

COMMITTENTE:



ALTA  
SORVEGLIANZA:



GENERAL CONTRACTOR:



**INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE  
OBIETTIVO N. 443/01**

**LINEA AV/AC TORINO – VENEZIA      Tratta VERONA – PADOVA**  
**Lotto funzionale Verona – Bivio Vicenza**  
**PROGETTO ESECUTIVO**  
**PONTI E VIADOTTI**  
**PARTE GENERALE**  
**GENERALE**  
**Confronto su metodi di analisi per spalle fisse**

|   |  |                  |  |            |
|---|--|------------------|--|------------|
| GENERAL CONTRACTOR  |  | DIRETTORE LAVORI |  | SCALA<br>- |
| IL PROGETTISTA INTEGRATORE  | Conorzio<br><b>Iricav Due</b><br>ing. Paolo Carmona<br><br>Data: |                  |  |            |
| <br>Ing. Giovanni MALAVENDA<br>iscritto all'ordine degli<br>ingegneri di Venezia n. 4289<br>Data: | <br>Data:  |                  |  |            |

|          |       |      |      |           |                  |        |      |               |
|----------|-------|------|------|-----------|------------------|--------|------|---------------|
| COMMESSA | LOTTO | FASE | ENTE | TIPO DOC. | OPERA/DISCIPLINA | PROGR. | REV. | FOGLIO        |
| IN17     | 10    | E    | I2   | CL        | VI0000           | 001    | A    | - - - P - - - |

|  |                            |      |
|--|----------------------------|------|
|  | VISTO CONSORZIO IRICAV DUE |      |
|  | Firma<br>                  | Data |

Progettazione:

| Rev. | Descrizione | Redatto     | Data       | Verificato   | Data       | Approvato   | Data       | IL PROGETTISTA              |
|------|-------------|-------------|------------|--------------|------------|-------------|------------|-----------------------------|
| A    | EMISSIONE   | A.Lambrughì | Marzo 2022 | P.A.Casalone | Marzo 2022 | G.Malavenda | Marzo 2022 | Ing. Giovanni MALAVENDA<br> |
|      |             |             |            |              |            |             |            |                             |

|                 |                      |                                  |
|-----------------|----------------------|----------------------------------|
| CIG. 8377957CD1 | CUP: J41E91000000009 | File: IN1710E12CLVI0000001A.DOCX |
|                 |                      | Cod. origine:                    |





Progetto cofinanziato  
dalla Unione Europea

|   |  |                        |                                       |          |
|---|--|------------------------|---------------------------------------|----------|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  |                        |                                       |          |
|   | <p>Progetto</p> <p>IN17</p>  | <p>Lotto</p> <p>10</p> | <p>Codifica</p> <p>EI2CLVI0000001</p> | <p>A</p> |

## INDICE

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | INTRODUZIONE E SCOPO .....  | 2  |
| 2   | CASO DI STUDIO .....  | 2  |
| 3   | CONFRONTO TRA MODELLI STRUTTURALI PE E ANALISI NUMERICHE 3D AL CONTINUO ..... | 4  |
| 3.1 | Modello ad Elementi Finiti 3D .....   | 4  |
| 3.2 | Richiami ai modelli strutturali adottati nel PE .....                         | 7  |
| 3.3 | Risultati .....   | 8  |
| 4   | CONFRONTO TRA APPROCCIO PSEUDO-STATICO E ANALISI SISMICHE AL PASSO .....      | 11 |
| 4.1 | Modello ad Elementi Finiti 2D .....   | 11 |
| 4.2 | Validazione delle analisi di risposta sismica locale .....                    | 14 |
| 4.3 | Risultati .....   | 16 |
| 5   | CONCLUSIONI .....   | 19 |
|     | RIFERIMENTI .....   | 20 |

|   |  |             |                            |   |
|---|--|-------------|----------------------------|---|
| GENERAL CONTRACTOR<br> | ALTA SORVEGLIANZA<br> |             |                            |   |
|   | Progetto<br>IN17   | Lotto<br>10 | Codifica<br>EI2CLVI0000001 | A |

## 1 INTRODUZIONE E SCOPO

Nell'ambito dell'istruttoria al Progetto Esecutivo del primo Lotto Funzionale di Iricav2, è emerso un commento relativo all'adeguatezza dei metodi di analisi sismica utilizzati per le spalle fisse.

In particolare, nel Progetto Esecutivo, in conformità a quanto fatto nel Progetto Definitivo approvato, è stato utilizzato un approccio pseudo-statico con forze di inerzia calcolate sulla base del valore dell'accelerazione massima al suolo. Questo approccio è permesso dalla normativa per i casi di spalle fisse per le quali si può assumere che si muovano con il suolo. Per gli altri casi, in assenza di un'analisi di interazione, la normativa richiede che l'analisi sia eseguita con riferimento all'accelerazione letta in corrispondenza del "plateau" dello spettro, seguita dall'applicazione del fattore di struttura.

In questa relazione si presentano i risultati di una serie di analisi interazione, utili a valutare l'adeguatezza in termini di margini di sicurezza dell'approccio pseudo-statico adottato nel Progetto Esecutivo e confermare quindi le valutazioni effettuate dai progetti in sede di progetto definitivo.

Lo studio è articolato in due fasi. In una prima fase viene presentato il confronto tra i modelli strutturali usati nel Progetto Esecutivo e metodi di analisi numerica tridimensionale, maggiormente rappresentativi del reale comportamento della spalla. Nella seconda fase l'attenzione è posta sul metodo di analisi sismica e in particolare sui limiti ed i risultati delle analisi pseudo-statiche rispetto ad analisi dinamiche più realistiche, nel dominio del tempo.

## 2 CASO DI STUDIO

La spalla selezionata per lo studio è la spalla fissa (Spalla A) del Viadotto Rio Guà (VI10), posizionata alla progressiva 183+778.803 (asse appoggi).

Questa spalla è stata selezionata per la sua altezza, che risulta essere tra le maggiori dell'intero Lotto 1 e quindi potenzialmente più cedevole rispetto a tutte le altre spalle fisse di questo progetto e nelle condizioni di amplificare al massimo le sollecitazioni dinamiche. Evidentemente i risultati che si troveranno per questa spalla varranno qualitativamente a maggior ragione per spalle di altezza inferiore.

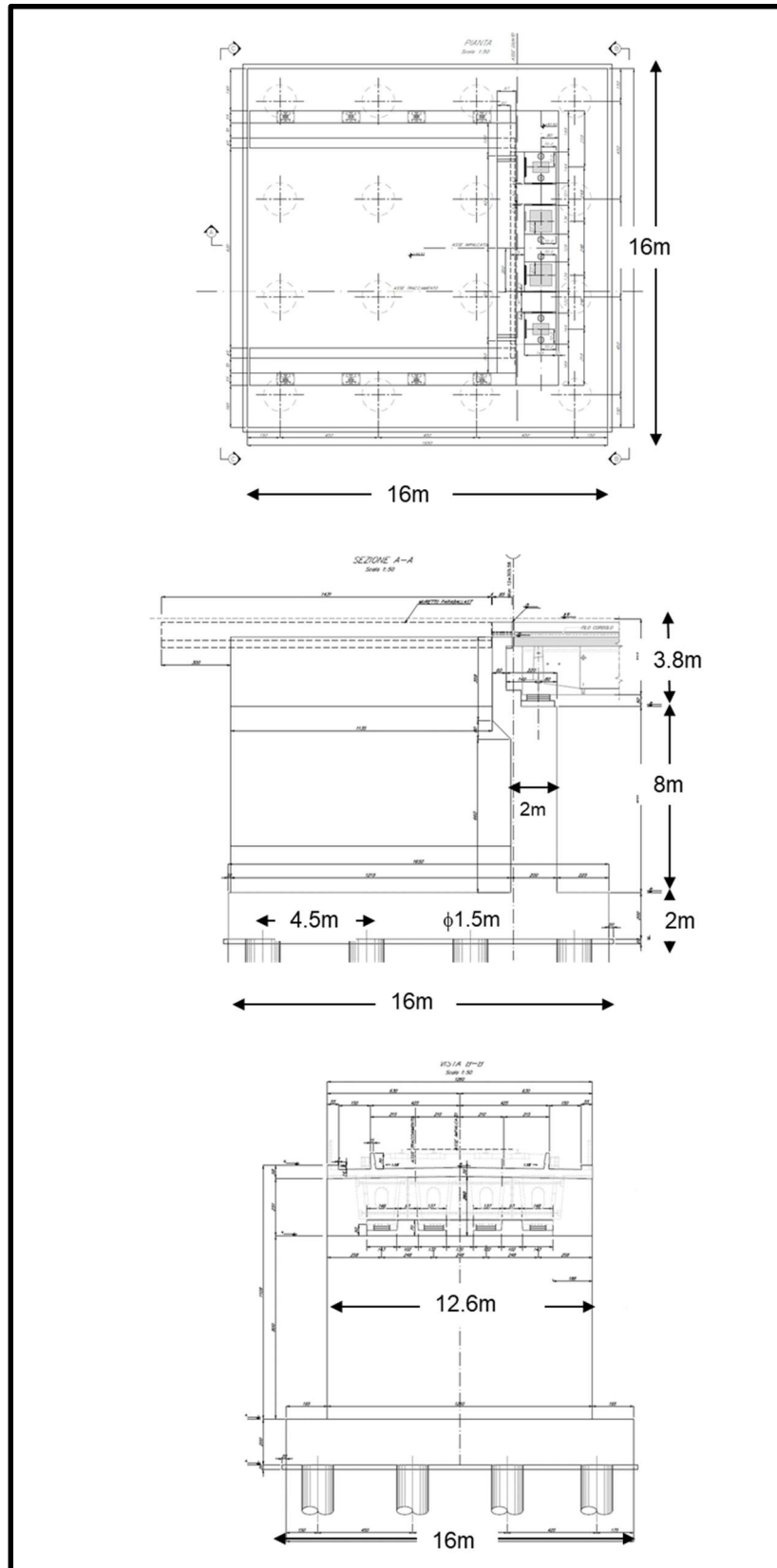


Figura 1 – Estratto geometria spalla VI10A

|   |   |                     |                                    |          |
|---|---|---------------------|------------------------------------|----------|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  |                     |                                    |          |
|   | <p>Progetto<br/>IN17</p>  | <p>Lotto<br/>10</p> | <p>Codifica<br/>EI2CLVI0000001</p> | <p>A</p> |

### 3 CONFRONTO TRA MODELLI STRUTTURALI PE E ANALISI NUMERICHE 3D AL CONTINUO

#### 3.1 MODELLO AD ELEMENTI FINITI 3D

Il modello ad Elementi Finiti 3D ha utilizzato una griglia di calcolo di dimensioni 100m×100m×100m (esclusa l'altezza del rilevato e della spalla), formata da 131972 nodi e 87822 elementi (Figura 2). Gli elementi utilizzati per la modellazione del terreno sono elementi tetraedrici continui a 10 nodi. Le strutture (muri frontale e paraghiaia della spalla, muri andatori, platea di fondazione, impalcato) sono state modellate con elementi strutturali bidimensionali a piastra (Figura 3). I pali di fondazione sono stati simulati con elementi "embedded beams".

Le analisi sono state eseguite mediante il software di calcolo Plaxis3D (versione 21.01.00.479).

L'impalcato è incernierato su un lato al muro frontale della spalla per simulare la condizione di vincolo fisso. L'altro lato è semplicemente appoggiato per simulare l'appoggio sulla pila P1.

Il modello è vincolato orizzontalmente lungo i suoi bordi verticali e vincolato verticalmente alla base.

La stratigrafia è stata assunta orizzontale con spessori degli strati in linea con quelli proposti nella Relazione Geotecnica di Progetto Esecutivo [1].

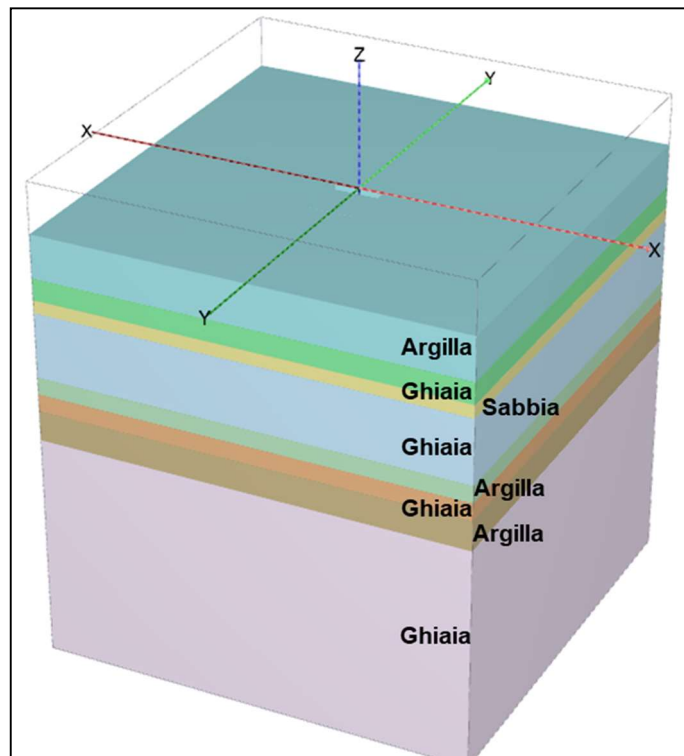




Figura 2 – Modello del terreno per analisi 3D ad Elementi Finiti

|   |  |  |       |               |   |
|---|--|--|-------|---------------|---|
| GENERAL CONTRACTOR<br> |  | ALTA SORVEGLIANZA<br> |       |               |   |
|   |  | Progetto   | Lotto | Codifica      |   |
|   |  | IN17   | 10    | EI2CLVI000001 | A |

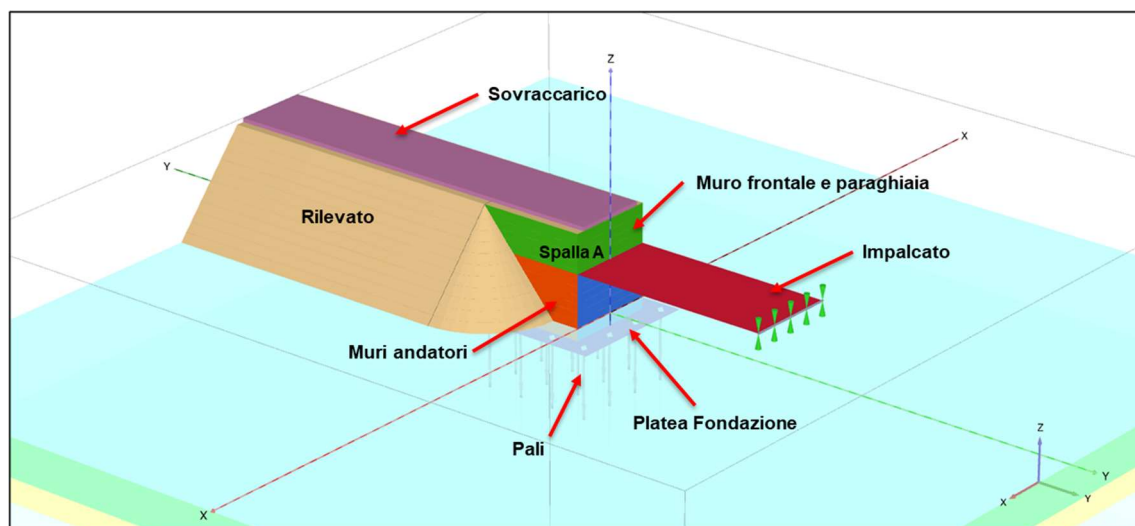


Figura 3 – Modello 3D ad Elementi Finiti del caso di studio

Il modello costitutivo del terreno è del tipo “Hardening Soil Small-Strain”. Per i valori dei parametri geotecnici è stato fatto riferimento alla caratterizzazione presentata nella Relazione Geotecnica. Per i parametri relativi alle piccole e piccolissime deformazioni (ad esempio  $G_0$  e curve di degradazione), è stato fatto riferimento ai valori delle velocità di propagazione delle onde di taglio [1] e alle curve di degradazione utilizzate nel Progetto Esecutivo per le analisi di risposta sismica locale [2]. In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** è riportata una sintesi dei parametri adottati per i terreni.

Tabella 1 – Parametri geotecnici.

| Stratigrafia |            |       |         | $\gamma$ | $G_0$ | $E_o$ | $E_{50,ref}$ | $E_{edo,ref}$ | $E_{ur,ref}$ | $c_u$ | $c'$ | $\phi'$ |
|--------------|------------|-------|---------|----------|-------|-------|--------------|---------------|--------------|-------|------|---------|
| Da (m)       | A (m)      | h (m) | Descr.  | MPa      | MPa   | MPa   | MPa          | MPa           | MPa          | kPa   | kPa  | °       |
| 0            | 10         | 10    | Argilla | 18.5     | 29    | 79    | 15           | 15            | 45           | 50    | 5    | 25      |
| 10           | 15         | 5     | Ghiaia  | 19.0     | 171   | 437   | 80           | 80            | 240          | -     | 0    | 38      |
| 15           | 18         | 3     | Sabbia  | 19.0     | 96    | 247   | 50           | 50            | 150          | -     | 0    | 37      |
| 18           | 33         | 15    | Ghiaia  | 19.0     | 233   | 595   | 140          | 140           | 420          | -     | 0    | 38      |
| 33           | 37         | 4     | Argilla | 18.5     | 42    | 114   | 25           | 25            | 75           | 80    | 5    | 25      |
| 37           | 41         | 4     | Ghiaia  | 19.0     | 304   | 777   | 200          | 200           | 600          | -     | 0    | 38      |
| 41           | 48         | 7     | Argilla | 18.5     | 74    | 202   | 40           | 40            | 120          | 150   | 5    | 25      |
| 48           | <b>100</b> | 52    | Ghiaia  | 19.0     | 385   | 966   | 240          | 240           | 720          | -     | 0    | 41      |

Il livello di falda è stato assunto coincidente con il piano campagna.

|   |  |                        |                                      |          |
|---|--|------------------------|--------------------------------------|----------|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  |                        |                                      |          |
|   | <p>Progetto</p> <p>IN17</p>  | <p>Lotto</p> <p>10</p> | <p>Codifica</p> <p>EI2CLVI000001</p> | <p>A</p> |

Le azioni sismiche sono state simulate mediante approccio pseudo-statico, con parametri sismici in linea con il Progetto Esecutivo. In questo studio è stata applicata la sola componente orizzontale longitudinale (le forze verticali e orizzontali fuori piano sono state escluse dallo studio). Le forze di inerzia sono state quindi calcolate utilizzando il valore dell'accelerazione orizzontale al suolo, ottenuta dall'approccio semplificato di normativa e pari a 0.295g. Il coefficiente  $\beta$  è stato assunto pari all'unità.

Le forze di inerzia sono state calcolate e applicate alle seguenti parti del modello: impalcato, muro frontale e paraghiaia, muri andatori, platea di fondazione e terreno di riempimento. Queste forze sono rappresentate graficamente in Figura 4, dove per semplicità non è mostrata la forza d'inerzia sul terreno di riempimento.

La spinta sismica del terreno a tergo della spalla è stata calcolata mediante la teoria di Mononobe-Okabe. Il valore di spinta sismica in eccesso rispetto al valore statico è stato poi applicato al modello mediante un carico distribuito uniforme.

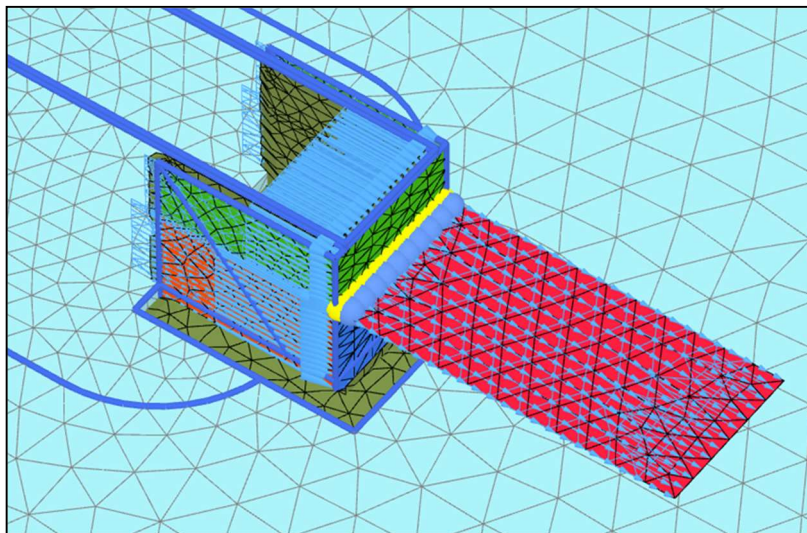


Figura 4 – Modello 3D ad EF – Azioni di inerzia pseudo-statiche (per maggiore chiarezza non sono rappresentate le forze relative al riempimento di terreno a tergo della spalla e la “sovraspinta” sismica prodotta dal rilevato).

|   |   |                     |                                    |          |
|---|---|---------------------|------------------------------------|----------|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  |                     |                                    |          |
|   | <p>Progetto<br/>IN17</p>  | <p>Lotto<br/>10</p> | <p>Codifica<br/>EI2CLVI0000001</p> | <p>A</p> |

### 3.2 RICHIAMI AI MODELLI STRUTTURALI ADOTTATI NEL PE

Il confronto presentato nel seguito con le sollecitazioni del Progetto Esecutivo è stato per semplicità limitato ai soli pali di fondazione. Il modello del Progetto Esecutivo si basa su una semplificazione del gruppo di pali di fondazione e include oltre i pali il collegamento con un plinto di fondazione rigido. Uno schema semplificato di questo modello è mostrato in Figura 5. L'interazione tra palo e terreno è stata modellata nel Progetto Esecutivo mediante molle lineari (modello tipo Matlock-Reese). Il modello non tiene in considerazione l'interazione tra il plinto di fondazione e il terreno.

La terna dei carichi (azione assiale, carico orizzontale e momento flettente) è applicata in corrispondenza della sommità del plinto.

Per un confronto più accurato con i risultati della modellazione numerica, il Progettista ha fornito un aggiornamento dei carichi del Progetto Esecutivo escludendo le componenti verticale e fuori piano delle forze di inerzia.

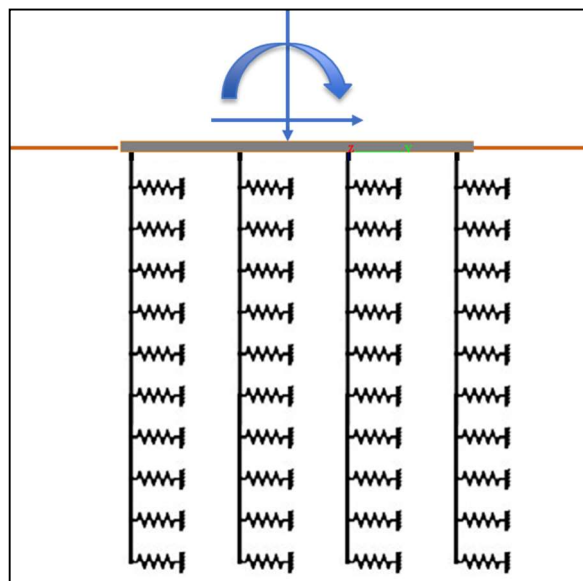




Figura 5 – Schema semplificato dei modelli adottati nel PE per i gruppi di pali di fondazione



|   |  |                     |                                   |          |
|---|--|---------------------|-----------------------------------|----------|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  |                     |                                   |          |
|   | <p>Progetto<br/>IN17</p>   | <p>Lotto<br/>10</p> | <p>Codifica<br/>EI2CLVI000001</p> | <p>A</p> |

### 3.3 RISULTATI

Nel seguito da Figura 6 a Figura 11 sono riportati i confronti tra i risultati dei modelli strutturali del Progetto Esecutivo e la modellazione tridimensionale ad Elementi Finiti. In particolare, le figure mostrano i valori di azione assiale, taglio e momento flettente relativi alle fasi statica (fine costruzione) e sismica. Per semplicità il confronto è limitato alle sollecitazioni calcolate a testa palo.

Dal confronto si osserva una generale riduzione delle sollecitazioni calcolate dall'analisi numerica tridimensionale rispetto ai modelli del Progetto Esecutivo. Tra le cause principali di queste riduzioni rientra sicuramente il contributo di resistenza offerto dal plinto di fondazione e la sua interazione con il terreno, che può essere tenuto in considerazione dall'analisi numerica ma è interamente trascurato dal modello strutturale del gruppo di pali.

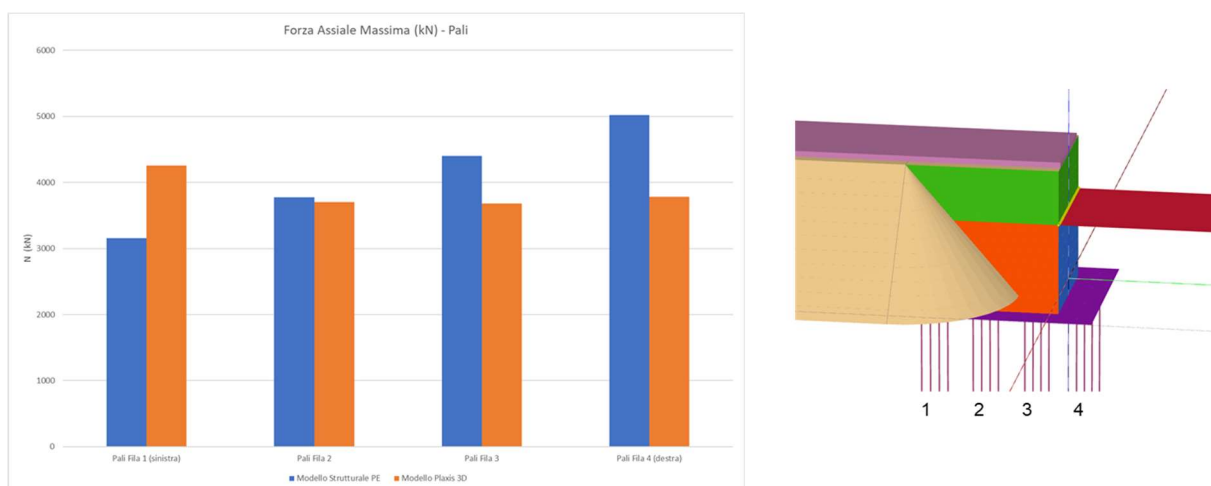


Figura 6 – Confronto tra modelli PE e analisi 3D EF – Pali – Fase statica – Azione assiale

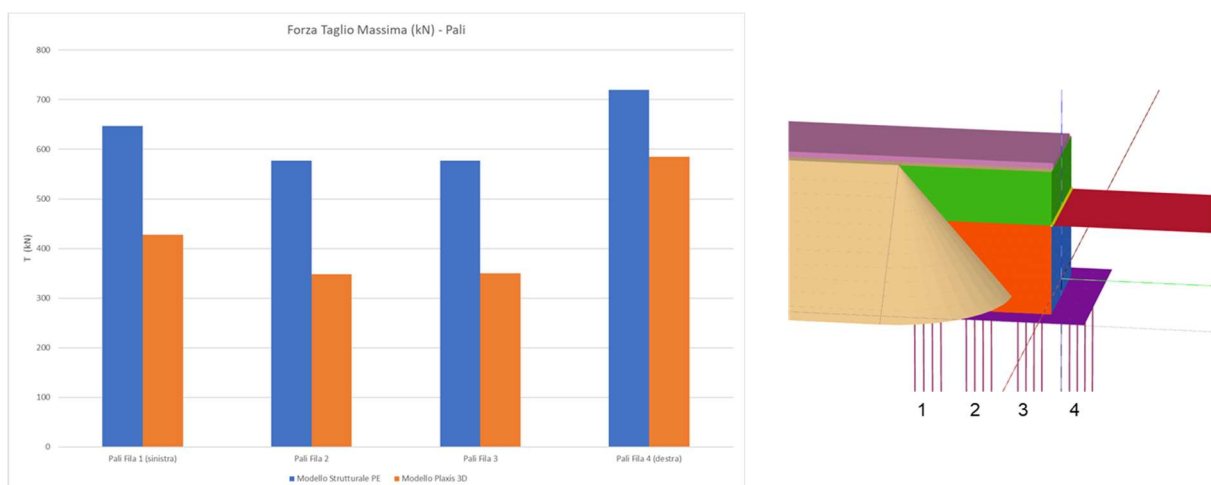


Figura 7 – Confronto tra modelli PE e analisi 3D EF – Pali – Fase statica – Taglio

|  |          |       |               |   |
|--|----------|-------|---------------|---|
|  | Progetto | Lotto | Codifica      |   |
|  | IN17     | 10    | EI2CLVI000001 | A |

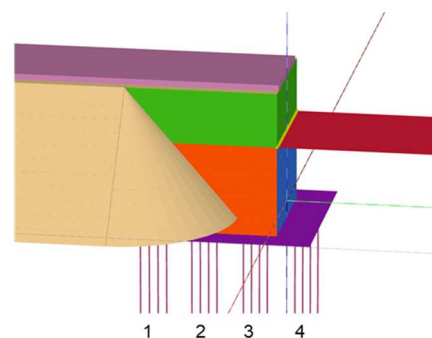
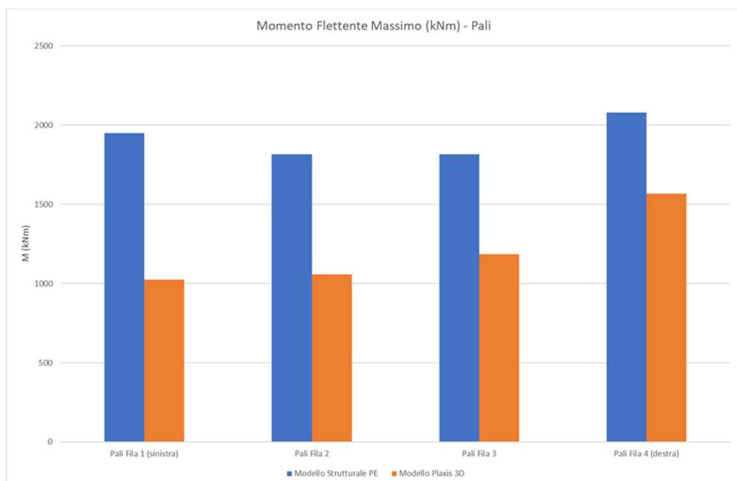


Figura 8 – Confronto tra modelli PE e analisi 3D EF – Pali – Fase statica – Momento flettente

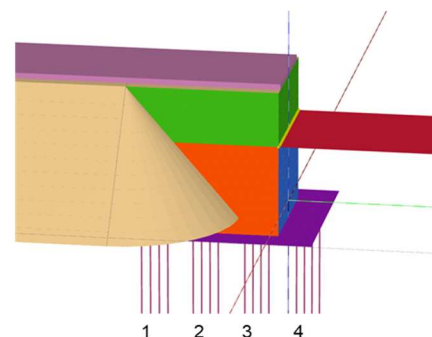
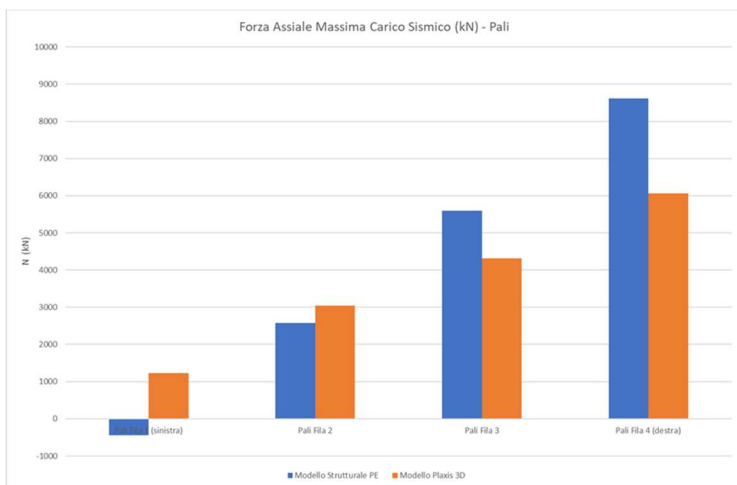


Figura 9 – Confronto tra modelli PE e analisi 3D EF – Pali – Fase pseudo-statica – Azione assiale

|  |          |       |               |   |
|--|----------|-------|---------------|---|
|  | Progetto | Lotto | Codifica      |   |
|  | IN17     | 10    | EI2CLVI000001 | A |

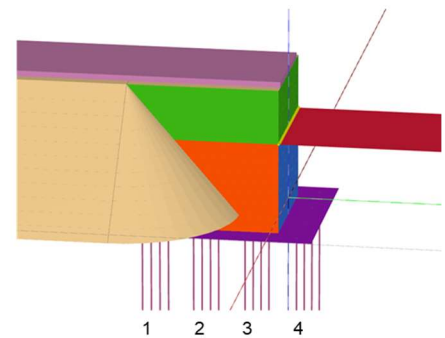
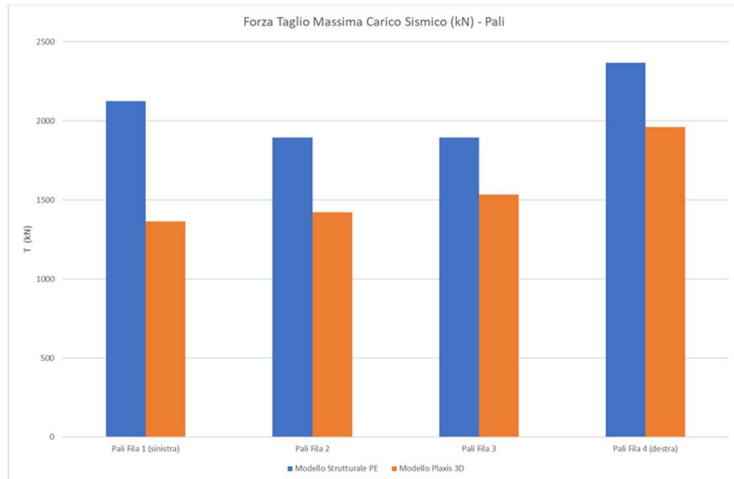


Figura 10 – Confronto tra modelli PE e analisi 3D EF – Pali – Fase pseudo-statica – Taglio

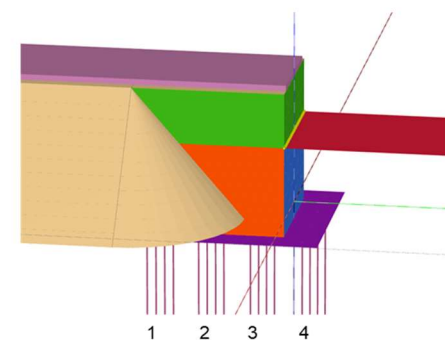
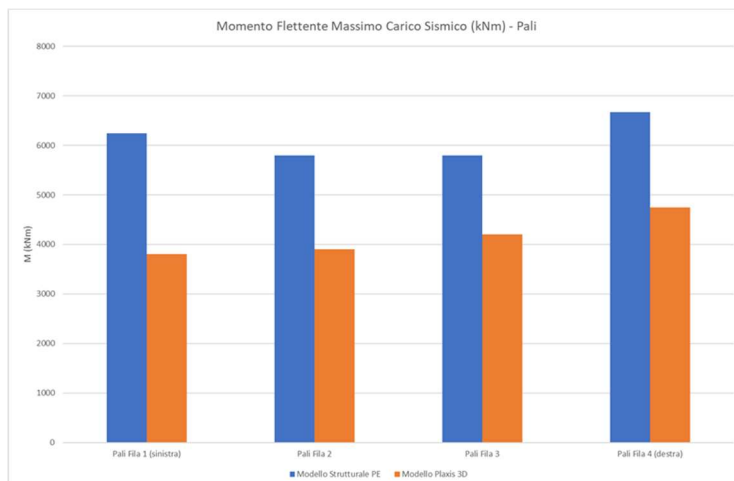




Figura 11 – Confronto tra modelli PE e analisi 3D EF – Pali – Fase pseudo-statica – Momento flettente

|   |  |             |                            |   |
|---|--|-------------|----------------------------|---|
| GENERAL CONTRACTOR<br> | ALTA SORVEGLIANZA<br> |             |                            |   |
|   | Progetto<br>IN17   | Lotto<br>10 | Codifica<br>EI2CLVI0000001 | A |

## 4 CONFRONTO TRA APPROCCIO PSEUDO-STATICO E ANALISI SISMICHE AL PASSO

### 4.1 MODELLO AD ELEMENTI FINITI 2D

Il modello ad Elementi Finiti 2D ha utilizzato una griglia di calcolo di dimensioni 400m (larghezza)×100m (altezza, esclusa l'altezza del rilevato e della spalla), formata da 208156 nodi e 25665 elementi (Figura 12). La maggiore larghezza di questo modello rispetto al caso tridimensionale è richiesta dalle analisi dinamiche nel dominio nel tempo e alla necessità di imporre adeguate condizioni “free-field” lungo i contorni verticali del modello. Gli elementi utilizzati per la modellazione del terreno sono elementi triangolari continui a 15 nodi.

Le analisi sono state eseguite mediante il software di calcolo Plaxis2D (versione 21.01.00.479).

Le strutture (muri frontale e paraghiaia della spalla, muri andatori, platea di fondazione, impalcato) sono state modellate con elementi strutturali monodimensionali (Figura 13).

I pali di fondazione sono stati simulati con elementi “embedded beams”. Per questi modelli è stata richiesta una fase di calibrazione delle rigidità delle interfacce, mediante confronto con soluzioni tridimensionali.

Anche per il modello bidimensionale l'impalcato è incernierato su un lato al muro frontale della spalla per simulare la condizione di vincolo fisso. L'altro lato è semplicemente appoggiato per simulare l'appoggio sulla pila P1.

Nelle fasi statiche e per l'analisi pseudo-statica il modello è vincolato orizzontalmente lungo i suoi bordi verticali e vincolato verticalmente alla base.

Nelle analisi dinamiche eseguite nel dominio del tempo (analisi al passo), alla base del modello è applicata una condizione “compliant base”, che consiste nell'applicazione di forze dipendenti dall'input sismico. Lungo i bordi verticali sono imposte condizioni del tipo “free-field”, che consistono in colonne verticali monodimensionali in grado di simulare il movimento free-field del terreno e scambiare forze con i bordi verticali del modello. Per entrambe le condizioni non vengono quindi imposti spostamenti e questo per evitare la riflessione delle onde incidenti.

Per la stratigrafia del terreno e i parametri del terreno vale quanto già riportato per il modello tridimensionale.

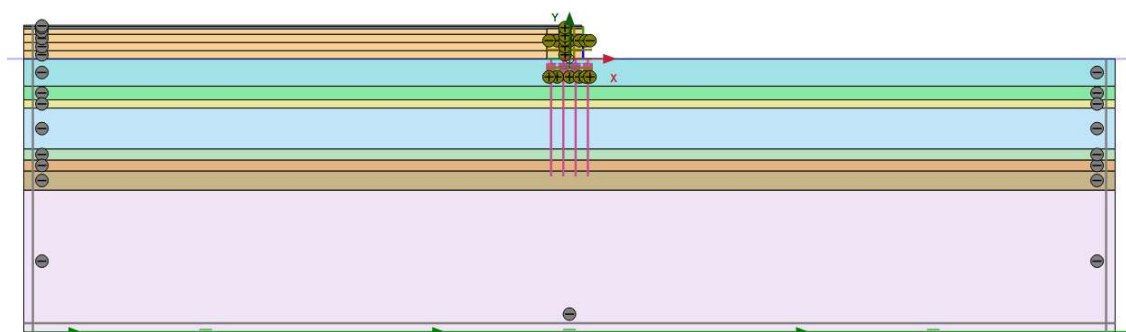



Figura 12 – Modello 2D ad Elementi Finiti del caso di studio (larghezza modello = 400m, altezza = 100m escluso il rilevato).

|   |   |                     |                                   |          |
|---|---|---------------------|-----------------------------------|----------|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  |                     |                                   |          |
|   | <p>Progetto<br/>IN17</p>  | <p>Lotto<br/>10</p> | <p>Codifica<br/>EI2CLVI000001</p> | <p>A</p> |

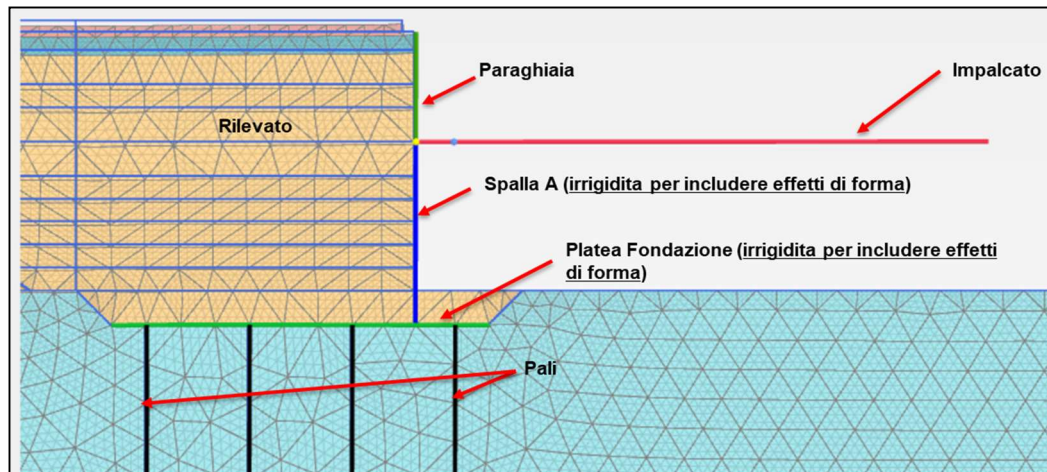


Figura 13 – Modello 2D ad Elementi Finiti del caso di studio – Dettaglio.

Per le forze inerziali applicate nell'analisi pseudo-statica vale in generale quanto detto per il modello tridimensionale. Una rappresentazione schematica delle stesse forze per il caso bidimensionale è mostrata in Figura 14.

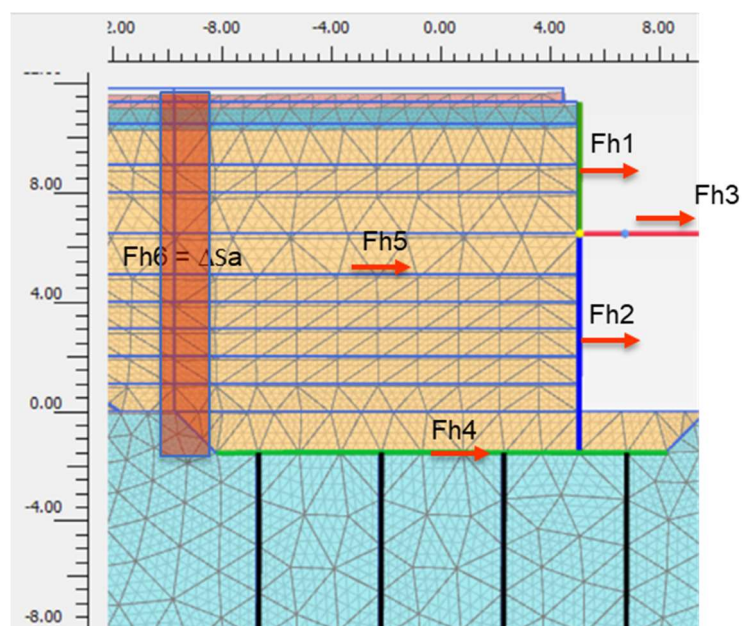






Figura 14 – Modello 2D ad Elementi Finiti del caso di studio – Azioni inerziali per analisi pseudo-statica.

|   |   |                        |                                       |          |
|---|---|------------------------|---------------------------------------|----------|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  |                        |                                       |          |
|   | <p>Progetto</p> <p>IN17</p>   | <p>Lotto</p> <p>10</p> | <p>Codifica</p> <p>EI2CLVI0000001</p> | <p>A</p> |

Gli accelerogrammi di input per le analisi dinamiche al passo sono gli stessi utilizzati nel Progetto Esecutivo per le analisi di risposta sismica locale [2]. Nel Progetto Esecutivo le registrazioni erano già state corrette nel dominio delle frequenze e scalate al valore di velocità di picco. La lista dei sette accelerogrammi è riportata in Tabella 2.

*Tabella 2 – Accelerogrammi per analisi sismiche al passo [1].*

| ID registrazione | Terremoto       | Data       | Nome Stazione           | M <sub>w</sub> | R <sub>epi</sub> (km) | Meccanismo di faglia | Classe sito NTC2018 |
|------------------|-----------------|------------|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
| Greece2016       | Grecia 2016     | 15/10/2016 | Saranda Seismic Station | 5.5            | 55.4                  | TF                   | A                   |
| ICCastelE        | Italia Centrale | 26/10/2016 | Castelluccio di Norcia  | 5.9            | 10.8                  | NF                   | A                   |
| ICCastelN        | Italia Centrale | 26/10/2016 | Castelluccio di Norcia  | 5.9            | 10.8                  | NF                   | A                   |
| MontemE          | Italia Centrale | 30/10/2016 | Montemonaco             | 6.5            | 19.2                  | NF                   | A                   |
| MontemN          | Italia Centrale | 30/10/2016 | Montemonaco             | 6.5            | 19.2                  | NF                   | A                   |
| Norcia           | Italia Centrale | 26/10/2016 | Norcia                  | 5.9            | 13.2                  | NF                   | B                   |
| Mirando          | Emilia-Romagna  | 29/05/2012 | Mirandola               | 6.0            | 5.1                   | TF                   | C                   |

|   |  |             |                           |   |
|---|--|-------------|---------------------------|---|
| GENERAL CONTRACTOR<br> | ALTA SORVEGLIANZA<br> |             |                           |   |
|   | Progetto<br>IN17   | Lotto<br>10 | Codifica<br>EI2CLVI000001 | A |



#### 4.2 VALIDAZIONE DELLE ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

Le analisi nel dominio del tempo della risposta delle strutture sono state precedute da una fase di validazione della risposta dinamica del modello, mediante confronto con analisi di risposta sismica locale eseguite con modelli lineari equivalenti.

A questo scopo è stato eseguito un confronto con l'analisi di risposta sismica locale del Progetto Esecutivo per il tratto S7. Questo tratto è il più prossimo alla posizione della spalla VI10A. Il confronto tra lo spettro di risposta calcolato dall'analisi numerica al passo e quello calcolato dal Progettista con un modello lineare equivalente è mostrato in Figura 15 per uno degli accelerogrammi (MontemonacoN), dal quale si nota un buon accordo generale tra le due soluzioni. Nella stessa figura è riportato per confronto anche lo spettro di normativa.

Tabella 3 – Stratigrafia considerata risposta sismica locale per il tratto S7 (Progetto Esecutivo)

| Da (m) | A (m)      | Vs (m/s) |
|--------|------------|----------|
| 0.0    | 2.5        | 260      |
| 2.5    | 2.5        | 260      |
| 5.0    | 2.5        | 220      |
| 7.5    | 2.5        | 220      |
| 10.0   | 2.5        | 210      |
| 12.5   | 1.5        | 210      |
| 14.0   | 2.5        | 225      |
| 16.5   | 2.5        | 230      |
| 19.0   | 2.5        | 230      |
| 21.5   | 3.5        | 260      |
| 25.0   | 2.5        | 260      |
| 27.5   | 2.5        | 260      |
| 30.0   | 2.5        | 260      |
| 32.5   | 2.5        | 260      |
| 35.0   | 2.5        | 320      |
| 37.5   | 12.5       | 320      |
| 50.0   | 30         | 550      |
| 80.0   | 20         | 550      |
| 100.0  | Half-Space | 800      |

|   |  |                     |                                   |          |
|---|--|---------------------|-----------------------------------|----------|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  |                     |                                   |          |
|   | <p>Progetto<br/>IN17</p>   | <p>Lotto<br/>10</p> | <p>Codifica<br/>EI2CLVI000001</p> | <p>A</p> |

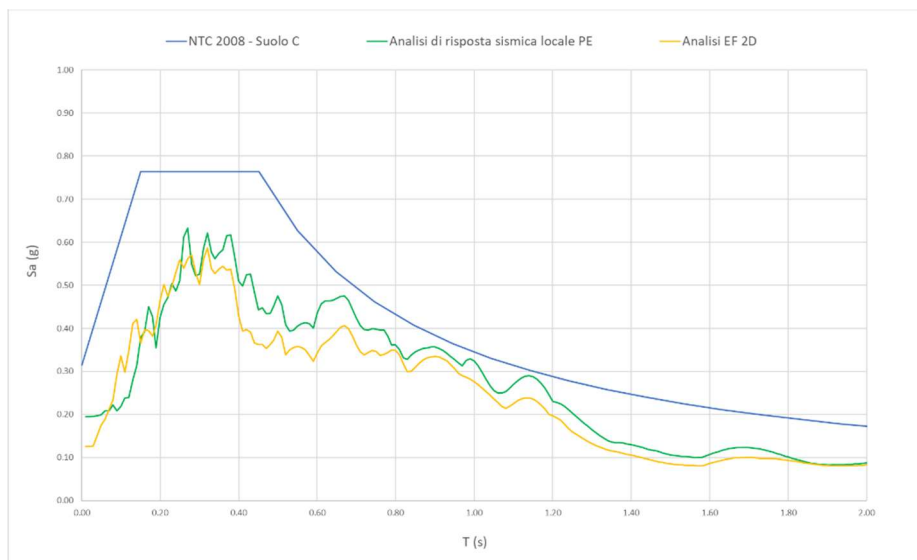



Figura 15 – Tratto S7 – Confronto tra analisi risposta sismica locale da modello EF 2D e risultati PE [1].

La validazione è stata estesa quindi anche al sito della spalla e alla relativa stratigrafia locale, mediante l'implementazione indipendente di un modello lineare equivalente. Il confronto tra i due approcci (modello lineare equivalente e modellazione numerica al passo) è riportato in Figura 16. Anche in questo caso si nota in generale un buon accordo tra le due soluzioni.

Tabella 4 – Stratigrafia considerata risposta sismica locale per la Spalla A VI10A (verifica indipendente)

| Da (m) | A (m)      | Vs (m/s) |
|--------|------------|----------|
| 0      | 10         | 100      |
| 10     | 5          | 300      |
| 15     | 3          | 225      |
| 18     | 15         | 350      |
| 33     | 4          | 150      |
| 37     | 4          | 400      |
| 41     | 7          | 200      |
| 48     | 52         | 450      |
| 100    | Half-Space | 800      |



|   |   |                     |                                   |          |
|---|---|---------------------|-----------------------------------|----------|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  |                     |                                   |          |
|   | <p>Progetto<br/>IN17</p>  | <p>Lotto<br/>10</p> | <p>Codifica<br/>EI2CLVI000001</p> | <p>A</p> |

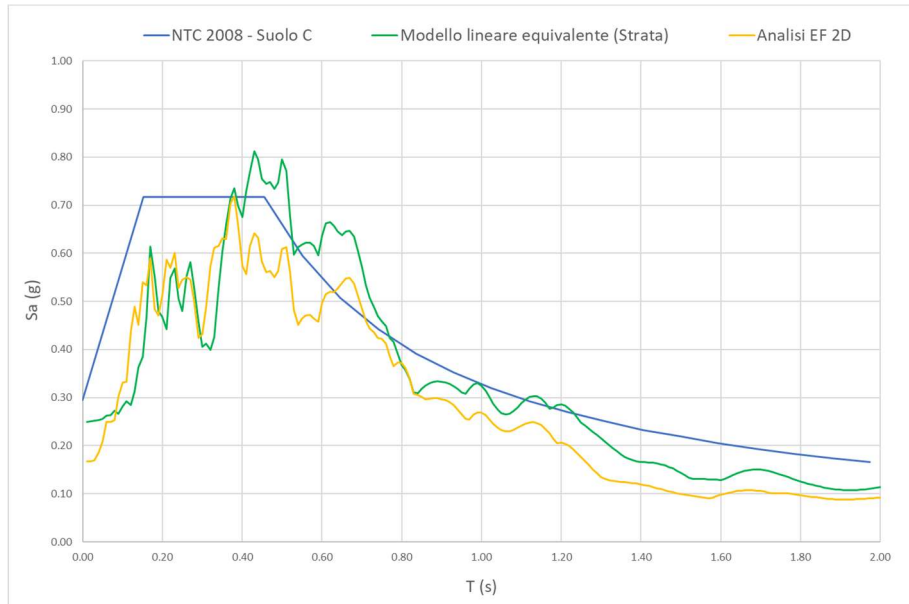
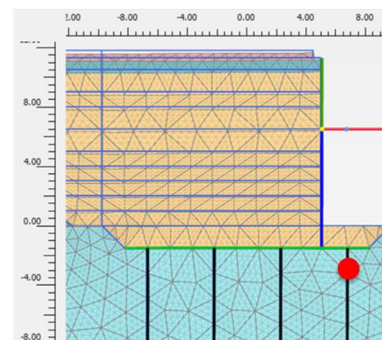
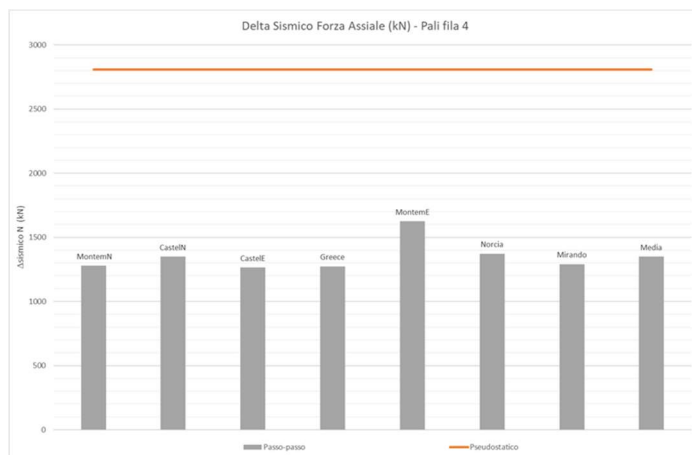


Figura 16 – Sito spalla VI10A – Confronto tra analisi risposta sismica locale da modello EF 2D e modello Strata.

### 4.3 RISULTATI

Il confronto tra i risultati dell'analisi pseudo-statica e quelle delle analisi al passo è riportato da Figura 17 a Figura 22, per i pali di fondazione, il muro frontale della spalla e l'impalcato. Oltre ai risultati delle singole analisi al passo è riportato anche il valore medio delle sollecitazioni calcolate dai sette accelerogrammi.

Le azioni interne calcolate dalle analisi al passo mostrano una sensibile riduzione rispetto a quelle ottenute dall'analisi pseudo-statica. Tra le cause principali all'origine di queste riduzioni rientrano sicuramente la minore accelerazione al suolo calcolata dalle analisi al passo rispetto all'approccio pseudo-statico e la non contemporaneità delle forze di inerzia, che è invece assunta implicitamente dall'analisi pseudostatica.



|   |   |                     |                                   |          |
|---|---|---------------------|-----------------------------------|----------|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  |                     |                                   |          |
|   | <p>Progetto<br/>IN17</p>  | <p>Lotto<br/>10</p> | <p>Codifica<br/>EI2CLVI000001</p> | <p>A</p> |

Figura 17 – Confronto tra analisi pseudo-statica e al passo – Pali (fila lato valle) – Incremento di sollecitazione da fase statica a fase sismica – Azione assiale.

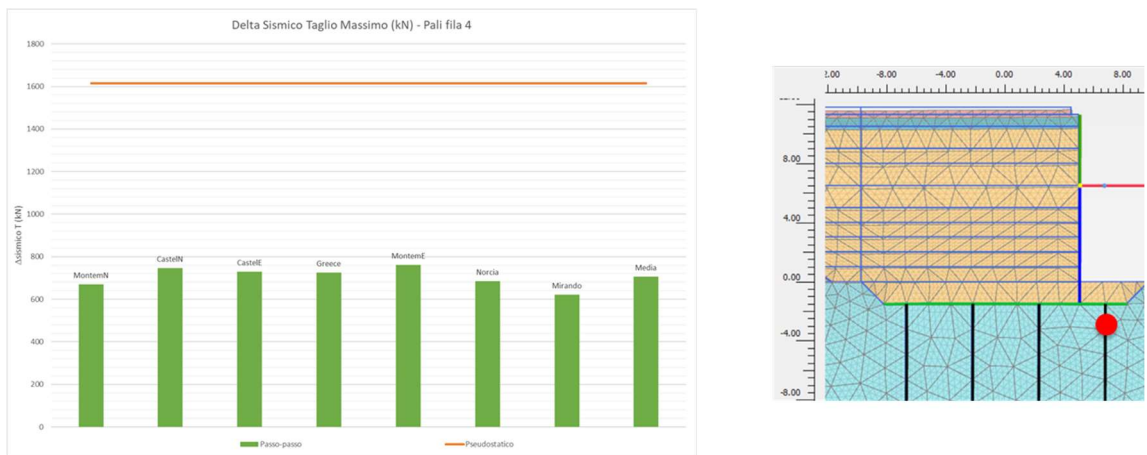


Figura 18 – Confronto tra analisi pseudo-statica e al passo – Pali (fila lato valle) – Incremento di sollecitazione da fase statica a fase sismica – Taglio.

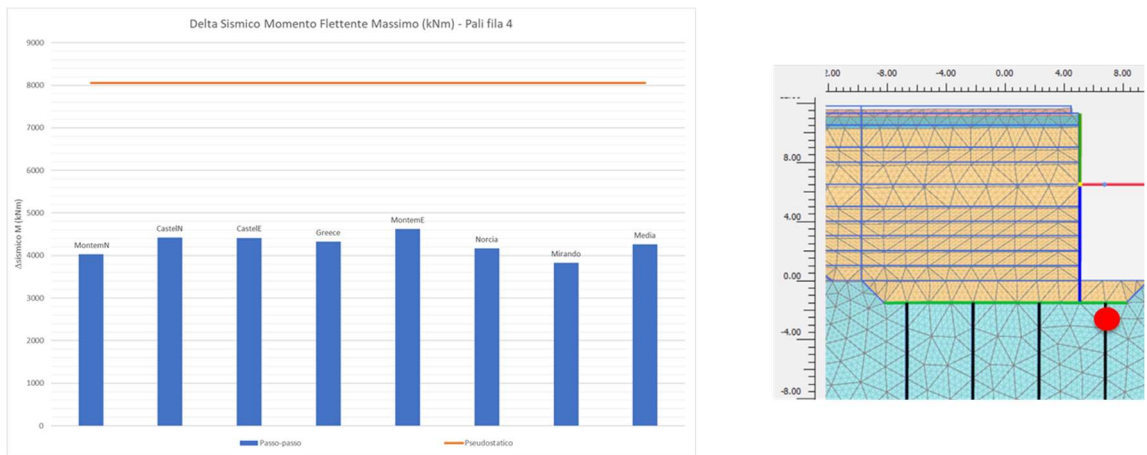


Figura 19 – Confronto tra analisi pseudo-statica e al passo – Pali (fila lato valle) – Incremento di sollecitazione da fase statica a fase sismica – Momento flettente.

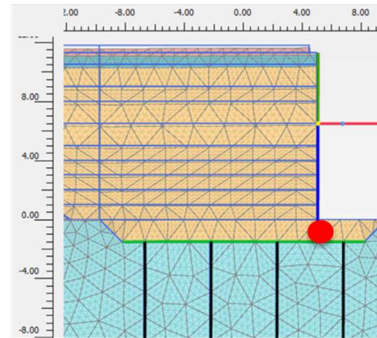
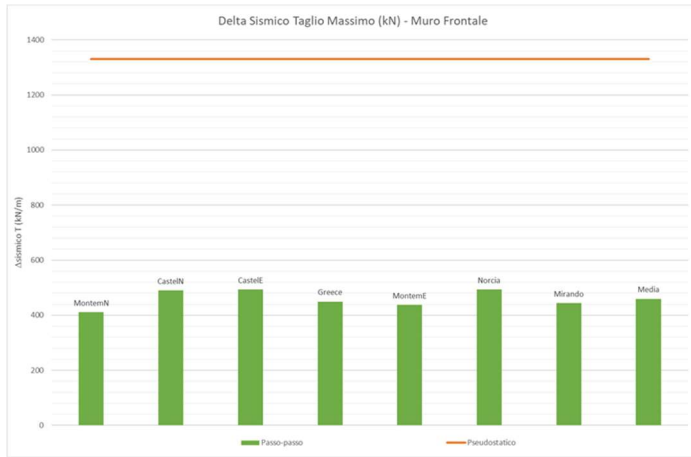


Figura 20 – Confronto tra analisi pseudo-statica e al passo – Muro frontale – Incremento di sollecitazione da fase statica a fase sismica – Taglio.

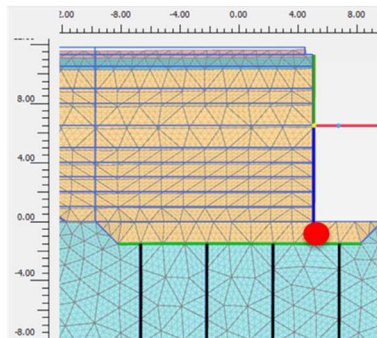
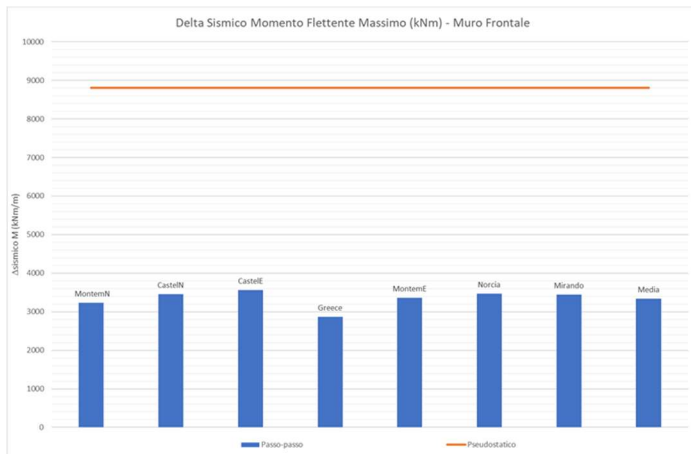


Figura 21 – Confronto tra analisi pseudo-statica e al passo – Muro frontale – Incremento di sollecitazione da fase statica a fase sismica – Momento flettente.

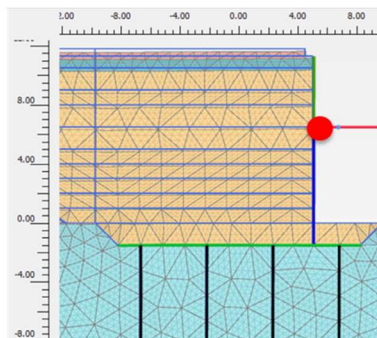
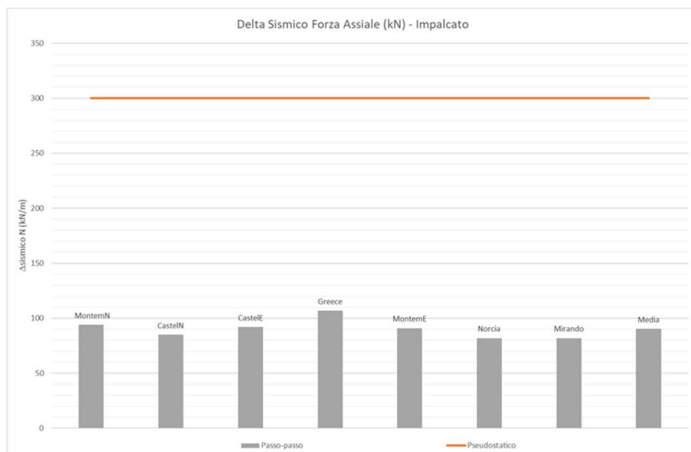




Figura 22 – Confronto tra analisi pseudo-statica e al passo – Impalcato (punto fisso) – Incremento di sollecitazione da fase statica a fase sismica – Azione assiale.

|   |   |             |                            |   |
|---|---|-------------|----------------------------|---|
| GENERAL CONTRACTOR<br> | ALTA SORVEGLIANZA<br> |             |                            |   |
|   | Progetto<br>IN17  | Lotto<br>10 | Codifica<br>EI2CLVI0000001 | A |

## 5 CONCLUSIONI

Passando dai modelli di calcolo di tipo strutturale utilizzati nel Progetto Esecutivo ad analisi numeriche più realistiche si è osservata in generale una riduzione dei valori delle azioni interne.



Nella prima fase di studio sono stati confrontati i risultati dei modelli strutturali con analisi ad elementi finiti tridimensionali, in grado di simulare la sequenza di fasi di costruzione del rilevato. La riduzione delle azioni interne è chiara sia per la condizione statica (al termine della costruzione), sia per la fase sismica, simulata in queste analisi mediante un approccio pseudo-statico coerente con quello adottato nel Progetto Esecutivo (forze d'inerzia determinate considerando un'accelerazione pari ad  $a_g \times S$ ). Facendo per esempio riferimento ai pali di fondazione, in termini medi le riduzioni osservate passando dai modelli strutturali alle analisi numeriche sono dell'ordine del 20%. Le riduzioni delle azioni interne nei pali sono causate principalmente dall'interazione tra il plinto di fondazione e il terreno, che non può essere inclusa nei modelli di Progetto Esecutivo.

Nella seconda fase di studio sono stati eseguiti dei confronti nel campo bidimensionale tra l'approccio pseudo-statico e le analisi sismiche nel dominio del tempo (analisi al passo). Utilizzando gli stessi input sismici adottati nel Progetto Esecutivo per le analisi di risposta sismica locale è stata calcolata la risposta della struttura per i sette accelerogrammi di progetto. Le azioni interne calcolate mediante le analisi al passo mostrano una sensibile riduzione rispetto a quelle ottenute dall'approccio pseudo-statico. In termini medi questa riduzione si attesta intorno al 50%. Le cause principali di queste riduzioni sono la minore accelerazione al suolo calcolata dalle analisi al passo rispetto all'approccio pseudo-statico e la non contemporaneità delle forze di inerzia.

Le due fasi di studio hanno permesso una stima quantitativa preliminare dei margini di sicurezza associati alla metodologia di calcolo del Progetto Esecutivo. Riduzioni pari ad almeno il 50% sarebbero da attendersi se la pratica progettuale potesse adottare modellazioni numeriche più realistiche, rispetto ai modelli strutturali comunemente utilizzati. Ovviamente la percentuale di riduzione risulterebbe ancora superiore se le forze di inerzia venissero calcolate in corrispondenza del "plateau" dello spettro di normativa.

Riduzioni di questo ordine mostrano che l'approccio pseudo-statico del Progetto Esecutivo è adeguato al caso in esame e notevolmente a favore di sicurezza. La stessa conclusione può essere estesa in generale alle analisi con spettro di risposta in tutto l'intervallo dei periodi tipici delle spalle fisse di viadotti e quindi anche ai viadotti i cui periodi ricadono nel plateau dello spettro.

Si può quindi concludere che le sollecitazioni utilizzate per la verifica attraverso l'adozione dell'accelerazione di picco al suolo, metodo utilizzato sia nel PD approvato, sia nel PE, sono largamente cautelative rispetto alle sollecitazioni derivanti da un'analisi di interazione terreno/struttura e dall'applicazione di accelerogrammi reali.

|   |  |             |                            |   |
|---|--|-------------|----------------------------|---|
| GENERAL CONTRACTOR<br> | ALTA SORVEGLIANZA<br> |             |                            |   |
|   | Progetto<br>IN17   | Lotto<br>10 | Codifica<br>EI2CLVI0000001 | A |

## RIFERIMENTI

- [1] Consorzio Iricav2 – Progetto Esecutivo – Viadotti e Ponti – Viadotto Rio Guà dal km L.S. 183+770,70 al km L.S. 183+920,70 – Generale – Relazione Geotecnica - IN1711EI2RBVI10A0001A – Aprile 2021.
- [2] Consorzio Iricav2 – Progetto Esecutivo – Generale – Geologia e Geotecnica – Generale – Risposta sismica locale. Allegato alle relazioni sulla modellazione sismica del sito e pericolosità sismica di base (IN1710EI2RHGE0000005B e IN1710EI2RHGE0000006B) – Doc. nr. IN1710EI2RHGE0000009A\_01 – Luglio 2021.