

**POLITECNICO DI TORINO**

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica - DISEG

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



Tesi di Laurea Magistrale

**Valutazione dell'influenza della quota di invaso sulla  
risposta sismica di una diga in materiale sciolto**

**Relatore:**

Prof. Sebastiano Foti

**Correlatore:**

Prof. Renato Maria Cosentini

**Correlatore:**

Prof. Domenico Lombardi

**Candidato:**

Davide Pupi

Anno Accademico 2019/20



# Indice

Indice delle Figure.....	iii
Indice delle Tabelle.....	viii
Sommario.....	1
1 Introduzione generale.....	2
1.1 Dighe.....	2
1.1.1 Studi e aspetti fondamentali riguardanti le dighe.....	4
1.2 Caso studio.....	6
1.2.1 Introduzione.....	6
1.2.2 Geologia del bacino.....	7
1.2.3 Diga di Poggio Cancelli.....	9
2 Rischio sismico.....	10
2.1 Pericolosità sismica.....	11
2.1.1 Approccio deterministico per la valutazione della pericolosità sismica.....	11
2.1.2 Approccio probabilistico per la valutazione della pericolosità sismica.....	16
2.1.3 Pericolosità sismica del territorio italiano.....	19
2.2 Esposizione.....	20
2.3 Vulnerabilità.....	21
2.3.1 Vulnerabilità dighe in materiali sciolti approccio di “livello 0”.....	22
3 Modellazione numerica.....	26
3.1 Geometria.....	27
3.2 Elemento.....	29
3.3 Legami costitutivi.....	31
3.3.1 PressureIndependMultiYield.....	31
3.3.2 PressureDependMultiYield02.....	34
3.4 Condizioni al contorno.....	38
3.4.1 Free-Field columns.....	38
3.4.2 Lysmer-Kuhlemeyer dashpot.....	39
3.4.3 Verifica dashpot.....	40
3.4.4 Vincoli alla base del modello.....	41
3.4.5 Superficie piezometrica e livello di invaso.....	42
3.5 Validazione modello dimensionale.....	44

4	Risultati.....	46
4.1	Risposta del modello con diversi livelli di invaso .....	47
4.1.1	Sisma 1 .....	49
4.1.2	Sisma 2.....	57
4.1.3	Sisma 3.....	65
4.1.4	Sisma 4.....	73
4.1.5	Sisma 5.....	81
4.2	Risposta del modello con diversi sismi .....	89
4.2.1	Livello di invaso nullo .....	89
4.2.2	Livello di invaso pari a 7 m.....	94
4.2.3	Livello di invaso pari a 14 m .....	99
4.2.4	Livello di invaso pari a 24 m .....	104
4.2.5	Livello di invaso pari a 27.5 m .....	109
	Conclusioni .....	114
	Bibliografia .....	116
	Sitografia.....	118

## Indice delle Figure

Figura 2.1: Rischio sismico sul territorio italiano (Foti, 2017).....	10
Figura 2.2: Potenziali sorgenti per terremoti $M > 5.5$ , ( <a href="http://diss.rm.ingv.it/">http://diss.rm.ingv.it/</a> ) .....	12
Figura 2.3: Zone sismogenetiche – ZS9 (Meletti e Valensise, 2004).....	12
Figura 2.4: Legge di Gutenberg-Richter (Foti, 2017).....	13
Figura 2.5: Distanza tra le varie sorgenti ed il punto di interesse (Foti, 2017).....	14
Figura 2.6: Esempio di curva di attenuazione (Fukushima e Tanaka,1991) .....	15
Figura 2.7: Scelta del terremoto di controllo (Foti, 2017).....	15
Figura 2.8: Probabilità condizionata del parametro $Y$ (Foti, 2017) .....	18
Figura 2.9: Pericolosità sismica di base del territorio italiano (INGV, 2004).....	19
Figura 2.10: Densità di popolazione o attività produttive sul territorio italiano (Foti, 2017) .....	20
Figura 2.11: Vulnerabilità del costruito sul territorio italiano (Foti, 2017) .....	21
Figura 2.12: Fuso per verifica a liquefazione per terreni con $U_c < 3.5$ (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2018).....	23
Figura 2.13: Fuso per verifica a liquefazione per terreni con $U_c > 3.5$ (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2018).....	24
Figura 3.1: Geometria della diga di Poggio Cancelli .....	27
Figura 3.2: Vista del modello in GiD .....	28
Figura 3.3: Nine_Four_Node_QuadUP element (OpenSees Wiki: <a href="https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Nine_Four_Node_Quad_u-p_Element">https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Nine_Four_Node_Quad_u-p_Element</a> )	29
Figura 3.4: legame costitutivo Pressure Independen MultiYield (OpenSees Wiki: <a href="https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureIndependMultiYield_Material">https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureIndependMultiYield_Material</a> ) ..	31
Figura 3.5: legame costitutivo Pressure Depend MultiYield (OpenSees Wiki: <a href="https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureDependMultiYield02_Material">https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureDependMultiYield02_Material</a> )	34
Figura 3.6: Free-field column .....	38
Figura 3.7: Sintassi comando equalDOF.....	38
Figura 3.8: Definizione del Lysmer-Kuhlemeyer dashpot in Opensees .....	39
Figura 3.9: Confronto tra gli spettri calcolati per i due modelli .....	40
Figura 3.10: Confronto tra le accelerazioni misurate nei due modelli.....	41
Figura 3.11: Esempio di calcolo della falda nel modello .....	42
Figura 3.12: Modello esportato in AutoCAD .....	42
Figura 3.13: Esempio di come sono stati vincolati i nodi sopra la superficie piezometrica	43
Figura 4.1: Rappresentazione schematica del modello .....	46
Figura 4.2 Spostamento nodo sinistro .....	49
Figura 4.3: Spostamento nodo centrale .....	49
Figura 4.4: Spostamento nodo destro .....	50
Figura 4.5: Spostamento orizzontale nodo sinistro .....	50
Figura 4.6: Spostamento orizzontale nodo centrale.....	51
Figura 4.7: Spostamento orizzontale nodo destro .....	51
Figura 4.8: Spostamento verticale nodo sinistro .....	52
Figura 4.9: Spostamento verticale nodo centrale.....	52
Figura 4.10: Spostamento verticale nodo destro .....	53
Figura 4.11: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello d'invaso nullo..	53

Figura 4.12: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello d'invaso pari a 7 m.....	54
Figura 4.13: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello d'invaso pari a 14 m.....	54
Figura 4.14: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello d'invaso pari a 24 m.....	54
Figura 4.15: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello d'invaso pari a 27.5 m.....	55
Figura 4.16: Vettori di spostamento associati ad un livello di invaso nullo .....	55
Figura 4.17: Valori di spostamento associati ad un livello di invaso di 7 m.....	55
Figura 4.18: Vettori di spostamento associati ad un livello di invaso pari a 14 m.....	56
Figura 4.19: Vettori spostamento associato ad un livello di invaso pari a 24 m.....	56
Figura 4.20: Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 27.5 m.....	56
Figura 4.21: Spostamento nodo sinistro .....	57
Figura 4.22: Spostamento nodo centrale .....	57
Figura 4.23: Spostamento nodo destro .....	58
Figura 4.24: Spostamento orizzontale nodo sinistro .....	58
Figura 4.25: Spostamento orizzontale nodo centrale.....	59
Figura 4.26: Spostamento orizzontale nodo destro .....	59
Figura 4.27: Spostamento verticale nodo sinistro .....	60
Figura 4.28: Spostamento verticale nodo centrale .....	60
Figura 4.29: Spostamento verticale nodo destro .....	61
Figura 4.30: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso nullo	61
Figura 4.31: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 7 m.....	62
Figura 4.32: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 14 m .....	62
Figura 4.33: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 24 m .....	62
Figura 4.34: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 27.5 m.....	63
Figura 4.35: Vettori spostamento associati ad un livello di invaso nullo.....	63
Figura 4.36: Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 7 m.....	63
Figura 4.37: Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 14 m.....	64
Figura 4.38: Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 24 m.....	64
Figura 4.39: Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 27.5 m.....	64
Figura 4.40: Spostamento nodo sinistro .....	65
Figura 4.41: Spostamento nodo centrale .....	65
Figura 4.42: Spostamento nodo destro .....	66
Figura 4.43: Spostamento orizzontale nodo sinistro .....	66
Figura 4.44: Spostamento orizzontale nodo centrale.....	67
Figura 4.45: Spostamento orizzontale nodo destro .....	67
Figura 4.46: Spostamento verticale nodo sinistro .....	68
Figura 4.47: Spostamento verticale nodo centrale .....	68
Figura 4.48: Spostamento verticale nodo destro .....	69
Figura 4.49: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso nullo	69

Figura 4.50: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 7 m.....	70
Figura 4.51: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 14 m .....	70
Figura 4.52: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 24 m .....	70
Figura 4.53: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 27.5 m .....	71
Figura 4.54: Vettori spostamento associato ad un livello di invaso nullo.....	71
Figura 4.55: Vettori spostamento associato ad un livello di invaso pari a 7 m.....	71
Figura 4.56: Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari 14 m .....	72
Figura 4.57: Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 24 m .....	72
Figura 4.58: Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 27.5 m .....	72
Figura 4.59: Spostamento nodo sinistro .....	73
Figura 4.60: Spostamento nodo centrale .....	73
Figura 4.61: Spostamento nodo destro .....	74
Figura 4.62: Spostamento orizzontale nodo sinistro .....	74
Figura 4.63: Spostamento orizzontale nodo centrale.....	75
Figura 4.64: Spostamenti orizzontali nodo destro .....	75
Figura 4.65: Spostamento verticale nodo sinistro .....	76
Figura 4.66: Spostamento verticale nodo centrale .....	76
Figura 4.67: Spostamento verticale nodo destro .....	77
Figura 4.68: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso nullo	77
Figura 4.69: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 7 m.....	78
Figura 4.70: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 14 m .....	78
Figura 4.71: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 24 m .....	78
Figura 4.72: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 27.5 m .....	79
Figura 4.73: Vettori spostamento associati ad un livello di invaso nullo.....	79
Figura 4.74: Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 7 m .....	79
Figura 4.75: Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 14 m .....	80
Figura 4.76: Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 24 m .....	80
Figura 4.77: Vettori spostamento associato ad un livello di invaso pari a 27.5m .....	80
Figura 4.78: Spostamento nodo sinistro .....	81
Figura 4.79: Spostamento nodo centrale .....	81
Figura 4.80: Spostamento nodo destro .....	82
Figura 4.81: Spostamento orizzontale nodo sinistro .....	82
Figura 4.82: Spostamento orizzontale nodo centrale.....	83
Figura 4.83: Spostamento orizzontale nodo destro .....	83
Figura 4.84: Spostamento verticale nodo sinistro .....	84
Figura 4.85: Spostamento verticale nodo centrale .....	84
Figura 4.86: Spostamento verticale nodo destro .....	85
Figura 4.87: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso nullo	85

Figura 4.88: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 7 m.....	86
Figura 4.89: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 14 m .....	86
Figura 4.90: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 24 m .....	86
Figura 4.91: Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 27.5 m .....	87
Figura 4.92: Vettori spostamento associato ad un livello di invaso nullo.....	87
Figura 4.93: Vettori spostamento associato ad un livello di invaso pari a 7 m.....	87
Figura 4.94: Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 14 m.....	88
Figura 4.95: Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 24 m.....	88
Figura 4.96: Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 27.5 m.....	88
Figura 4.97: Spostamento nodo sinistro .....	89
Figura 4.98: Spostamento nodo centrale .....	89
Figura 4.99: Spostamento nodo destro .....	90
Figura 4.100: Spostamenti orizzontali nodo sinistro .....	90
Figura 4.101: Spostamenti orizzontali nodo centrale.....	91
Figura 4.102: Spostamenti orizzontali nodo destro .....	91
Figura 4.103: Spostamenti verticali nodo sinistro .....	92
Figura 4.104: Spostamenti verticali nodo centrale .....	92
Figura 4.105: Spostamenti verticali nodo destro .....	93
Figura 4.106: Spostamento nodo sinistro.....	94
Figura 4.107: Spostamento nodo centrale.....	94
Figura 4.108: Spostamento nodo destro.....	95
Figura 4.109: Spostamento orizzontale nodo sinistro .....	95
Figura 4.110: Spostamento orizzontale nodo centrale .....	96
Figura 4.111: Spostamento orizzontale nodo destro .....	96
Figura 4.112: Spostamento verticale nodo sinistro .....	97
Figura 4.113: Spostamento verticale nodo centrale .....	97
Figura 4.114: Spostamento verticale nodo destro .....	98
Figura 4.115: Spostamento nodo sinistro.....	99
Figura 4.116: Spostamento nodo centrale.....	99
Figura 4.117: Spostamento nodo destro.....	100
Figura 4.118: Spostamento orizzontale nodo sinistro .....	100
Figura 4.119: Spostamento orizzontale nodo centrale .....	101
Figura 4.120: Spostamento orizzontale nodo destro .....	101
Figura 4.121: Spostamento verticale nodo sinistro .....	102
Figura 4.122: Spostamento verticale nodo centrale .....	102
Figura 4.123: Spostamento verticale nodo destro .....	103
Figura 4.124: Spostamento nodo sinistro.....	104
Figura 4.125: Spostamento nodo centrale.....	104
Figura 4.126: Spostamento nodo destro.....	105
Figura 4.127: Spostamento orizzontale nodo sinistro .....	105
Figura 4.128: Spostamento orizzontale nodo centrale .....	106
Figura 4.129: Spostamento orizzontale nodo destro .....	106

Figura 4.130: Spostamento verticale nodo sinistro .....	107
Figura 4.131: Spostamento verticale nodo centrale .....	107
Figura 4.132: Spostamento verticale nodo destro .....	108
Figura 4.133: Spostamento nodo sinistro .....	109
Figura 4.134: Spostamento nodo centrale .....	109
Figura 4.135: Spostamento nodo destro .....	110
Figura 4.136: Spostamento orizzontale nodo sinistro .....	110
Figura 4.137: Spostamento orizzontale nodo centrale .....	111
Figura 4.138: Spostamento orizzontale nodo destro .....	111
Figura 4.139: Spostamento verticale nodo sinistro .....	112
Figura 4.140: Spostamento verticale nodo centrale .....	112
Figura 4.141: Spostamento verticale nodo destro .....	113

## Indice delle Tabele

Tabella 2.1: Punteggio a seconda della condizione del rilevato (Frigo, Chiaia, Foti, Fantilli, De Biagi, 2015) .....	25
Tabella 3.1: Modello geometrico della diga di Poggio Cancelli.....	28
Tabella 3.2: Parametri Nine_Four_Node_QuadUP element (OpenSees Wiki: <a href="https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Nine_Four_Node_Quad_u-p_Element">https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Nine_Four_Node_Quad_u-p_Element</a> )	30
Tabella 3.3: Parametri Pressure Independ MultiYield (OpenSees Wiki: <a href="https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureIndependMultiYield_Material">https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureIndependMultiYield_Material</a> ) ..	32
Tabella 3.4: Parametri consigliati al variare del tipo di argilla (OpenSees Wiki: <a href="https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureIndependMultiYield_Material">https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureIndependMultiYield_Material</a> ) ..	33
Tabella 3.5: Parametri Pressure Depend MultiYield02 (OpenSees Wiki: <a href="https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureDependMultiYield02_Material">https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureDependMultiYield02_Material</a> )	36
Tabella 3.6: Parametri consigliati al variare del tipo di sabbia (OpenSees Wiki: <a href="https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureDependMultiYield02_Material">https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureDependMultiYield02_Material</a> )	37
Tabella 3.7: Proprietà dei materiali .....	44
Tabella 3.8: Confronto in termini di accelerazione in superficie .....	44
Tabella 3.9: Confronto in termini di spettro di risposta.....	45
Tabella 4.1: Tabella contenete parametri dei differenti sismi .....	47
Tabella 4.2: Valori finali del vettore spostamento nei punti di controllo .....	48







## Sommario

La valutazione del rischio sismico riguardante le dighe in terra è una tematica di particolare interesse ingegneristico, in quanto tali opere ricoprono un ruolo socio-economico molto importante per l'irrigazione e la produzione di energia idroelettrica, inoltre un possibile crollo può portare a conseguenze catastrofiche, con un elevato numero di vittime.

Da esperienze pregresse di eventi sismici avvenuti in tutto il mondo si è potuto osservare un'ottima risposta di queste opere ai vari terremoti. Gli sporadici casi di crollo verificatisi, hanno riguardato per lo più dighe in terra realizzate mediante la tecnica per sedimentazione idraulica in cui la sollecitazione dinamica indotta dal sisma ha portato ad una perdita di resistenza a taglio del materiale con conseguente crollo.

Una pratica comune che viene utilizzata quando si verificano eventi sismici è quella di ridurre il volume del livello dell'acqua del serbatoio mediante lo svuotamento tramite scarichi di superficie o di fondo, che probabilmente riduce il rischio sismico e migliora le prestazioni della diga.

Il presente lavoro di tesi ha come oggetto lo studio dell'effetto che il livello dell'acqua in concomitanza di un evento sismico esercita sull'opera di sbarramento, potendo così valutare se ad una diminuzione del livello invasato corrisponda anche una diminuzione del rischio sismico.

Il caso studio scelto è la diga in terra di Poggio Cancelli, ubicata nella zona nord-ovest del lago di Campotosto, a circa 1 km di distanza dall'omonimo paese, soggetta all'intensa sequenza sismica iniziata il 24 agosto 2016 e conclusasi il 18 gennaio 2017, che ha colpito il centro Italia.

Per lo studio di tale diga è stato realizzato un modello numerico agli elementi finiti mediante il framework Opensees, sviluppato dall'università di Berkeley. Il pre- e post- processor GiD è stato utilizzato come interfaccia grafica per creare la geometria del modello e visualizzare i risultati.

I risultati delle analisi agli elementi finiti sono stati confrontati tra loro per valutare l'influenza della quota d'invaso sulla risposta sismica della diga.

# 1 Introduzione generale

## 1.1 Dighe

Le dighe possono essere suddivise in due principali categorie, le dighe in materiali sciolti e le dighe a gravità o ad arco.

La prima categoria riguarda le dighe in materiali sciolti, le quali vengono realizzate con materiali di provenienza geologica in grado di mantenere le proprie caratteristiche inalterate nel tempo. Esse possono essere suddivise a loro volta in:

- dighe a sezione omogenea;
- dighe zonate con nucleo impermeabile di argilla;
- dighe con diaframma;
- dighe a scogliera;

Per quanto riguarda le dighe in materiali sciolti di tipo zonate, tre sono le parti principali che la costituiscono:

- nucleo impermeabile, evita che l'acqua attraversi il corpo della diga per cui in esso è realizzato con materiali caratterizzati da bassa permeabilità e non solubili. La posa in opera del terreno avviene mediante la compattazione in strati successivi con rulli vibranti o a piedi costipanti con spessore degli strati di circa 30 cm. È pertanto necessario che il terreno scelto sia anche facilmente compattabile;
- rinfianchi, necessari alla stabilità dell'intera opera e ad evitare l'erosione, per cui essi sono realizzati con materiale di pezzatura grossolana. La posa in opera avviene per strati di spessore fino a 2 metri e che successivamente vengono compattati; in tal modo si riesce ad ottenere una bassa deformabilità ed un'alta resistenza;
- filtri e dreni, realizzati con materiali che non devono né avere componenti fini né materiale alterabile. La granulometria del materiale scelto dovrà corrispondere a quelle specificate dalla normativa.

La seconda tipologia di dighe riguarda quelle realizzate in muratura, oppure in calcestruzzo. La loro geometria dipende dal sito in cui si desidera realizzare lo sbarramento e dal materiale con cui sono realizzate. Generalmente vengono suddivise in:

- dighe a gravità;
- dighe a contrafforti;
- dighe ad arco-gravità;
- dighe ad arco-cupola;
- dighe in vibrocemento;

La scelta tra queste due tipologie di sbarramento è legata al sito in cui si intende realizzare l'opera, per cui non è possibile definire una regola specifica. In generale la scelta dipende dal terreno di fondazione, infatti esso dovrà possedere delle caratteristiche meccaniche tali per cui le pressioni trasmesse dalla diga non generino delle superfici di rottura al suo interno tali da portare a fenomeni di instabilità; inoltre i cedimenti prodotti dovranno essere compatibili con quella della diga sovrastante, in modo da non comprometterne la stabilità.

Ecco dunque che, nel caso di terreni o rocce che mostrano un'elevata deformabilità, le dighe in materiali sciolti, grazie alle maggiori dimensioni ed alla loro maggiore deformabilità, riescono a trasferire pressioni minori al terreno ed a seguire l'andamento della deformata del terreno, cosa che invece potrebbe portare alla rottura le dighe in calcestruzzo che sotto questo punto di vista risultano molto più fragili; Nella scelta della tipologia di diga da realizzare si deve inoltre valutare attentamente l'opportunità di eventuali interventi di stabilizzazione della fondazione o opere di scavo per raggiungere materiali con qualità migliore in quanto i costi potrebbero risultare elevati. Risulta pertanto evidente che nel caso di fondazione costituita da rocce compatte, può risultare economicamente vantaggioso realizzare dighe in calcestruzzo.

Come specificato precedentemente, queste sono indicazioni di carattere del tutto generale, pertanto per ogni caso sarà necessario uno studio dettagliato del sito in modo che la scelta ricada sulla tipologia di opera più opportuna.

### 1.1.1 Studi e aspetti fondamentali riguardanti le dighe

Data la complessità di queste opere ed il loro impatto socio-economico, è fondamentale eseguire adeguate indagini geologiche e geotecniche del sito di interesse, in modo tale da conoscere tutti i fattori che condizionano la sicurezza dell'opera.

Queste indagini consentono di comprendere, oltre alle condizioni geologiche, anche quelle strutturali del bacino stesso, ed associando questi dati con quelli derivanti da uno studio idrogeologico è possibile conoscere la tenuta idraulica del bacino; questo è un aspetto fondamentale in quanto è direttamente correlato allo scopo finale a cui dovrà adempiere l'invaso. Dunque saranno presi in considerazione diversi livelli di tenuta idraulica in funzione delle necessità a cui deve assolvere l'opera da realizzare.

Altro studio da eseguire riguarda la filtrazione che può generarsi nelle sponde del bacino oppure nel terreno di fondazione, in quanto ad essa sono associate poi le forze di filtrazione, le sottopressioni ed i gradienti idraulici. È bene osservare che le forze di filtrazione possono essere dello stesso ordine di grandezza di quelle gravitazionali, ed in molti studi riguardanti crolli di dighe in terra si è visto che tali forze sono state determinanti per il collasso.

Nel caso in cui si generino gradienti idraulici elevati o sottopressioni non accettabili si dovranno predisporre dei trattamenti volti a ristabilire dei valori accettabili di questi ultimi. Possibili interventi per il controllo della filtrazione possono essere la realizzazione di diaframmi, iniezioni, oppure si può pensare di approfondire il nucleo della diga fino ad intercettare un ammasso roccioso di bassa permeabilità.

Ulteriori considerazioni riguardano la stabilità delle sponde del bacino, in quanto il riempimento del bacino crea una profonda modifica delle sue condizioni idrogeologiche. Una situazione molto pericolosa da tenere presente si verifica nel caso di svasso rapido del bacino ed in presenza di materiali con bassa permeabilità. In tale condizione il rapido decremento del livello dell'acqua riduce o annulla completamente la forza stabilizzante esercitata da quest'ultima sulle sponde del bacino ed, inoltre, data la bassa permeabilità dei materiali che costituiscono le sponde, le pressioni interstiziali non si dissipano velocemente. Ciò può generare una possibile instabilità delle sponde del bacino.

Nelle dighe in materiali sciolti sarà inoltre necessario anche uno studio approfondito dei materiali scelti per la sua costruzione, in quanto le caratteristiche dell'opera dipenderanno da questi ultimi ed andranno ad influenzare aspetti molto importanti quali ad esempio la filtrazione attraverso il corpo diga. Considerando i volumi in gioco, è indispensabile la

reperibilità del materiale nei pressi dell'area di realizzazione dell'opera. Bisogna in tal caso garantire adeguati requisiti di carattere operativo, quale la distanza operativa e la facilità di estrazione del materiale, la valutazione della qualità del materiale estratto e un il rispetto delle condizioni ambientali. Una campagna di indagine a tal fine è indispensabile per il reperimento del materiale che, nel rispetto delle condizioni predette, fornisca proprietà adeguate.

Nel caso in cui la diga in terra è costituita da materiali erodibili è necessario prestare molta attenzione al gradiente idraulico che si genera perché esso potrebbe far sì che si creino dei vuoti interni che minerebbero la stabilità dell'opera (tale fenomeno viene chiamato erosione interna). Le zone più soggette a tale fenomeno sono: quelle di contatto tra il terreno di fondazione e il corpo-diga, all'interno del terreno di fondazione e nei materiali che compongono il corpo della diga.

Nel caso in cui si verifici tale situazione sarà necessario ridurre il gradiente idraulico, al fine di ridurre le forze di filtrazione oppure si può procedere all'installazione di filtri e drenaggi.

## 1.2 Caso studio

### 1.2.1 Introduzione

Il lago artificiale di Campotosto, si trova in provincia dell'Aquila. Esso ha dapprima subito una fase di palude torbosa a causa dell'interrimento provocato dal trasporto solido degli affluenti, e successivamente è stato ripristinato attraverso sbarramenti artificiali.

L'invaso è contenuto da tre dighe: la diga ad arco di Rio Fucino, la diga in terra di Poggio Cancelli ed infine la diga di Sella Pedicate; inoltre è delimitato dalla sella naturale di Santa Maria degli Angeli.

La diga ad arco di Rio Fucino è situata sul corso d'acqua omonimo, affluente del fiume Vomano; la diga in terra di Poggio Cancelli è situata sul Rio Castellano, affluente del fiume Tronto; infine la diga di Sella Pedicate è situata in prossimità dell'omonima cresta.

Il serbatoio è stato realizzato in due fasi successive:

- la prima fase risale agli anni 1940-1951, ad opera della società "TERNI - Società per l'Industria e l'Elettricità";
- la seconda fase risale agli anni 1964-1971, ad opera dell'ENEL.

Durante la fase uno, le dighe sono state costruite con un'altezza tale da mantenere il massimo invaso alla quota 1312,50 m slm; successivamente, nella fase due, l'altezza delle dighe è stata incrementata per poter ottenere un invaso maggiore, raggiungendo quota 1325 m slm.

L'ENEL detiene l'autorizzazione al riempimento del lago per le seguenti quote di massima e minima regolazione: 1324,40 m e 1294 m slm; tali quote permettono di ottenere un volume medio utile di regolazione di 315.000.000 m<sup>3</sup>.

Nel 1990 l'ENEL, a seguito di una valutazione circa le condizioni di esercizio e la stima degli afflussi e deflussi del lago, ha constatato però l'impossibilità di raggiungere la quota massima di regolazione prevista originariamente ed ha quindi ottenuto dal Ministero dei Lavori Pubblici la limitazione permanente della quota massima di regolazione a metri 1317.50 m slm, così come proposto.

La quota di massimo invaso 1318.25 m slm è stata ottenuta costruendo un dispositivo di sfioro a calice situato nei pressi della diga Rio Fucino; Con la successiva autorizzazione

concessa nel 1990 dal Ministero dei Lavori Pubblici si è poi raggiunto un volume medio utile di regolazione di 217.000.000 m<sup>3</sup>.

Il lago costituisce ad oggi il serbatoio di testa del sistema di impianti idroelettrici del Gruppo Vomano. Tale sistema grazie alle favorevoli condizioni geografiche e topografiche, presenta la peculiarità dell'accumulo nel serbatoio di testa (Campotosto) sia degli afflussi naturali del bacino imbrifero direttamente sotteso dal lago (superficie di circa 47.5 km<sup>2</sup>), sia delle acque relative ai bacini imbriferi dei versanti orientale e occidentale dei Monti della Laga (superficie di circa 97.5 km<sup>2</sup>). Nel serbatoio di testa del sistema di impianti idroelettrici del Gruppo Vomano giungono, infine, gli afflussi del medio Vomano, sollevati mediante pompaggio dalla Centrale Idroelettrica di Provvidenza.

### **1.2.2 Geologia del bacino**

Il bacino sotteso al lago di Campotosto, è ubicato nella Conca di Amatrice all'interno della fascia pedemontana dell'Appennino centrale, delimitata ad Ovest dai Monti Sibillini e ad Est dai Monti della Laga.

La formazione della conca di Amatrice risale alle fasi distensive che hanno determinato la disarticolazione della struttura a thrust costruito tra il Miocene superiore ed il Pliocene inferiore. In tale periodo gli eventi compressivi hanno infatti provocato la sovrapposizione delle tre unità tettoniche principali (l'unità dei Monti Sibillini, l'unità del Gran Sasso – Cittareale – Accumuli, l'unità di Acquasanta – Montagna dei Fiori – Montagnone)..

Durante questo regime tettonico estensionale si sono generate una serie di faglie normali ad andamento NW-SE.

Tale fase distensiva è tuttora in atto ed è testimoniata da indizi geomorfologici, quali forte attività erosiva dei corsi d'acqua a monte delle faglie, scarpate di neoformazione, grossi depositi di frana.

L'elemento tettonico distensivo più importante si trova nell'anticlinale situato sul versante occidentale dei Monti della Laga (Monte Gorzano – Monte di Mezzo), con asse orientato N30°W. Sul fianco occidentale di questa anticlinale si trova un'importante faglia diretta, con direzione N30°W e inclinazione e con rigetto di circa 1000 – 1500 m la quale mette a contatto le Marne con Cerrognana con la parte alta del Membro pre-evaporitico della Formazione della Laga (Bachetti et al., 1990).

Nell'anticlinale, la faglia di cui sopra è accoppiata ad una serie di altre faglie dirette ad alto angolo, che determinano un assetto a gradinata. La zona interessata da tali faglie dirette ha un'ampiezza di circa 500 m. La zona occidentale della conca di Amatrice ha un assetto morfostrutturale costituito da una serie di blocchi ribassati verso NE da faglie antitetiche alle principali.

L'assetto morfo-tettonico dell'intera area è costituito da un sistema di blocchi con evoluzione indipendente delimitati da faglie (Cacciumi et al., 1995).

Le faglie che delimitano i suddetti blocchi sono state suddivise in 3 ordini:

- 1° ordine con rigetto maggiore di 1200 m.
- 2° ordine con rigetto compreso tra 1200 e 500 m.
- 3° ordine con rigetto minore di 500 m.

Dalla carta morfo-tettonica è possibile individuare due blocchi principali: ad Est il blocco dei Monti della Laga, il più sollevato della zona, e ad Ovest il blocco di Monte Uteri, anch'esso sollevato. Fra tali due blocchi principali si possono osservare una serie di blocchi minori con sollevamenti tra loro molto disomogenei.

In queste aree relativamente più depresse (Conca di Campotosto, d'Amatrice – Sommati e Capitignano – Montereale), si sono depositate le successioni sedimentarie.

### 1.2.3 Diga di Poggio Cancelli

La diga di Poggio Cancelli è ubicata nella zona nord-ovest del lago di Camposto, a circa 1 km di distanza dall'omonimo paese;

Sui fianchi di questa area sono visibili affioramenti di roccia arenaceo-marnosa con leggera pendenza verso sud-est. Nella restante zona sono presenti terreni argillosi impermeabili e sotto tale strato si alternano strati di terreni sabbiosi e strati di terreni ghiaiosi separati da argilla.

La diga è alta 27,5 m ed il livello di ritenuta normale è situato a 24 m mentre quello di piena a 25 m.

La diga è stata realizzata in materiali sciolti provenienti da una cava situata a circa 500 m di distanza dal sito dove è situata l'opera, può essere classificata come "diga zonata con nucleo impermeabile di argilla".

Per la costruzione dei rinfianchi è stato usato terreno di cava mentre il nucleo è stato reso impermeabile mediante l'aggiunta del 3% in peso di bentonite. Il paramento a monte è protetto da uno strato di lastroni in calcestruzzo gettati sul posto, mentre nella parte di valle è stato realizzato un muro di spessore di 4,5 m ed altezza 3.5 metri posizionato a contatto con la fondazione in roccia. Sopra tale muro il paramento è rivestito con zolle d'erba.

Lungo le pareti dello scavo che consentono alla diga di poggiare su roccia, sono state eseguite delle impermeabilizzazioni tramite iniezioni di cemento.

Prima della posa in opera del materiale è stato eseguito uno studio Proctor utilizzando 25 colpi di pestello per strato, ottenendo un contenuto d'acqua ottimale pari al 15,2% del peso secco per i rinfianchi, e del 16.5% per il nucleo.

La posa in opera del materiale è avvenuta per sovrapposizione successiva di strati con spessore massimo di 25 cm e costipati mediante rullo compattatore a piedi costipanti assicurando un numero minimo di passaggi pari a 14.

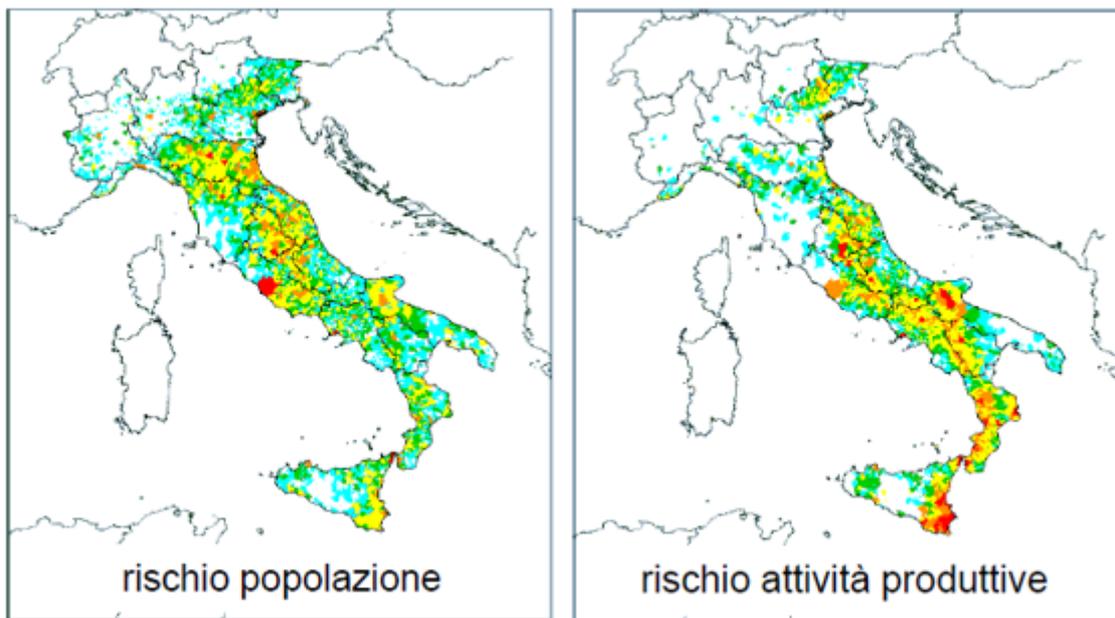
## 2 Rischio sismico

Il rischio sismico è un indice che fornisce la probabilità di avere, in caso di evento sismico, danni a case, persone o attività. Esso è definito come la convoluzione della vulnerabilità, pericolosità ed esposizione; ne consegue che se solo una delle precedenti citate quantità è nulla il rischio sismico risulterà nullo.

$$R = P \times V \times E \quad (\text{Eq.2.1})$$

In Italia è stato condotto uno studio su tutto il territorio nazionale che ne ha consentito di valutare la *pericolosità sismica*.

Analoghi studi sono stati condotti per definire la *vulnerabilità* e *l'esposizione* del territorio nazionale. Dalla convoluzione di queste tre parametri si è ottenuto il *rischio sismico* che viene rappresentato in funzione di: *danno atteso e persone coinvolte* (Fig. 2.1)



**Figura 2.1:** Rischio sismico sul territorio italiano (Foti, 2017)

## 2.1 Pericolosità sismica

La pericolosità sismica è definita come la probabilità che si verifichi, in un dato luogo o entro un data area ed entro un certo periodo di tempo, un terremoto capace di causare danni, quindi consiste nell'andare a determinare lo scuotimento atteso in una specifica area. Gli elementi che concorrono al moto sismico in una specifica area sono:

- sorgenti sismiche, cioè le faglie capaci;
- distanza di ogni faglia dal punto di interesse;
- magnitudo, cioè l'energia che la faglia può rilasciare;
- stratigrafia.

La valutazione di tale parametro può essere eseguita con un approccio deterministico oppure probabilistico.

### 2.1.1 Approccio deterministico per la valutazione della pericolosità sismica

Tale analisi considera i dati a disposizione senza tener in conto delle incertezze che si hanno nel considerare i fattori che concorrono alla definizione della pericolosità sismica. Nel caso in cui il sito oggetto di studio sia interessato da più faglie, in ambito deterministico si considerano tutte le potenziali sorgenti andando poi a prendere come riferimento la situazione più gravosa.

Tale approccio si articola in cinque passi:

1. *Identificazione delle sorgenti sismiche*: si valutano quali sono le sorgenti di interesse per il sito, analizzando, per ciascuna sorgente sismica, i dati dei terremoti del passato e le informazioni di natura geofisica. Ciò è già stato fatto ed ha portato alla realizzazione del Catalogo delle faglie che possono generare terremoti. A tali faglie poi è necessario associare dei parametri che consentano di determinare cosa ci si aspetti; essendoci però pochi dati a disposizione risulta difficile da eseguire per le singole faglie. Per far fronte a questa problematica sono state definite delle zone sismogenetiche, cioè zone aventi faglie che producono lo stesso tipo di rottura e quindi aventi caratteristiche simili.

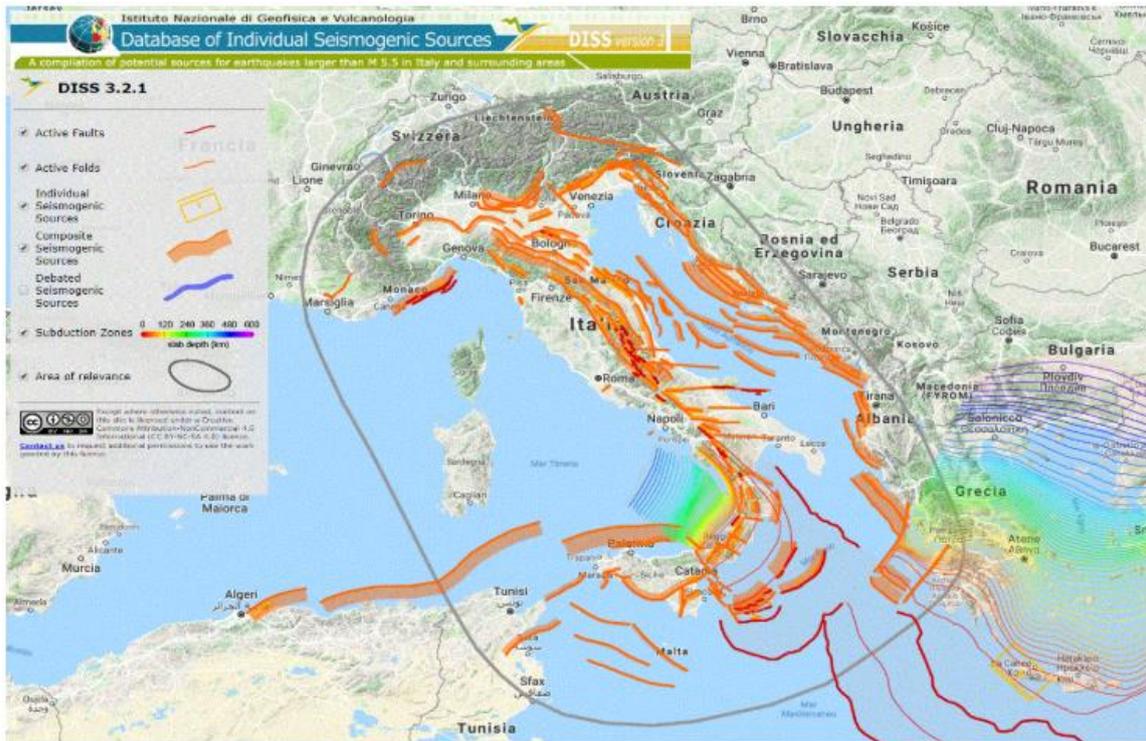


Figura 2.2: Potenziali sorgenti per terremoti  $M > 5.5$ , (<http://diss.rm.ingv.it/>)

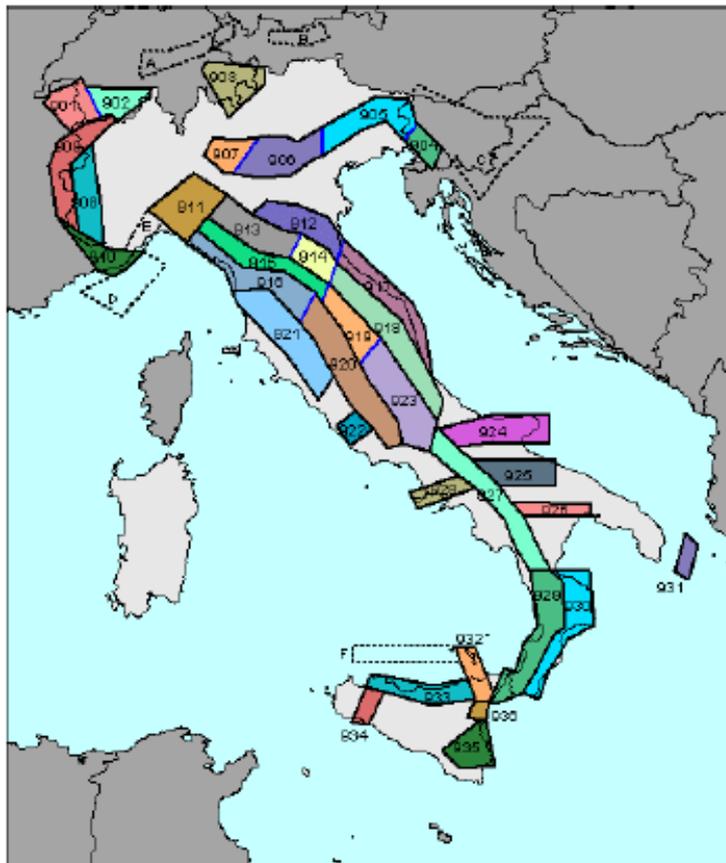


Figura 2.3: Zone sismogenetiche – ZS9 (Meletti e Valensise, 2004)

2. *Valutazione magnitudo sismica massima attesa*: a causa della scarsa conoscenza dei parametri della faglia, non è possibile ragionare in termini meccanici per andare a valutare la massima magnitudo attesa. Per cui ci si basa sui dati storici attraverso l'utilizzo di opportune relazioni empiriche. In particolare, si ricorre alla legge di Gutenberg-Richter (vedi Eq.2.1.1.1) che lega la magnitudo attesa alla ricorrenza dei terremoti.

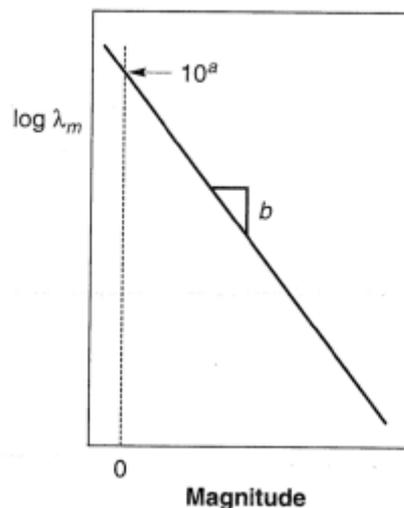
$$\log \lambda_m = a - bM \quad (\text{Eq.2.1.1.1})$$

Dove

$\lambda_m$  = frequenza annuale di superamento, cioè frequenza di terremoti di intensità superiore ad una certa magnitudo

$a, b$  = parametri derivanti dalla regressione dei dati a disposizione

$M$  = magnitudo



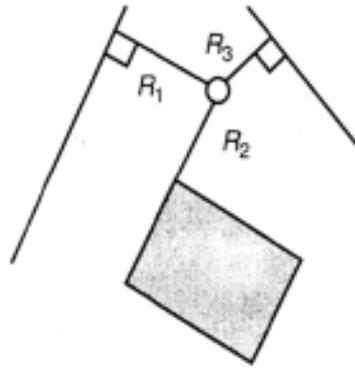
**Figura 2.4:** Legge di Gutenberg-Richter (Foti, 2017)

Per ricavare i parametri  $a$  e  $b$  è necessario ricostruire una statistica dei terremoti, cosa che non è possibile fare su di una singola faglia in quanto non si dispongono dati sufficienti; dunque ci si basa sulla zona sismogenetica ed i risultati vengono poi applicati alla sorgente di interesse.

Il limite di tale approccio è dato dal fatto che per periodi di ritorno molto grandi, cioè  $\lambda_m$  che tendono a 0 le magnitudo che si ottengono sono sempre più elevate, in realtà

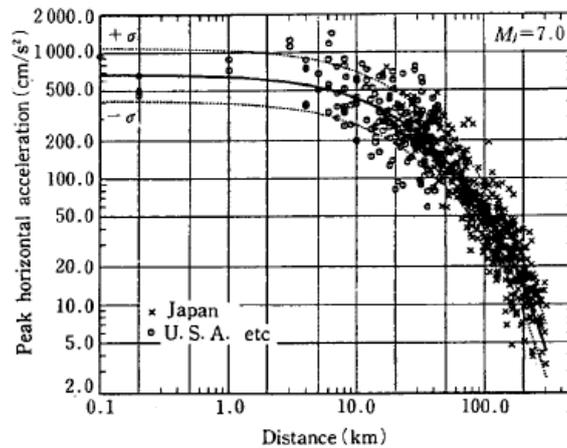
la curva dovrebbe chiudersi ad un valore asintotico in quanto i sistemi di faglie hanno una dimensione finita e di conseguenza una capacità limitata di accumulare energia.

3. *Valutazione distanza sorgente-sito*: si sceglie la distanza minima tra il punto di interesse e le varie sorgenti considerate.



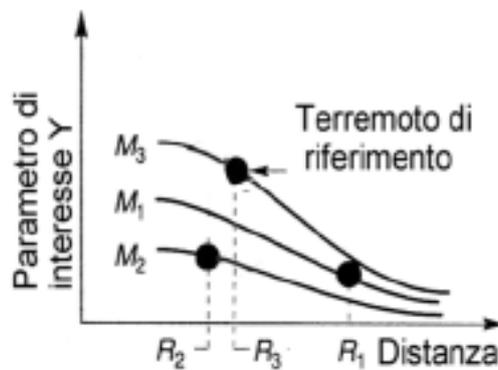
**Figura 2.5:** Distanza tra le varie sorgenti ed il punto di interesse (Foti, 2017)

4. *Valutazione effetti attesi in funzione delle leggi di attenuazione regionali*: a causa della scarsa quantità di dati a disposizione non è possibile costruire un modello di propagazione dell'onda sismica del terreno per cui anche qui, come fatto precedentemente, ci si basa sui dati storici a disposizione. Scelto un parametro di scuotimento, si vanno a prendere le registrazioni a disposizione e le si legano mediante la distanza epicentrale, in tal modo si riesce a capire come varia il parametro scelto in funzione della distanza. Quello che si osserva è un andamento che presenta un massimo all'epicentro e tende a zero per una distanza infinita. Andando a raggruppare i dati con magnitudo simile si ottengono le curve di attenuazione regionale che consentono di determinare lo scuotimento atteso.



**Figura 2.6:** Esempio di curva di attenuazione (Fukushima e Tanaka,1991)

5. *Selezione del terremoto di controllo:* per ciascuna faglia, nota la magnitudo e la distanza, attraverso la legge di attenuazione regionale si può ricavare il parametro di interesse atteso. Il terremoto di controllo sarà quello a cui è associato un effetto peggiore, che non è detto sia quello legato alla faglia più vicina o a quella che produce una magnitudo maggiore, in quanto nelle curve di attenuazione c'è una combinazione di questi due parametri.



**Figura 2.7:** Scelta del terremoto di controllo (Foti, 2017)

## 2.1.2 Approccio probabilistico per la valutazione della pericolosità sismica

Il metodo utilizzato per l'approccio probabilistico è quello proposto da Cornell, in cui non si procede alla determinazione di una singola azione di riferimento ma si ottiene, scelto un parametro descrittivo del moto del terreno, la probabilità di eccedenza in un fissato tempo di riferimento.

Si procede attraverso i medesimi step del metodo deterministico, associando in questo caso ad ogni variabile una certa distribuzione probabilistica e quindi si combinano le probabilità in modo tale da ottenere lo scuotimento atteso in termini probabilistici, cioè la probabilità di superare un determinato livello di scuotimento. Ciò consente di tener conto delle incertezze nelle varie leggi empiriche considerate.

In tale approccio si esprime una probabilità condizionata, in quanto il superamento di una specifica soglia da parte del parametro scelto per descrivere il moto del terreno è condizionato dalla magnitudo e distanza. Dunque la distribuzione di probabilità del parametro  $y$  scelto si lega alla distribuzione di probabilità della magnitudo e alla distribuzione di probabilità della distanza (Eq.2.1.2.1)

$$P(y > \bar{y}) = \iint P(y > \bar{y} | m; d) f_D(d) f_M(m) d_m d_d \quad (Eq.2.1.2.1)$$

Nello specifico, i termini all'interno dell'integrale sono descritti di seguito:

- $f_D(d)$  distribuzione di probabilità della distanza: definisce la probabilità che l'evento si verifichi ad una certa distanza dal sito di interesse.  
Si assume l'equi-probabilità di rottura nella faglia, cioè si associa la stessa probabilità di rottura ad ogni area; si ottiene in tal modo una probabilità maggiore alle distanze intermedie e minore alle distanze maggiori e minori. L'output è rappresentato da un istogramma di frequenza associato alla forma della faglia che approssima la distribuzione della distanza.
- $f_M(m)$  distribuzione di probabilità della magnitudo: essa definisce la probabilità che un evento di una certa magnitudo sia superato; è governata dalla legge di Gutenberg-Richter che lega la magnitudo al tempo.

L'assunzione che viene fatta a priori è che la variabile abbia una distribuzione alla Poisson (vedi Eq.2.1.2.2), che rappresenta la probabilità di avere almeno un evento di magnitudo superiore a  $m$  nell'intervallo di tempo fissato  $t$ .

$$P(N \geq 1) = 1 - e^{-\lambda_m t} \quad (\text{Eq.2.1.2.2})$$

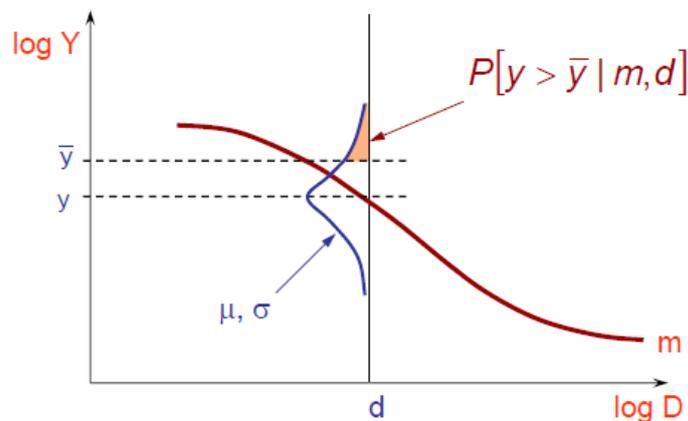
Nell'equazione precedente  $\lambda_m$  rappresenta la frequenza annuale di superamento dell'evento di magnitudo  $m$

$$\lambda_m = \frac{\text{num.eventi con } M > m}{\text{intervallo temporale}} \quad (\text{Eq.2.1.2.3})$$

Come detto precedentemente, tale parametro deriva dalla legge di Gutenberg-Richter e si basa sulla regressione dei dati di sismicità regionale.

Le ipotesi alla base di tale modello sono:

- Eventi indipendenti: cioè non c'è memoria tra eventi successivi, ma questo non è vero poiché il rilascio di energia da parte di una faglia potrebbe avere conseguenze su faglie circostanti.
  - Eventi rari: la probabilità che avvengano due eventi ravvicinati nel tempo è piccola. Ciò non accade nella realtà poiché si vedono eventi ravvicinati a seguito della rottura di diverse porzioni di faglia o di faglie contigue.
  - Processo stazionario: il risultato non varia e la probabilità calcolata è la stessa andando a traslare la finestra temporale di osservazione poiché non c'è memoria. Questo però è in contrasto con la teoria del gap sismico, la quale afferma che in presenza di faglie attive maggiore è il tempo che trascorre da quando non avviene un evento importante maggiore è l'energia che si sta accumulando, dunque inevitabilmente mi sto avvicinando alla rottura.
- $P(y > \bar{y}|m; d)$  probabilità condizionata dove, date una magnitudo  $m$  ed una distanza  $d$ , essa rappresenta la probabilità che il parametro  $y$  superi il valore di soglia  $\bar{y}$ . Mediante i dati storici a disposizione si può determinare la legge di attenuazione regionale a cui si associa anche una distribuzione statistica dovuta alla dispersione dei dati. Dunque non si considera più il valor medio della legge di attenuazione regionale, ma anche le incertezze associate a questo valor medio.



**Figura 2.8:** Probabilità condizionata del parametro Y (Foti, 2017)

Andando infine a combinare tali tre distribuzioni ed integrandole si ottiene, per una singola sorgente, la probabilità che in un determinato arco temporale il valore limite del parametro scelto per descrivere lo scuotimento venga superato.

Nel caso in cui nel sito oggetto di studio siano presenti più sorgenti, a differenza dell'approccio probabilistico in cui si selezionava il terremoto di controllo come quello più gravoso, si vanno a combinare le probabilità associate alle diverse sorgenti (Eq.2.1.2.4)

$$P = \sum_i P_i(y > \bar{y}) \quad (Eq.2.1.2.4)$$

Questo metodo consente di superare le limitazioni connesse al metodo deterministico precedentemente esposto, che sono:

- Le incertezze non vengono tenute in conto nel metodo deterministico;
- Quello che si prevede in maniera deterministica si basa su informazioni di partenza assunte note e certe all'interno del modello, mentre in realtà sono state fatte delle assunzioni;

Anche l'approccio probabilistico presenta i suoi limiti connessi alle ipotesi di base presenti nel modello; viene comunque utilizzato in quanto risulta essere il metodo migliore in base alle conoscenze che abbiamo. Per tale motivo, in caso di opere rilevanti, potendo eseguire una caratterizzazione dettagliata, si utilizza un approccio deterministico.

### 2.1.3 Pericolosità sismica del territorio italiano

La pericolosità sul territorio italiano è stata definita dall'INGV. Esso ha suddiviso il territorio nazionale in una griglia con passo di  $0.05^\circ$  e su ciascun punto ha eseguito una valutazione probabilistica; in tale valutazione sono state fatte le seguenti assunzioni:

- La probabilità di superamento è fissata al 10% in 50 anni a cui corrisponde un periodo di ritorno dell'azione sismica pari a  $T_R = 475$  anni
- Le condizioni topografiche e stratigrafiche alle quali si fa riferimento sono quelle di affioramento roccioso rigido e pianeggiante, non si tengono in conto in tale analisi le condizioni locali. Tale scelta è stata dettata dal fatto che essendo la variabilità delle condizioni locali elevata non era possibile ragionare in tale modo, per cui si parla di *pericolosità sismica di base*.

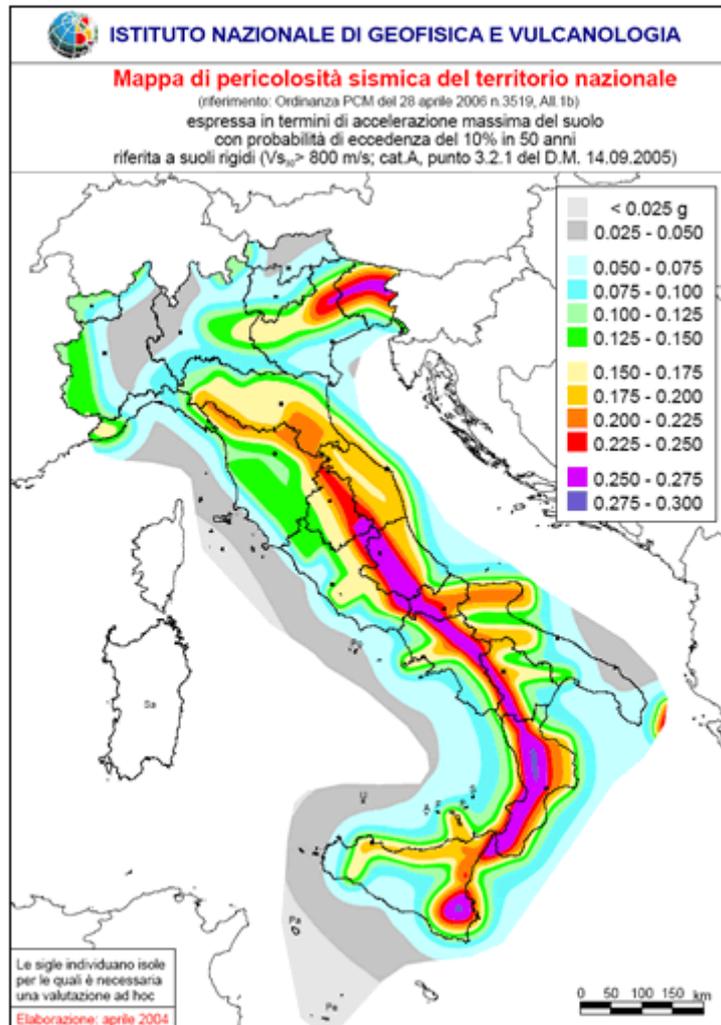


Figura 2.9: Pericolosità sismica di base del territorio italiano (INGV, 2004)

## 2.2 Esposizione

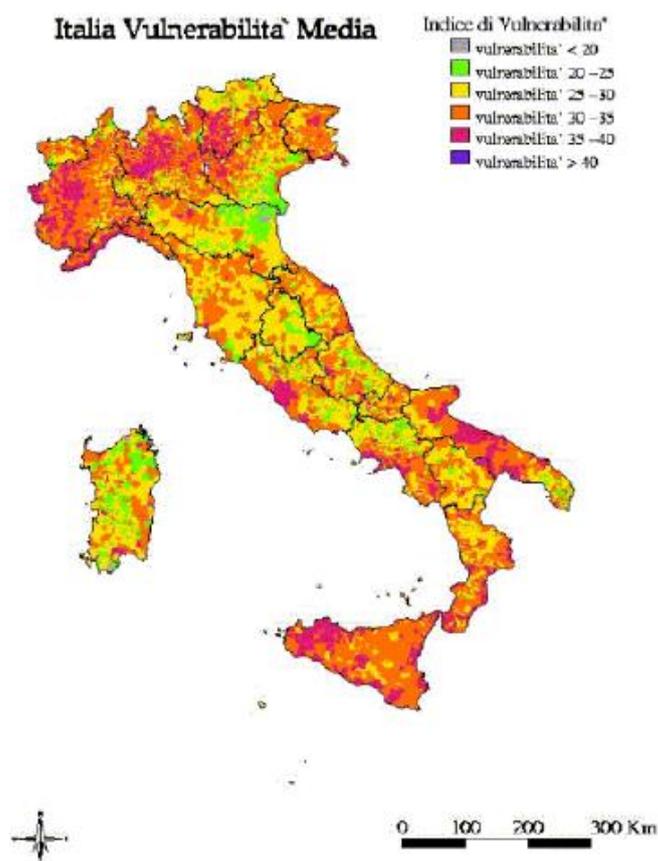
L' esposizione è una caratteristica del sistema sociale e può essere definita come la dislocazione, consistenza, qualità e valore dei beni e delle attività presenti sul territorio, che possono essere influenzate direttamente o indirettamente dall'evento sismico.



**Figura 2.10:** Densità di popolazione o attività produttive sul territorio italiano (Foti, 2017)

## 2.3 Vulnerabilità

La Vulnerabilità è la capacità dell'opera di opporsi alle forze orizzontali indotte dal sisma; se tale capacità è elevata ne consegue una vulnerabilità bassa. È valutata a livello di singoli edifici, sistema urbano o rete di infrastrutture e questo risulta l'unico parametro su cui si può agire progettando in modo opportuno.



**Figura 2.11:** Vulnerabilità del costruito sul territorio italiano (Foti, 2017)

Nel caso di studio delle dighe, risulta essere particolarmente complessa la definizione della vulnerabilità, in quanto uno studio di dettaglio della vulnerabilità sismica richiede una conoscenza approfondita di tutta l'area interessata dall'invaso preso in esame.

Molto spesso ci si trova in condizioni caratterizzate da una scarsa conoscenza dell'invaso in esame a causa delle difficoltà nel reperire i dati riguardanti i materiali costituenti le dighe e lo strato di fondazione su cui esse poggiano e ciò non consente di eseguire uno studio di dettaglio della vulnerabilità. In tali situazioni si può utilizzare un approccio di "livello 0" esplicitato nei paragrafi seguenti (Frigo, Chiaia, Foti, Fantilli, De Biagi, 2015).

### **2.3.1 Vulnerabilità dighe in materiali sciolti approccio di “livello 0”**

Nella definizione della vulnerabilità delle dighe in materiali sciolti si va a definire un indice di vulnerabilità globale che tiene conto in tal modo di più aspetti legati ai materiali con cui è stata realizzata l'opera, le condizioni in sito dell'opera e le sue prestazioni quando soggetta a scuotimento. Si definiscono dunque diversi indici.

#### **2.3.1.1 Vulnerabilità connessa alla liquefazione**

L'indice  $V_{\text{liquefaction}}$  è connesso alla liquefazione ciclica, cioè la perdita di resistenza del materiale, dovuto all'accumulo di sovrappressioni interstiziali durante i cicli di carico indotti dal sisma ad elevata frequenza. In tali condizioni, per effetto della sollecitazione ciclica indotta dal sisma, il materiale sarà soggetto a densificazione, tenderà cioè ad addensarsi, ma questo addensamento sarà contrastato dal fluido interstiziale presente, con conseguente aumento delle pressioni interstiziali. Poiché il fenomeno avviene ad alte frequenze, il materiale non riuscirà a dissipare le sovrappressioni che si generano ad ogni ciclo di carico, per cui si avrà un accumulo di sovrappressioni interstiziali fino alla condizione limite in cui si annulleranno le tensioni efficaci e si avrà la perdita di resistenza del materiale e dunque liquefazione. In questa condizione le particelle non sono più in contatto tra loro ma in sospensione per cui non sono in grado di trasferirsi il carico.

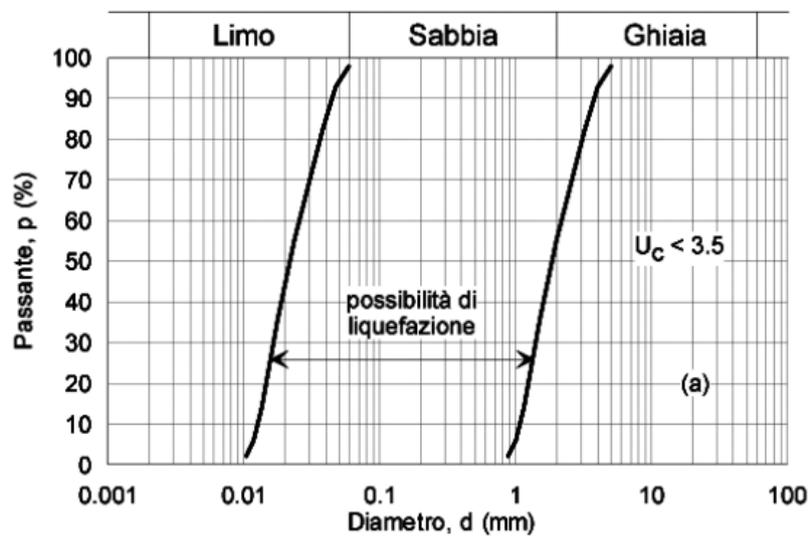
Questa risulta essere una situazione temporanea, in quanto finito il carico ciclico la sovrappressione si diffonderà nella zona circostante andando a diminuire nel tempo con conseguente aumento delle tensioni efficaci e recupero della resistenza del materiale. Anche se in tale fenomeno la perdita di resistenza è temporanea, i danni che possono occorrere sono permanenti.

È da osservare che tale fenomeno non avviene in materiali argillosi poiché intervengono delle interazioni elettrochimiche che, anche se non paragonabili ad un legame di cementazione, sono capaci di impedire il moto libero delle particelle, dunque in caso di scuotimento non avviene il processo di addensamento.

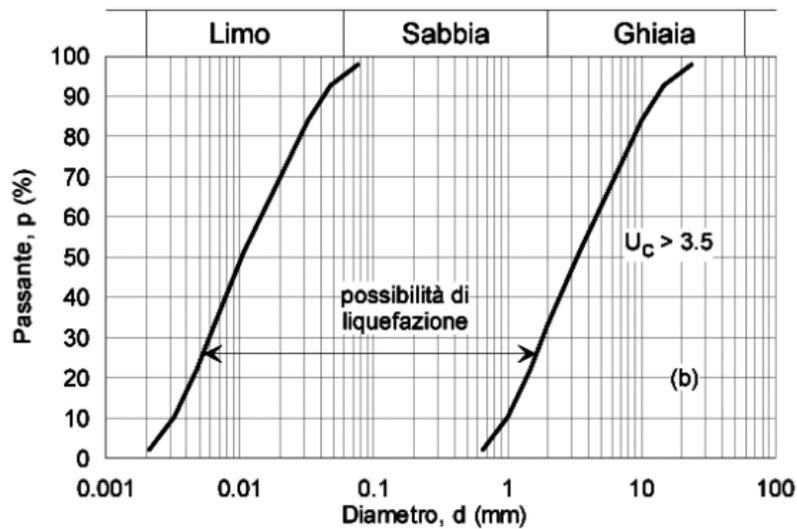
La suscettibilità alla liquefazione viene considerata anche all'interno delle NTC 2018 in una serie di criteri che mi indicano la possibilità di escludere a priori il fenomeno della liquefazione. Nel caso in cui solo uno di questi criteri si verifica si esclude il rischio di

liquefazione quindi si evita la necessità di una verifica a liquefazione. I motivi di esclusione sono:

- Accelerazione di picco al suolo si progetto  $S \cdot a_g < 0.1g$ ;
- Profondità della falda dal p.c.  $z_w > 15 m$ ;
- depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica  $(N1)60 > 30$  oppure  $qc1N > 180$  normalizzate ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
- Criterio granulometrico (fuso terreni liquefabili), la curva granulometrica del campione in esame deve cadere esternamente al fuso affinché si possa escludere la liquefazione.



**Figura 2.12:** Fuso per verifica a liquefazione per terreni con  $U_c < 3.5$  (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2018)



**Figura 2.13:** Fuso per verifica a liquefazione per terreni con  $U_c > 3.5$  (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2018)

Se si ricade in una delle condizioni sopracitate considerate nella normativa allora non si incorrerà nel rischio di liquefazione e di conseguenza  $V_{liquefaction}$  sarà nullo, se invece l'opera in esame è suscettibile al fenomeno della liquefazione allora  $V_{liquefaction}$  assumerà valore unitario.

### 2.3.1.2 Vulnerabilità connessa alle condizioni del rilevato

Il parametro  $V_{conditions}$  consente di tenere in conto, all'interno dell'indice di vulnerabilità, l'aspetto legato alle condizioni in sito della diga presa in esame. A seguito di un sopralluogo, il tecnico andrà a stabilire un punteggio in base alle condizioni del corpo della diga. Per semplificare la procedura e rendere applicabile tale metodo a tutti gli invasi esistenti sono state definite 5 classi e ad ogni classe è stato assegnato un punteggio (tab 2.1).

L'indice di vulnerabilità connesso alle condizioni del rilevato sarà dato dal complemento a 1 di tale punteggio.

<i>Condizione del rilevato</i>		<i>w</i>
1	Ottimale: rispettate le condizioni di progetto, assenza di deformazioni	0,8
2	Buono: assenza di deformazioni superficiali, piccole imperfezioni sul rivestimento del rilevato	0,6
3	Discreto: segni di degradazione superficiale	0,4
4	Mediocre: presenza di deformazioni superficiali e sul rivestimento	0,2
5	Non accettabile / assenza di sopralluogo	0

**Tabella 2.1:** Punteggio a seconda della condizione del rilevato (Frigo, Chiaia, Foti, Fantilli, De Biagi, 2015)

### **2.3.1.3 Vulnerabilità connessa ai cedimenti**

Scelto il metodo per determinare la deformazione del rilevato, tale indice sarà dato dal rapporto tra il cedimento calcolato con il metodo scelto dal progettista ed un valore assunto come soglia di danno.

### **2.3.1.4 Vulnerabilità connessa agli spostamenti**

La stima degli spostamenti nel rilevato può essere eseguita con uno dei metodi riportati in letteratura (ad esempio il metodo proposto da Newmark 1965), l'indice di vulnerabilità connesso agli spostamenti sarà dato dal rapporto tra lo spostamento determinato ed un valore di spostamento assunto come soglia di danno.

### 3 Modellazione numerica

Lo studio della risposta sismica della diga di Poggio Cancelli è avvenuto mediante la realizzazione di un modello numerico agli elementi finiti.

Per fare ciò è stato scelto il framework agli elementi finiti Opensees sviluppato dall'Università di Berkeley in California, per simulare la risposta di sistemi strutturali e geotecnici soggetti ad eventi sismici. Il software è open source, quindi può essere scaricato gratuitamente dall'omonimo sito ed utilizzato da chiunque. Ciò ha reso possibile la sua diffusione in tutto il mondo, creando una community di ricercatori, professori, studenti e professionisti.

Lo scambio di idee e problematiche riguardanti il software, ha permesso di aggiornare continuamente le funzioni disponibili all'interno del programma, consentendo così di risolvere un ampio numero di problematiche che spaziano dal campo strutturale a quello geotecnico.

Opensees presenta al suo interno un'ampia gamma di elementi, algoritmi risolutivi e legami costitutivi implementati dagli sviluppatori in linguaggi C++. Non possedendo un'interfaccia grafica la scrittura del codice da parte dell'utente avviene in linguaggio Tcl, linguaggio di scripting di facile apprendimento ma allo stesso tempo potente, che consente di richiamare le diverse funzioni.

Nel caso di problematiche complesse o di modelli dalle dimensioni elevate, per facilitare l'operazione di scrittura del codice e visualizzazione dei risultati sono presenti in commercio dei programmi che ricoprono il ruolo di pre e post-processor.

Questo framework è stato scelto nel presente lavoro di tesi in quanto risulta essere in grado di eseguire analisi con modelli costitutivi estremamente complessi ed analizzare problematiche che si presentano in condizioni sismiche nei terreni, quali la liquefazione. Data la complessità del caso studio in esame per la realizzazione della geometria e visualizzazione dei risultati, come pre e post-processor è stato utilizzato il software GiD.

### 3.1 Geometria

A seguito di un'approfondita ricerca bibliografica, è stata reperita una sezione della diga in esame da *Rassegna dei materiali sciolti adoperati nelle dighe costruite in Italia nel periodo 1950-1975* (Jappelli e Silvestri, 2005) potendosi così basare su di essa, con le dovute approssimazioni, per la realizzazione della geometria del modello.

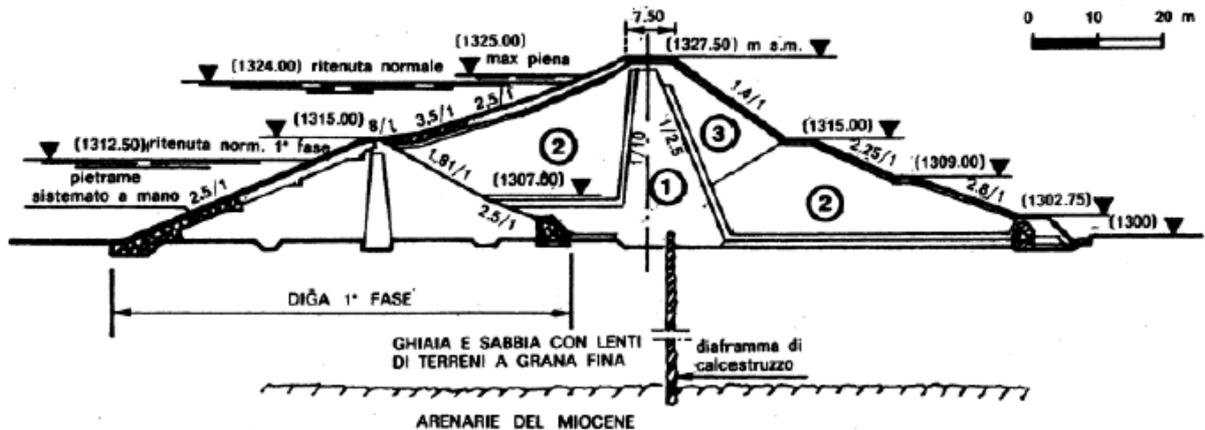


Figura 3.1: Geometria della diga di Poggio Cancelli

Come detto precedentemente, non avendo Opensees l'interfaccia grafica, per la realizzazione della geometria è stato usato il software GiD.

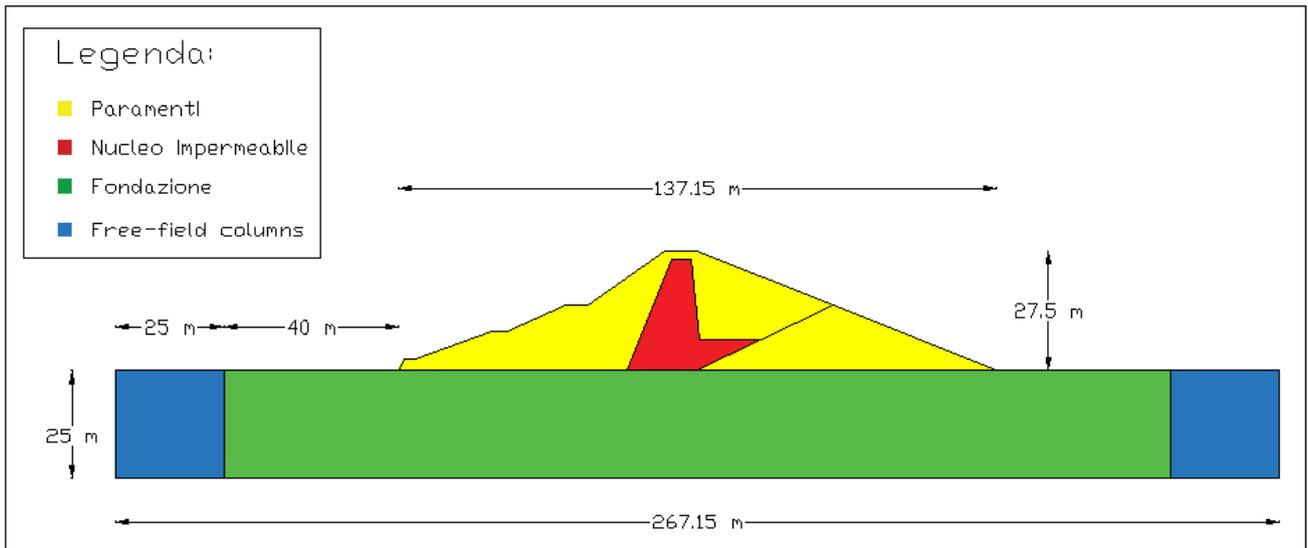
La base di partenza è stato l'esempio "Dynamic 2D Effective Stress Analysis of Slope" realizzato da Christopher McGann e Pedro Arduino dell'Università di Washington. Mediante tale esempio i due sviluppatori hanno realizzato una serie di file chiamati "problem type" presenti all'interno della libreria di GiD, che vanno a definire quali leggi costitutive possono essere utilizzate, la tipologia di elemento e la sintassi della mesh generata nel file di input.

La dimensione della mesh è stata ottimizzata in modo tale da poter permettere una corretta propagazione dell'onda sismica all'interno del modello, ciò è stato fatto seguendo l'eq. 3.1.1.

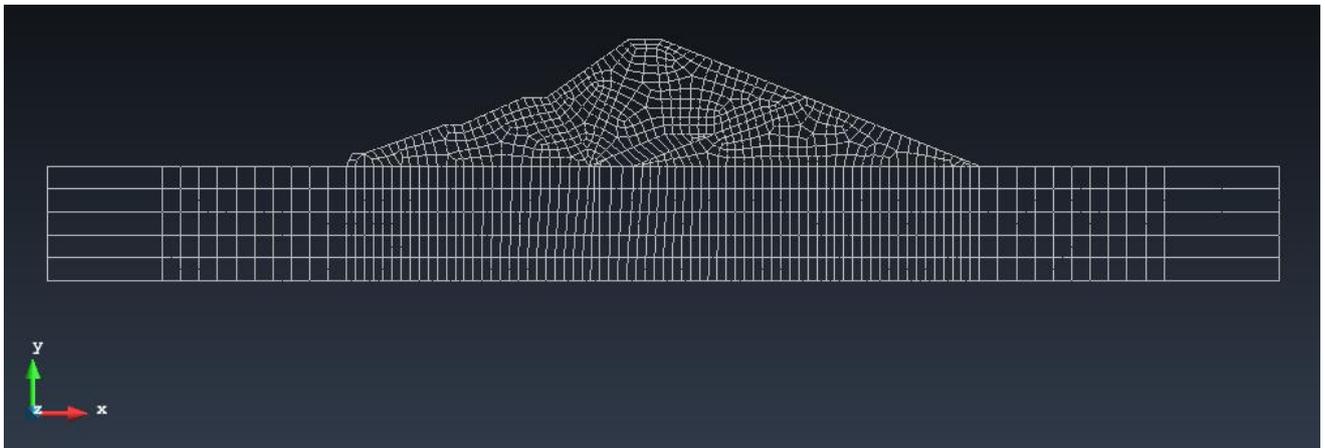
$$\Delta l = \frac{V_{s,min}}{(6-10) \cdot f_{max}} \quad (Eq. 3.1.1)$$

La massima frequenza che si è ritenuto necessaria propagare è stata 22.61 Hz. Poiché nel corpo della diga e nello strato di fondazione sono state adottate differenti rigidzze, dall'equazione 3.1.1 è stata ottenuta una dimensione massima della mesh differente.

Per il corpo della diga è stata ottenuta una dimensione massima degli elementi della mesh pari a 1.1 m, mentre per lo strato di fondazione la dimensione massima ottenuta è stata di 5 m. Poiché la geometria del corpo diga non è regolare la mesh in questa zona risulta anch'essa non regolare e la dimensione dei vari elementi è compresa in un range che varia tra 1 m e 0.85 m.



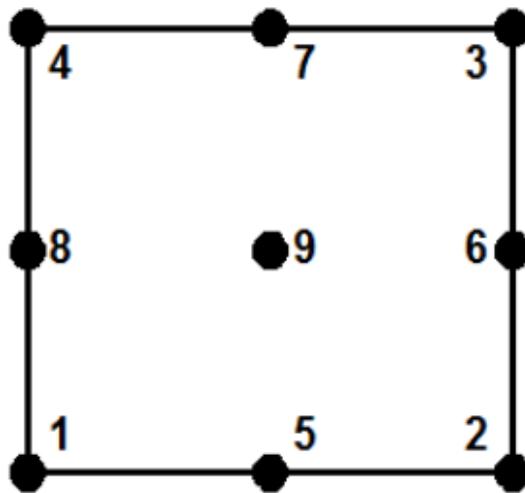
**Tabella 3.1:** Modello geometrico della diga di Poggio Cancelli



**Figura 3.2:** Vista del modello in GiD

## 3.2 Elemento

L'elemento utilizzato per la costruzione del modello è il “**Nine\_Four\_Node\_QuadUP**”, elemento quadrato a deformazione piana. Esso è costituito da 9 nodi di cui, i 4 posti ai vertici del quadrato sono nodi con 3 gradi di libertà (due per gli spostamenti nelle due direzioni ortogonali del piano ed il terzo per la pressione del fluido), mentre i restanti 5 nodi, posti in mezzzeria dei lati dell'elemento ed al centro dell'elemento stesso, hanno 2 gradi di libertà corrispondenti agli spostamenti nelle due direzioni ortogonali nel piano. Esso consente di simulare la risposta dinamica solido-fluido, sulla base della teoria Biot del mezzo poroso.



**Figura 3.3:** Nine\_Four\_Node\_QuadUP element (OpenSees Wiki: [https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Nine\\_Four\\_Node\\_Quad\\_u-p\\_Element](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Nine_Four_Node_Quad_u-p_Element))

In opensees l'elemento viene scritto con la seguente sintassi:

```
element 9_4_QuadUP $eleTag $Node1 $Node2 $Node3 $Node4 $Node5 $Node6  
$Node7 $Node8 $Node9 $thick $matTag $bulk $fmass $hPerm $vPerm <$b1=0  
$b2=0>
```

Il significato dei parametri presenti nella formula sovrastante sono riportati nella tabella di seguito riportata.

<b>eleTag</b>	A positive integer uniquely identifying the element among all elements
<b>Node1,... Node9</b>	Nine element node (previously defined) numbers (see figure above for order of numbering).
<b>thick</b>	Element thickness
<b>matTag</b>	Tag of an NDMaterial object (previously defined) of which the element is composed
<b>bulk</b>	Combined undrained bulk modulus $B_c$ relating changes in pore pressure and volumetric strain, may be approximated by: $B_c \approx B_f/n$ where $B_f$ is the bulk modulus of fluid phase ( $2.2 \times 10^6$ kPa (or $3.191 \times 10^5$ psi) for water), and $n$ the initial porosity.
<b>fmass</b>	Fluid mass density
<b>hPerm, vPerm</b>	Permeability coefficient in horizontal and vertical directions respectively.
<b>b1,b2</b>	Optional gravity acceleration components in horizontal and vertical directions respectively (defaults are 0.0)

**Tabella 3.2:** Parametri Nine\_Four\_Node\_QuadUP element (OpenSees Wiki:  
[https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Nine\\_Four\\_Node\\_Quad\\_u-p\\_Element](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Nine_Four_Node_Quad_u-p_Element))

### 3.3 Legami costitutivi

Nei prossimi paragrafi verranno esposti i legami costitutivi scelti per la modellazione dei vari materiali costituenti la diga presa in analisi.

#### 3.3.1 PressureIndependentMultiYield

È un modello elastico-plastico in cui la plasticità si manifesta solo nella risposta deviatorica sforzo-deformazione. La risposta volumetrica sforzo-deformazione è lineare-elastica ed è indipendente dalla risposta deviatorica. Questo modello è implementato per simulare la risposta monotonica o ciclica di materiali il cui comportamento al taglio è insensibile al cambiamento della tensione di confinamento. Tale modello descrive bene il comportamento di materiali quali, ad esempio, terreni organici o argilla in condizioni di carico rapido (non drenato). Il modello consente di eseguire un'analisi disaccoppiata alle tensioni efficaci, esso è stato usato per modellare la risposta del nucleo impermeabile della diga costituito da argilla ed il terreno di fondazione sottostante la diga.

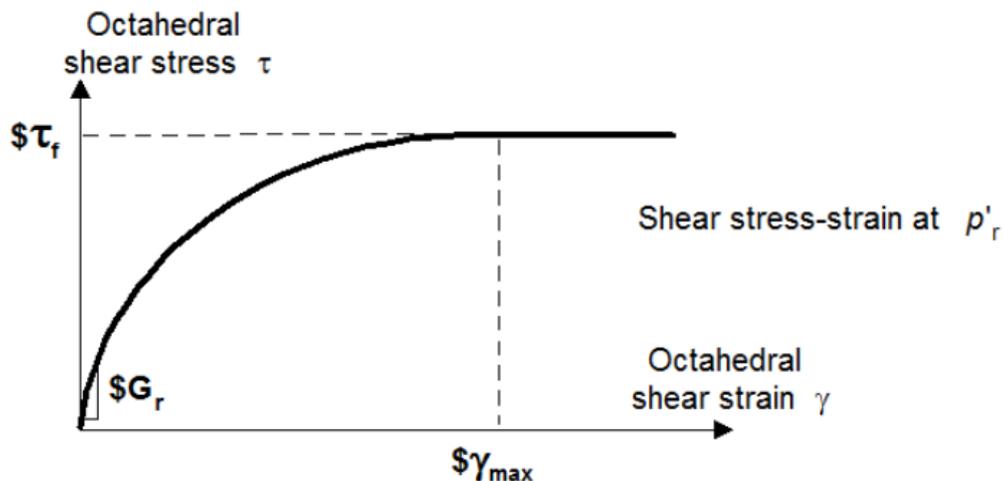


Figura 3.4: legame costitutivo Pressure Independent MultiYield (OpenSees Wiki: [https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureIndependentMultiYield\\_Material](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureIndependentMultiYield_Material))

Esso ha la seguente sintassi in opensees:

```
nDmaterial PressureIndependentMultiYield $tag $nd $rho $refShearModul
$refBulkModul $cohesi $peakShearStra <$ frictionAng = 0. $ RefPress = 100. $
PressDependCoe = 0. $ noYieldSurf = 20 <$ r1 $ Gs1...>>
```

Il significato dei parametri presenti nella formula sovrastante sono riportati nella tabella di seguito riportata.

<b>Tag</b>	A positive integer uniquely identifying the material among all nDMaterials.
<b>\$nd</b>	Number of dimensions, 2 for plane-strain, and 3 for 3D analysis.
<b>\$rho</b>	Saturated soil mass density.
<b>\$refShearModul (G<sub>r</sub>)</b>	Reference low-strain shear modulus, specified at a reference mean effective confining pressure refPress of p' <sub>r</sub> (see below).
<b>\$refBulkModul (B<sub>r</sub>)</b>	Reference bulk modulus, specified at a reference mean effective confining pressure refPress of p' <sub>r</sub> (see below).
<b>\$cohesi (c)</b>	Apparent cohesion at zero effective confinement.
<b>\$peakShearStra (γ<sub>max</sub>)</b>	An octahedral shear strain at which the maximum shear strength is reached, specified at a reference mean effective confining pressure refPress of p' <sub>r</sub> (see below).
<b>\$frictionAng (Φ)</b>	Friction angle at peak shear strength in degrees, optional (default is 0.0).
<b>\$refPress (p'<sub>r</sub>)</b>	Reference mean effective confining pressure at which G <sub>r</sub> , B <sub>r</sub> , and γ <sub>max</sub> are defined, optional (default is 100. kPa).
<b>\$pressDependCoe (d)</b>	A positive constant defining variations of G and B as a function of instantaneous effective confinement p' (default is 0.0): $G = G_r \left( \frac{p'}{p'_r} \right)^d \quad B = B_r \left( \frac{p'}{p'_r} \right)^d$ If Φ=0, d is reset to 0.0.
<b>\$noYieldSurf</b>	Number of yield surfaces, optional (must be less than 40, default is 20). The surfaces are generated based on the hyperbolic relation defined in Note 2 below.
<b>\$r, \$Gs</b>	Instead of automatic surfaces generation (Note 2), you can define yield surfaces directly based on desired shear modulus reduction curve. To do so, add a minus sign in front of noYieldSurf, then provide noYieldSurf pairs of shear strain (γ) and modulus ratio (G <sub>s</sub> ) values. For example, to define 10 surfaces: ... -10γ <sub>1</sub> G <sub>s1</sub> ... γ <sub>10</sub> G <sub>s10</sub> ... See Note 3 below for some important notes.

**Tabella 3.3:** Parametri Pressure Independ MultiYield (OpenSees Wiki: [https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureIndependMultiYield\\_Material](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureIndependMultiYield_Material))

Come si può notare risulta essere un modello molto complesso costituito da molti parametri difficili da gestire, per cui gli sviluppatori consigliano di usare i seguenti parametri riportati in tabella 3.4. I parametri scelti per le analisi sono quelli cerchiati in rosso nella figura seguente.

Parameters	Soft Clay	Medium Clay	Stiff Clay
rho	1.3 ton/m <sup>3</sup> or 1.217x10 <sup>-4</sup> (lbf)(s <sup>2</sup> )/in <sup>4</sup>	1.5 ton/m <sup>3</sup> or 1.404x10 <sup>-4</sup> (lbf)(s <sup>2</sup> )/in <sup>4</sup>	1.8 ton/m <sup>3</sup> or 1.685x10 <sup>-4</sup> (lbf)(s <sup>2</sup> )/in <sup>4</sup>
refShearModul	1.3x10 <sup>4</sup> kPa or 1.885x10 <sup>3</sup> psi	6.0x10 <sup>4</sup> kPa or 8.702x10 <sup>4</sup> psi	1.5x10 <sup>5</sup> kPa or 2.176x10 <sup>4</sup> psi
refBulkModu	6.5x10 <sup>4</sup> kPa or 9.427x10 <sup>3</sup> psi	3.0x10 <sup>5</sup> kPa or 4.351x10 <sup>4</sup> psi	7.5x10 <sup>5</sup> kPa or 1.088x10 <sup>5</sup> psi
cohesi	18 kPa or 2.611 psi	37 kPa or 5.366 psi	75 kPa or 10.878 psi
peakShearStra (at p' <sub>r</sub> =80 kPa or 11.6 psi)	0.1	0.1	0.1
frictionAng	0	0	0
pressDependCoe	0	0	0

**Tabella 3.4:** Parametri consigliati al variare del tipo di argilla (OpenSees Wiki: [https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureIndependMultiYield\\_Material](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureIndependMultiYield_Material))

### 3.3.2 PressureDependMultiYield02

È un modello elastico-plastico che consente di simulare la risposta dei terreni che risentono dell'influenza della pressione di confinamento nel loro comportamento. Il modello consente di tener in conto delle seguenti caratteristiche dei terreni: dilatanza (contrazione del volume indotta da taglio o dilatazione) e liquefazione, tipicamente visibile in sabbie o limi durante condizioni di carico monotono o ciclico.

Tale legame costitutivo consente di eseguire analisi accoppiate alle tensioni efficaci, esso è stato usato per modellare la risposta dei paramenti della diga costituiti da sabbia compattata.

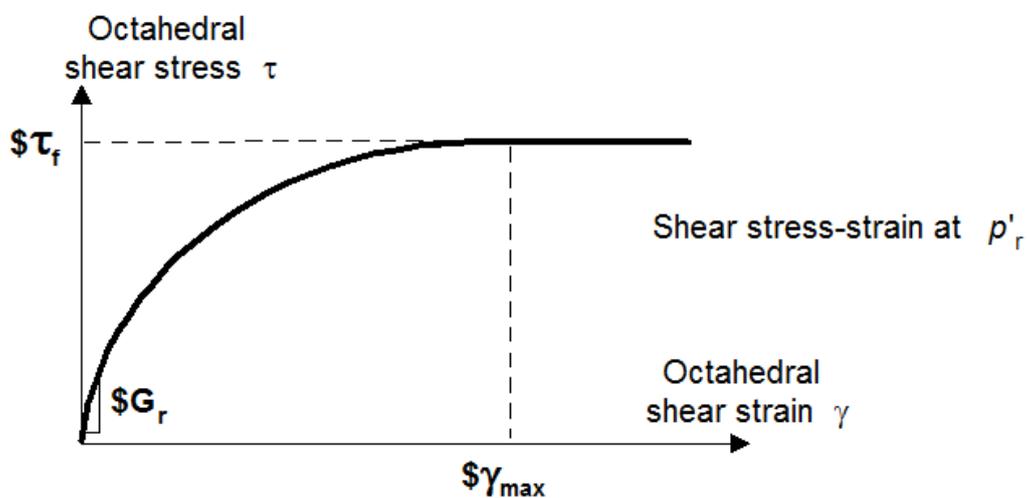


Figura 3.5: legame costitutivo Pressure Depend MultiYield (OpenSees Wiki: [https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureDependMultiYield02\\_Material](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureDependMultiYield02_Material))

Esso ha la seguente sintassi in opensees:

```
nDMaterial PressureDependMultiYield02 $tag $nd $rho $refShearModul
$refBulkModul $frictionAng $peakShearStra $refPress $pressDependCoe
$PTAng $contrac1 $contrac3 $dilat1 $dilat3 <$noYieldSurf=20 <$r1 $Gs1 ...>
$contrac2=5. $dilat2=3. $liquefac1=1. $liquefac2=0. $e=0.6 $cs1=0.9 $cs2=0.02
$cs3=0.7 $pa=101 <$c=0.1>>
```

Il significato dei parametri presenti nella formula sovrastante sono riportati nella tabella di seguito riportata.

<b>Rho</b>	Saturated soil mass density.
<b>refShearModul (Gr)</b>	Reference low-strain shear modulus, specified at a reference mean effective confining pressure refPress of p'r (see below).
<b>refBulkModul (Br)</b>	Reference bulk modulus, specified at a reference mean effective confining pressure refPress of p'r (see below).
<b>frictionAng (Φ)</b>	Friction angle at peak shear strength, in degrees.
<b>peakShearStra (γmax)</b>	An octahedral shear strain at which the maximum shear strength is reached, specified at a reference mean effective confining pressure refPress of p'r (see below). Octahedral shear strain is defined as: $\gamma = \frac{2}{3} \left[ (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{zz})^2 + 6\varepsilon_{xy}^2 + 6\varepsilon_{yz}^2 + 6\varepsilon_{zx}^2 \right]^{1/2}$
<b>refPress (p'r)</b>	Reference mean effective confining pressure at which Gr, Br, and γmax are defined.
<b>pressDependCoe (d)</b>	A positive constant defining variations of G and B as a function of instantaneous effective confinement p': $G = G_r \left( \frac{p'}{p'_r} \right)^d \quad B = B_r \left( \frac{p'}{p'_r} \right)^d$
<b>PTAng (ΦPT)</b>	Phase transformation angle, in degrees.
<b>Contra</b>	A non-negative constant defining the rate of shear-induced volume decrease (contraction) or pore pressure buildup. A larger value corresponds to faster contraction rate.
<b>dilat1, dilat2</b>	Non-negative constants defining the rate of shear-induced volume increase (dilation). Larger values correspond to stronger dilation rate.
<b>liquefac1, liquefac2, liquefac3</b>	Parameters controlling the mechanism of liquefaction-induced perfectly plastic shear strain accumulation, i.e., cyclic mobility. Set liquefac1 = 0 to deactivate this mechanism altogether. liquefac1 defines the effective confining pressure (e.g., 10 kPa in SI units or 1.45 psi in English units) below which the mechanism is in effect. Smaller values should be assigned to denser sands. Liquefac2 defines the maximum amount of perfectly plastic shear strain developed at zero effective confinement during each loading phase. Smaller values should be assigned to denser sands. Liquefac3 defines the maximum amount of biased perfectly plastic shear strain γb accumulated at each loading phase under biased shear loading conditions, as γb=liquefac2 x liquefac3. Typically, liquefac3 takes a value between 0.0 and 3.0. Smaller values should be assigned to denser sands. See the references listed at the end of this chapter for more information.

<b>noYieldSurf</b>	Number of yield surfaces, optional (must be less than 40, default is 20). The surfaces are generated based on the hyperbolic relation defined in Note 2 below.
<b>r, Gs</b>	Instead of automatic surfaces generation (Note 2), you can define yield surfaces directly based on desired shear modulus reduction curve. To do so, add a minus sign in front of noYieldSurf, then provide noYieldSurf pairs of shear strain ( $\gamma$ ) and modulus ratio (Gs) values. For example, to define 10 surfaces: ... -10 $\gamma$ 1Gs1 ... $\gamma$ 10Gs10 ... See Note 3 below for some important notes.
<b>E</b>	Initial void ratio, optional (default is 0.6).
<b>cs1, cs2, cs3, pa</b>	Parameters defining a straight critical-state line $e_c$ in $e$ - $p'$ space. If $cs3=0$ , $e_c = cs1 - cs2 \log(p'/pa)$ else (Li and Wang, JGGE, 124(12)), $e_c = cs1 - cs2(p'/pa)^{cs3}$ where $pa$ is atmospheric pressure for normalization (typically 101 kPa in SI units, or 14.65 psi in English units). All four constants are optional (default values: $cs1=0.9$ , $cs2=0.02$ , $cs3=0.7$ , $pa = 101$ kPa).
<b>C</b>	Numerical constant (default value = 0.3 kPa)
<b>contrac3</b>	A non-negative constant reflecting $K\sigma$ effect.
<b>dilat3</b>	A non-negative constant reflecting $K\sigma$ effect.
<b>contrac2</b>	A non-negative constant reflecting dilation history on contraction tendency.
<b>C</b>	Numerical constant (default value = 0.1 kPa)

**Tabella 3.5:** Parametri Pressure Depend MultiYield02 (OpenSees Wiki: [https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureDependMultiYield02\\_Material](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureDependMultiYield02_Material))

Anche in questo caso, risulta essere un modello notevolmente complesso costituito da molti parametri difficili da gestire, per cui gli sviluppatori suggeriscono di usare i seguenti parametri riportati in tabella 3.6. Nel modello sono stati utilizzati i parametri cerchiati in rosso nella figura sottostante.

	Dr=30%	Dr=40%	Dr=50%	Dr=60%	Dr=75%
rho	1.7 ton/m <sup>3</sup> or 1.59x10 <sup>-4</sup> (lbf)(s <sup>2</sup> )/in <sup>4</sup>	1.8 ton/m <sup>3</sup> or 1.685x10 <sup>-4</sup> (lbf)(s <sup>2</sup> )/in <sup>4</sup>	1.9 ton/m <sup>3</sup> or 1.778x10 <sup>-4</sup> (lbf)(s <sup>2</sup> )/in <sup>4</sup>	2.0 ton/m <sup>3</sup> or 1.872x10 <sup>-4</sup> (lbf)(s <sup>2</sup> )/in <sup>4</sup>	2.1 ton/m <sup>3</sup> or 1.965x10 <sup>-4</sup> (lbf)(s <sup>2</sup> )/in <sup>4</sup>
refShearModul (at p' <sub>r</sub> =80 kPa or 11.6 psi)	6x10 <sup>4</sup> kPa or 8.702x10 <sup>3</sup> psi	9x10 <sup>4</sup> kPa or 1.305x10 <sup>4</sup> psi	10x10 <sup>4</sup> kPa or 1.45x10 <sup>4</sup> psi	11x10 <sup>4</sup> kPa or 1.595x10 <sup>4</sup> psi	13x10 <sup>4</sup> kPa or 1.885x10 <sup>4</sup> psi
refBulkModu (at p' <sub>r</sub> =80 kPa or 11.6 psi)	16x10 <sup>4</sup> kPa or 2.321x10 <sup>4</sup> psi (K <sub>0</sub> =0.5)	22x10 <sup>4</sup> kPa or 3.191x10 <sup>4</sup> psi (K <sub>0</sub> =0.47)	23.3x10 <sup>4</sup> kPa or 3.379x10 <sup>4</sup> psi (K <sub>0</sub> =0.45)	24x10 <sup>4</sup> kPa or 3.481x10 <sup>4</sup> psi (K <sub>0</sub> =0.43)	26x10 <sup>4</sup> kPa or 3.771x10 <sup>4</sup> psi (K <sub>0</sub> =0.4)
frictionAng	31	32	33.5	35	36.5
PTAng	31	26	25.5	26	26
peakShearStra (at p' <sub>r</sub> =101 kPa or 14.65 psi)	0.1				
refPress (p' <sub>r</sub> )	101 kPa or 14.65 psi				
pressDependCoe	0.5				
Contrac1	0.087	0.067	0.045	0.028	0.013
Contrac3	0.18	0.23	0.15	0.05	0.0
dilat1	0.	0.06	0.06	0.1	0.3
dilat3	0.0	0.27	0.15	0.05	0.0
e	0.85	0.77	0.7	0.65	0.55

**Tabella 3.6:** Parametri consigliati al variare del tipo di sabbia (OpenSees Wiki: [https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureDependMultiYield02\\_Material](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureDependMultiYield02_Material))

## 3.4 Condizioni al contorno

### 3.4.1 Free-Field columns

Focalizzandosi sulla direzione orizzontale, nel modello è presente una porzione limitata del reale dominio in sito, dunque per rappresentare la risposta in campo libero del terreno circostante sono state aggiunte le free-field columns (vedi fig. 3.5.1).



Figura 3.6: Free-field column

A tale scopo, agli elementi costituenti le free-field columns è stata assegnato uno spessore di 10000 m, molto maggiore rispetto a quello assegnato agli elementi costituenti la mesh interna del modello pari a 1 m, senza alterare le altre caratteristiche del materiale che le compongono. Esse sono state poste ad una distanza di 40 m da entrambi i margini della diga per far sì che non andassero ad influenzare la risposta della diga stessa.

I nodi su entrambi i lati costituenti le free-field columns sono stati vincolati insieme usando il comando equalDOF (vedi fig. 3.5.2), per creare condizioni al contorno periodiche (Christopher McGann e Pedro Arduino, University of Washington)

```
equalDOF 4077 4066 1 2
equalDOF 4078 4056 1 2
equalDOF 4078 4067 1 2
equalDOF 4079 4068 1 2
equalDOF 4080 4058 1 2
equalDOF 4080 4069 1 2
equalDOF 4081 4070 1 2
equalDOF 4082 4060 1 2
equalDOF 4082 4071 1 2
equalDOF 4083 4072 1 2
equalDOF 4084 4062 1 2
equalDOF 4084 4073 1 2
equalDOF 4085 4074 1 2
equalDOF 4086 4064 1 2
equalDOF 4086 4075 1 2
equalDOF 4087 4076 1 2
```

Figura 3.7: Sintassi comando equalDOF

### 3.4.2 Lysmer-Kuhlemeyer dashpot

Come detto nel precedente paragrafo, il modello numerico realizzato rappresenta solo una piccola porzione della reale dimensione del dominio. Dunque, per rendere la modellazione il più possibile rappresentativa della realtà è stato utilizzato un Lysmer-Kuhlemeyer dashpot nel nodo in basso a destra per simulare la dissipazione di energia che avviene nel terreno sottostante il modello. Esso è stato posizionato nel nodo in basso a destra del modello alla quota -25 m, poiché a tale quota è stata ipotizzata la presenza del bedrock, non avendo dati a disposizione per conoscere l'esatta posizione.

Il Lysmer-Kuhlemeyer dashpot è stato definito mediante l'utilizzo di uno specifico elemento a lunghezza nulla chiamato "zero-length element" avente una legge costitutiva di tipo viscoso.

La legge costitutiva di questo materiale necessita della definizione di un opportuno coefficiente "c", dato dal prodotto della densità del materiale sottostante il modello per la velocità delle onde di taglio  $V_s$  dello stesso (Joyner e Chen, 1975).

Esso, oltre a simulare la dissipazione di energia, consente di applicare l'input dinamico al modello come storia di velocità. Per far sì che il carico applicato sia equivalente a quello reale, il coefficiente c viene moltiplicato per l'area di base del modello, tenendo anche conto dello spessore delle free-field columns.

```
# define dashpot nodes
node 4187 202.150 -25.000
node 4188 202.150 -25.000

# define fixities for dashpot nodes
fix 4187 1 1
fix 4188 0 1

# define equal DOF for dashpot and base soil node
equalDOF 1 4188 1
puts "Finished creating dashpot nodes and boundary conditions..."

# define dashpot material
set baseArea 500217.15
set dashpotCoeff 2500.00
uniaxialMaterial Viscous 5 [expr $dashpotCoeff*$baseArea] 1

# define dashpot element
element zerolength 972 4187 4188 -mat 5 -dir 1
puts "Finished creating dashpot material and element..."
```

Figura 3.8: Definizione del Lysmer-Kuhlemeyer dashpot in OpenSees

Lo “zero length-element” può spostarsi solo lungo la direzione orizzontale ed una sua estremità è fissa dunque non può subire spostamenti, mentre l'altra estremità è vincolata al nodo alla base del modello mediante il comando EqualDOF, tale nodo risulta anche essere il nodo master del comando.

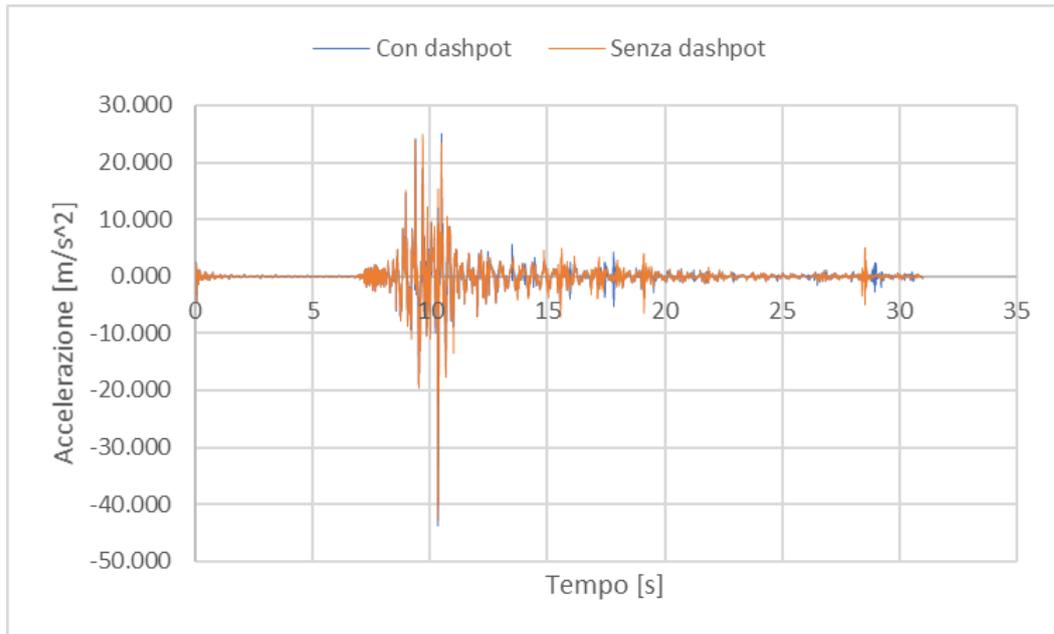
### 3.4.3 Verifica dashpot

Ai bordi del modello non sono stati utilizzati i dashpot per andare a simulare l'assorbimento di energia in tali punti, per cui si è proceduto ad una verifica di tale condizione.

Nella figura sottostante è riportato il confronto tra il modello con i dashpot come condizioni al contorno laterali ed il medesimo modello senza dashpot. Il confronto è stato fatto mediante lo spettro di risposta in termini di accelerazione calcolato nel punto centrale del coronamento e la storia di accelerazione sempre registrata nel medesimo punto.



Figura 3.9: Confronto tra gli spettri calcolati per i due modelli



**Figura 3.10:** Confronto tra le accelerazioni misurate nei due modelli

Si può osservare come la risposta del modello non cambi per cui non si commettono errori nel non utilizzare i dashpot ai bordi del modello.

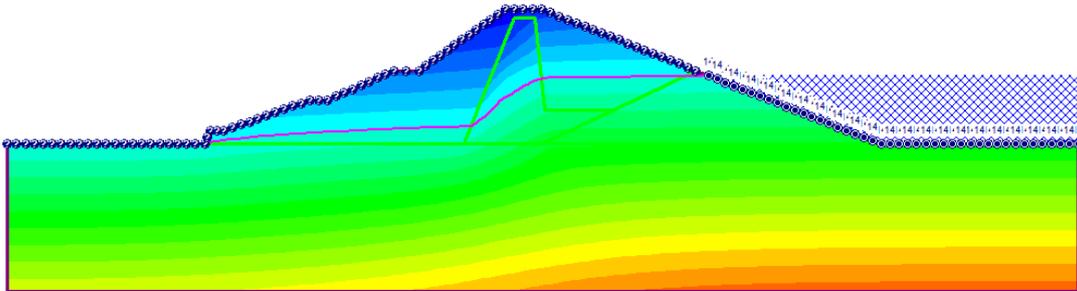
#### 3.4.4 Vincoli alla base del modello

Ai nodi costituenti la base del modello sono state applicate due tipologie di vincolo:

- È stato impedito lo spostamento nella direzione verticale di questi punti;
- Nella direzione orizzontale i punti sono liberi di muoversi, ma devono avere tutti lo stesso spostamento.

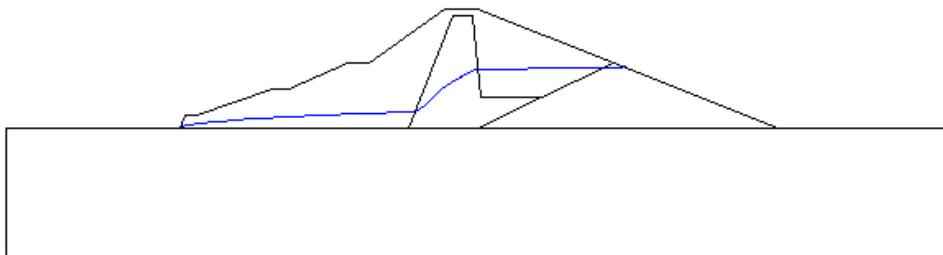
### 3.4.5 Superficie piezometrica e livello di invaso

Poiché il codice non consente di determinare la superficie piezometrica all'interno della diga, essa è stata calcolata mediante il software Phase2.



**Figura 3.11:** Esempio di calcolo della falda nel modello

Tale software consente poi di esportare la geometria dell'intero modello, compresa la superficie piezometrica in AutoCAD. Quest'ultima è stata quindi approssimata, per motivi pratici, a tre spezzate. Misurando la lunghezza e la pendenza dei vari tratti è stata introdotta in Opensees.



**Figura 3.12:** Modello esportato in AutoCAD

Per posizionare la superficie piezometrica all'interno del modello in Opensees, è stato bloccato il terzo grado di libertà dei nodi posti ai vertici degli elementi, cioè quelli con tre gradi di libertà, sopra la superficie piezometrica.

```
fix 2656 0 0 1
fix 2568 0 0 1
fix 2619 0 0 1
fix 2516 0 0 1
```

**Figura 3.13:** Esempio di come sono stati vincolati i nodi sopra la superficie piezometrica

È necessario inoltre introdurre l'acqua dell'invaso per tener conto del suo effetto dinamico durante l'analisi. Ciò è stato realizzato assegnando ad ogni nodo sul contorno della mesh a contatto con l'acqua (sotto il livello di invaso) la massa della colonna di acqua agente sul nodo stesso, in tal modo non sono state alterate le tensioni efficaci.

La massa assegnata, ad ogni nodo, è stata aggiunta nel codice mediante il comando `mass`. Tale massa è data dal prodotto di metà della distanza tra il nodo considerato e quelli adiacenti, l'altezza della colonna di acqua sovrastante il nodo e lo spessore dell'elemento. Nel caso di nodi posizionati lungo una superficie orizzontale, su di essi agirà la massa solo lungo la direzione verticale mentre per i nodi lungo il segmento inclinato, la massa così calcolata è stata scomposta nelle sue due componenti orizzontale e verticale.

### 3.5 Validazione modello dimensionale

È stata eseguita una validazione delle principali grandezze del modello mediante il confronto tra i risultati ottenuti da analisi dinamiche monodimensionali eseguite con Opensees e Strata, considerando la verticale situata ai piedi della diga.

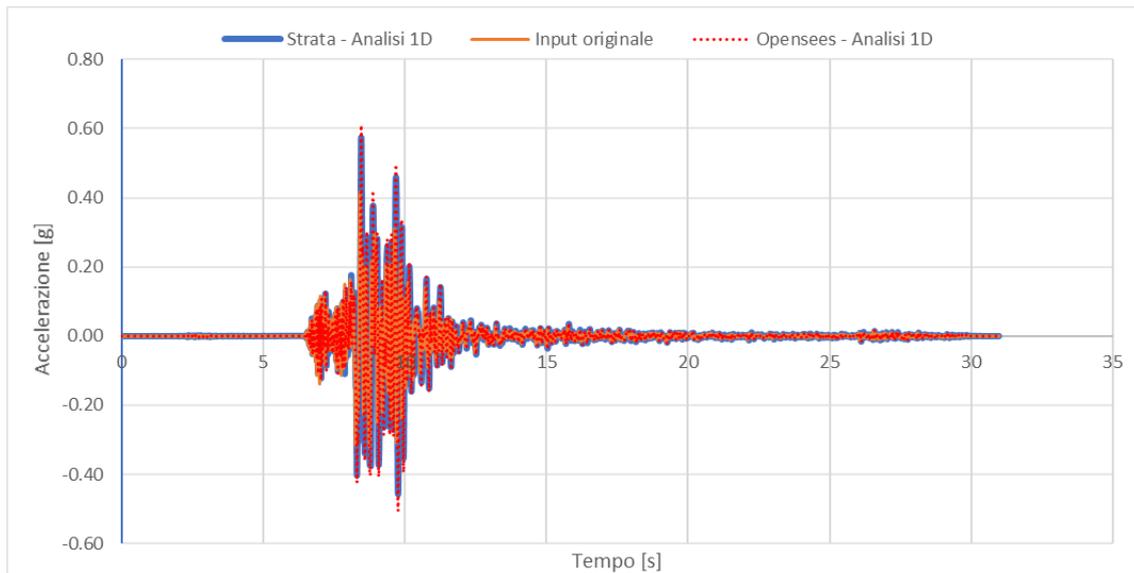
Strata è un software sviluppato da A. R. Kottke e E. M. Rathje (Università del Texas, Austin) che consente di eseguire la risposta sismica locale di un deposito monodimensionale, tramite analisi elastiche lineari, visco-elastiche lineari e visco-elastiche lineari equivalenti.

Il confronto è stato fatto eseguendo analisi elastiche lineari. Le proprietà assegnate ai materiali in tale analisi sono riportate in tabella 3.7.

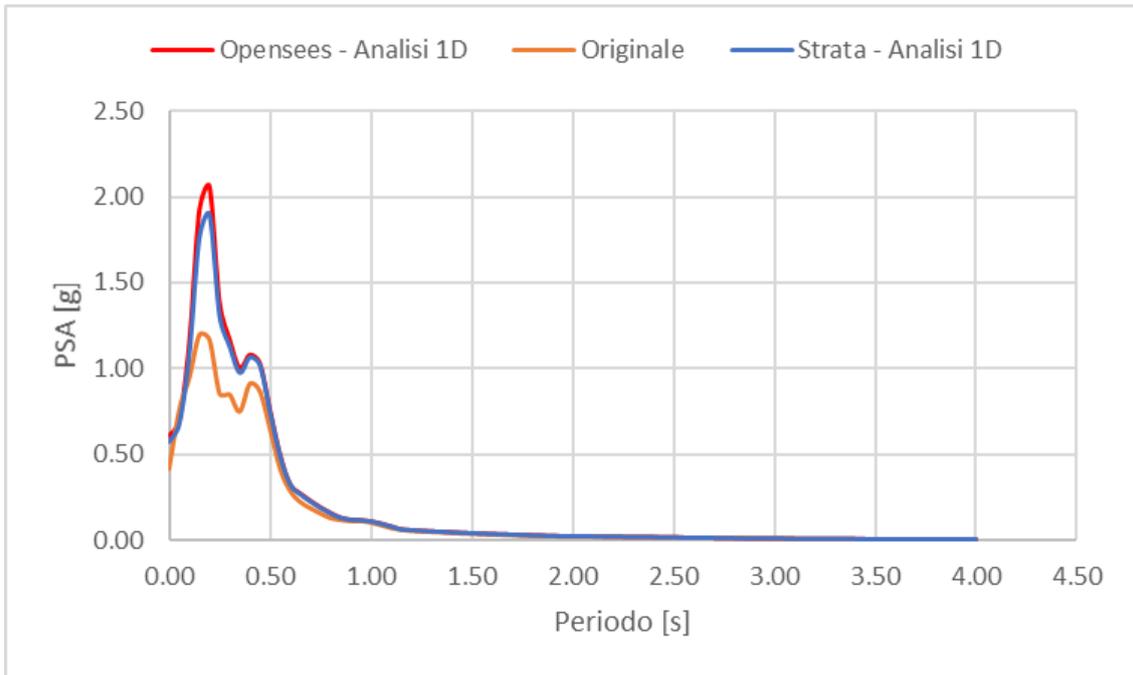
	Densità [kN/m <sup>3</sup> ]	Vs[m/s]
Fondazione	18	630
Bedrock	25	1000

**Tabella 3.7:** Proprietà dei materiali

Il confronto tra le due analisi è stato fatto in termini di accelerazioni valutate in superficie e di spettri di risposta in accelerazione.



**Tabella 3.8:** Confronto in termini di accelerazione in superficie

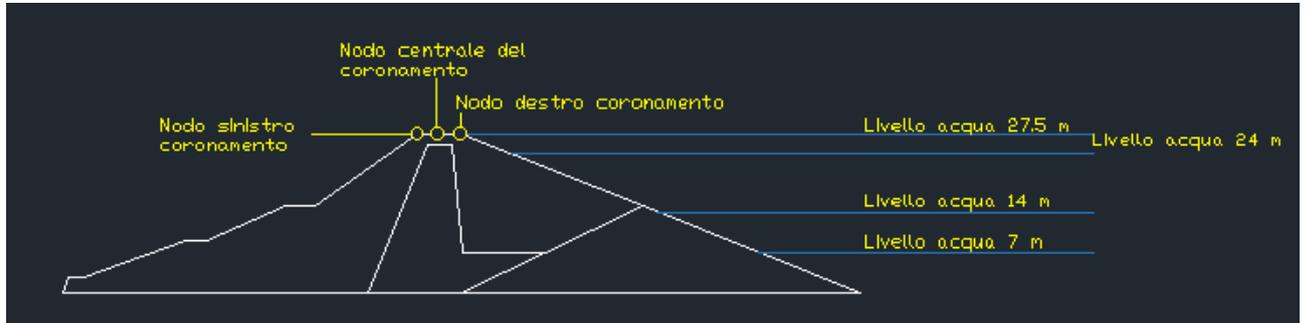


**Tabella 3.9:** Confronto in termini di spettro di risposta

Si può concludere affermando che il confronto tra le due analisi risulta sufficiente ed appropriato per poter ritenere il modello validato.

## 4 Risultati

I punti scelti per il monitoraggio degli spostamenti della diga sono stati l'estremo sinistro il punto centrale e l'estremo destro del coronamento (vedi fig. sotto).



**Figura 4.1:** Rappresentazione schematica del modello

Le analisi sono state condotte facendo variare il livello d'acqua dell'invaso, in particolare sono stati scelti 5 livelli:

- volume invasato nullo;
- livello invasato pari a 7 m;
- livello invasato pari a 14 m;
- livello invasato pari a 24 m;
- livello invasato pari a 27.5 m;

Tra i vari livelli considerati, il livello di invasato pari a 24 m risulta essere quello di esercizio mentre il livello pari a 27.5 m non può essere mai raggiunto nella realtà in quanto la quota di massimo invasato è imposta a 25 m. In via cautelativa è stato comunque considerato tale livello poiché, seppur remota, potrebbe verificarsi la condizione di mal funzionamento degli organi di regolazione del livello di invasato. Si è comunque notato che a tale livello non sempre corrispondono degli effetti peggiorativi.

Il modello è stato sottoposto a 5 differenti sismi aventi le caratteristiche riportate nella tabella sottostante.

	PGA [cm/s <sup>2</sup> ]	PGV [cm/s <sup>2</sup> ]	PGD [cm/s <sup>2</sup> ]
Sisma 1	584.331	21.024	2.177911
Sisma 2	550.443	19.353	2.380265
Sisma 3	340.639	9.156	0.521158
Sisma 4	304.539	5.499	0.313849
Sisma 5	301.849	13.076	3.022780

**Tabella 4.1:** Tabella contenete parametri dei differenti sismi

Nella lettura dei risultati, uno spostamento verticale negativo comporta un abbassamento, mentre uno spostamento orizzontale negativo implica uno spostamento verso valle cioè la parte sinistra del modello.

Poiché l'interesse di queste analisi sono gli spostamenti finali dei punti di controllo a seguito dei diversi input dinamici, a tutti i risultati è stata sottratta l'aliquota di spostamento dovuta alla fase dell'analisi gravitazionale.

Gli spostamenti generati in tale fase sono dovuti alla costruzione della diga, dunque non connessi alla risposta dinamica della diga stessa.

#### **4.1 Risposta del modello con diversi livelli di invaso**

In questo paragrafo sono stati confrontati gli spostamenti ottenuti dai modelli con diversi livelli di invaso sottoposti al medesimo terremoto. Come detto precedentemente sono stati utilizzati cinque input dinamici.

Dai risultati riportati nei grafici seguenti è possibile notare come non sia possibile individuare una corrispondenza univoca tra il livello dell'acqua nell'invaso e la risposta dei tre punti del coronamento, sia in termini di spostamento orizzontale e verticale, sia in termini di vettori di spostamento. Si può dunque concludere che non in tutte le analisi condotte è possibile individuare una proporzionalità diretta tra il livello di invaso e l'entità degli spostamenti. Ulteriori studi, mediante anche l'utilizzo di ulteriori input sismici, sarebbero necessari per meglio definire il comportamento dinamico della diga ed indagare quanto la geometria della stessa e la presenza del nucleo impermeabile possano influire sui risultati.

In ogni caso, dall'analisi degli spostamenti dell'intero modello riportati in seguito per tutti i vari input, si nota che l'aumento del livello di invaso ha un effetto molto più marcato sul paramento di monte. Esso è direttamente a contatto con l'acqua dell'invaso, dove si genera

una superficie di scivolamento che parte dal piede e si propaga verso il coronamento della diga. Le dimensioni di tale superficie di scivolamento aumentano all'aumentare del livello di invaso.

	Nodo sinistro		Nodo centrale		Nodo destro	
	liv. acqua	Spost. [m]	liv. acqua	Spost. [m]	liv. acqua	Spost. [m]
sisma 1	0	0.166	0	0.110	0	0.110
	7	0.170	7	0.110	7	0.100
	14	0.170	14	0.110	14	0.110
	24	0.140	24	0.100	24	0.120
	27.5	0.120	27.5	0.092	27.5	0.110
sisma 2	0	0.042	0	0.023	0	0.021
	7	0.042	7	0.025	7	0.022
	14	0.038	14	0.025	14	0.024
	24	0.038	24	0.023	24	0.027
	27.5	0.033	27.5	0.018	27.5	0.032
sisma 3	0	0.028	0	0.018	0	0.019
	7	0.023	7	0.017	7	0.016
	14	0.021	14	0.015	14	0.014
	24	0.018	24	0.013	24	0.018
	27.5	0.023	27.5	0.013	27.5	0.024
sisma 4	0	0.013	0	0.009	0	0.009
	7	0.012	7	0.009	7	0.009
	14	0.011	14	0.009	14	0.008
	24	0.011	24	0.008	24	0.010
	27.5	0.013	27.5	0.008	27.5	0.013
sisma 5	0	0.034	0	0.016	0	0.017
	7	0.031	7	0.016	7	0.017
	14	0.028	14	0.016	14	0.017
	24	0.024	24	0.014	24	0.019
	27.5	0.024	27.5	0.012	27.5	0.023

**Tabella 4.2:** Valori finali del vettore spostamento nei punti di controllo

### 4.1.1 Sisma 1

Si riportano di seguito i risultati ottenuti in termini di spostamenti (complessivi, orizzontali e verticali) dei punti di controllo posti sul coronamento ottenuti al variare del livello di invaso sotto l'azione del sisma 1.

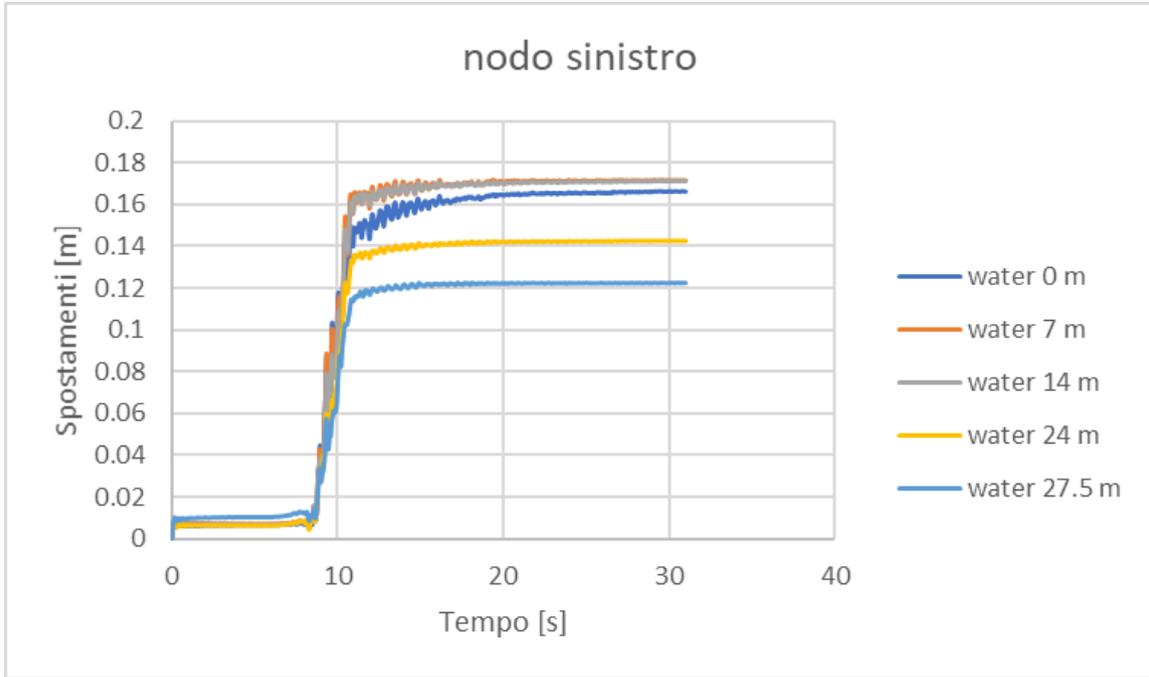


Figura 4.2 Spostamento nodo sinistro

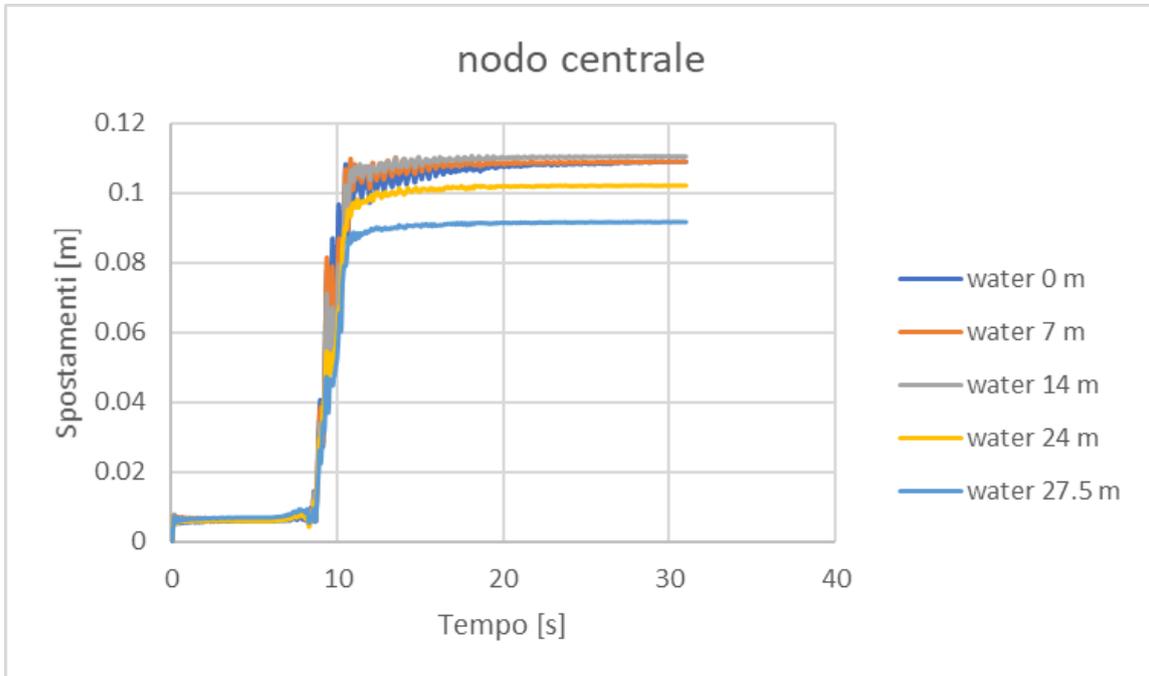
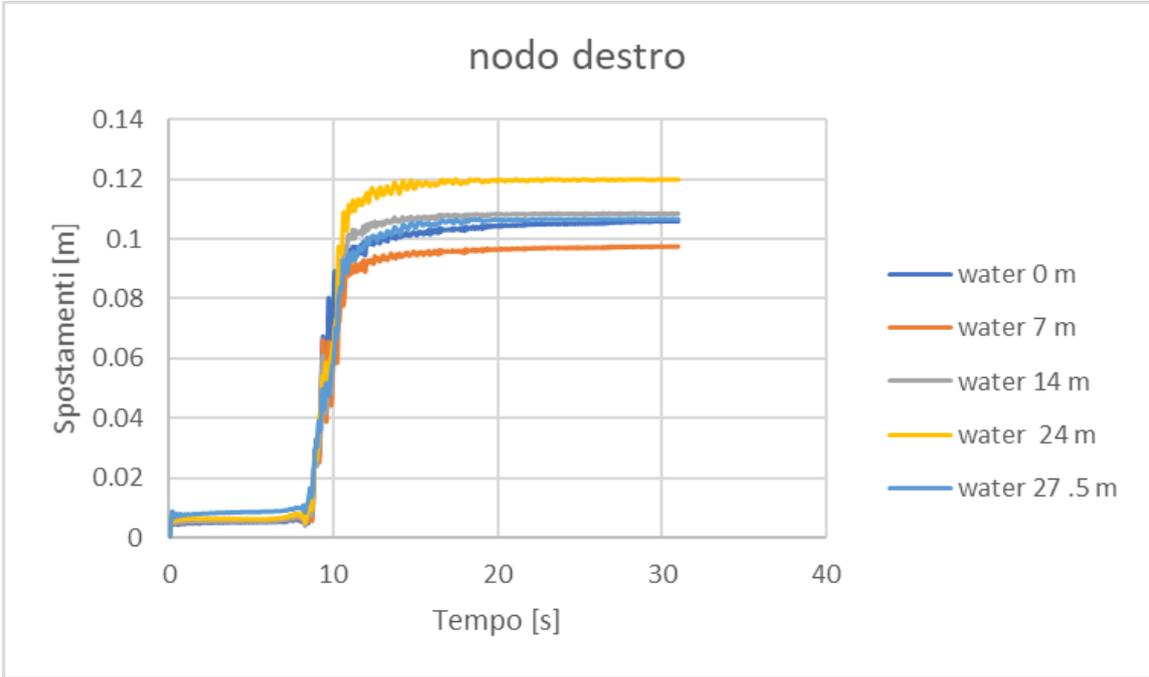
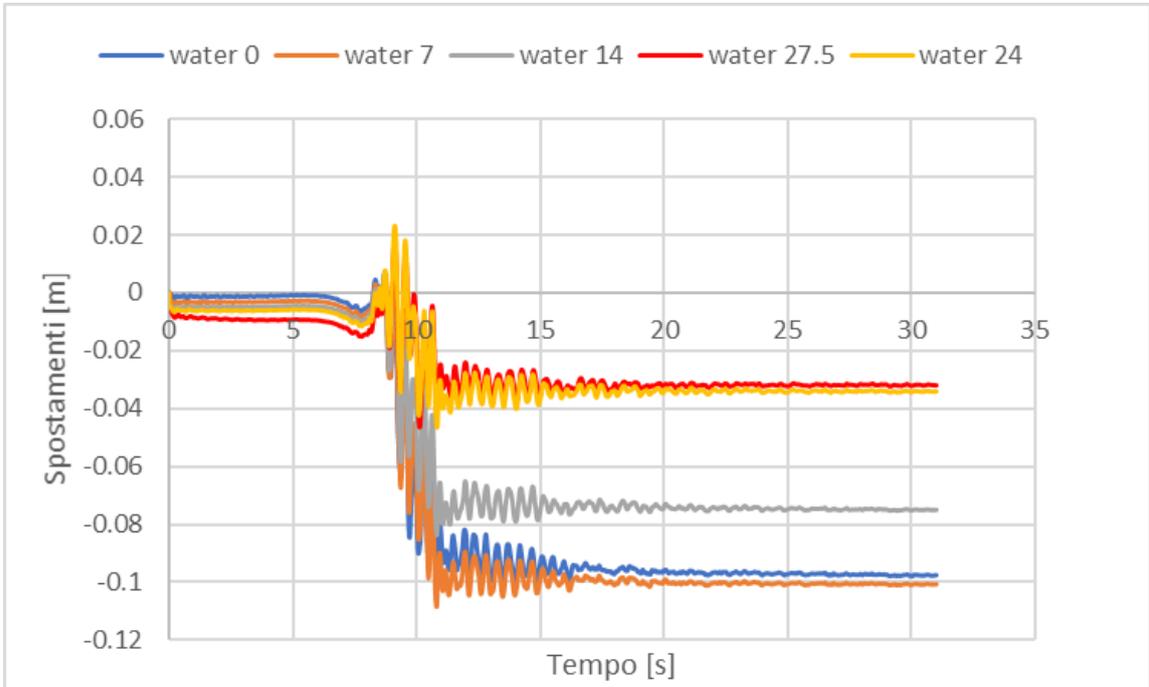


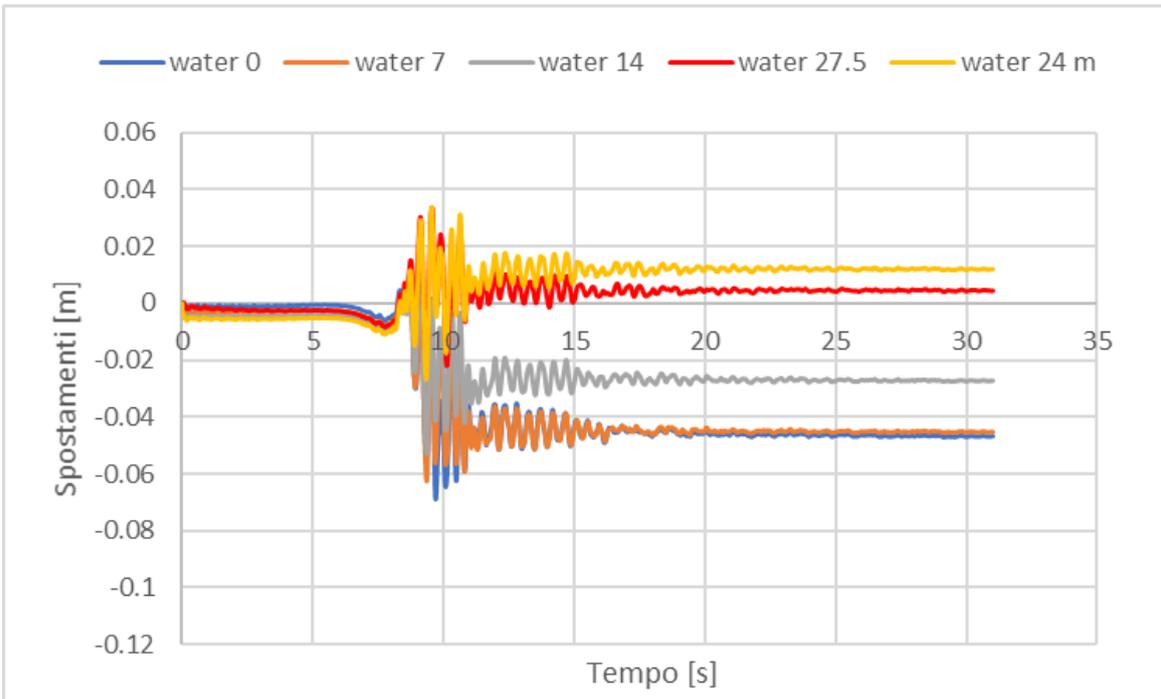
Figura 4.3: Spostamento nodo centrale



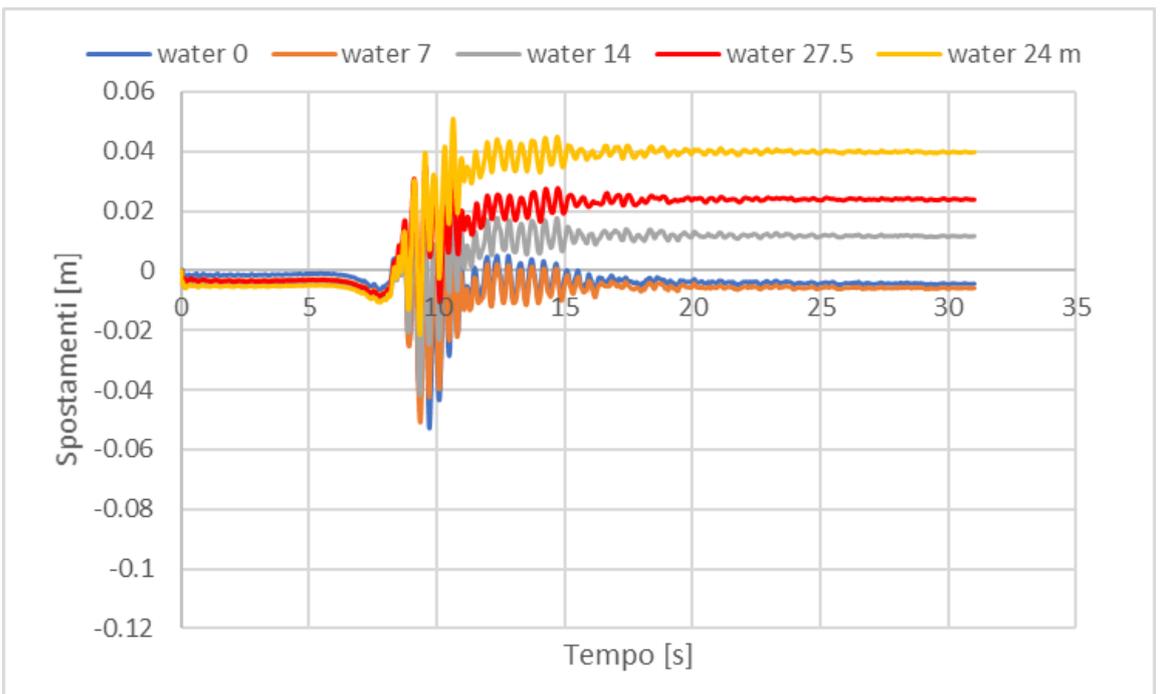
**Figura 4.4:** Spostamento nodo destro



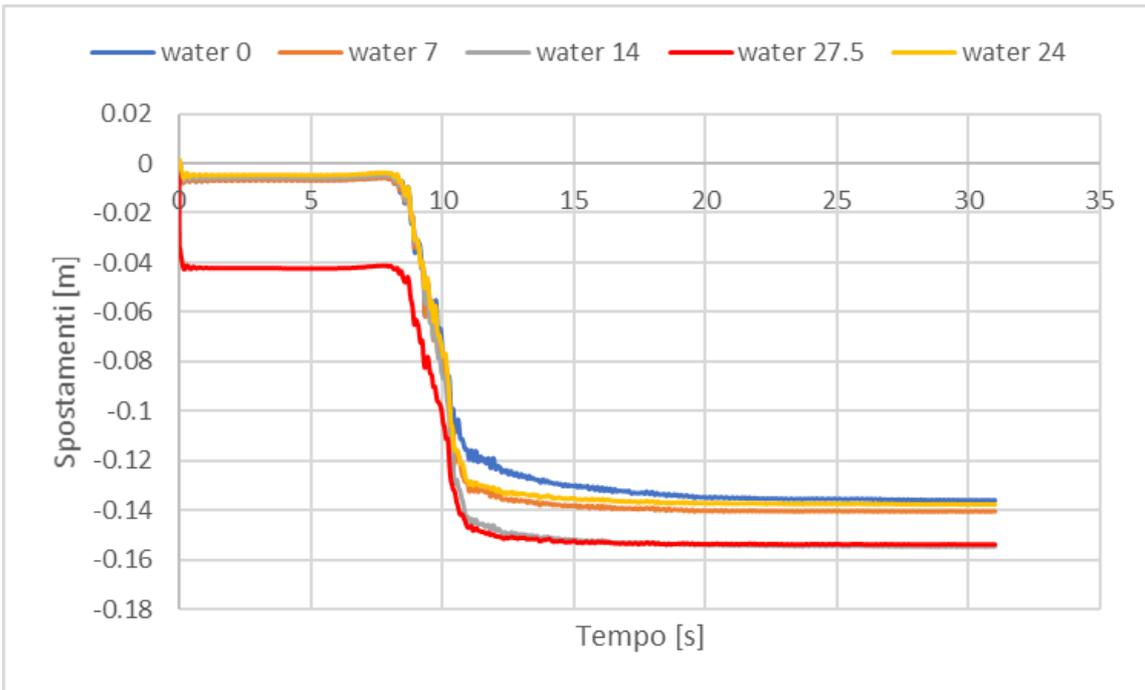
**Figura 4.5:** Spostamento orizzontale nodo sinistro



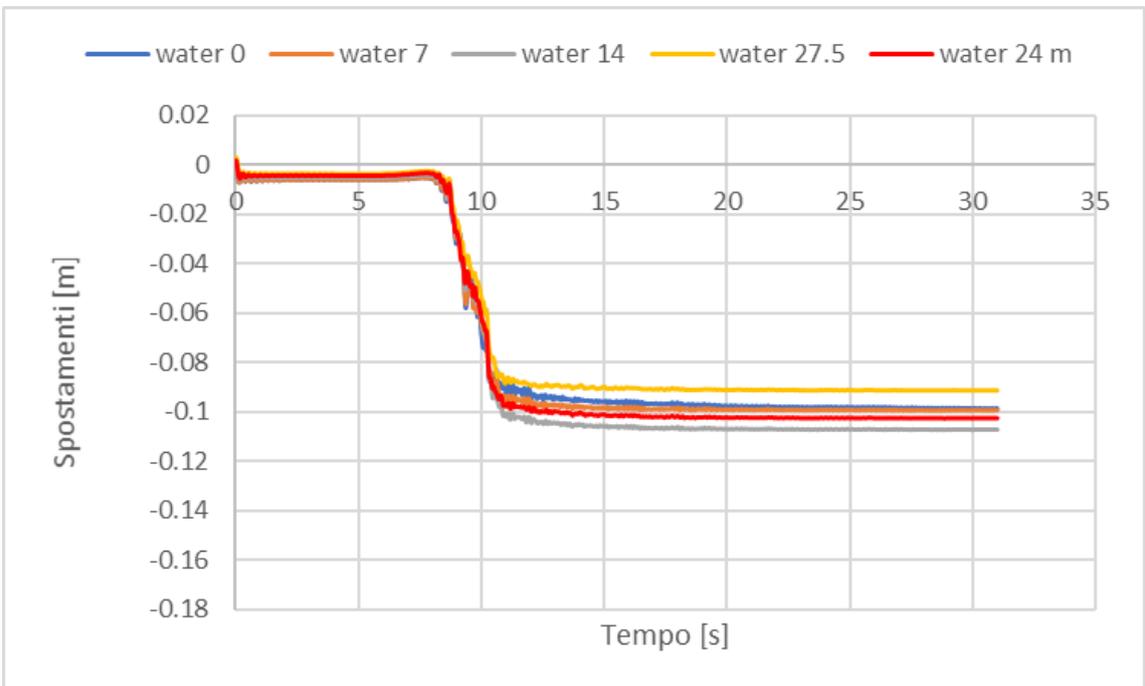
**Figura 4.6:** Spostamento orizzontale nodo centrale



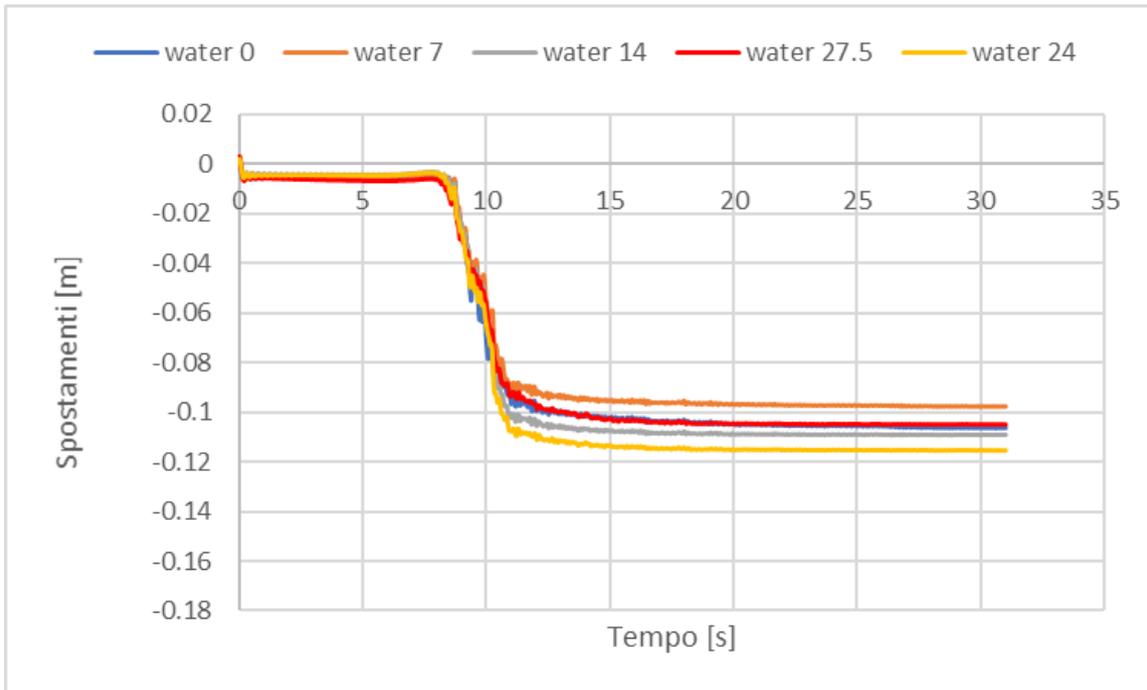
**Figura 4.7:** Spostamento orizzontale nodo destro



**Figura 4.8:** Spostamento verticale nodo sinistro

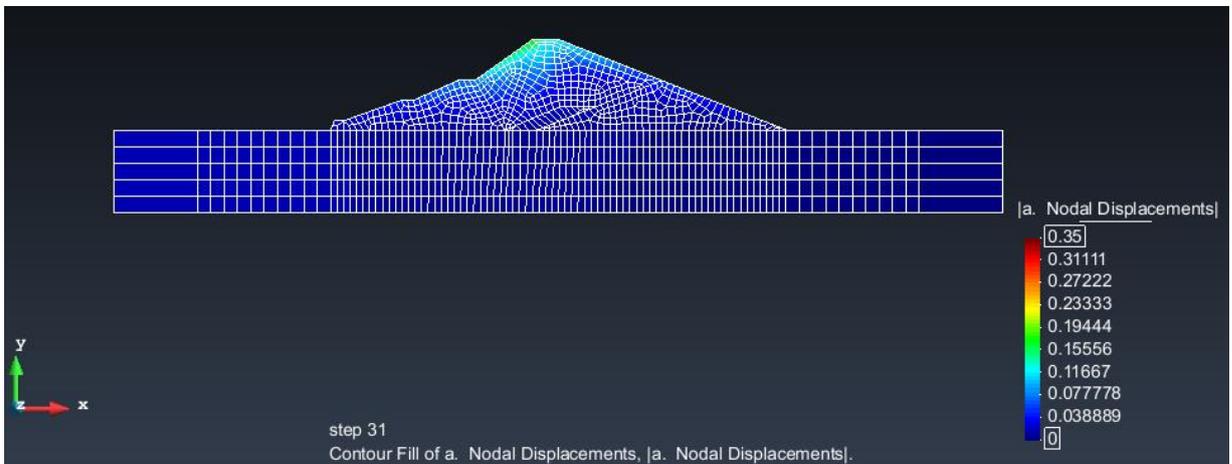


**Figura 4.9:** Spostamento verticale nodo centrale

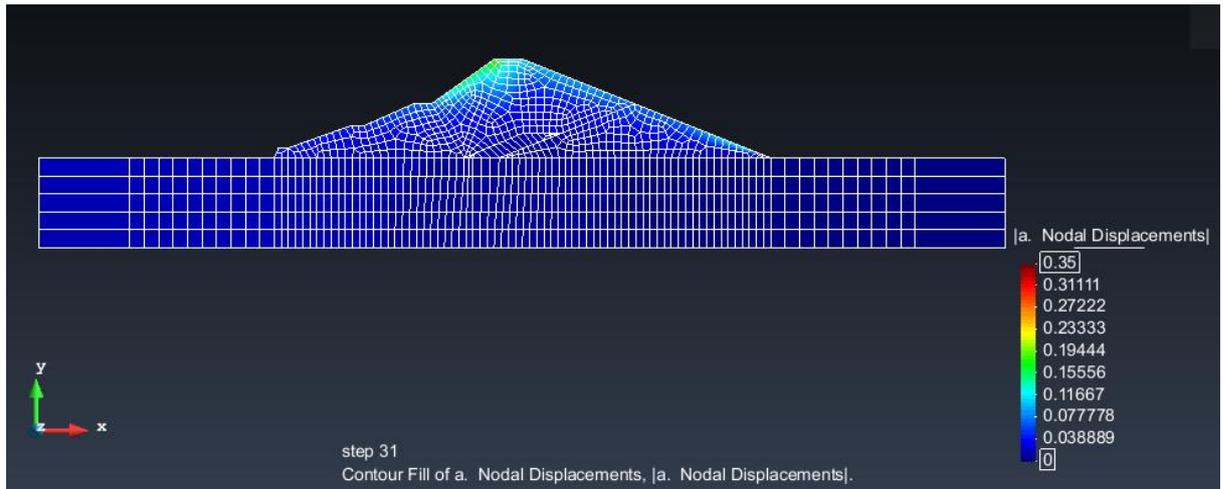


**Figura 4.10:** Spostamento verticale nodo destro

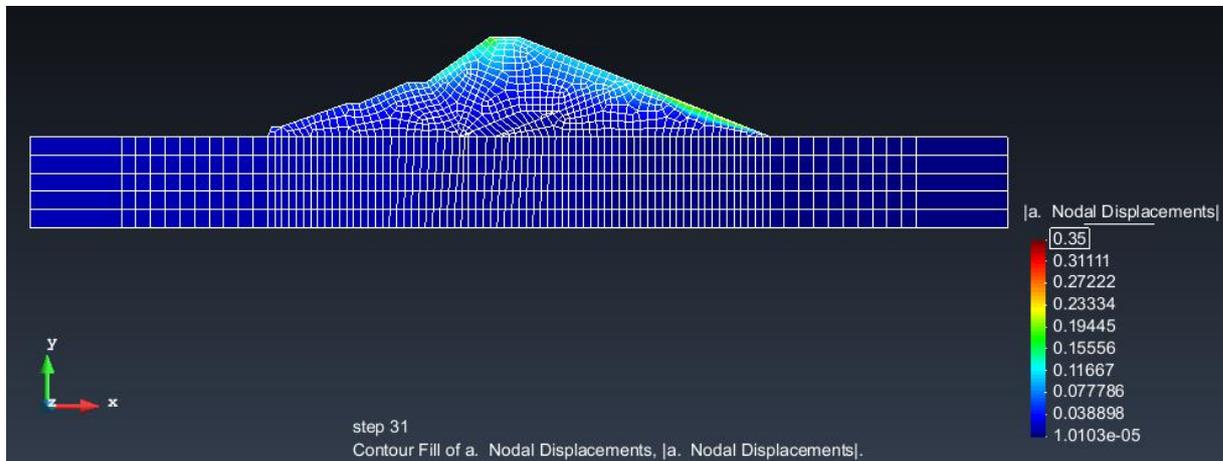
Di seguito si riportano i risultati delle analisi predette in termini di distribuzione degli spostamenti dei nodi mediante la rappresentazione di contour fill e di vettori spostamento.



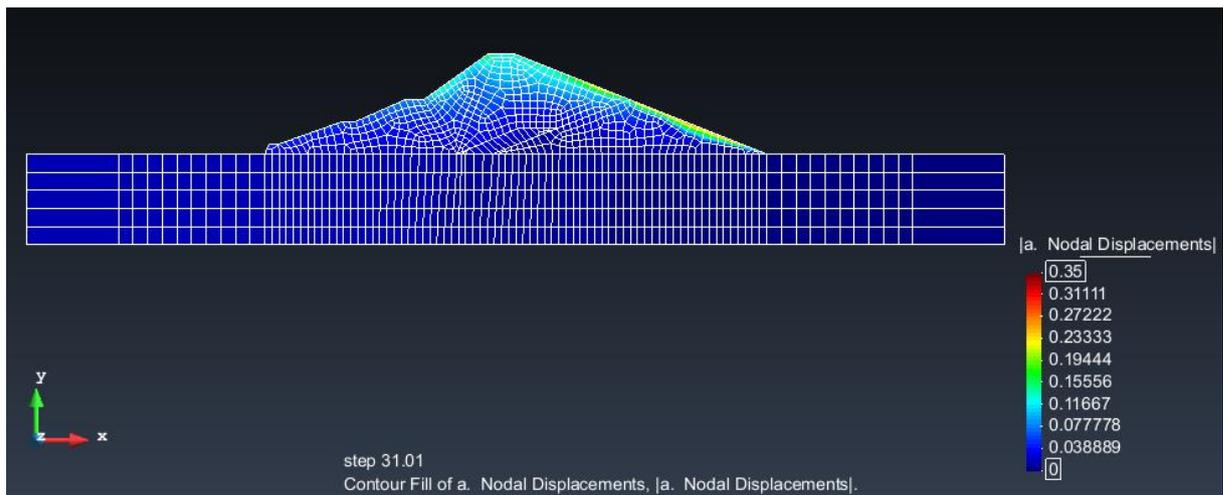
**Figura 4.11:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello d'invaso nullo



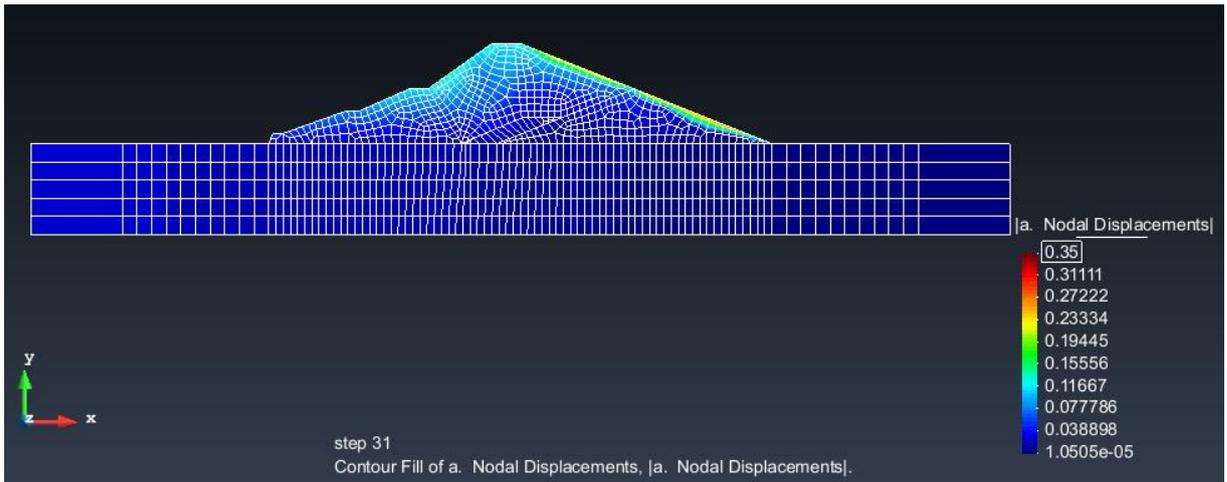
**Figura 4.12:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad in livello d'invaso pari a 7 m



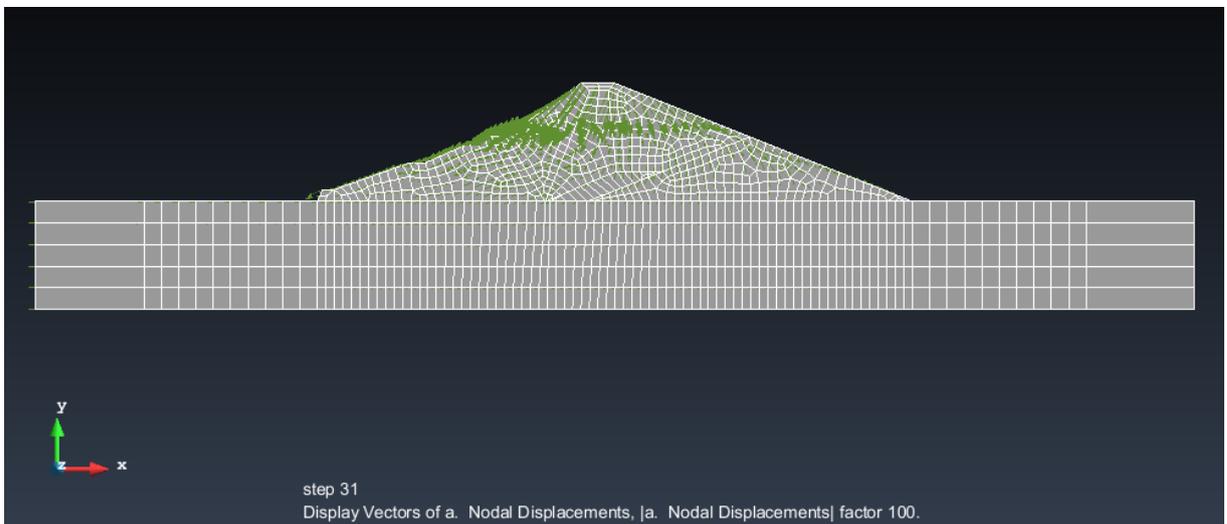
**Figura 4.13:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello d'invaso pari a 14 m



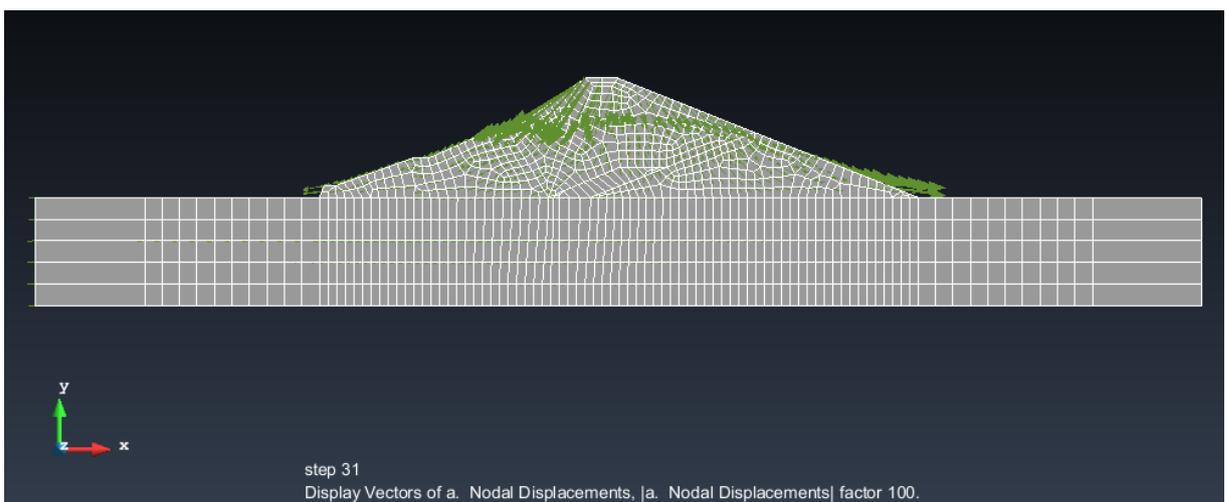
**Figura 4.14:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello d'invaso pari a 24 m



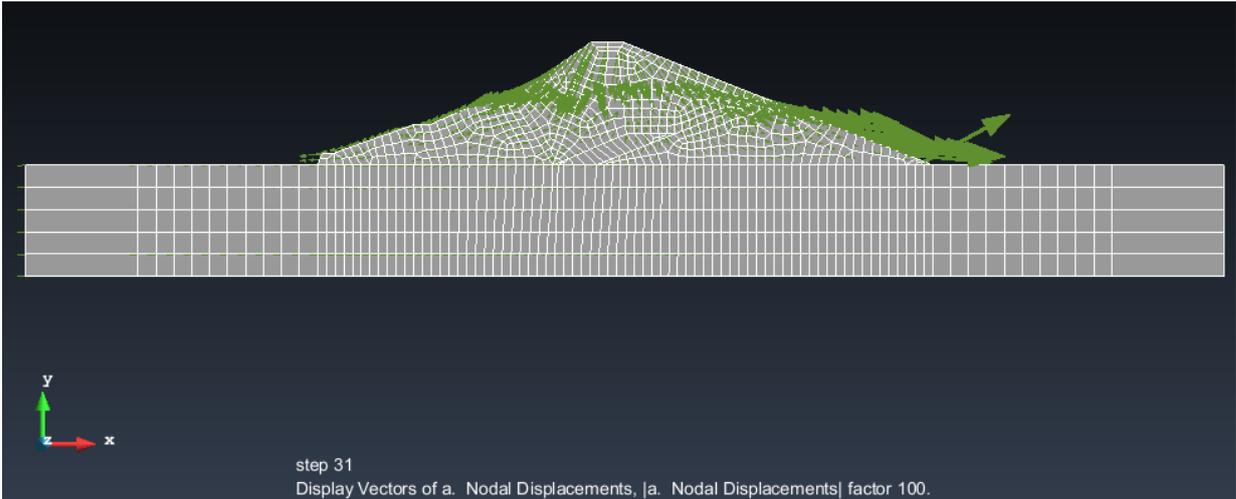
**Figura 4.15:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello d'invaso pari a 27.5 m



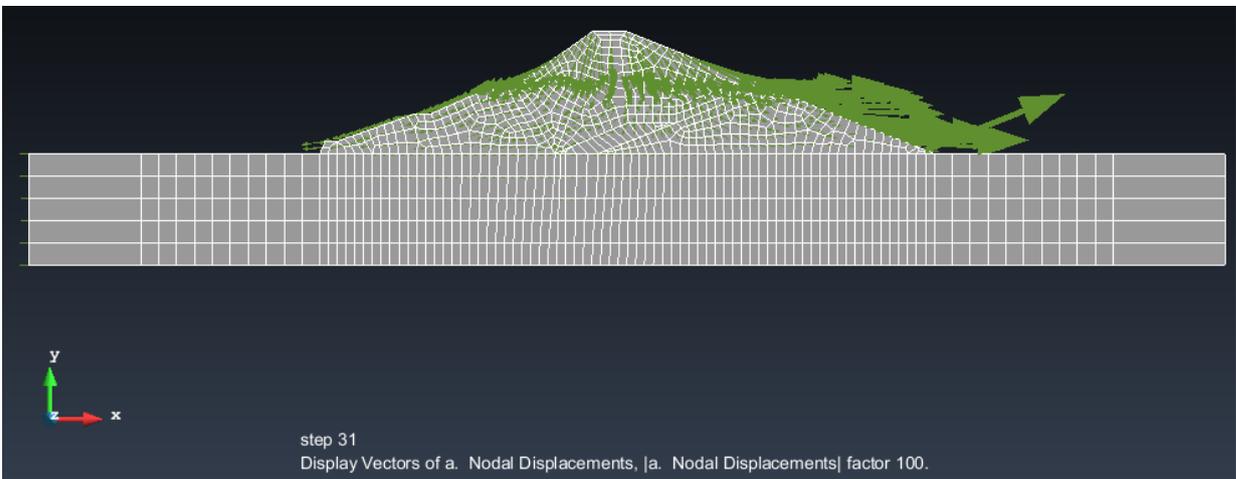
**Figura 4.16:** Vettori di spostamento associati ad un livello di invaso nullo



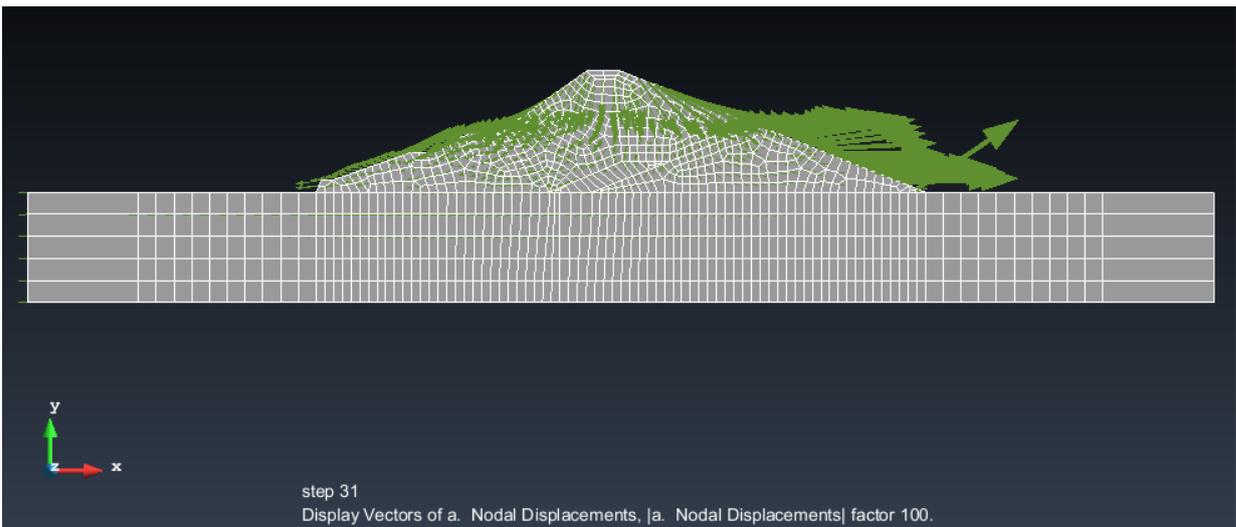
**Figura 4.17:** Valori di spostamento associati ad un livello di invaso di 7 m



**Figura 4.18:** Vettori di spostamento associati ad un livello di invaso pari a 14 m



**Figura 4.19:** Vettori spostamento associato ad un livello di invaso pari a 24 m



**Figura 4.20:** Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 27.5 m

### 4.1.2 Sisma 2

Si riportano di seguito i risultati ottenuti in termini di spostamenti (complessivi, orizzontali e verticali) dei punti di controllo posti sul coronamento ottenuti al variare del livello di invaso sotto l'azione del sisma 2.

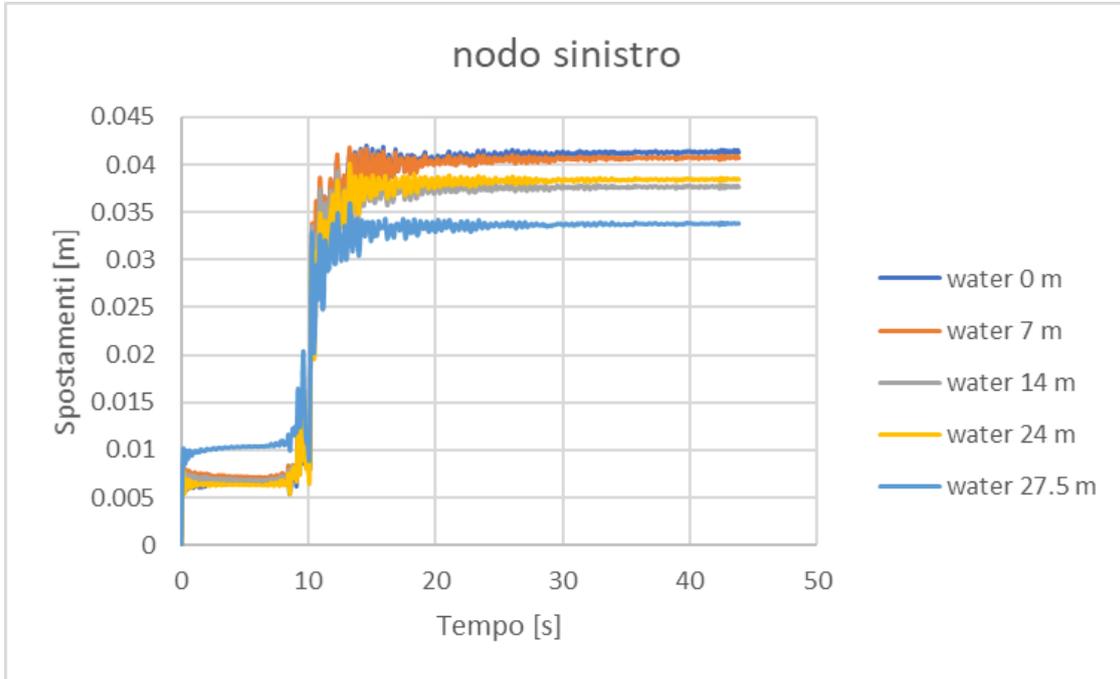


Figura 4.21: Spostamento nodo sinistro

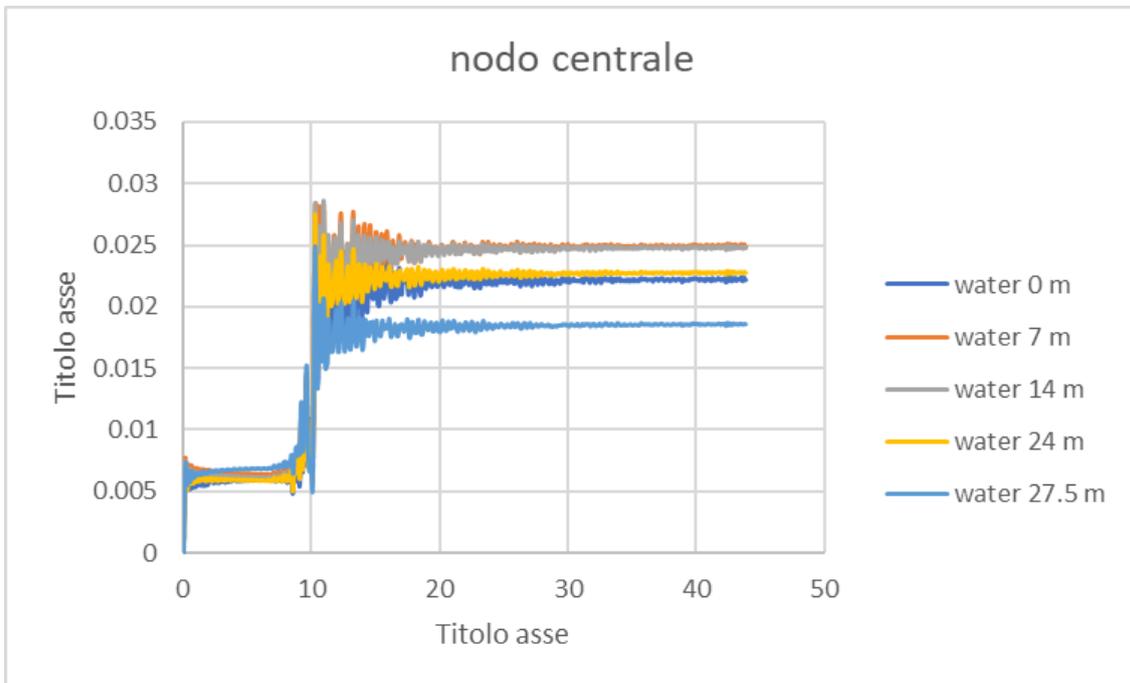


Figura 4.22: Spostamento nodo centrale

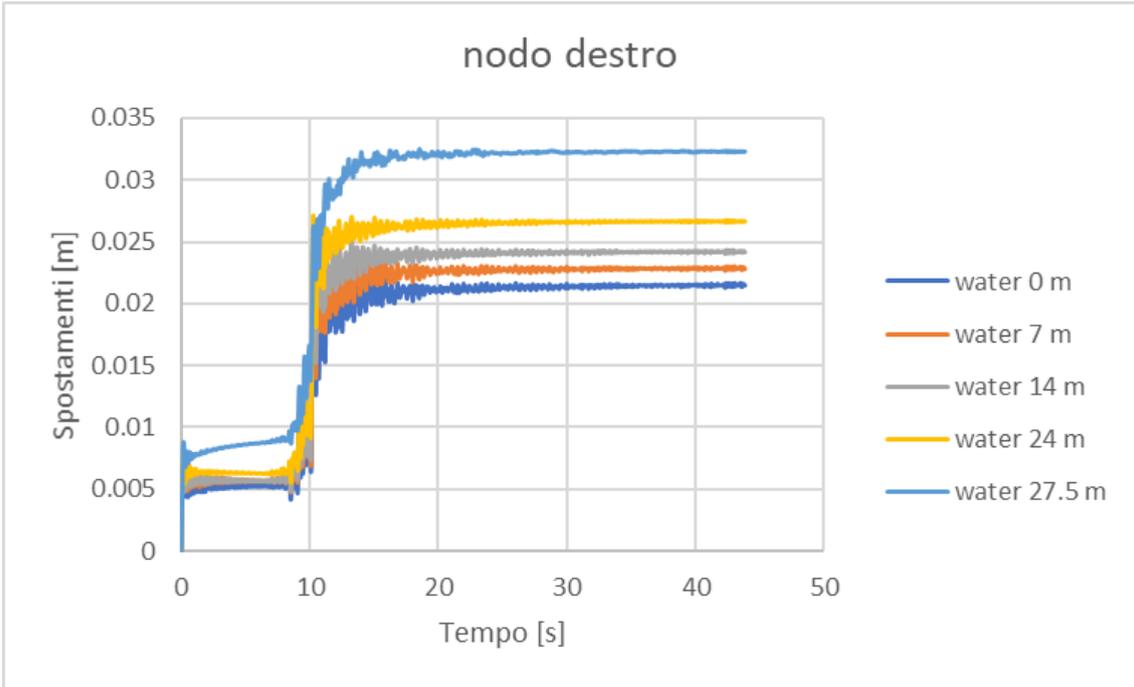


Figura 4.23: Spostamento nodo destro

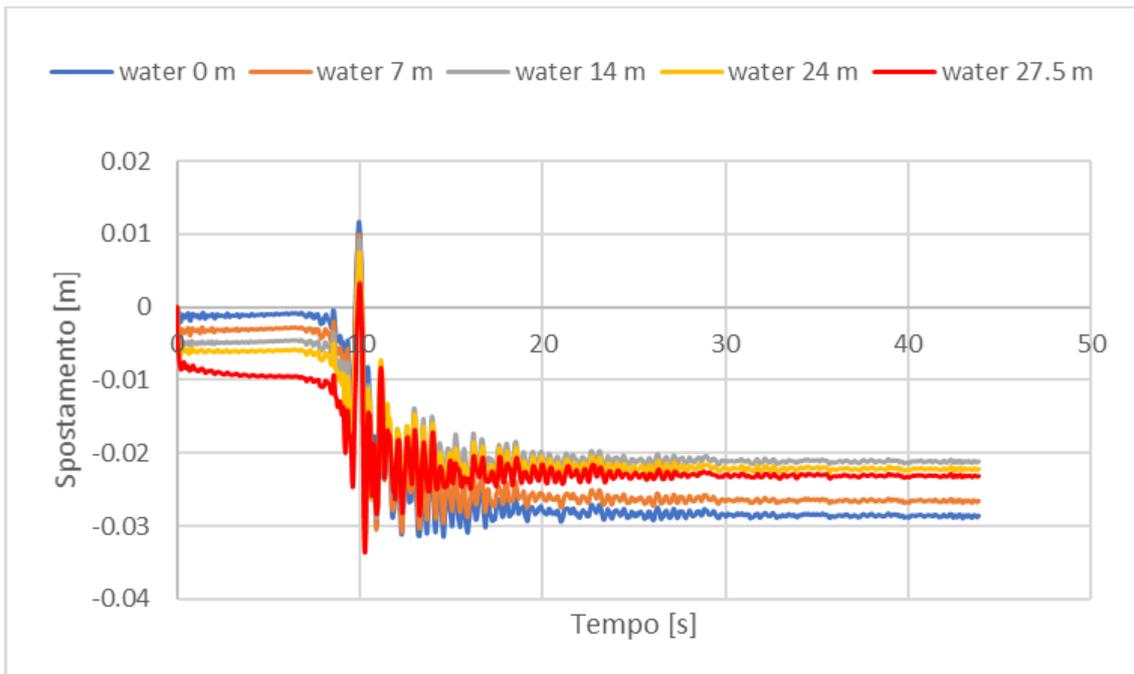
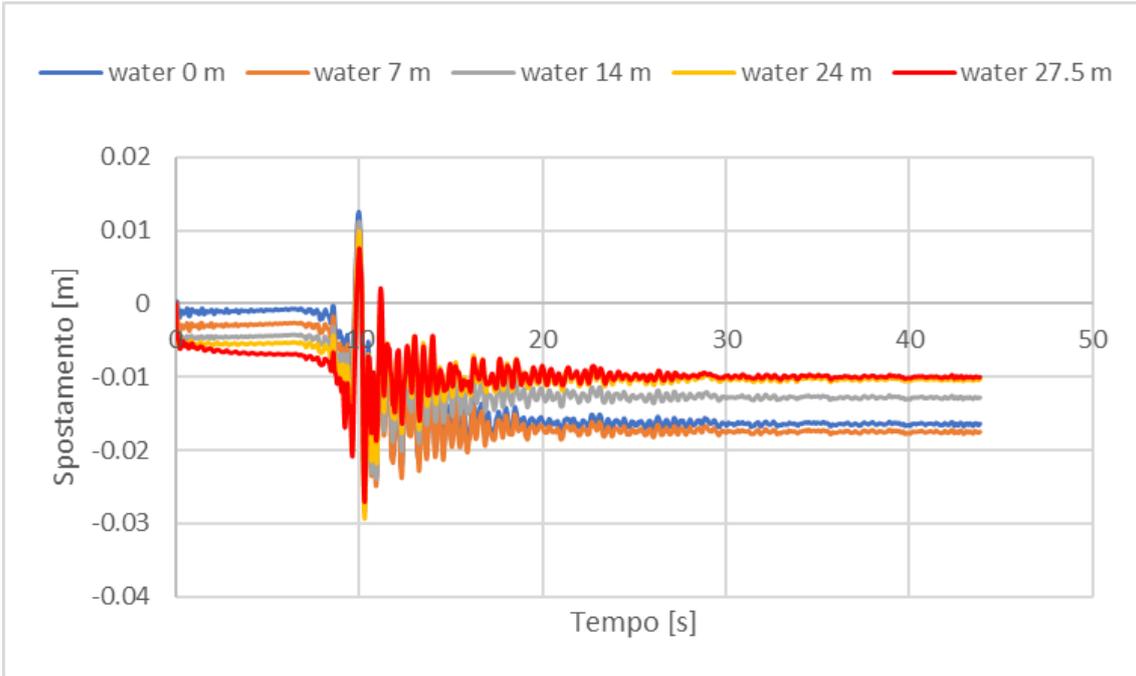
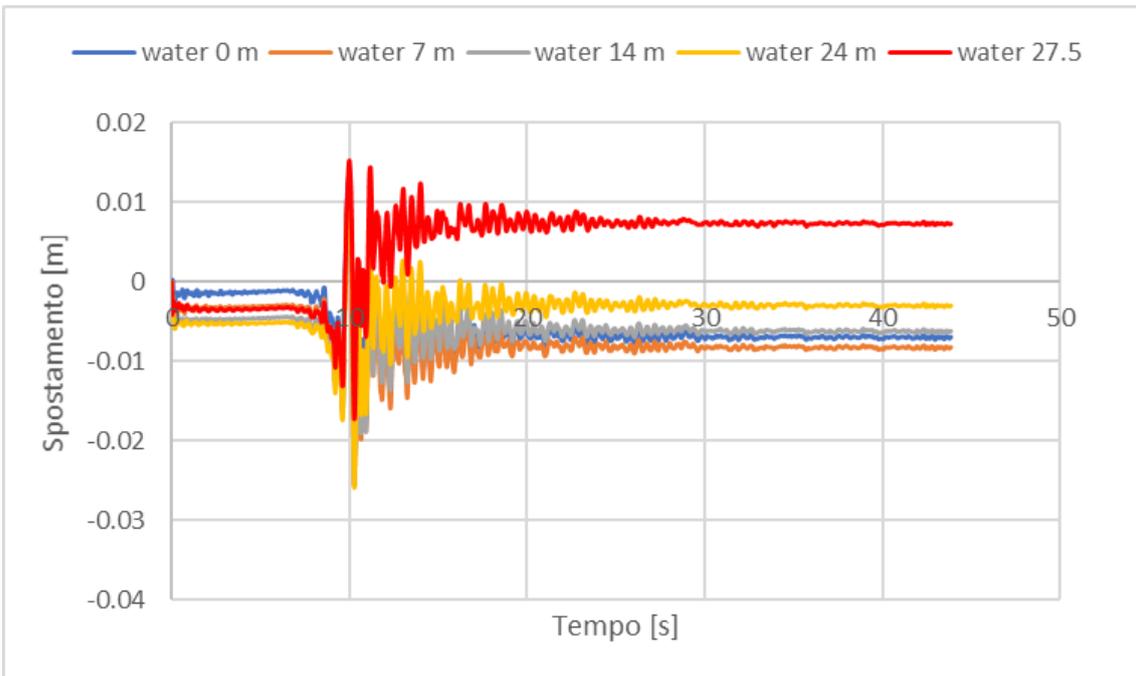


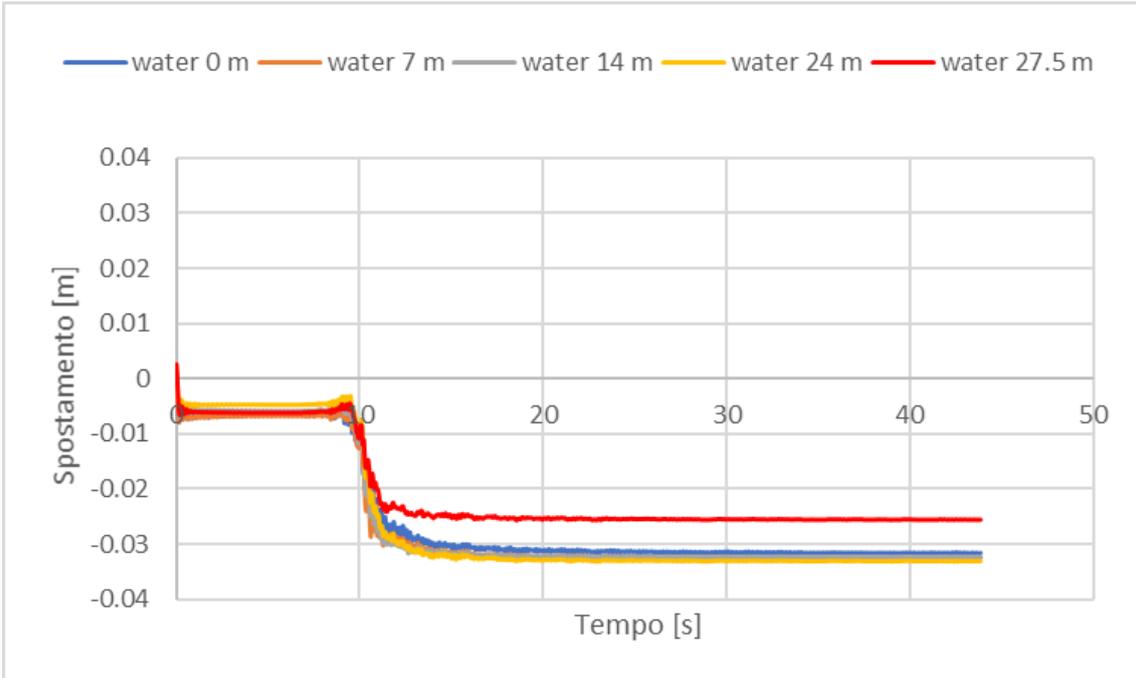
Figura 4.24: Spostamento orizzontale nodo sinistro



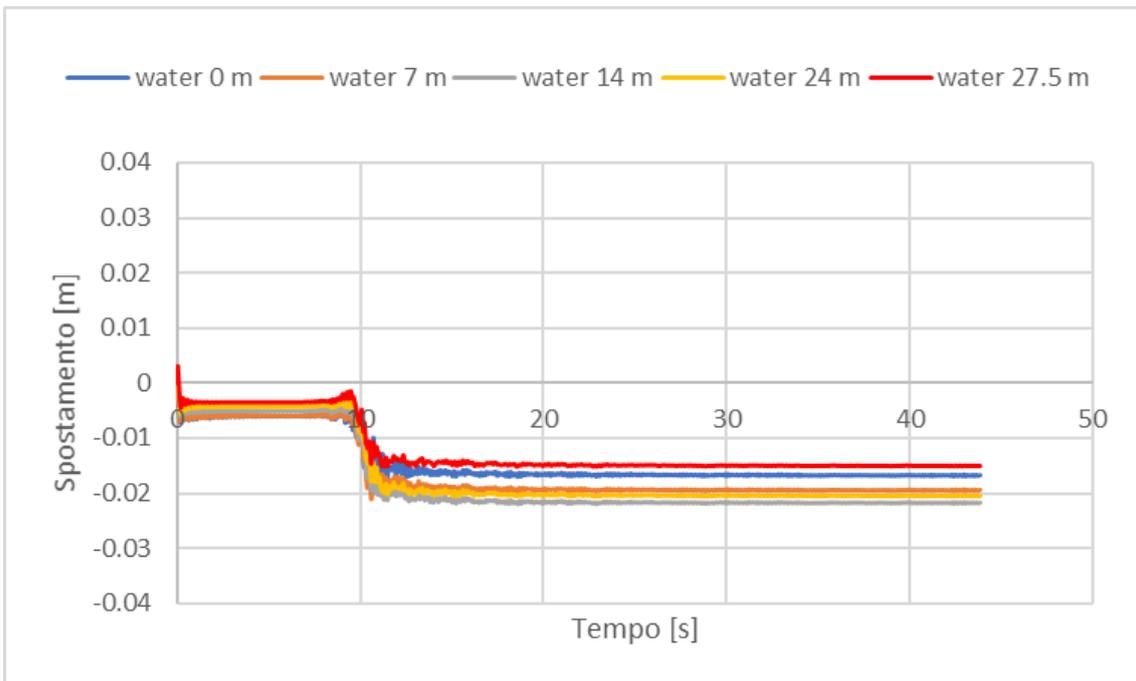
**Figura 4.25:** Spostamento orizzontale nodo centrale



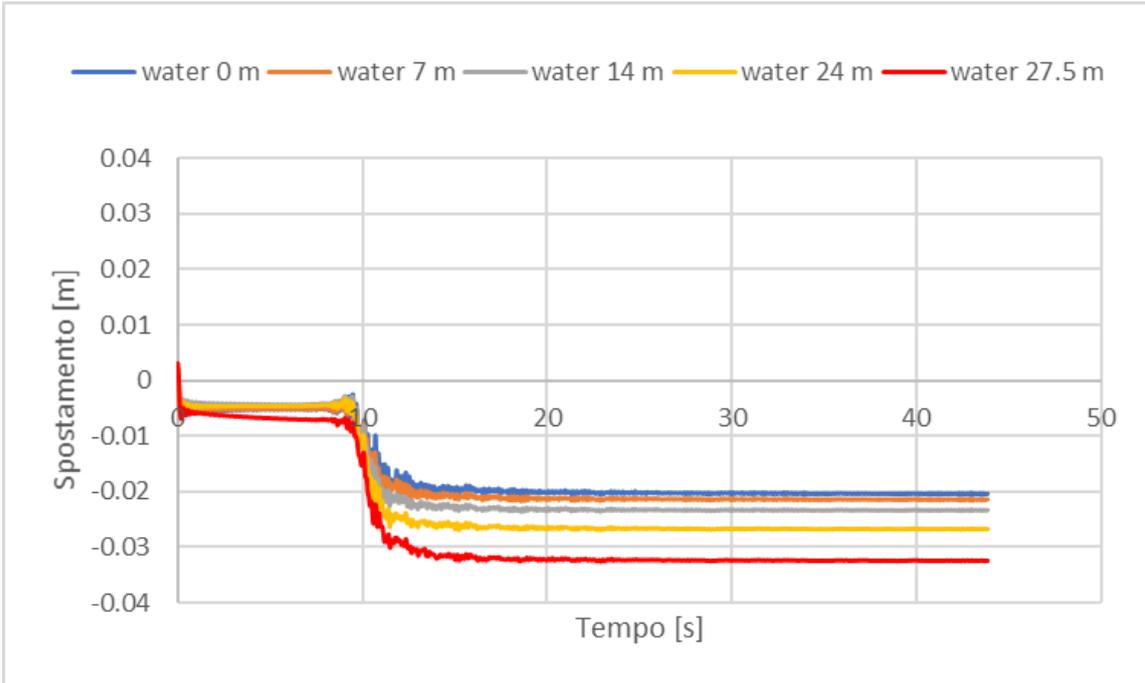
**Figura 4.26:** Spostamento orizzontale nodo destro



**Figura 4.27:** Spostamento verticale nodo sinistro

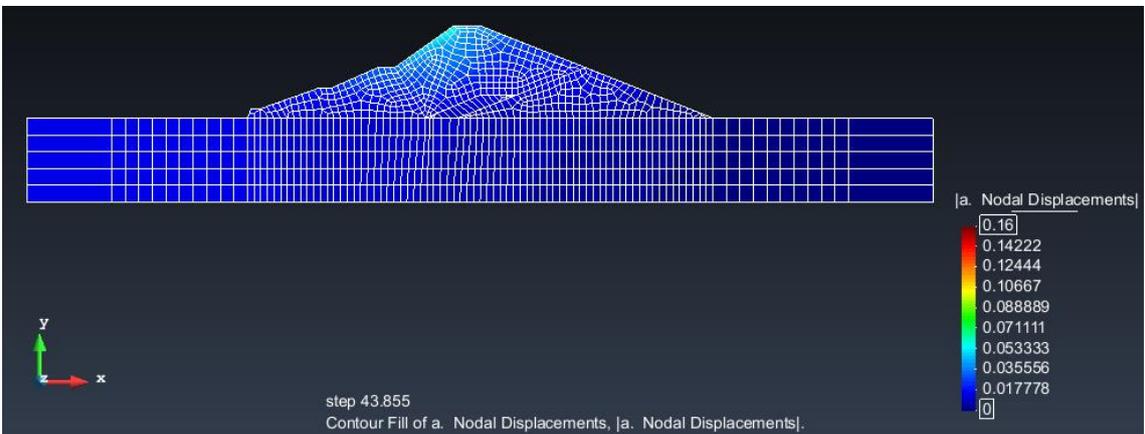


**Figura 4.28:** Spostamento verticale nodo centrale

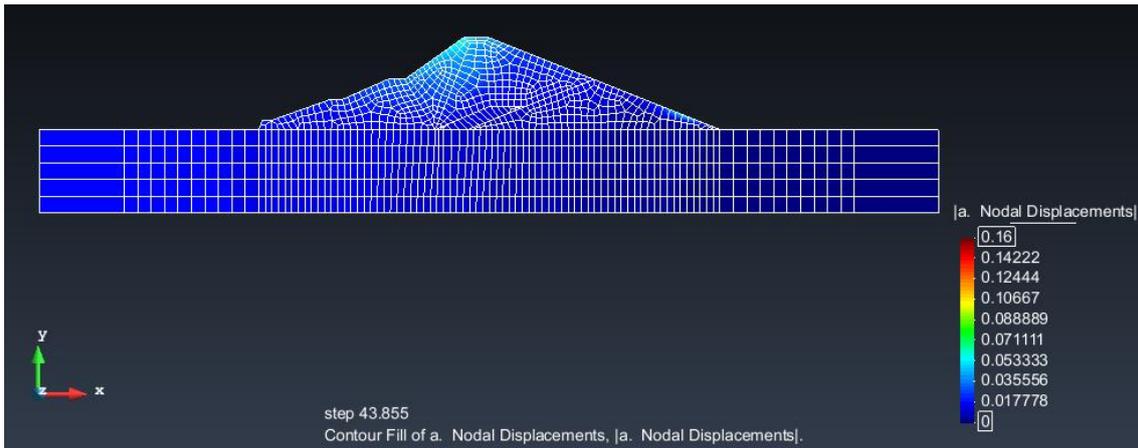


**Figura 4.29:** Spostamento verticale nodo destro

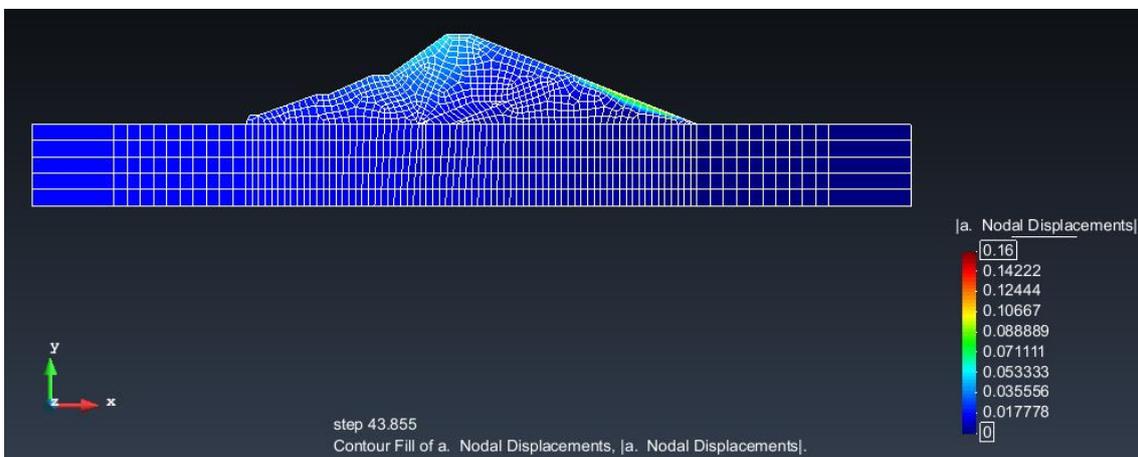
Di seguito si riportano i risultati delle analisi predette in termini di distribuzione degli spostamenti dei nodi mediante la rappresentazione di contour fill e di vettori spostamento.



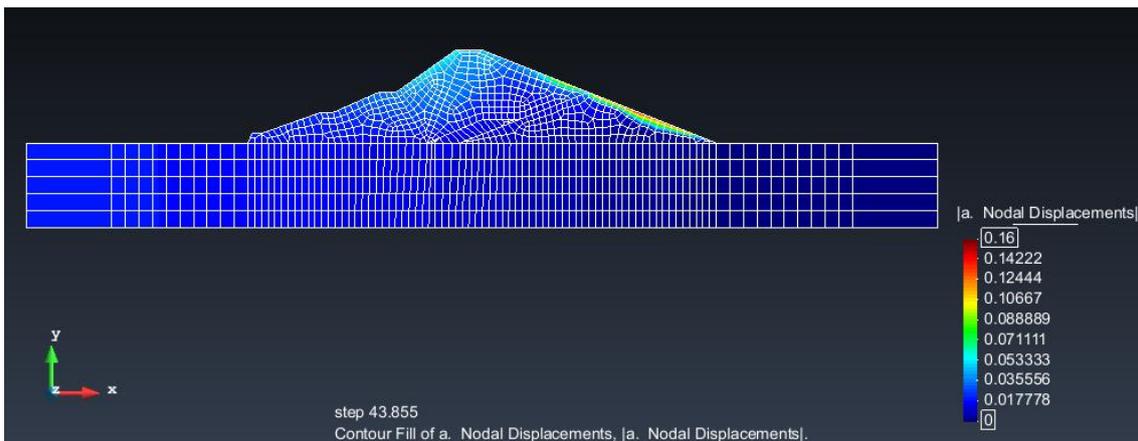
**Figura 4.30:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso nullo



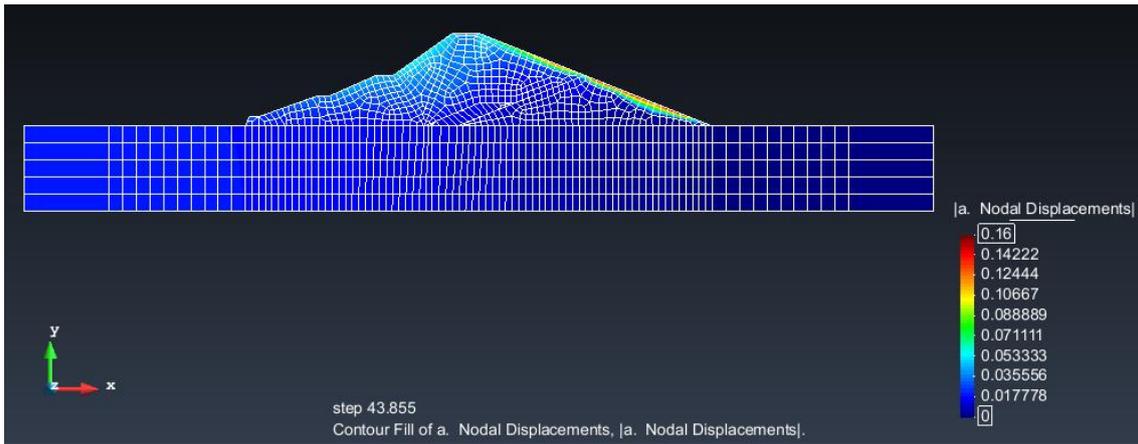
**Figura 4.31:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 7 m



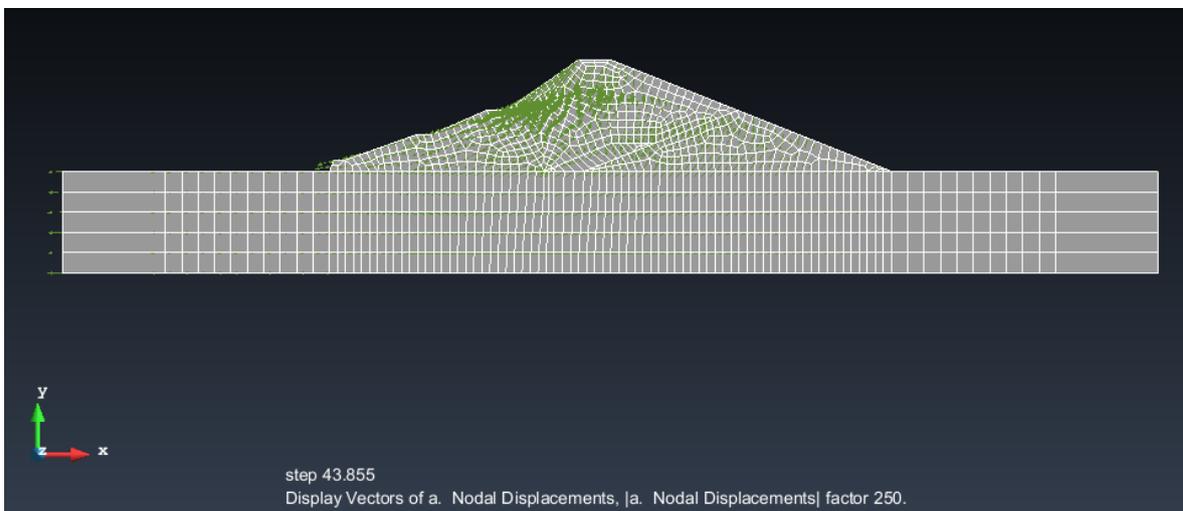
**Figura 4.32:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 14 m



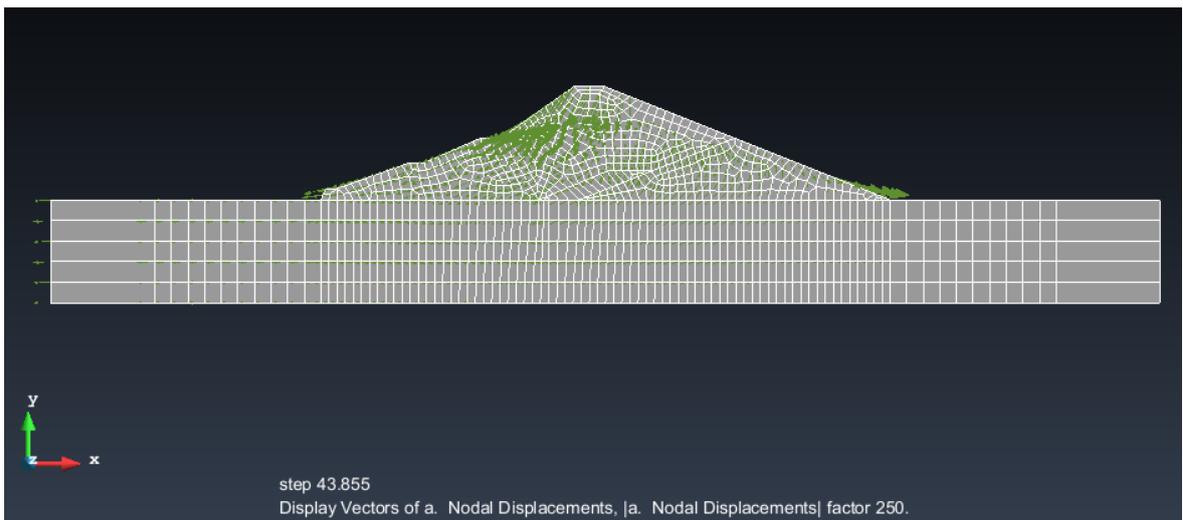
**Figura 4.33:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 24 m



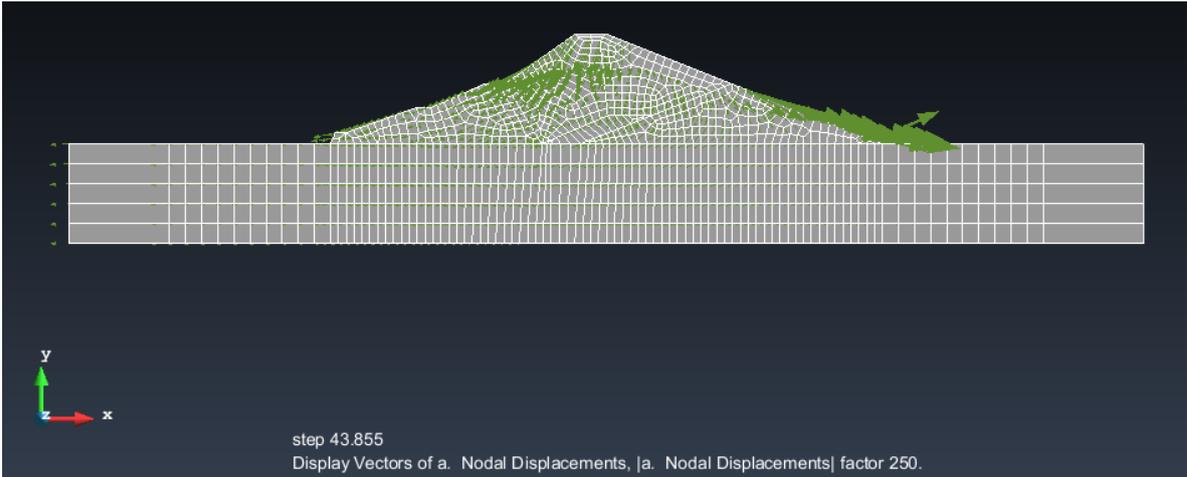
**Figura 4.34:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 27.5 m



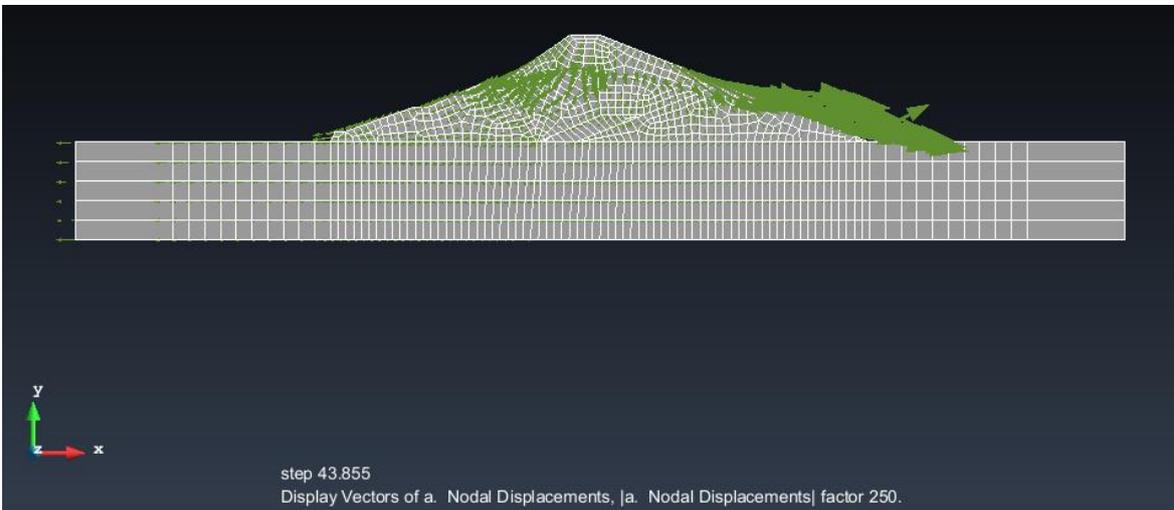
**Figura 4.35:** Vettori spostamento associati ad un livello di invaso nullo



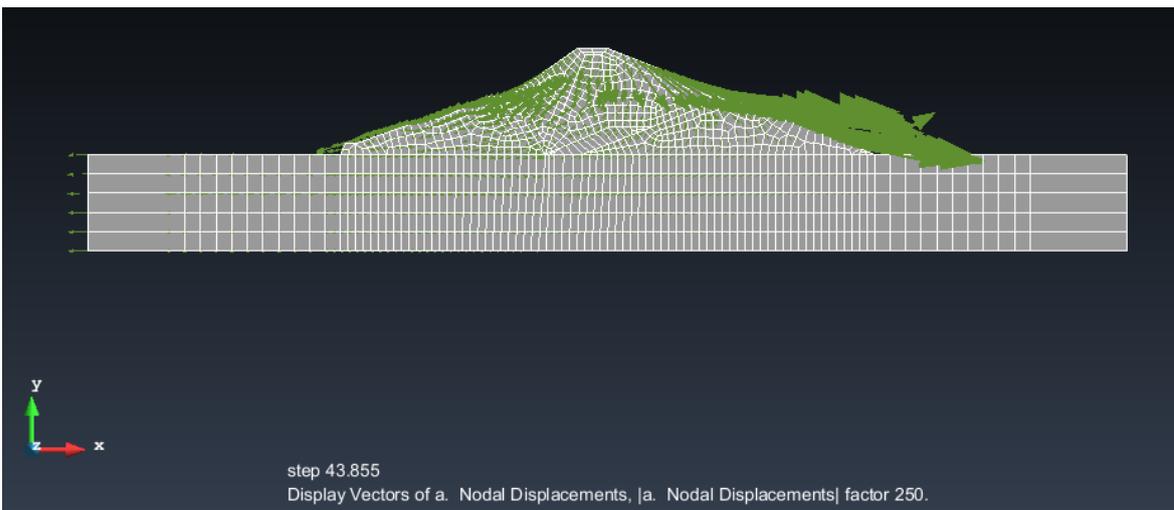
**Figura 4.36:** Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 7 m



**Figura 4.37:** Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 14 m



**Figura 4.38:** Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 24 m



**Figura 4.39:** Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 27.5 m

### 4.1.3 Sisma 3

Si riportano di seguito i risultati ottenuti in termini di spostamenti (complessivi, orizzontali e verticali) dei punti di controllo posti sul coronamento ottenuti al variare del livello di invaso sotto l'azione del sisma 3.

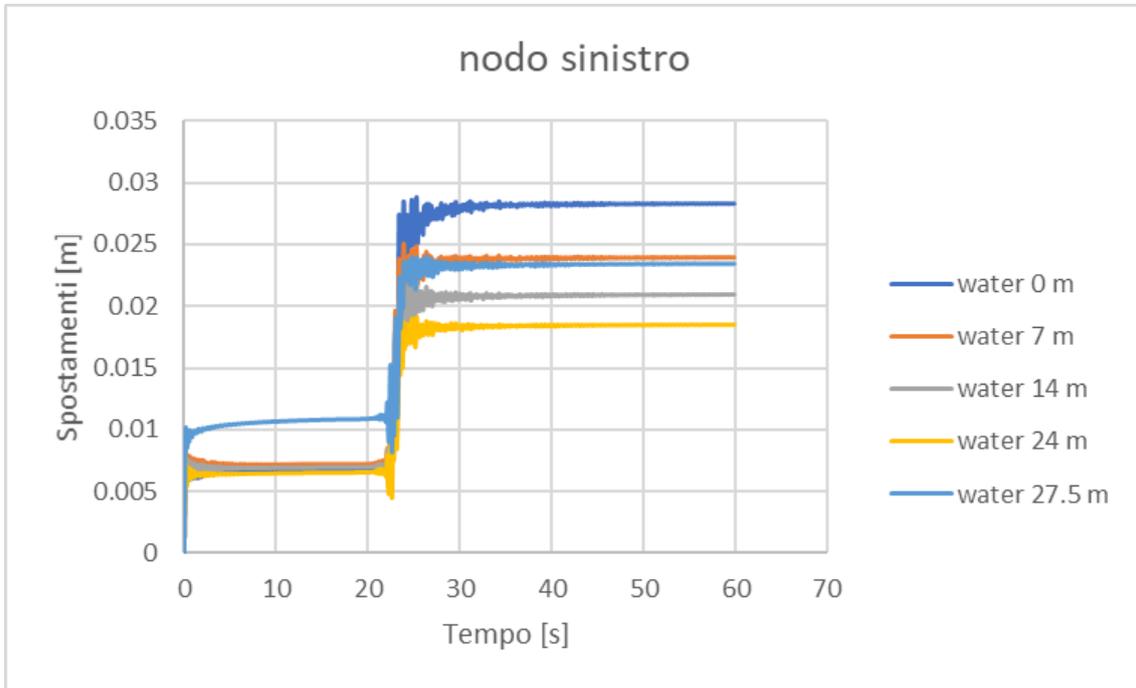


Figura 4.40: Spostamento nodo sinistro

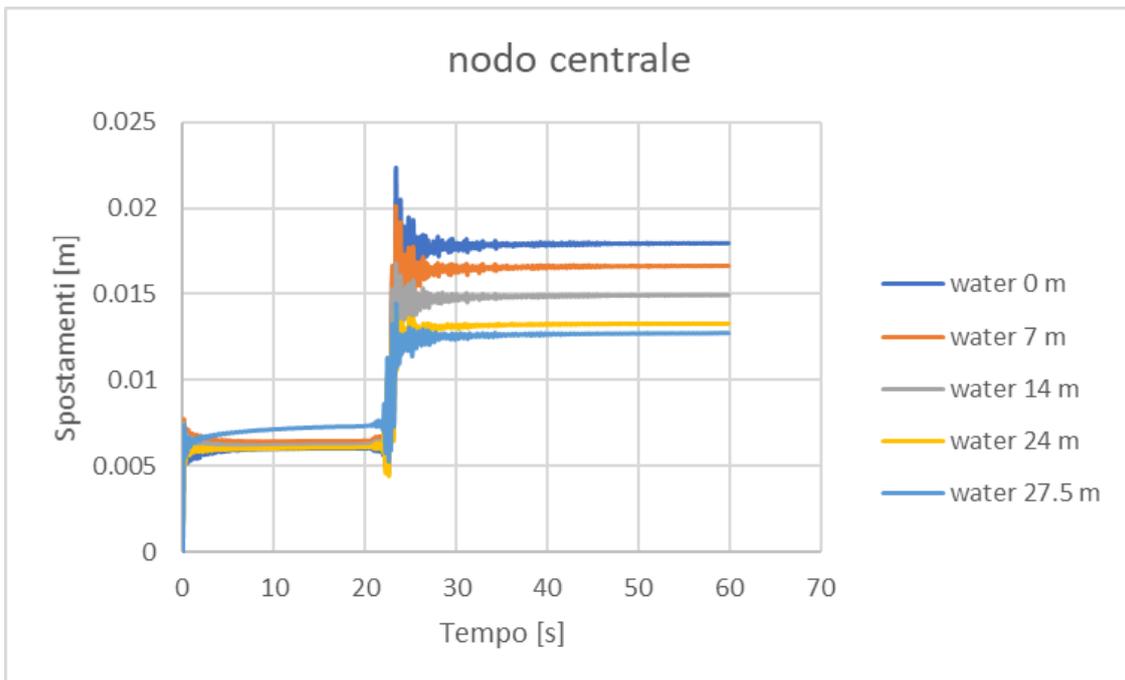
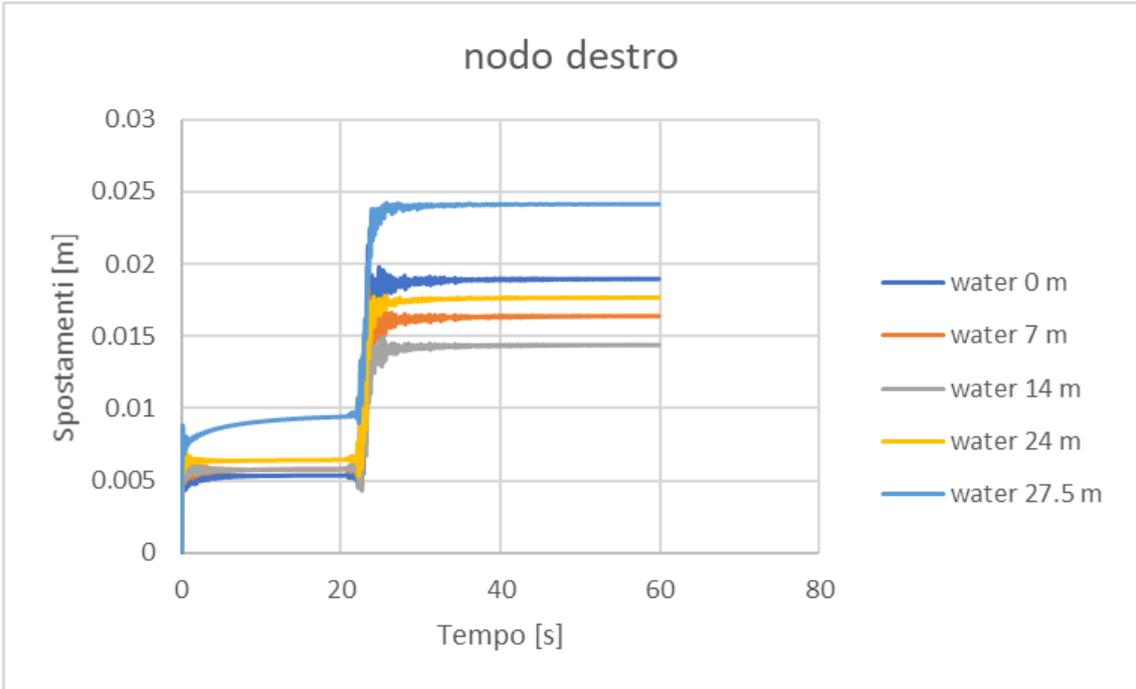
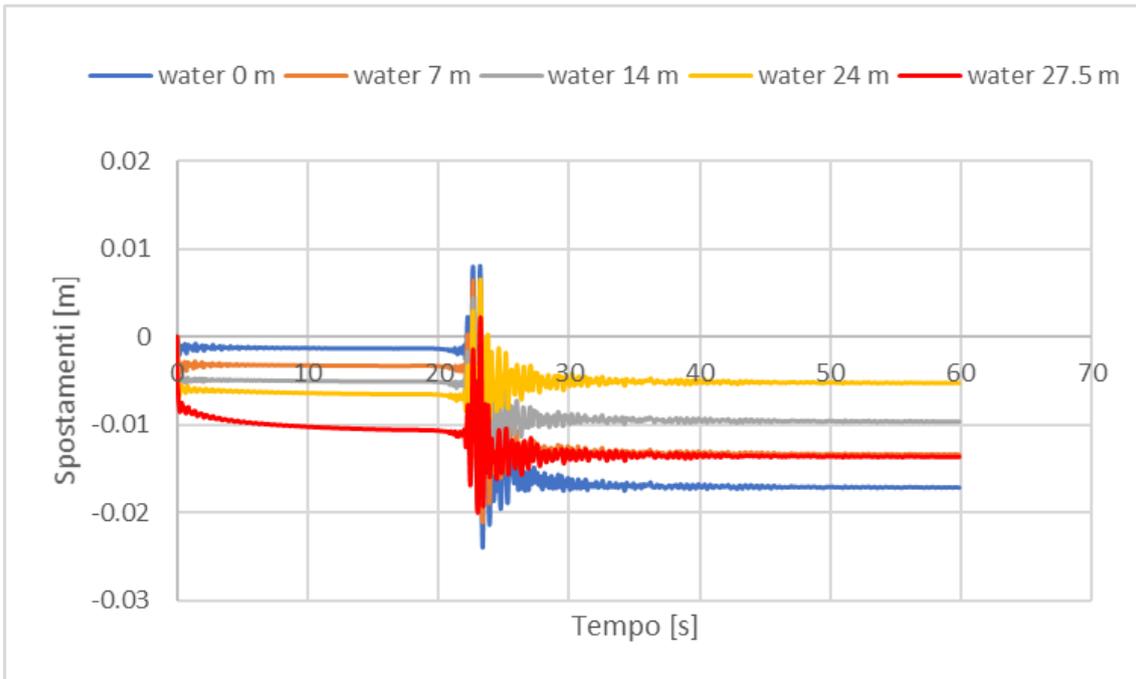


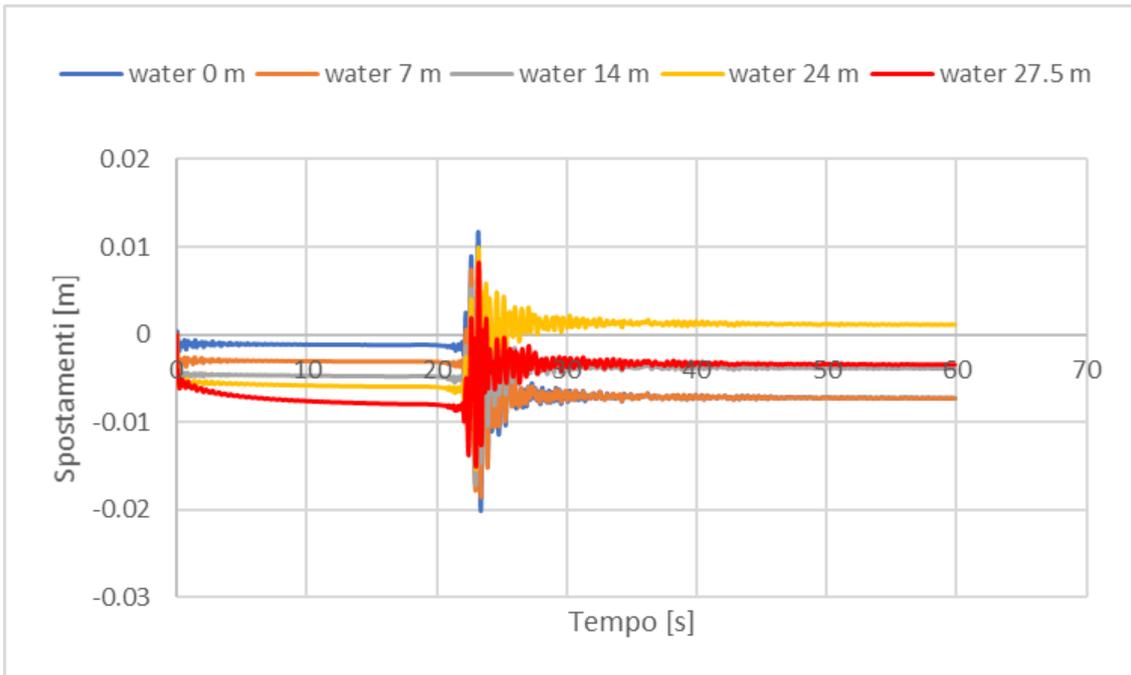
Figura 4.41: Spostamento nodo centrale



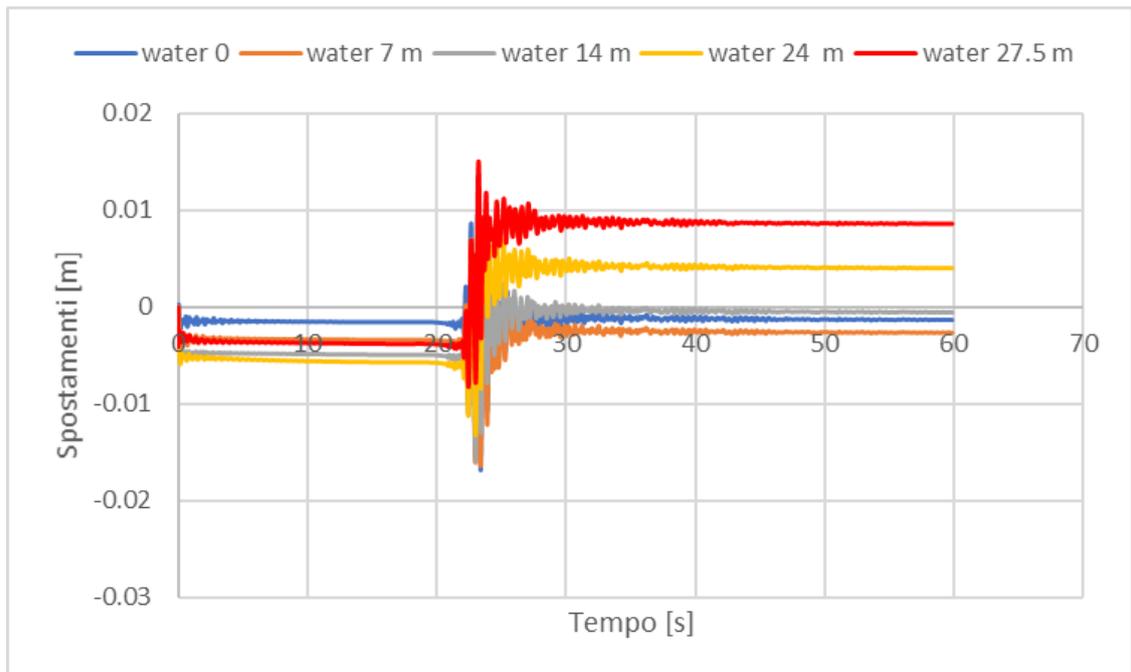
**Figura 4.42:** Spostamento nodo destro



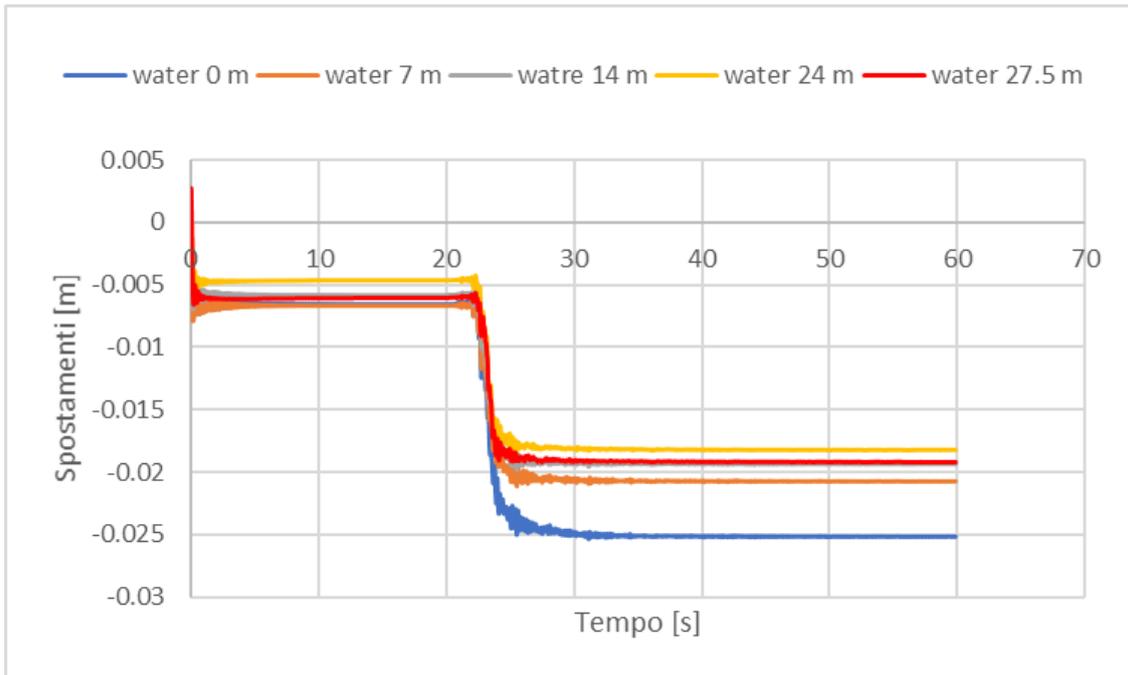
**Figura 4.43:** Spostamento orizzontale nodo sinistro



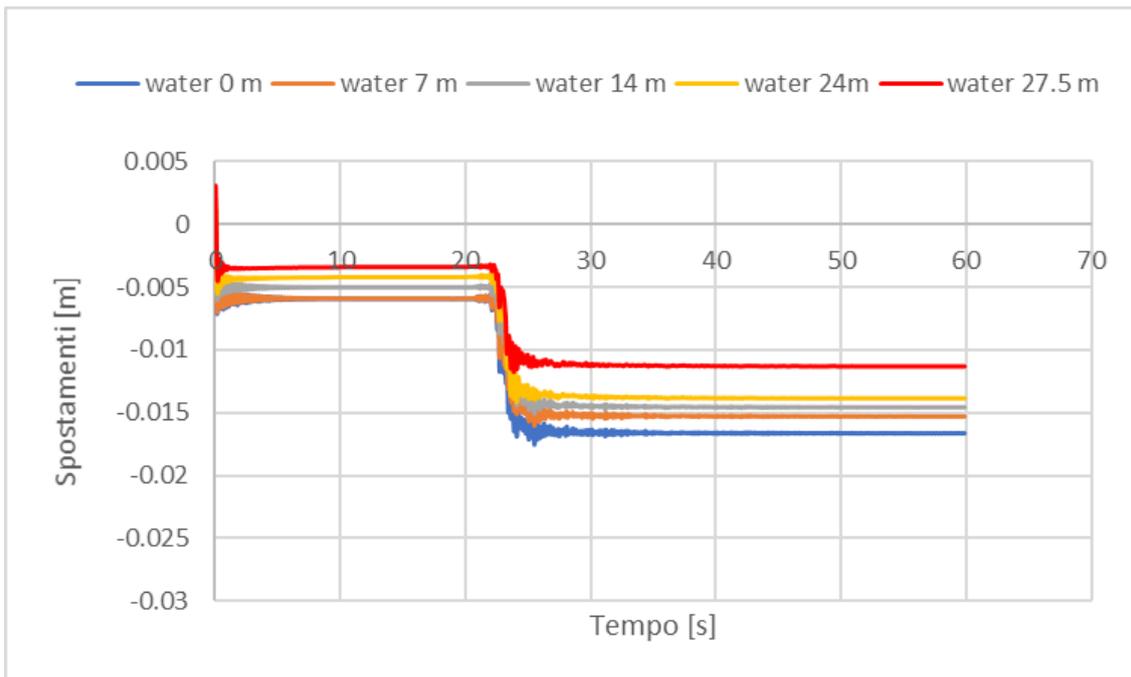
**Figura 4.44:** Spostamento orizzontale nodo centrale



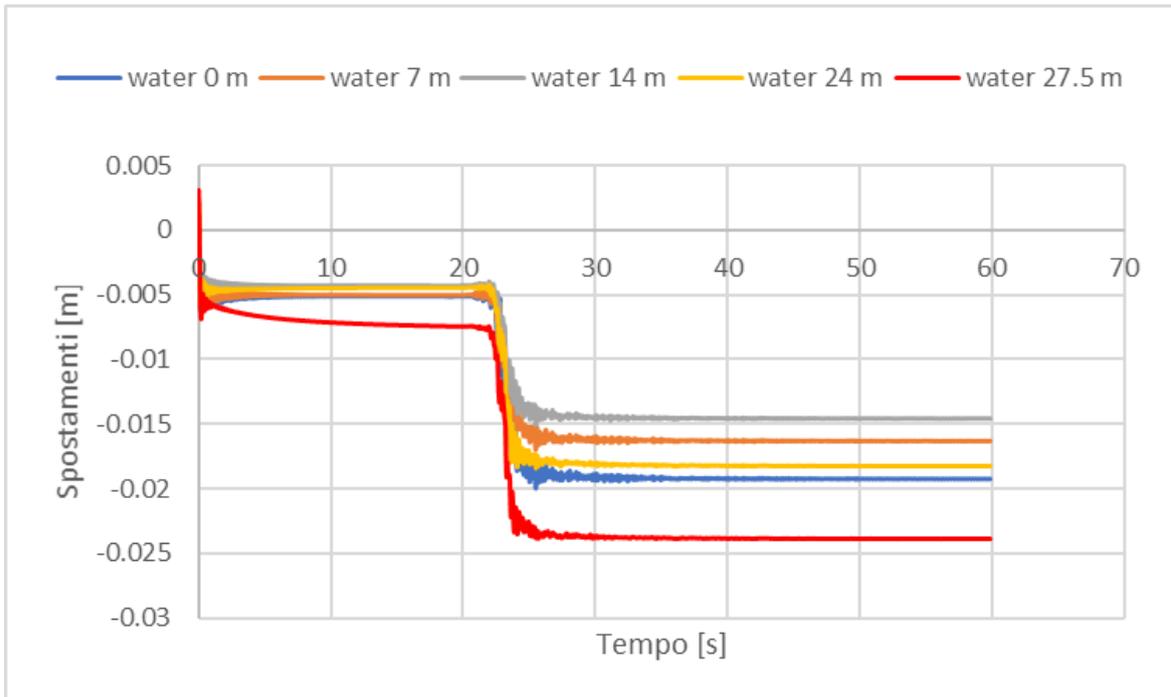
**Figura 4.45:** Spostamento orizzontale nodo destro



**Figura 4.46:** Spostamento verticale nodo sinistro

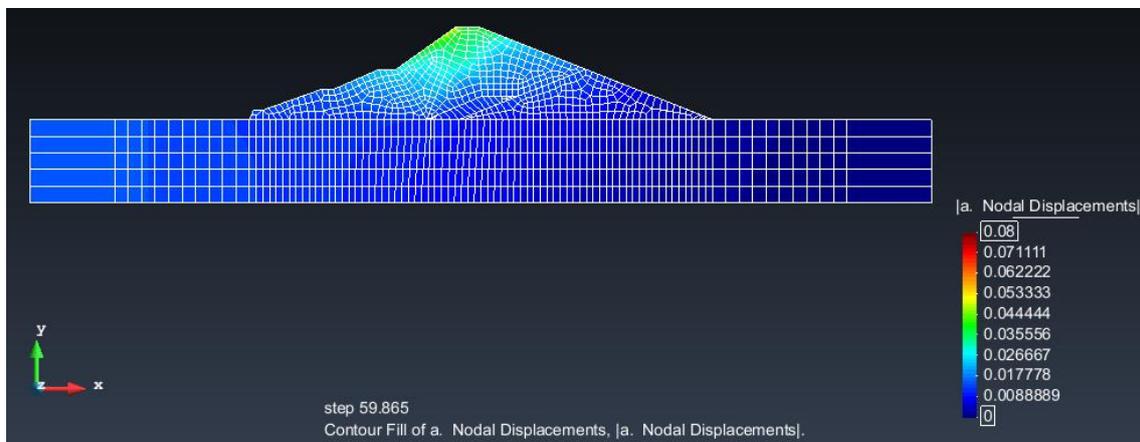


**Figura 4.47:** Spostamento verticale nodo centrale

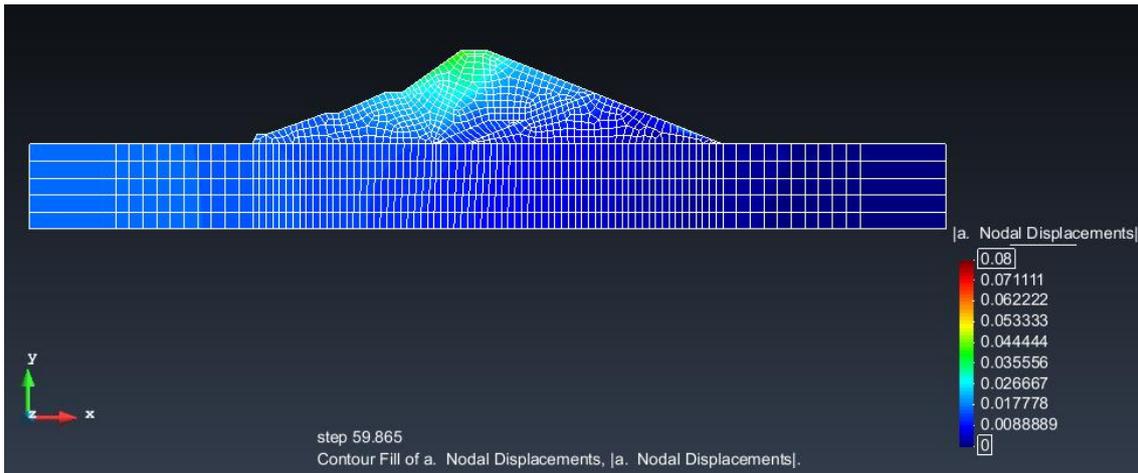


**Figura 4.48:** Spostamento verticale nodo destro

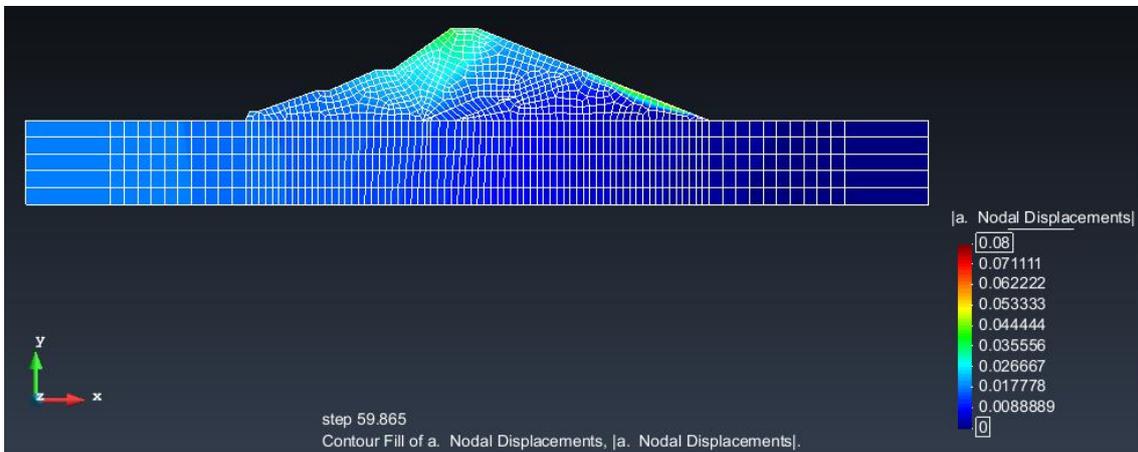
Di seguito si riportano i risultati delle analisi predette in termini di distribuzione degli spostamenti dei nodi mediante la rappresentazione di contour fill e di vettori spostamento.



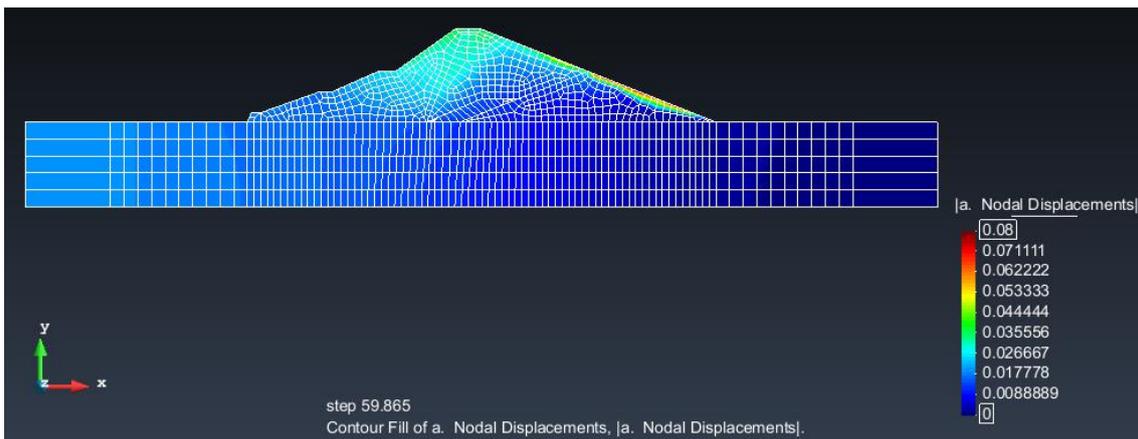
**Figura 4.49:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso nullo



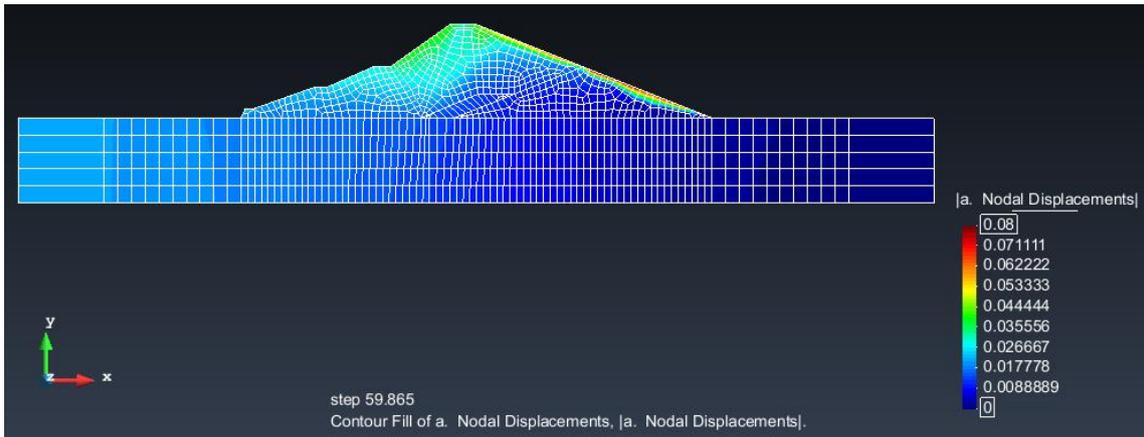
**Figura 4.50:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 7 m



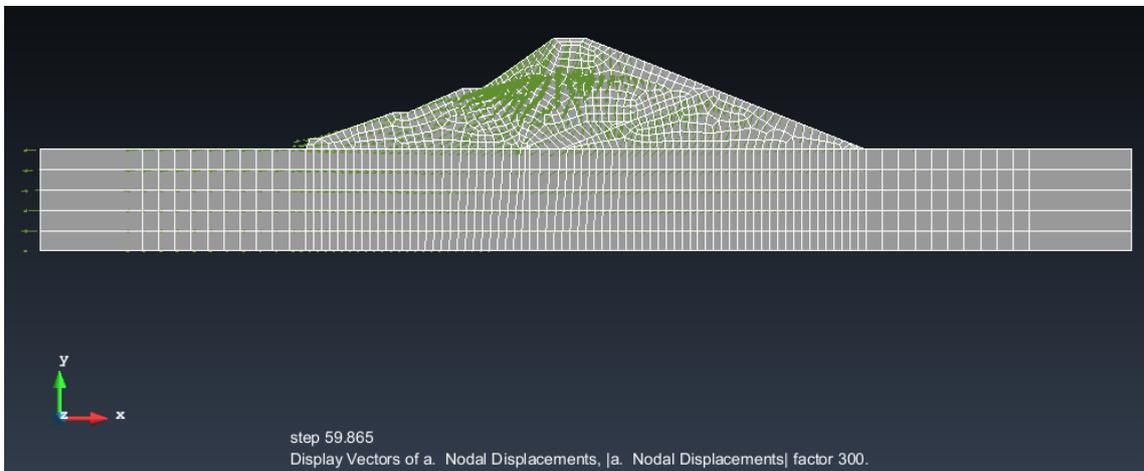
**Figura 4.51:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 14 m



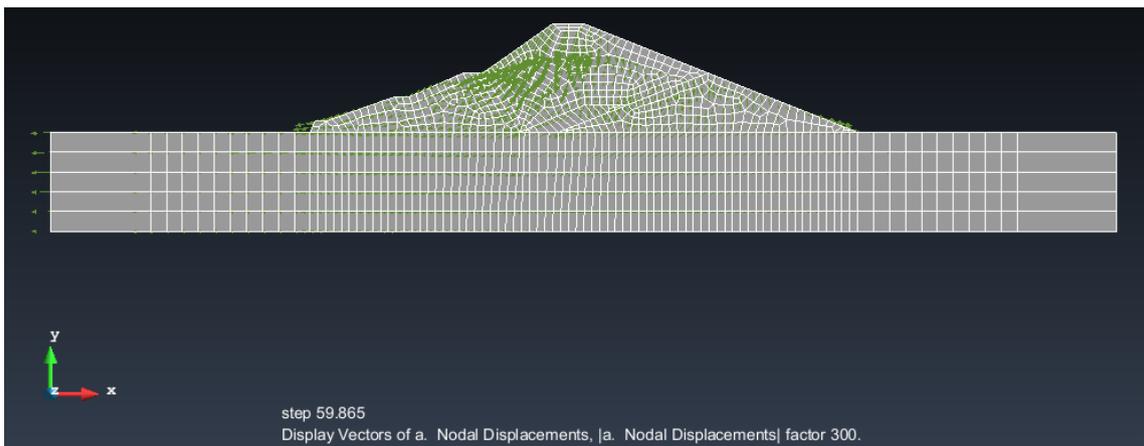
**Figura 4.52:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 24 m



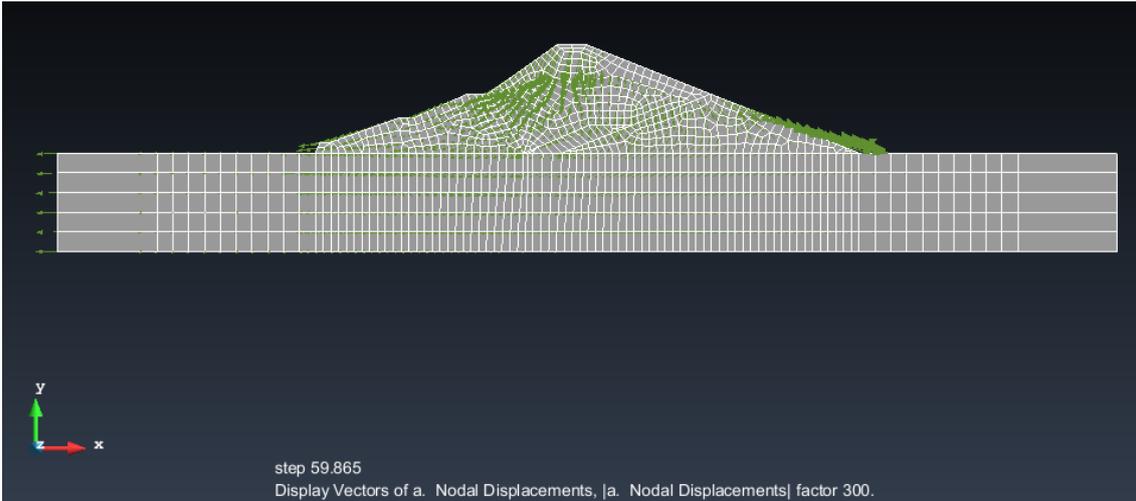
**Figura 4.53:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 27.5 m



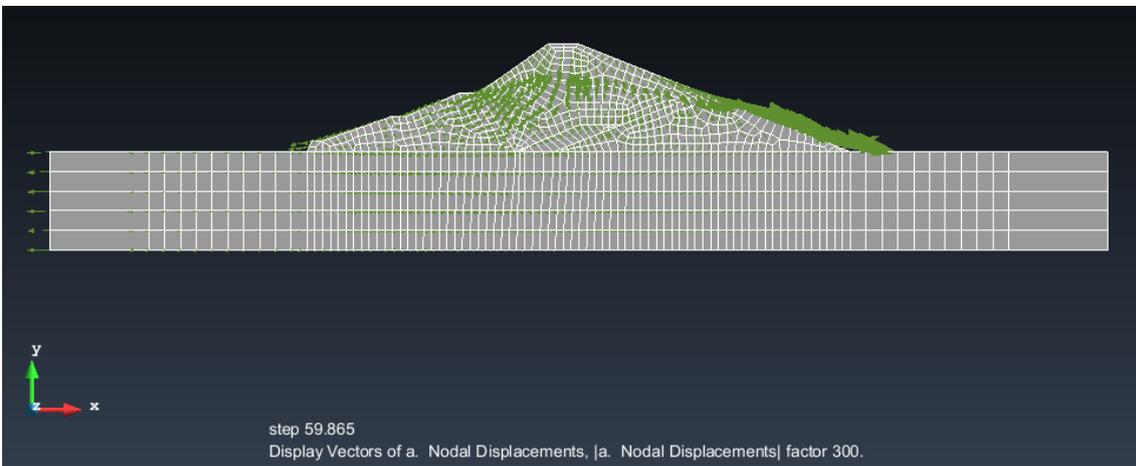
**Figura 4.54:** Vettori spostamento associato ad un livello di invaso nullo



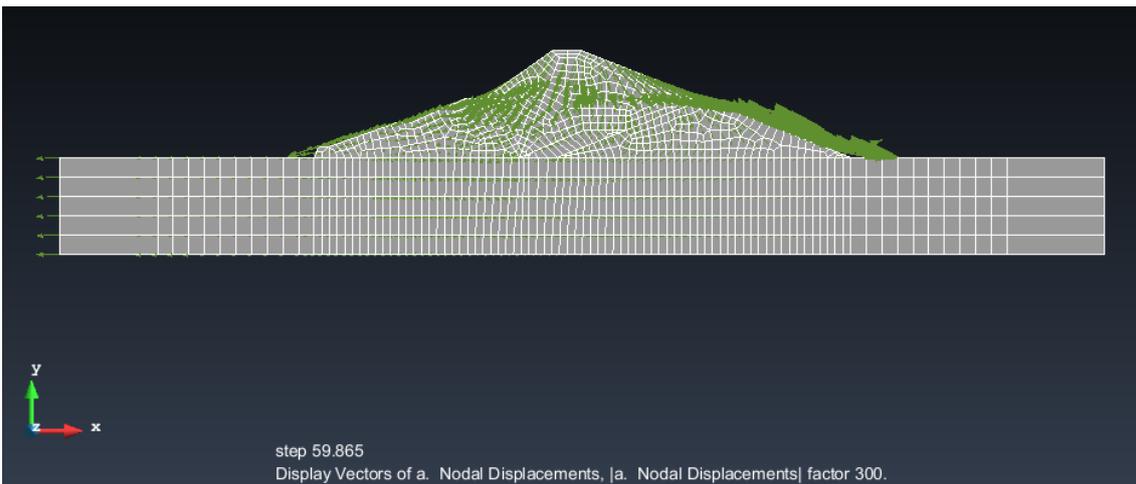
**Figura 4.55:** Vettori spostamento associato ad un livello di invaso pari a 7 m



**Figura 4.56:** Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari 14 m



**Figura 4.57:** Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 24 m



**Figura 4.58:** Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 27.5 m

#### 4.1.4 Sisma 4

Si riportano di seguito i risultati ottenuti in termini di spostamenti (complessivi, orizzontali e verticali) dei punti di controllo posti sul coronamento ottenuti al variare del livello di invaso sotto l'azione del sisma 4.

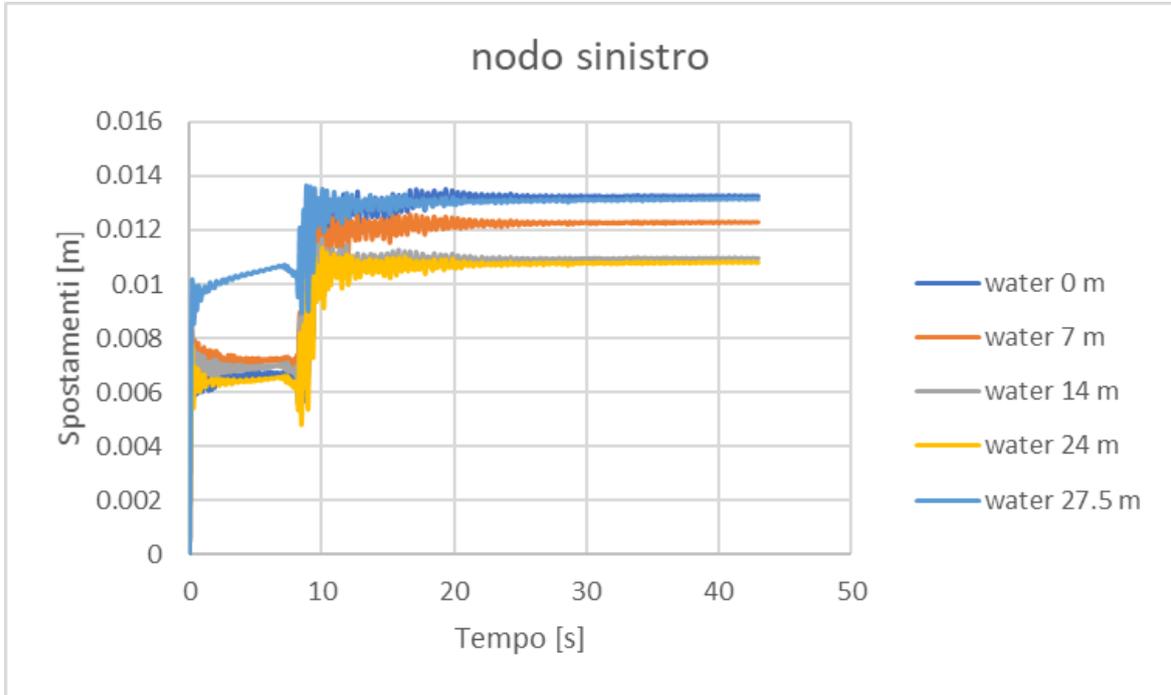


Figura 4.59: Spostamento nodo sinistro

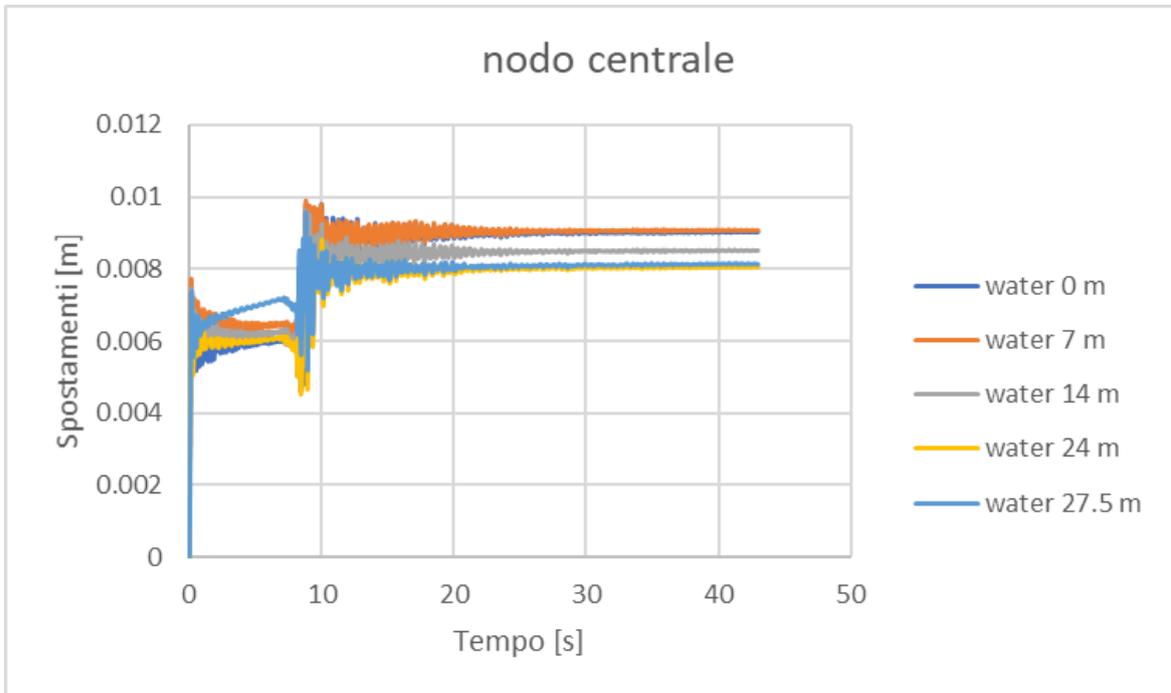


Figura 4.60: Spostamento nodo centrale

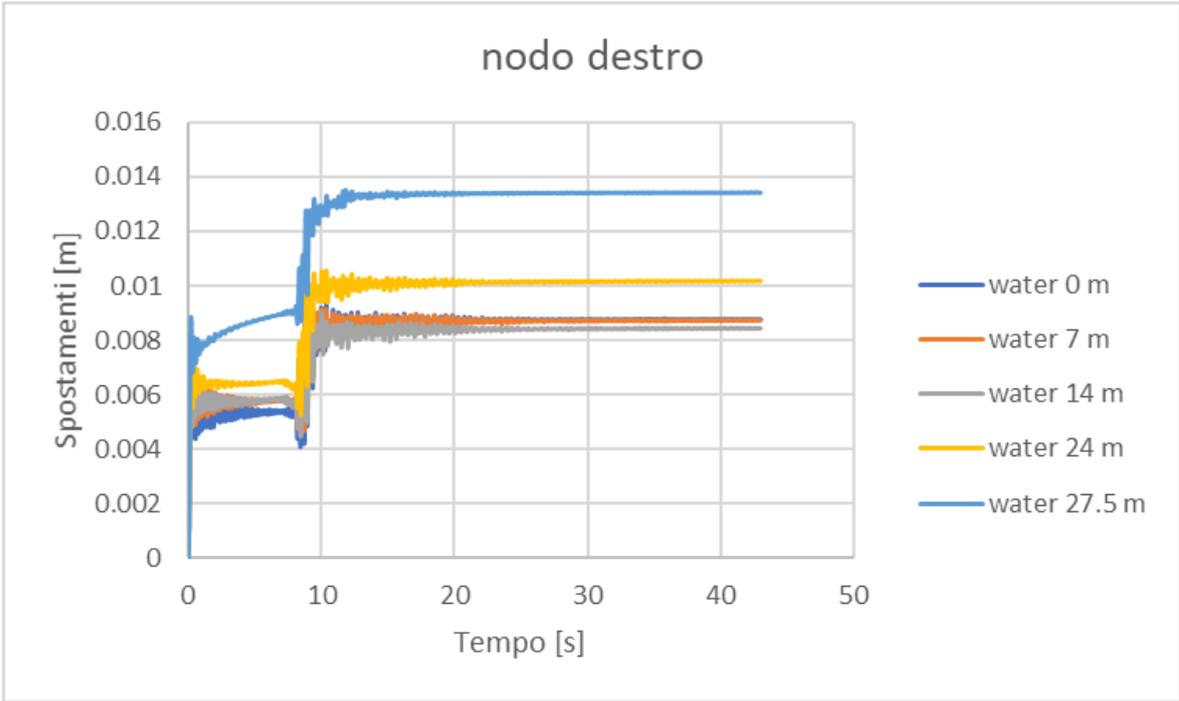


Figura 4.61: Spostamento nodo destro

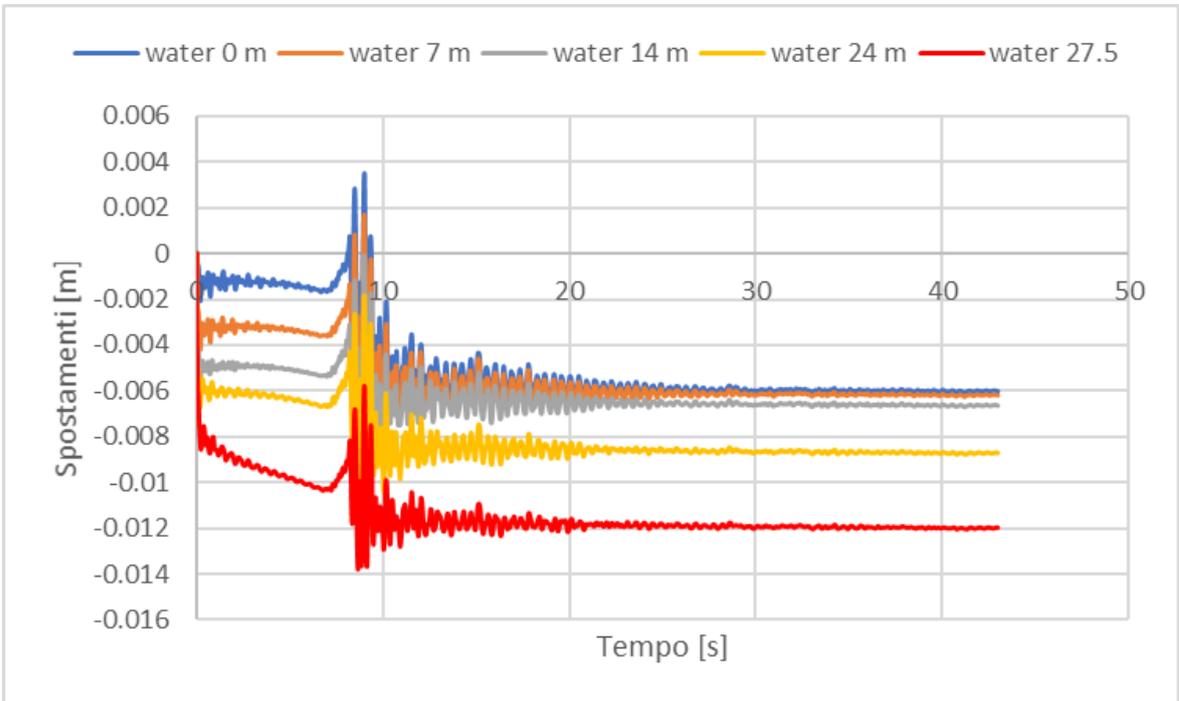
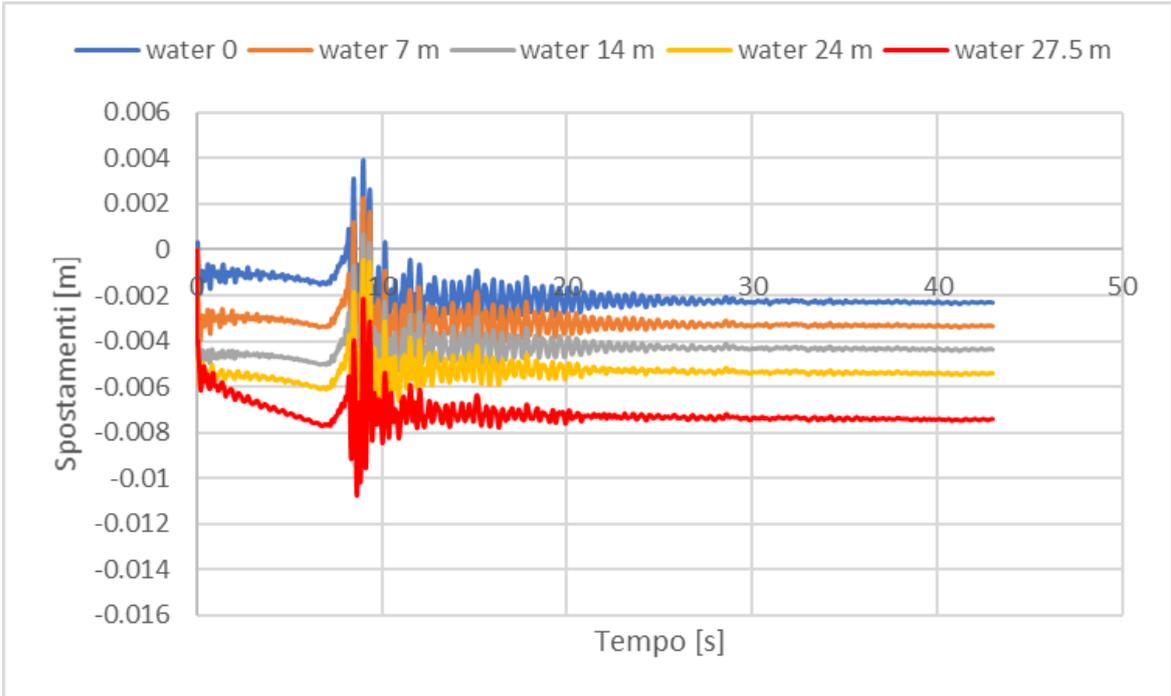
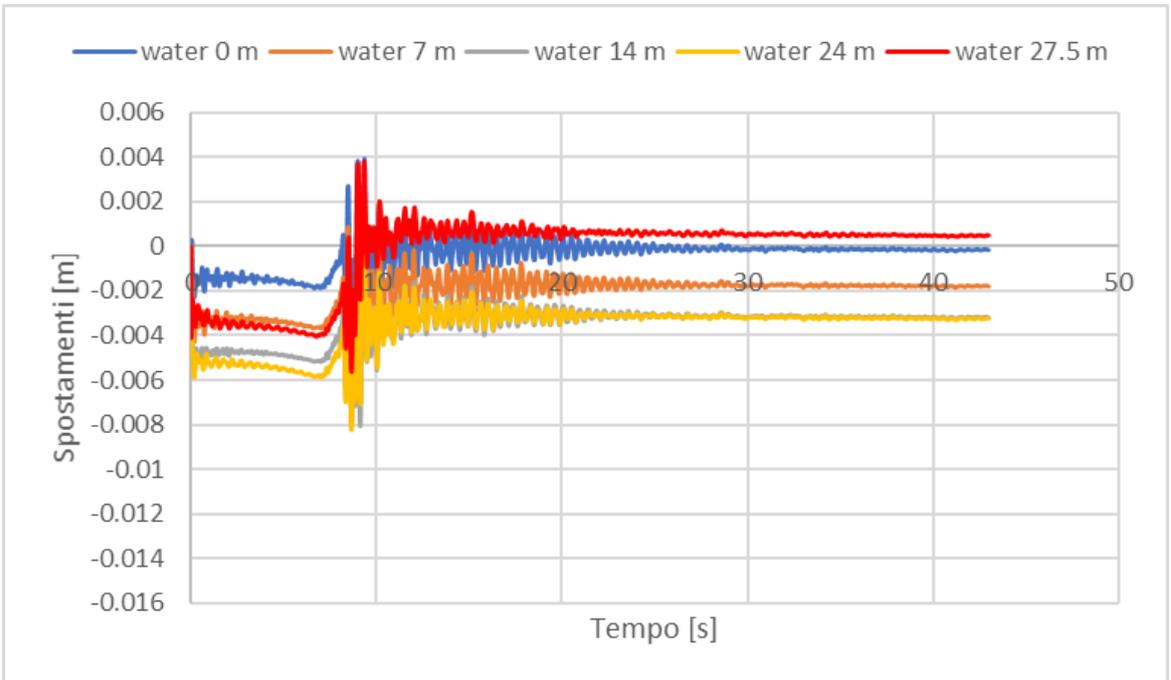


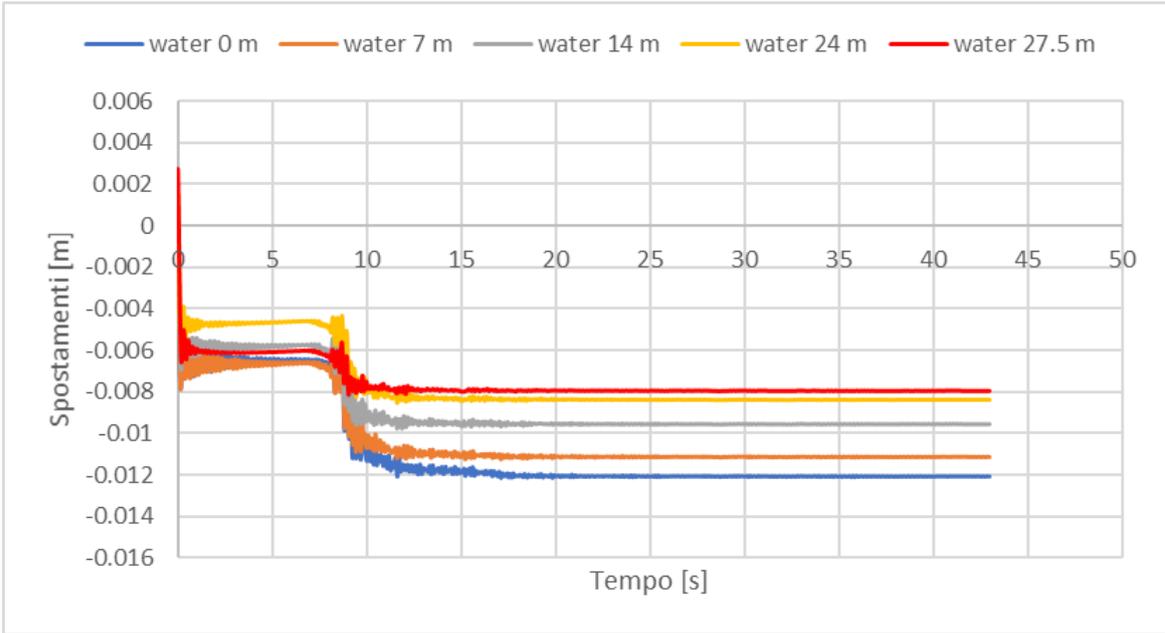
Figura 4.62: Spostamento orizzontale nodo sinistro



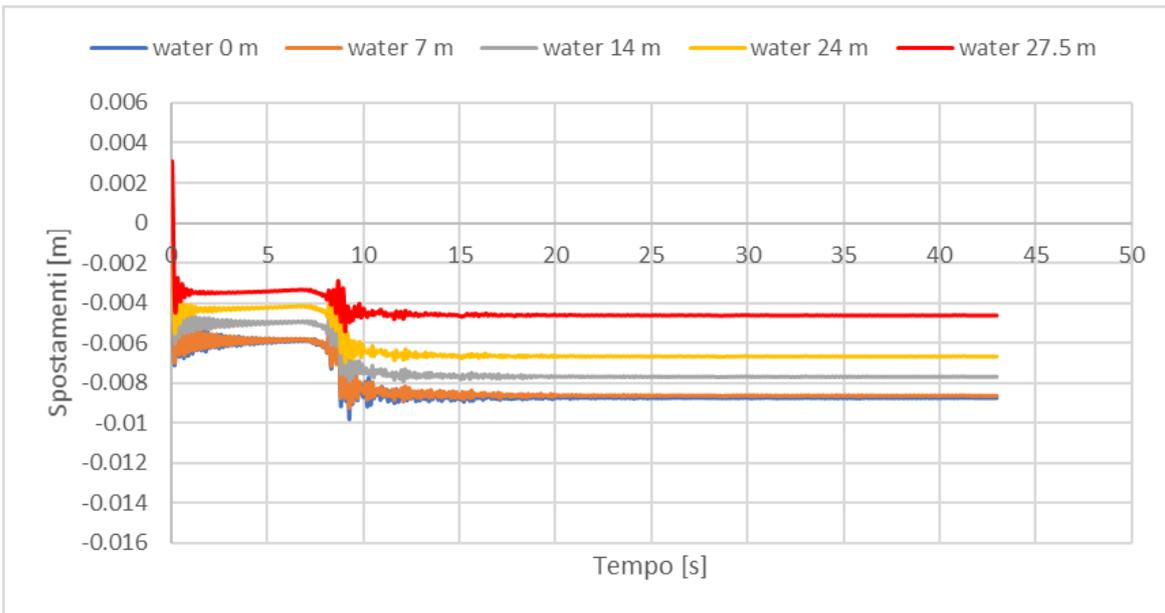
**Figura 4.63:** Spostamento orizzontale nodo centrale



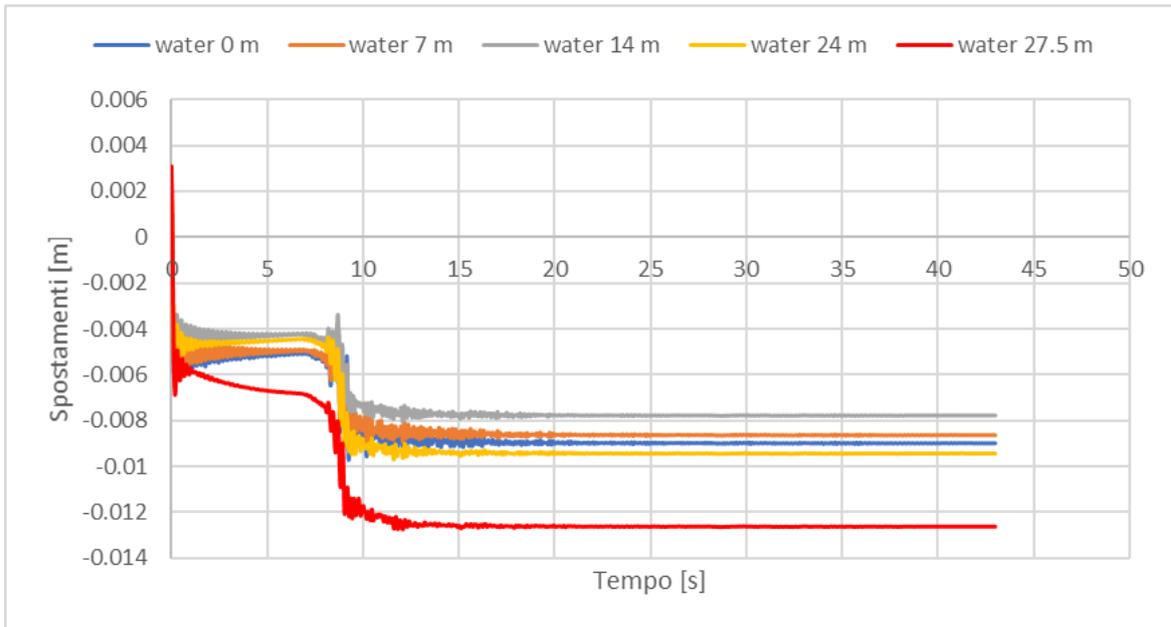
**Figura 4.64:** Spostamenti orizzontali nodo destro



**Figura 4.65:** Spostamento verticale nodo sinistro

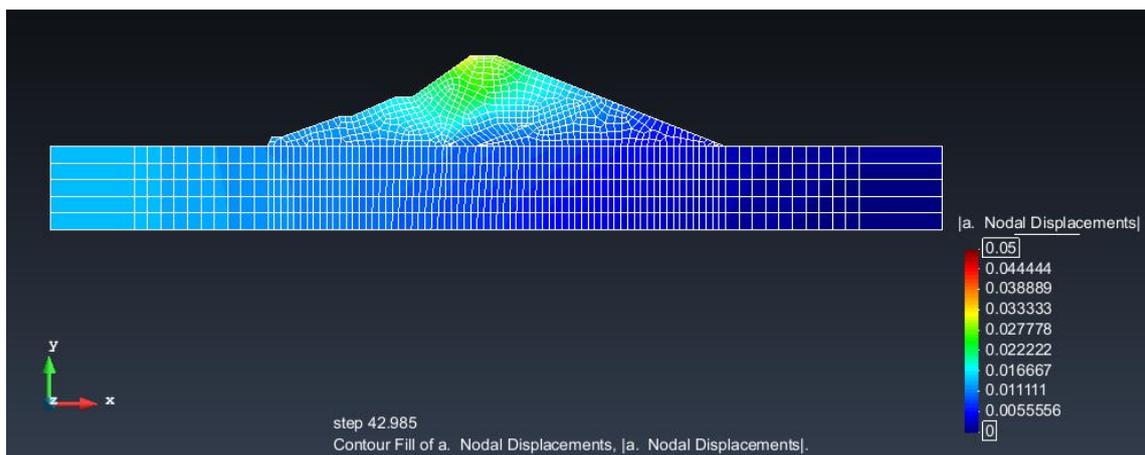


**Figura 4.66:** Spostamento verticale nodo centrale

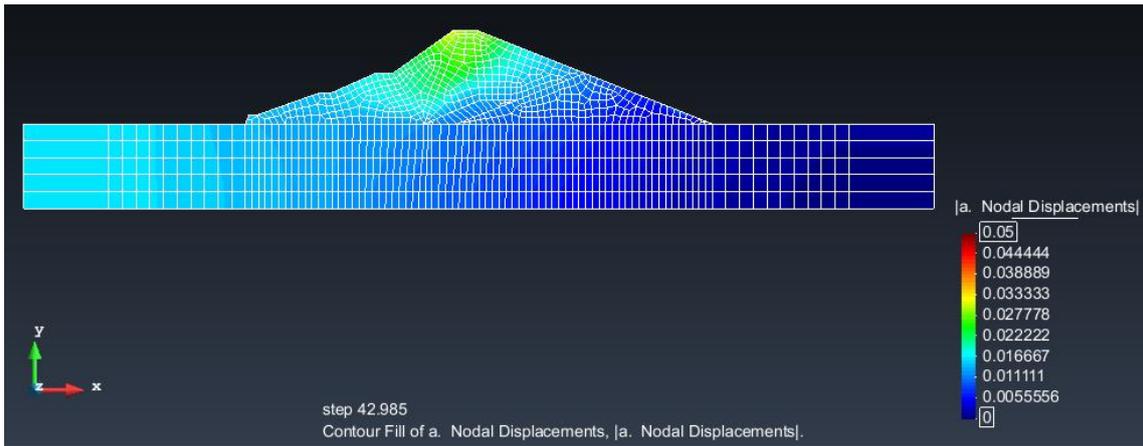


**Figura 4.67:** Spostamento verticale nodo destro

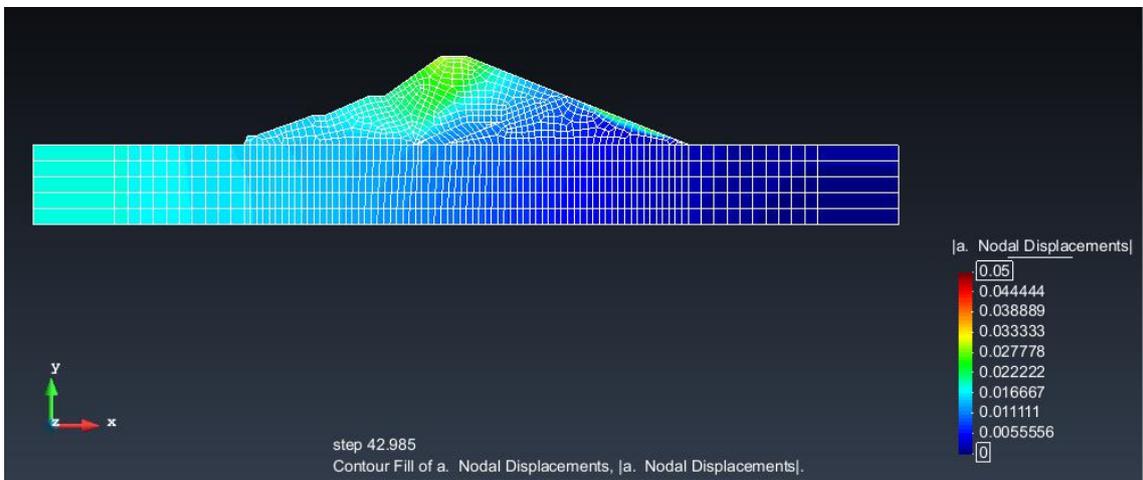
Di seguito si riportano i risultati delle analisi predette in termini di distribuzione degli spostamenti dei nodi mediante la rappresentazione di contour fill e di vettori spostamento.



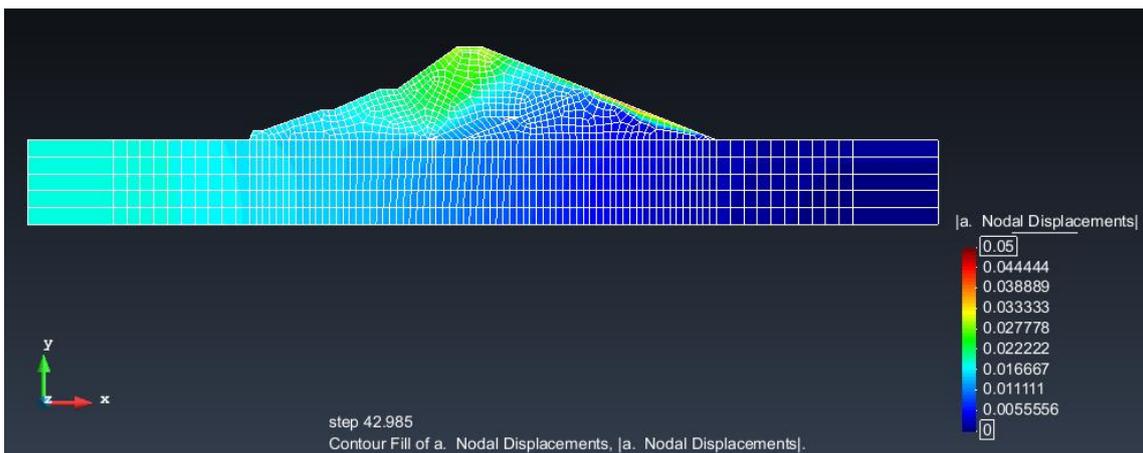
**Figura 4.68:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso nullo



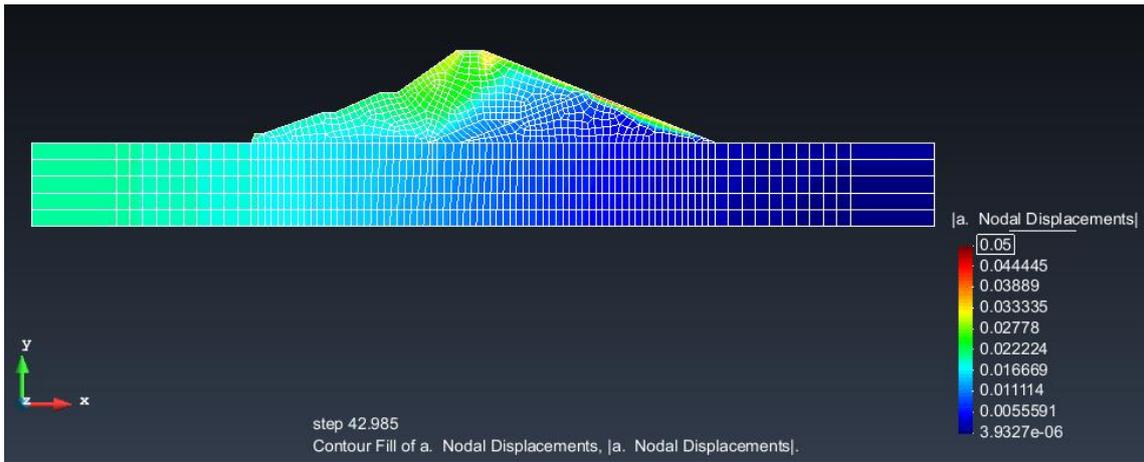
**Figura 4.69:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 7 m



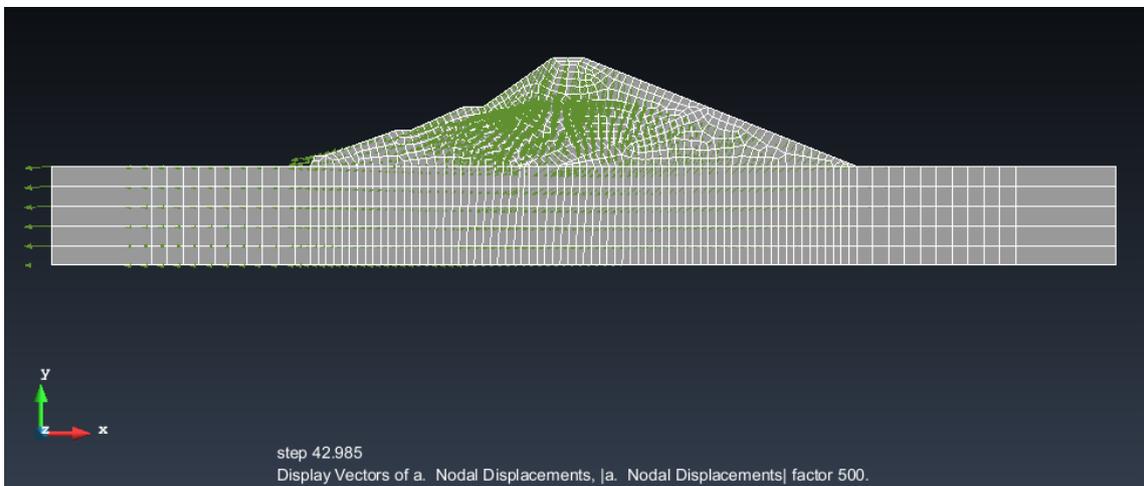
**Figura 4.70:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 14 m



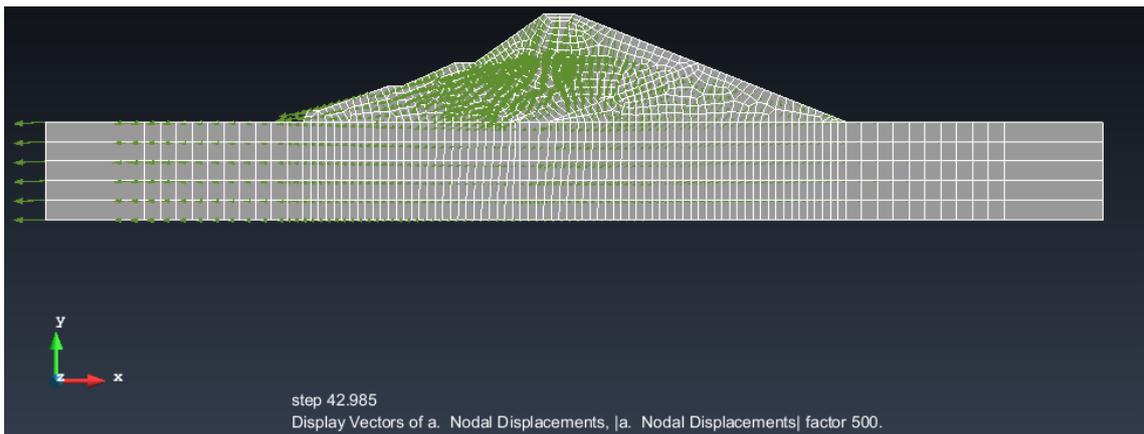
**Figura 4.71:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 24 m



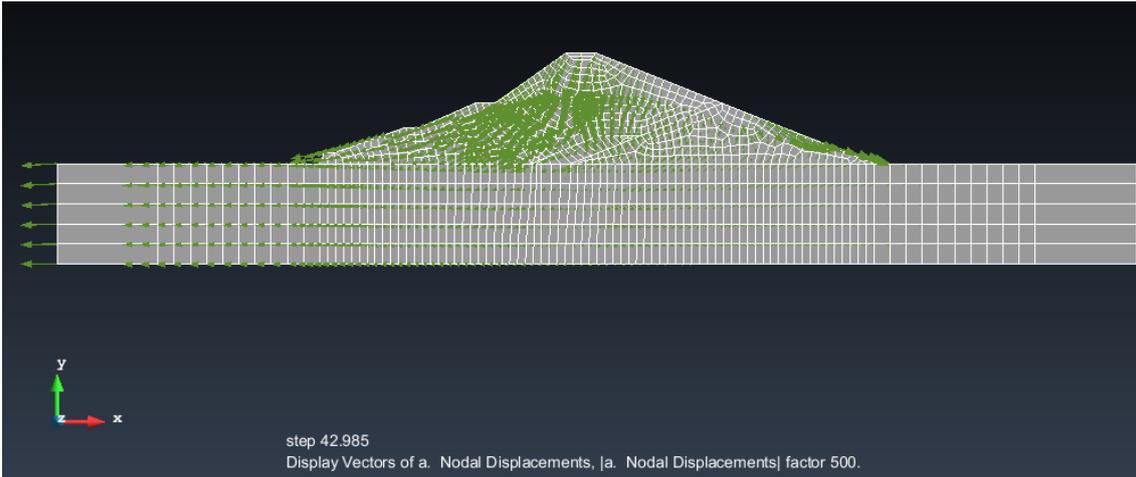
**Figura 4.72:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 27.5 m



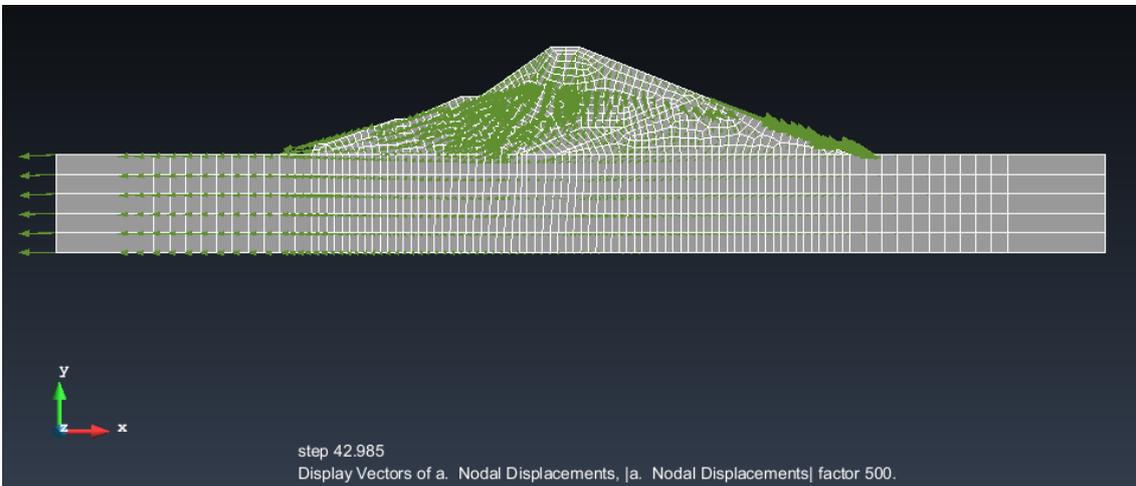
**Figura 4.73:** Vettori spostamento associati ad un livello di invaso nullo



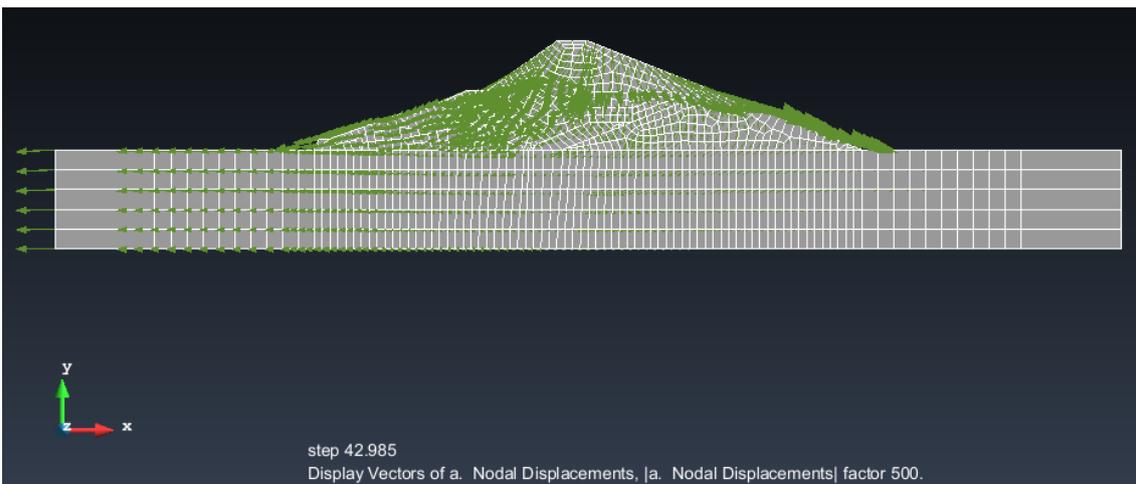
**Figura 4.74:** Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 7 m



**Figura 4.75:** Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 14 m



**Figura 4.76:** Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 24 m



**Figura 4.77:** Vettori spostamento associato ad un livello di invaso pari a 27.5m

### 4.1.5 Sisma 5

Si riportano di seguito i risultati ottenuti in termini di spostamenti (complessivi, orizzontali e verticali) dei punti di controllo posti sul coronamento ottenuti al variare del livello di invaso sotto l'azione del sisma 5.

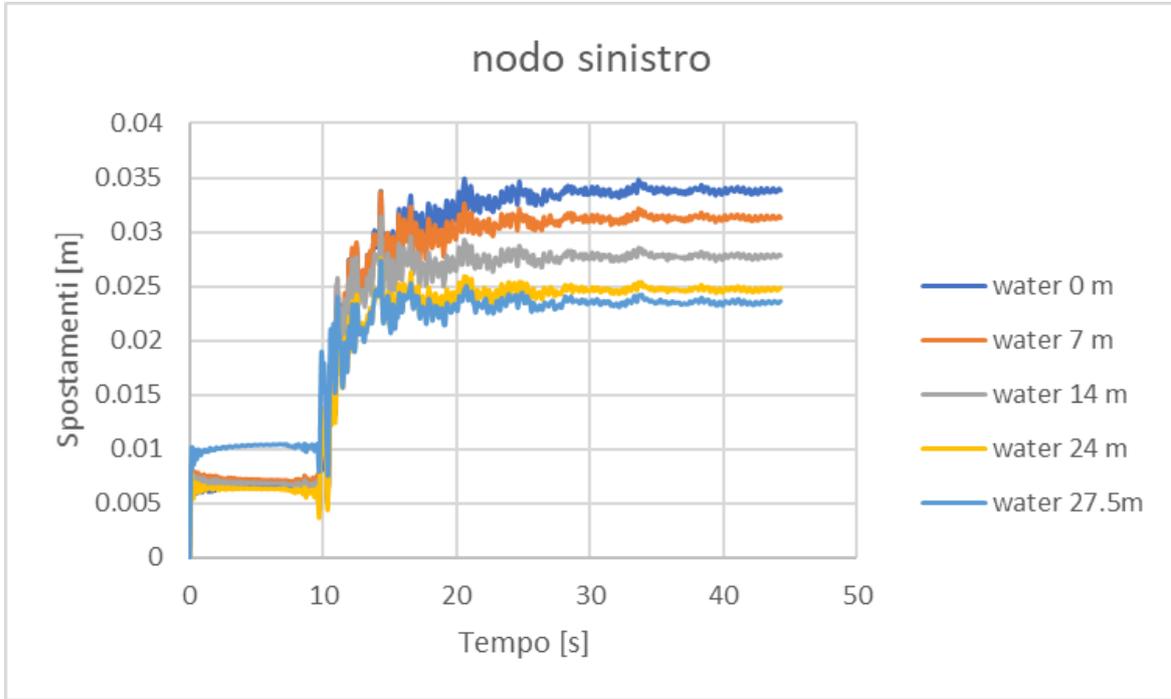


Figura 4.78: Spostamento nodo sinistro

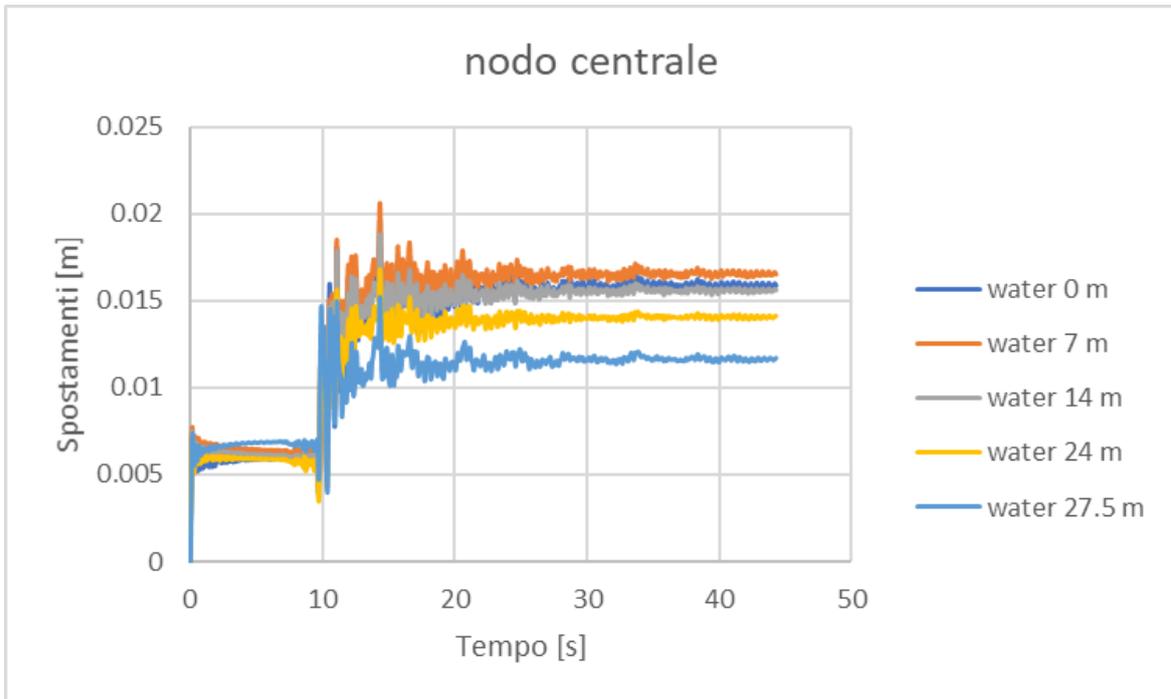
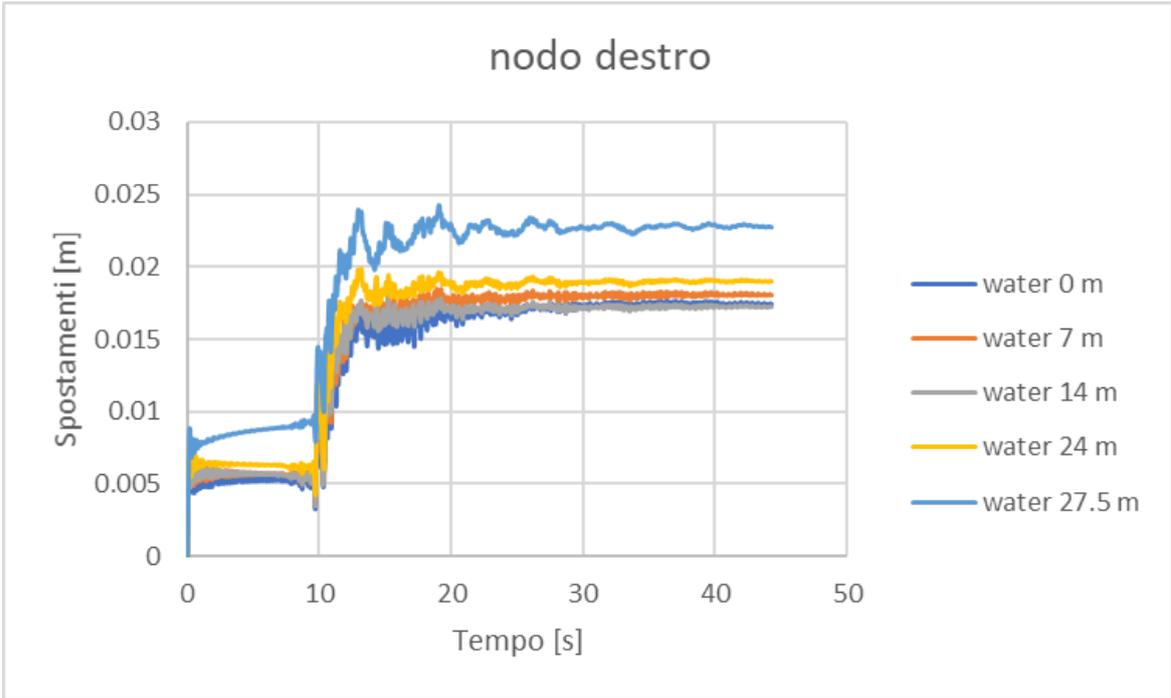
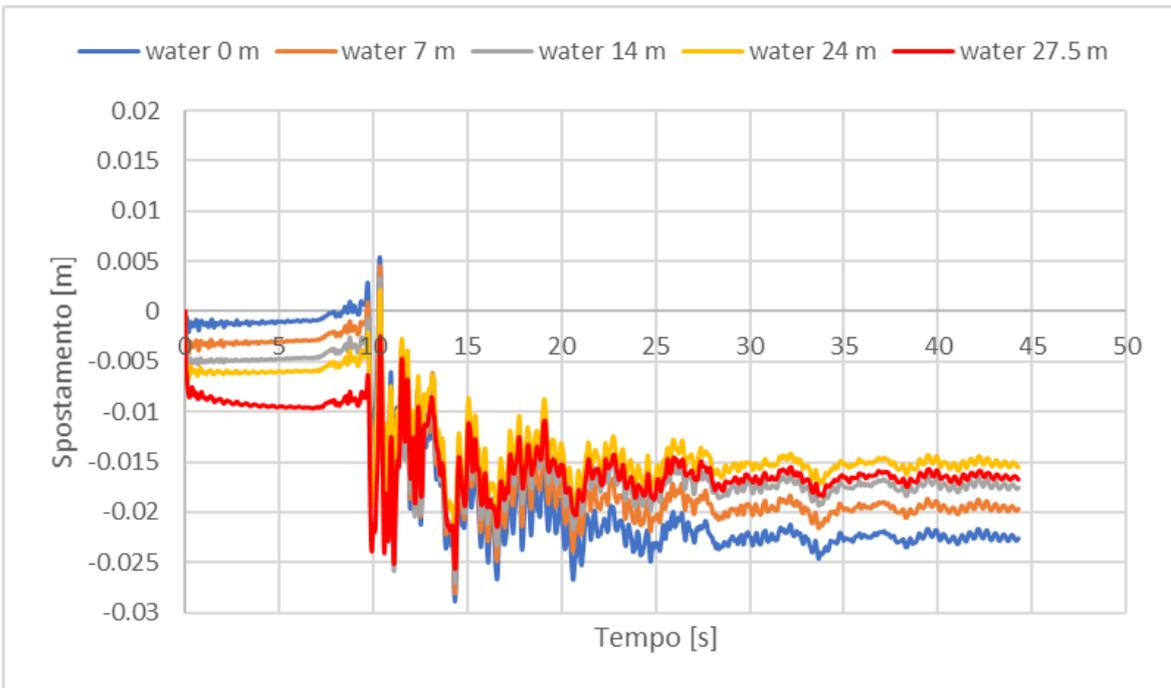


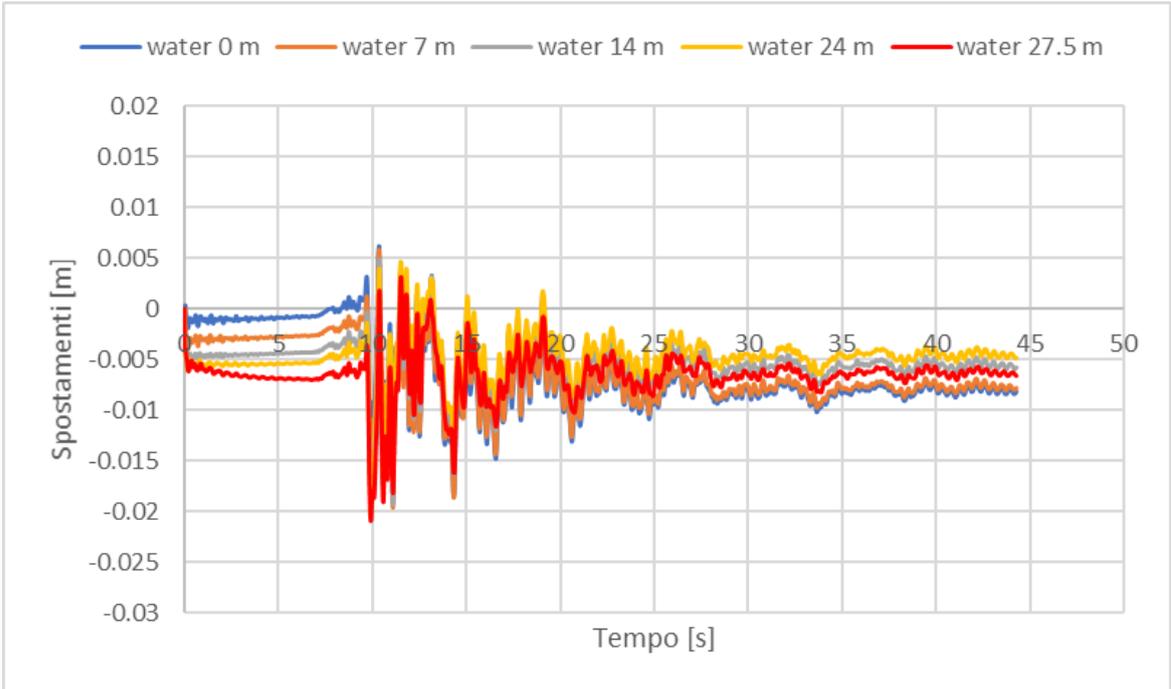
Figura 4.79: Spostamento nodo centrale



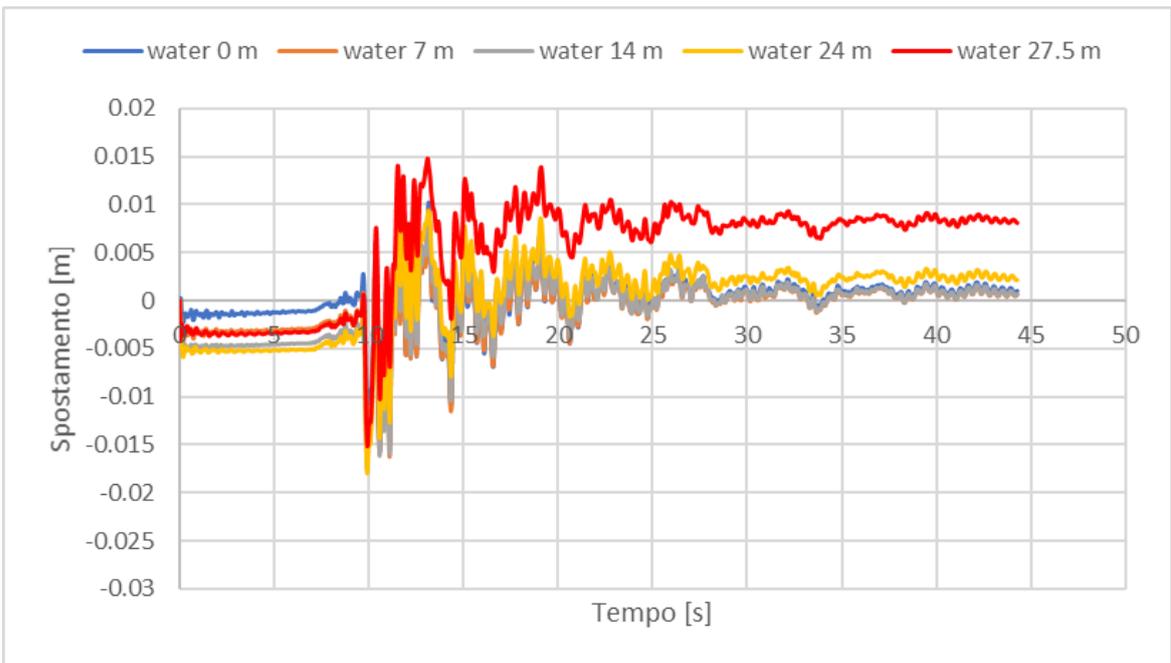
**Figura 4.80:** Spostamento nodo destro



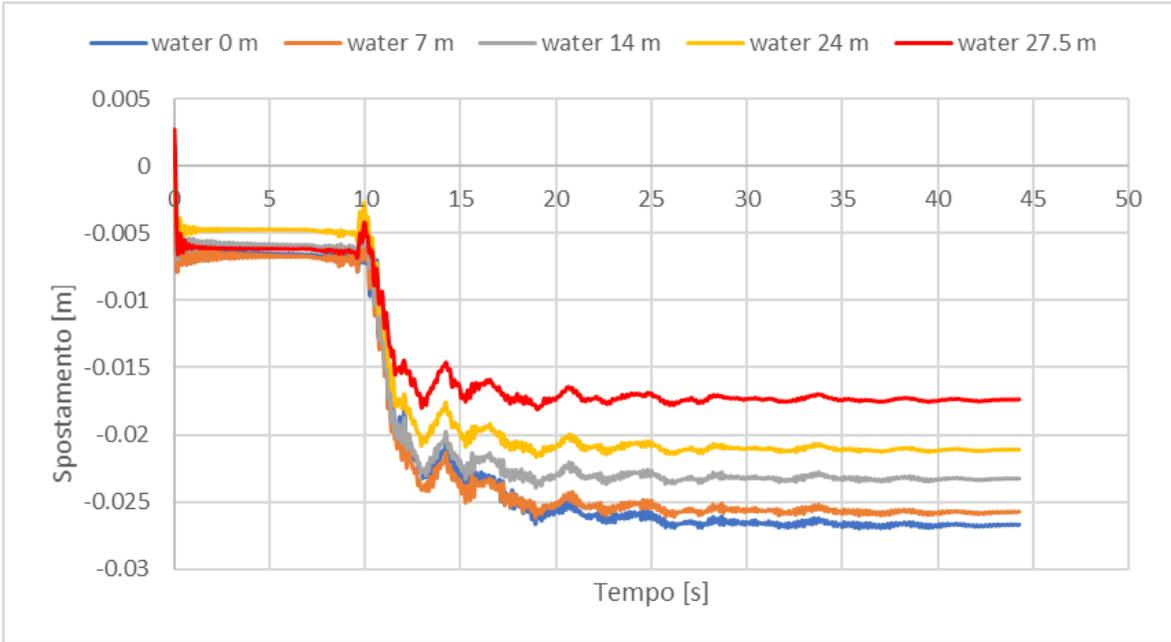
**Figura 4.81:** Spostamento orizzontale nodo sinistro



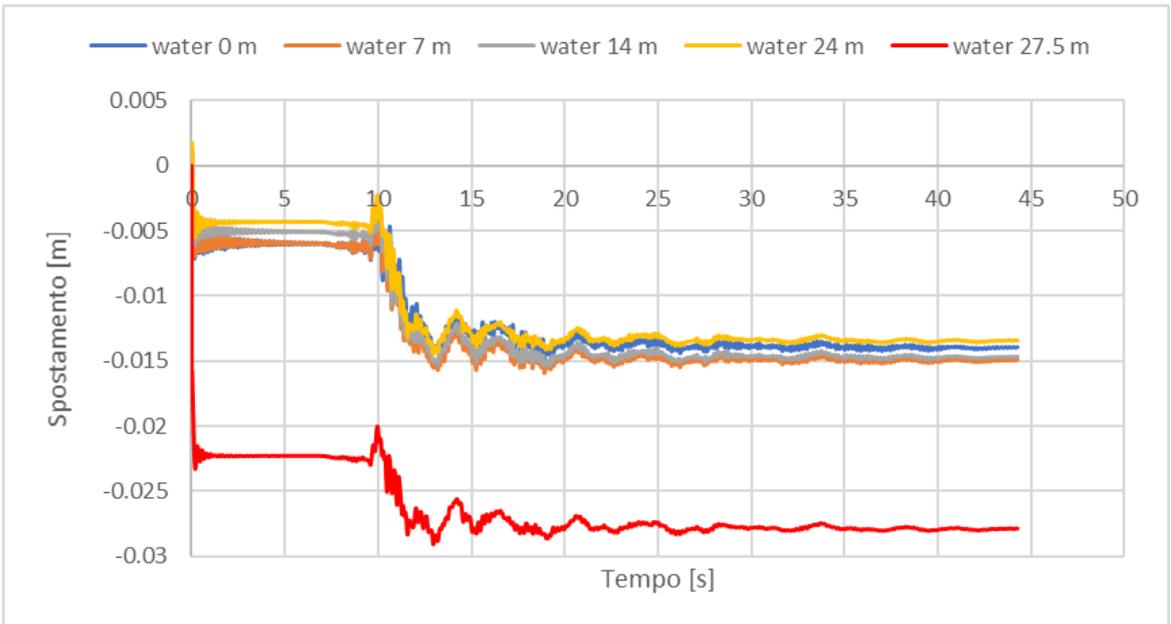
**Figura 4.82:** Spostamento orizzontale nodo centrale



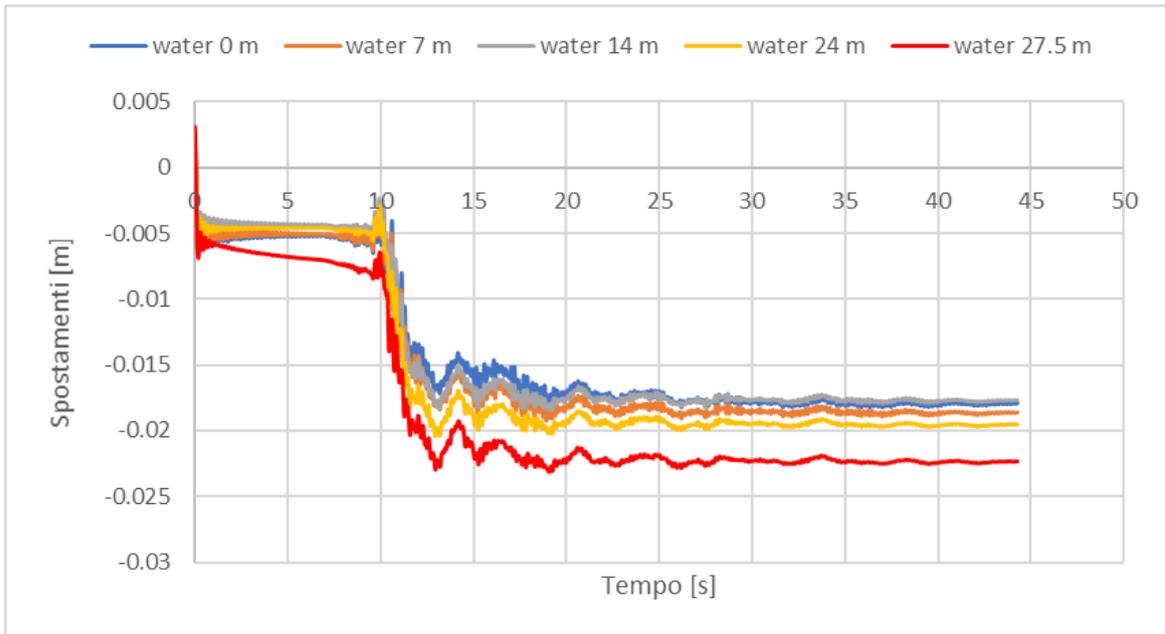
**Figura 4.83:** Spostamento orizzontale nodo destro



**Figura 4.84:** Spostamento verticale nodo sinistro

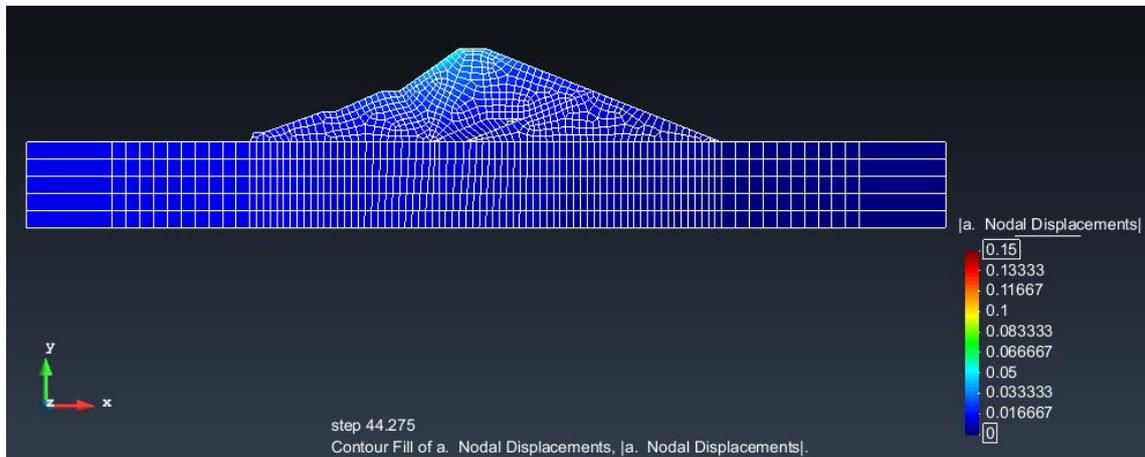


**Figura 4.85:** Spostamento verticale nodo centrale

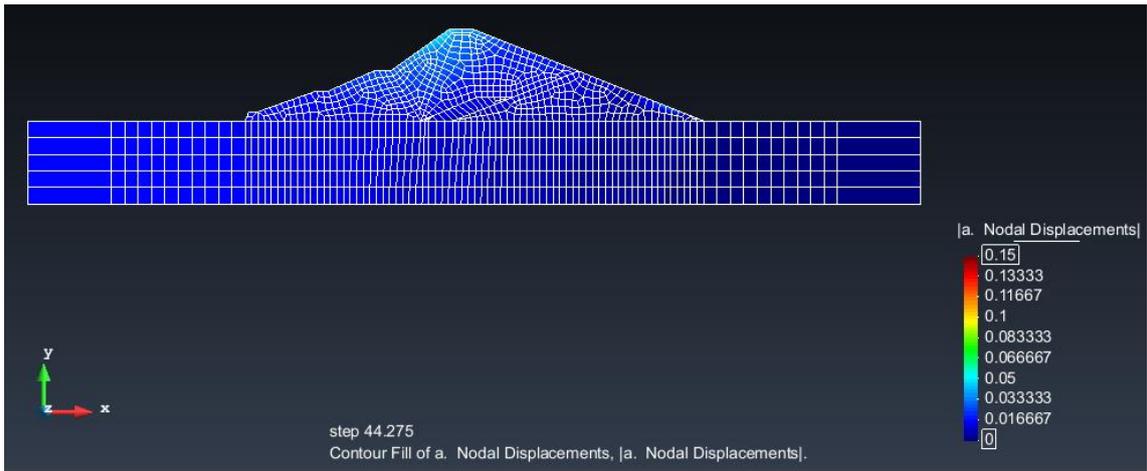


**Figura 4.86:** Spostamento verticale nodo destro

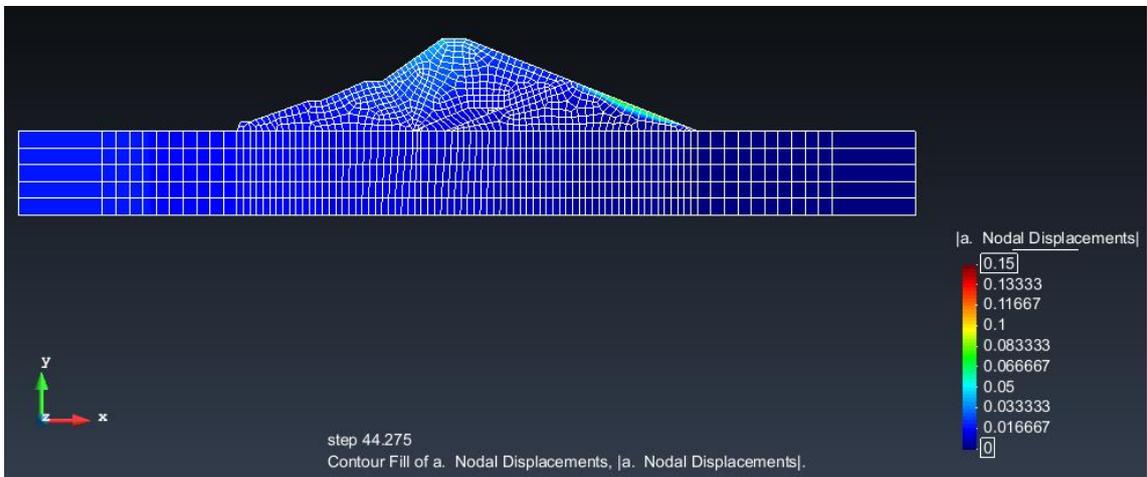
Di seguito si riportano i risultati delle analisi predette in termini di distribuzione degli spostamenti dei nodi mediante la rappresentazione di contour fill e di vettori spostamento.



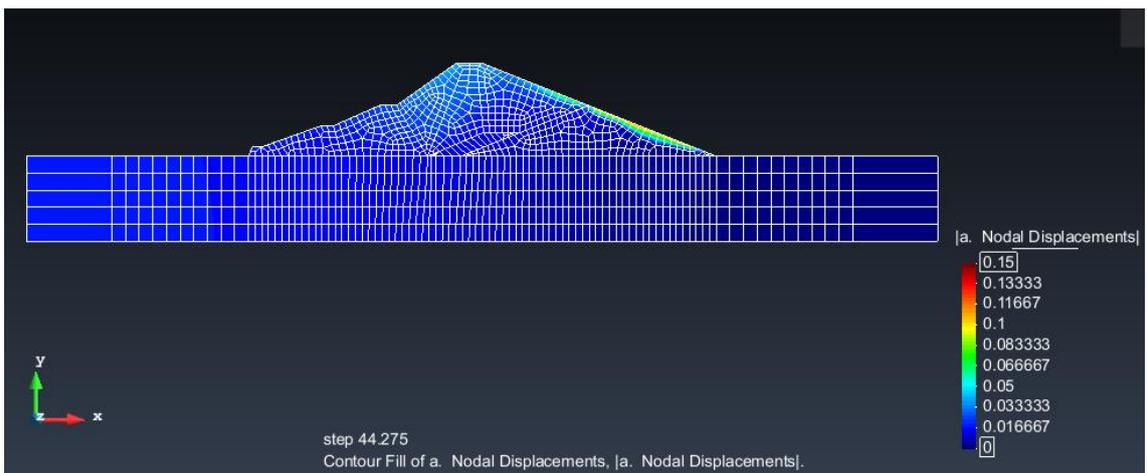
**Figura 4.87:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso nullo



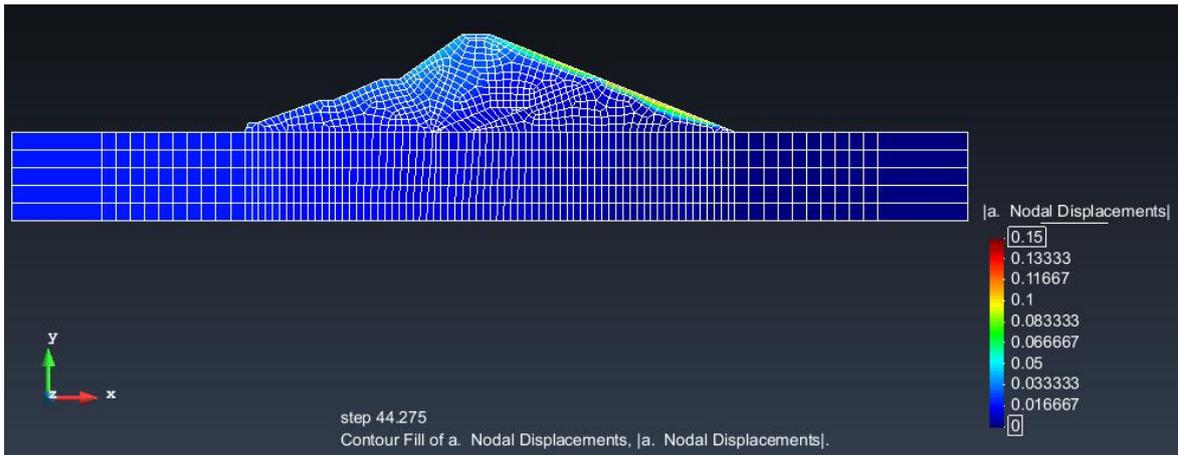
**Figura 4.88:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 7 m



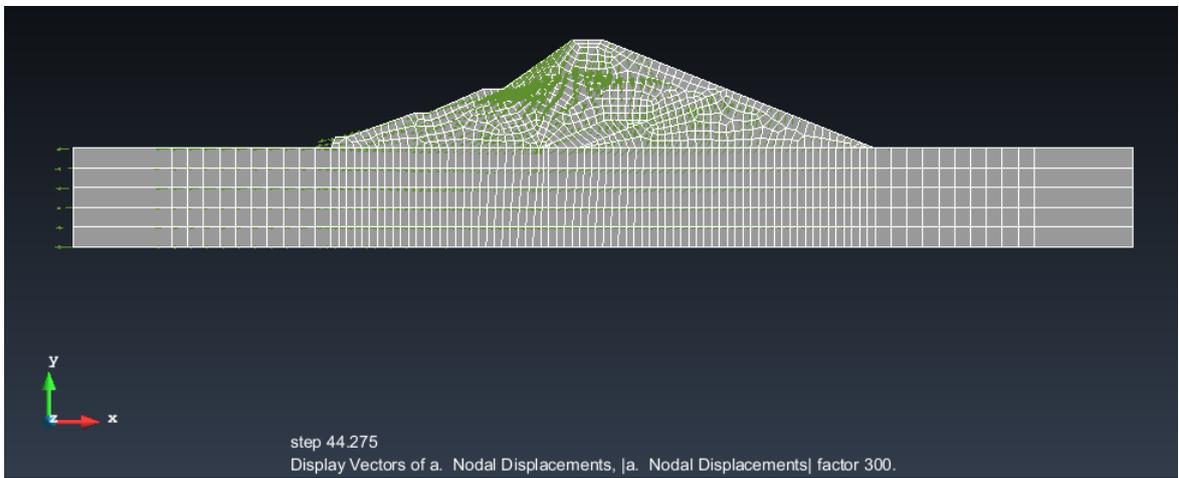
**Figura 4.89:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 14 m



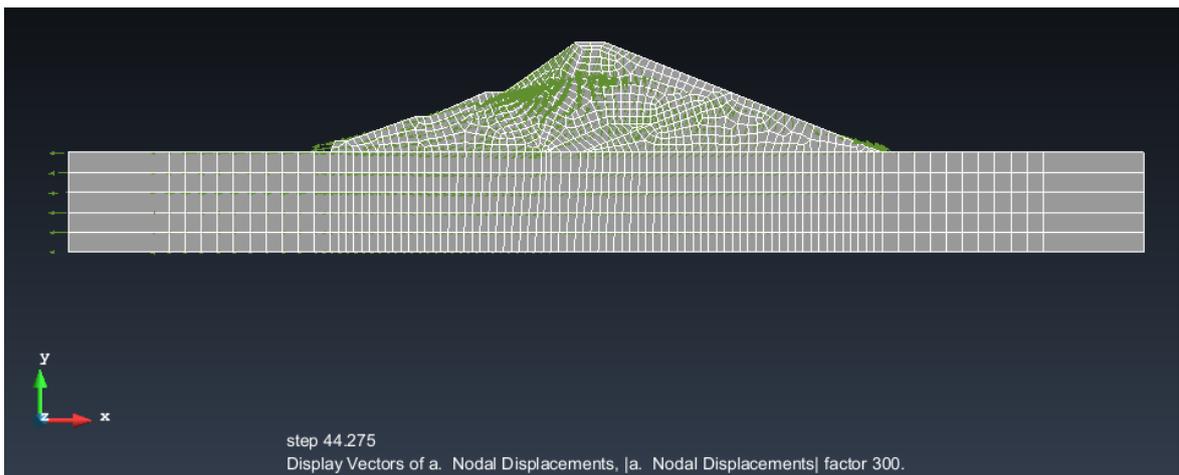
**Figura 4.90:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 24 m



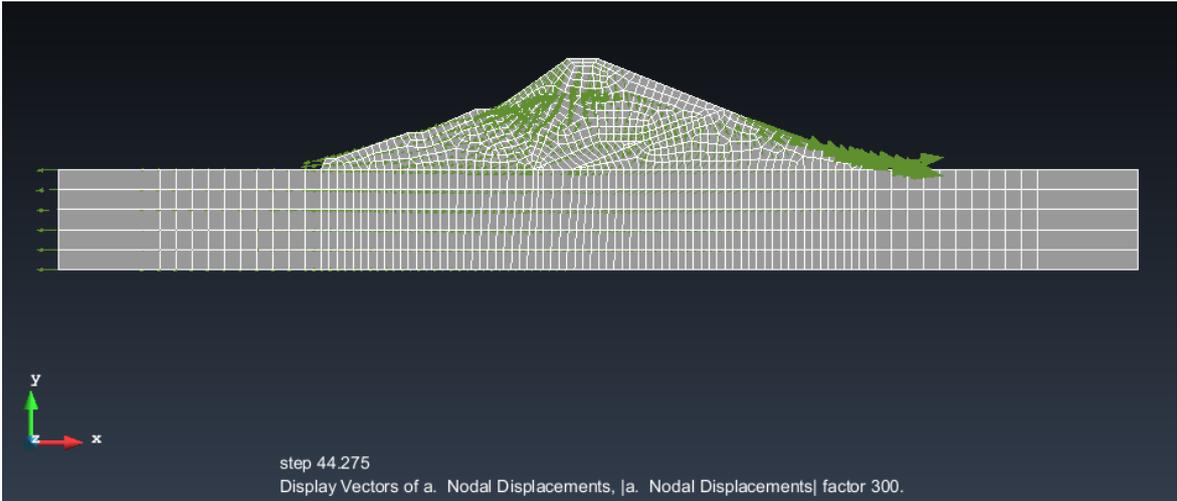
**Figura 4.91:** Contour fill degli spostamenti dei nodi associati ad un livello di invaso pari a 27.5 m



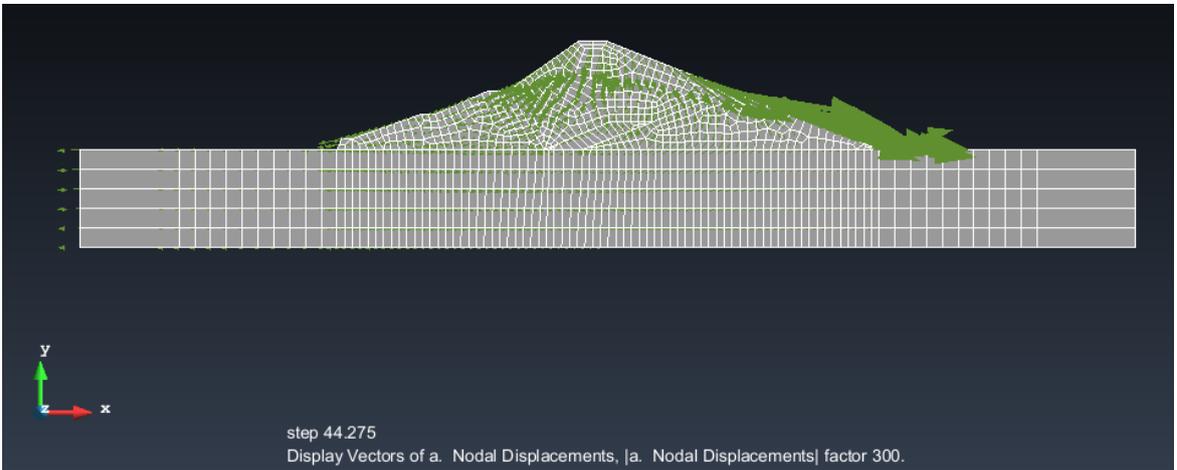
**Figura 4.92:** Vettori spostamento associato ad un livello di invaso nullo



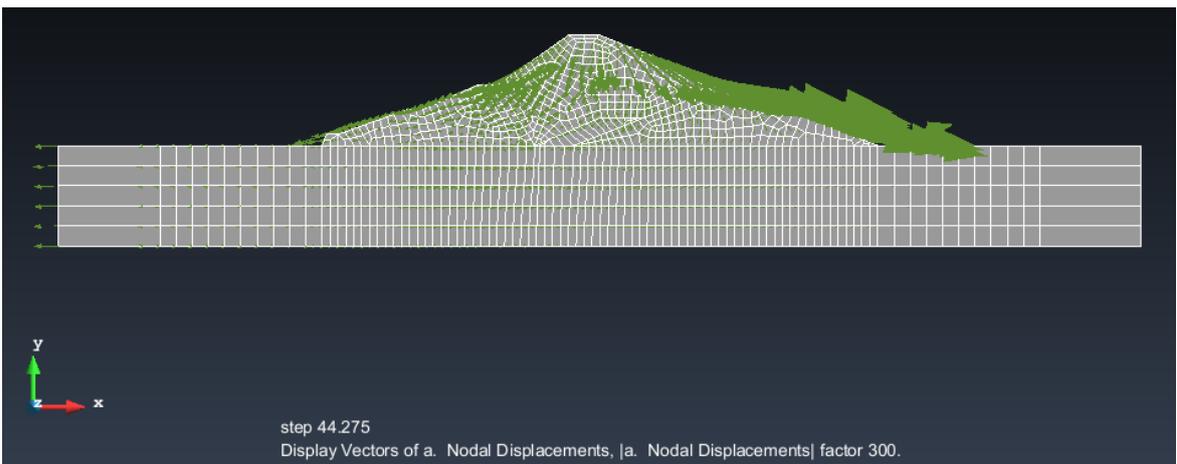
**Figura 4.93:** Vettori spostamento associato ad un livello di invaso pari a 7 m



**Figura 4.94:** Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 14 m



**Figura 4.95:** Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 24 m



**Figura 4.96:** Vettori spostamento associati ad un livello di invaso pari a 27.5 m

## 4.2 Risposta del modello con diversi sismi

Nel presente paragrafo si è confrontata la risposta del modello ai differenti input dinamici a parità di livello di acqua invasato.

### 4.2.1 Livello di invaso nullo

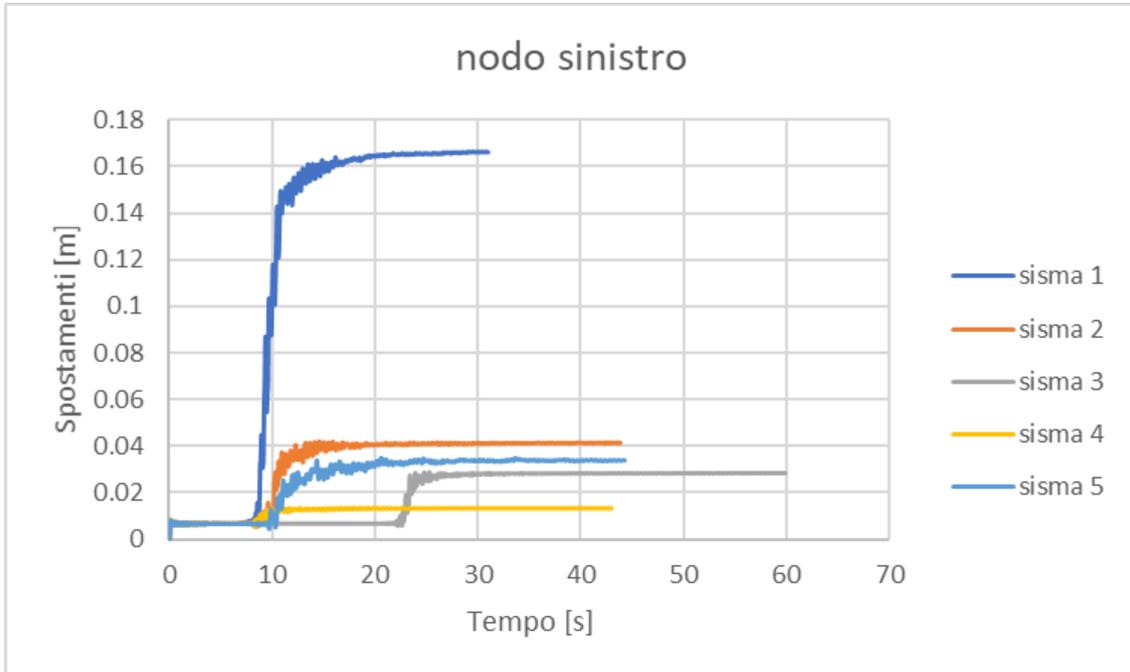


Figura 4.97: Spostamento nodo sinistro

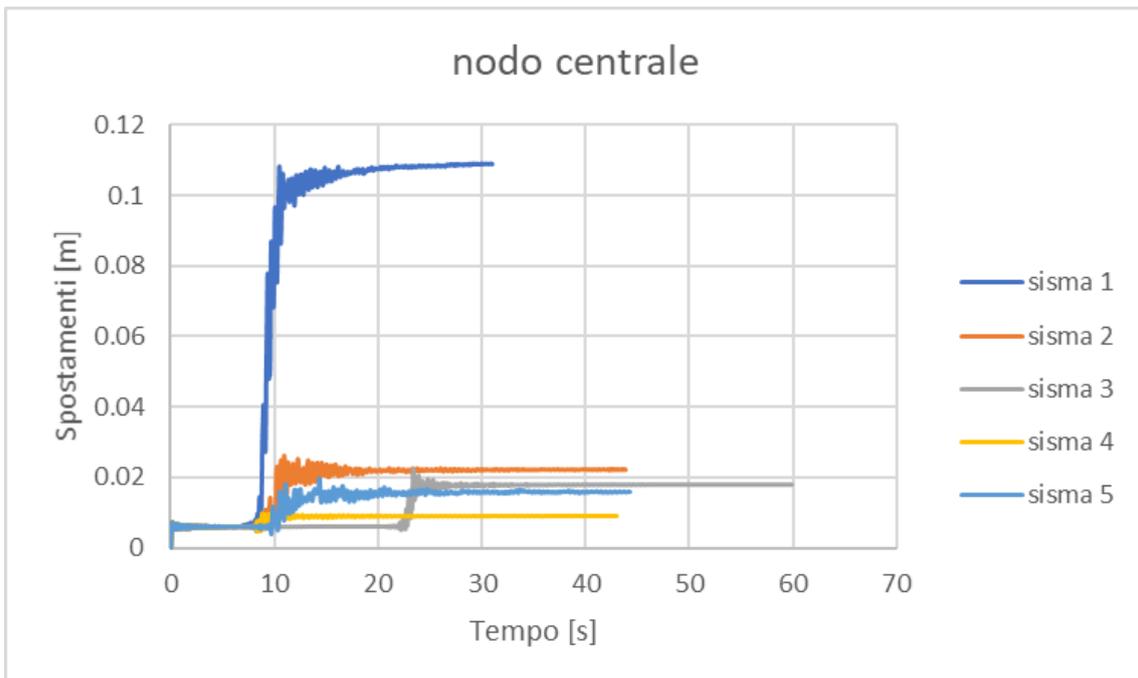
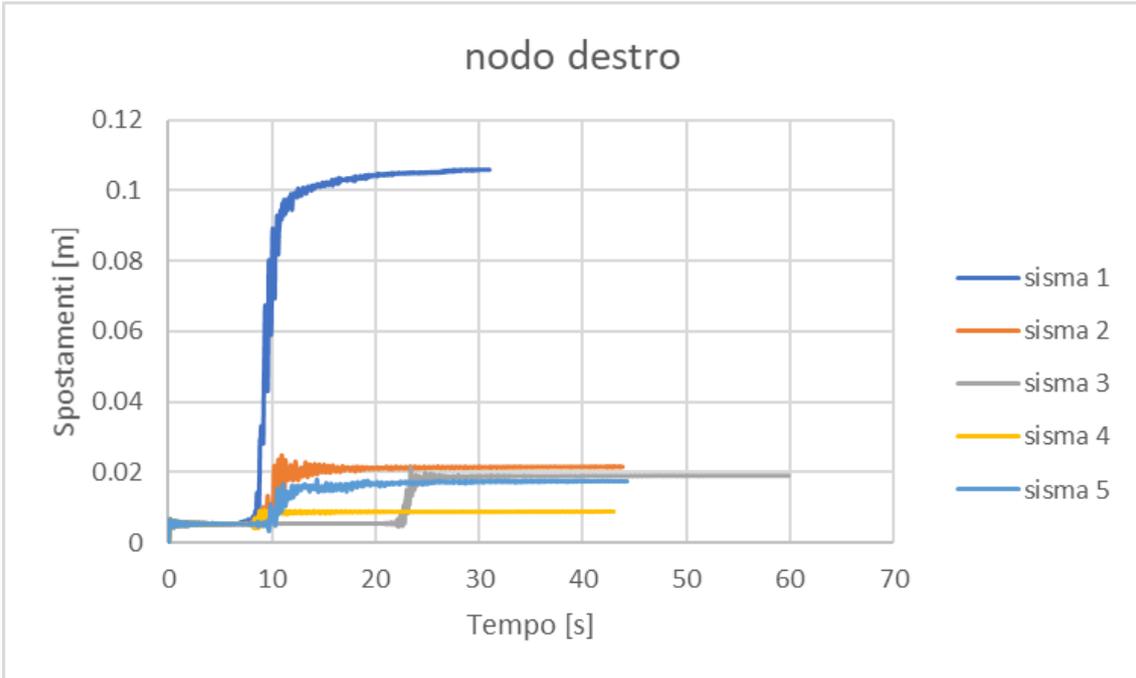
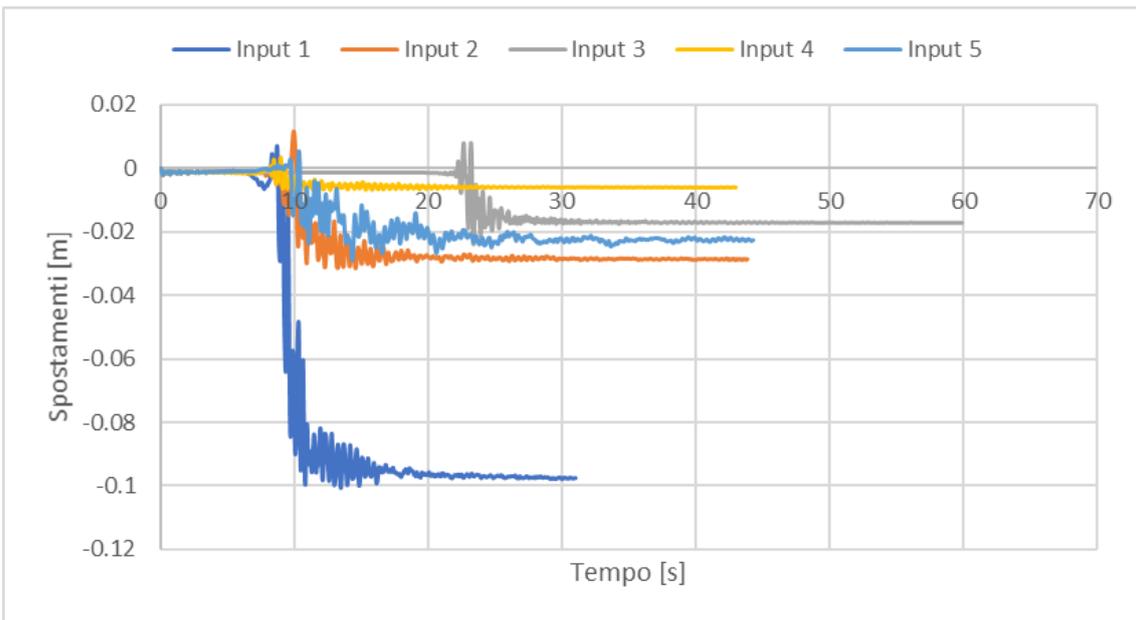


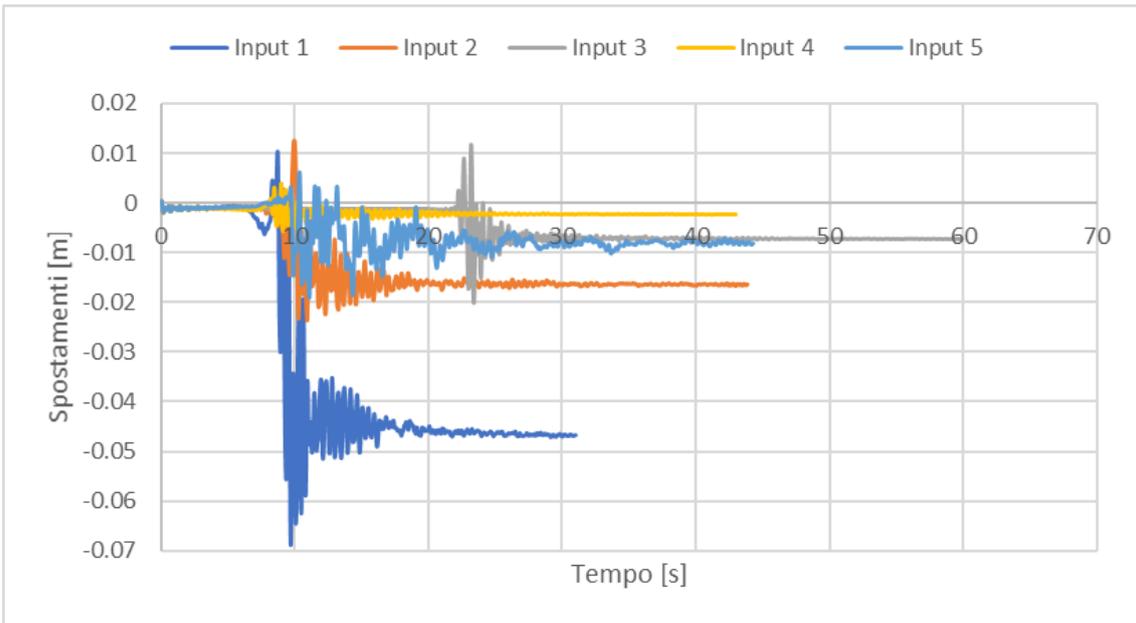
Figura 4.98: Spostamento nodo centrale



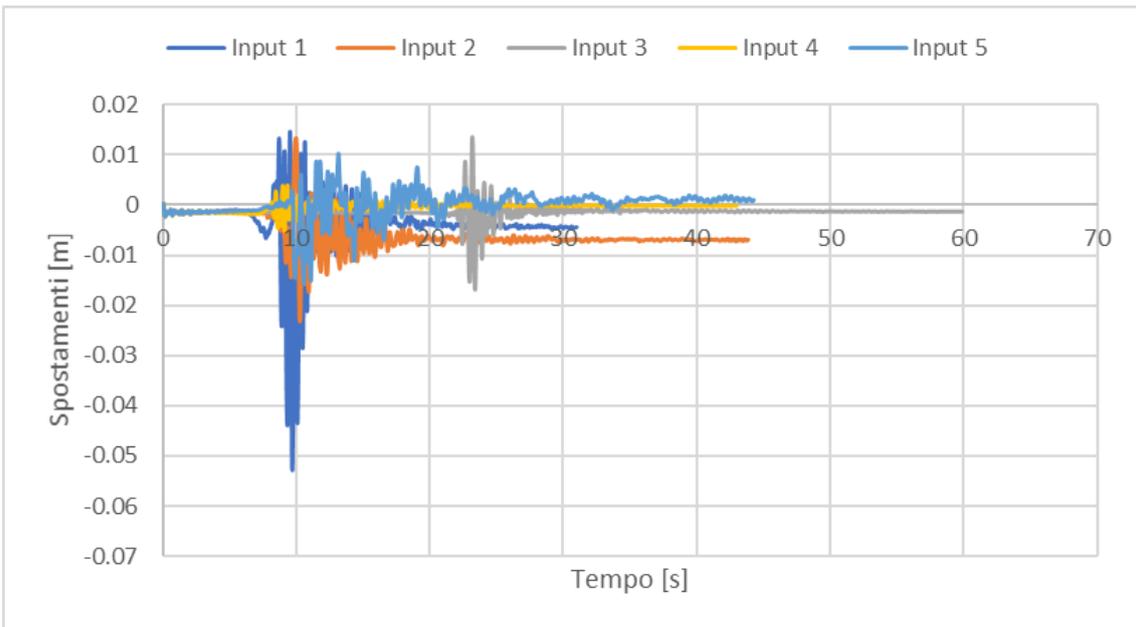
**Figura 4.99:** Spostamento nodo destro



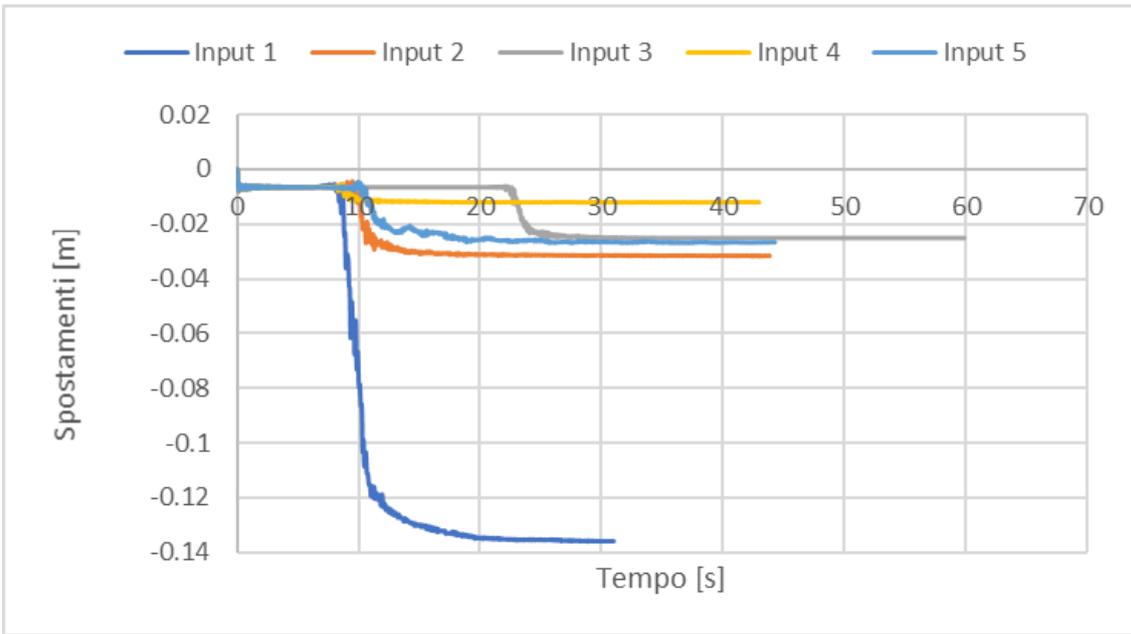
**Figura 4.100:** Spostamenti orizzontali nodo sinistro



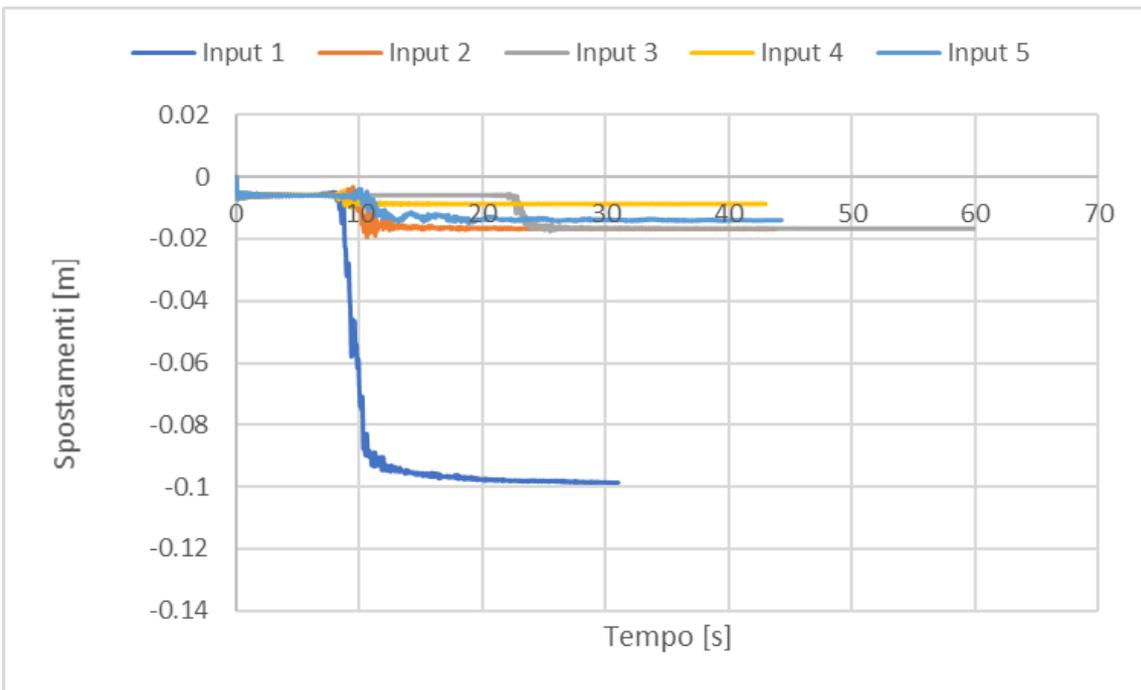
**Figura 4.101:** Spostamenti orizzontali nodo centrale



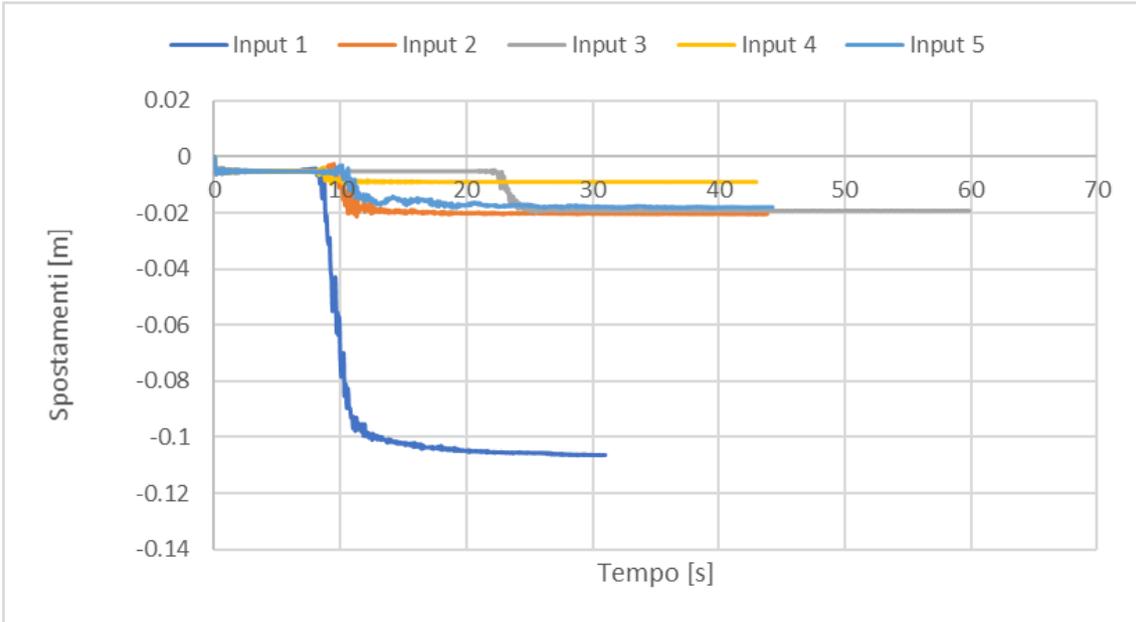
**Figura 4.102:** Spostamenti orizzontali nodo destro



**Figura 4.103:** Spostamenti verticali nodo sinistro



**Figura 4.104:** Spostamenti verticali nodo centrale



**Figura 4.105:** Spostamenti verticali nodo destro

## 4.2.2 Livello di invaso pari a 7 m

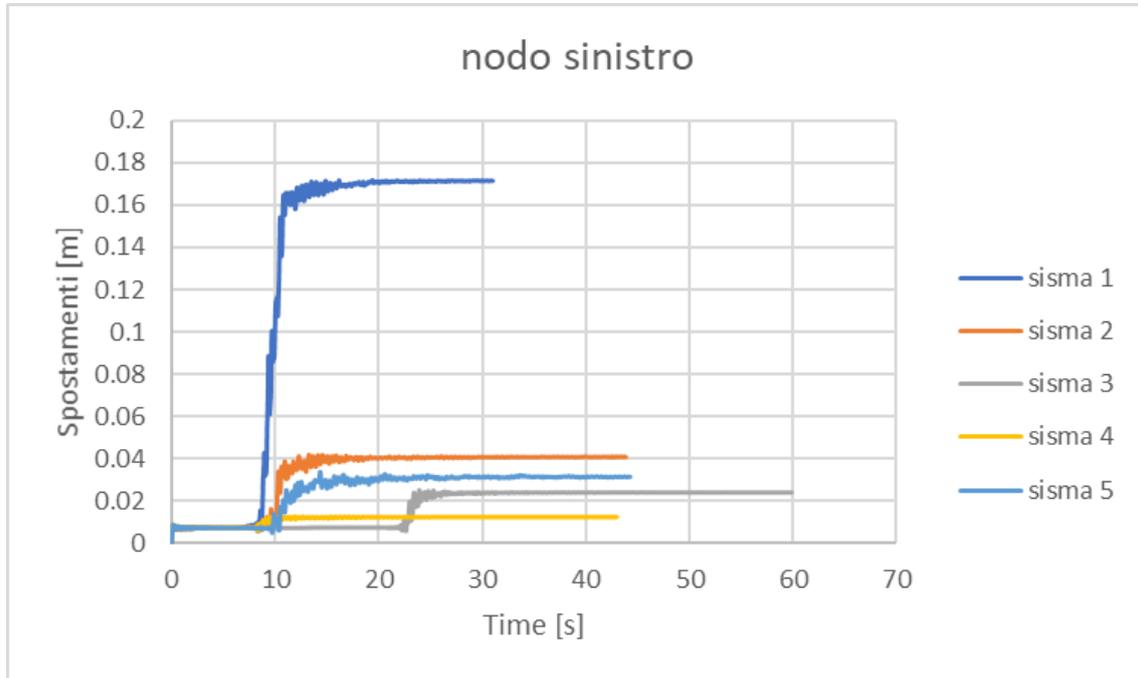


Figura 4.106: Spostamento nodo sinistro

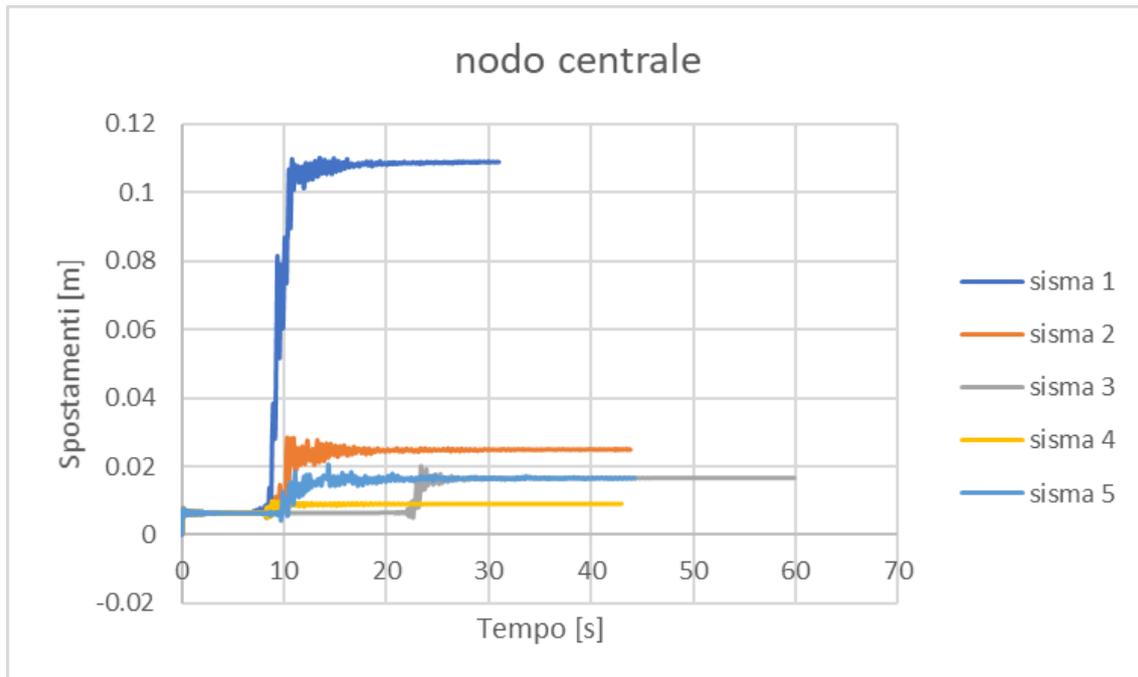
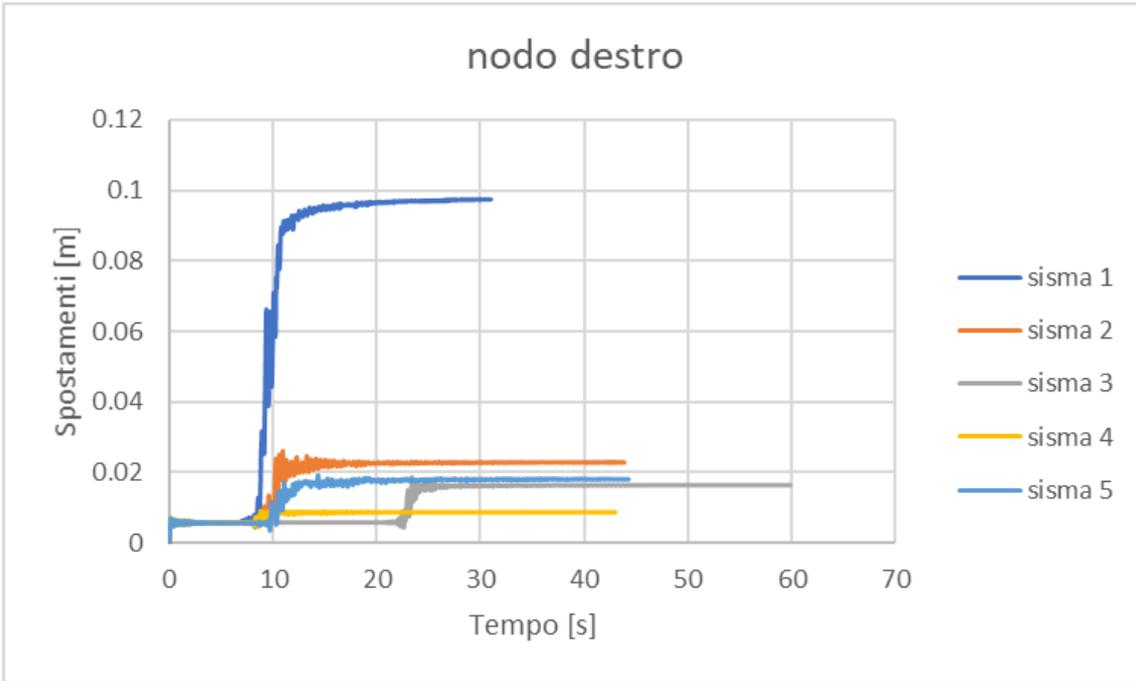
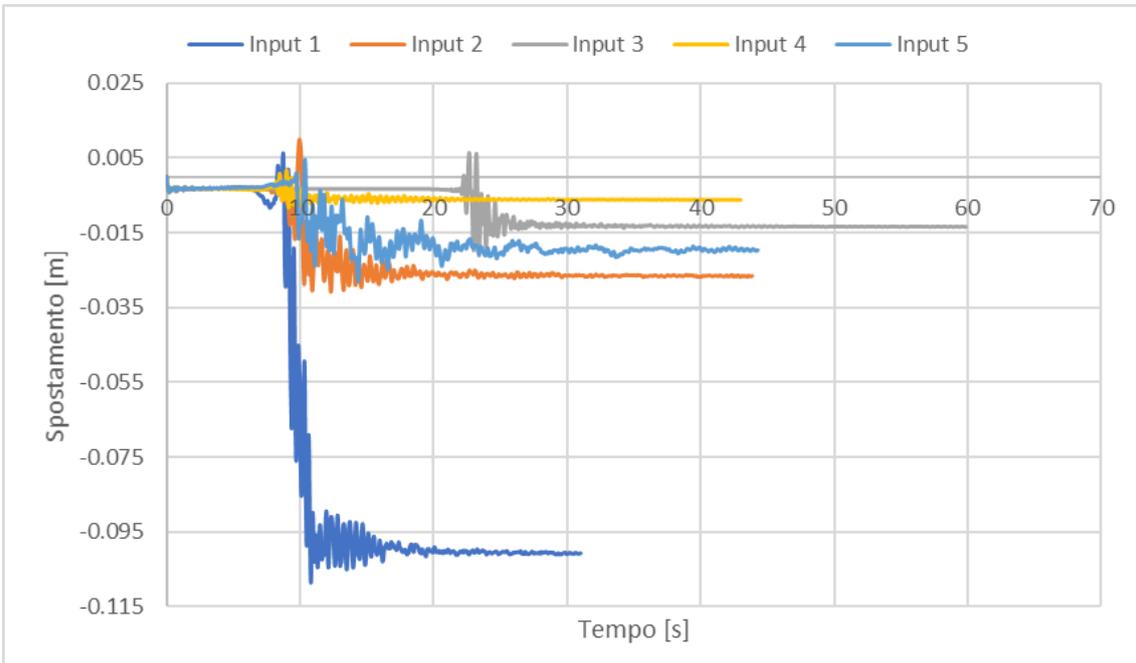


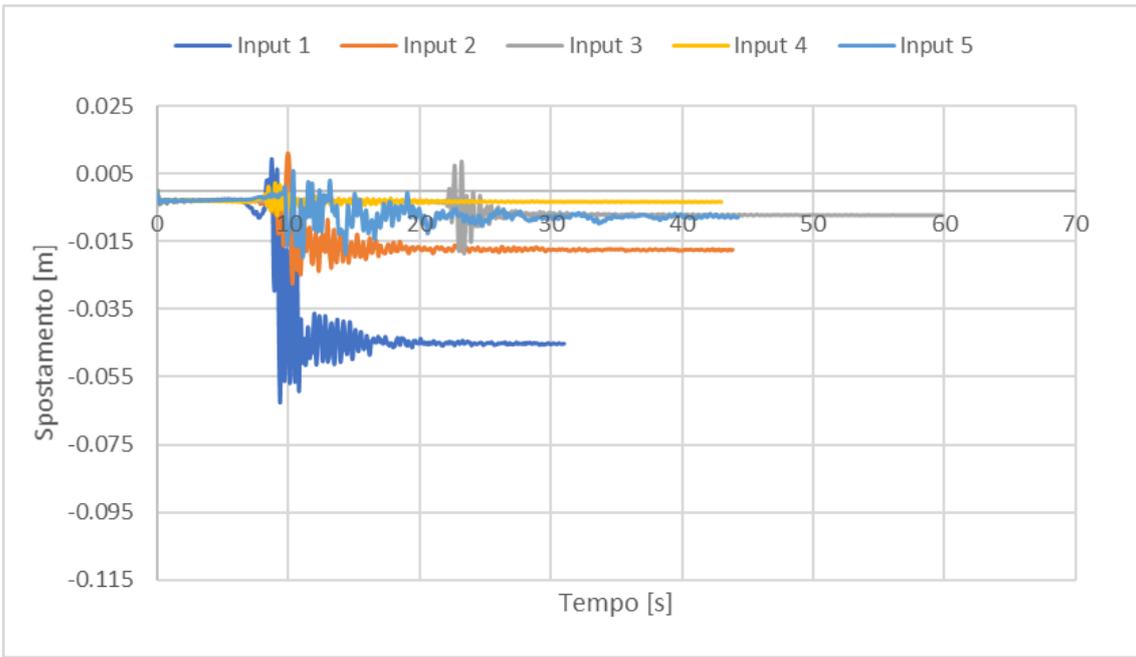
Figura 4.107: Spostamento nodo centrale



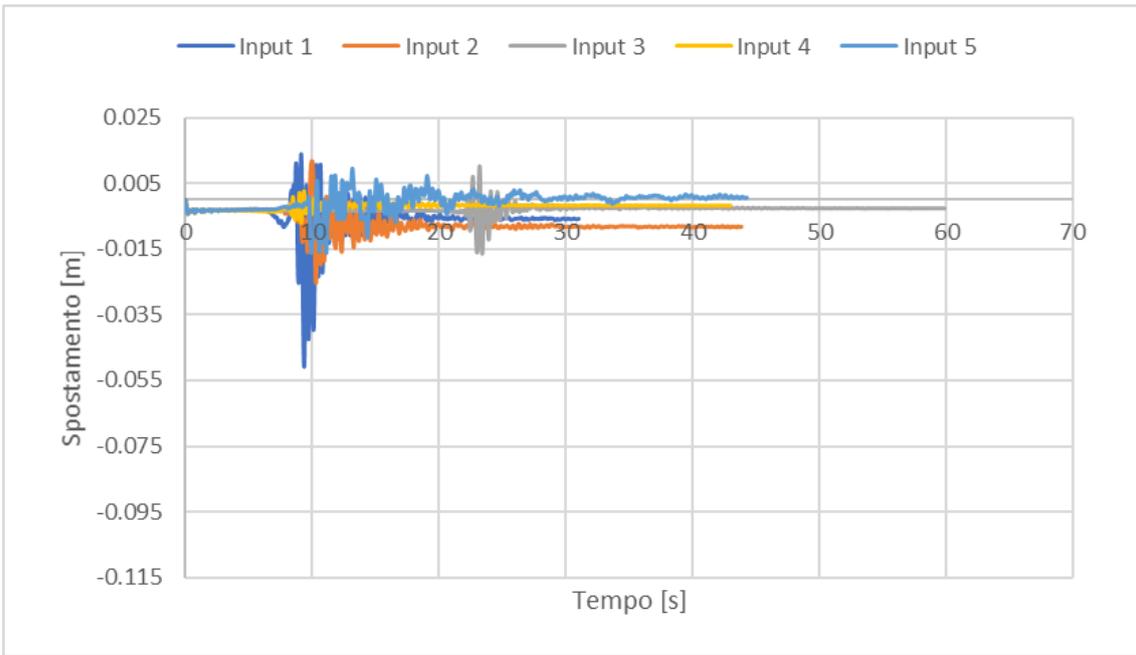
**Figura 4.108:** Spostamento nodo destro



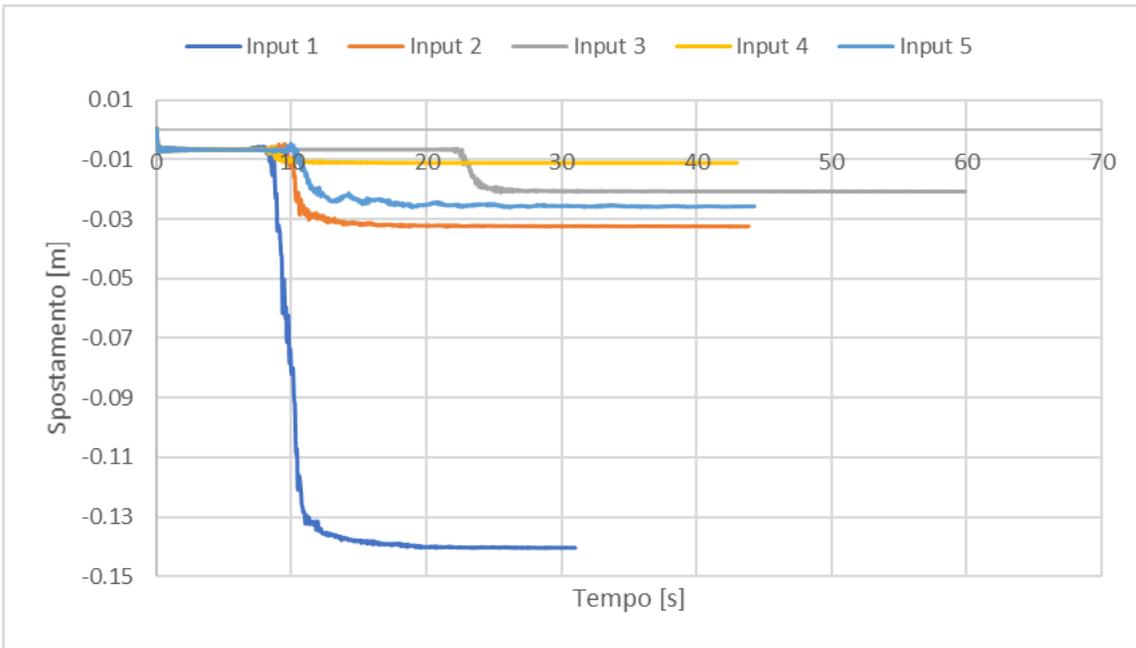
**Figura 4.109:** Spostamento orizzontale nodo sinistro



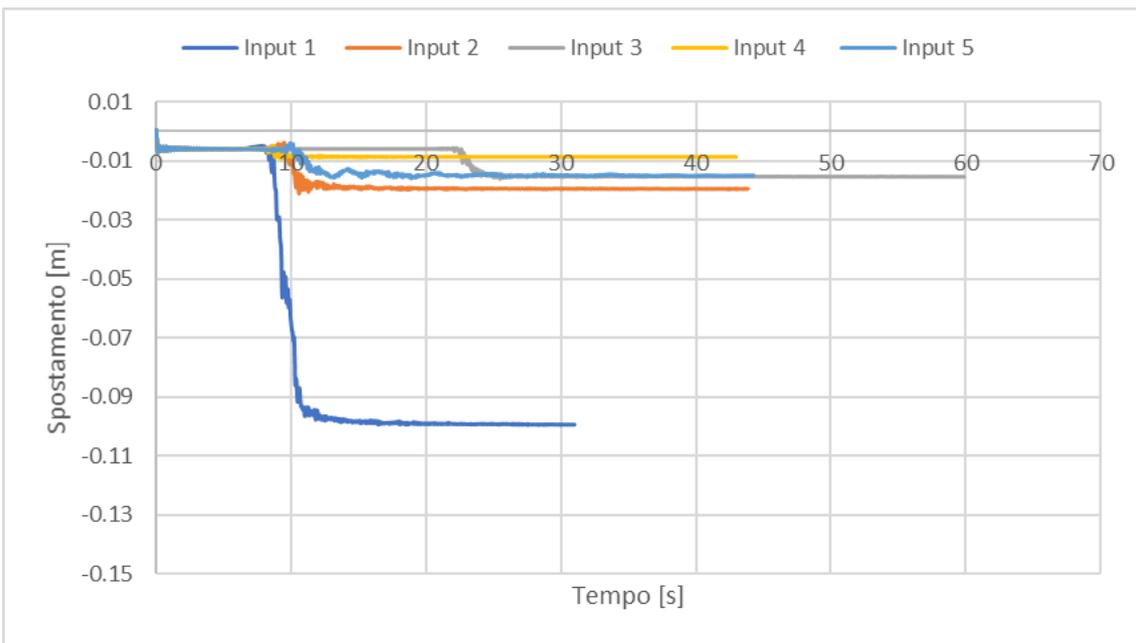
**Figura 4.110:** Spostamento orizzontale nodo centrale



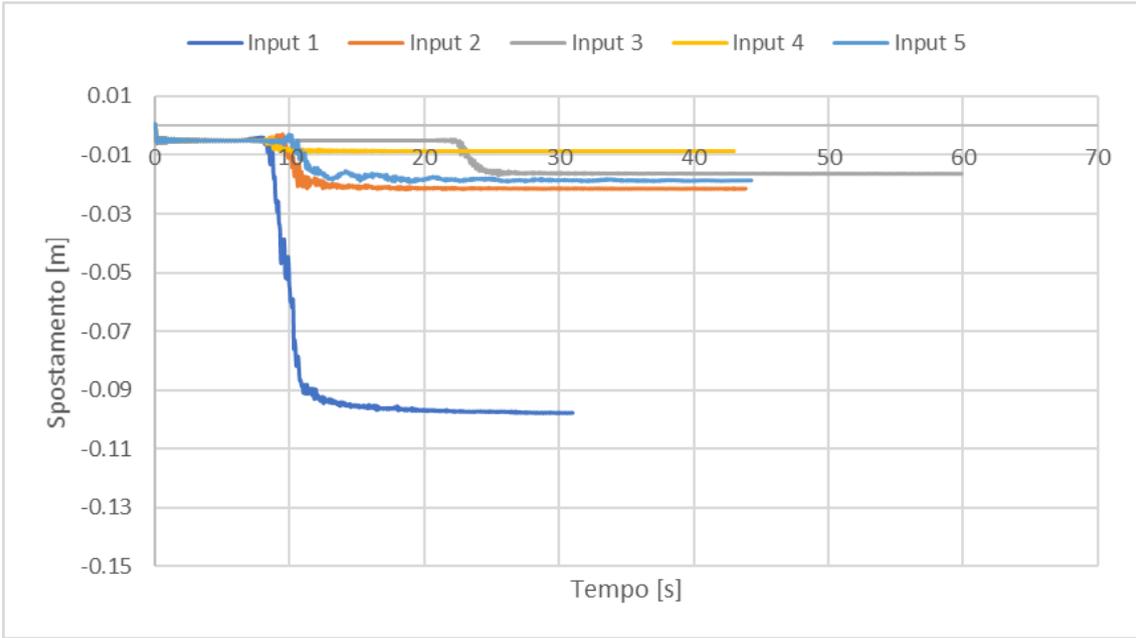
**Figura 4.111:** Spostamento orizzontale nodo destro



**Figura 4.112:** Spostamento verticale nodo sinistro



**Figura 4.113:** Spostamento verticale nodo centrale



**Figura 4.114:** Spostamento verticale nodo destro

### 4.2.3 Livello di invaso pari a 14 m

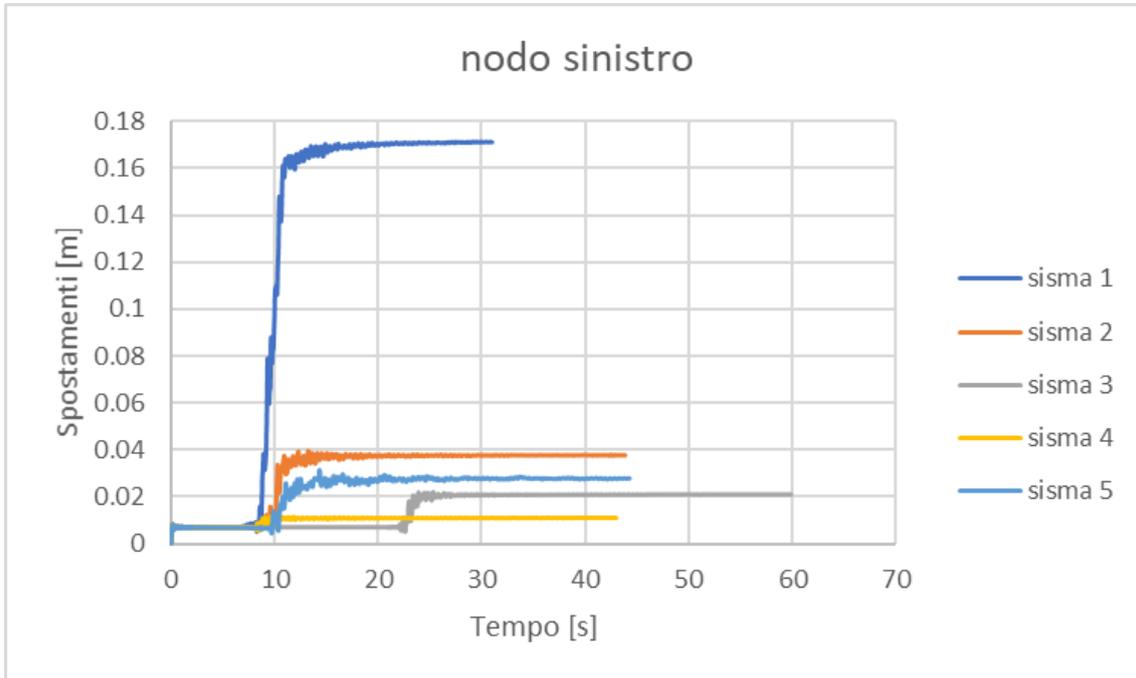


Figura 4.115: Spostamento nodo sinistro

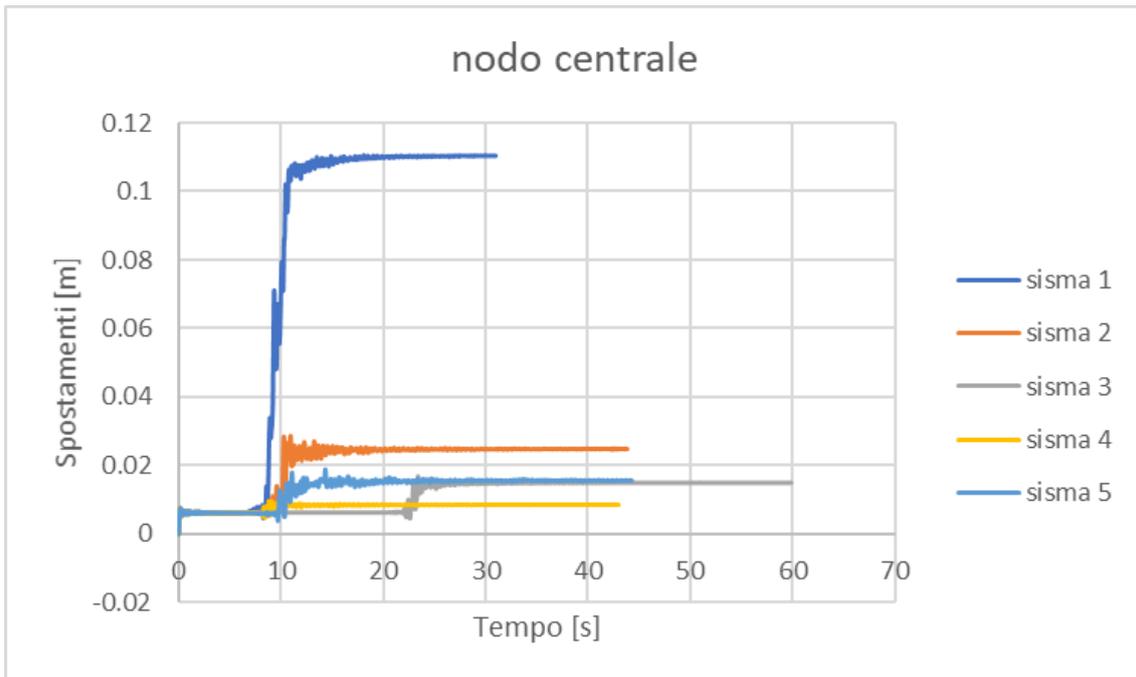
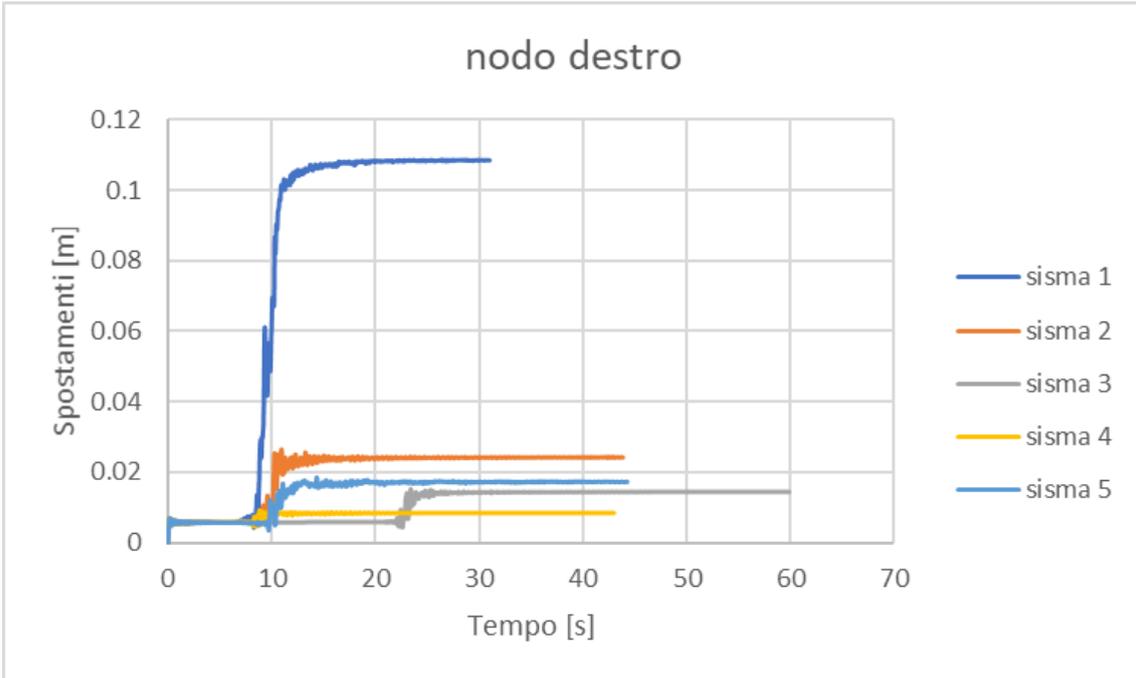
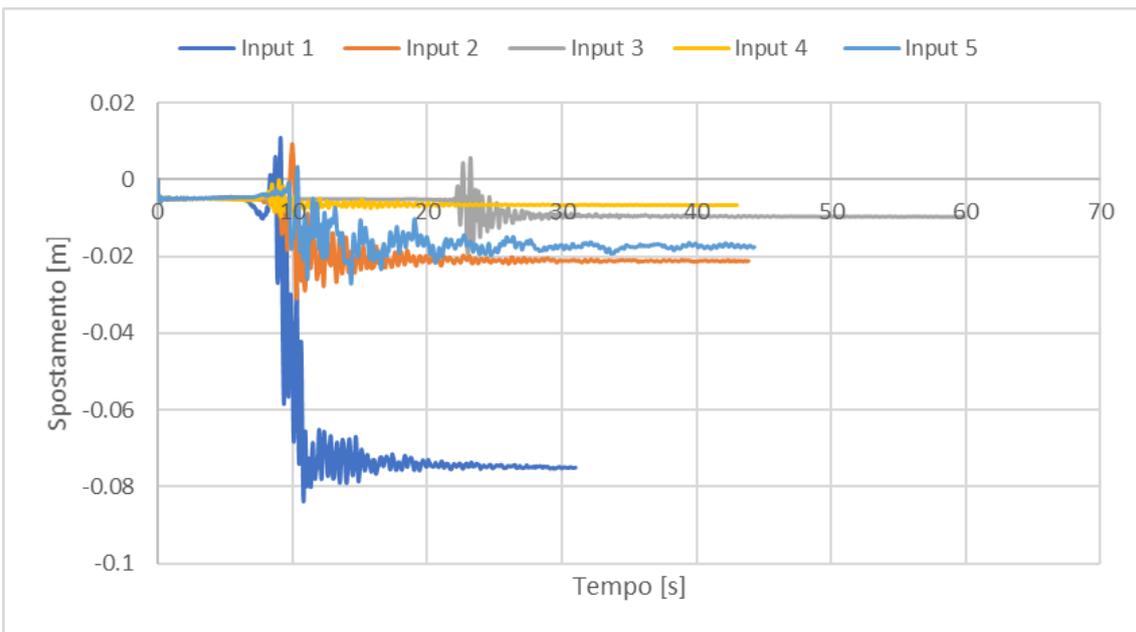


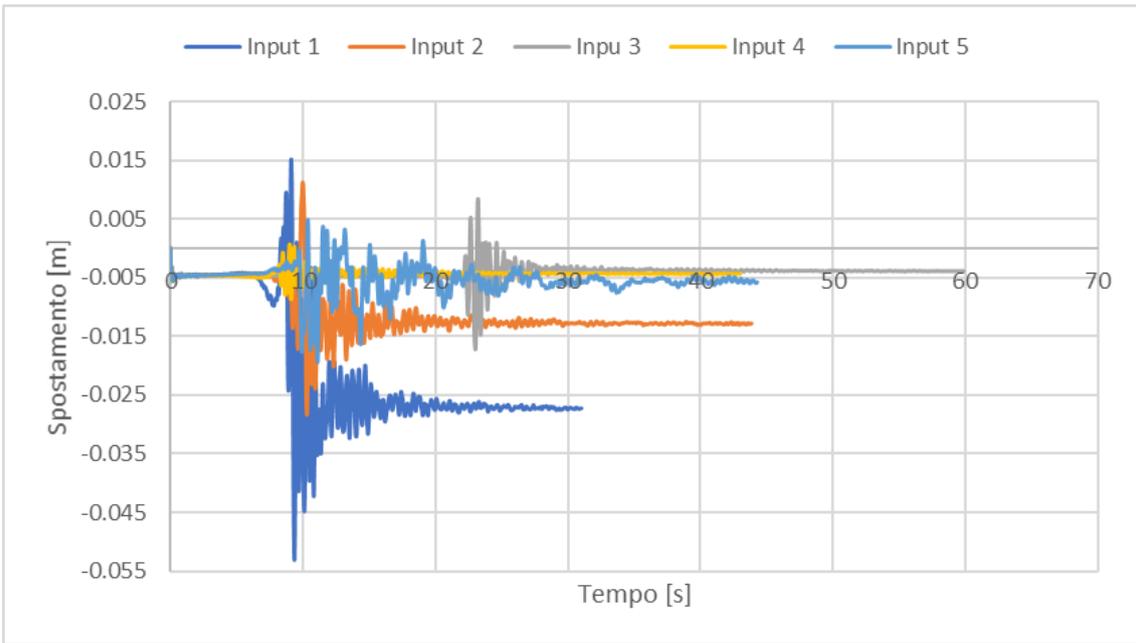
Figura 4.116: Spostamento nodo centrale



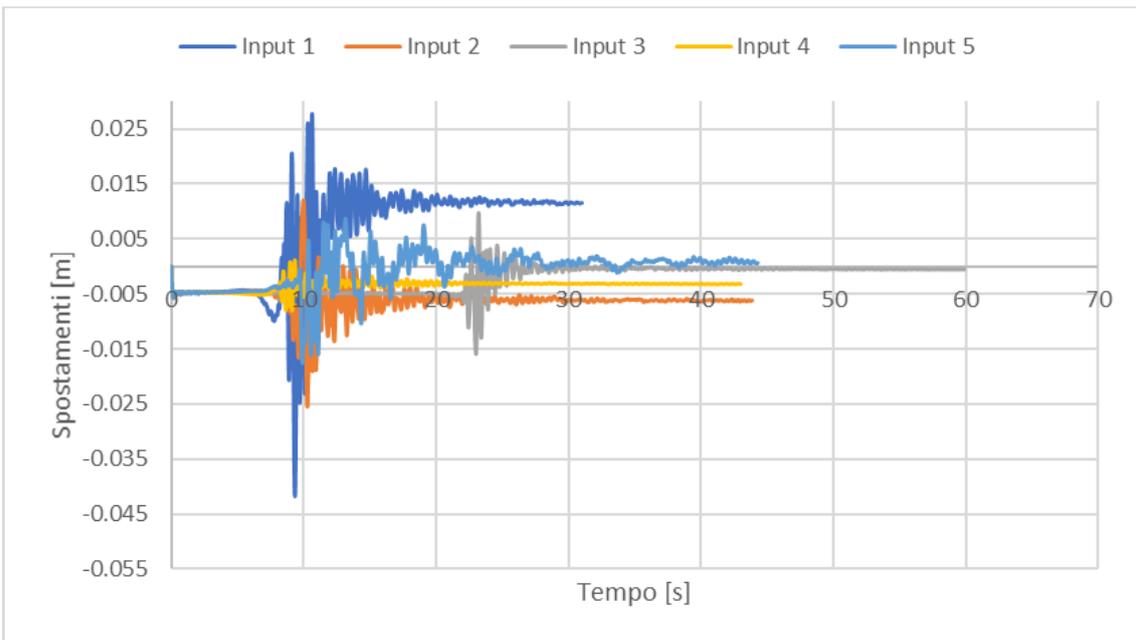
**Figura 4.117:** Spostamento nodo destro



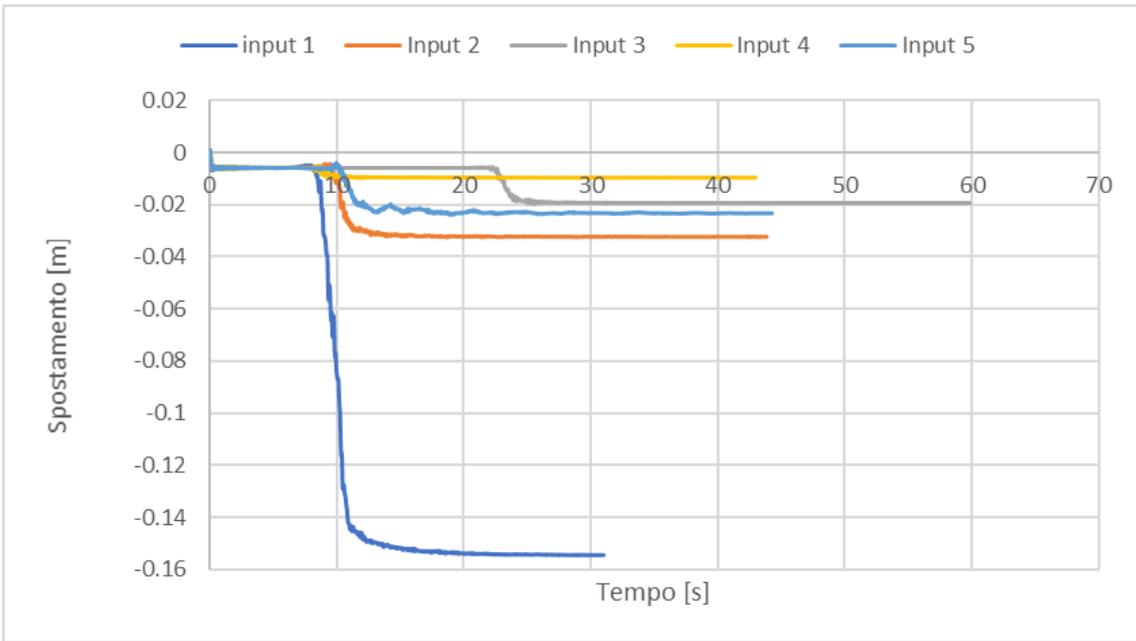
**Figura 4.118:** Spostamento orizzontale nodo sinistro



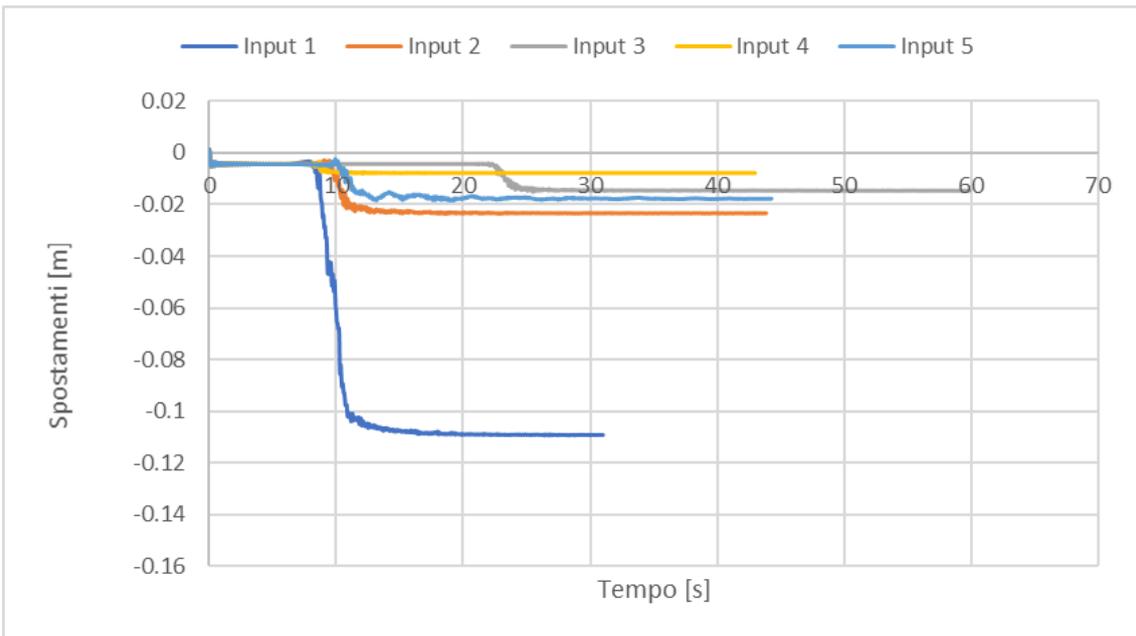
**Figura 4.119:** Spostamento orizzontale nodo centrale



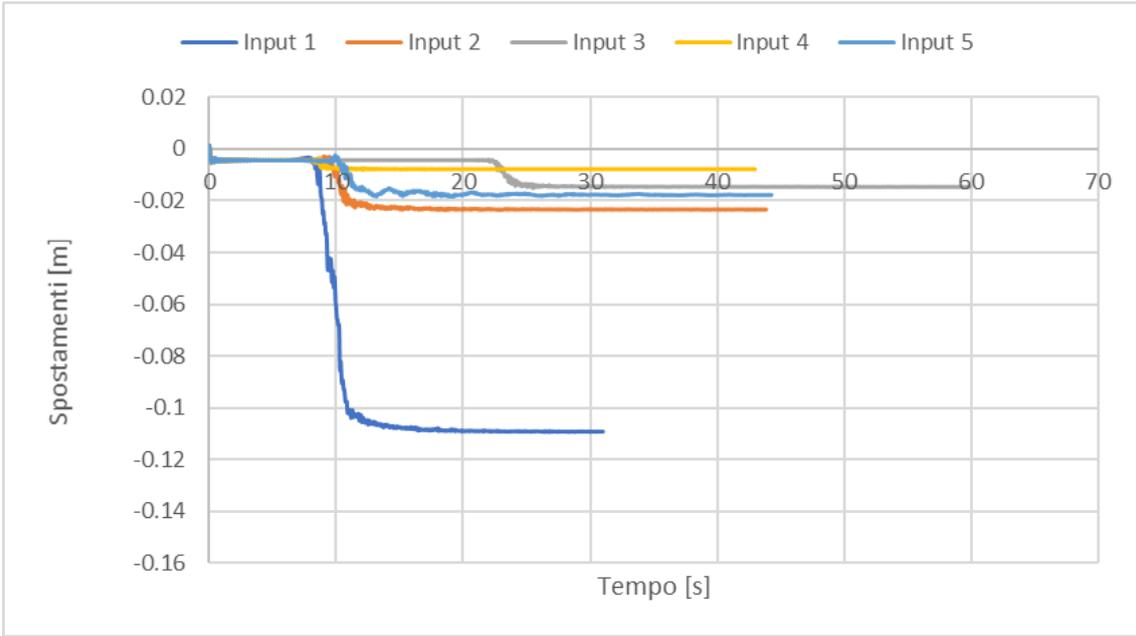
**Figura 4.120:** Spostamento orizzontale nodo destro



**Figura 4.121:** Spostamento verticale nodo sinistro



**Figura 4.122:** Spostamento verticale nodo centrale



**Figura 4.123:** Spostamento verticale nodo destro

#### 4.2.4 Livello di invaso pari a 24 m

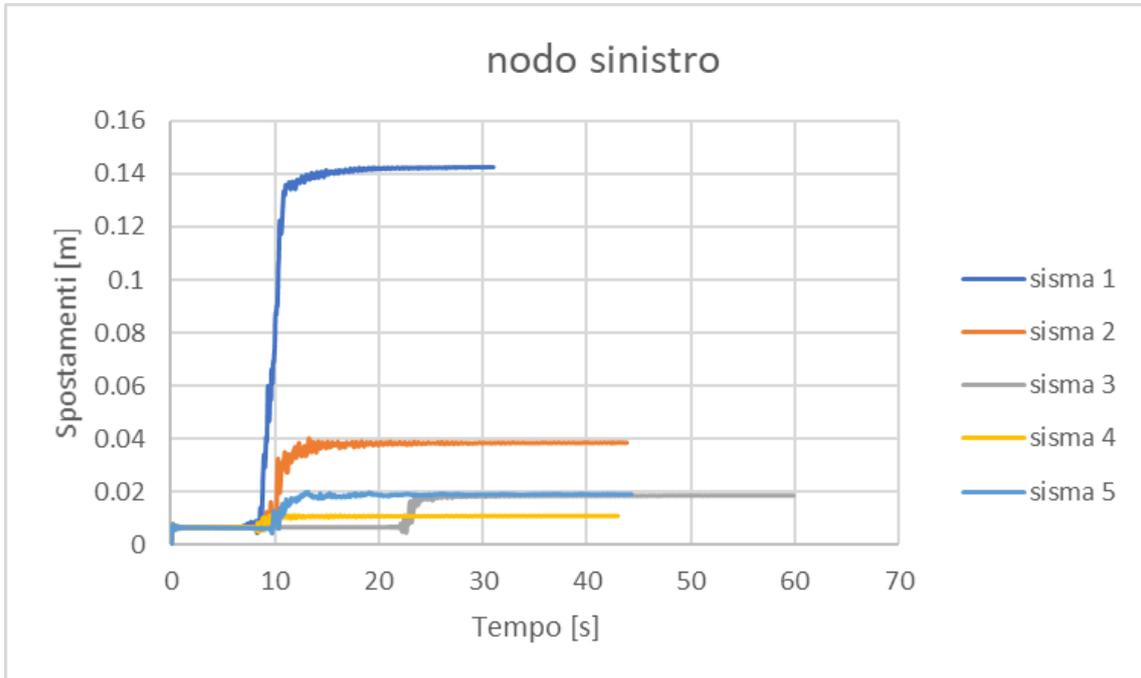


Figura 4.124: Spostamento nodo sinistro

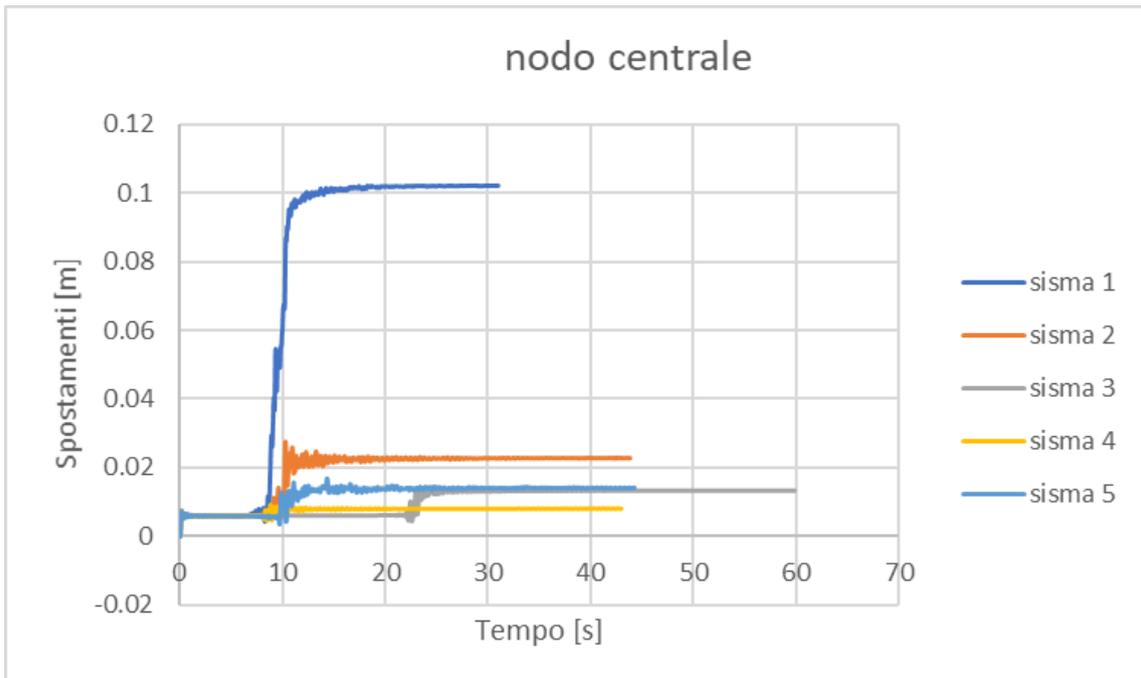
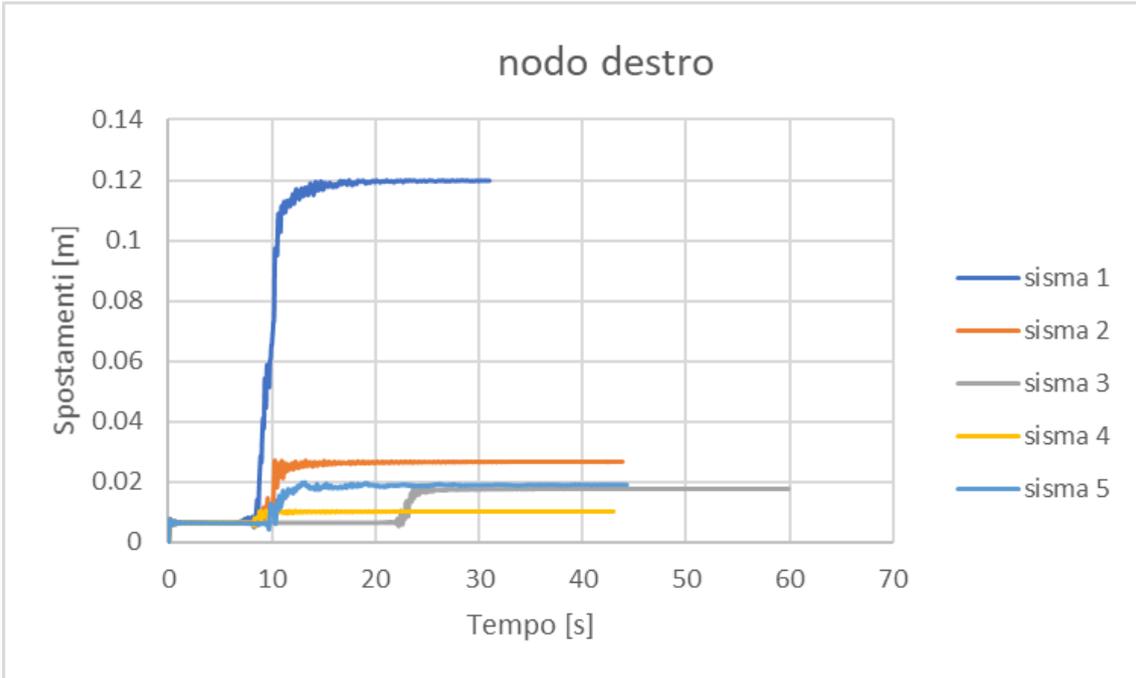
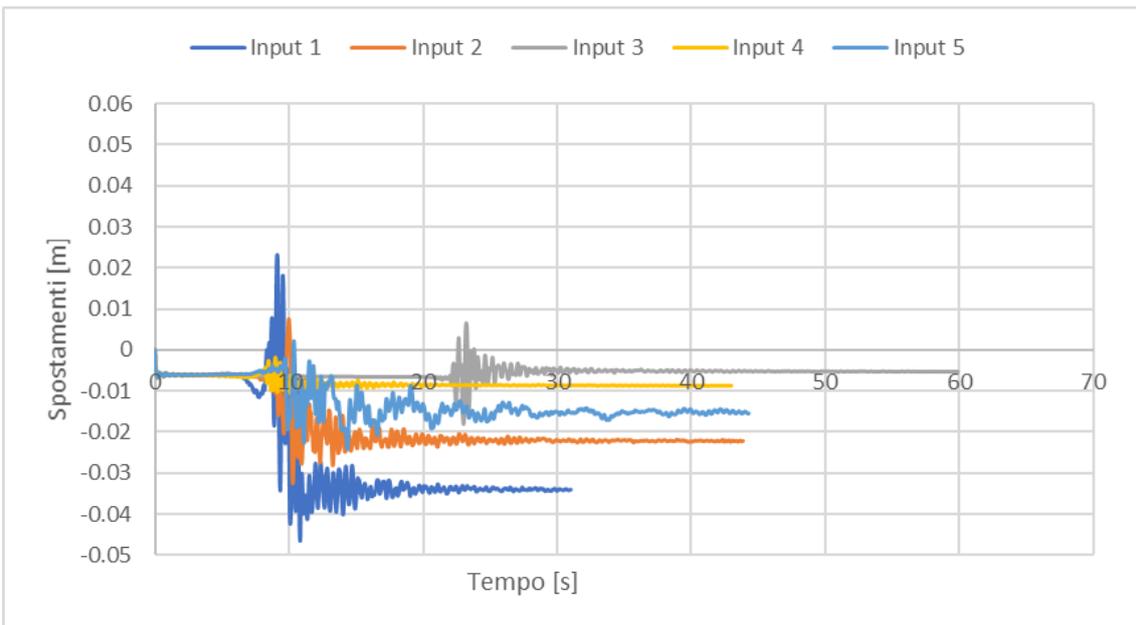


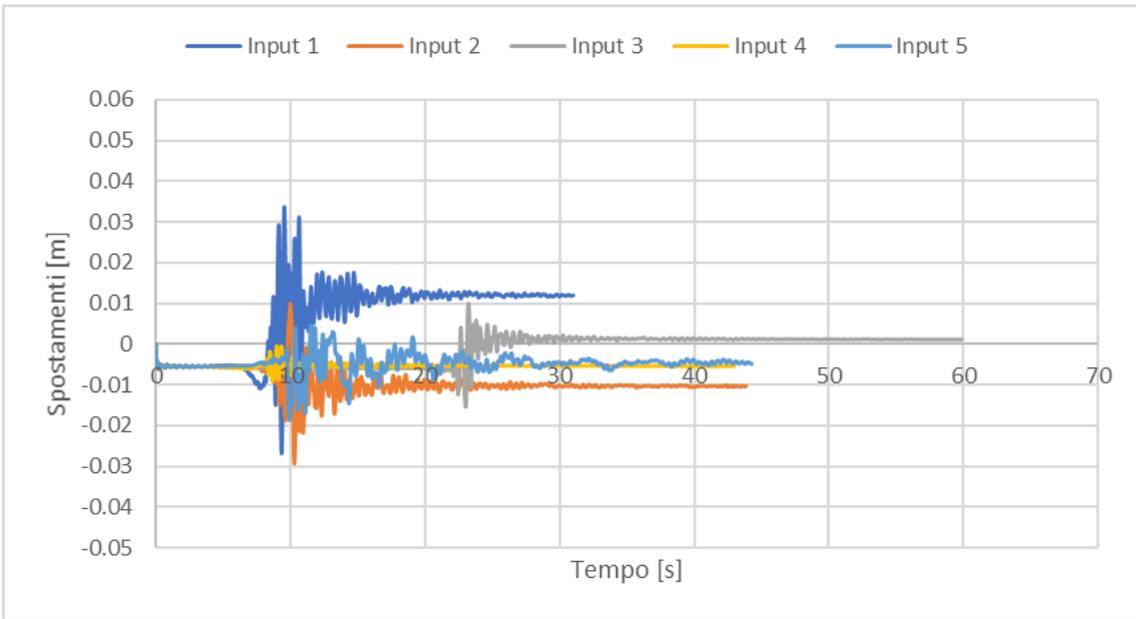
Figura 4.125: Spostamento nodo centrale



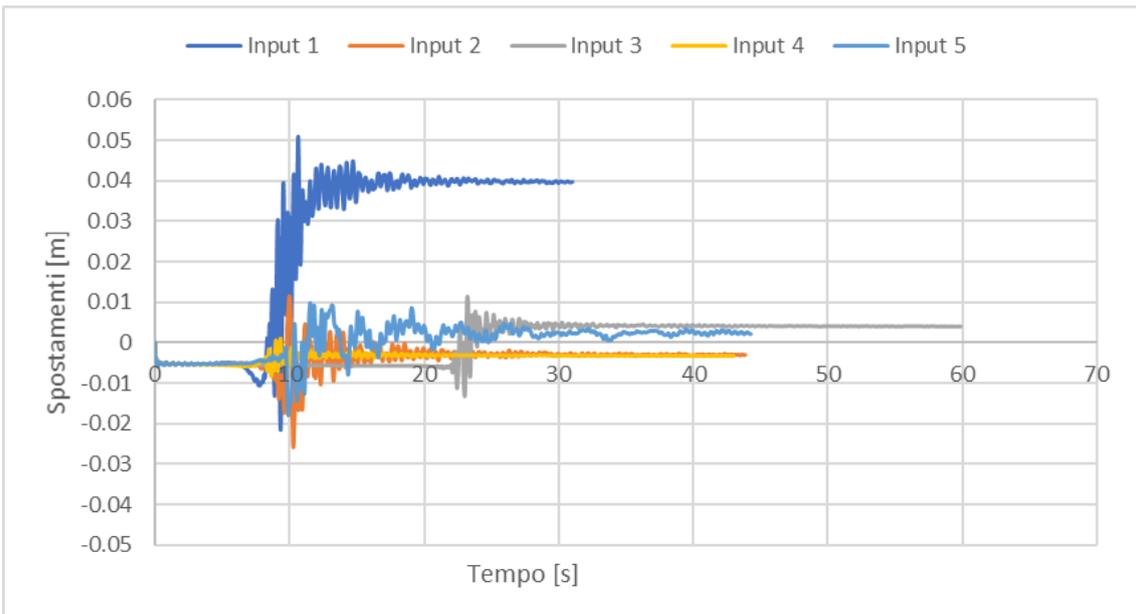
**Figura 4.126:** Spostamento nodo destro



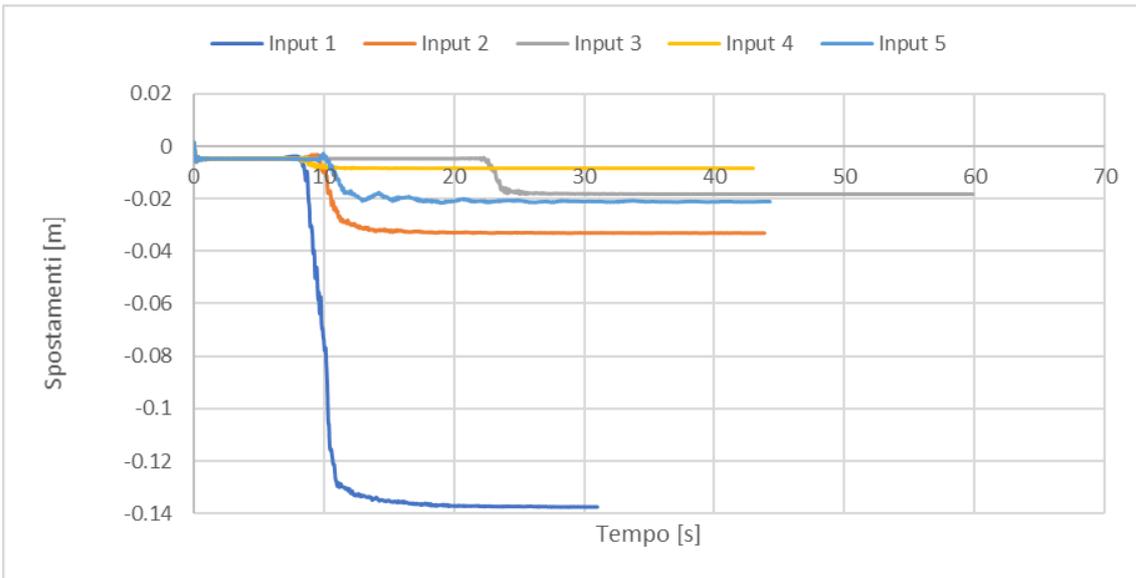
**Figura 4.127:** Spostamento orizzontale nodo sinistro



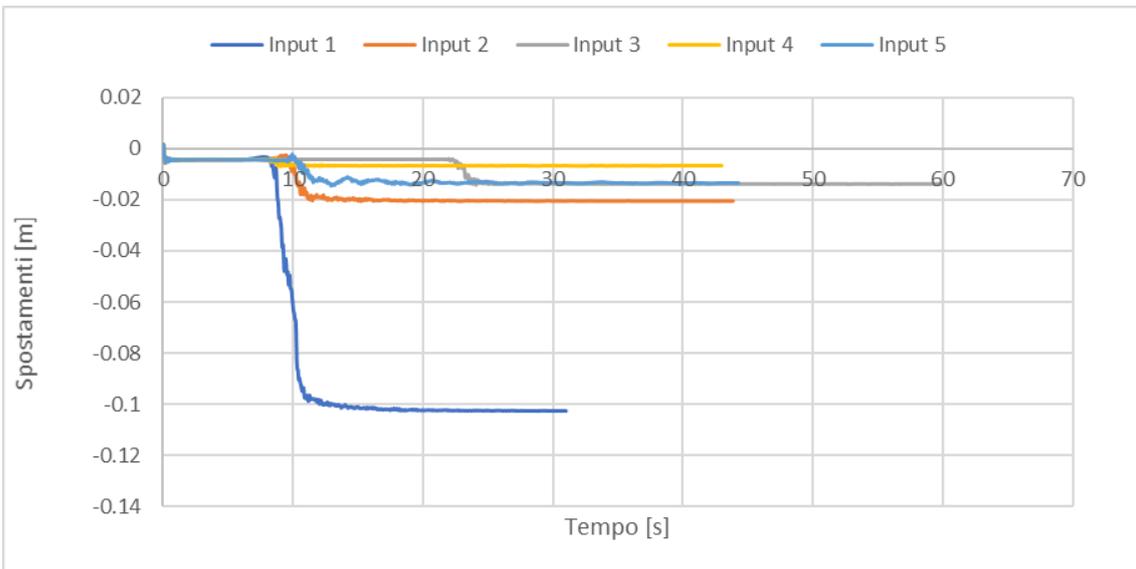
**Figura 4.128:** Spostamento orizzontale nodo centrale



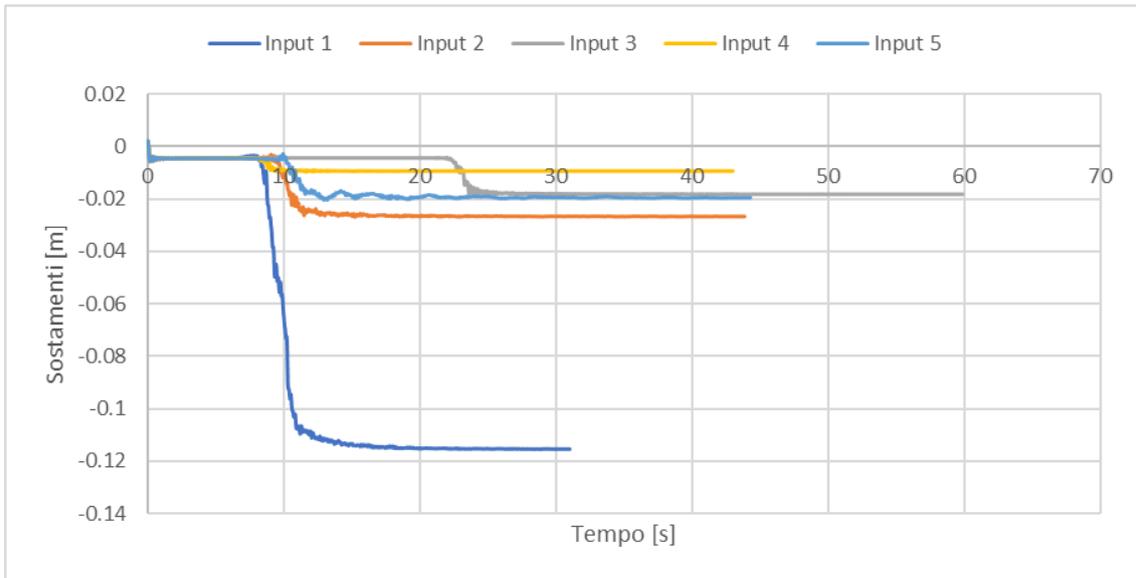
**Figura 4.129:** Spostamento orizzontale nodo destro



**Figura 4.130:** Spostamento verticale nodo sinistro



**Figura 4.131:** Spostamento verticale nodo centrale



**Figura 4.132:** Spostamento verticale nodo destro

#### 4.2.5 Livello di invaso pari a 27.5 m

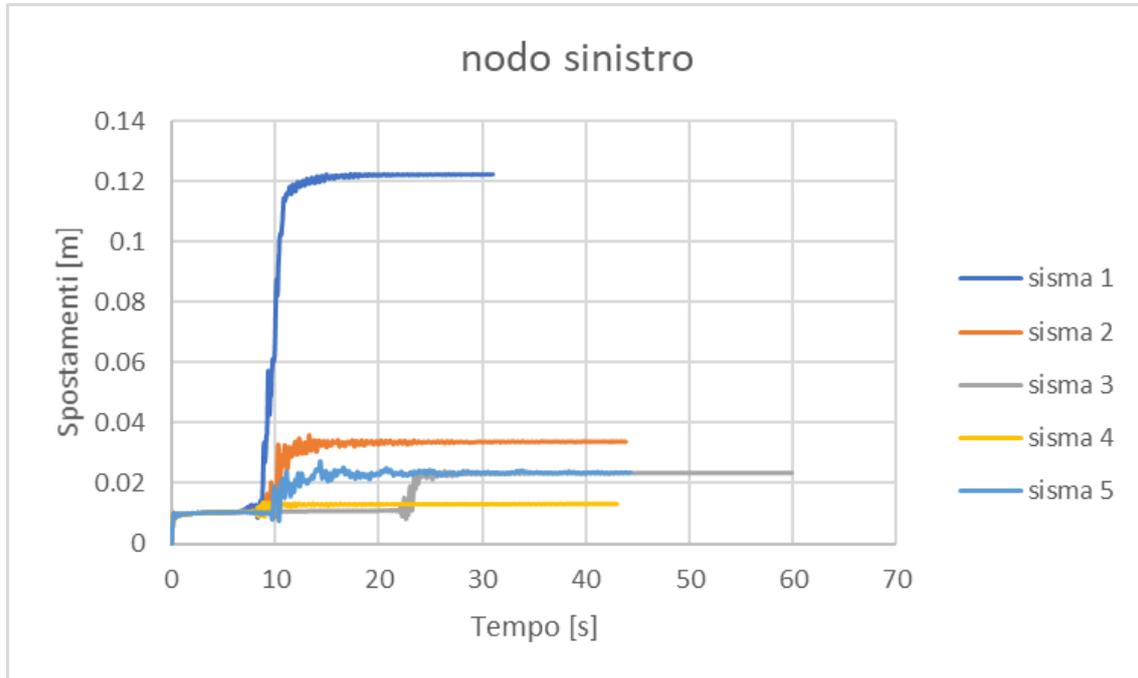


Figura 4.133: Spostamento nodo sinistro

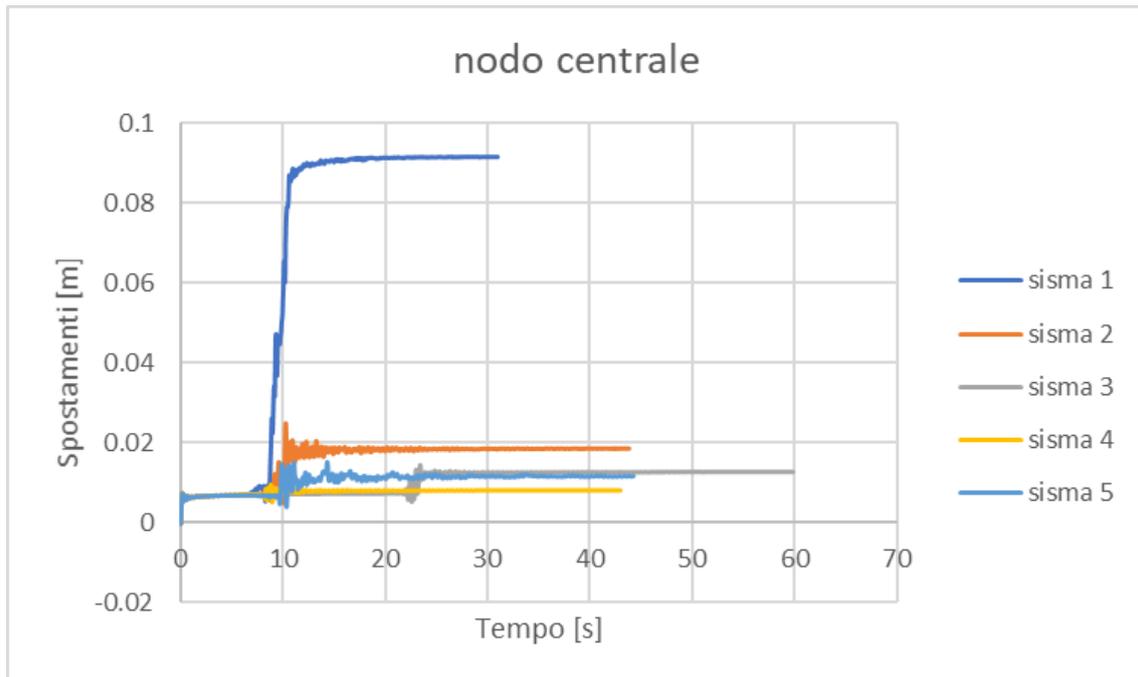
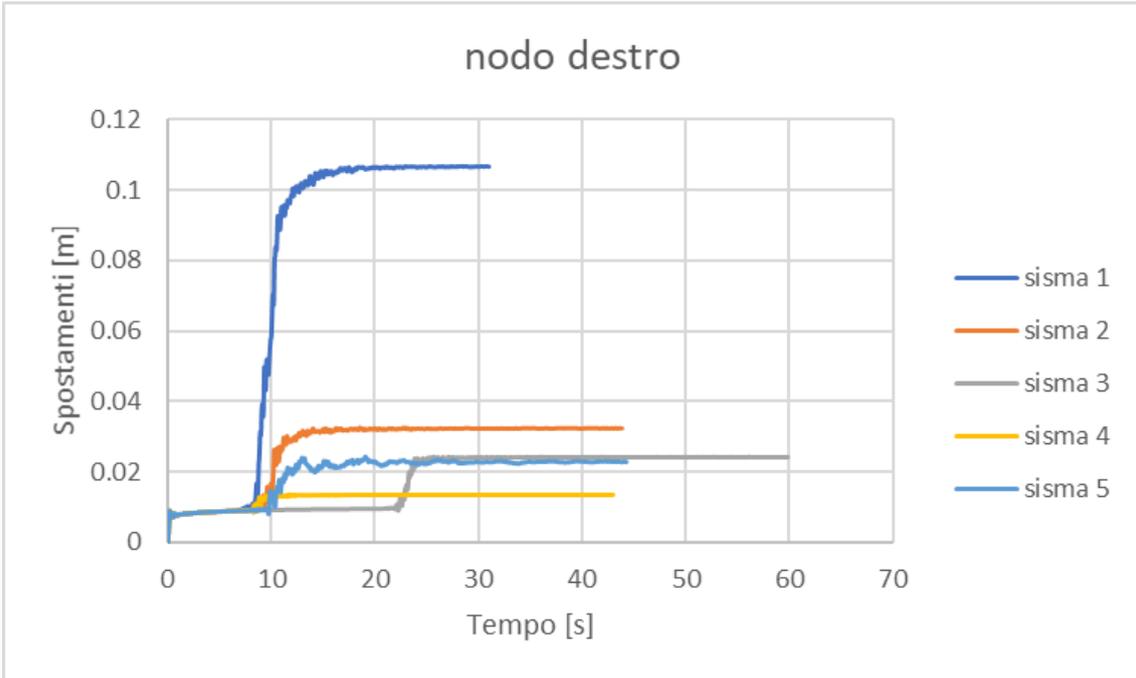
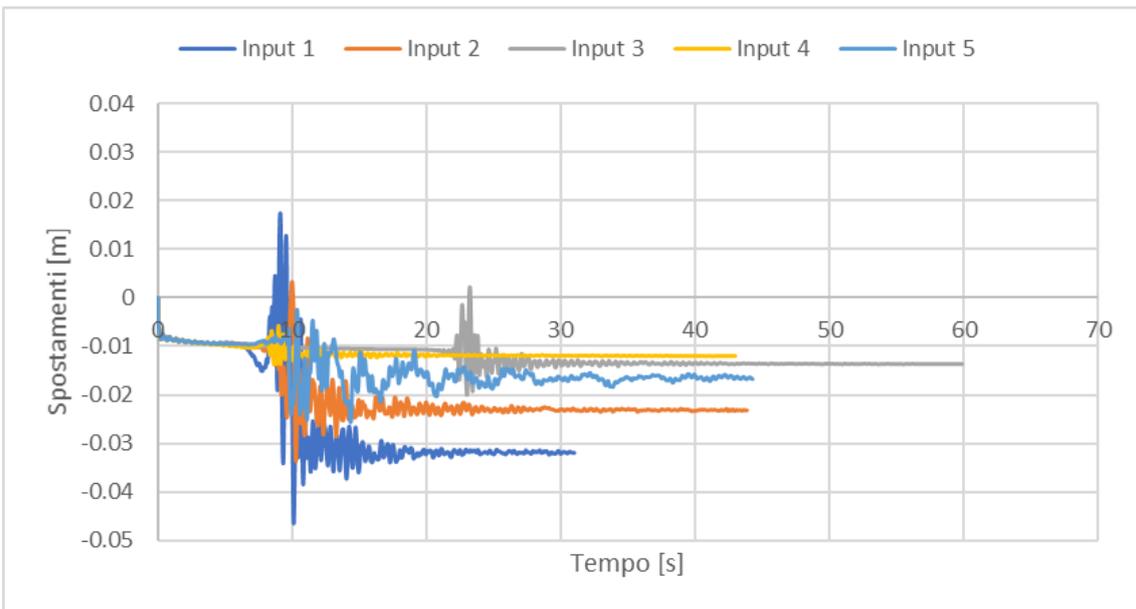


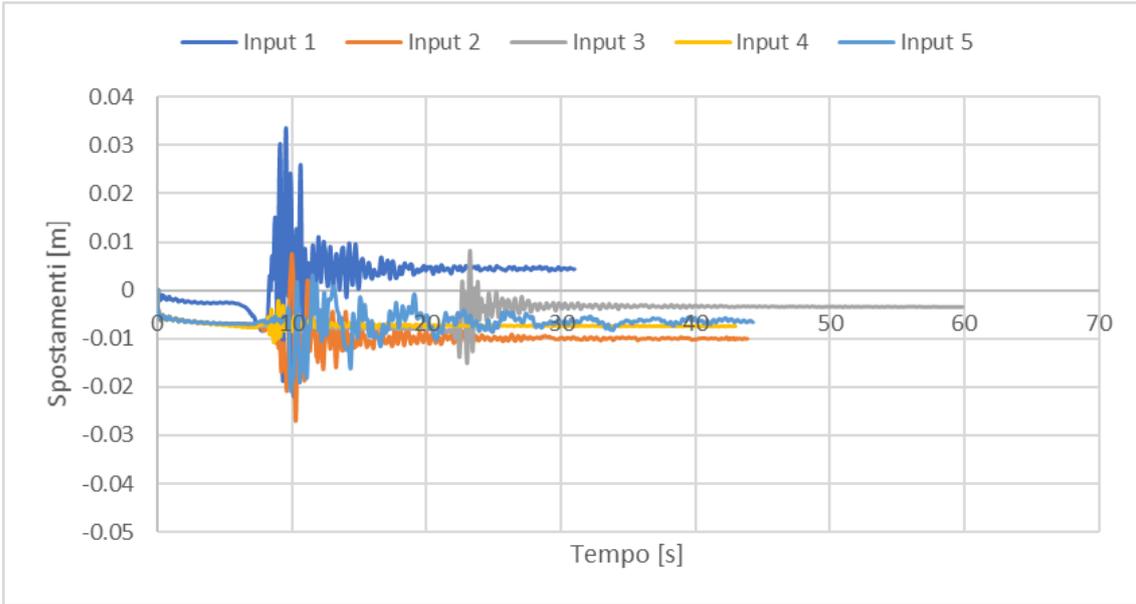
Figura 4.134: Spostamento nodo centrale



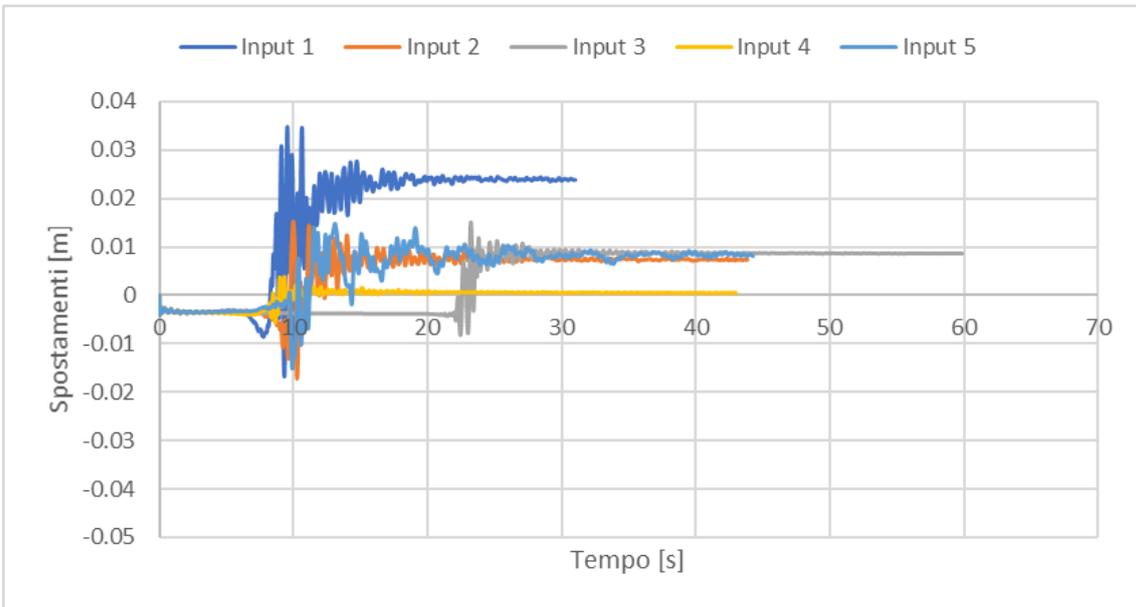
**Figura 4.135:** Spostamento nodo destro



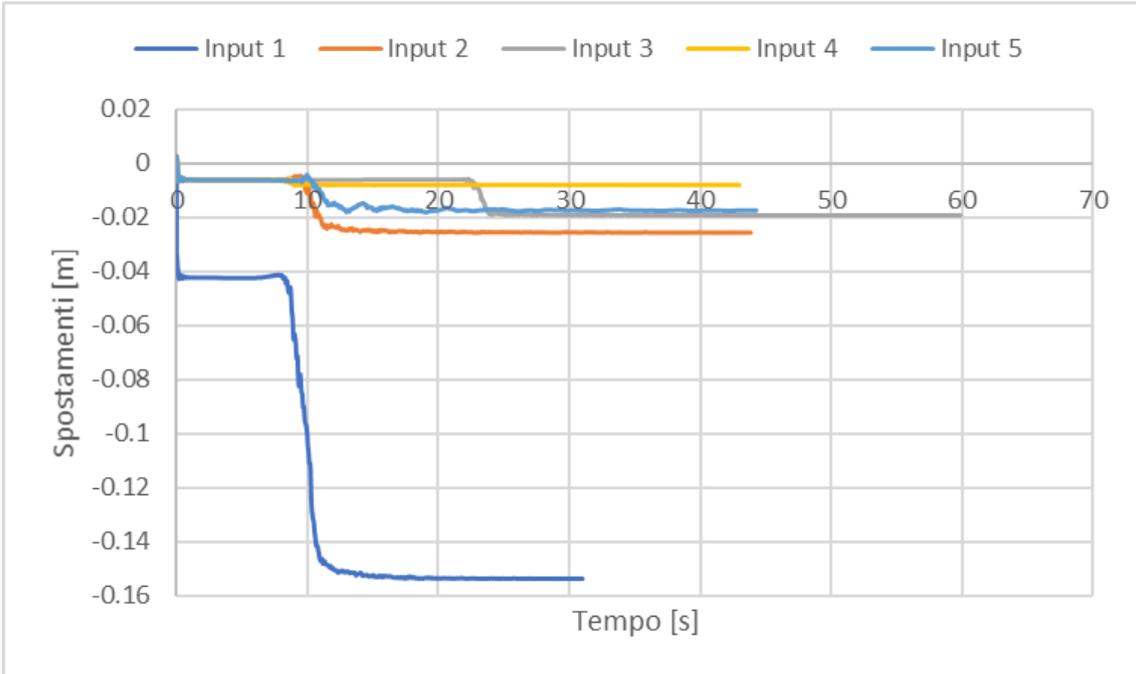
**Figura 4.136:** Spostamento orizzontale nodo sinistro



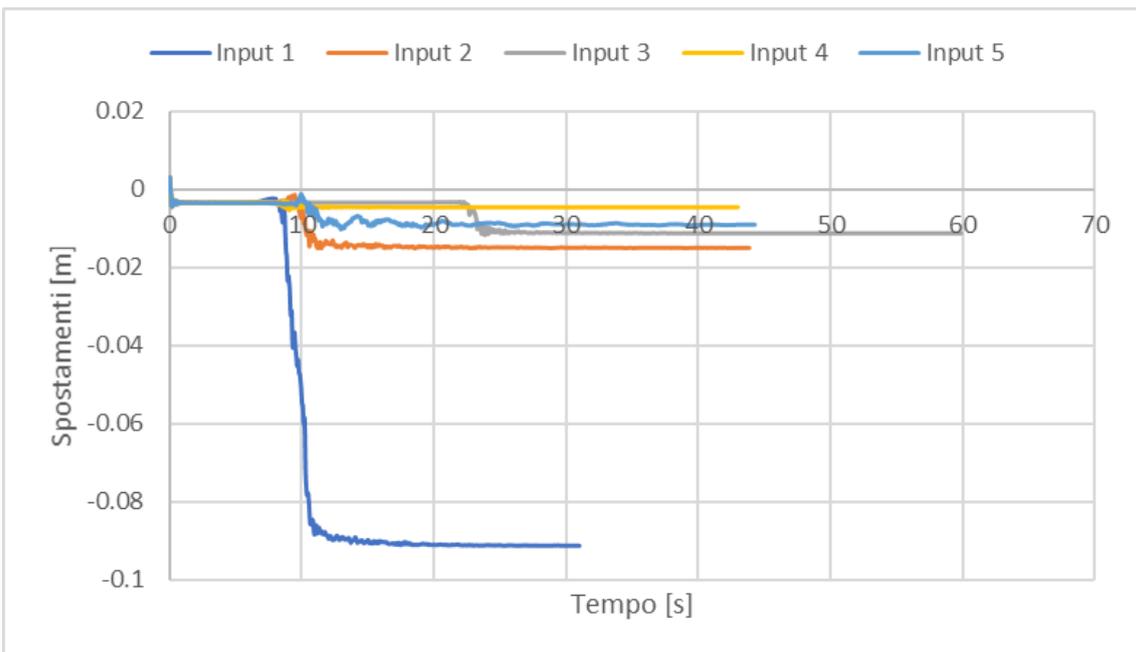
**Figura 4.137:** Spostamento orizzontale nodo centrale



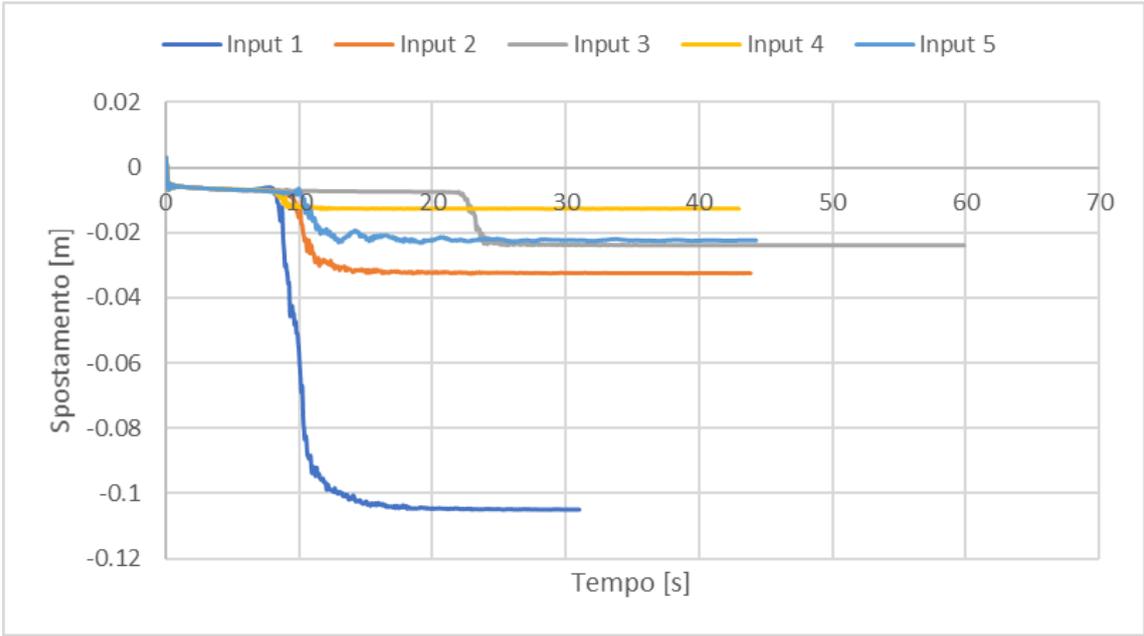
**Figura 4.138:** Spostamento orizzontale nodo destro



**Figura 4.139:** Spostamento verticale nodo sinistro



**Figura 4.140:** Spostamento verticale nodo centrale



**Figura 4.141:** Spostamento verticale nodo destro

## Conclusioni

Nel lavoro di tesi è stato condotto uno studio del comportamento dinamico delle dighe in terra con riferimento alla diga di Poggio Cancelli. Le analisi sono state condotte mediante il framework agli elementi finito Opensees che ha permesso di utilizzare modelli costitutivi complessi nella valutazione della risposta dinamica del caso studio, al variare del livello di acqua invasato.

I risultati di tali analisi sono stati espressi in termini di spostamenti, e delle relative componenti orizzontali e verticali, di tre punti posti sul coronamento. Dalla lettura di questi risultati non è stato possibile determinare una proporzionalità diretta tra il livello di acqua invasato e l'entità degli spostamenti dei punti.

Risultano quindi necessarie ulteriori analisi, considerando ulteriori eventi sismici oltre a quelli utilizzati nel presente lavoro, allo scopo di:

- caratterizzare in modo opportuno la risposta dinamica del sistema in esame, per valutare l'influenza della geometria della diga sui valori di spostamento registrati nei punti di monitoraggio, essendo questa caratterizzata da una forte asimmetria con differente pendenza delle due spalle di monte e di valle;
- indagare l'effetto del nucleo impermeabile, avendo, anch'esso, una geometria non simmetrica;

Una caratterizzazione mediante prove in sito dei materiali costituenti la diga consentirebbe, inoltre di verificare i dati reperiti dalla letteratura definire con maggiore accuratezza il modello della diga.

Sebbene il lavoro svolto mostri le limitazioni sin qui elencate, esso d'altro canto presenta il pregio di aver dimostrato che il pre- e post-processor GiD associato con Opensees, opensource framework, consente di operare analisi complesse su modelli numerici altrettanto complessi, in termini di geometria e, dimensioni, considerando opportunamente l'azione dell'acqua. La presenza in letteratura di analisi condotte su modelli molto prossimi alle condizioni reali è, ad oggi, molto limitata.



## Bibliografia

ANIDEL (Associazione nazionale imprese produttrici e distributrici di energia elettrica): Commissione per lo studio dei problemi inerenti alle dighe, *Dighe di ritenuta degli impianti idroelettrici italiani, Volume VI*, ANIDEL, 1952.

Bachetti C., Blumetti A. M., Calderoni G., Ridolfi M., *Attività neotettonica e paleosismica nel settore meridionale dei Monti della Laga*, Mem. Soc. Geol. It. 13, 1990.

Barla M., Musso G., *Slide e Appunti del corso di Numerical Method in geotechnical engineering*, Politecnico di Torino, 2017.

Cacciuni A., Centamore E., Di Stefano R., Dramis F., *Evoluzione morfotettonica della Conca di Amatrice*, Sudi Geologici Camerati, 1995.

Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008, *Norme Tecniche per le costruzioni*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 2018.

Foti S., Cosentini R.M., Dominijanni A., Atti Conferenze di Geotecnica di Torino, *Analisi e Progetto delle Opere Geotecniche in Zona Sismica*, Politecnico di Torino-Stampa, Novembre 2018.

Foti S., *Slide e Appunti del corso di Geotecnica Sismica*, Politecnico di Torino, 2017.

Frigo B., Chiaia B., Foti S., Fantilli A., De Biagi V., *Metodologia speditiva per la valutazione della vulnerabilità sismica di piccoli sbarramenti in terra e calcestruzzo - RISBA – Rischio degli sbarramenti artificiali. Progetto transfrontaliero Italia-Francia Alcotra*, 2015.

Fukushima Y., Tanaka T., *A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan*, Shimizu Technical Research Bulletin, 1991.

Giani G. P., *Rock Slope Stability Analysis*, CRC Press, 1992.

Jappelli R., Silvestri T., *Rassegna dei materiali sciolti adoperati nelle dighe costruite in Italia nel periodo 1950-1975* appendice in “*Questioni di Ingegneria Geotecnica*”, Tomo II, pp. 429-524 Hevelius, Benevento, 2005.

Lancellotta R., *Geotecnica*, Zanichelli, 2012.

Luis I., Gonzalez de Vallejo, *Geoingegneria*, Pearson, 2004.

Meletti C., Valensise G., *Zonazione sismogenetica ZS9 – App.2 al Rapporto Conclusivo*, 2004.

Volpini T., *Bilancio idrogeologico del lago di Campotosto*, 1998.

Yang H. Huang, *Stability Analysis of Earth Slopes*, Van Nostrand Reinhold, 1983.

## Sitografia

[https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/GiD\\_ProblemTypes\\_for\\_2D\\_Slope\\_Analysis\\_Input\\_File\\_Generation](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/GiD_ProblemTypes_for_2D_Slope_Analysis_Input_File_Generation)

[https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Dynamic\\_2D\\_Effective\\_Stress\\_Analysis\\_of\\_Slope](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Dynamic_2D_Effective_Stress_Analysis_of_Slope)

[https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Nine\\_Four\\_Node\\_Quad\\_u-p\\_Element](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Nine_Four_Node_Quad_u-p_Element)

[https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureIndependMultiYield\\_Material](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureIndependMultiYield_Material)

[https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureDependMultiYield02\\_Material](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/PressureDependMultiYield02_Material)

[http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet\\_30/#/station/IT/PCB](http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet_30/#/station/IT/PCB)

<http://diss.rm.ingv.it/>

<http://esse1.mi.ingv.it/>

<http://esse1.mi.ingv.it/d2.html>