

Via P. F. Calvi, 9 - 25123 Brescia - ITALIA  
Tel. +39-030-3702371 - Fax +39-030-396143 - info@studiofrosio.it  
Codice fiscale e Partita IVA 01690560170 - www.studiofrosio.it

**STUDIO FROSIO**  
STUDIO ASSOCIATO DI INGEGNERIA



*VIS S.r.l.*

*Comune di CASTELNUOVO BOCCA D'ADDA*

*Provincia di LODI*

**IMPIANTO IDROELETTRICO "BUDRIESSE"**

**Valutazione di Impatto Ambientale**

**PROGETTO DEFINITIVO**

*Relazione geologica, geotecnica e sismica*



Responsabile del documento: *dott. geol. Marco Dagupati*  
*GEOLAMBDA Engineering S.r.l.*

Progettista generale: *dott. ing. Nino Frosio*

## INDICE

1	PREMESSA E INQUADRAMENTO GEOLOGICO	3
2	INDAGINI GEOGNOSTICHE EFFETTUATE	5
3	IL MODELLO GEOTECNICO	7
3.1	DEFINIZIONE DEI VALORI CARATTERISTICI DEI PARAMETRI GEOTECNICI	7
4	VALUTAZIONE DEGLI ASPETTI SISMICI	9
4.1	ANALISI SISMICA DI 3° LIVELLO	10
4.2	DEFINIZIONE DELL'AZIONE SISMICA SECONDO LA NORMATIVA	13
4.2.1	<i>Risultati e considerazioni</i>	14
4.3	ANALISI DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE DEI TERRENI DI FONDAZIONE	14
4.3.1	<i>Criteri di analisi</i>	15
4.3.2	<i>Valutazione del parametro CSR</i>	15
4.3.3	<i>Magnitudo di riferimento</i>	15
4.3.4	<i>Valutazione del parametro CRR</i>	15
4.3.5	<i>Risultati</i>	16
5	ANALISI DI STABILITA' DELLE SPONDE	17
5.1	RISULTATI	20
6	ALLEGATO 1: SONDAGGI GEOGNOSTICI	23
7	ALLEGATO 2: PROVE PENETROMETRICHE	24
7.1	REGISTRAZIONI STRUMENTALI DELLE RESISTENZE PENETROMETRICHE	25
7.2	PROFILI VERTICALI PROVE CPT	29
8	ALLEGATO 3: INDAGINE GEOFISICA CON METODOLOGIA MASW	30
9	ALLEGATO 4: ANALISI DI STABILITA' DELLE SPONDE – SEZIONE A MONTE DELLA TRAVERSA	31
10	ALLEGATO 5: ANALISI DI STABILITA' DELLE SPONDE – SEZIONE A VALLE DELLA TRAVERSA (SPONDA SINISTRA)	32

## **1 PREMESSA E INQUADRAMENTO GEOLOGICO**

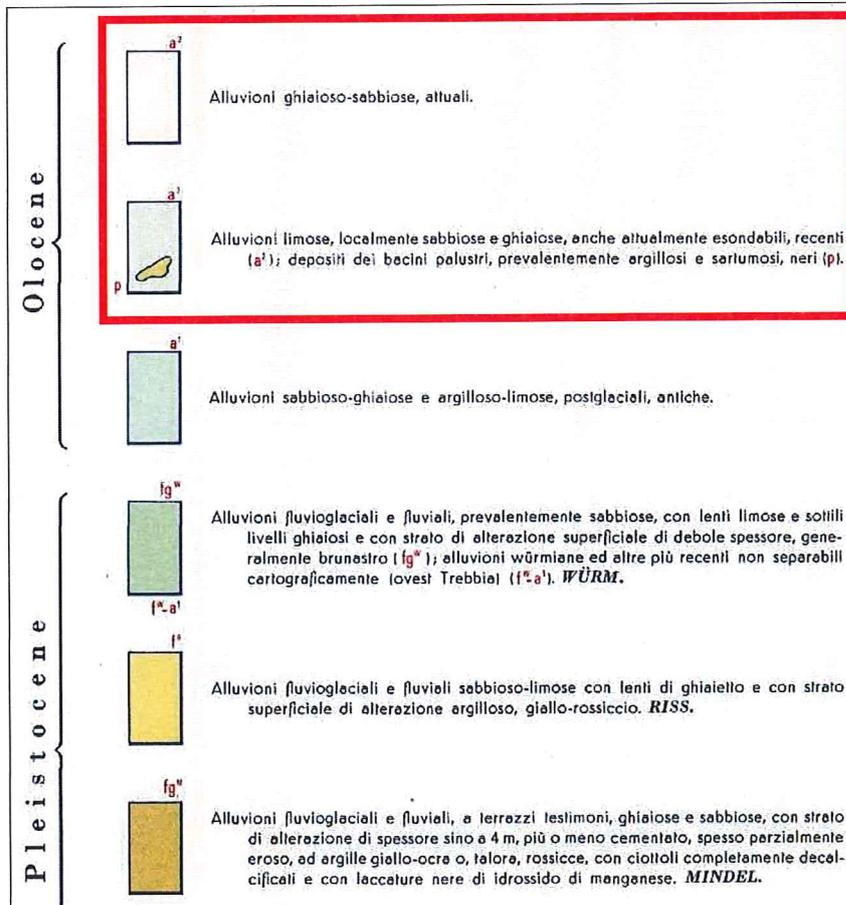
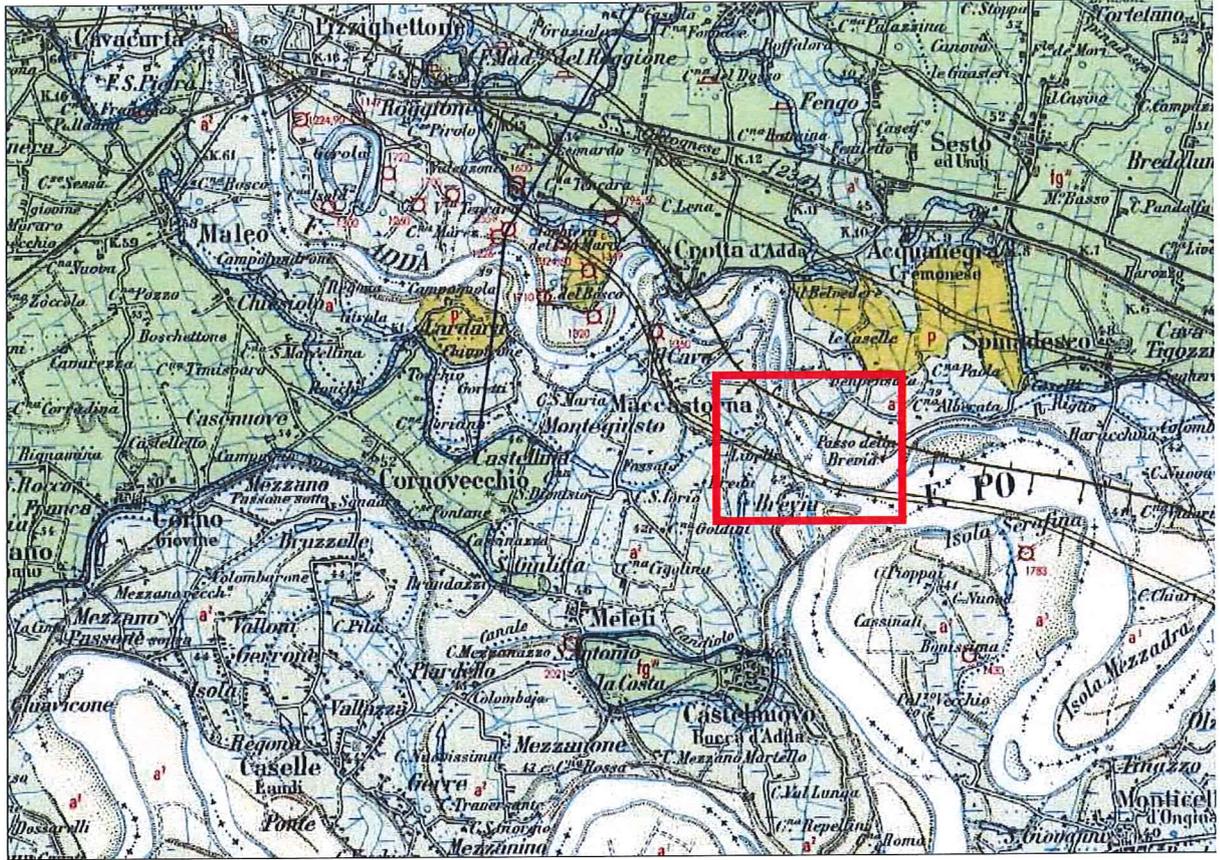
In seno al progetto definitivo della centrale idroelettrica in Comune di Castelnuovo Bocca d'Adda proposto da "VIS S.r.l.", sono state definite le caratteristiche geologiche e geotecniche dei terreni per un corretto dimensionamento delle strutture di fondazione ai sensi del D.M. 14/01/2008 e s.m.i..

L'indagine si è avvalsa di una serie di prove penetrometriche e sondaggi geognostici, programmati sulla base della vigente normativa relativa alle indagini sui terreni e realizzate secondo quanto specificato nelle "Raccomandazioni sulla Programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche" a cura della Associazione Geotecnica Italiana (1977).

Nel corso del presente studio è stata eseguita anche specifica indagine geofisica per valutare le caratteristiche dell'area in ottica sismica.

Dato lo scopo del presente studio, che prevede una ricostruzione geologico-tecnica della porzione più superficiale di sottosuolo, non sono state compiute analisi di tipo stratigrafico, le quali assumono importanza secondaria per le finalità tecnico-progettuali dell'indagine.

La zona in questione, infatti, si sviluppa su depositi alluvionali recenti e attuali del fiume Adda, così come descritto nella seguente immagine estratta in stralcio dalla Carta Geologica d'Italia, F. 60 "Piacenza".

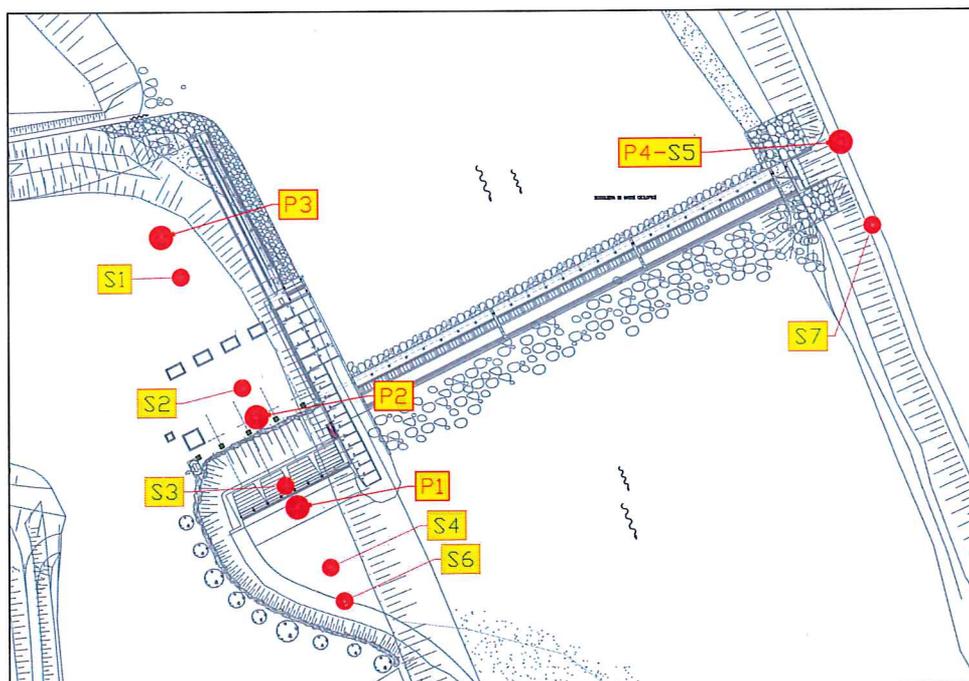


## 2 INDAGINI GEOGNOSTICHE EFFETTUATE

Sulla base delle caratteristiche progettuali e delle condizioni logistiche del sito è stata sviluppata una campagna geognostica per la definizione del modello geologico, geotecnico e sismico dell'area in esame. Nel dettaglio, sono state eseguite le seguenti indagini:

- **N. 6 sondaggi a carotaggio continuo (S1, S2, S3, S4, S6, S7)** e n. 1 a infissione con campionatore dinamico (**S5**), spinti fino alla profondità massima di 30 m da piano campagna, utilizzati sia per l'osservazione del profilo stratigrafico e geotecnico, sia per il campionamento dei terreni necessari alla formulazione del *Piano di utilizzo*. In due dei sette sondaggi eseguiti (rispettivamente il n. 6 in sponda destra e il n. 7 in sponda sinistra) sono state eseguite prove SPT in avanzamento ogni 3 m fino alla profondità di 24 m. Le prove SPT sono state eseguite a punta aperta secondo la normativa standard ISSMFE. Tutto il materiale carotato è stato posizionato in apposite cassette catalogatrici di 5 metri cadauna e descritto stratigraficamente (Allegato 1). I sondaggi n. 6 e 7, inoltre, sono stati attrezzati con tubo piezometrico da 3" per il monitoraggio nel tempo dei livelli piezometrici e l'esecuzione (in sponda destra, dove verrà realizzato il corpo della centrale) di alcune prove di permeabilità in sito.
- **N. 4 prove penetrometriche statiche (P1-P4)** eseguite con punta meccanica tipo Begemann (Allegato 2) e spinte fino a profondità comprese tra 24 e 26 m ovvero fino al raggiungimento del rifiuto strumentale;
- **N. 2 stendimenti sismici con la metodologia MASW (M1 e M2)** finalizzati alla ricostruzione del profilo della velocità delle onde di taglio con la profondità (Vs-z – Allegato 3).

L'ubicazione delle indagini eseguite è riportata nella seguente figura.



Nella tabella 1 e 2 si riassumono le caratteristiche delle prove penetrometriche e dei sondaggi eseguiti.

<i>CPT</i>	<i>Profondità (m)</i>
<i>P1</i>	25.8
<i>P2</i>	25.4
<i>P3</i>	25.6
<i>P4</i>	24.2

*Tabella 1 - Riepilogo prove penetrometriche statiche eseguite*

<i>Sondaggio</i>	<i>Profondità (m)</i>	<i>Prove SPT (n)</i>
<i>S1</i>	10	-
<i>S2</i>	15	-
<i>S3</i>	15	-
<i>S4</i>	10	-
<i>S5</i>	1	-
<i>S6</i>	30	8
<i>S7</i>	30	8

*Tabella 2 - Riepilogo sondaggi geognostici effettuati*

Le diverse indagini geognostiche hanno permesso di ottenere una buona quantità di dati e di ricostruire il modello di sottosuolo fino alle profondità di interesse per il progetto in esame.

Le prove eseguite nei fori di sondaggio, unitamente a quelle penetrometriche e alle indagini geofisiche, hanno permesso di determinare i parametri lito-meccanici e dinamici specifici dei terreni.

### 3 IL MODELLO GEOTECNICO

L'esecuzione dei sondaggi a carotaggio continuo e l'interpretazione stratigrafica secondo il metodo di Schmertmann (attraverso il rapporto  $R_p/RI$ ) delle prove penetrometriche statiche hanno permesso di ricostruire il modello di sottosuolo.

Nel dettaglio, la successione stratigrafica appare costituita da un primo orizzonte di limo sabbioso-argilloso con spessore che varia tra 2,0 e 3,5 m, seguito in profondità da un deposito di natura prevalentemente sabbiosa fino a circa 28-29 m, quota alla quale compare un letto limoso correlabile fra entrambe le sponde del fiume Adda.

Tale successione è caratterizzata dalla presenza di una frazione più fine di natura limosa nella porzione superficiale, la quale scompare rapidamente con la profondità per lasciare il posto ad una componente più grossolana di natura ghiaiosa.

In sponda destra, ad una profondità compresa tra 9 e 13 m, la successione sabbiosa è interrotta dalla presenza di una lente di natura limoso-argillosa che trova il suo massimo spessore nel sondaggio S6. Assumendo una geometria lentiforme, tuttavia, il deposito più fine appare come il semplice prodotto deposizionale di un ambiente a bassa energia, non correlabile con altre informazioni stratigrafiche presenti nello stretto intorno della derivazione e della centrale in progetto.

Per quanto concerne la superficie piezometrica, essa è strettamente correlabile con le quote idrometriche del fiume, che ne condizionano importanti escursioni.

#### 3.1 DEFINIZIONE DEI VALORI CARATTERISTICI DEI PARAMETRI GEOTECNICI

In funzione di quanto rilevato nella campagna geognostica, sono state individuate alcune unità geotecniche a caratteristiche omogenee, sia dal punto di vista litologico che comportamentale. Come precisato innanzi, la successione stratigrafica locale è caratterizzata dalla presenza di terreni granulari con un comportamento prevalentemente incoerente (deposito costituito principalmente da sabbie – comportamento drenato), per i quali sono stati calcolati:

- **Angolo di resistenza al taglio ( $\phi'$ )**, facendo ricorso alla correlazione di De Mello e di Wolff (1989) basata sui valori di  $N_{SPT}$  misurati nei sondaggi geognostici e alle correlazioni di Caquot, Koppejan e De Beer basate sulla resistenza alla punta e la tensione verticale efficace misurate nelle prove penetrometriche statiche;
- **Modulo elastico o di Young ( $E'$ )**, facendo ricorso alla correlazione d'Apollonia basata sui valori di  $N_{SPT}$  e alla correlazione di Schmertmann basata sui valori misurati nelle prove CPT.

In questo modo sono stati definiti due modelli geotecnici, differenti per ciascuna sponda del fiume Adda in corrispondenza dello sbarramento.

Per ogni unità che compone il sottosuolo sono stati definiti i valori caratteristici dei parametri geotecnici (D.M. 14/01/2008 ed alla Circolare Esplicativa del C.S.L.P. - C6.2.2 della C.M. 02/02/2009 n. 617), riassumibili nella seguente tabella:

<i>Sponda destra – Castelnuovo Bocca d'Adda</i>					
<i>Unità geotecnica</i>	<i>Profondità [m]</i>	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	$c'$ [kPa]	$E'$ [MPa]
<i>A</i> <i>Limo sabbioso-argilloso</i>	0,0 a 2,5-3,5	18	24	5	4
<i>B</i> <i>Sabbia a tratti limosa</i>	3,5 a 6,0	19	27	-	12
<i>C</i> <i>Sabbia con orizzonti limoso-argillosi</i>	6,0 a 11,0	19	29	-	25
<i>D</i> <i>Sabbia</i>	11,0 a 23,0-25,0	19	30	-	45
<i>E</i> <i>Sabbia con ghiaia</i>	25,0 a 30,0	19	32	-	60

Tabella 3 - Valori caratteristici dei parametri geotecnici - Sponda destra

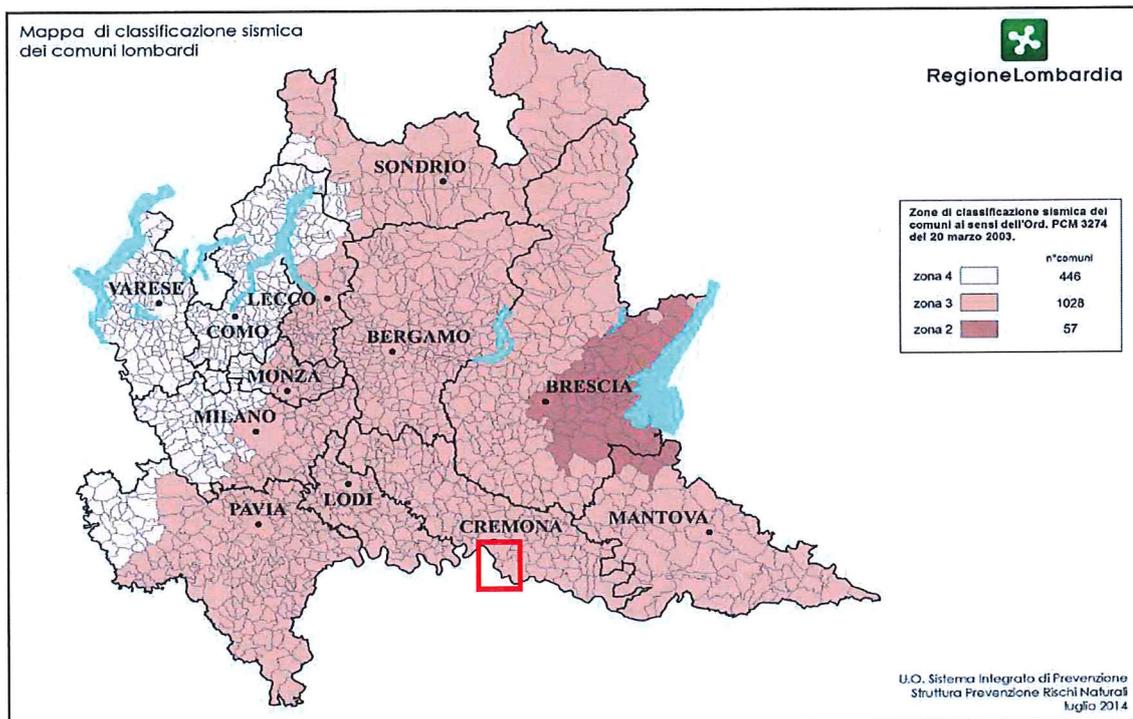
<i>Sponda sinistra – Crotta d'Adda</i>					
<i>Unità geotecnica</i>	<i>Profondità [m]</i>	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	$c'$ [kPa]	$E'$ [MPa]
<i>A</i> <i>Limo argilloso</i>	0,0 a 2,2	18	22	5	3
<i>B</i> <i>Sabbia a tratti limosa</i>	2,2 a 7,5	19	28	-	15
<i>C</i> <i>Sabbia con orizzonti limoso-sabbiosi</i>	7,5 a 16,0	19	27	-	20
<i>D</i> <i>Sabbia</i>	16,0 a 18,0	19	24	-	18
<i>E</i> <i>Sabbia</i>	18,0 a 20,0	19	27	-	35
<i>F</i> <i>Sabbia con ghiaia</i>	20,0 a 24,0	19	29	-	45

Tabella 4 - Valori caratteristici dei parametri geotecnici - Sponda sinistra

#### 4 VALUTAZIONE DEGLI ASPETTI SISMICI

Nel corso dello studio sono state definite le caratteristiche sismiche proprie dell'area in esame attraverso l'esecuzione dell'analisi sismica di 3° livello (D.g.r. 8/7374/2008 e D.g.r. IX/2616/2011), finalizzata a caratterizzare quantitativamente gli effetti di modifica della pericolosità di base dovuta alle caratteristiche litologiche e sismiche dei terreni che costituiscono il sito d'intervento. Ciò permette anche di valutare l'adeguatezza dell'approccio semplificato previsto dalla normativa antisismica nazionale nel considerare gli effetti sismici locali nella definizione dell'azione sismica (Cap. 3.2.2 *Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche* – D.M. 14.01.2008).

Facendo riferimento alla D.g.r. n. X/2129 del 11 luglio 2014 “*Aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia*”, i territori comunali di Castelnuovo Bocca d'Adda e Crotta d'Adda appartengono alla zona sismica 3 (*figura 1*), ovvero contraddistinti da un “medio-basso” grado di sismicità (entrambi i comuni erano precedentemente inseriti nella zona sismica 4 ai sensi della D.G.R. n. 7/14964 del 7 novembre 2003 in attuazione all'Ordinanza 3274 e s.m.i.).



**Figura 1:** Classificazione sismica dei comuni della Lombardia (D.g.r. n. X/2129 del 11 luglio 2014).

In accordo con quanto riportato nelle NTC08 (paragrafo 2.4.2 e 2.4.3), per il dimensionamento degli elementi strutturali allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV) è stata considerata una classe d'uso pari a III che implica il seguente periodo di ritorno per le azioni sismiche (tabella 1).

Azione sismica					
Salvaguardia della vita (10%)	Tipologia edilizia	$V_N$ [anni]	$C_U$	$V_R$ [anni]	$T_R$ [anni]
SLV	Sbarramento	50	1,5	75	712

Tabella 5 - Periodo di ritorno delle azioni sismiche

#### 4.1 ANALISI SISMICA DI 3° LIVELLO

La valutazione della risposta sismica locale (RSL o effetto di sito) rappresenta l'analisi sismica più dettagliata in grado di determinare l'insieme delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che un moto sismico, relativo ad una formazione di base (bedrock sismico), subisce attraversando gli strati di terreno sovrastanti fino alla superficie (o ad una quota definita).

Le simulazioni numeriche sono state effettuate utilizzando il codice di calcolo *SHA-KE91* (Schnabel et al. 1972; Idriss e Sun, 1992), il quale definisce un modello monodimensionale adottando un comportamento del mezzo di tipo "lineare equivalente" (schematizzazione compatibile con i livelli di deformazione/accelerazione attesi per l'area in esame - valore di PGA atteso pari a 0.081g per  $T_R=475$  anni e pari a 0.101g per  $T_R=975$  anni).

Per l'esecuzione dell'analisi numerica s'è proceduto attraverso le seguenti fasi di lavoro

1. **Definizione delle caratteristiche geologiche:** è stata ricostruita la successione stratigrafica propria dell'area utilizzando i dati delle indagini geognostiche effettuate per il progetto (sondaggi a carotaggio continuo e prove penetrometriche statiche);
2. **Definizione dei parametri fisico-meccanici:** i parametri necessari nell'analisi numerica sono, per ogni strato in cui è suddiviso il profilo stratigrafico, il peso di volume, la velocità delle onde S e l'andamento del modulo di taglio e del rapporto di smorzamento in funzione della deformazione; i valori delle Vs sono quelli ricavati dalle prove MASW effettuate mentre le curve G- $\gamma$  e D- $\gamma$  sono quelle mediamente rappresentative di ciascuna litologia di riferimento (Seed et al., 1986; Vucetic e Dobry, 1991) e fornite dalla Regione Lombardia;
3. **Definizione del moto di input:** le azioni sismiche di ingresso sono rappresentate da una combinazione di accelerogrammi reali scalati il cui spettro di risposta combinato è compatibile con lo spettro di risposta del moto atteso per un periodo di ritorno di 712 anni (tabella 1, Spettro Target - suolo A; *figura 2*); tali accelerogrammi sono stati selezionati utilizzando il software REXEL. La selezione degli accelerogrammi è stata effettuata utilizzando il database internazionale *European Strong-motion Database* (ESD), basandosi sugli studi di disaggregazione dell'INGV per la definizione della coppia M-R di ricerca degli accelerogrammi (*figura 3*).

Gli accelerogrammi di input vengono fatti propagare a partire dal bedrock sismico (strato con  $V_s > 800$  m/s) fino alla quota di imposta fondazionale supposta a 31 m s.l.m. (la quota di esecuzione delle prove geofisiche è pari a circa 39 m s.l.m.).

Non essendo stato rilevato direttamente, la profondità del bedrock sismico è stata ipotizzata assegnando un gradiente delle velocità delle onde S con la profondità di tipo logaritmico, desunto dai dati misurati nelle prove MASW.

Poiché i profili  $V_s$ -profondità ricostruiti (quello in sponda destra e quello in sponda sinistra) presentano andamenti simili a partire da circa 8 m di profondità (quota di imposta fondazionale assunta per lo sbarramento, mentre il corpo della centrale non è esposto a effetti sismici essendo interrato), nelle simulazioni numeriche si è deciso di adottare un unico modello sismico monodimensionale di riferimento ottenuto come media dei due profili.

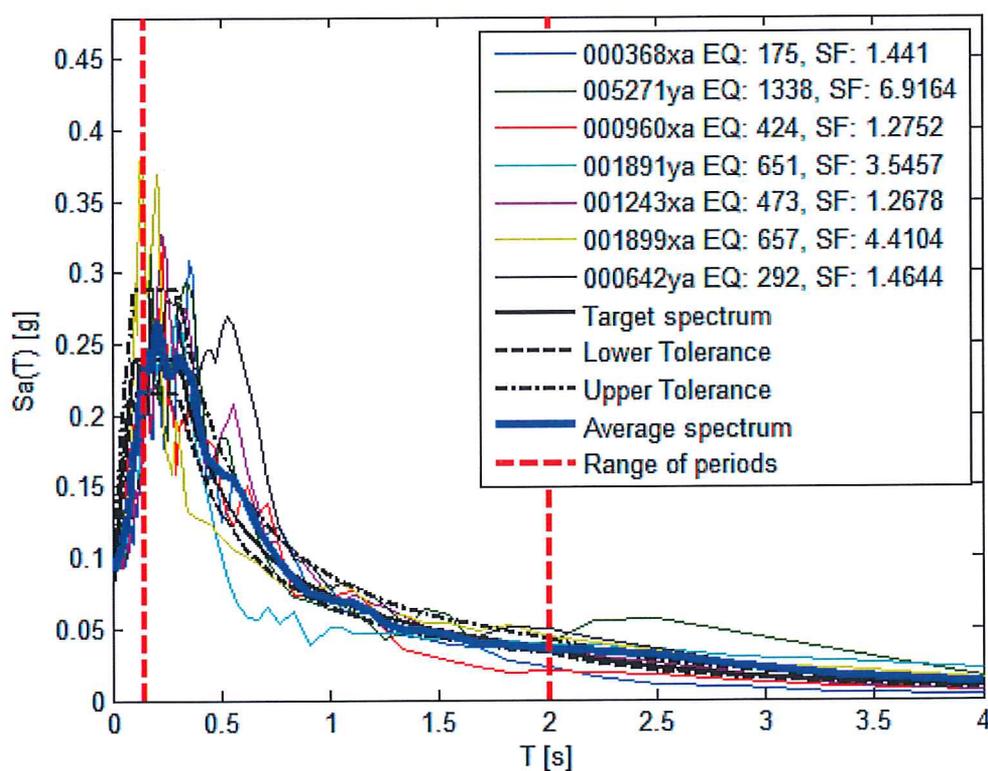
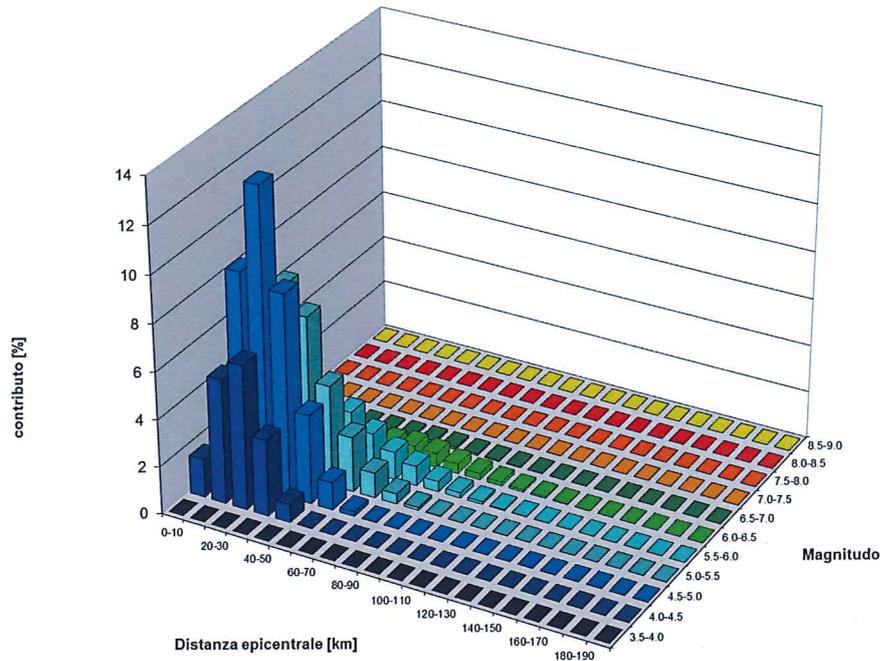
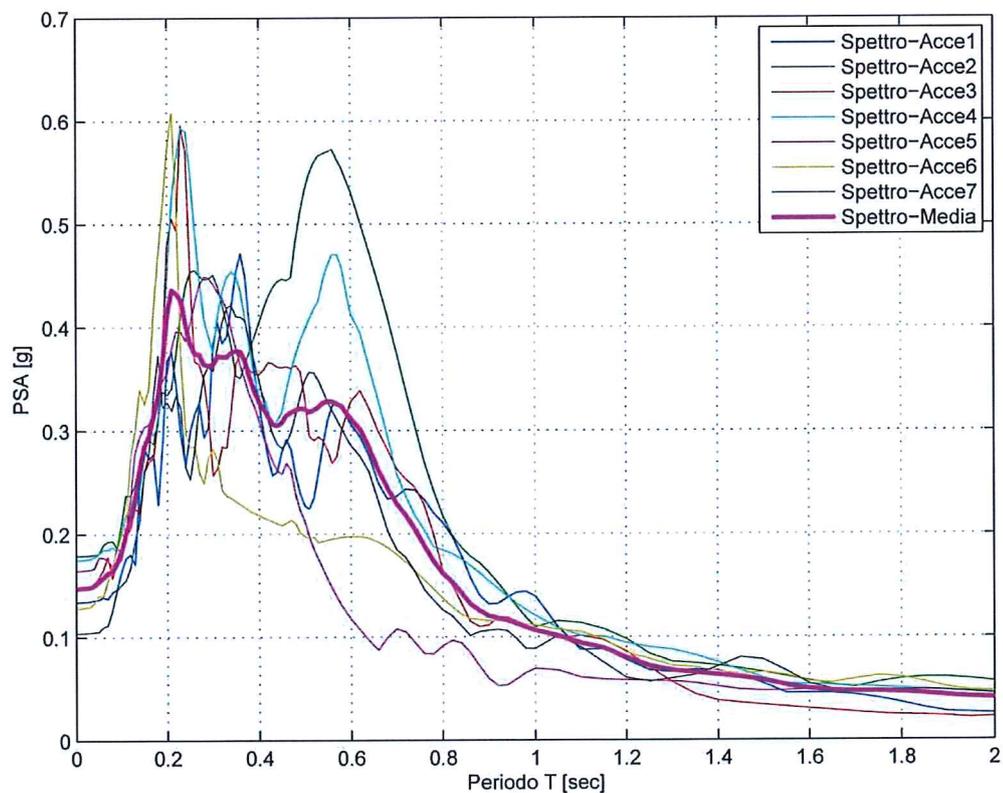


Figura 2: Spettro target e spettri degli accelerogrammi selezionati –  $T_R=712$  anni.



*Figura 3: Analisi della disaggregazione per l'area in esame - INGV.*

In *figura 4* si riportano i risultati delle simulazioni numeriche effettuate in termini di spettro di risposta in accelerazione (valori espressi come frazione di g; in magenta si riporta la media degli spettri ottenuti utilizzando gli accelerogrammi di input).



*Figura 4: Spettri di risposta ottenuti dalle simulazioni numeriche.*

#### 4.2 DEFINIZIONE DELL'AZIONE SISMICA SECONDO LA NORMATIVA

Nel presente capitolo vengono confrontati gli spettri di risposta previsti dalla normativa antisismica con quelli ottenuti dallo studio di risposta sismica locale riportato nel paragrafo precedente; tale confronto consente di verificare se l'approccio semplificato previsto dalla normativa è adeguato nel considerare gli effetti di amplificazione sismica propri del sito.

La quantificazione della risposta sismica locale mediante l'utilizzo di categorie di sottosuolo nella valutazione dell'amplificazione stratigrafica, infatti, comporta una semplificazione del problema senza cogliere le specificità proprie del sito nella modificazione del moto sismico atteso, rischiando di sottostimare (o sovrastimare) i livelli di accelerazione attesi.

Nel calcolo dell'azione sismica si è fatto riferimento a quanto contenuto nel D.M. 14/01/2008, in particolare ai capitoli 2 e 3.

Le ipotesi assunte nella definizione degli spettri di risposta elastici in accelerazione risultano:

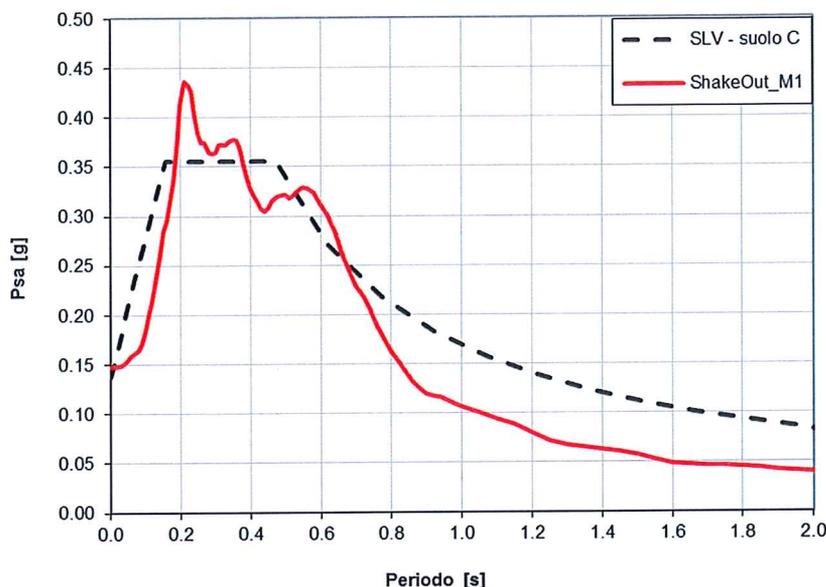
- Valori di accelerazione massima orizzontale e dei parametri spettrali per i diversi stati limite (valori interpolati ottenuti dalla media pesata con i 4 punti della griglia di accelerazioni che comprendono il sito in esame [ED50 – 45.140704; 9.874138] così come definito nell'Allegato A e B):

	$P_{VR}$	$T_R$	$a_g$	$F_O$	$T_C^*$
		[anni]	[g/10]		[s]
<b>SLO</b>	81%	45	0.363	2.572	0.2174
<b>SLD</b>	63%	75	0.438	2.562	0.2512
<b>SLV</b>	10%	712	0.913	2.598	0.3039
<b>SLC</b>	5%	1462	1.140	2.596	0.3176

- **Categoria di sottosuolo** = C ( $V_{s,30} = 314,8$  (M1) - 298,6 m/s (M2) a partire da -8,0 m da p.c. attuale) e **categoria topografica** = T1 e coefficiente di smorzamento viscoso  $\xi = 5\%$  a cui corrispondono i seguenti valori:

	$S_S$	$C_C$	$S$	$T_B$	$T_C$	$T_D$	$F_V$
				[s]	[s]	[s]	
<b>SLO</b>	1.50	1.74	1.50	0.13	0.38	1.75	0.66
<b>SLD</b>	1.50	1.66	1.50	0.14	0.42	1.78	0.72
<b>SLV</b>	1.50	1.56	1.50	0.16	0.47	1.97	1.06
<b>SLC</b>	1.50	1.53	1.50	0.16	0.49	2.06	1.18

In *figura 5* si confronta lo spettro di risposta elastico previsto dalla normativa per lo stato limite di salvaguardia della vita SLV (formule riportate nel paragrafo 3.2.3.2.1) e quello ottenuto dalle simulazioni numeriche effettuate (ShakeOut\_M1).



**Figura 5:** Confronto tra lo spettro di risposta previsto dalle NTC08 (SLV e sottosuolo C - curva nera tratteggiata) e lo spettro medio ottenuto dalle simulazioni numeriche (curva rossa).

#### 4.2.1 Risultati e considerazioni

I risultati dello studio di risposta sismica locale effettuato confrontati con l'approccio semplificato previsto dalle NTC08 (Cap. 3.2.2 *Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche*) evidenziano che è **possibile utilizzare parzialmente lo spettro di risposta elastico previsto dalle NTC08 adottando una categoria di sottosuolo di tipo C** (figura 5). Tale spettro risulta mediamente sufficiente a tenere in considerazione gli effetti di amplificazione sismica propri del sito (studio RSL), ad eccezione per periodi delle strutture compresi tra 0.2 e 0.4 s.

#### 4.3 ANALISI DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE DEI TERRENI DI FONDAZIONE

La liquefazione è un fenomeno associato alla perdita di resistenza al taglio o ad un accumulo di deformazioni plastiche in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, sollecitati da azioni dinamiche (terremoti) che agiscono in condizioni non drenate.

L'analisi della suscettibilità alla liquefazione di un dato sito dipende da:

- caratteristiche dell'azione sismica (intensità e durata);
- proprietà geotecniche dei terreni;
- caratteristiche litologiche dei terreni e profondità della falda.

La liquefazione di un deposito è dunque il risultato dell'effetto combinato di due principali categorie di fattori: le condizioni del terreno (fattore predisponente) e la sismicità (fattore scatenante).

Sebbene un terreno sia potenzialmente liquefacibile sulla base delle sue condizioni geo-

logiche-geotecniche, la liquefazione non avviene se l'azione sismica non raggiunge valori di accelerazione massima  $a_{\max}$  superiori a 0.10g (NTC08 – Cap. 7.11.3.4.1).

Il valore di accelerazione massima di progetto per il calcolo del potenziale di liquefazione risulta pari a  $a_{\max} = 0.147g$ , (valore ottenuto dalle simulazioni numeriche di RSL - figura 4).

#### 4.3.1 Criteri di analisi

Le analisi sono state sviluppate seguendo i criteri delineati dal *National Centre of Earthquake Engineering Research (NCEER)* nel 1998.

L'analisi consiste nel confrontare il "Cyclic Stress Ratio" (CSR), cioè l'azione eccitante dovuta al sisma, con il "Cyclic Resistance Ratio" (CRR) che rappresenta la capacità di resistenza alla liquefazione del terreno. La possibilità di liquefazione sussiste quando  $CSR \geq CRR$ .

#### 4.3.2 Valutazione del parametro CSR

Il termine CSR può essere espresso dalla seguente relazione:

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0.65(a_{\max} / g)(\sigma_{vo} / \sigma'_{vo}) \cdot r_d$$

in cui  $\sigma_{vo}$  e  $\sigma'_{vo}$  sono rispettivamente la pressione verticale totale ed efficace alla quota considerata (la falda si trova ad una profondità di circa 6-7 m) e il termine  $r_d$  è funzione della profondità. In base a tale espressione si determina, ad ogni profondità, il valore di CSR da confrontare con la resistenza disponibile alla medesima quota (CRR).

#### 4.3.3 Magnitudo di riferimento

Facendo riferimento alla zonazione sismogenetica ZS9 del territorio italiano, l'area in esame non rientra in alcuna zona sismogenetica: ai fini del calcolo si è assunta una magnitudo di riferimento pari a  $M_w = 6.14$  (che corrisponde alla massima magnitudo delle zone sismogenetiche più vicine all'area in esame, ovvero la 911 e la 913), da cui si ricava il parametro MSF (fattore di correzione per la magnitudo del parametro CRR).

#### 4.3.4 Valutazione del parametro CRR

La valutazione di CRR è stata eseguita utilizzando l'analisi semplificata basata sui valori ottenuti dalle quattro prove penetrometriche statiche effettuate. La procedura utilizza le correlazioni basate sulla resistenza penetrometrica CPT proposte da *Robertson e Wride* (1998) secondo le seguenti equazioni:

$$\begin{aligned} CRR_{7.5} &= 0.833 \cdot [(q_{c1N})_{CS} / 1000] + 0.05 && (q_{c1N})_{CS} < 50 \\ CRR_{7.5} &= 93 \cdot [(q_{c1N})_{CS} / 1000]^3 + 0.08 && 50 < (q_{c1N})_{CS} < 160 \end{aligned}$$

Dove:

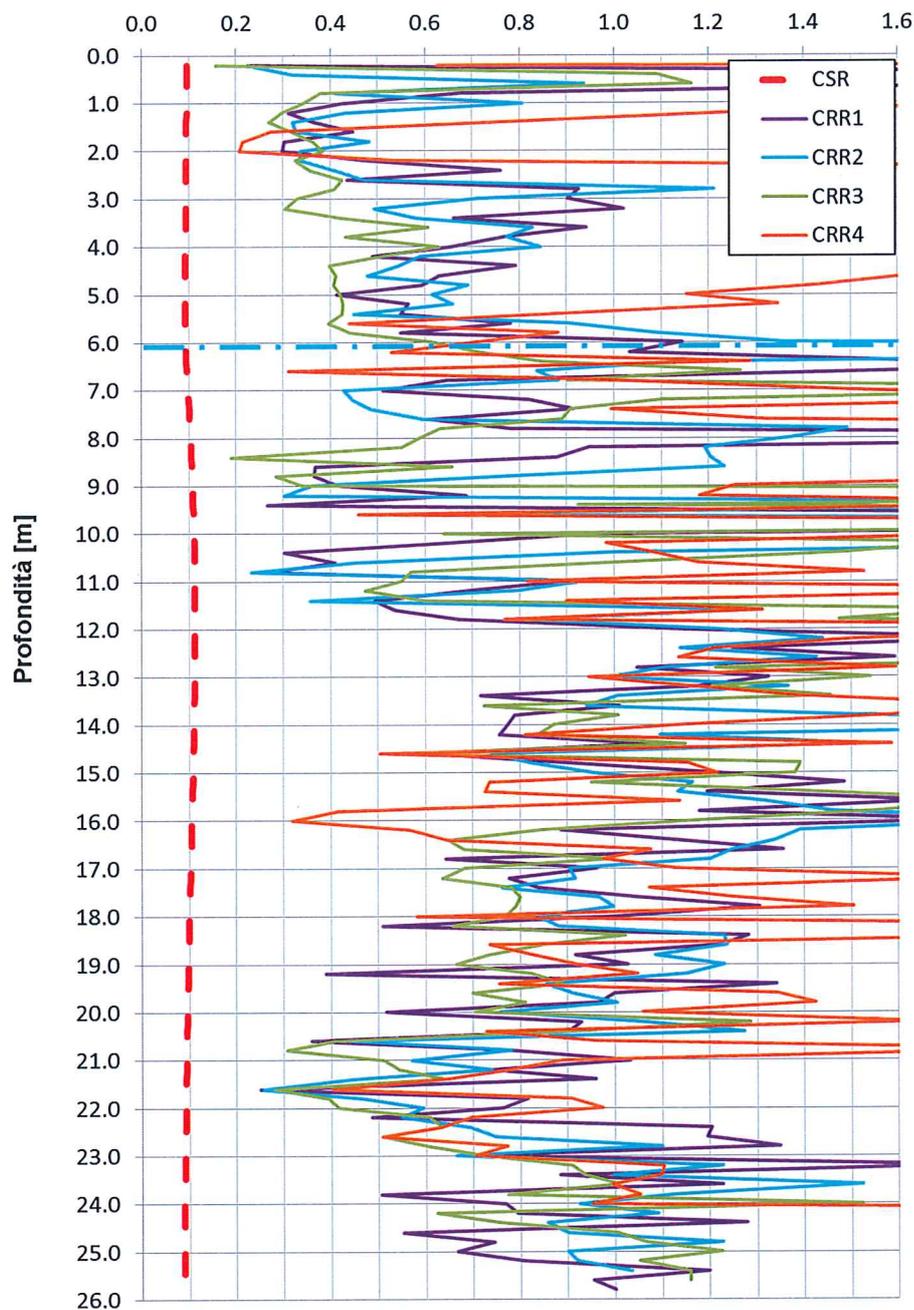
$(q_{c1N})_{CS}$  = resistenza alla punta normalizzata a circa 100 kPa.

Il valore di  $CRR_{7.5}$  viene successivamente moltiplicato per il fattore MSF.

Secondo *Robertson e Wride*, se il fattore IC risulta maggiore di 2.6 (terreni coesivi/semicoesivi) si può considerare l'orizzonte come NON a rischio di liquefazione (*La Liquefazione del terreno in condizioni sismiche* – *Crespellani, Nardi, Simoncini, 1988*).

#### 4.3.5 Risultati

I risultati dell'analisi del potenziale di liquefazione sono diagrammati in **figura 6** da cui emerge l'assenza di rischio in relazione a potenziali fenomeni di liquefazione per i terreni che costituiscono il substrato dell'area in esame.



*Figura 6: Analisi del potenziale di liquefazione dei terreni di fondazione.*

## 5 ANALISI DI STABILITA' DELLE SPONDE

Nel presente capitolo si riportano i risultati delle simulazioni numeriche effettuate con l'obiettivo di valutare le condizioni di stabilità delle sponde del fiume Adda sia a monte che a valle dello sbarramento in progetto.

Le procedure di analisi di stabilità di un pendio in terra (o di una scarpata), attraverso la valutazione dell'equilibrio limite, consistono nella definizione di un coefficiente di sicurezza alla traslazione e/o alla rotazione del volume di terra compreso fra la superficie del versante/scarpata ed una superficie di taglio potenziale imposta.

La procedura di calcolo prende in considerazione tutte le forze e/o i momenti agenti lungo il piano di taglio, fornendo una valutazione sulla stabilità globale attraverso la definizione di un fattore di sicurezza, il quale viene calcolato dal rapporto tra la resistenza di taglio massima disponibile lungo la superficie di rottura e gli sforzi tangenziali agenti, ovvero mobilitati, lungo tale piano:

$$F_{SIC} = T_{MAX} / T_{MOB}$$

Con:

- $F_{SIC}$  = coefficiente di sicurezza;
- $T_{MAX}$  = resistenza di taglio massima;
- $T_{MOB}$  = sforzo tangenziale mobilitato.

In condizioni di equilibrio limite tale rapporto è pari a 1 ( $T_{MAX} = T_{MOB}$ ). Il pendio potrebbe essere considerato in teoria stabile quando il fattore di sicurezza è superiore a tale valore.

Le verifiche di stabilità sono state effettuate in accordo con quanto riportato nel capitolo 6 e 7 del D.M. 14.01.2008 applicando l'approccio 1 combinazione 2 per le verifiche allo stato limite ultimo (stabilità globale - A2+M2+R2).

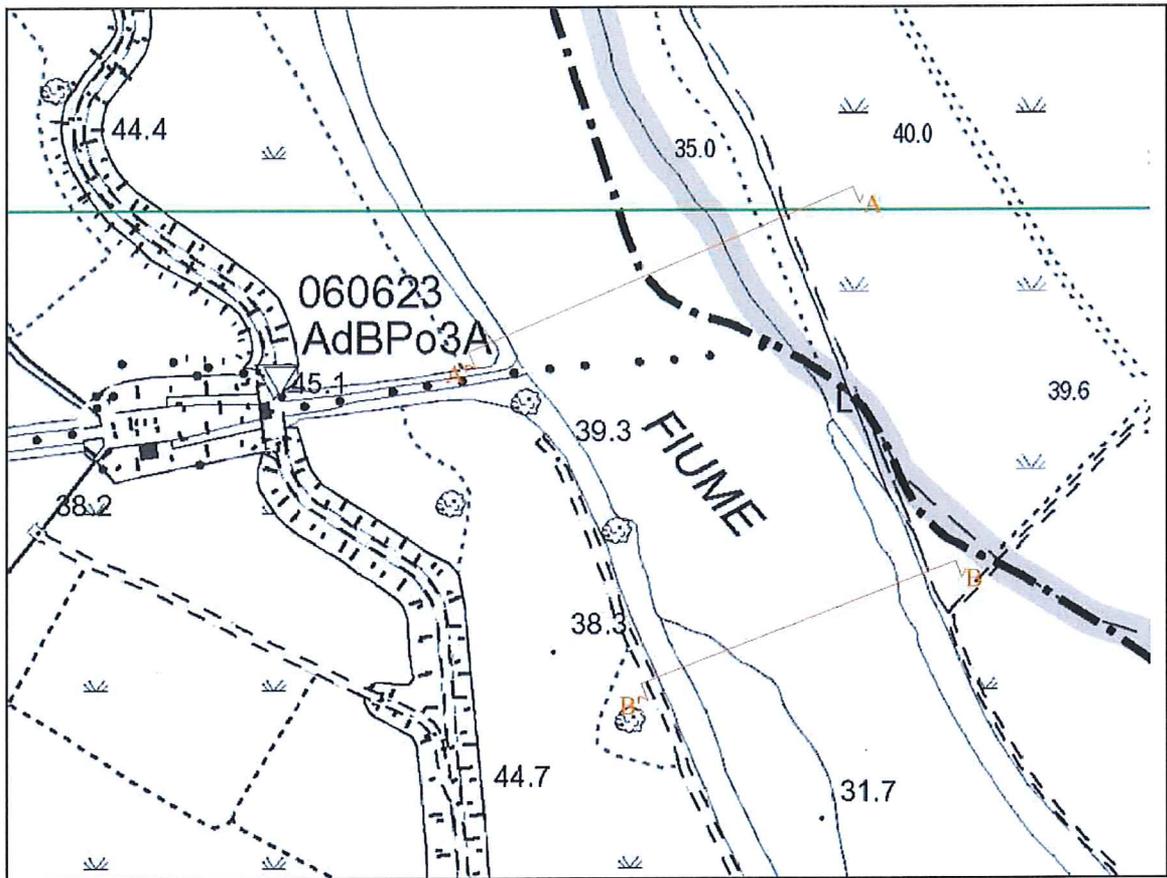
Secondo le NTC08 la stabilità del pendio/scarpata è verificata quanto  $Ed \leq Rd$  ovvero quando  $F_s > 1.1$  (paragrafo 6.8 delle NTC08).

La verifica della stabilità è stata condotta utilizzando il programma *SLIDE 6.0 della Rocscience*, applicando il metodo semplificato proposto da Bishop e da Jambu.

Si è operato alla ricerca ed alla verifica delle potenziali superfici di scivolamento utilizzando il metodo del reticolo dei centri che consiste nel disegnare sul pendio un reticolo di centri di calcolo ad ognuno dei quali corrisponderà una superficie potenziale di scivolamento circolare. Il ricorso a tale metodologia permette di analizzare superfici di scivolamento sia corticali che profonde.

Inoltre l'uso del programma *SLIDE 6.0* consente di valutare la condizione di rapido svuotamento - RS - attraverso l'uso di una specifica funzione ("Rapid Drawndown Analysis").

Le analisi di stabilità sono state svolte per la sponda destra e sinistra della sezione A-A', a monte della traversa, e per la sponda sinistra della sezione B-B', a valle della traversa, così come riportato in figura 1.



*Figura 1: Ubicazione delle sezioni utilizzate per le verifiche di stabilità delle sponde del fiume Adda.*

Le simulazioni sono state effettuate sia in condizioni statiche che sismiche utilizzando i valori minimi sia dell'angolo di resistenza al taglio ( $\phi'$ ) che di coesione ( $c'$ ) di ciascuna unità (condizioni più sfavorevoli).

In figura 2, 3 e 4 si riportano i modelli geometrici e geotecnici di ciascuna sponda, utilizzati nelle analisi di stabilità.

Nelle analisi in campo dinamico si è utilizzato il valore del coefficiente sismico orizzontale  $k_h = \beta_s \cdot a_{max}/g$  e verticale  $k_v = 0,5 k_h$ , assumendo le seguenti condizioni:

- Zona sismica = 3 (D.g.r. n.X/2129 del 11 luglio 2014);
- Valore dell'accelerazione massima orizzontale ottenuto dallo studio di risposta sismica locale, da cui si ricava:

Cond.	$\beta_s$	$a_{max}$ [g]	$K_H$	$K_V$
sismica	0.20	0.147	0.0294	0.0147

Le verifiche sono state eseguite nelle seguenti condizioni:

1. *Stato di Fatto (SF)*: situazione attuale delle sponde e del fiume Adda con quota idrometrica pari a 32,59 m s.l.m. per la zona a monte e pari a 31,49 m s.l.m. per la zona a valle dello sbarramento;
2. *Massimo Invaso (MI)* - la falda è stata assunta come coincidente con la quota di massimo invaso prevista dal progetto pari a 35,50 m s.l.m. per la zona a monte della traversa (sezione A-A') e pari a 31,99 m s.l.m. per la zona di valle (sezione B-B');
3. *Rapido Svuotamento (RS)*, ovvero rapida decrescita dei livelli idrometrici dalla condizione MI fino al raggiungimento della condizione SF per collasso dello sbarramento; trattandosi di una condizione "rara" (di cui si darà spiegazione nell'analisi dei risultati) non è stata considerata l'azione sismica coincidente con quella di rapido svuotamento.

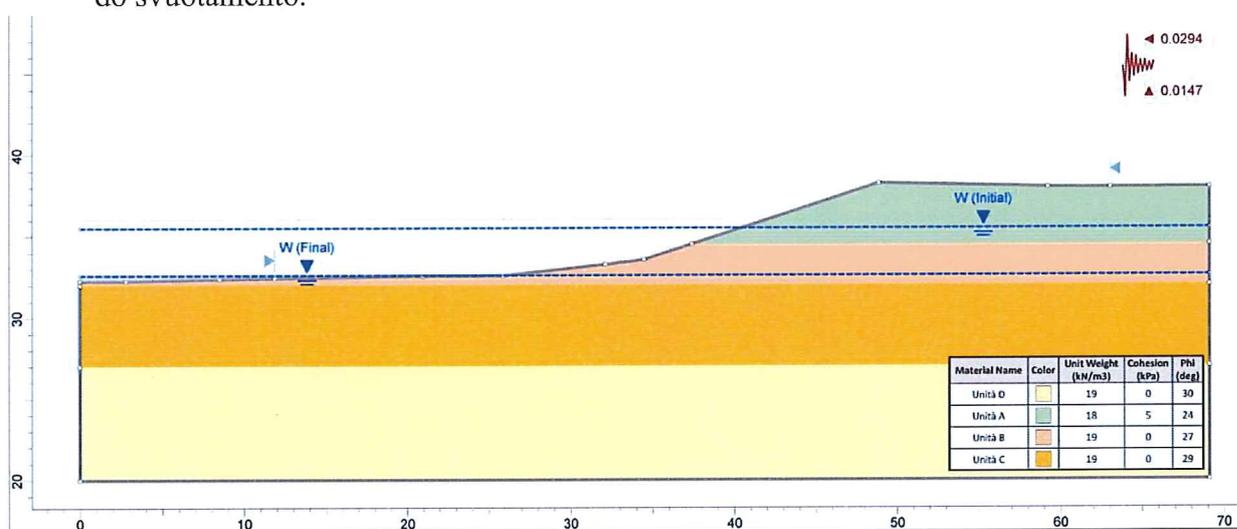


Figura 2: Modello geotecnico Sponda Destra - sezione A-A'.

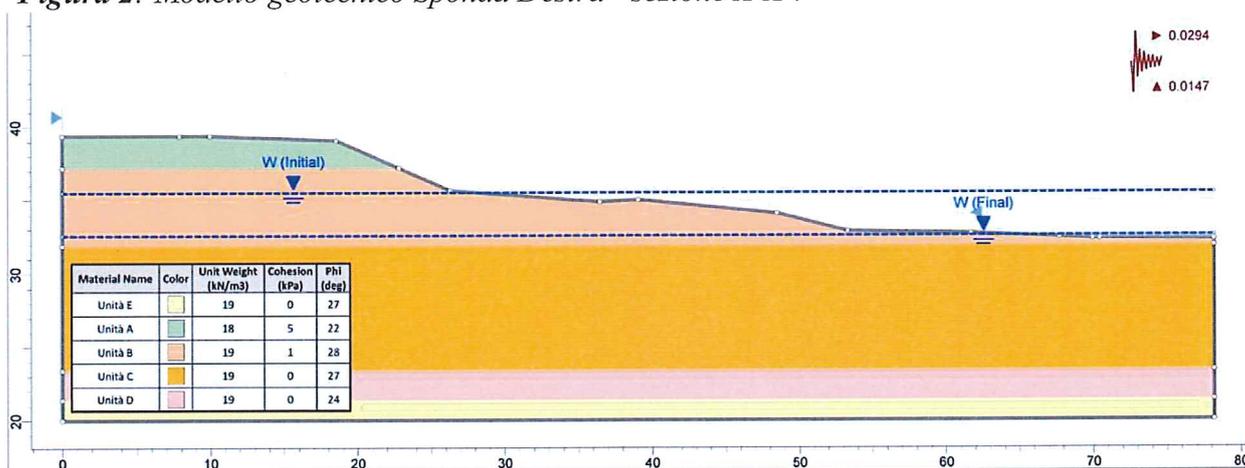


Figura 3: Modello geotecnico Sponda Sinistra - sezione A-A'.

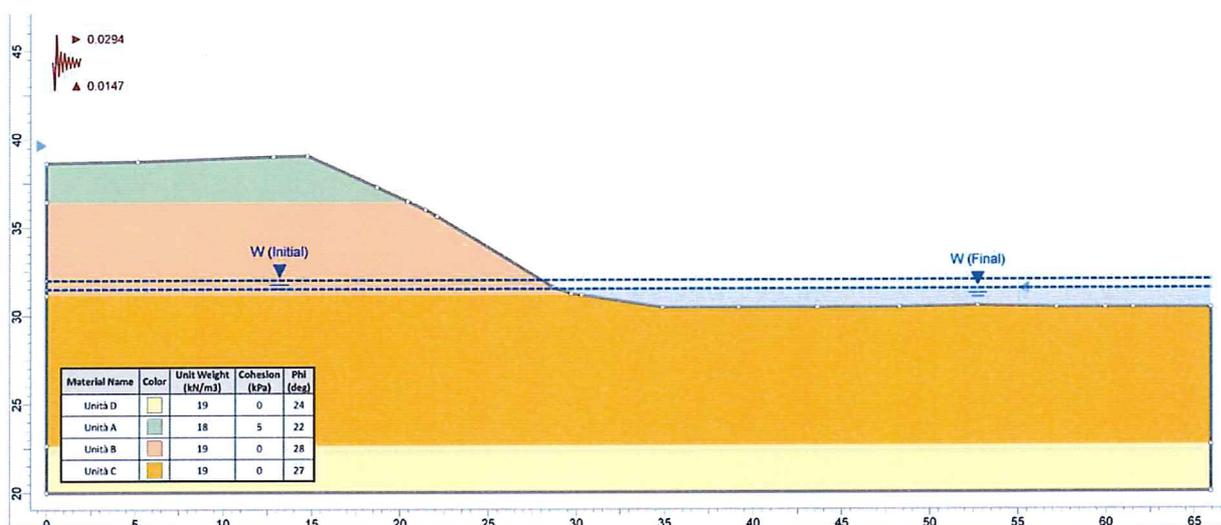


Figura 4: Modello geotecnico Sponda Sinistra - sezione B-B'.

### 5.1 RISULTATI

Nelle **tabelle 1 e 2** si riportano i valori dei coefficienti di sicurezza minimi ottenuti dalle analisi di stabilità nelle tre condizioni di esercizio (SF “Stato di Fatto”, MI “Massimo Invaso”, RS “Rapido Svuotamento”):

Profilo A-A' – a monte della traversa		
	Sponda Sx	Sponda Dx
<b>Caso</b>	<b>Fs Minimo</b>	<b>Fs Minimo</b>
<i>SF</i>	<i>1.543</i>	<i>1.655</i>
<i>SF con sisma</i>	<i>1.439</i>	<i>1.464</i>
<i>MI</i>	<i>1.341</i>	<i>1.260</i>
<i>RS</i>	<i>1.399</i>	<i>1.268</i>

Tabella 6 - Coefficienti di sicurezza ottenuti dalle analisi di stabilità per la sezione A-A' - sponda destra e sponda sinistra

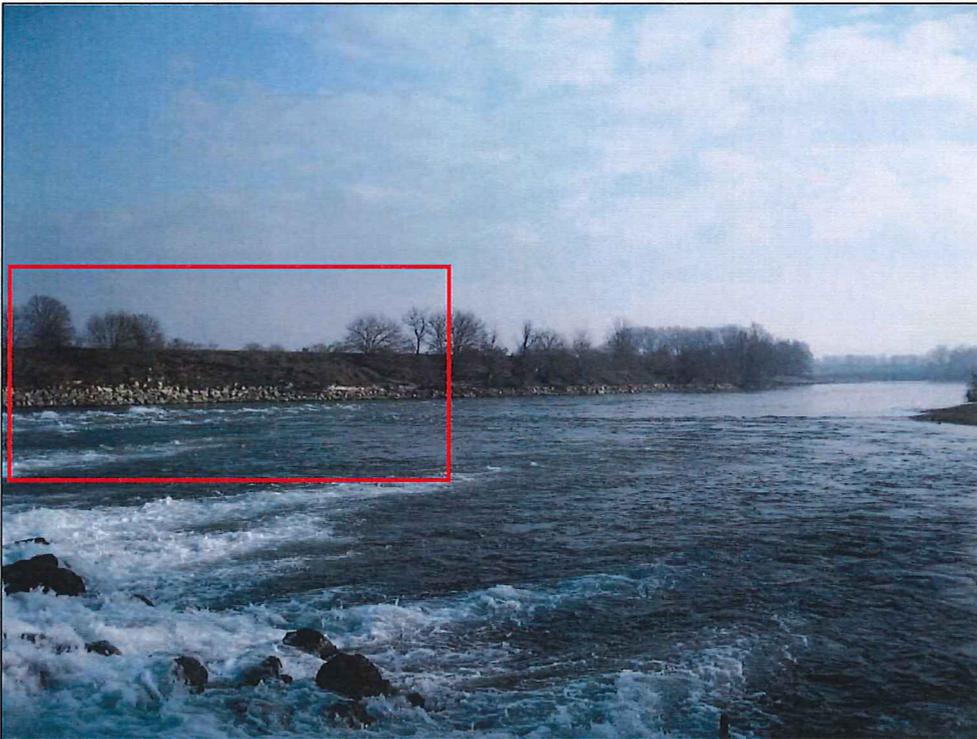
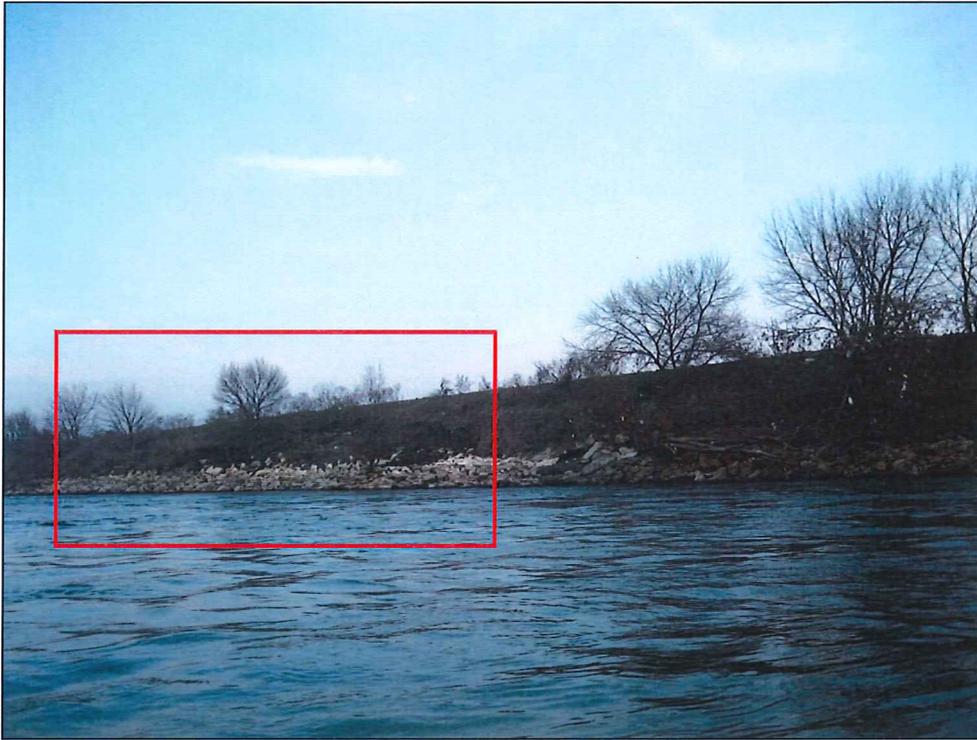
Profilo B-B' – a valle della traversa	
	Sponda Sx
<b>Caso</b>	<b>Fs Minimo</b>
<i>SF</i>	<i>0.908</i>
<i>SF con sisma</i>	<i>0.856</i>
<i>MI</i>	<i>0.842</i>
<i>RS</i>	<i>0.841</i>

Tabella 7 - Coefficienti di sicurezza ottenuti dalle analisi di stabilità per la sezione B-B' - sponda sinistra

In allegato 3 si riportano i risultati delle analisi di stabilità effettuate, dalle quali risulta che:

- **La stabilità della sponda destra e sinistra a monte della traversa è verificata ( $FS > 1,1$ )** per tutte le potenziali superfici di scivolamento considerate, anche in condizioni dinamiche e di rapido svuotamento. Non è stata verificata la coincidenza tra evento sismico e rapido svuotamento in quanto trattasi di una condizione assolutamente improbabile: per questione di sicurezza, infatti, lo sbarramento è stato suddiviso in tre campate indipendenti, motivo per cui l'eventuale collasso di una campata non produrrebbe lo svuotamento improvviso dell'invaso a monte. Analogamente, nel caso in cui si dovesse procedere all'abbassamento programmato dello sbarramento (ad esempio per operazioni di manutenzione), l'operazione avverrà in modo graduale. Per assicurarsi che i livelli idrometrici e quelli piezometrici restino in equilibrio (evitando lo sviluppo di sovrappressioni neutrali che favoriscono la destabilizzazione della sponda), lo svuotamento programmato verrà accompagnato da un monitoraggio costante e contemporaneo dei piezometri presenti sulla sponda e delle quote dell'invaso, adeguando conseguentemente la velocità di abbassamento dello sbarramento.
- **La stabilità della sponda sinistra a valle della traversa NON risulta verificata ( $FS < 1,1$ )**, condizione già palesata dai franamenti che si osservano lungo la sponda stessa nello stato attuale (foto seguenti). A tale proposito si precisa che l'intervento in progetto NON incide sui naturali livelli idrometrici a valle dello sbarramento (contrariamente a quanto accade a monte) e quindi non modificherà le condizioni di instabilità rilevate.

La spalla sinistra e le strutture annesse per il passaggio delle barche saranno fondate a monte sul taglione antisifonamento e a valle su pali isolati, che garantiscono la sicura stabilità dell'opera indipendentemente dalle situazioni critiche rilevate. Per quanto riguarda la sponda sinistra a valle dello sbarramento, è previsto un intervento di rinforzo attraverso la messa in opera di una scogliera con massi ciclopici per il tratto coinvolto dallo sfioro d'acqua. Inoltre la gestione dello sbarramento prevede di smaltire portate fino a  $\sim 260 \text{ m}^3/\text{s}$  dalla sola campata centrale, tenendo quindi ben lontano dalle sponde la corrente nella situazione probabilisticamente più pericolosa (Po basso), contrariamente a quanto accade oggi, quando la corrente è costantemente indirizzata verso la sponda sinistra aumentando le sollecitazioni al piede. Le campate laterali saranno aperte di norma in presenza d'un rigurgito significativo del Po, che certamente riduce le velocità della corrente liquida e i conseguenti problemi d'erosione.



*Foto 1 e 2 - La sponda sinistra a valle della traversa; nel riquadro i fenomeni di instabilità/franamento della sponda, giustificati dai calcoli di stabilità.*

## 6 ALLEGATO 1: SONDAGGI GEOGNOSTICI

GEOLAMBDA Engineering S.r.l.  
Via A. Diaz, 22  
26845 Codogno (LO)  
Tel.: 0377.433021 Fax: 0377.402035

Committente: VIS S.r.l.  
Località: Castelnuovo Bocca d'Adda (LO)

Scala: 100 Data: maggio 2015 Sondaggio n. S1

**Attrezzatura e metodo di perforazione: a carotaggio continuo**

- Campione rimaneggiato     Campione a percussione     LEFRANC  
 Campione S.P.T.     Campione ind.     prova di permeabilità  
 Campione da Vane Test     Campione ind. rotativo     LUGEON

Quota di riferimento (m)	Profondità (m)	Sezione terreno	Campione	Descrizione litologica	Piezometro	Completamento	Falda	S.P.T.	% Carotaggio	Pocket Test	Max Vane test	Residuo
	0,60		0,00	terreno vegetale					100%			
	2,00		1,00	limo sabbioso					100%			
	6,00		3,00	sabbia medio fine					100%			
	10,00		4,00	sabbia media con ghiaia					100%			
			6,00						100%			
			7,00						100%			





GEOLAMBDA Engineering S.r.l.  
Via A. Diaz, 22  
26845 Codogno (LO)  
Tel.: 0377.433021 Fax: 0377.402035

Committente: VIS S.r.l.  
Località: Castelnuovo Bocca d'Adda (LO)

Scala:  Data:  Sondaggio n.

**Attrezzatura e metodo di perforazione: a carotaggio continuo**

- Campione rimaneggiato     Campione a percussione     LEFRANC  
 Campione S.P.T.     Campione ind.     prova di permeabilità  
 Campione da Vane Test     Campione ind. rotativo     LUGEON

Quota di riferimento (m)	Profondità (m)	Sezione terreno	Campione	Descrizione litologica	Piezometro	Completamento	Falda	S.P.T.	% Carotaggio	Pocket Test	Max Vane test	Residuo
	0,60		<input type="text" value="0,00"/> <input type="text" value="1,00"/> <input type="text" value="3,00"/> <input type="text" value="4,00"/> <input type="text" value="6,00"/> <input type="text" value="7,00"/>	terreno vegetale sabbia fine sabbia con orizzonti ghiaiosi limo da sabbioso ad argilloso					<input type="text" value="20%"/> <input type="text" value="40%"/> <input type="text" value="60%"/> <input type="text" value="80%"/> <input type="text" value="100%"/>			





## 7 ALLEGATO 2: PROVE PENETROMETRICHE



## 7.1 REGISTRAZIONI STRUMENTALI DELLE RESISTENZE PENETROMETRICHE

SPONDA DESTRA									SPONDA SINISTRA		
Prova n. 1			Prova n. 2			Prova n. 3			Prova n. 4		
Prof.	Rp	Rp + RI	Prof.	Rp	Rp + RI	Prof.	Rp	Rp + RI	Prof.	Rp	Rp+RI
m	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	m	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	m	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	m	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
0,2	1	2	0,2	1	2	0,2	1	2	0,2	1	2
0,4	22	30	0,4	12	20	0,4	17	20	0,4	133	165
0,6	27	47	0,6	19	27	0,6	19	31	0,6	162	186
0,8	21	44	0,8	22	35	0,8	15	30	0,8	57	132
1	18	36	1	23	31	1	13	24	1	44	93
1,2	13	26	1,2	15	30	1,2	11	21	1,2	32	61
1,4	13	26	1,4	16	29	1,4	12	24	1,4	27	50
1,6	14	29	1,6	15	29	1,6	13	24	1,6	12	35
1,8	21	39	1,8	18	32	1,8	7	20	1,8	13	24
2	18	26	2	20	40	2	16	30	2	11	19
2,2	20	33	2,2	25	37	2,2	13	29	2,2	20	27
2,4	13	33	2,4	22	32	2,4	12	25	2,4	52	74
2,6	38	65	2,6	28	46	2,6	15	29	2,6	52	101
2,8	43	58	2,8	54	69	2,8	14	31	2,8	100	159
3	92	120	3	55	90	3	15	31	3	81	146
3,2	69	96	3,2	37	62	3,2	16	29	3,2	84	147
3,4	56	90	3,4	46	64	3,4	18	30	3,4	75	129
3,6	42	67	3,6	45	67	3,6	18	35	3,6	68	128
3,8	68	99	3,8	51	80	3,8	47	70	3,8	88	142
4	70	100	4	55	84	4	94	112	4	109	160
4,2	48	75	4,2	55	87	4,2	85	108	4,2	78	151
4,4	72	93	4,4	55	80	4,4	57	77	4,4	64	137
4,6	65	98	4,6	62	86	4,6	56	74	4,6	91	158
4,8	40	68	4,8	57	79	4,8	52	71	4,8	114	170
5	58	84	5	58	88	5	51	70	5	63	115
5,2	51	71	5,2	58	86	5,2	63	83	5,2	49	93
5,4	53	79	5,4	54	84	5,4	55	76	5,4	98	145
5,6	68	94	5,6	43	65	5,6	56	77	5,6	76	115
5,8	75	111	5,8	56	91	5,8	42	62	5,8	99	121
6	70	98	6	60	102	6	49	70	6	75	116
6,2	95	143	6,2	75	124	6,2	74	103	6,2	86	121

6,4	199	247	6,4	182	287	6,4	122	158	6,4	72	100
6,6	134	181	6,6	99	132	6,6	159	199	6,6	53	107
6,8	60	128	6,8	81	124	6,8	162	213	6,8	84	101
7	83	117	7	85	130	7	246	279	7	53	102
7,2	108	138	7,2	72	97	7,2	182	238	7,2	52	106
7,4	104	149	7,4	63	90	7,4	168	207	7,4	87	155
7,6	84	134	7,6	65	94	7,6	160	196	7,6	103	155
7,8	182	219	7,8	86	121	7,8	111	151	7,8	182	247
8	277	301	8	144	213	8	135	173	8	255	363
8,2	149	235	8,2	173	242	8,2	90	121	8,2	214	304
8,4	108	159	8,4	132	189	8,4	60	96	8,4	209	325
8,6	96	149	8,6	112	178	8,6	32	40	8,6	141	236
8,8	90	114	8,8	135	203	8,8	26	55	8,8	136	245
9	40	65	9	90	138	9	55	67	9	142	245
9,2	39	60	9,2	64	89	9,2	68	91	9,2	101	172
9,4	90	122	9,4	75	96	9,4	199	325	9,4	75	143
9,6	297	313	9,6	152	235	9,6	372	411	9,6	148	227
9,8	370	427	9,8	287	356	9,8	396	467	9,8	95	156
10	205	296	10	312	426	10	131	191	10	62	158
10,2	38	82	10,2	228	337	10,2	296	341	10,2	68	143
10,4	16	47	10,4	162	284	10,4	267	310	10,4	70	119
10,6	26	38	10,6	95	159	10,6	206	255	10,6	91	144
10,8	23	42	10,8	58	94	10,8	153	204	10,8	123	195
11	15	26	11	24	40	11	122	160	11	130	220
11,2	35	78	11,2	46	87	11,2	103	146	11,2	78	138
11,4	146	179	11,4	59	98	11,4	189	228	11,4	123	210
11,6	150	185	11,6	72	100	11,6	271	300	11,6	72	138
11,8	161	200	11,8	135	197	11,8	287	365	11,8	64	126
12	213	262	12	182	244	12	378	429	12	52	94
12,2	294	363	12,2	200	282	12,2	374	428	12,2	194	287
12,4	250	325	12,4	205	296	12,4	399	436	12,4	186	282
12,6	298	360	12,6	227	301	12,6	274	383	12,6	155	238
12,8	177	237	12,8	189	275	12,8	229	352	12,8	203	286
13	226	303	13	204	282	13	265	338	13	173	275
13,2	213	296	13,2	226	294	13,2	230	310	13,2	182	254
13,4	180	259	13,4	201	288	13,4	282	357	13,4	135	220
13,6	172	227	13,6	182	254	13,6	224	292	13,6	140	237

13,8	154	233	13,8	173	246	13,8	225	263	13,8	122	238
14	151	218	14	155	261	14	231	297	14	191	296
14,2	133	200	14,2	167	311	14,2	183	235	14,2	213	300
14,4	155	222	14,4	292	379	14,4	160	228	14,4	140	196
14,6	191	278	14,6	225	302	14,6	172	263	14,6	156	266
14,8	189	293	14,8	193	289	14,8	194	282	14,8	181	267
15	188	262	15	190	257	15	247	351	15	213	305
15,2	237	333	15,2	216	295	15,2	234	327	15,2	181	273
15,4	228	332	15,4	223	312	15,4	230	296	15,4	193	257
15,6	336	425	15,6	261	347	15,6	282	384	15,6	169	230
15,8	282	354	15,8	275	362	15,8	313	425	15,8	113	208
16	269	335	16	296	389	16	307	386	16	95	138
16,2	274	391	16,2	302	419	16,2	192	245	16,2	44	77
16,4	300	345	16,4	285	361	16,4	203	278	16,4	24	55
16,6	283	339	16,6	290	373	16,6	210	264	16,6	76	108
16,8	213	300	16,8	254	328	16,8	238	294	16,8	75	134
17	173	224	17	222	311	17	224	302	17	80	135
17,2	152	241	17,2	189	265	17,2	185	237	17,2	74	136
17,4	157	234	17,4	163	248	17,4	180	241	17,4	89	171
17,6	199	281	17,6	151	227	17,6	200	276	17,6	73	135
17,8	221	316	17,8	165	256	17,8	232	307	17,8	79	144
18	196	306	18	204	298	18	228	293	18	125	200
18,2	208	301	18,2	223	302	18,2	213	278	18,2	75	138
18,4	296	337	18,4	241	320	18,4	265	324	18,4	113	207
18,6	181	268	18,6	250	354	18,6	205	283	18,6	136	241
18,8	184	295	18,8	199	302	18,8	196	278	18,8	158	235
19	195	286	19	205	307	19	213	287	19	141	226
19,2	211	310	19,2	200	312	19,2	222	285	19,2	154	245
19,4	277	300	19,4	226	334	19,4	234	312	19,4	165	266
19,6	196	303	19,6	217	298	19,6	220	302	19,6	178	259
19,8	184	283	19,8	207	296	19,8	198	265	19,8	149	270
20	199	297	20	189	288	20	210	294	20	179	302
20,2	270	322	20,2	243	324	20,2	311	383	20,2	224	329
20,4	213	289	20,4	221	320	20,4	265	357	20,4	205	346
20,6	186	278	20,6	223	342	20,6	209	286	20,6	336	413
20,8	188	289	20,8	202	285	20,8	138	294	20,8	355	427
21	194	279	21	200	284	21	152	187	21	235	363

21,2	170	276	21,2	196	258	21,2	192	254	21,2	196	284
21,4	188	272	21,4	162	244	21,4	221	282	21,4	213	299
21,6	146	248	21,6	150	204	21,6	169	235	21,6	238	307
21,8	171	254	21,8	168	213	21,8	174	199	21,8	301	396
22	170	262	22	182	239	22	182	227	22	282	348
22,2	205	293	22,2	183	254	22,2	196	243	22,2	220	305
22,4	272	324	22,4	213	279	22,4	170	241	22,4	242	318
22,6	215	328	22,6	224	302	22,6	209	286	22,6	196	257
22,8	235	357	22,8	263	345	22,8	257	313	22,8	238	297
23	244	376	23	256	364	23	273	324	23	222	304
23,2	386	458	23,2	338	400	23,2	285	347	23,2	267	346
23,4	324	439	23,4	321	412	23,4	288	370	23,4	304	413
23,6	362	421	23,6	383	458	23,6	304	389	23,6	282	378
23,8	260	339	23,8	324	421	23,8	275	362	23,8	300	395
24	288	325	24	296	387	24	302	374	24	324	419
24,2	302	368	24,2	325	408	24,2	238	376	24,2	542	613
24,4	295	358	24,4	300	389	24,4	227	295	24,4	rifiuto	
24,6	207	329	24,6	282	356	24,6	264	352			
24,8	286	354	24,8	338	427	24,8	275	381			
25	254	321	25	309	410	25	312	422			
25,2	292	363	25,2	276	354	25,2	344	458			
25,4	313	388	25,4	323	419	25,4	350	429			
25,6	305	418	25,6	rifiuto		25,6	352	478			
25,8	319	409	25,8	---	---	25,8	rifiuto				
26	rifiuto		26	---	---	26	---	---			

## 7.2 PROFILI VERTICALI PROVE CPT









Committente: VIS S.r.l.

Località: Castelnovo Bocca d'Adda (LO)

Data:

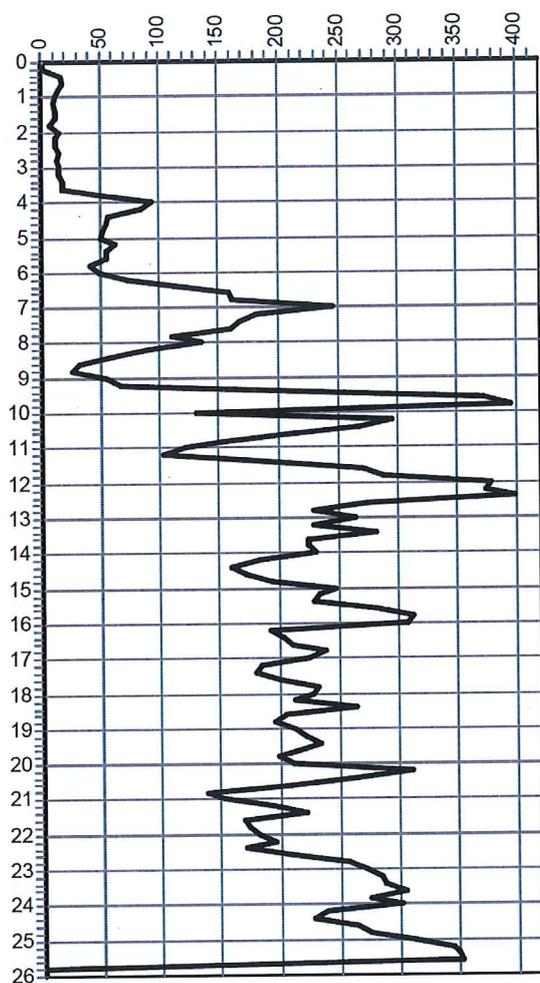
Attrezzatura: Penetrometro Statico a punta meccanica

Note:

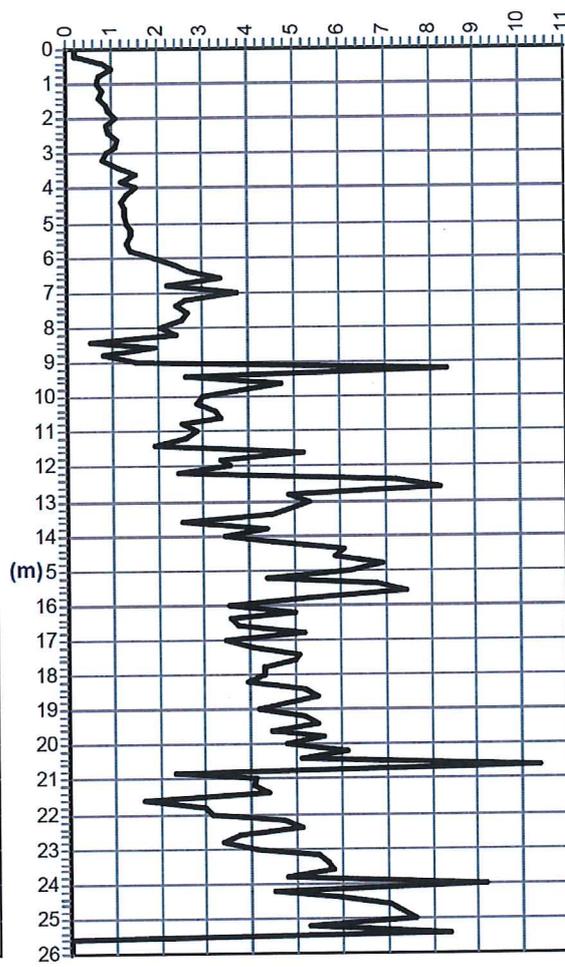
Quota(m): p.c.

Sigla: \Prova n.3

### Grafico della prova



— resistenza della punta( $q_c$ )( $\text{kg/cm}^2$ )



— resistenza laterale( $f_s$ )( $\text{kg/cm}^2$ )



Committente: VIS S.r.l.

Località: Crotta d'Adda (CR)

Data:

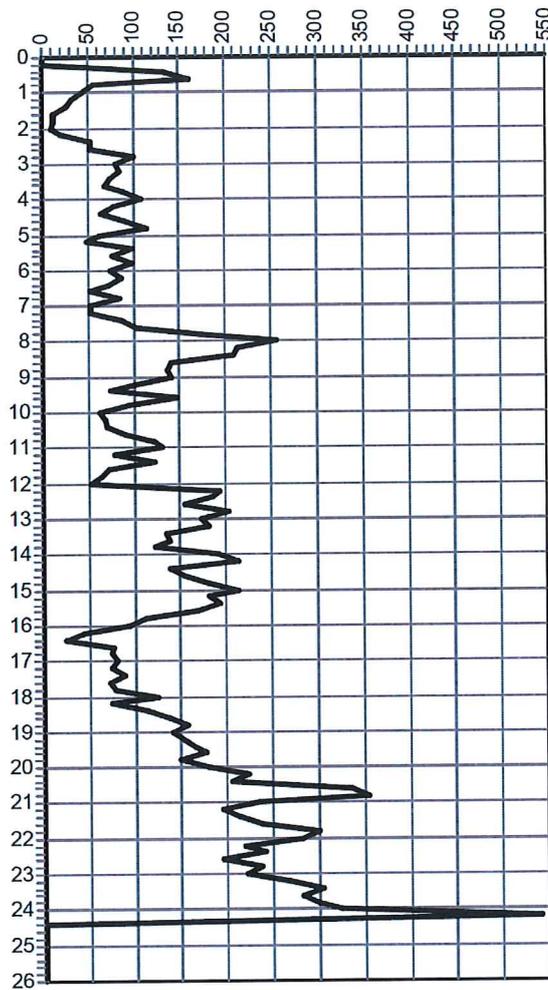
Attrezzatura: Penetrometro Statico a punta meccanica

Note:

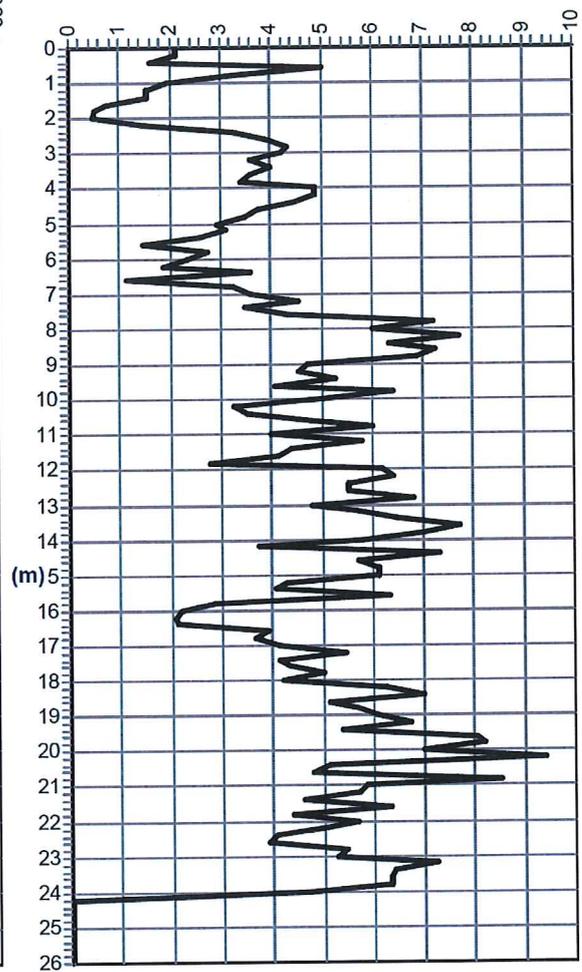
Quota(m):

Sigla: \Prova n.4

### Grafico della prova



— resistenza della punta(qc)(kg/cm²)



— resistenza laterale(fs)(kg/cm²)

Committente: VIS S.r.l.

Località: Crotta d'Adda (CR)

Data:

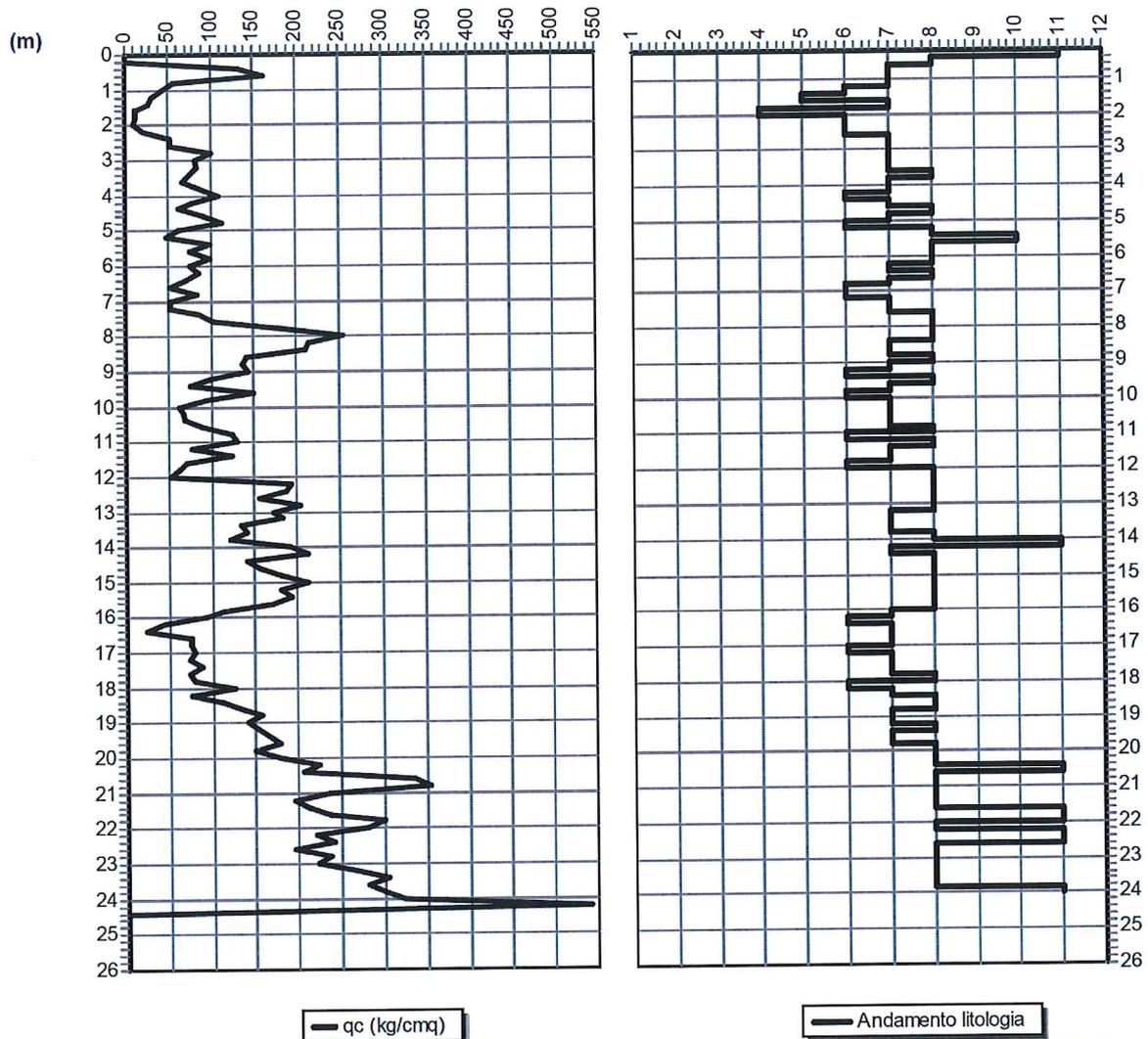
Attrezzatura: Penetrometro Statico a punta meccanica

Note:

Quota(m):

Sigla: \Prova n.4

### Grafico resistenza punta - litologia



SCHMERTMANN(1978): 1=Argilla organica-2=Arg.in.molto molle-3=Arg.molle-4=Arg.med.consistente-5=Arg.consistente-6=Arg.molto consistente-7=Arg.sabbiosa/limosa-8=Sabbia e limo-9=Sabbia sciolta-10=Sabbia med.addensata-11=Sabbia addensata-12=Sabbia cementata

## 8 ALLEGATO 3: INDAGINE GEOFISICA CON METODOLOGIA MASW

# Signa srl

## INDAGINI GEOFISICHE

**Committente:** Geolambda Engineering S.r.l.

**Località:** Impianto idroelettrico di Budriesse.

**Comune:** Castelnuovo Bocca d'Adda (LO).

**Indagine:** Indagini geofisiche con la metodologia MASW.

## RAPPORTO TECNICO

Codice documento: 22-15			Numero pagine: 11		
A	08/06/15	EMISSIONE	DG	DG	DG
Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato



**SIGNA srl**  
Via G. Donizetti, 7 – 24040 Boltiere (BG)  
Tel/Fax 035-806318 – Cell. 331-8218021  
Cod.Fisc. e P.IVA 05388280967  
[www.signasrl.it](http://www.signasrl.it); e-mail: [info@signasrl.it](mailto:info@signasrl.it)



SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	08/06/2015
	N. Commessa	22-15
	C. Documento	01
<b>Indagine geofisica con la metodologia MASW</b>	Revisione	A (DG)
	Nome file	MASW_Maccastorna

## 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La presente relazione riporta le elaborazioni ed i risultati ottenuti dall'esecuzione di n.2 profili sismici con la metodologia MASW effettuati in sponda destra (M1) ed in sponda sinistra (M2) del fiume Adda nell'ambito del progetto di realizzazione di un nuovo impianto idroelettrico in comune di Castelnuovo Bocca d'Adda (LO).

La campagna di indagine è stata eseguita nella giornata del 24 Aprile 2015 su incarico della società *Geolambda Engineering S.r.l.* di Codogno (LO).

Scopo dell'indagine è quello di ricostruire, per l'area in oggetto, l'andamento della velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità ( $V_s$ -z).

Il modello sismico monodimensionale costituisce infatti l'aspetto principale sia nella stima degli effetti sismici di sito (o risposta sismica locale - RSL) che nella definizione dell'azione sismica di progetto, in quanto consente di conoscere l'incidenza delle locali condizioni stratigrafiche nella modifica della pericolosità sismica di base.

Ciò permette una corretta progettazione strutturale in relazione alle condizioni sito-specifiche, garantendo un adeguato livello di protezione antisismica delle costruzioni (O.P.C.M. 3274 e s.m.i; D.M. 14.01.2008; D.G.R. n. 8/7374 e D.G.R. IX/2616/2011).

Nei capitoli successivi verranno descritte le modalità d'esecuzione delle misure sperimentali e l'interpretazione geofisica delle stesse.

In figura 1 si riporta l'ubicazione delle prospezioni MASW effettuate.



**Figura 1:** Ubicazione delle prove MASW effettuate (immagine tratta da Google Map).

SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	08/06/2015
	N. Commessa	22-15
	C. Documento	01
<b>Indagine geofisica con la metodologia MASW</b>	Revisione	A (DG)
	Nome file	MASW_Maccastorna

## 2. INDAGINE GEOFISICA MASW: DESCRIZIONE DEL METODO E DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

La prova MASW, messa a punto nel 1999 da ricercatori del *Kansas Geological Survey* (Park C.B. et al., 1999) permette di determinare in modo dettagliato l'andamento della velocità delle onde sismiche di taglio (o onde S) in funzione della profondità attraverso lo studio della propagazione delle onde superficiali di Rayleigh.

Il metodo di indagine MASW si distingue in "attivo" e "passivo" (Zywicki D.J., 1999; Park C.B., Miller R.D., 2006; Roma V., 2006):

1) Nel "**metodo attivo**" le onde superficiali sono prodotte da una sorgente impulsiva disposta a piano campagna e vengono registrate da uno stendimento lineare composto da numerosi ricevitori posti a breve distanza (distanza intergeofonica).

2) Nel "**metodo passivo**" lo stendimento presenta le stesse caratteristiche geometriche del metodo attivo ma i ricevitori non registrano le onde superficiali prodotte da una sorgente impulsiva, bensì il rumore di fondo (detto anche "microtremori") prodotto da sorgenti naturali (vento) e antropiche (traffico, attività industriali).

Le due tecniche indagano bande spettrali differenti: mentre il metodo attivo consente di ottenere una curva di dispersione nel range di frequenza compreso tra 10 e 40 Hz e fornisce informazioni sulla parte più superficiale di sottosuolo (fino a circa 20-30 m di profondità in funzione della rigidità del suolo), il metodo passivo consente di determinare una curva di dispersione nella banda di frequenza tra 4 e 20 Hz e fornisce informazioni sugli strati più profondi (generalmente al di sotto dei 30 m).

La combinazione delle due tecniche consente di ottenere uno spettro completo nella banda di frequenza comprese tra 4 e 40 Hz e permette una dettagliata ricostruzione dell'andamento della velocità delle onde di taglio fino a circa 30-40 m di profondità (sempre in funzione della rigidità degli strati).

L'analisi delle onde superficiali è stata eseguita utilizzando la strumentazione classica per la prospezione sismica a rifrazione disposta sul terreno secondo un array lineare da 24 geofoni con spaziatura pari a 1.5 m per entrambi gli stendimenti (la configurazione

SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	08/06/2015
	N. Commessa	22-15
	C. Documento	01
<b>Indagine geofisica con la metodologia MASW</b>	Revisione	A (DG)
	Nome file	MASW_Maccastorna

geometrica adottata è stata dettata sia dalle condizioni logistiche che dalla necessità di ricostruire al meglio lo spettro di velocità delle onde superficiali di Rayleigh).

Per ottenere una buona risoluzione in termini di frequenza, oltre ad utilizzare geofoni da 4.5 Hz, è stato utilizzato un sismografo a 24 bit.

Nell'esecuzione della prova MASW attiva è stato utilizzato come sistema di energizzazione una mazza di 8 Kg battente su piattello metallico. Per aumentare il rapporto segnale/rumore si è proceduto alla somma di più energizzazioni (processo di *stacking*).

La sorgente è stata posta ad una distanza compresa tra 6 e 15 m dal primo geofono effettuando più energizzazioni in punti differenti ("*Optimum Field Parameters of an MASW Survey*", Park C.B. et al., 2005; Dal Moro G., 2008; Dal Moro G., 2012).

Terminata l'indagine attiva, con la stessa configurazione geometrica si è passati alla registrazione dei microtremori (MASW passiva) acquisendo in totale 10-12 registrazioni di rumore, ciascuna della lunghezza di 30 s.

Di seguito si riassumono le principali caratteristiche della strumentazione utilizzata per l'esecuzione della prova MASW attiva e passiva:

n°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	sismografo GEOMETRICS "GEODE" a 24 bit
24	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
1	Cavo sismico	L = 60 m
1	Sorgente	Mazza battente su piattello metallico

Data	08/06/2015
N. Commessa	22-15
C. Documento	01
Revisione	A (DG)
Nome file	MASW_Maccastorna

**Indagine geofisica con la metodologia MASW**



**Figura 2:** Vista dello stendimento geofisico M1 effettuato.



**Figura 3:** Vista dello stendimento geofisico M2 effettuato.

SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	08/06/2015
	N. Commessa	22-15
	C. Documento	01
<b>Indagine geofisica con la metodologia MASW</b>	Revisione	A (DG)
	Nome file	MASW_Maccastorna

### 3. ELABORAZIONE DATI

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (**SurfSeis 4.0** della Kansas University, Park C. B., 2006-2013).

Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo.

L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "*phase velocity-frequency (c-f)*" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

Gli spettri bidimensionali ottenuti dalle registrazioni con il metodo attivo e con quello passivo, elaborati in fasi separate, vengono successivamente combinati in modo da ottenere uno spettro unico.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Inoltre, la combinazione dei due metodi MASW consente di individuare il "modo fondamentale" delle onde di superficie nel campo di frequenze compreso tra i 4 e i 40 Hz e di ottenere informazioni sia "superficiali" che "profonde".

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (si vedano le curve di dispersione riportate in allegato).

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo.

Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

**Indagine geofisica con la metodologia MASW**

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio Vs in funzione della profondità.

Dall'inversione delle curve di dispersione (relative al "modo fondamentale" delle onde superficiali di Rayleigh) si ottengono i seguenti modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, ciascuno rappresentativo dell'area investigata:

<b>MASW 1</b>			
<b>Strato</b>	<b>Spessore [m]</b>	<b>Vs [m/s]</b>	<b>Profondità</b>
1	0.7	112	0.7
2	0.9	112	1.6
3	1.1	164	2.8
4	1.4	141	4.2
5	1.8	221	6.0
6	2.2	236	8.2
7	2.8	167	10.9
8	3.5	259	14.4
9	4.3	330	18.7
10	5.4	317	24.1
11	6.8	314	30.9
12	9.3	547	40.2

**Tabella 1:** Modello sismico monodimensionale – M1.

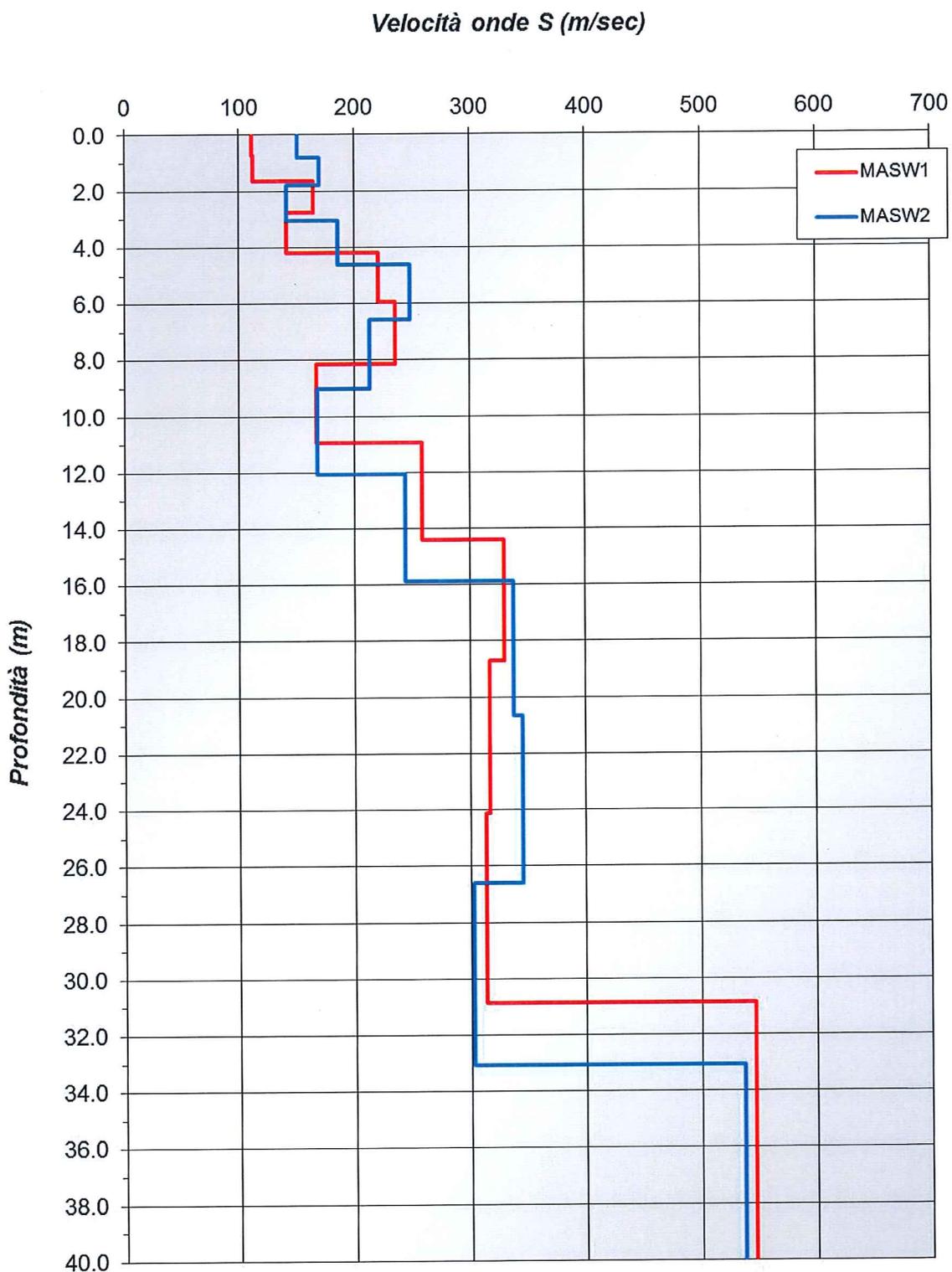
<b>MASW 2</b>			
<b>Strato</b>	<b>Spessore [m]</b>	<b>Vs [m/s]</b>	<b>Profondità</b>
1	0.8	151	0.8
2	1.0	169	1.8
3	1.3	141	3.1
4	1.6	186	4.6
5	2.0	249	6.6
6	2.4	213	9.0
7	3.1	168	12.1
8	3.8	245	15.9
9	4.8	338	20.6
10	6.0	345	26.6
11	6.5	303	33.1
12	7.5	537	40.6

**Tabella 2:** Modello sismico monodimensionale – M2.

Data	08/06/2015
N. Commessa	22-15
C. Documento	01
Revisione	A (DG)
Nome file	MASW_Maccastorna

**Indagine geofisica con la metodologia MASW**

**Shear-Wave Velocity Profile from Surface waves inversion**



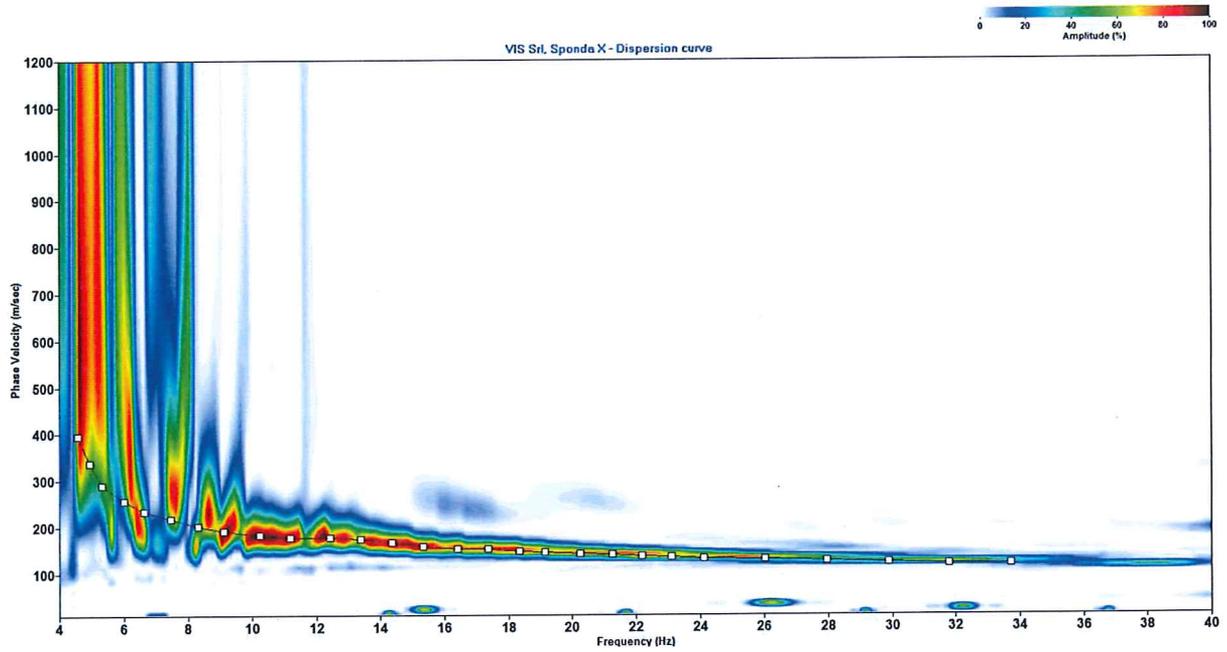
SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	08/06/2015
	N. Commessa	22-15
	C. Documento	01
<b><i>Indagine geofisica con la metodologia MASW</i></b>	Revisione	A (DG)
	Nome file	MASW_Maccastorna

# ALLEGATO

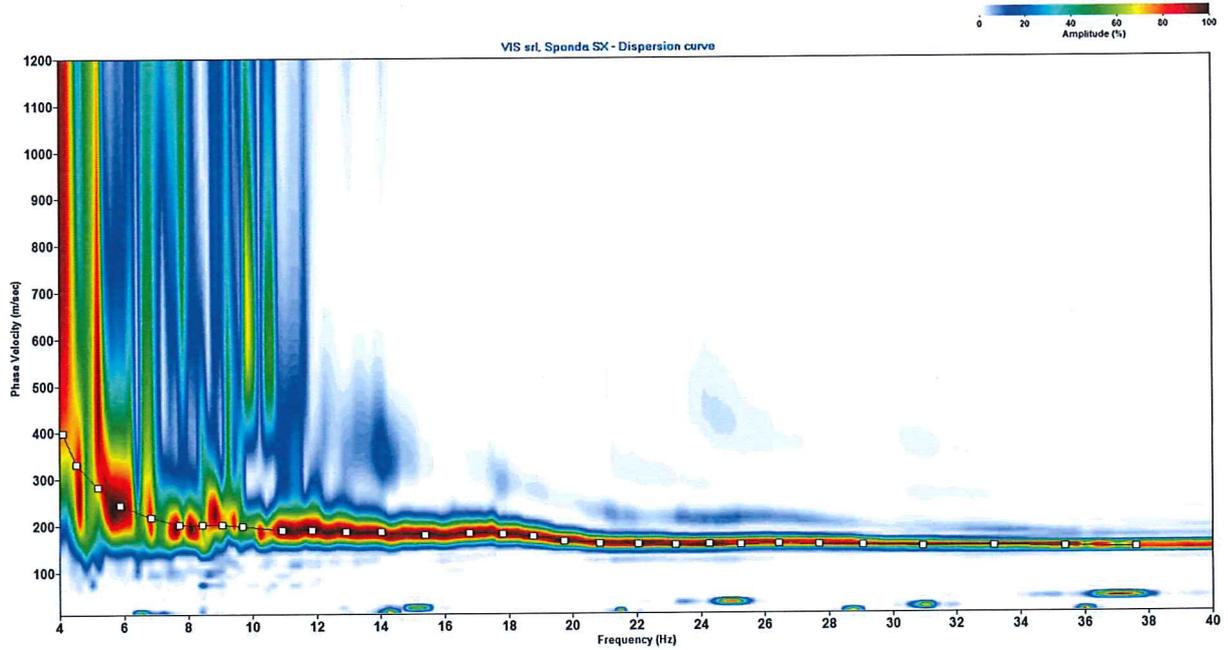
Data	08/06/2015
N. Commessa	22-15
C. Documento	01
Revisione	A (DG)
Nome file	MASW_Maccastorna

**Indagine geofisica con la metodologia MASW**

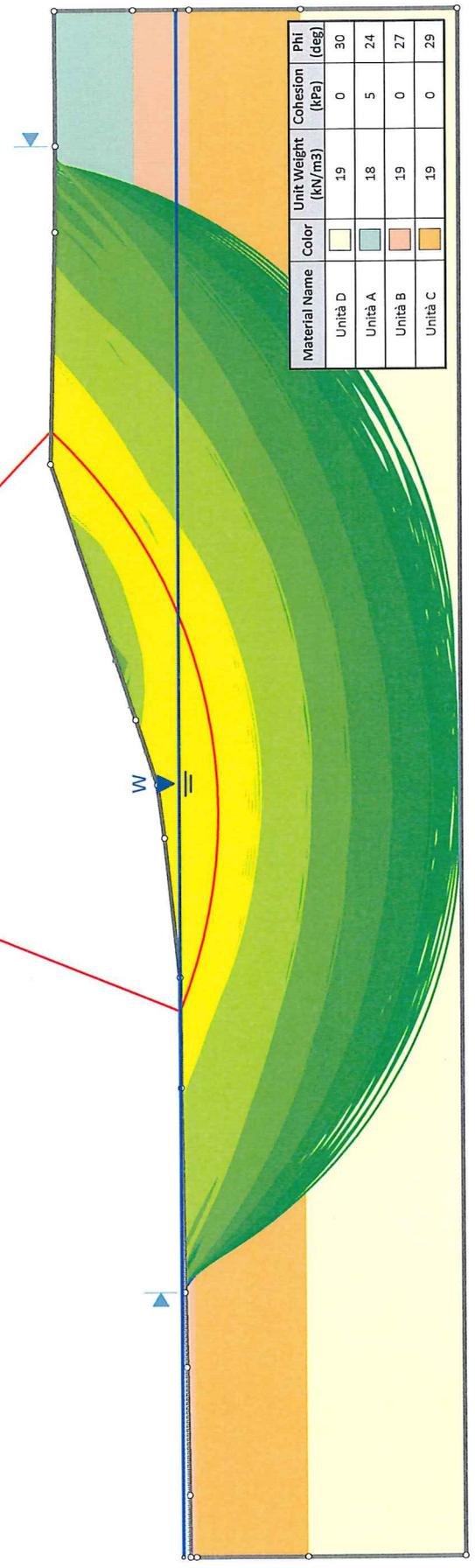
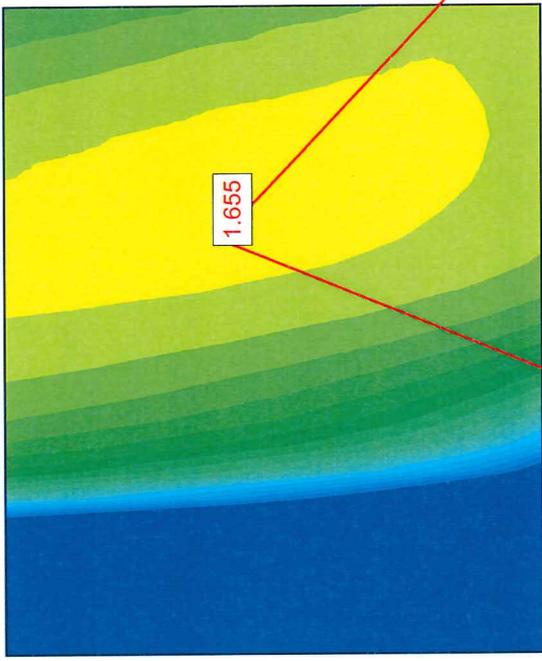
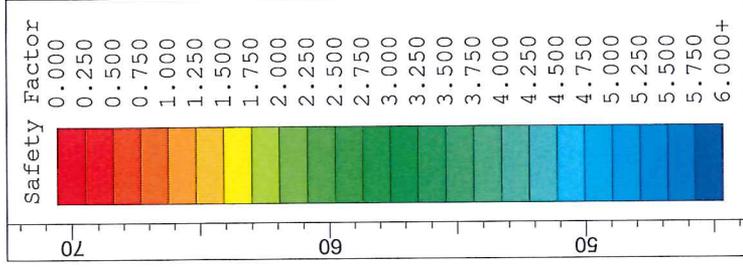
**MASW1 - CURVA DI DISPERSIONE**



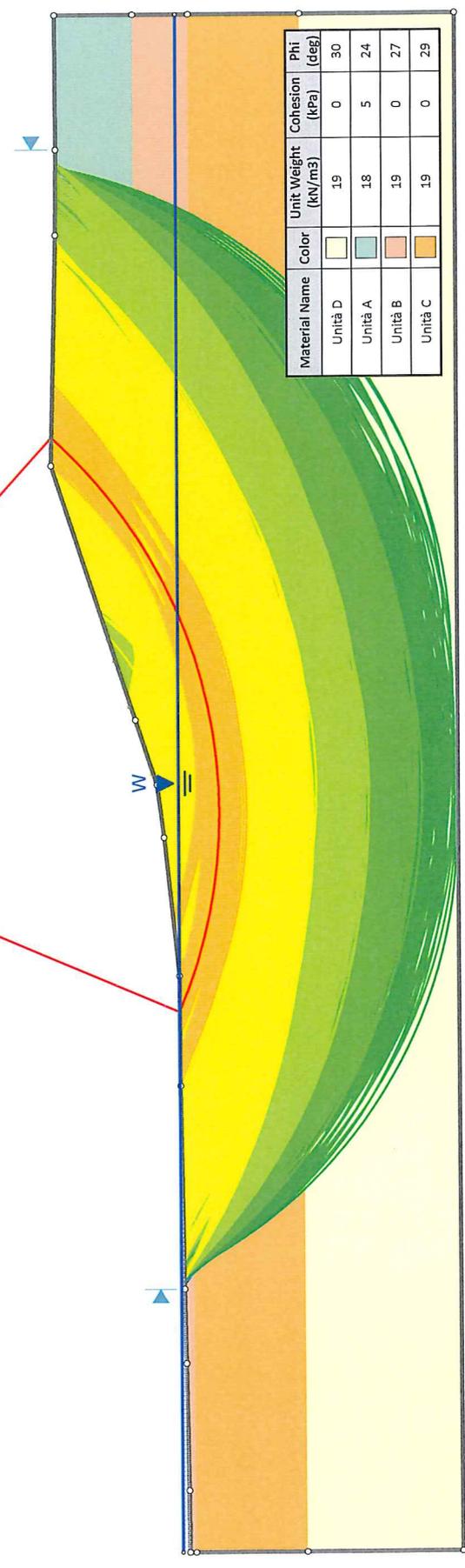
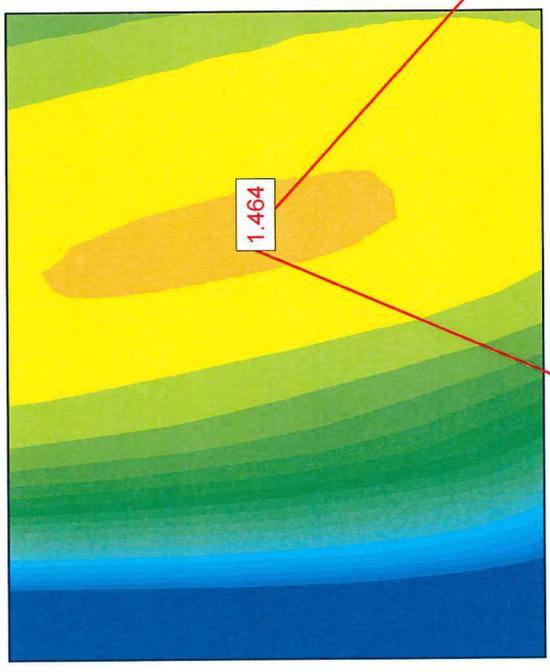
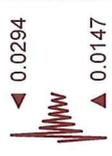
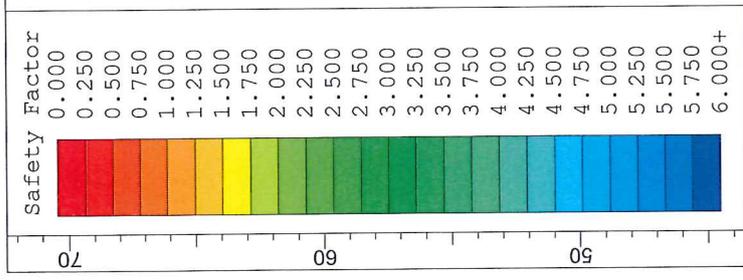
**MASW2 - CURVA DI DISPERSIONE**

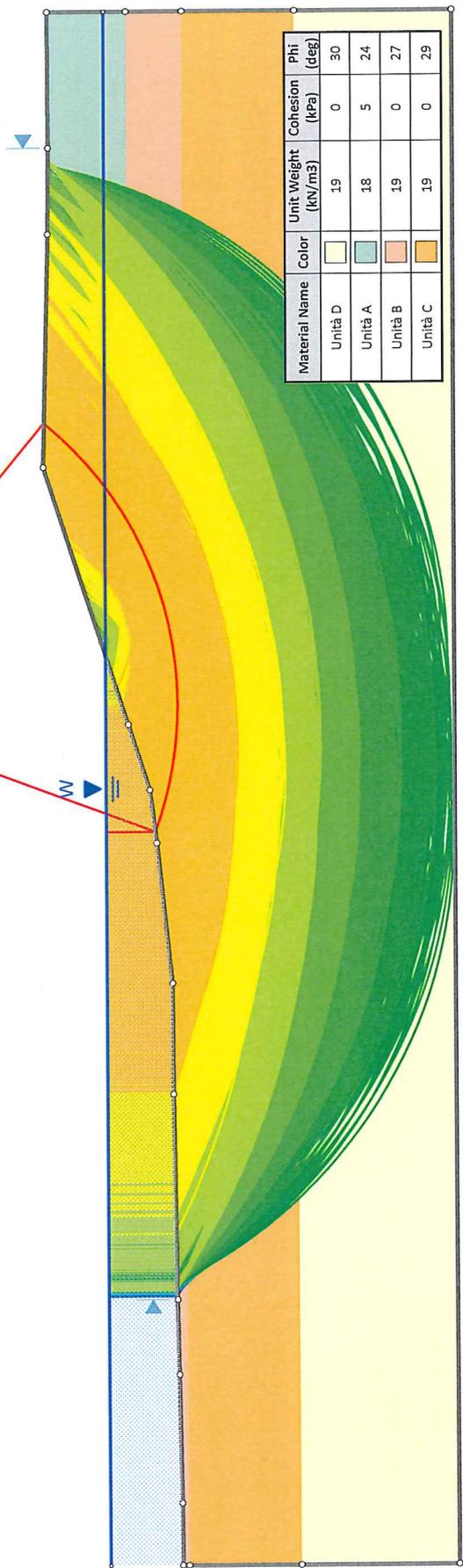
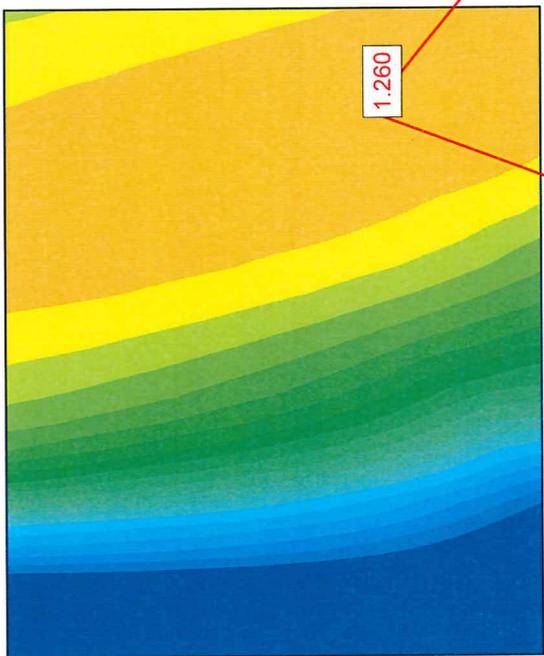
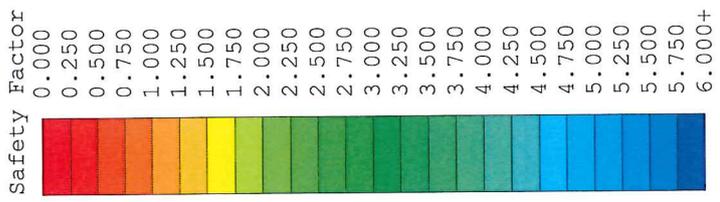


**9 ALLEGATO 4: ANALISI DI STABILITA' DELLE SPONDE – SEZIONE A  
MONTE DELLA TRAVERSA**

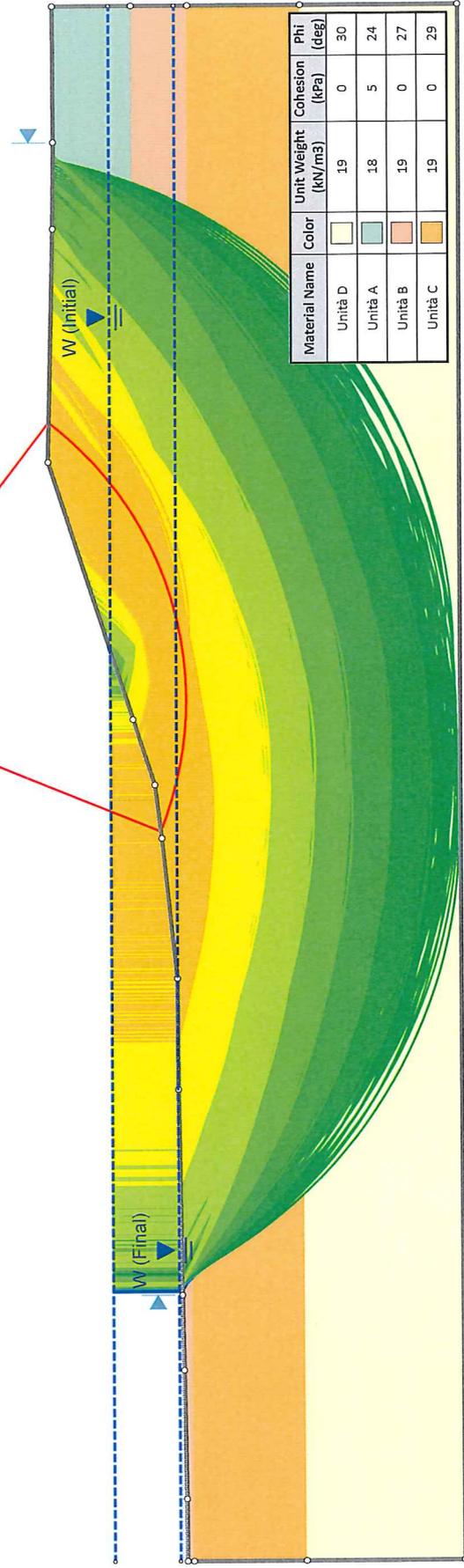
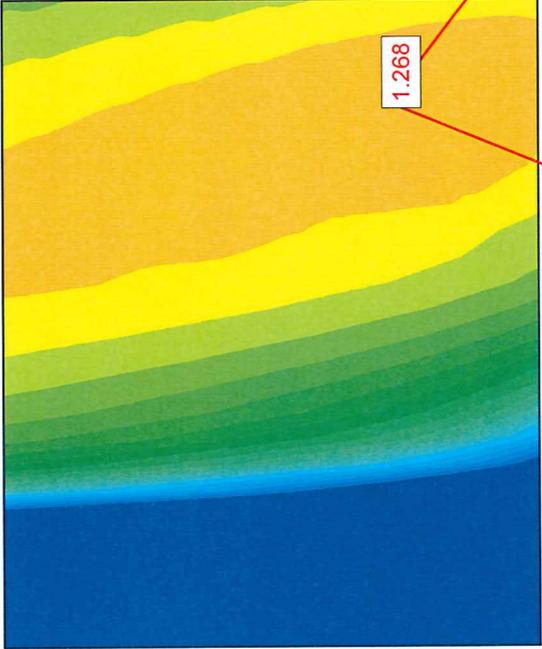
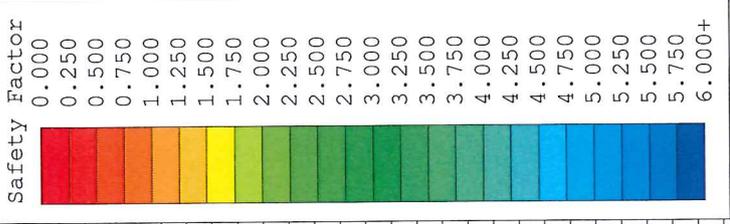


Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Phi (deg)
Unită D		19	0	30
Unită A		18	5	24
Unită B		19	0	27
Unită C		19	0	29

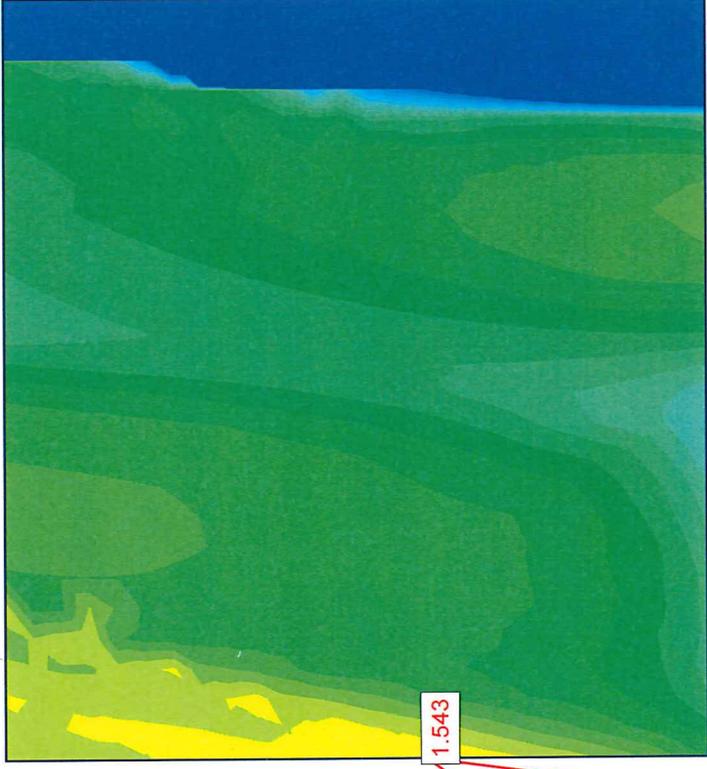
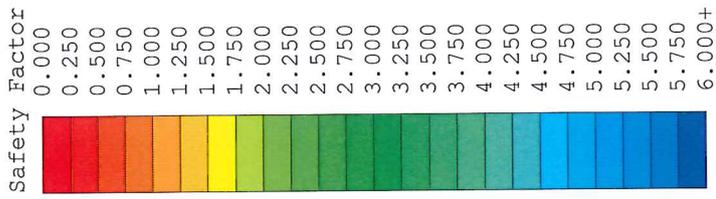




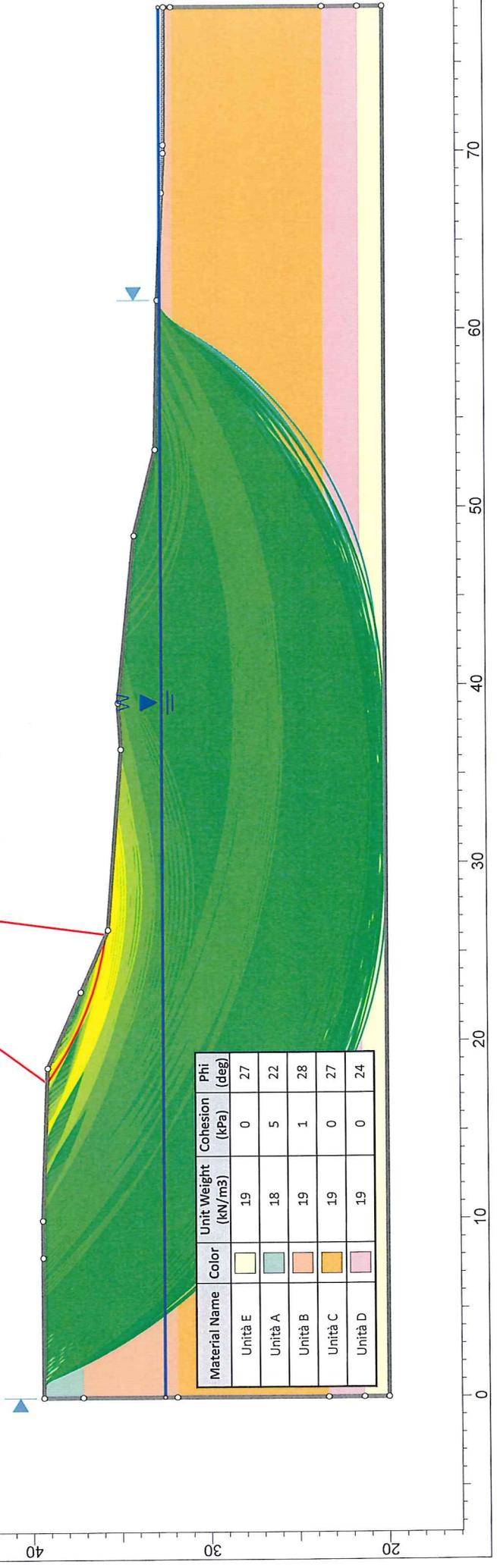
0 10 20 30 40 50 60 70

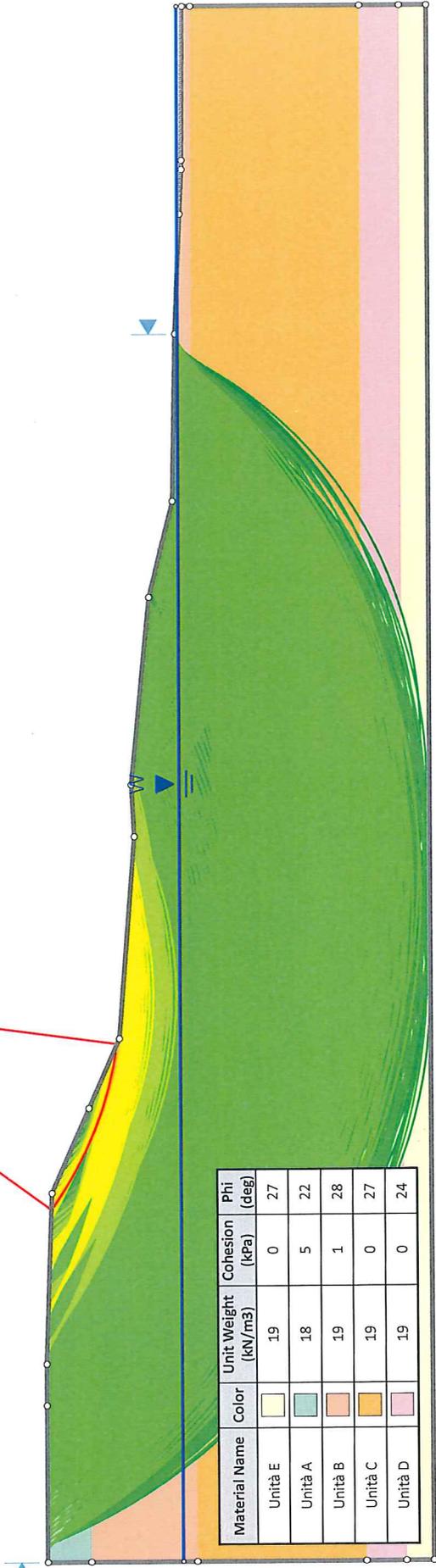
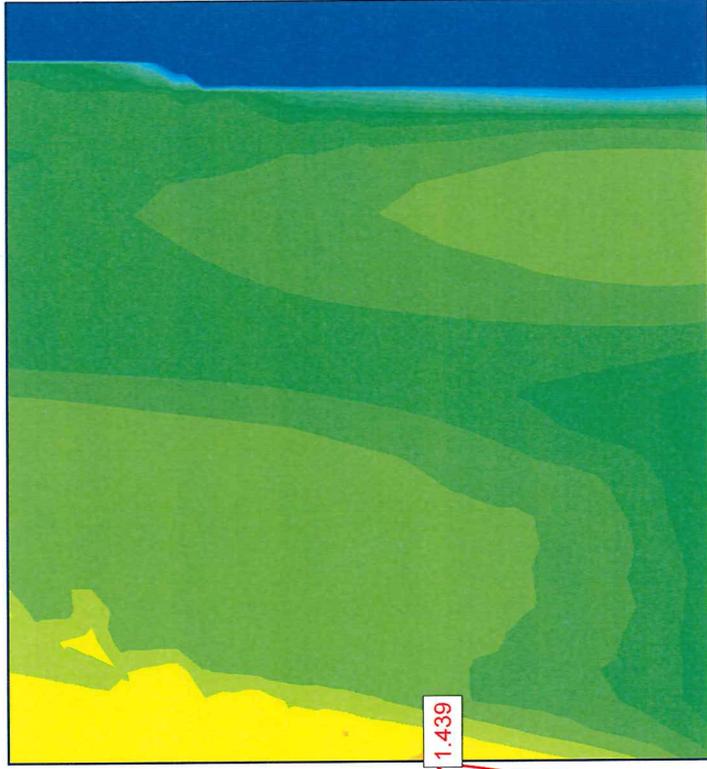
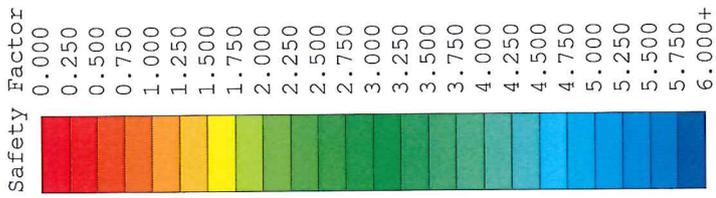


0 10 20 30 40 50 60 70



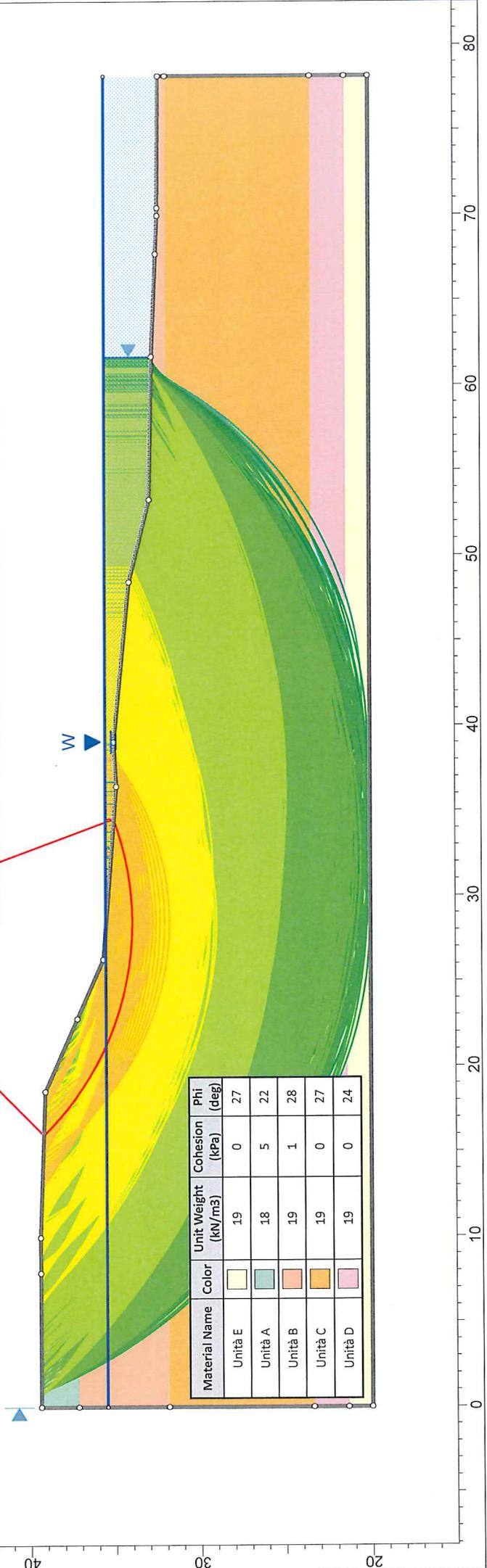
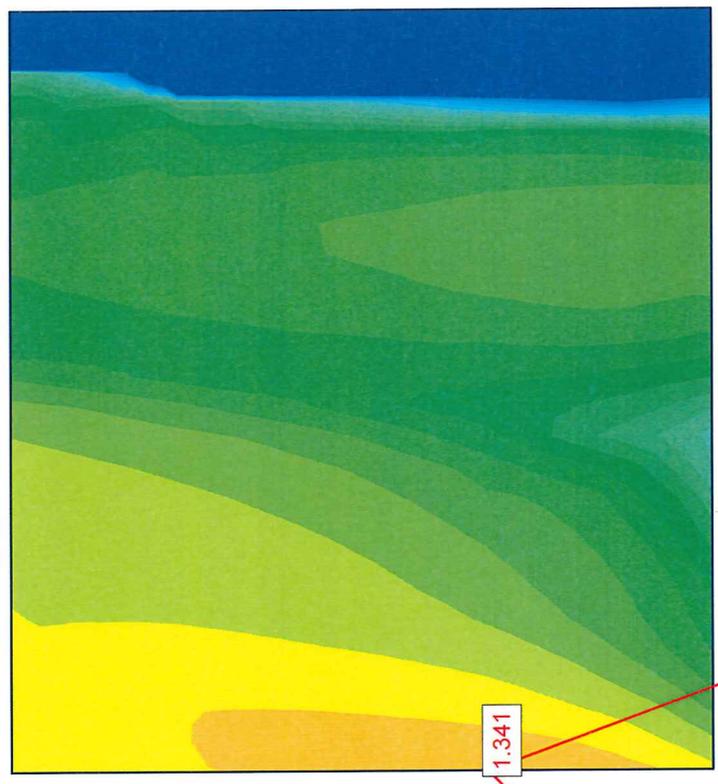
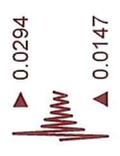
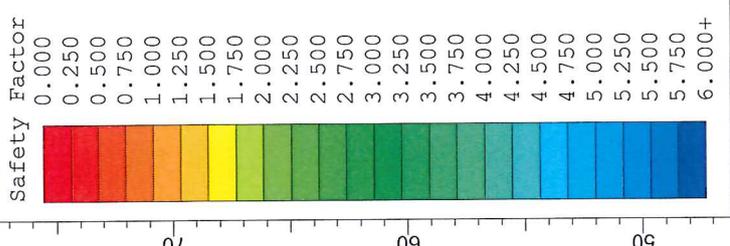
1.543

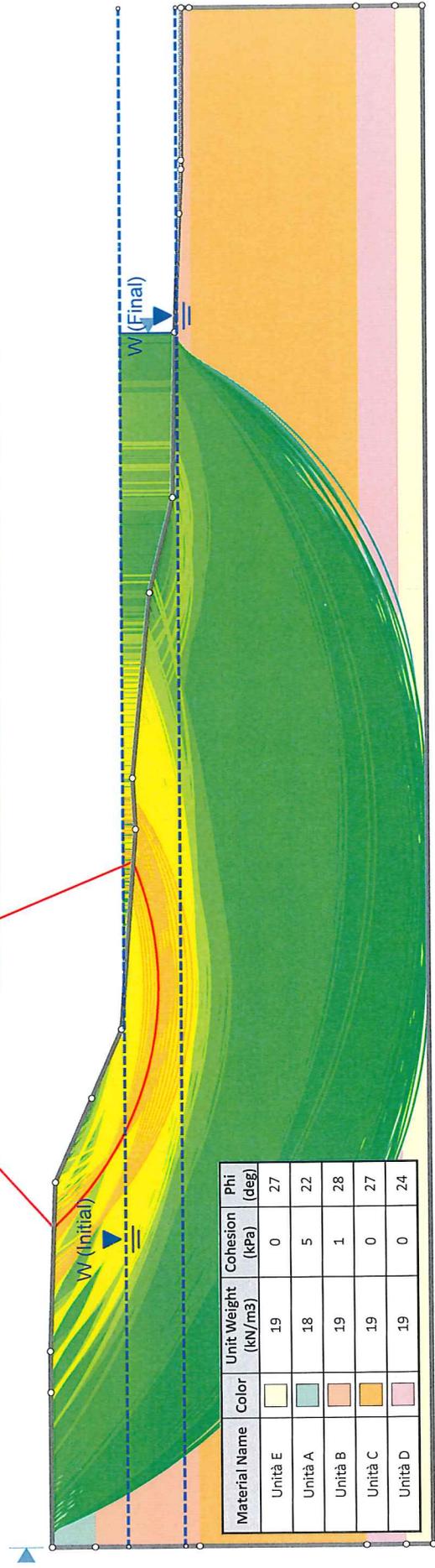
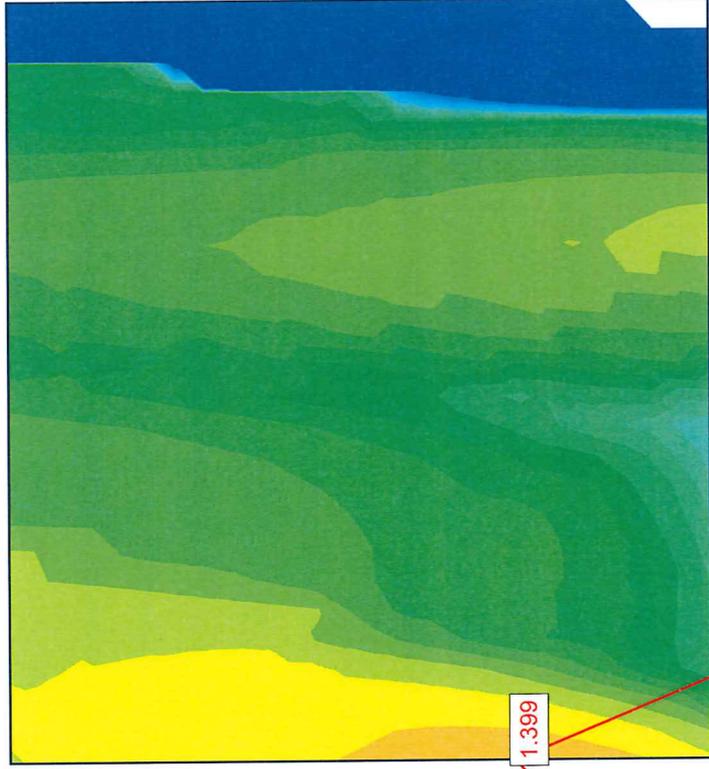
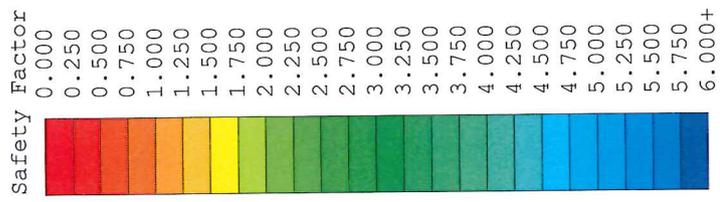




Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Phi (deg)
Unită E		19	0	27
Unită A		18	5	22
Unită B		19	1	28
Unită C		19	0	27
Unită D		19	0	24



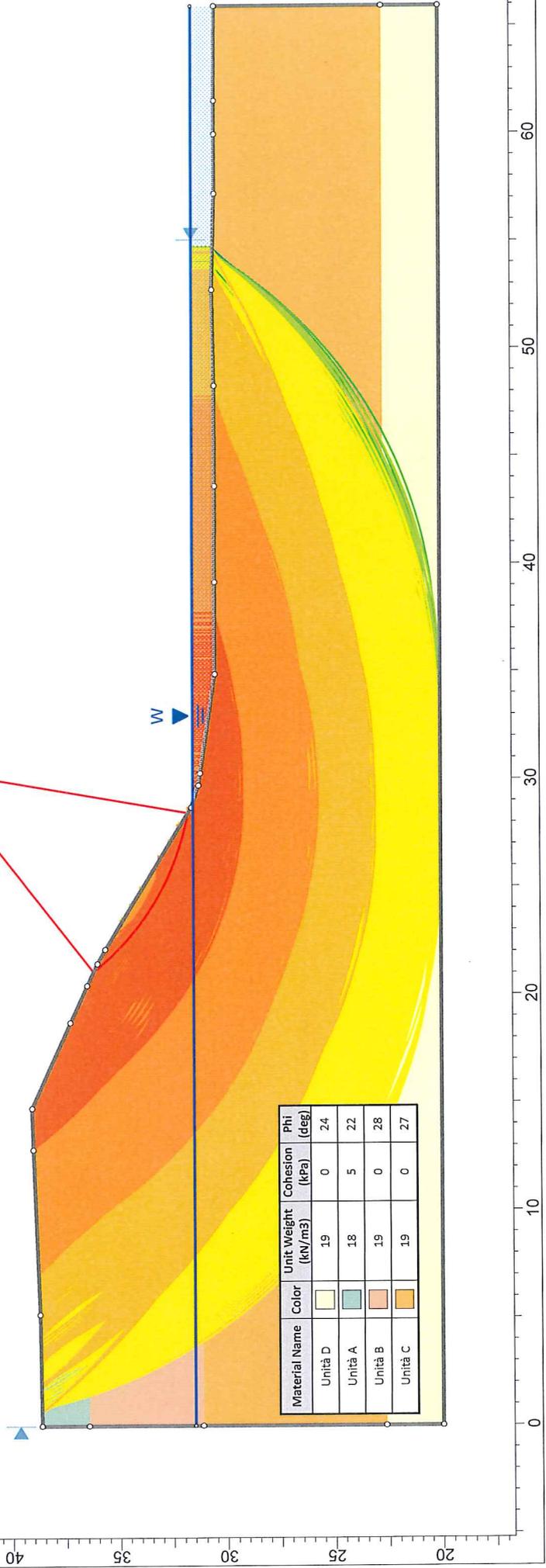
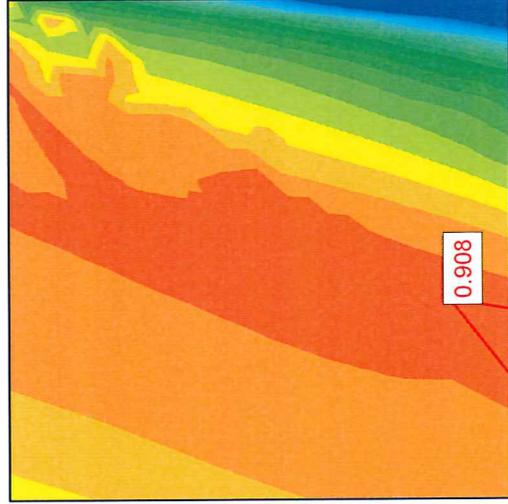
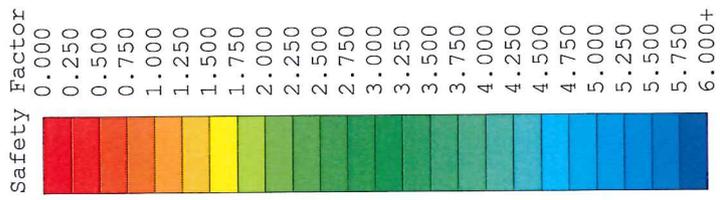




0 10 20 30 40 50 60 70 80

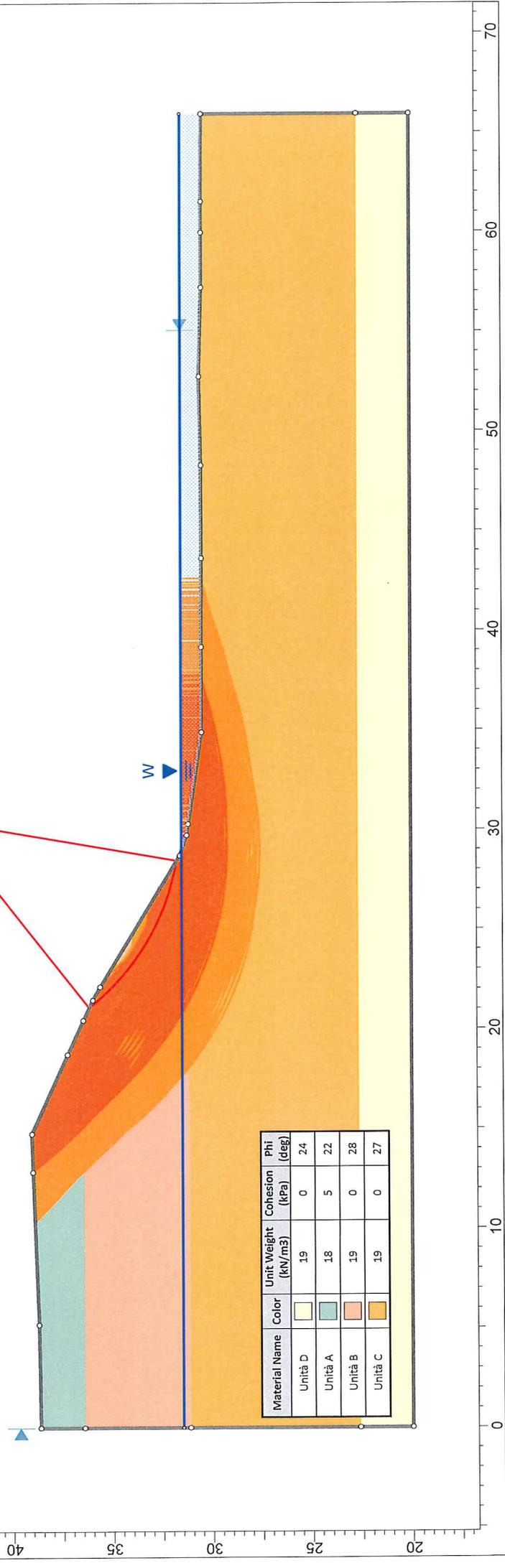
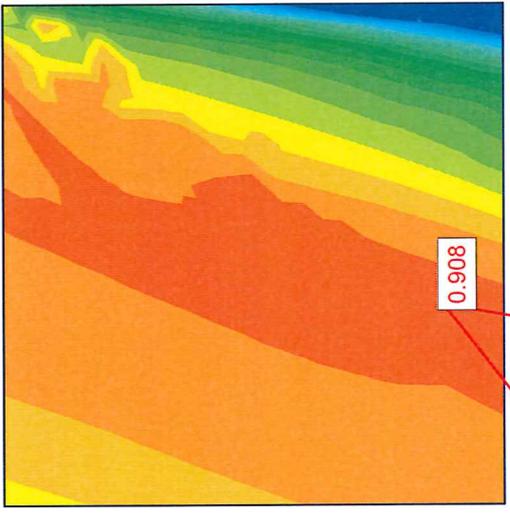
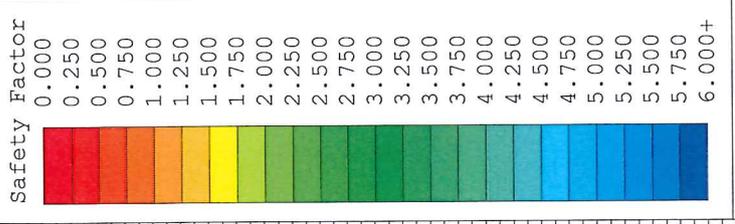
**10 ALLEGATO 5: ANALISI DI STABILITA' DELLE SPONDE – SEZIONE A  
VALLE DELLA TRAVERSA (SPONDA SINISTRA)**

# Sponda Sx - Stato attuale FS tutte

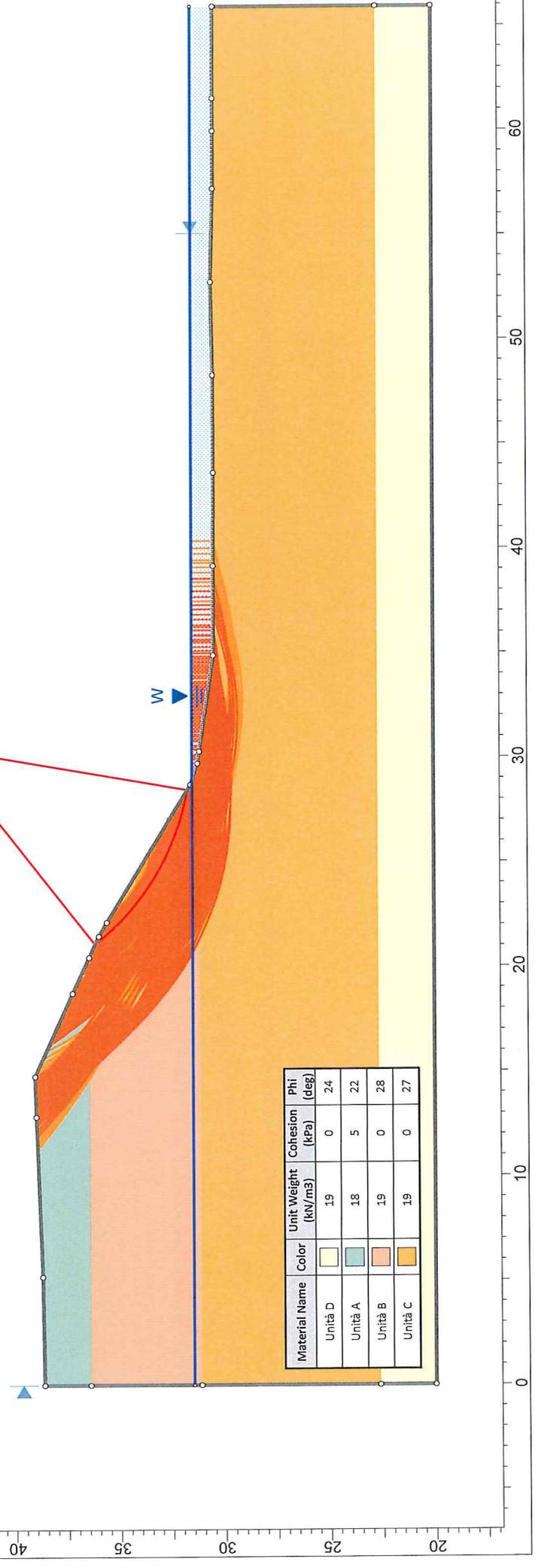
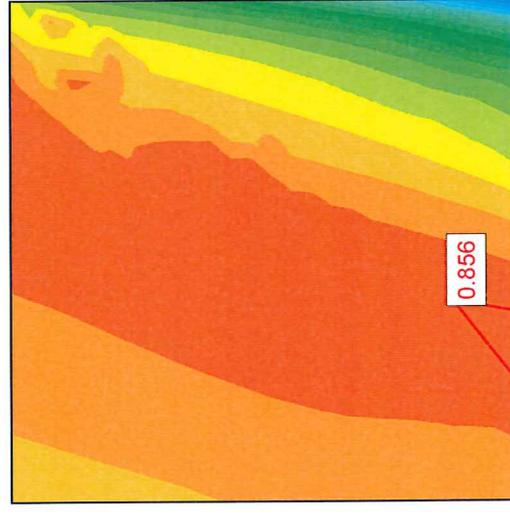
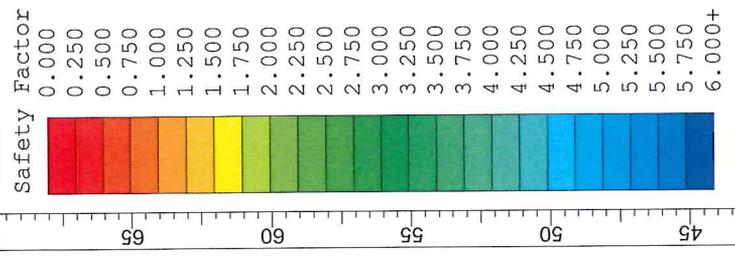


Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Phi (deg)
Unità D		19	0	24
Unità A		18	5	22
Unità B		19	0	28
Unità C		19	0	27

# Sponda Sx - Stato attuale FS<1.1

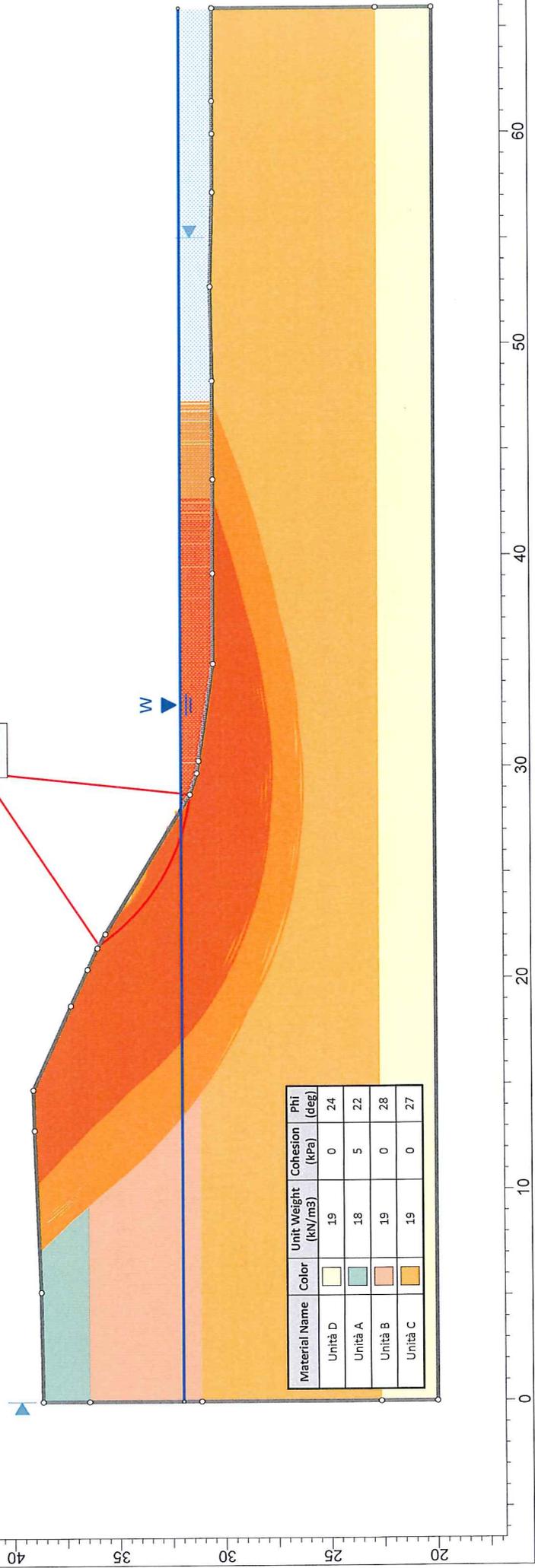
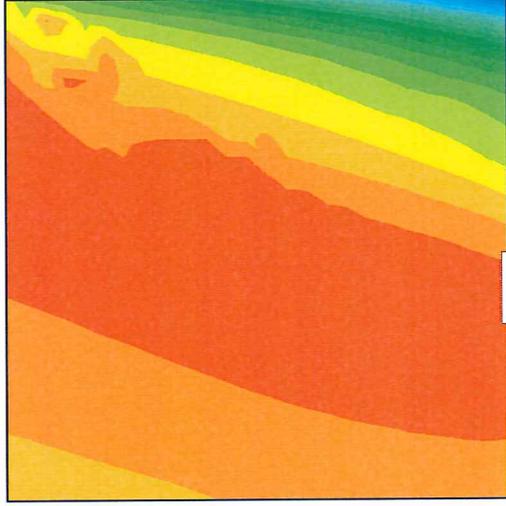
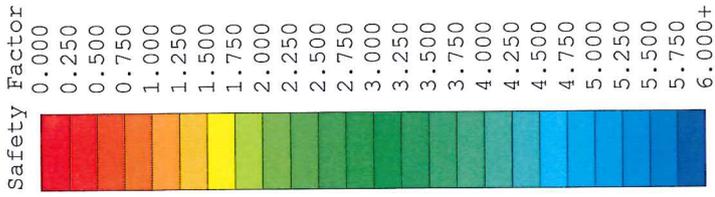


# Sponda Sx - Stato attuale + sisma FS<1.1

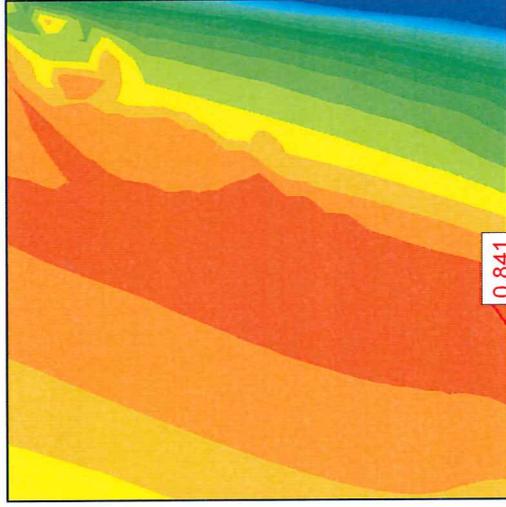
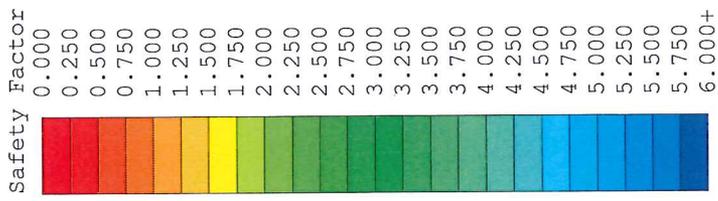


Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Phi (deg)
Unità D	Yellow	19	0	24
Unità A	Teal	18	5	22
Unità B	Orange	19	0	28
Unità C	Light Orange	19	0	27

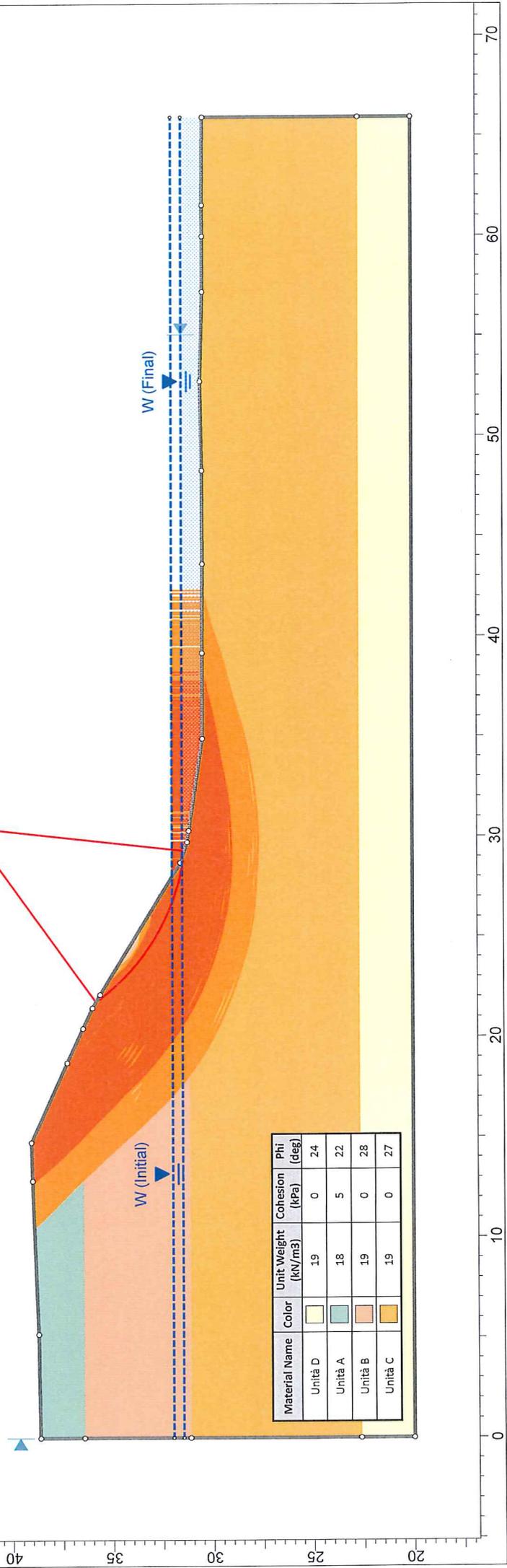
# Sponda Sx - Max Imvaso + sisma FS<1.1



# Sponda Sx - Rapido svuotamento FS < 1.1



0.841



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Phi (deg)
Unità D	[Light Yellow]	19	0	24
Unità A	[Light Green]	18	5	22
Unità B	[Light Orange]	19	0	28
Unità C	[Light Yellow]	19	0	27