

**POLITECNICO DI MILANO**

**Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio  
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale**



**VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ  
IDROGEOLOGICA NEL SITO ARCHEOLOGICO DI  
CASTELSEPRIO (VA)**

**Relatore: Prof. Paola Gattinoni**

**Autore: Alessandro Valletta**

**Matricola: 818948**

**Anno accademico 2015/2016**

## RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare innanzitutto la Professoressa Paola Gattinoni, per avermi seguito con grande disponibilità, pazienza e attenzione durante questi mesi di lavoro.

Ringrazio tutte le persone che ho avuto modo di conoscere in questi anni di studio e che hanno condiviso con me questo percorso, in particolare gli amici che ho avuto la fortuna di conoscere durante i miei tre anni di permanenza a Como: il vostro aiuto e la vostra compagnia sono state indispensabili.

Un doveroso ringraziamento va a Jacopo, Andrea, Francesca, Francesco, Andrea, Michele e Vincent, i miei coinquilini di via Beroldo 2, che mi hanno fatto sentire parte di una famiglia anche lontano da casa.

Non posso non ringraziare tutti i miei amici di lunga e lunghissima data, in particolare Francesco, Giovanni, Matilde, Gabriele, Milena, Martina e Chiara. Ognuno ha scelto la sua strada e, nonostante questo, c'è sempre stato un momento per ritrovarsi assieme: impossibile dirvi quanto questo sia stato importante per me.

Il più grande e sentito ringraziamento va alla mia famiglia, che mi ha dato i mezzi e la possibilità di essere dove sono ora; grazie per tutti i consigli, il sostegno e la fiducia che mi avete dato in ogni momento e in ogni occasione.

## SINTESI

Recentemente la tutela e la conservazione del patrimonio culturale ha assunto in Italia una rilevanza sempre maggiore; il grande numero di testimonianze storiche che caratterizzano il territorio italiano ha portato infatti alla realizzazione di vari studi volti alla valutazione dei rischi di carattere geologico e idrogeologico a cui sono soggetti i siti archeologici.

La presente tesi analizza il caso di studio del Parco Archeologico di Castelseprio (VA), facente parte di una rete di siti della Lombardia dichiarati Patrimonio dell'Umanità dell'UNESCO, con l'obiettivo di descrivere i processi idrogeologici che lo caratterizzano e di individuare le aree soggette a maggior pericolosità, al fine di stabilire degli interventi di messa in sicurezza.

Tramite l'analisi dei dati geologici, geomorfologici e idrogeologici a disposizione è stato ricostruito il modello concettuale dell'area di studio, dalla quale è emersa una debolezza geologica intrinseca dei materiali costituenti il sito; infatti, in superficie, è presente una litozona ghiaiosa e sabbiosa vulnerabile a fenomeni di erosione interna innescati dalla filtrazione dell'acqua (*piping*), fondamentale nel condizionare l'evoluzione della dinamica del versante.

Sulla base del modello concettuale sono state implementate una serie di simulazioni numeriche, utilizzando un modello agli elementi finiti in campo dapprima bidimensionale, con l'obiettivo di descrivere i processi in atto e l'influenza del *piping* sulla stabilità del versante. Si è poi passato alla ricostruzione di un modello tridimensionale per definire l'andamento areale della pericolosità all'interno del sito archeologico e nelle aree circostanti.

Le analisi in campo 2D hanno messo in luce come lo sviluppo del *piping* porti ad un sensibile peggioramento delle condizioni di stabilità del pendio, indebolendo il materiale e dando luogo a superfici di rottura nello strato superficiale. Tramite l'implementazione di diverse condizioni idrauliche è stato possibile studiare l'influenza dell'acqua sull'evoluzione del fenomeno: i risultati hanno mostrato una chiara dipendenza dall'intensità delle precipitazioni, il cui aumento provoca l'espansione delle aree soggette a erosione aggravando ulteriormente le condizioni di stabilità dell'area in esame. Un'analisi di sensitività svolta sui parametri di coesione e angolo d'attrito ha mostrato che, per determinati valori, il versante in esame può raggiungere la condizione di collasso.

Le simulazioni in campo tridimensionale, oltre a confermare i risultati ottenuti dal modello 2D, hanno consentito di individuare le aree del pianalto maggiormente soggette ad instabilità, che costituisce un'informazione di fondamentale importanza per la pianificazione delle strategie di conservazione e fruibilità futura del sito. In particolare, i risultati della modellazione 3D sono stati utili per valutare l'idoneità di diversi percorsi di collegamento e accesso agli scavi, indispensabili per garantire l'unitarietà del sito archeologico in esame. Per la messa in sicurezza di queste vie sono stati proposti, dove necessari, interventi strutturali e di manutenzione delle aree interessate.

## Sommario

RINGRAZIAMENTI .....	I
SINTESI .....	II
INDICE DELLE FIGURE .....	V
INDICE DELLE TABELLE.....	X
1. INTRODUZIONE.....	1
1.1. PREMESSA.....	1
1.2. STATO DELL'ARTE .....	1
1.3. DEFINIZIONE DEL PROBLEMA.....	2
1.4. OBIETTIVI E ORGANIZZAZIONE DELLO STUDIO.....	3
2. IL CASO DI STUDIO .....	4
2.1. DESCRIZIONE GENERALE DELL'AREA DI STUDIO .....	4
2.2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO .....	9
2.3. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO.....	19
2.4. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO .....	24
2.5. OPERE PRESENTI.....	29
3. MODELLO CONCETTUALE DI RIFERIMENTO .....	33
3.1. DEFINIZIONE DEL MODELLO FISICO.....	33
3.2. CARATTERISTICHE DEI GEOMATERIALI.....	34
3.3. DESCRIZIONE DEI PROCESSI GEOMORFOLOGICI E IDROGEOLOGICI .....	42
4. IL FENOMENO DEL PIPING .....	45
4.1. DESCRIZIONE DEL FENOMENO .....	45
4.2. ANALISI DELLE CONDIZIONI DI INNESCO .....	46
4.3. ANALISI DELL'EVOLUZIONE DEL FENOMENO .....	49
4.4. ANALISI DEGLI EFFETTI SULLE CONDIZIONI DI STABILITA' .....	56
5. DAL MODELLO CONCETTUALE ALLA MODELLAZIONE NUMERICA 2D .....	59
5.1. INTRODUZIONE.....	59
5.2. GEOMETRIA E DEFINIZIONE DELLA MESH .....	59
5.3. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI .....	61
5.4. CONDIZIONI INIZIALI E CONDIZIONI AL CONTORNO .....	62
6. ANALISI NUMERICHE 2D – RISULTATI.....	69
6.1. INTRODUZIONE.....	69
6.2. ANALISI IN CONDIZIONI ASCIUTTE.....	69
6.3. ANALISI IN PRESENZA DI ACQUA .....	70
6.3.1. ANALISI CON ALIMENTAZIONE SOLO DA MONTE .....	71
6.3.2. ANALISI CON ALIMENTAZIONE DA MONTE E RICARICA SUPERFICIALE.....	81



6.4.	ANALISI DI SENSITIVITÀ .....	108
7.	IL MODELLO TRIDIMENSIONALE.....	111
7.1.	GEOMETRIA DEL MODELLO.....	111
7.2.	DEFINIZIONE DELLA MESH E PROPRIETÀ DEI MATERIALI.....	112
7.3.	CONDIZIONI INIZIALI E CONDIZIONI AL CONTORNO .....	113
7.4.	ANALISI CON ALIMENTAZIONE DA MONTE E RICARICA SUPERFICIALE.....	115
7.5.	ANALISI CON MATERIALE INDEBOLITO DAL PIPING .....	119
7.6.	PERICOLOSITÀ E INTERVENTI DI MITIGAZIONE .....	123
8.	CONCLUSIONI .....	128
9.	APPENDICE – IL MODELLO NUMERICO .....	130
9.1.	ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI .....	130
9.1.1.	CONSTRUCTION STAGE.....	134
9.1.2.	SEEPAGE.....	135
9.1.3.	SLOPE STABILITY (SRM) .....	135
10.	BIBLIOGRAFIA .....	137

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Siti UNESCO in Lombardia; il Parco di Castelseprio è indicato dal cerchio rosso .....	2
Figura 2 - Inquadramento geografico della zona di studio (Barozzi et al., 2015) .....	4
Figura 3 - Localizzazione del sito archeologico con la sua area di rispetto .....	5
Figura 4 - Hillshade del pianalto su cui sorge il Parco Archeologico (Barozzi et al., 2015).....	6
Figura 5 - Stralcio della Carta Geologica d'Italia (scala 1:100.000, Foglio n. 31) relativo all'area di studio, localizzata all'interno del cerchio nero .....	7
Figura 6 - Porzione del Parco Archeologico: vista su pozzo (in primo piano) e cisterna (in secondo piano) .....	8
Figura 7 – Definizione dei fenomeni attivi e delle zone a rischio idrogeologico secondo il PAI (Barozzi et al., 2015).....	9
Figura 8 - Affioramento di Gonfolite lungo la sponda sinistra dell'Olona in località Castiglione Olona, poco a Nord dell'area di studio (Barozzi et al., 2015) .....	10
Figura 9 - Affioramento di Ceppo dell'Olona a monte del Monastero di Torba (Barozzi et al., 2015) .....	12
Figura 10 - Formazione di Castronno (Barozzi et al., 2015) .....	12
Figura 11 - Carta Geologica .....	14
Figura 12 - Sezione interpretativa con andamento Nord-Sud (modificata da Barozzi et al., 2015)..	16
Figura 13 - Sezione interpretativa con andamento Ovest-Est (modificata da Barozzi et al., 2015)..	17
Figura 14 - Sezione della Valle dell'Olona (Zuccoli, 2010) .....	18
Figura 15 - Cavità nel Ceppo (Barozzi et al., 2015) .....	20
Figura 16 - Ristagno d'acqua naturale (Barozzi et al., 2015) .....	21
Figura 17 - Esempio di frattura che favorisce la circolazione dell'acqua (Barozzi et al., 2015).....	22
Figura 18 - Carta idrogeologica .....	23
Figura 19 - Esempio di erosione accelerate (Barozzi et al., 2015) .....	24
Figura 20 - Nicchia di frana con fenomeni di erosione (roggia Vallone) (Barozzi et al., 2015) .....	25
Figura 21 - Ostruzione dell'alveo a causa della presenza di vegetazione (Barozzi et al., 2015).....	26
Figura 22 - Evidenze di cedimenti lungo il perimetro del Parco Archeologico (Barozzi et al., 2015)	27
Figura 23 - Affioramento del Ceppo sul versante orientale (Barozzi et al., 2015) .....	28
Figura 24 - Carta geomorfologica.....	29
Figura 25 - Piccole briglie e protezioni spondali in legno lungo la Roggia Malmonte (Barozzi et al., 2015) .....	30
Figura 26 - Gabbionata metallica presente in prossimità della roggia Vallone (Barozzi et al., 2015) .....	30
Figura 27 - Rete metallica parzialmente ricoperta dalla vegetazione posizionata lungo il margine meridionale del terrazzo (Barozzi et al., 2015) .....	31
Figura 28 - Carta delle opere esistenti .....	32
Figura 29 - Alternanza di strati cementati e meno cementati nel Ceppo dell'Olona (Barozzi et al., 2015) .....	34
Figura 30 - Posizione delle indagini nel comune di Castelseprio .....	35
Figura 31 - Risultati dell'indagine IGT1 (n° 2 prove penetrometriche) e sezione interpretativa (PGT Castelseprio, 2013) .....	36

Figura 32 - Posizione delle indagini nel comune di Gornate Olona.....	37
Figura 33 - Prove penetrometriche P1 e P6 situate in località S.ta Monica (SM) (Parmigiani, 2004) .....	38
Figura 34 - Confronto tra sezione sismica a rifrazione SIS 1(valori in m/s) e sezione geoelettrica ERT 1 (valori in $\log(\Omega m)$ ) (Fontana, 2010) .....	40
Figura 35 - Esempio di cavità metrica nel Ceppo dell'Olona (occhio pollino) .....	41
Figura 36 – Schema di galleria e cavità (occhi pollini) generati da fenomeni di erosione sotterranea (Scesi et al., 2015) .....	42
Figura 37 - Esempio di <i>piping</i> nella Formazione di Castronno (Barozzi et al., 2015) .....	43
Figura 38 - Rappresentazione schematica del modello concettuale di riferimento .....	44
Figura 39 - Esempio di piping indotto da filtrazione (Xiao, 2015) .....	45
Figura 40 - Evoluzione delle cavità in presenza di un'interfaccia tra strato permeabile e substrato impermeabile (modificato da Bonomi e Villa, 2006) .....	47
Figura 41 - Diagramma di Kenney e Lau (Ronnqvist e Viklander, 2015).....	48
Figura 42 - Modello proposto per la rappresentazione del flusso attraverso il materiale granulare (El Shamy e Aydin, 2008).....	50
Figura 43 - Sviluppo del tempo dell'azione erosiva, partendo dallo stato iniziale (a sinistra) fino al completo sviluppo del fenomeno (a destra) (Wang e Ni, 2013) .....	51
Figura 44 - Diagramma dell'analisi numerica (Fujisawa et al., 2010) .....	52
Figura 45 - Modello numerico tridimensionale; l'area in nero corrisponde alla cavità (Bersan et al., 2013) .....	53
Figura 46 - Dettaglio della discretizzazione: a) dominio 3D b) dominio 2D utilizzato nell'interfaccia Fracture Flow (Bersan et al., 2013) .....	54
Figura 47 - Evoluzione della massima velocità di uscita in funzione della larghezza del modello W nelle diverse fasi di sviluppo del piping (Vandenboer et al., 2015) .....	55
Figura 48 - Discretizzazione del dominio; si noti l'infittimento nell'area di interesse (Bonomi e Villa, 2006) .....	56
Figura 49 - Sezione del bacino di decantazione; in rosso sono indicate le celle con gradiente idraulico superiore al valore critico, perciò vulnerabili a fenomeni di piping (Bonomi e Villa, 2006) .....	57
Figura 50 - Evoluzione del piping all'interno del bacino di decantazione (Bonomi e Villa, 2006).....	58
Figura 51 - Geometria 2D del pendio.....	59
Figura 52 - Mesh del dominio 2D.....	60
Figura 53 - Dettaglio della mesh 2D.....	61
Figura 54 - Condizioni al contorno imposte ai confini del dominio .....	63
Figura 55 - Condizioni idrauliche al contorno .....	64
Figura 56 - Stato di sforzo verticale iniziale nel caso di pendio asciutto .....	65
Figura 57 - Stato di sforzo verticale nel caso di pendio asciutto (Fase 1).....	65
Figura 58 - Stato di sforzo verticale nel caso di pendio asciutto (Fase 2).....	66
Figura 59 - Stato di sforzo verticale nel caso di pendio asciutto (Fase 3).....	66
Figura 60 - Stato di sforzo orizzontale iniziale nel caso di pendio asciutto .....	67
Figura 61 - Stato di sforzo orizzontale nel caso di pendio asciutto (Fase 1).....	67

Figura 62 - Stato di sforzo orizzontale nel caso di pendio asciutto (Fase 2).....	68
Figura 63 - Stato di sforzo orizzontale nel caso di pendio asciutto (Fase 3).....	68
Figura 64 - Dettaglio delle deformazioni a taglio nel caso di pendio asciutto .....	69
Figura 65 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y nel caso di pendio asciutto.....	70
Figura 66 - Andamento delle pressioni iniziali in presenza di carichi idraulici costanti .....	71
Figura 67 - Velocità di filtrazione nel piano x-y.....	72
Figura 68 - Schema del procedimento utilizzato per lo svolgimento delle analisi numeriche .....	73
Figura 69 - Andamento del gradiente critico nella litozona C in assenza di ricarica .....	74
Figura 70 - Geometria del modello aggiornata sulla base dei risultati ottenuti dalla simulazione iniziale in assenza di ricarica superficiale.....	75
Figura 71 - Dettaglio delle deformazioni a taglio ottenute dalla prima analisi con materiale soggetto a piping.....	76
Figura 72 – Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuti dalla prima simulazione con materiale indebolito dal piping.....	76
Figura 73 - Distribuzione del gradiente idraulico critico in ciascuna simulazione.....	78
Figura 74 - Evoluzione della geometria del pendio con l'inserimento del materiale indebolito dal piping.....	79
Figura 75 - Deformazioni a taglio ottenute alla sesta analisi con materiale indebolito dal piping ...	80
Figura 76 - Variazione del fattore di sicurezza al progredire del piping nel dominio.....	80
Figura 77 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuta dalla sesta analisi con materiale indebolito dal piping .....	81
Figura 78 - Distribuzione delle pressioni iniziali con ricarica media autunnale e invernale.....	83
Figura 79 - Andamento dello zero piezometrico ottenuto dall'analisi iniziale con precipitazioni medie autunnali .....	84
Figura 80 - Distribuzione del gradiente critico all'interno della litozona B (immagine superiore) e della litozona C (immagine inferiore) nel caso di precipitazioni medie autunnali .....	85
Figura 81 - Deformazioni a taglio ottenute dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni medie autunnali .....	86
Figura 82 - Deformazioni a taglio ottenute dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni medie invernali.....	87
Figura 83 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuta dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni autunnali .....	88
Figura 84 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuta dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni invernali .....	88
Figura 85 - Distribuzione del gradiente critico all'interno della litozona B (immagine superiore) e della litozona C (immagine inferiore) ottenuta dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping nel caso di precipitazioni medie autunnali .....	90
Figura 86 - Dettaglio delle deformazioni a taglio ottenute dalla seconda analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni medie autunnali .....	91
Figura 87 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuta dalla seconda analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni autunnali .....	92
Figura 88 - Curve di probabilità pluviometrica relative al comune di Castelseprio.....	93

Figura 89 - Distribuzione delle pressioni iniziali con $Tr=2$ anni.....	95
Figura 90 - Distribuzione delle pressioni iniziali con $Tr=50$ anni.....	95
Figura 91 - Distribuzione delle pressioni iniziali con $Tr=200$ anni.....	96
Figura 92 - Andamento del gradiente critico all'interno della litozona C al variare del valore di ricarica superficiale .....	97
Figura 93 - Deformazioni a taglio ottenute dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno $Tr=2$ anni.....	98
Figura 94 - Deformazioni a taglio ottenute dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno $Tr=10$ anni.....	98
Figura 95 - Deformazioni a taglio ottenute dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno $Tr=50$ anni.....	99
Figura 96 - Deformazioni a taglio ottenute dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno $Tr=200$ anni.....	99
Figura 97 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuta dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno pari a 2 anni .....	100
Figura 98 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuta dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno pari a 50 anni.....	101
Figura 99 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuta dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno pari a 200 anni.....	101
Figura 100 - Andamento del gradiente idraulico ottenuto dal primo passo di analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno $Tr=2$ anni.....	103
Figura 101 - Geometria aggiornata sulla base dei risultati ottenuti dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno $Tr=2$ anni.....	103
Figura 102 - Andamento del gradiente idraulico ottenuto dal primo passo di analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno $Tr=200$ anni.....	104
Figura 103 - Geometria aggiornata sulla base dei risultati ottenuti dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno $Tr=200$ anni.....	104
Figura 104 - Deformazioni a taglio ottenute dalla seconda analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno $Tr=2$ anni .....	105
Figura 105 - Deformazioni a taglio ottenute dalla seconda analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno $Tr=200$ anni .....	106
Figura 106 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuta dalla seconda analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno pari a 2 anni .....	107
Figura 107 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuta dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno pari a 200 anni.....	107
Figura 108 - Andamento del fattore di sicurezza al variare dell'angolo d'attrito.....	109
Figura 109 - Andamento del fattore di sicurezza al variare della coesione.....	110
Figura 110 - Geometria del modello tridimensionale.....	112
Figura 111 - Mesh del modello tridimensionale .....	113
Figura 112 - Sforzi verticali nel modello tridimensionale .....	114
Figura 113 - Distribuzione delle pressioni neutre con alimentazione solo da monte .....	115
Figura 114 - Distribuzione delle deformazioni a taglio .....	116

Figura 115 - Spostamenti in direzione x nel modello tridimensionale .....	117
Figura 116 - Spostamenti in direzione y nel modello tridimensionale .....	117
Figura 117 - Spostamenti verticali in direzione z nel modello tridimensionale .....	118
Figura 118 - Distribuzione delle pressioni neutre nel caso di ricarica superficiale con tempo di ritorno pari a 200 anni .....	119
Figura 119 - Geometria del modello tridimensionale con materiale indebolito dal piping .....	120
Figura 120 - Distribuzione delle pressioni neutre con materiale indebolito dal piping .....	121
Figura 121 - Deformazioni a taglio ottenute dall'analisi con materiale indebolito dal piping .....	122
Figura 122 - Spostamenti in direzione x ottenuti dall'analisi con materiale indebolito dal piping .....	122
Figura 123 - Spostamenti in direzione y ottenuti dall'analisi con materiale indebolito dal piping .....	123
Figura 124 - Mappa dei percorsi che permettono l'accesso al sito e i collegamenti interni (De Finis et al., 2015) .....	124
Figura 125 - Carta di suscettibilità all'innesco (in alto) e carta della magnitudine (in basso) del sito archeologico di Castelseprio e delle aree circostanti .....	125
Figura 126 - Legame costitutivo elastico-lineare (fonte: Midas Manual).....	130
Figura 127 - Legame costitutivo elastico perfettamente-plastico (fonte: Midas Manual).....	131
Figura 128 - Legame costitutivo elastico non lineare (fonte: Midas Manual).....	131
Figura 129 - Legame costitutivo incrudente (fonte: Midas Manual) .....	132
Figura 130 - Legame costitutivo di Cam-Clay (fonte: Midas Manual) .....	132
Figura 131 - Schematizzazione di un ammasso roccioso fratturato (fonte: Midas manual).....	133
Figura 132 - Criterio di rottura alla Mohr-Coulomb.....	133
Figura 133 - Schema del funzionamento dell'analisi Construction Stage: a) situazione iniziale, b) forze che l'oggetto A esercita sull'oggetto B, c) forze che l'oggetto B esercita sull'oggetto A (fonte: Midas Manual) .....	134
Figura 134 - Metodo SRM: in alto) punto di Gauss di un elemento, in basso a sinistra) cerchio di Mohr associato allo stato di sforzo nel punto A, in basso a destra) cerchio di Mohr a rottura (fonte: Midas Manual) .....	136

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Litozone identificate all'interno dei depositi costituenti il terrazzo .....	39
Tabella 2 - Caratteristiche meccaniche e idrauliche dei materiali.....	62
Tabella 3 - Parametri del materiale soggetto a piping relativo alla litozona C.....	73
Tabella 4 - Precipitazioni medie mensili per ciascuna stagione .....	82
Tabella 5 - Parametri dei materiali soggetti a piping relativi alla litozona B .....	86
Tabella 6 - Parametri per il calcolo della curva di probabilità pluviometrica (Dati: ARPA Lombardia) .....	93
Tabella 7 - Dati di precipitazione relativi agli eventi critici con durata pari a 1 giorno al variare del tempo di ritorno.....	94
Tabella 8 - Valori del fattore di sicurezza ottenuti al variare dell'angolo d'attrito.....	108
Tabella 9 - Valori del fattore di sicurezza ottenuti al variare della coesione .....	110
Tabella 10 - Problematiche riscontrate nell'area in esame, con relativi interventi proposti per la messa in sicurezza.....	127

# 1. INTRODUZIONE

## 1.1. PREMESSA

L'eredità culturale di un paese costituisce una ricchezza insostituibile, ed è fondamentale per la comprensione dell'evoluzione umana e delle diversità culturali; questo è particolarmente vero in Italia, dove sono presenti testimonianze storiche di grande importanza che risalgono fino all'epoca Greca e Romana. Ne consegue che la tutela dei siti storici e archeologici è diventata, soprattutto negli anni più recenti, materia di grande interesse proprio per la rilevanza che questi rivestono all'interno del patrimonio culturale italiano.

I siti archeologici e i terreni circostanti sono frequentemente influenzati da fattori naturali quali, ad esempio, cambiamenti climatici o variazioni di carattere idrogeologico, ai quali si aggiungono effetti causati dalle attività umane: data l'importanza del tema l'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Educazione, la Scienza e la Cultura (UNESCO) incoraggia l'identificazione, la protezione e la preservazione dei patrimoni naturali e culturali in tutto il mondo.

Come riportato da Lollino e Audisio (2006), circa il 70% dei monumenti italiani inclusi nell'UNESCO World Heritage List è affetto da problemi di carattere geologico e geomorfologico, con particolare rilevanza per quanto riguarda fenomeni di frana e alluvioni. Queste osservazioni sono riprese da Canuti et al. (2009), che sottolineano come gran parte dei siti sia soggetta a più di un rischio, rendendo quindi indispensabile un approccio al problema di tipo interdisciplinare.

## 1.2. STATO DELL'ARTE

Data l'importanza della tematica, è possibile rintracciare vari studi compiuti per caratterizzare il rischio naturale nei siti archeologici al fine di salvaguardare la sicurezza degli stessi; per quanto riguarda i siti italiani, numerosi sono gli studi su aree del Centro Italia, che sono spesso affette nelle zone montuose da cinematismi di blocchi rocciosi (Canuti et al. 2000, D'Amato et al. 2006, Lollino e Audisio 2006).

Nella descrizione delle metodologie seguite da vari autori in questo ambito è frequente trovare, affiancati a metodologie classiche, l'impiego di nuove tecnologie che permettono un'analisi più approfondita e agevole del caso in esame, favorendo l'utilizzo di prove non distruttive, al fine di caratterizzare gli ammassi rocciosi coinvolti. Un esempio di questa procedura è lo studio condotto da Fanti et al. (2013) nel comune toscano di Pitigliano: come affermano gli autori, per supplire alle mancanze dei metodi di indagine tradizionale sono state impiegate anche tecniche di laser scanner terrestre (TLS). L'utilizzo di questa tecnologia ha permesso ottenere un modello dettagliato dell'area d'interesse, consentendo quindi di individuare con più precisione la presenza di discontinuità nell'ammasso roccioso e di valutare la probabilità di occorrenza di differenti meccanismi di instabilità. Un approccio simile è stato seguito da Margottini et al. (2015) in uno studio riguardante il monastero di Vardzia, in Georgia. Infatti, oltre alle indagini geotecniche sul campo per la



determinazione dei parametri geo-meccanici, gli autori hanno impiegato la tecnica del laser scanner terrestre per una ricostruzione accurata della topografia.

L'utilizzo combinato di queste tipologie di indagini ha portato alla definizione di sistemi di monitoraggio di vario genere; in alcuni studi (Coppola et al. 2006, Fanti et al. 2006) sono stati impiegati strumenti per il monitoraggio *in situ* delle aree interessate, come piezometri e inclinometri. Studi condotti negli ultimi anni hanno invece sottolineato come tecniche da remoto, quali telerilevamento da satellite e radar ad apertura sintetica (SAR), siano strumenti di grande efficacia e utilità per il monitoraggio delle aree interessate da fenomeni di instabilità (Tapete et al. 2012, Agapiou et al. 2015, Zhou et al. 2015).

### 1.3. DEFINIZIONE DEL PROBLEMA

Il presente caso di studio interessa una zona della Provincia di Varese comprendente il Parco Archeologico di Castelseprio (Comune Castelseprio), la Chiesa di Santa Maria Foris Portas (Comune Castelseprio) e il Monastero di Torba (Comune di Gornate Olona). Il parco archeologico è stato dichiarato Patrimonio dell'Umanità dall'UNESCO il 21 giugno 2011 e fa parte dei siti denominati "Centri di potere e culto nell'Italia Longobarda": questi comprendono le più importanti testimonianze monumentali longobarde esistenti sul territorio italiano, e si tratta di un insieme di beni di grande valore storico e culturale la cui datazione spazia dal VI all'VIII secolo (Figura 1).

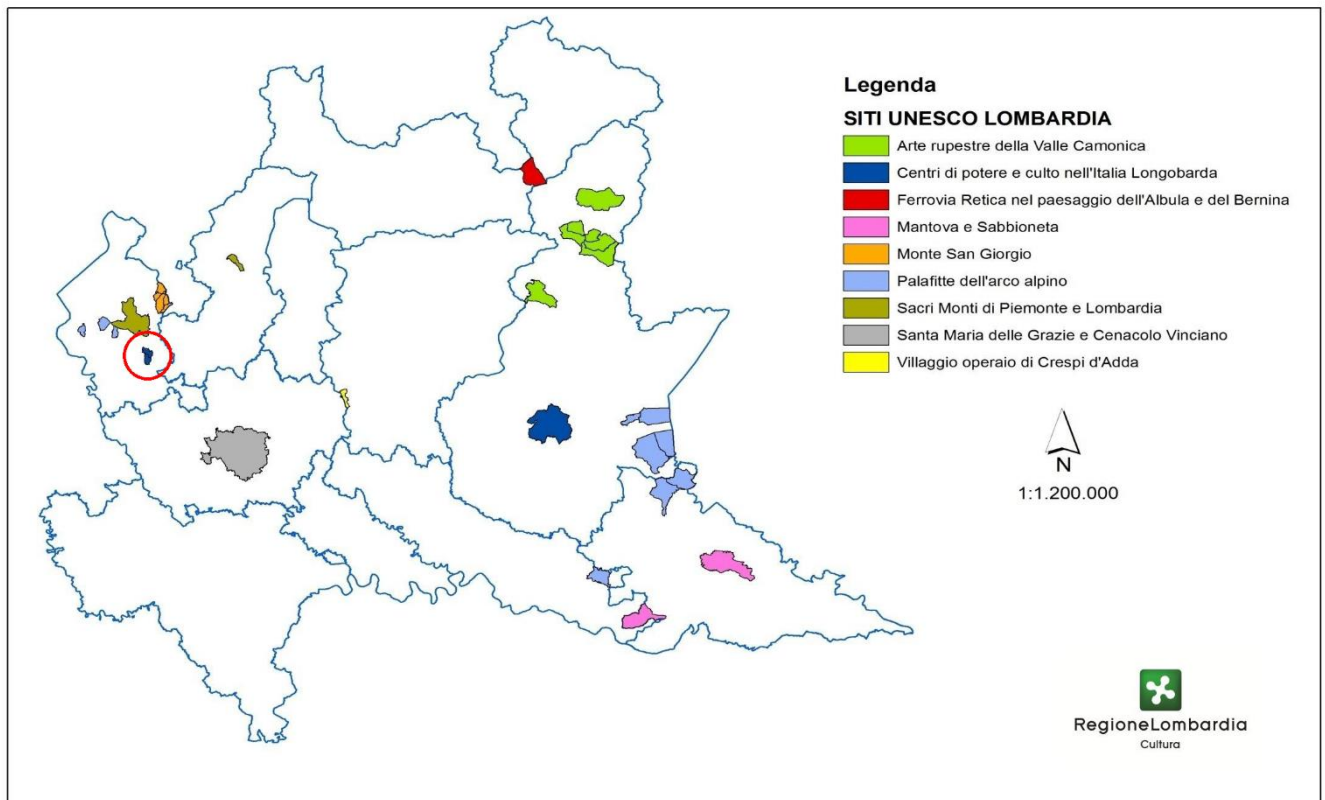


Figura 1 - Siti UNESCO in Lombardia; il Parco di Castelseprio è indicato dal cerchio rosso

Nonostante ciò, il sito archeologico risulta di difficile fruizione, anche a causa della presenza di problematiche di carattere geologico che potrebbero compromettere, nel lungo periodo, la sicurezza di una parte del sito stesso. In particolare, l'area risulta interessata da un fenomeno di erosione interna, conosciuto come *piping*: questo fenomeno è caratteristico dell'Alta Pianura Lombarda e può dare luogo a cavità e sprofondamenti del terreno, conosciuti localmente come "occhi pollini" (Strini, 2004). A causa dell'instabilità geologica dell'area in esame, l'accessibilità al sito archeologico risulta già compromessa, impedendo la percorrenza di alcuni dei sentieri di accesso agli scavi.

#### 1.4. OBIETTIVI E ORGANIZZAZIONE DELLO STUDIO

Il presente studio si concentra sull'analisi dell'evoluzione del *piping* all'interno dell'area di interesse, al fine di valutare il rischio derivante da possibili fenomeni di instabilità innescati dall'erosione interna, con specifico riferimento al pianalto su cui si trova il Parco Archeologico di Castelseprio. In questo modo sarà quindi possibile valutare l'effetto che tale fenomeno avrà nel lungo termine sulla sicurezza del sito e sulla sua fruibilità.

Per raggiungere gli obiettivi prefissati si procederà innanzitutto ad esaminare lo stato dell'arte procedendo in un secondo momento all'inquadramento dell'area di interesse, andando a valutare la componente geologica, geomorfologica e idrogeologica; l'obiettivo di questo passo è la costruzione di un modello concettuale che consenta di schematizzare le litozone coinvolte e le possibili instabilità che possono generarsi.

Per l'analisi delle condizioni di stabilità si procederà all'implementazione di un modello numerico: in un primo momento ci si concentrerà su simulazioni condotte su un modello bidimensionale, con lo scopo di individuare i possibili fenomeni di instabilità indotti dallo sviluppo del *piping* e valutare le ripercussioni della componente idrica sulla dinamica del versante. In seguito verrà implementato un modello tridimensionale che verrà utilizzato per lo svolgimento di analisi di stabilità, finalizzate all'individuazione delle aree a maggior pericolosità sulle quali agire per la messa in sicurezza del sito archeologico.

## 2. IL CASO DI STUDIO

### 2.1. DESCRIZIONE GENERALE DELL'AREA DI STUDIO

L'area in esame, mostrata in Figura 3 e Figura 4, è caratterizzata dalla presenza di un pianalto, inciso a ovest dal Torrente Tenore e ad est dal Fiume Olona (Figura 2), e appartiene alla fascia collinare morenica situata a valle dei rilievi montuosi prealpini; in particolare, la zona di studio è costituita da una parte del pianalto che si affaccia sulla media Valle Olona e dalle sue pendici. Le quote altimetriche vanno da un massimo di 360 m s.l.m. in corrispondenza della Chiesa di Santa Maria Foris Portas a un minimo di 260 m s.l.m. in corrispondenza del Monastero di Torba.

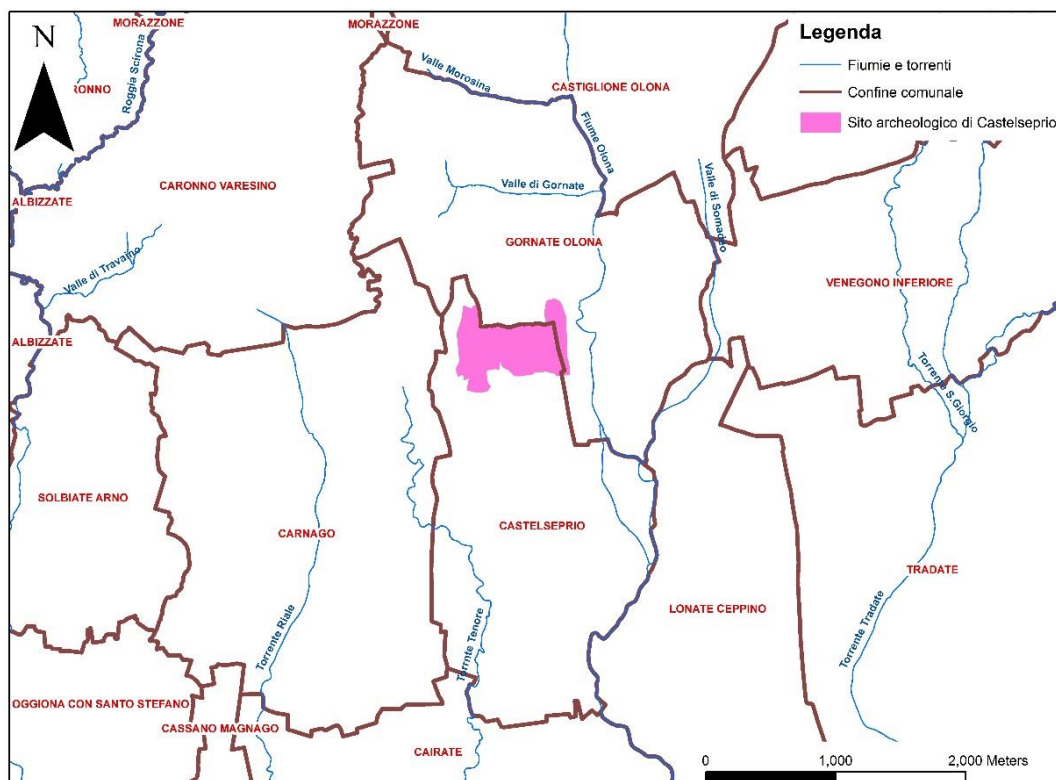


Figura 2 - Inquadramento geografico della zona di studio (Barozzi et al., 2015)

# Castrum con torre Torba e la chiesa di Santa Maria foris portas - I Longobardi in Italia

- I luoghi del potere (568-774 A.D.)

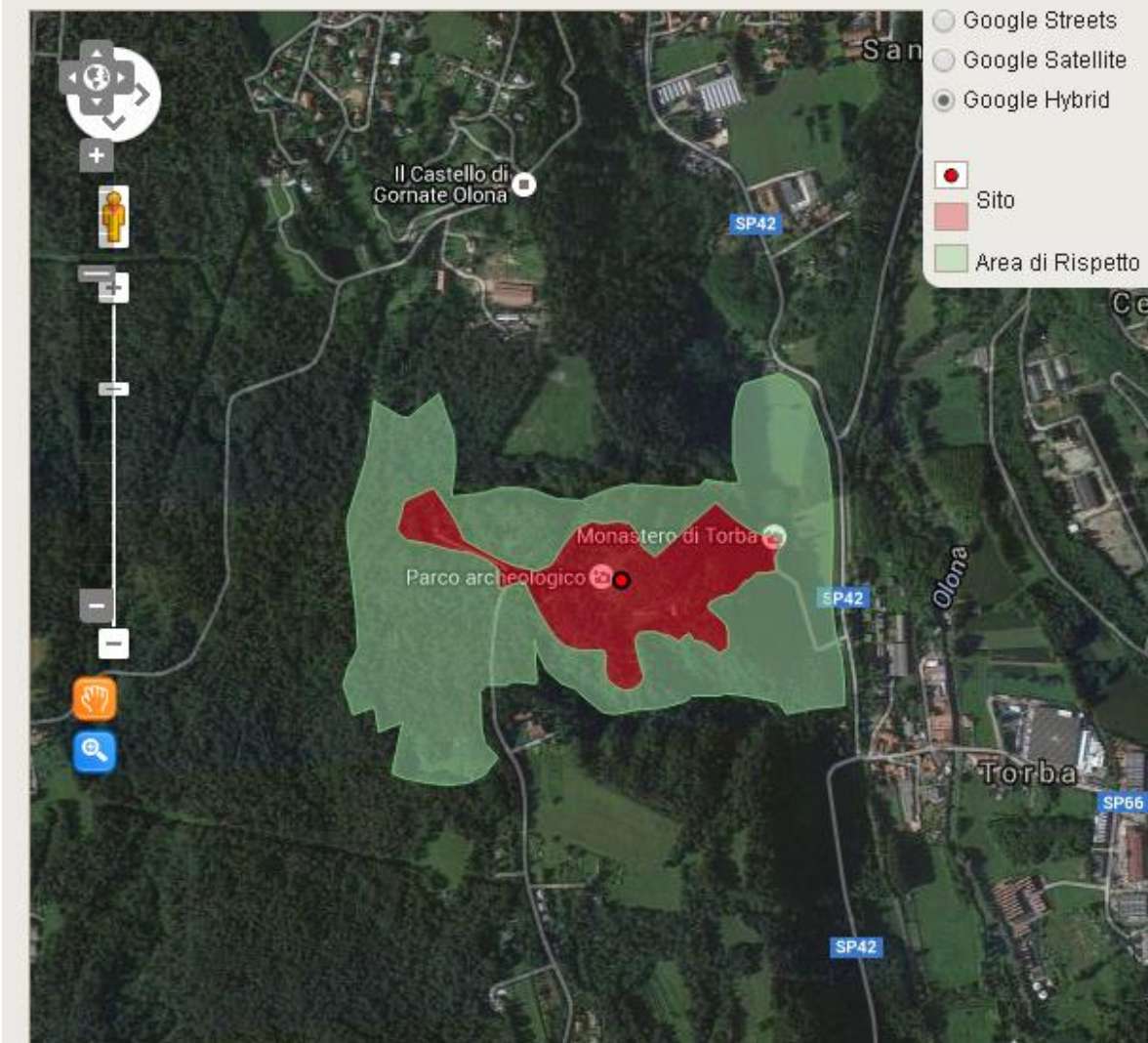


Figura 3 - Localizzazione del sito archeologico con la sua area di rispetto



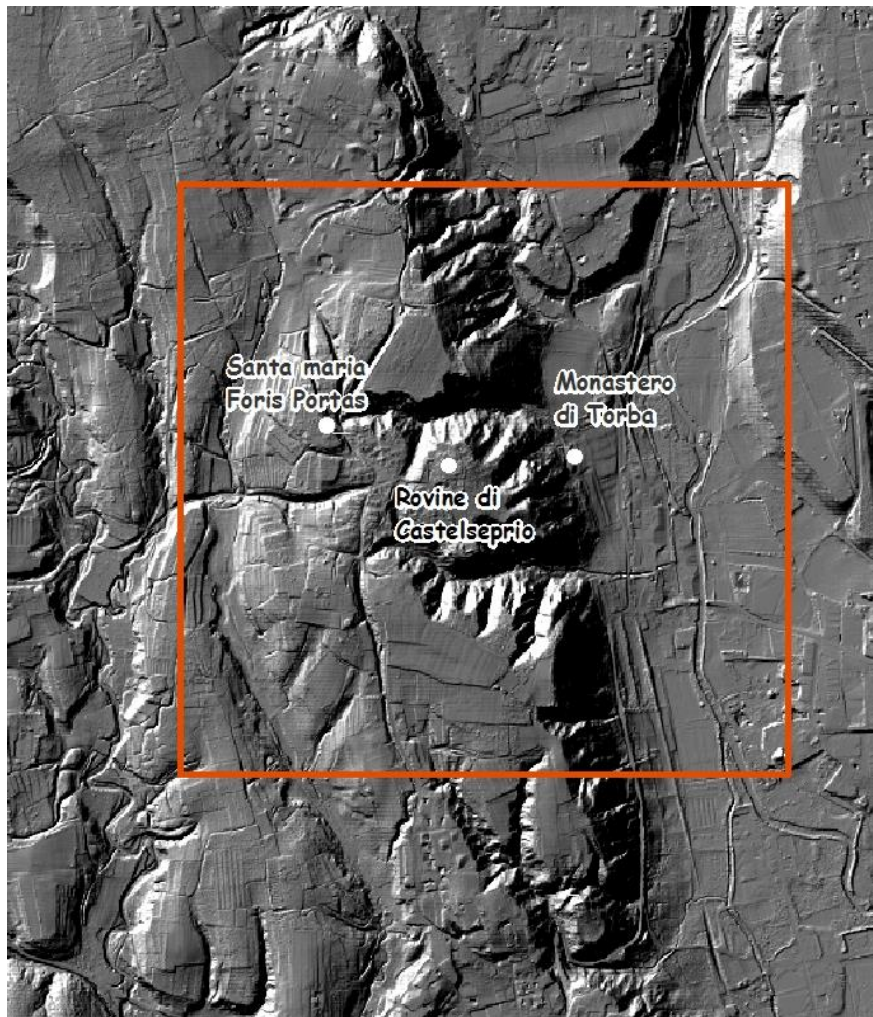


Figura 4 - Hillshade del pianalto su cui sorge il Parco Archeologico (Barozzi et al., 2015)

In generale, i pianalti sono stati il punto di convergenza dei fronti dei ghiacciai che scesero dal Lago Maggiore, da quello di Lugano e di Como, lasciando depositi morenici e fluvioglaciali (Figura 5). L'attuale morfologia del pianalto di Castelseprio è caratterizzata da un'area subpianeggiante, costituita da depositi glaciali e fluvioglaciali, sormontati da una coltre discontinua di materiali di origine eolica (loess). L'area di studio, in particolare, è caratterizzata da importanti spessori di depositi continentali sciolti, quali facies glaciali, fluvioglaciali e alluvionali, del periodo Quaternario che ricoprono estesamente un substrato roccioso Gonfolitico (Oligo-Miocene), costituito da depositi conglomeratico-arenacei.

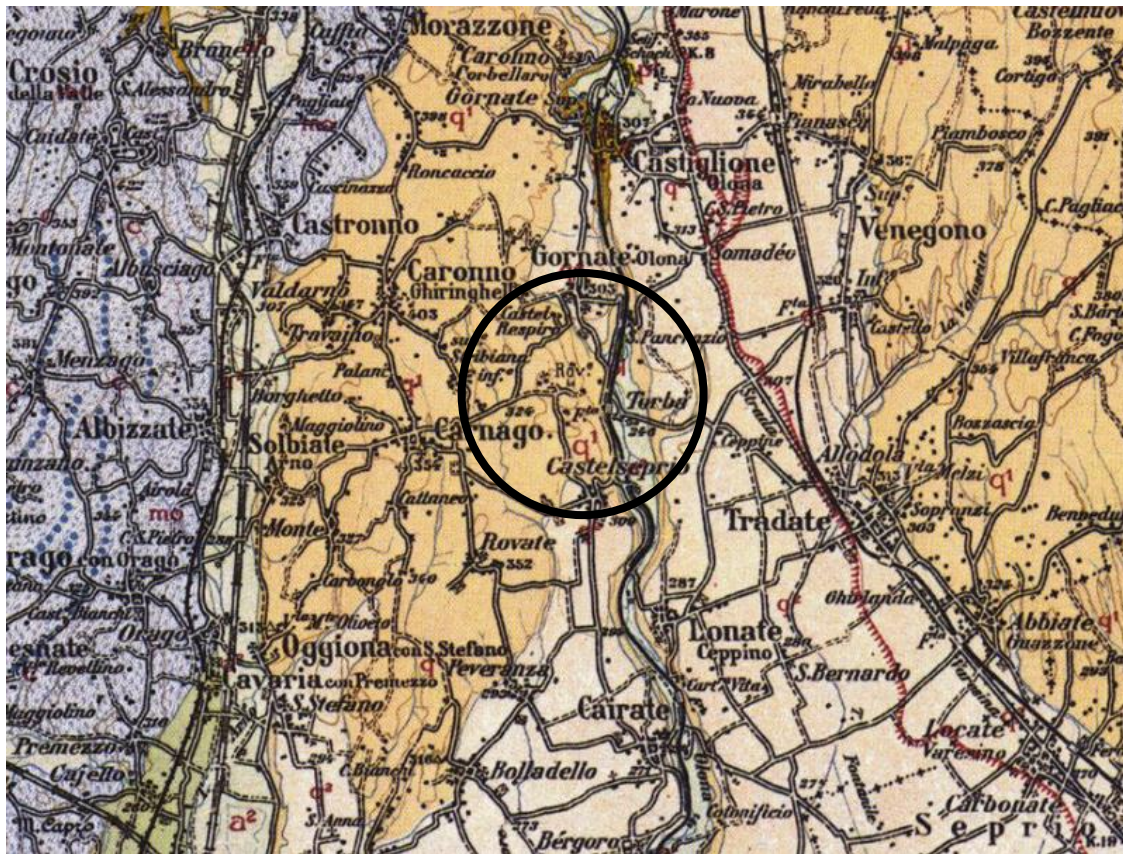


Figura 5 - Stralcio della Carta Geologica d'Italia (scala 1:100.000, Foglio n. 31) relativo all'area di studio, localizzata all'interno del cerchio nero

Legenda:  $a^2$  = alluvioni recenti,  $q^1$  = depositi fluvioglaciali antichi (ferrettizzati),  $q^2$  = depositi fluvioglaciali antichi (terrazzati),  $mo$  = depositi fluvioglaciali recenti.

La struttura idrogeologica dell'area appare fortemente condizionata dalla presenza di un substrato impermeabile posto a profondità comprese fra 10-30 m; si può ritenere quindi che la zona del pianalto sia molto ricca di acque sotterranee. Sebbene i dati dell'unico sondaggio disponibile nell'area di studio, realizzato fino a 15 m di profondità in prossimità di una cisterna (Figura 6), non evidenzino la presenza di acque sotterranee, non è comunque possibile escludere in termini assoluti la presenza di acque nell'area del Parco Archeologico, soprattutto alla luce delle osservazioni effettuate in studi precedenti in aree geologicamente del tutto simili. Infatti, alcuni studi precedenti (Francani, 1983) dimostrano che la copertura continentale, costituita da sedimenti di origine fluvioglaciale con litologie eterogenee (ghiaie e sabbie a supporto di matrice argillosa, da poco a profondamente alterate) può ospitare acquiferi a carattere sospeso, con ridotta potenzialità ed estensione laterale, e a moderata o ridotta soggiacenza. Tale mancanza di continuità nelle falde sospese caratterizza con ogni probabilità anche l'area di studio.

Per quanto riguarda le acque superficiali, lungo il versante orientale del pianalto (scarpata che congiunge il pianalto al fondovalle del Fiume Olona) esistono vari corsi d'acqua con regime idraulico torrentizio, caratterizzato da una variabilità molto marcata delle portate in funzione della stagionalità e dell'intensità delle precipitazioni, a causa delle modeste dimensioni dei bacini di alimentazione e all'assenza di significative sorgenti.





Figura 6 - Porzione del Parco Archeologico: vista su pozzo (in primo piano) e cisterna (in secondo piano)

Dal punto di vista della pericolosità geologica, sulla base di quanto riportato nel PGT di Castelseprio, una parte significativa della zona in esame è identificata dal PAI come potenzialmente instabile: si tratta dei ripidi versanti che degradano dal pianalto dove sorge il Parco Archeologico alla zona di fondovalle dell'Olona, dove sorge il Monastero di Torba. In particolare, tutto il bacino della Roggia Vallone viene identificato dal PAI come area con fenomeni franosi attivi. Inoltre, gli alvei delle Rogge Vallone e Malmonte risultano interessati da fenomeni di erosione fluviale, solo parzialmente ridotti dalle opere di protezione presenti (Figura 7).

L'area in esame si colloca inoltre all'interno di quella fascia dell'Alta Pianura Lombarda potenzialmente interessata dalla presenza di cavità (Strini, 2000), capaci di condizionare fortemente sia la circolazione idrica sia l'evoluzione geomorfologica dei versanti. A ciò si sommano le problematiche di tipo forestale: lo studio forestale della Valle del Malmonte (Nicoloso, 2012) evidenzia infatti che il ceduo invecchiato di robinia è in generale e avanzato stato di collasso, mentre il ribaltamento delle ceppaie può favorire l'innescò di fenomeni di instabilità della coltre superficiale di terreno.

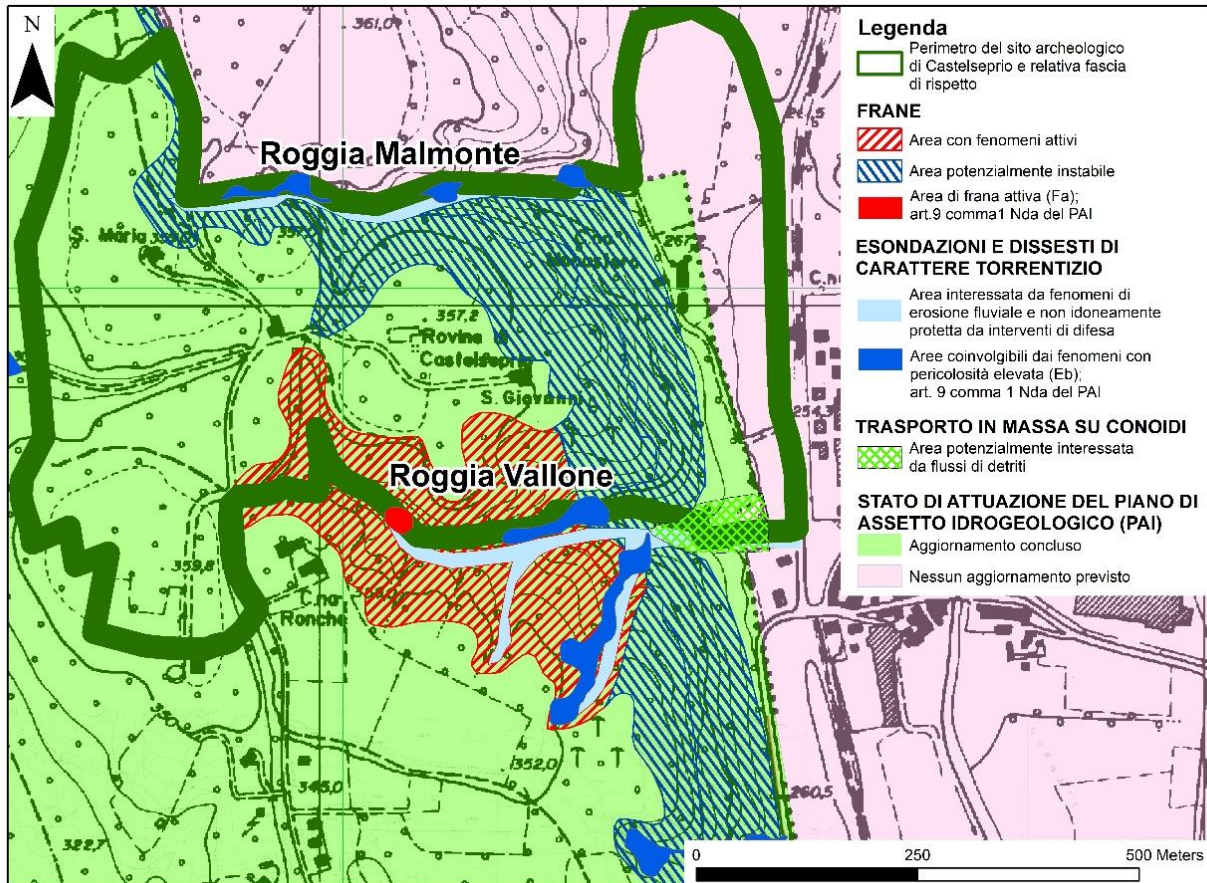


Figura 7 – Definizione dei fenomeni attivi e delle zone a rischio idrogeologico secondo il PAI (Barozzi et al., 2015)

## 2.2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il territorio di Castelseprio fa parte di un'area intercomunale agricolo-boschiva che possiede anche un vasto patrimonio storico, culturale e monumentale; tale territorio è caratterizzato dalla presenza di corpi terrazzati che bordano il fiume Olona, detti "pianalti", i quali sono responsabili di notevoli dislivelli. Il Comune di Castelseprio si colloca sul pianalto occidentale.

Dal punto di vista paleo-geografico l'area presenta interessanti peculiarità: nel corso degli ultimi due milioni di anni la zona fu il fronte di ghiacciai di ben 13 glaciazioni che hanno formato delle colline (morene) e dei grandi accumuli di sedimenti che, nei periodi a clima mite tra i grandi freddi delle glaciazioni, sono stati profondamente incisi dall'azione dei corsi d'acqua provenienti dalle Alpi; a questi si aggiunsero poi depositi di origine eolica (loess) che caratterizzano la parte sommitale di molte delle formazioni che si sono originate. Il risultato è che questi sedimenti oggi costituiscono estesi terrazzi sopraelevati rispetto all'attuale livello della pianura.

Il rilevamento geologico è stato condotto a partire dal quadro delle conoscenze fornito dagli studi precedenti, in particolare dai PGT dei comuni di Castelseprio e Gornate Olona. Come si può osservare nella Carta Geologica (Figura 11) nell'area in esame si identifica la seguente successione stratigrafica:



- **Gonfolite** (Go - Oligo-Miocene): non affiorante nell'area di rilievo, pertanto non è riportata sulla Carta Geologica, ma viene comunque descritta in quanto costituisce il substrato roccioso su cui poggiano sia i sedimenti marini (Argille di Castel di Sotto) che i depositi continentali quaternari più antichi (es. Ceppo dell'Olon). La Gonfolite è costituita da una successione arenaceo-conglomeratica. L'andamento di tale substrato appare, in base agli studi precedenti, piuttosto irregolare e localmente inciso da paleovalli.



Figura 8 - Affioramento di Gonfolite lungo la sponda sinistra dell'Olon in località Castiglione Olona, poco a Nord dell'area di studio (Barozzi et al., 2015)

- **Argille di Castel di Sotto** (ACS - Pliocene inferiore): non affioranti nell'area di studio, sono depositi marini presenti al di sotto dei depositi continentali di origine fluvioglaciale; litologicamente prevalgono le argille, con intercalazioni di sabbie e ghiaie.
- **Serie Pre-Ceppo** (PC – Pliocene superiore). La serie Pre-Ceppo comprende 3 unità litostratigrafiche di seguito riportate dalla più recente alla più antica:
  - *Formazione di Castelseprio;*
  - *Formazione di Cascina Monastero;*
  - *Formazione di Torba.*

Le tre unità sono state unificate nella carta geologica perché scarsamente affioranti nel territorio esaminato. Si tratta di una complessa successione di formazioni che si rinvengono in destra idrografica del Valle dell'Olon. Le formazioni sono costituite da depositi di origine fluviale.

Di seguito vengono riportate le descrizioni litologiche, tessiturali e petrografiche di ogni unità litostratigrafica.

- Formazione di Castelseprio: Questa unità è caratterizzata da depositi fluviali o fluvioglaciali costituiti da ghiaie stratificate e lenti di sabbia. I clasti carbonatici e alpini sono molto abbondanti mentre i clasti di origine metamorfica sono scarsi. I carbonati sono spesso argillificati mentre il grado di alterazione dei clasti vulcanici e metamorfici è praticamente assente. Cementazione localmente buona.
  - Formazione di Cascina Monastero: Questa unità è caratterizzata da depositi fluviali e si contraddistingue per le sequenze gradate di sabbie, ghiaie e limi. I clasti vulcanici sono molto abbondanti mentre i clasti carbonatici e i clasti metamorfici sono scarsi. Lo stato di alterazione è complessivamente basso o assente. Il grado di cementazione è praticamente nullo.
  - Formazione di Torba: Questa unità è caratterizzata da depositi di origine fluviale costituiti da un'alternanza di sabbie e ghiaia. I clasti di origine carbonatica e vulcanica sono molto scarsi mentre i clasti di origine metamorfica sono molto abbondanti fino a raggiungere l'80% della composizione petrografica. I clasti metamorfici sono spesso ridotti a sabbia, mentre i clasti carbonatici sono completamente argillificati. La cementazione è localmente presente.
- **Ceppo dell'Olona** (CO - Pleistocene inferiore): affiorante lungo la scarpata della Valle Olona, si tratta di un conglomerato di origine alluvionale, costituito da ciottoli, ghiaie e sabbie con una cementazione da debole a buona; la compattezza è talvolta sufficientemente elevata da permettere di autosostenersi, laddove emerge, in pareti verticali. I clasti sono da arrotondati a subarrotondati e presentano un basso grado di alterazione (Figura 9). Nel loro insieme il Ceppo dell'Olona e la Formazione di Castronno costituiscono un unico corpo sedimentario di notevole potenza (alcune decine di metri).





Figura 9 - Affioramento di Ceppo dell'Oloni a monte del Monastero di Torba (Barozzi et al., 2015)

- **Formazione di Castronno** (Cs – Pleistocene inferiore): affiorante lungo il terrazzo sul quale sorgono le antiche Rovine, tale unità è caratterizzata da depositi di origine fluvioglaciale (Mindel, Auct.) costituiti da ghiaie e sabbie a supporto di matrice, fortemente alterate, coperte da uno spessore superiore a 2 m di coltre loessica. Tali depositi si presentano privi di cementazione e con un elevato grado di alterazione (Ferretto): i clasti carbonatici sono quasi completamente argillificati, mentre quelli vulcanici e metamorfici sono ridotti a sabbia (Figura 10).



Figura 10 - Formazione di Castronno (Barozzi et al., 2015)

- **Allogruppo di Morazzone (Mo).** I depositi di questa unità sono distribuiti nel settore occidentale del territorio di Castelseprio e lungo l'alveo della Roggia Rile. Si tratta di depositi di origine fluviale e fluvioglaciali (Gunz-Mindel Auct.) costituiti prevalentemente da diamicton, sabbie e ghiaie coperti in superficie da un livello loessico di spessore variabile fino a 3 m. L'Allogruppo di Morazzone è suddiviso in 4 unità di rango minore che presentano caratteristiche litologiche e tessiturali simili e i cui rapporti stratigrafici e geometrici sono di difficile individuazione. Le caratteristiche tessiturali e petrografiche possono essere così sintetizzate: clasti carbonatici, vulcanici e metamorfici presenti con grado di alterazione molto spinta (fino al 90%); presenza di copertura loessica superficiale.
- **Alloformazione di Cantù (Ca - Pleistocene superiore) e Allogruppo di Besnate (Be – Pleistocene superiore):** l'Alloformazione di Cantù è costituita dai depositi corrispondenti allo LGM (Ultimo Massimo Glaciale) e copre in discordanza i depositi di tutte le unità più antiche. Essa affiora lungo il terrazzo inferiore (quota media 265-270 m s.l.m.) che ospita il Monastero di Torba, mentre il più antico Allogruppo di Besnate affiora sul terrazzo intermedio ad una quota media di 290-300 m s.l.m. al di fuori dell'area di interesse. Entrambi sono costituiti da ghiaie prevalenti con intercalazioni sabbiose; i clasti sono poligenici (carbonatici, esotici alpini, e vulcanici) e si presentano da privi di alterazione a debolmente alterati o con patine di ossidazione; la percentuale dei clasti alterati varia in genere dal 10% a circa il 30%.

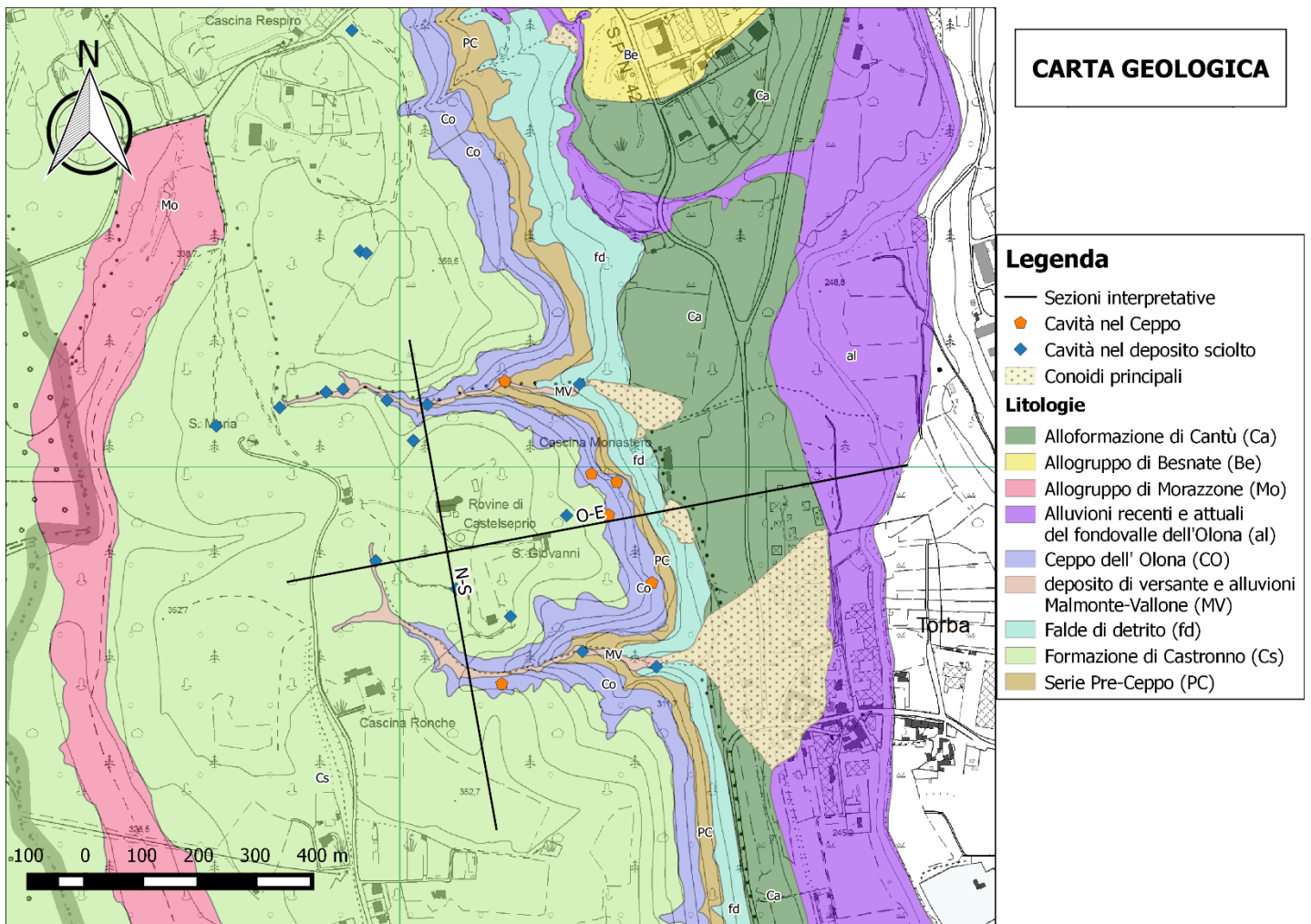


Figura 11 - Carta Geologica

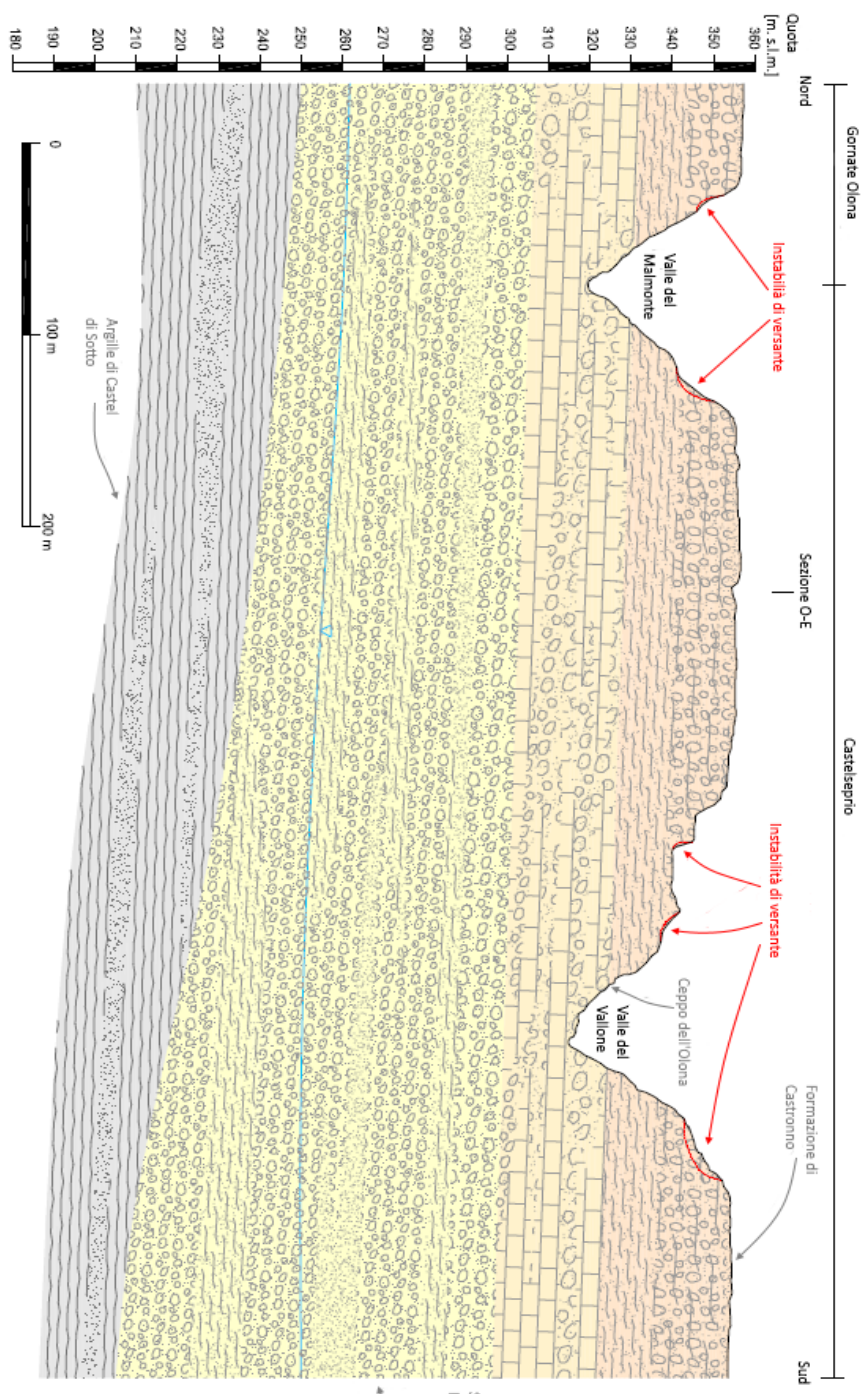
A parziale copertura delle formazioni sopra descritte si rinveno i sedimenti quaternari riportati di seguito:

- Alluvioni recenti e attuali del fondovalle dell'Olona: sono depositi a prevalente composizione grossolana, gradati ed organizzati, costituiti da sabbie, ghiaie e ciottoli di dimensioni massime anche superiori a 50 centimetri in lenti o livelli, talvolta con intercalazioni limoso-sabbiose-argillose o livelli torbosi (zone umide e/o aree di esondazione anche occasionali)
- Falde di detrito: si rinveno alla base dei terrazzi ricoprendo parzialmente alcune litologie descritte precedentemente. Sono costituite da blocchi e ciottoli poco classati e talora cementati
- Depositi di versante, alluvioni e conoidi di deiezione delle rogge Malmonte e Vallone: sono depositi di blocchi aventi dimensioni estremamente variabili, da pochi centimetri ad alcuni metri cubi. Derivano sia dal trasporto fluviale che da fenomeni di colamento (debris flow), che dal distacco di blocchi presenti sui versanti vallivi.



Nell'area di studio sono state eseguite due sezioni geologiche interpretative aventi direzione N-S (da Gornate Olona a Castelseprio) ed O-E (da Castelseprio a Torba); tali sezioni sono state realizzate a partire dalle osservazioni effettuate sul terreno e da dati stratigrafici di pozzi e sondaggi e da prove penetrometriche eseguiti nei territori circostanti l'area di indagine.

- **Sezione ad andamento N-S** (Figura 12): tale sezione mostra il terrazzo, su cui si trova il Parco Archeologico, inciso profondamente dai Rii Malmonte e Vallone. Esso è costituito dalla Formazione di Castronno (ghiaie e sabbie a supporto di matrice, fortemente alterate, coperte da uno spessore superiore a 2 m di coltre loessica). Lo spessore di tale Formazione è di circa 30 metri. Nelle incisioni dei Rii Vallone e Malmonte affiora invece il Ceppo dell'Olona che, nell'area di studio, ha uno spessore medio di circa 20 metri. Al disotto del Ceppo si rinviene la Serie denominata Pre-Ceppo, che ha uno spessore medio di circa 60 m, a cui segue la Formazione delle Argille di Castel di Sotto e che costituisce il substrato impermeabile. E' interessante notare che in corrispondenza delle incisioni vallivi e delle variazioni di pendenza de versanti si rinvergono numerosi fenomeni di instabilità.
- **Sezione ad andamento O-E** (Figura 13): anche in questa seconda sezione si rinvergono le Formazioni descritte in precedenza, ovvero: la Formazione di Castronno, che costituisce il terrazzo su cui si trova il Parco archeologico, il Ceppo dell'Olona e la Serie del Pre-Ceppo. In corrispondenza della località Torba affiora, invece, l'Alloformazione di Cantù, che degrada verso le alluvioni del Fiume Olona. Ad una profondità variabile tra i 240 e i 230 m s.l.m. sono presenti le Argille di Castel di Sotto. Anche in questa sezione sono visibili i fenomeni di instabilità localizzati lungo il versante orientale del terrazzo di Castelseprio.



**Sezione N-S**

<b>LEGENDA GEOLOGICA:</b>	
	Formazione di Castronno
	Ceppo dell'Olona
	Serie Pre-Cappo
	Argille di Castel di Sulo
<b>LEGENDA IDROGEOLOGICA:</b>	
	Argille
	Sabbie
	Ghiale
	Livello piezometrico

Figura 12 - Sezione interpretativa con andamento Nord-Sud (modificata da Barozzi et al., 2015)

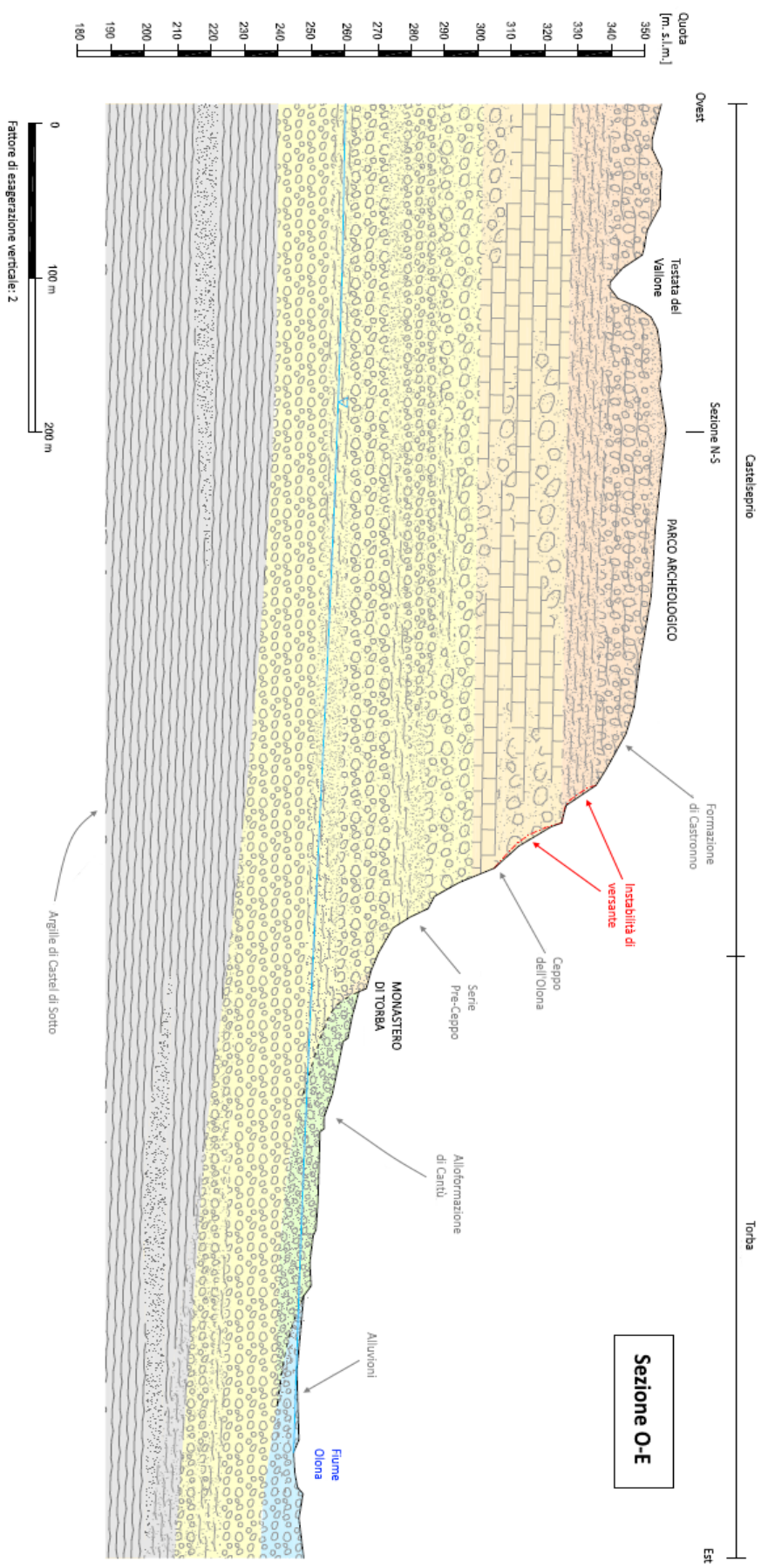


Figura 13 - Sezione interpretativa con andamento Ovest-Est (modificata da Barozzi et al., 2015)



In entrambe le sezioni viene riportata la superficie piezometrica, che si attesta a circa 90 m dal piano campagna del terrazzo di Castelseprio (corrispondenti a 260 m s.l.m.). Nella Sezione O-E si osserva che la superficie piezometrica si raccorda al Fiume Olona e si attesta ad una profondità variabile tra i 2 e i 3 metri.

Durante l'esecuzione delle sezioni idrogeologiche è stata rilevata una certa discontinuità orizzontale dei depositi, testimoniata da una non correlabilità tra dati stratigrafici di pozzi poco distanti. Una possibile spiegazione di questa non correlabilità è stata fornita da Zuccoli (2010) che, nei lavori svolti sull'area in esame, ha verificato la presenza di paleovalle formatesi per il lavoro di erosione di corsi d'acqua importanti derivanti dallo scioglimento dei ghiacciai creatisi più a nord (Figura 14).

In particolare le paleovalle ricostruite possono essere state create dal cambiamento dell'alveo del Fiume Olona, in seguito ad un sollevamento tettonico generalizzato.

La prima paleovalle riconosciuta è quella definita come Paleovalle A, la quale è stata riempita dalla Serie Pre-Ceppo formata da depositi fluviali e fluvio-glaciali. La Paleovalle B, invece risale al periodo successivo alla successione di glaciazioni, che regolarmente hanno raggiunto l'area edificando l'anfiteatro attualmente visibile.

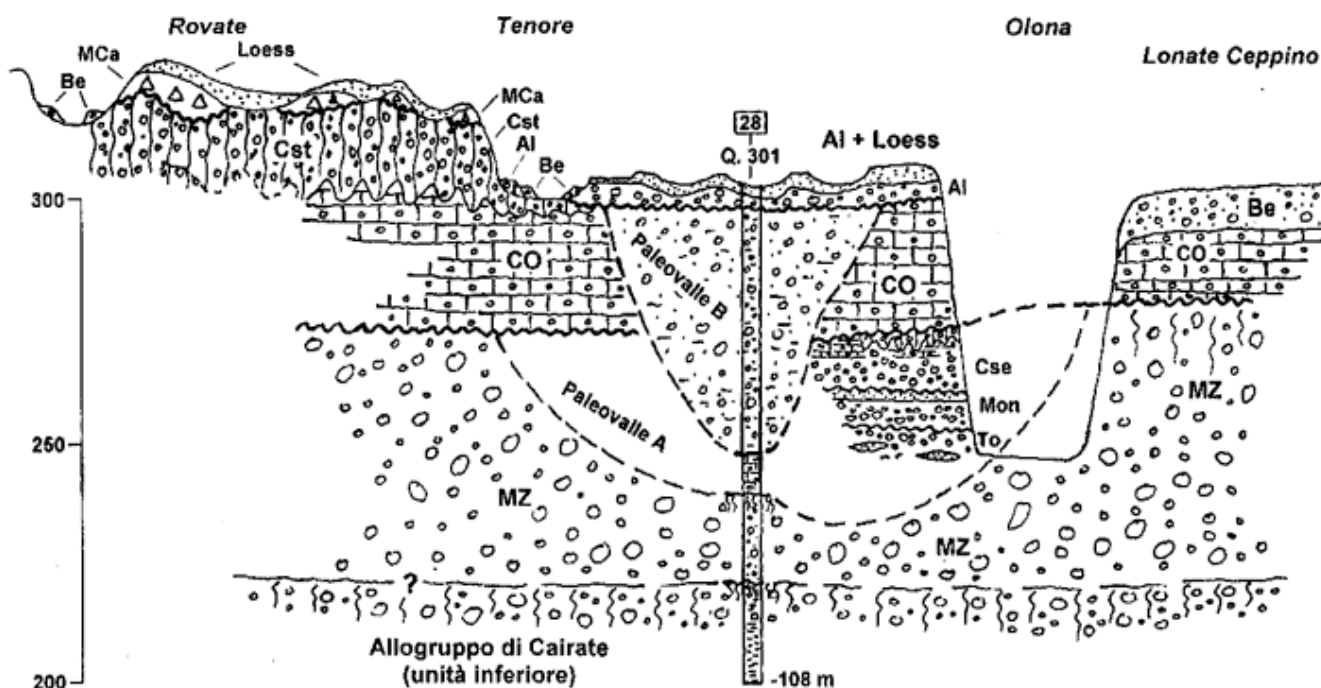


Figura 14 - Sezione della Valle dell'Olona (Zuccoli, 2010)

LEGENDA: • Be: Allogruppo di Besnate i. • Mca: Unità di Carnago • Cst: Formazione di Castronno • Al: All. di Albizzate • MZ: Formazione di Molino Zacchetto. • CO: Ceppo dell'Olona • Cse: Formazione di Castelseprio • Mon: Formazione di Cascina M. • To: Formazione di Torba

### 2.3. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

Il profilo idrogeologico dell'area è stato ricostruito sulla base dei dati ricavati dalle stratigrafie dei pozzi e dalla carta idrogeologica del PMIP di Varese: la direzione di flusso risulta generalmente orientata verso SE, con gradiente di circa 0,7 %. La quota piezometrica misurata nei pozzi di Castelseprio è intorno ai 250 m s.l.m.. Considerato il gradiente piezometrico medio, nell'area di studio (posta circa 1,5 km a monte idrogeologico) la quota piezometrica è stimata intorno ai 260 m s.l.m., corrispondente ad una soggiacenza dell'ordine di 90 m dal piano campagna del terrazzo. Nella valle del fiume Olona, la falda è invece superficiale e si raccorda con il fiume stesso, con soggiacenza compresa tra i 2 e 3 m.

La definizione dell'idrostratigrafia dell'area di studio si basa sull'analisi contenuta nel PGT di Castelseprio (2013), nel quale vengono utilizzate due sezioni idrogeologiche, rispettivamente orientate N-S e E-W, le cui tracce sono riportate sulla tavola idrogeologica.

A partire dal basso stratigrafico sono state riconosciute le seguenti unità idrostratigrafiche:

#### - **UNITÀ DELLE ARGILLE PREVALENTI**

Rappresenta la base impermeabile dell'unità acquifera superiore. E' costituita da depositi a granulometria fine (limi, argille) con rare intercalazioni sabbiose. Sebbene tale unità non affiori nell'area di Castelseprio, segni della sua presenza sono alcune sorgenti libere rinvenute nella zona di raccordo tra i pianalti e la piana dell'Olona generata per soglia di permeabilità sottoposta.

#### - **UNITÀ DELLE GHIAIE E GHIAIE LIMOSE**

E' costituita da sedimenti di varia natura, in genere granulari (da limi a ghiaie sciolte con sabbia); frequentemente il deposito è a supporto di matrice fine, ma sono presenti livelli a supporto clastico. L'unità costituisce l'acquifero principale di tipo libero o semiconfinato, di spessore fortemente variabile in quanto i limiti stratigrafici superiore e inferiore sono erosionali.

#### - **UNITÀ A CONGLOMERATI BASALI**

La base di tale unità è identificabile dal conglomerato del Ceppo che si estende in modo discontinuo lungo l'intero pianalto su cui sorge il Comune di Castelseprio. Essa è costituita da clasti di varia natura in abbondante matrice limosa e per questo non dà luogo a falda sfruttabile dal punto di vista idropotabile.

La parte sommitale dell'unità è costituita da depositi a granulometria fine (loess) e da suoli profondamente alterati e argillificati ("ferretto"), aventi spessori considerevoli soprattutto nelle zone dei rilievi collinari (fino a 10 m). Questi depositi possono ospitare piccole falde sospese.

#### - UNITÀ DELL'OLONA

E' costituita dai sedimenti granulari (ghiaia, sabbia e ciottoli) di natura alluvionale presenti nel fondovalle dell'Olon. L'unità dell'Olon, rispetto alle unità precedenti, si è depositata successivamente alle unità delle ghiaie e ghiaie limose. L'unità presenta uno spessore variabile da 10 a 30 m di profondità ed è stata raggiunta dai pozzi presenti nel fondovalle.

Nell'area di studio è quindi possibile identificare un acquifero principale, contenuto nei depositi fluvioglaciali più profondi (prevalentemente ghiaie limose) e poggiate sulle sottostanti Argille. A quote più elevate anche i conglomerati del Ceppo, nelle porzioni poco cementate o in quelle fratturate (Figura 15), possono ospitare una circolazione idrica significativa, andando quindi a costituire il cosiddetto secondo acquifero, con valori della conducibilità idraulica dell'ordine dei  $10^{-5}$  m/s o superiori. Alla circolazione idrica all'interno del Ceppo contribuisce anche la presenza di cavità diffusamente distribuite sia sul versante orientale che all'interno delle valli. Tali cavità si impostano spesso in corrispondenza dei contatti tra gli orizzonti più cementati e quelli meno cementati.



Figura 15 - Cavità nel Ceppo (Barozzi et al., 2015)

Entrambi gli acquiferi risultano essere, in base alle stratigrafie dei pozzi e ai dati sulle portate degli stessi, dotati di una conducibilità idraulica buona.

Inoltre, la copertura continentale costituita da sedimenti di origine fluvioglaciale con litologie eterogenee (ghiaie e sabbie a supporto di matrice argillosa, da poco a profondamente alterate) può ospitare acquiferi a carattere sospeso con ridotta potenzialità ed estensione laterale e a moderata o ridotta soggiacenza.

Il territorio Castelseprio possiede, nel settore dei pianalti, una copertura a granulometria fine che, nei primi metri, ha una componente argillosa importante. Nell'area della valle Olona invece la zona

non satura è costituita prevalentemente da sedimenti ghiaioso-sabbiosi. Si hanno quindi due tipologie di terreni con comportamenti differenti:

- I terreni dei pianalti che presentano un drenaggio difficoltoso e una permeabilità bassa;
- I terreni della valle Olona che si possono considerare dotati di buona permeabilità e drenanti.

Inoltre, depositi più superficiali del pianalto presentano lenti di spessori variabile da qualche decimetro fino a 2-3 m a diversa granulometria e permeabilità. Studi precedenti condotti in aree limitrofe (Francani, 1983) hanno evidenziato che le lenti sono costituite da limi, sabbie e ciottoli più o meno profondamente alterati, fino al livello di limi e argille rossastre situato a 4-6 m dal piano campagna. Tale livello, sostanzialmente impermeabile, funge da substrato per piccole falde locali.

Una struttura idrogeologica di questo tipo favorisce la formazione di falde sospese, che presentano piezometrie proprie, quasi mai correlabili tra loro, talora alimentanti piccole sorgenti il cui regime risulta fortemente correlato agli eventi meteorici. Infatti, nei depositi più superficiali, l'abbondanza di vuoti intercomunicanti sviluppatasi sia per piping che per effetto della vegetazione facilita l'infiltrazione delle acque meteoriche e quindi l'alimentazione delle falde sospese.

Sul pianalto, essendo l'acclività generalmente bassa, si osservano locali anomalie concentrazioni di acque nelle porzioni depresse, con fenomeni di ristagno prolungato; tali ristagni, sia naturali (Figura 16) che di origine antropica, sono particolarmente diffusi sul terrazzo di Gornate Olona, che presenta caratteristiche geologiche e idrogeologiche del tutto analoghe a quelle presenti nella zona del Parco Archeologico.



Figura 16 - Ristagno d'acqua naturale (Barozzi et al., 2015)



In quest'ultima area la presenza di locali opere per la canalizzazione e il drenaggio delle acque fa sì che non ci siano evidenti fenomeni di ristagno. Forti evidenze in tal senso sono state riscontrate sulla porzione di pavimentazione originale della Chiesa di Santa Maria Foris Portas dove, in occasione di precipitazioni meteoriche particolarmente intense si osservano macchie di umidità.

La morfologia dei paleocanali rinvenuti lungo la zona occidentale del terrazzo evidenzia una direzione di deflusso delle acque prevalentemente Nord-Sud. Allineamenti simili si riscontrano nelle valli secondarie delle Rogge Vallone e Malmonte.



Figura 17 - Esempio di frattura che favorisce la circolazione dell'acqua (Barozzi et al., 2015)

Inoltre, facendo riferimento ai dati riportati nel PGT di Gornate Olona (2014), è possibile procedere ad una suddivisione dei terreni in base ai valori di permeabilità sub-superficiale:

- TERRENI A PERMEABILITÀ DA MEDIA AD ALTA: comprende i depositi alluvionali da recenti ad attuali costituiti in prevalenza da ciottoli, ghiaie e sabbie, con limi in percentuali variabili; zone di aerazione di pochi metri. Sono stati stimati valori di permeabilità compresi fra 10-1 e 10-3 cm/sec, e grado di vulnerabilità verticale della falda da alto ad elevato (1 anno–1 giorno). Si ha una probabile riduzione della permeabilità nel settore meridionale, per la presenza di depositi fini.
- TERRENI A PERMEABILITÀ DA MEDIA A BASSA: comprende i depositi fluvio-glaciali terrazzati (soprattutto del Wurm) costituiti da ciottoli, ghiaie e sabbie con rare lenti limoso-argillose; in questo caso si sono stimati valori della permeabilità compresi fra 10-1 e 10-5 cm/sec, spessore della zona di aerazione generalmente superiore ai 40 m e grado di vulnerabilità verticale della falda da media a bassa (1-20 anni).

- **TERRENI A PERMEABILITÀ BASSA:** in questa classe sono compresi i depositi morenici, fluvio-glaciali ed eluviali (Mindel). La permeabilità è stimata come generalmente inferiore ai 10-6 cm/sec, con una vulnerabilità verticale da molto bassa a nulla, grazie anche alla presenza di un forte cappellaccio di materiale alterato impermeabile (ferretto). Lo strato di areazione ha spessori molto rilevanti, ed è stato valutato come superiore ai 70 m. da p.c..
- **TERRENI A PERMEABILITÀ SECONDARIA:** è la classe che raggruppa tutti gli ammassi rocciosi presenti, costituiti esclusivamente da conglomerati a diverso grado di cementazione (Ceppo dell'Olona e Gonfolite), con valori della permeabilità che variano a seconda delle caratteristiche di cementazione e tettoniche degli ammassi, e valutati in un range molto variabile (da 1 m/s ad impermeabile, ma generalmente discrete). Per le caratteristiche di questa unità si ritiene che il grado di vulnerabilità verticale della falda nei livelli superiori vari fra valori elevati e valori molto bassi.

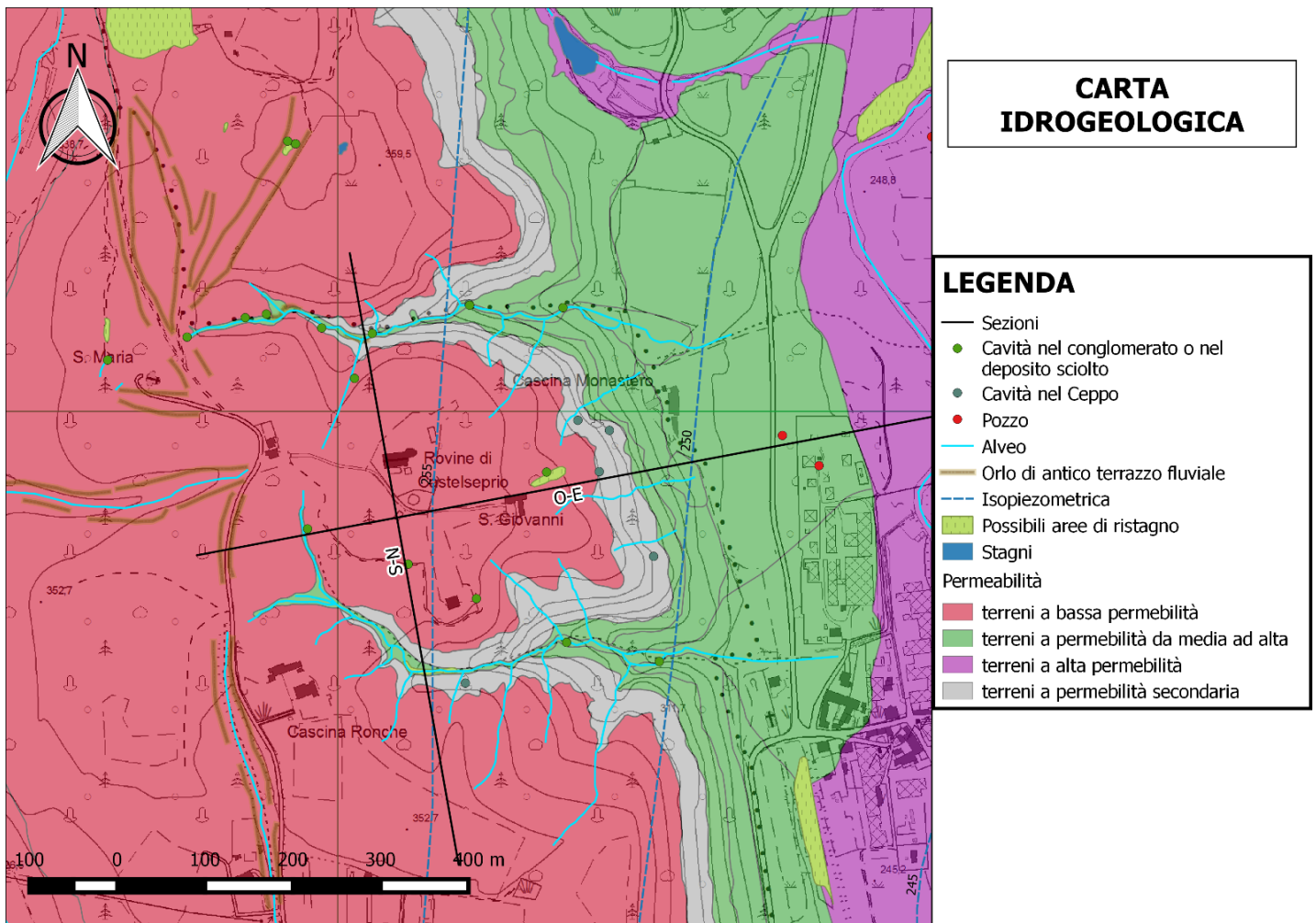


Figura 18 - Carta idrogeologica

#### 2.4. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Come già anticipato, il territorio comunale di Castelseprio è suddiviso, dal punto di vista geomorfologico, in due pianalti incisi a ovest dal Torrente Tenore e ad est dal Fiume Olona. In particolare, l'area di studio si localizza prevalentemente sul terrazzo in destra idrografica rispetto alla Valle Olona, posto a una quota di circa 350 m s.l.m..

La superficie del terrazzo ha un'estensione di circa 0.1 km<sup>2</sup> ed è delimitata da una scarpata morfologica caratterizzata da elevati valori di acclività, in particolare verso est, dove degrada verso l'alveo dell'Olona. Il versante che degrada verso ovest risulta decisamente meno acclive e si presenta caratterizzato da diffusi ed estesi terrazzamenti. Sono inoltre presenti orli di terrazzi fluviali, aventi direzione prevalentemente Nord-Sud ed Est-Ovest, che spesso sottendono aree in erosione accelerata.



Figura 19 - Esempio di erosione accelerate (Barozzi et al., 2015)

L'area di studio, come evidenziato in più punti nel PGT del Comune di Castelseprio (2013), è caratterizzata dalla presenza di diversi fenomeni di dissesto. Nell'ambito del presente studio sono stati acquisiti i dissesti già censiti e cartografati nei due PGT di interesse, il suddetto relativo a Castelseprio (2013) e quello di Gornate Olona (2014); il censimento è poi stato aggiornato sulla base



dei rilievi in sito “ad hoc”. Il quadro complessivo che ne deriva descrive una situazione di generale e diffusa instabilità.

Il settore orientale di entrambi i pianalti è caratterizzato da una scarpata con pendenze anche superiori ai 20° (con dislivelli tra i 40 e i 50 m), in cui si impostano diversi corsi d’acqua che incidono il versante provocando un’erosione continua e, in alcuni casi, fenomeni di distacco e crollo, con presenza di massi in alveo. Si registrano inoltre fenomeni di erosione accelerata, seppure non direttamente connessi al passaggio dei corsi d’acqua, in particolare a ridosso del versante sud dell’area archeologica, nella quale tale fenomeno attivo di erosione crea l’instabilità del versante stesso con l’istaurarsi di cedimenti e asportazione di terreno in corrispondenza del limite meridionale dell’area Archeologica.

Dai rilievi svolti è stato possibile riscontrare una situazione di instabilità diffusa lungo i due impluvi principali che delimitano il terrazzo: la Valle del Malmonte a Nord e quella del Vallone a Sud. Il rilievi sul terreno hanno evidenziato in entrambi gli impluvi la presenza di nicchie di frana e di erosione (Figura 20), nonché arretramenti del ciglio del terrazzo che hanno causato sbarramenti e rallentamenti del flusso; inoltre, entrambi i bacini presentano una fitta vegetazione sia in alveo che lungo le sponde.



Figura 20 - Nicchia di frana con fenomeni di erosione (roggia Vallone) (Barozzi et al., 2015)

L’asportazione di terreno verso la valle della Roggia Vallone è determinata dalla presenza di ruscellamento diffuso, specie durante i fenomeni meteorici intensi, unitamente ai passaggi del terreno da saturo a insaturo e ai cicli invernali di gelo-disgelo, che agiscono sulla litologia prevalentemente costituita da materiale fine. Dal punto di vista morfologico tale zona appare piuttosto articolata, con valli laterali aventi caratteristiche simili a quella della valle principale. In



particolare, lungo tutto lo sviluppo dell'alveo sono diffusamente presenti evidenze di erosione; a queste si aggiungono le numerose nicchie di frana derivanti dal progressivo arretramento del ciglio del terrazzo che contornano quasi per intero il bacino idrografico della Roggia Vallone. Questi fenomeni di instabilità hanno provocato la caduta di blocchi e alberi all'interno dell'alveo, con conseguente ostruzione del deflusso.

Per quanto riguarda la Roggia Malmonte, lungo tutto il suo sviluppo sono evidenti i segni dell'erosione provocata dalle acque lungo le sponde, con numerose piccole nicchie di distacco; sono inoltre presenti nicchie di distacco connesse all'erosione al piede esercitata dalla Roggia Malmonte. In effetti, osservando la Carta Geomorfologica (Figura 24) risulta evidente che lo spartiacque delimitante il bacino della Roggia Malmonte è pressoché coincidente con l'involuppo di una serie di nicchie di frana. A causa di questi franamenti, in alveo sono spesso presenti blocchi di conglomerato e alberi divelti, che provocano locali ostruzioni e rallentamenti del deflusso (Figura 21).



Figura 21 - Ostruzione dell'alveo a causa della presenza di vegetazione (Barozzi et al., 2015)

Fenomeni di erosione accelerata e arretramento dell'orlo di scarpata analoghi a quelli evidenziati nelle due valli sono particolarmente diffusi anche lungo il versante orientale dell'area archeologica, che degrada verso il Monastero di Torba.

Questi fenomeni sono influenzati dalla presenza del Fiume Olona e di altre incisioni torrentizie che solcano le aree di versante nella parte orientale degli scavi. Le scarpate presentano altezze medie molto variabili; quelle più evidenti sono intagliate sul piano di fondovalle correlabili all'azione erosionale del Fiume Olona, e comprendono sia tratti attivi che quiescenti. Come riportato nel PGT di Gornate Olona, nell'area orientale degli scavi sono stati osservati eventi alluvionali che, negli anni compresi tra il 1995 e il 2002, hanno provocato fenomeni più o meno circoscritti di tracimazione dei corsi d'acqua e trasporto di materiale detritico (tipo *debris-flow*).



Figura 22 - Evidenze di cedimenti lungo il perimetro del Parco Archeologico (Barozzi et al., 2015)

Tali instabilità hanno già determinato locali cedimenti e asportazioni di terreno in corrispondenza del perimetro dell'area archeologica stessa: lungo il versante orientale sono inoltre presenti scivolamenti di terreni fini, inglobanti ghiaia o ciottoli, ubicati a tetto del conglomerato (Ceppo dell'Olona). Il conglomerato costituente il Ceppo dell'Olona è infatti caratterizzato da una competenza relativamente più elevata rispetto alle formazioni che lo delimitano a tetto e a letto, definendo di conseguenza una netta discontinuità morfologica lungo il versante, con pareti subverticali piuttosto continue. Tale conglomerato è però molto sensibile ai processi di alterazione, soprattutto chimica e fisica: la dissoluzione del cemento calcareo, il ruscellamento delle acque superficiali, i fenomeni crioclastici e la bioclastesi hanno progressivamente indebolito il conglomerato, che si presenta localmente molto fratturato e poco cementato.





Figura 23 - Affioramento del Ceppo sul versante orientale (Barozzi et al., 2015)

Tale debolezza geologica, unitamente all'elevata acclività, favorisce l'innescò di fenomeni gravitativi, con frequenti distacchi e crolli di blocchi (di dimensioni metriche e plurimetriche), che alimentano le sottostanti falde di detrito, soprattutto lungo il settore orientale del pianalto, in corrispondenza delle porzioni di scarpata aventi una maggiore acclività.

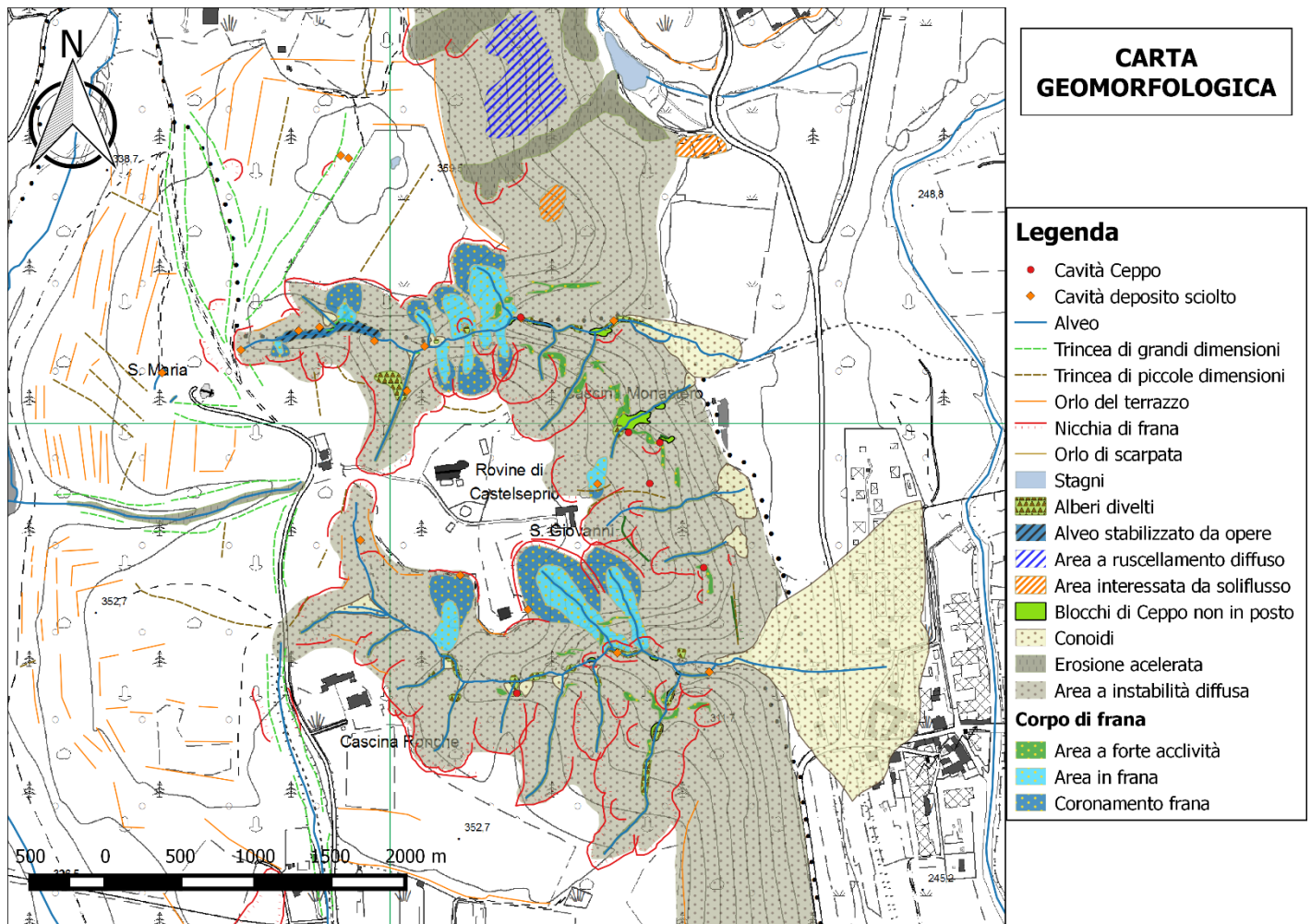


Figura 24 - Carta geomorfologica

## 2.5. OPERE PRESENTI

In conseguenza della diffusa franosità della zona, in alcuni settori dell'area di studio sono stati già realizzati alcuni interventi di difesa del suolo e mitigazione del rischio idrogeologico.

Tra questi, si citano gli interventi di "Ripristino dei versanti del parco" previsti dal Piano della Protezione e Conservazione dei Centri di Potere e di Culto dell'UNESCO: il Piano prevedeva nel 2008 interventi di manutenzione e pulizia del bosco, oltre a opere di drenaggio e collettamento delle acque, finalizzate al ripristino della stabilità dei versanti. Lo stesso Piano prevedeva inoltre il ripristino del sentiero di collegamento tra il Monastero di Torba e l'area archeologica di Castelseprio. Purtroppo, i documenti progettuali di tali interventi non sono disponibili e quindi non si possono conoscere nel dettaglio l'ubicazione e la tipologia degli interventi effettivamente realizzati.

Altri interventi di manutenzione e pulizia del bosco sovrastante l'area del Monastero di Torba erano previsti nel 2015 (Caselli, 2015): l'ipotesi progettuale prevedeva anche la posa in opera di reti in aderenza, o in alternativa, la realizzazione di un rilevato/vallo paramassi. Tali opere non risultano al momento realizzate



Attualmente, è possibile osservare la presenza di varie opere di sistemazione idraulica lungo gli impluvi della Roggia Malmonte, della Roggia Vallone e degli impluvi minori che scendono lungo il versante orientale verso il Monastero di Torba. In particolare, lungo la Roggia Malmonte sono presenti numerose briglie e salti di fondo prevalentemente realizzati in legname (Figura 25), nonché protezioni spondali a loro volta costituite essenzialmente da palificate.



Figura 25 - Piccole briglie e protezioni spondali in legno lungo la Roggia Malmonte (Barozzi et al., 2015)

In prossimità della Roggia Vallone si trova una gabbionata, attualmente quasi del tutto ricoperta da vegetazione, ed è inoltre presente una condotta in calcestruzzo per il by-pass delle acque, la cui funzionalità appare però compromessa dalla presenza di vegetazione (Figura 26).



Figura 26 - Gabbionata metallica presente in prossimità della roggia Vallone (Barozzi et al., 2015)



Palificate in legno, abbinate a graticciate, sono inoltre state realizzate in prossimità di Santa Maria Foris Portas, dove si rileva anche la presenza di pozzi perdenti. Si ha inoltre notizia di alcuni pozzetti di drenaggio realizzati all'interno della porzione di pavimentazione originale della chiesa, al fine di ridurre l'umidità.

Le opere di stabilizzazione presenti nei pressi degli Scavi Archeologici si localizzano in particolare lungo l'orlo di scarpata che delimita il pianalto, soprattutto lungo i margini orientale e meridionale del terrazzo: qui sono presenti opere di impermeabilizzazione superficiale, geostuoie, reti metalliche in aderenza, nonché frequenti palificate in legno a protezione del sentiero delle mura (Figura 27).



Figura 27 - Rete metallica parzialmente ricoperta dalla vegetazione posizionata lungo il margine meridionale del terrazzo (Barozzi et al., 2015)

Interventi diffusi sono inoltre stati realizzati all'interno della Valle del Malmonte, che come già evidenziato in precedenza risulta estesamente interessata da fenomeni di instabilità superficiale (Nicoloso, 2012): tra gli interventi realizzati si elencano estensive opere di manutenzione della vegetazione, opere diffuse di contenimento dell'erosione (biostuoie e idrosemina), opere di regimazione delle acque (briglie in legname e pietrame), opere di sostegno localizzate in corrispondenza delle principali nicchie di frana (palificate e muretti).

Infine, sono presenti alcuni interventi di regimazione e drenaggio delle acque, realizzati sul pianalto (nella zona orientale del sito) a monte delle mura, dove è stata costruita una trincea drenante (Mazzucchelli et al., 2011).

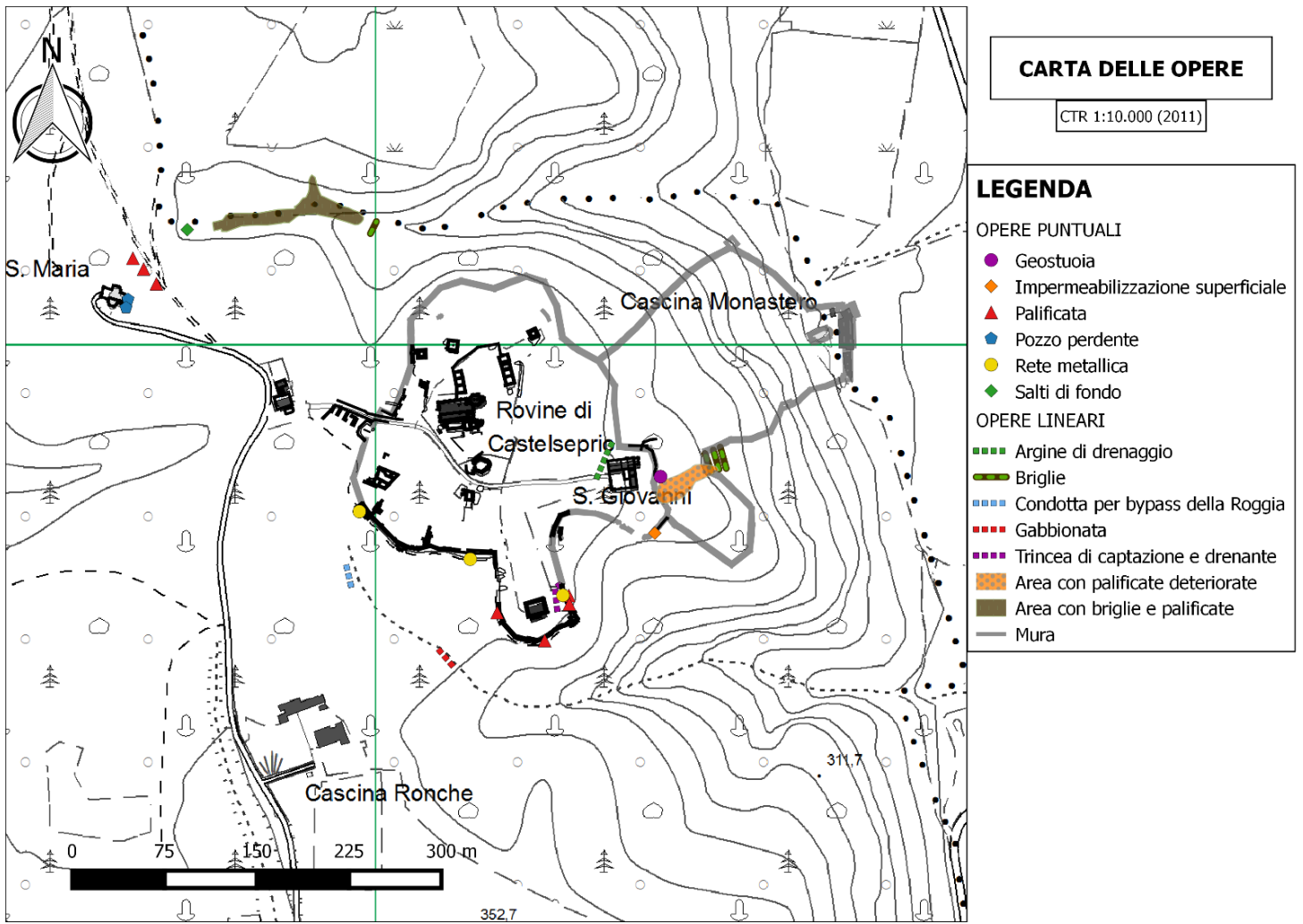


Figura 28 - Carta delle opere esistenti

### 3. MODELLO CONCETTUALE DI RIFERIMENTO

La realizzazione del modello concettuale di riferimento si divide in tre fasi principali, basate sulla raccolta e sull'interpretazione di dati e informazioni provenienti da fonti diverse:

- Definizione del modello fisico, che si concentra sulla geometria del problema e sui geomateriali
- Individuazione delle caratteristiche tecniche dei geomateriali presenti
- Descrizione dei processi geomorfologici e idrogeologici in atto nell'area interessata

#### 3.1. DEFINIZIONE DEL MODELLO FISICO

Il primo passo consiste quindi nell'individuare i geomateriali presenti nell'area di studio e ricostruirne la struttura spaziale.

Come si evince dai risultati del rilevamento geologico e dalle sezioni interpretative il pianalto su cui sorgono gli Scavi è costituito da depositi fluvioglaciali antichi facenti parte della Formazione di Castronno, con livelli fortemente alterati fino a 20-25 m di profondità; tale unità litologica, caratterizzata da ghiaie e sabbie con forte grado di alterazione, si estende anche a Nord e a Sud del pianalto.

Questi depositi poggiano sopra uno strato conglomeratico, avente immersione verso SSE con un'inclinazione circa del 3%; questa unità, identificata come Ceppo dell'Olona, affiora lungo tutta la scarpata della valle del fiume Olona ed è osservabile, nei pressi del pianalto, nelle valli incise dalle rogge Malmonte e Vallona. Inoltre tale strato è caratterizzato da un minor grado di alterazione rispetto ai depositi fluvioglaciali: in particolare, immediatamente sopra il conglomerato del Ceppo sono presenti almeno 4-5 m di depositi fortemente alterati e argillificati (Ferretto).

Infine, sotto al conglomerato avente uno spessore intorno ai 20-25m, sono presenti depositi prevalentemente ghiaioso limosi fino a oltre 100 m di profondità (rispetto al piano campagna del terrazzo).





Figura 29 - Alternanza di strati cementati e meno cementati nel Ceppo dell'Olona (Barozzi et al., 2015)

### 3.2. CARATTERISTICHE DEI GEOMATERIALI

Definito il modello fisico (geomateriali e geometria) è possibile passare alla fase successiva, nella quale ai diversi geomateriali vengono attribuite delle caratteristiche tecniche. Per ottenere queste informazioni sono stati analizzati i risultati derivanti da precedenti indagini condotte sul pianalto o in zone geologicamente simili: in particolare, sono stati analizzati i dati ottenuti da prove penetrometriche e prospezioni geofisiche svolte nelle aree circostanti la zona degli scavi archeologici.

L'utilizzo di prove relative ad aree limitrofe è stato necessario in quanto le analisi svolte sul pianalto dove sorgono gli scavi non erano sufficienti a definire con ragionevole precisione le caratteristiche tecniche dei geomateriali; si è perciò scelto di utilizzare i risultati di prove svolte in aree dove è presente una tipologia di terreni assimilabile a quella del pianalto. Di seguito vengono riportate le considerazioni fatte su tali analisi.

Le prove penetrometriche utilizzate per la definizione dei geomateriali sono state ricavate dal PGT di Castelseprio (2013) e da varie indagini e relazioni geologico-tecniche svolte nel comune di Gornate Olona, rispettivamente a Sud e a Nord del pianalto; come detto in precedenza, si è cercato di sfruttare i dati relativi a studi svolti nei pressi degli Scavi oppure su terreni geologicamente simili.

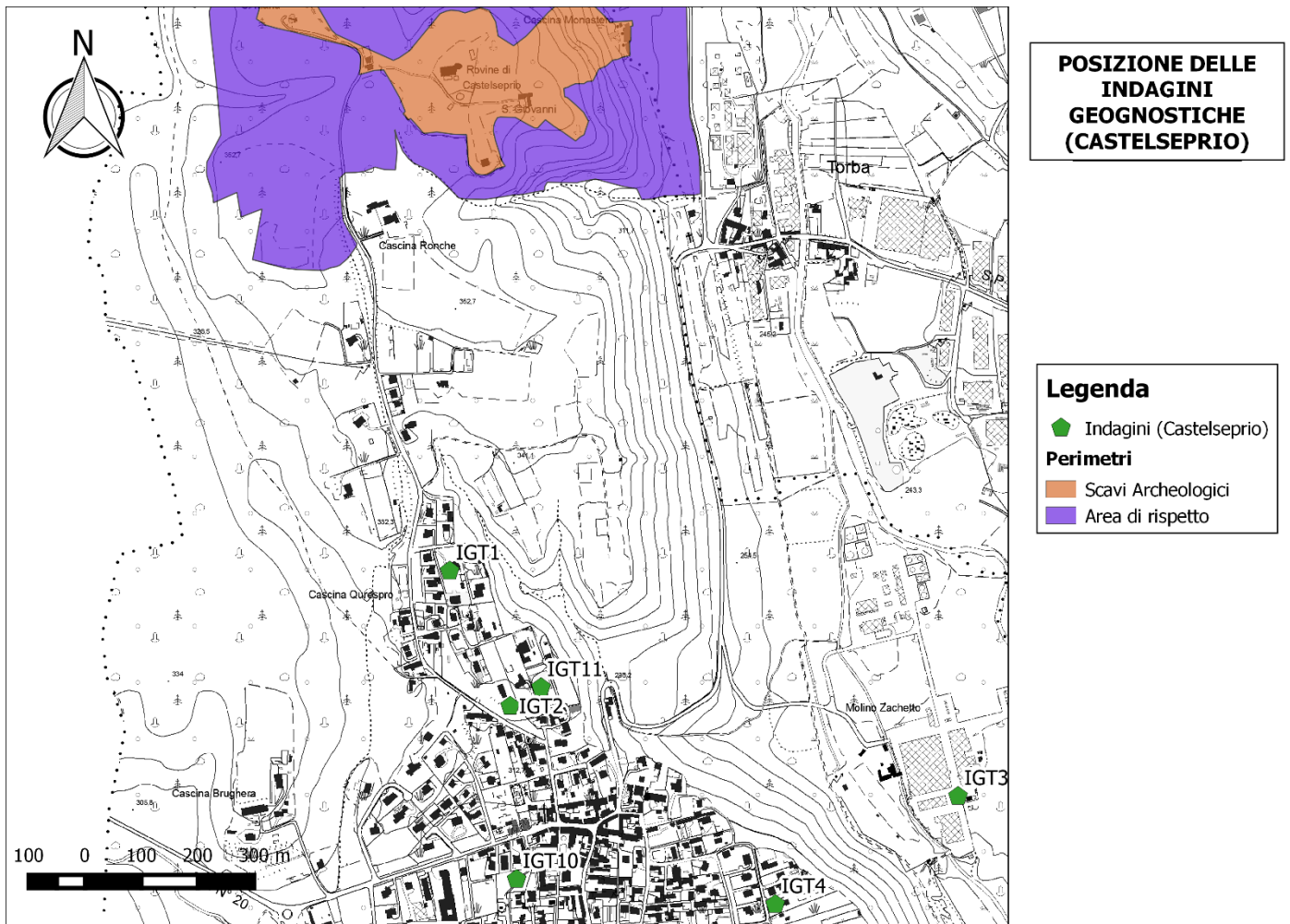


Figura 30 - Posizione delle indagini nel comune di Castelseprio

Come si può osservare dalla Figura 30, che riporta la posizione delle prove nel comune di Castelseprio, le indagini sono state svolte perlopiù all'interno della zona residenziale e sono tendenzialmente distanti dall'area di interesse: per questo motivo si è scelto di considerare le tre prove IGT1, IGT2 e IGT11, situate a Nord del comune. A titolo di esempio si riporta di seguito il risultato dell'indagine IGT1, dove viene mostrato il numero di colpi per ottenere un avanzamento di 10 centimetri al variare della profondità, oltre alla sezione geologica interpretativa (Figura 31).

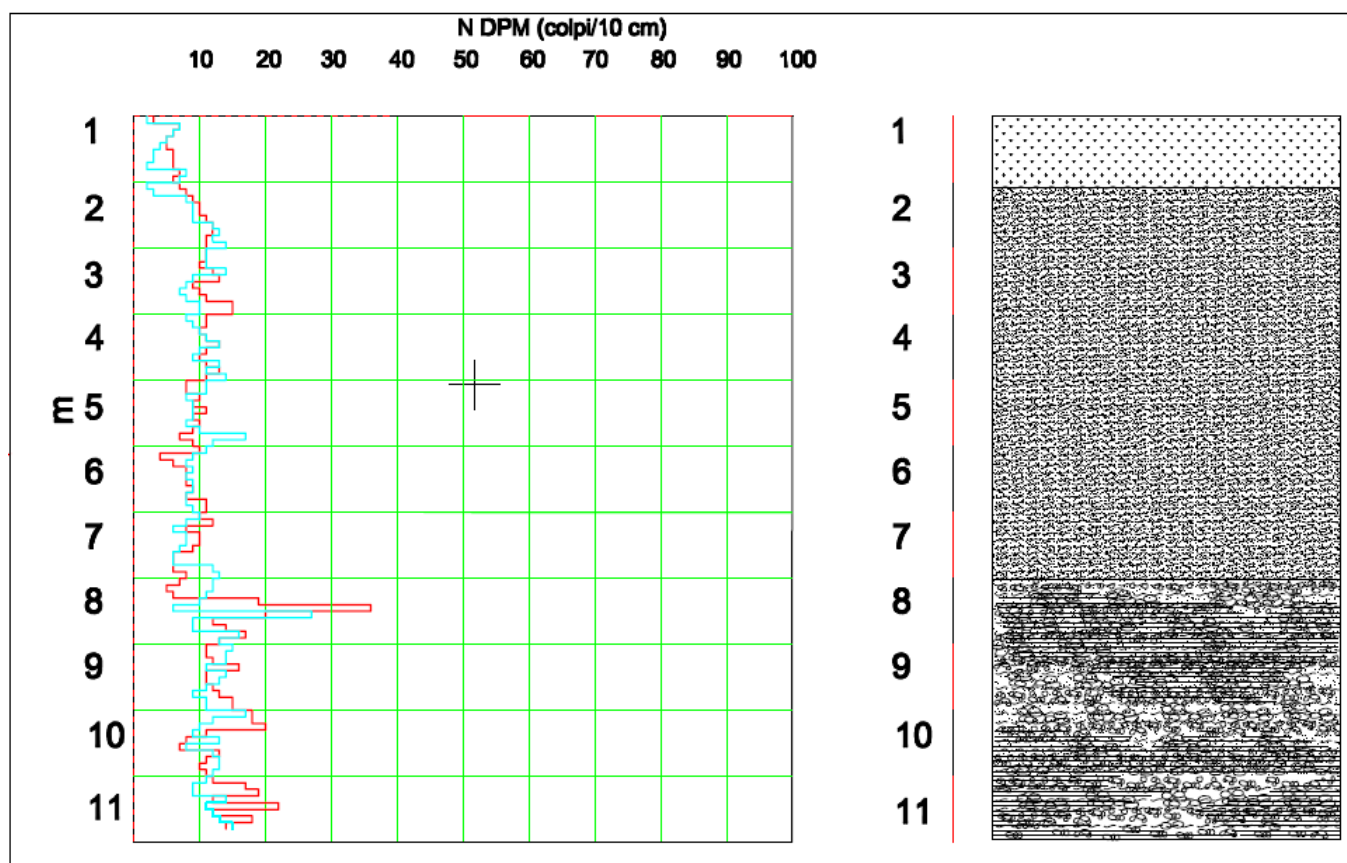


Figura 31 - Risultati dell'indagine IGT1 (n° 2 prove penetrometriche) e sezione interpretativa (PGT Castelseprio, 2013)

Come si può notare la sezione è stata ricostruita sulla base di due prove penetrometriche che compongono l'indagine geognostica IGT1; per il primo metro si osservano valori molto bassi di resistenza alla penetrazione, che indica uno scarso addensamento del materiale. Superata tale profondità le indagini mostrano un miglioramento della qualità del terreno, con andamento piuttosto regolare fino a circa 7 metri; qui si assiste ad un ulteriore aumento della resistenza a penetrazione, che torna ad essere abbastanza regolare fino a 11 metri, punto più profondo raggiunto dalla prova.

Dopo il primo strato, più sottile, composto da terreno di coltura, il suolo risulta composto principalmente da materiale limoso-sabbioso che caratterizza lo strato intermedio. La zona più profonda è invece composta prevalentemente da ghiaia e ciottoli inclusi in una matrice argillosa.

Anche le due indagini IGT2 e IGT11 (rispettivamente composte da 5 e 3 prove penetrometriche) svolte nel comune di Castelseprio restituiscono dati simili, mostrando una variazione dello stato di addensamento attorno ai 5 metri di profondità dove la resistenza a penetrazione del materiale aumenta.

In aggiunta alle prove incluse nel PGT di Castelseprio (2013) sono state prese in esame diverse indagini situate a Nord degli Scavi, nel comune di Gornate Olona. Nella Figura 32 riportata di seguito sono mostrate alcune delle indagini situate più in prossimità del pianalto.



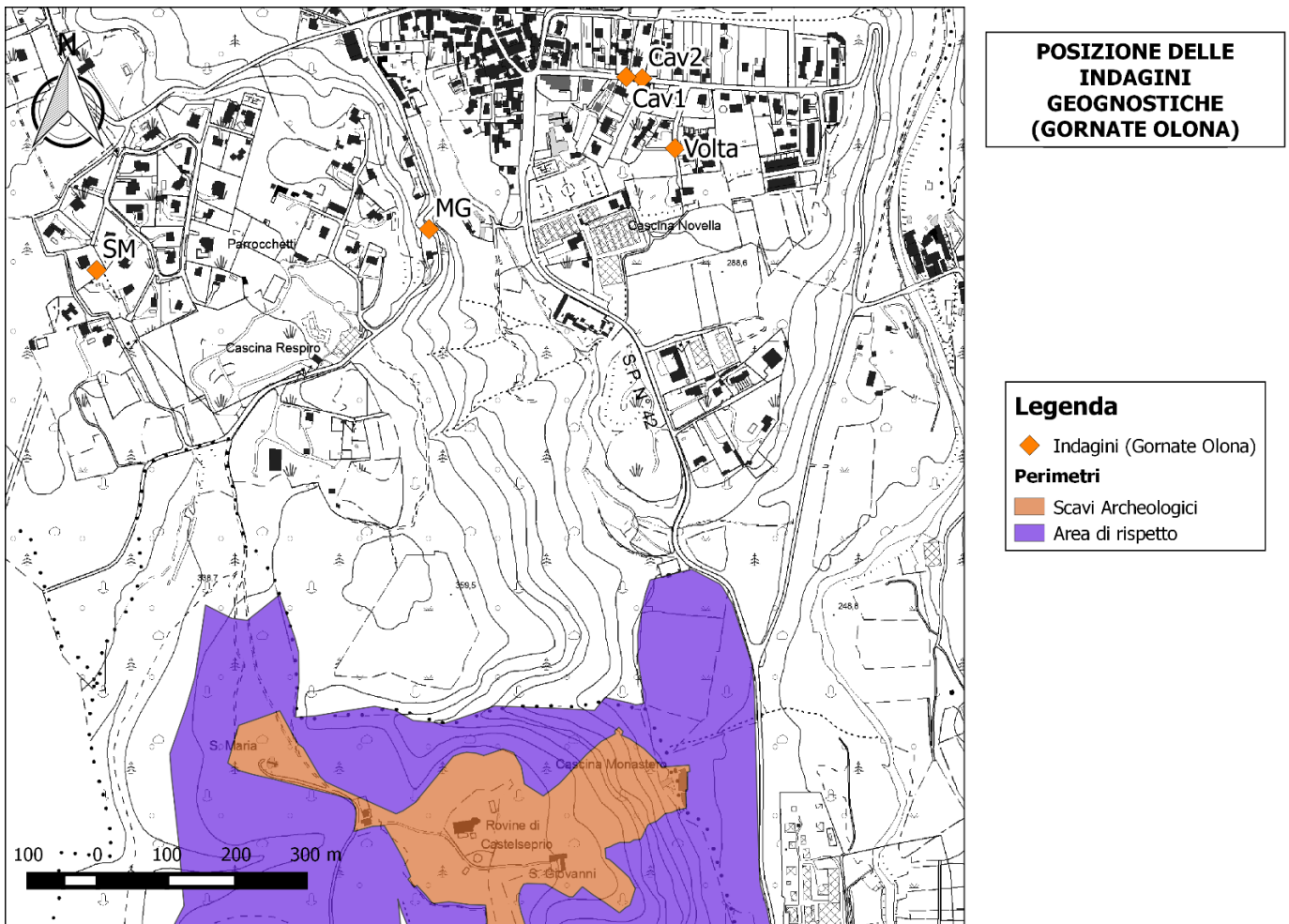


Figura 32 - Posizione delle indagini nel comune di Gornate Olona

Anche per quanto riguarda le indagini svolte all'interno del comune di Gornate Olona si può notare come la maggior parte di queste siano state svolte nell'area residenziale piuttosto che nei pressi degli Scavi Archeologici. Inoltre alcune prove (come ad esempio Cav1 e Cav2) sembrano localizzate al di fuori dell'area geologicamente affine al pianalto degli Scavi di Castelseprio: per questo motivo sono state considerate più attendibili le indagini denominate SM e MG, che rispettivamente sono costituite da 6 e 4 prove penetrometriche. Di seguito vengono presentate, a titolo di esempio, i risultati di due delle sei prove penetrometriche facenti parte dell'indagine SM (Parmigiani, 2004).



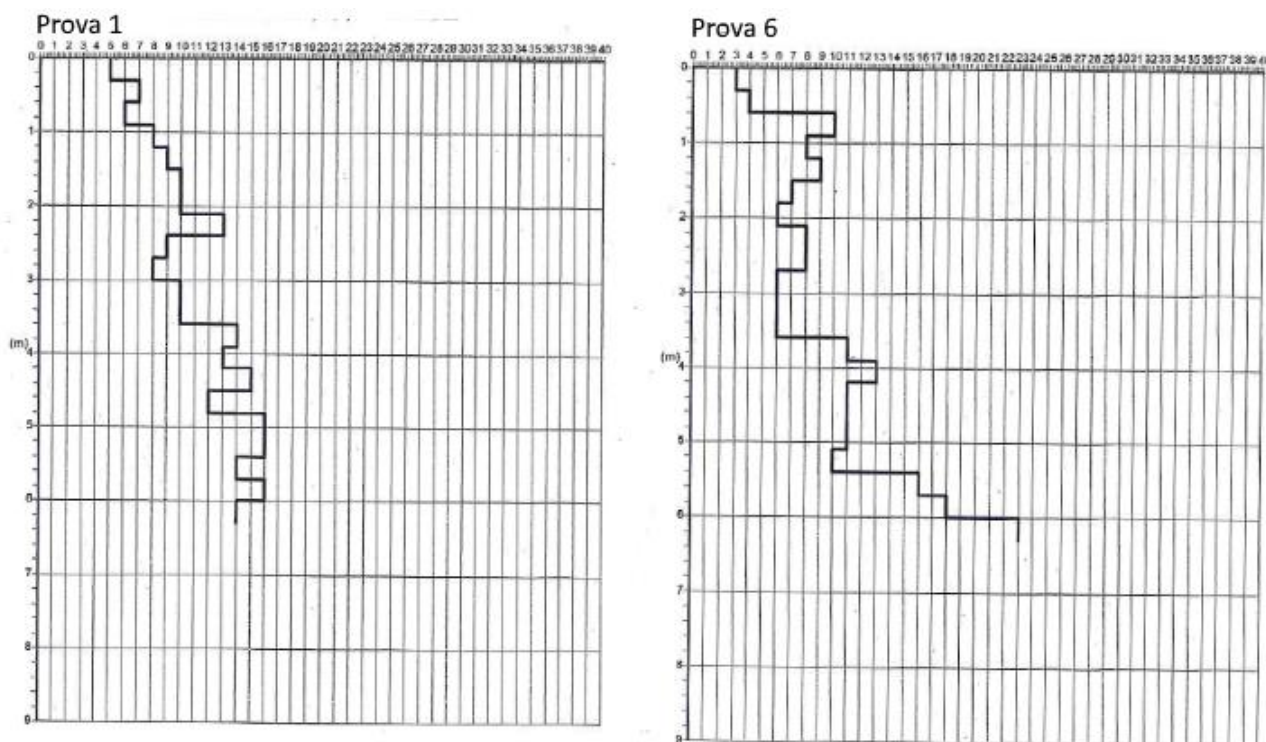


Figura 33 - Prove penetrometriche P1 e P6 situate in località S.ta Monica (SM) (Parmigiani, 2004)

Entrambe le prove mostrano una scarsa resistenza alla penetrazione fino a circa 4 metri, dove si incontra un terreno leggermente più addensato e aumenta il numero di colpi fino alla massima profondità raggiunta. In particolare nella prova P6 si osserva, arrivati a 6 metri, un notevole incremento della resistenza a penetrazione: questo dato sembra essere in accordo con quanto ottenuto dall'analisi delle indagini nel comune di Castelseprio (si veda la prova IGT1 precedentemente mostrata in Figura 31) che indicano una variazione della risposta del terreno ad una profondità di circa 6-7 metri.

Sulla base delle indagini geognostiche svolte nelle aree geologicamente simili al pianalto è quindi possibile dedurre le caratteristiche fisiche dei geomateriali costituenti le stratigrafie che interessano la zona degli Scavi Archeologici.

Per quanto riguarda i depositi superficiali, costituenti il pianalto stesso, si evidenziano caratteristiche geotecniche generalmente da mediocri a scadenti: infatti, i risultati delle prove penetrometriche forniscono valori di  $N_{spt}$  variabili da 2 (in presenza di falda sospesa) a 12 (in condizioni asciutte). Valori altrettanto bassi della resistenza alla penetrazione sono stati ottenuti in prove penetrometriche eseguite direttamente sul pianalto di Castelseprio, immediatamente a sud delle rovine (Fontana, 2007), con  $N_{spt}$  variabili da 2 a 8 nei primi 4 m dal piano campagna.

La resistenza alla penetrazione aumenta a profondità superiori a 5 m dal piano campagna, dove si raggiungono valori di  $N_{spt}$  variabili da 14 a 23, indicativi di un maggior grado di addensamento del terreno. Valori analoghi sono stati riscontrati anche sul vicino terrazzo di Gornate Olona (posto immediatamente a nord dell'area di studio e caratterizzato da un contesto geologico del tutto simile a quello del terrazzo di Castelseprio), dove i valori di  $N_{spt}$  sono risultati inferiori a 10 colpi fino a circa

5 m di profondità dal piano campagna, mentre per profondità superiori (fino a 7-8 m) i valori di  $N_{spt}$  si mantengono intorno ai 20-25 colpi (Idrogeo, 2004). Negli studi da cui sono state estratte tali prove viene inoltre affermato che tale aumento della resistenza del terreno sia imputabile non tanto a un miglioramento della qualità del terreno stesso, quanto a un aumento del carico litostatico agente.

I dati delle prove penetrometriche indicano quindi la presenza, nei primi metri del terrazzo, di un terreno incoerente e scarsamente addensato, mentre lo stato di addensamento tende mediamente ad aumentare con il crescere della profondità. Integrando i riscontri emersi dalle prove in sito coi rilievi sul terreno, in accordo con quanto riportato nel PGT di Castelseprio (2013), nell'area di interesse è possibile identificare diverse unità geologico-tecniche (Tabella 1).

Litozona	Profondità	Caratteristiche tecniche
A) Limo sabbioso (Loess)	Da 0 a 1 m	Terreni fini, da sciolti a poco addensati, dotati di scarsa consistenza
B) Limo sabbioso-argilloso con ghiaia (Formazione di Castronno)	Da 1 a 6-7 m	Terreni poco addensati e poco consistenti
C) Ghiaia in matrice argilloso-sabbiosa (Livello alterato della Formazione di Castronno)	Da 6-7 m a 20 m	Terreni incoerenti in matrice fine, mediamente addensati
D) Ghiaie cementate	Da 20 a 40-45 m	Deposito localmente cementato, ma soggetto a dissoluzione e alterazione
E) Ghiaie e sabbie	Oltre i 40-45 m	Terreni mediamente addensati

Tabella 1 - Litozone identificate all'interno dei depositi costituenti il terrazzo

Per le litozone B e C, sulla base delle correlazioni empiriche usualmente utilizzate per l'interpretazione delle prove penetrometriche, si possono considerare plausibili i seguenti valori dei parametri geologico-tecnici:

- Litozona B:
  - Peso specifico intorno ai 15-18 kN/m<sup>3</sup>
  - Angolo d'attrito di circa 28°
  - Coesione variabile da 35 a 45 kPa
  - Modulo di Young intorno ai 4-5 MPa
- Litozona C:
  - Peso specifico compreso tra 18 e 20 kN/m<sup>3</sup>
  - Angolo d'attrito con valori massimi di 32°
  - Coesione intorno ai 70-80 kPa
  - Modulo di Young che può raggiungere valori intorno ai 10 MPa.

Per quanto riguarda la Litozona D sono state sfruttate alcune indagini geofisiche condotte sul vicino terrazzo di Gornate Olona, che evidenziano un'estrema eterogeneità del deposito superficiale (Figura 34); queste prove, che includono le prove penetrometriche MG citate in precedenza, comprendono anche 2 sezioni tomografiche di resistività elettrica e 1 sezione tomografica di velocità delle onde di compressione P, che aiutano a descrivere l'area in esame (Fontana, 2010).

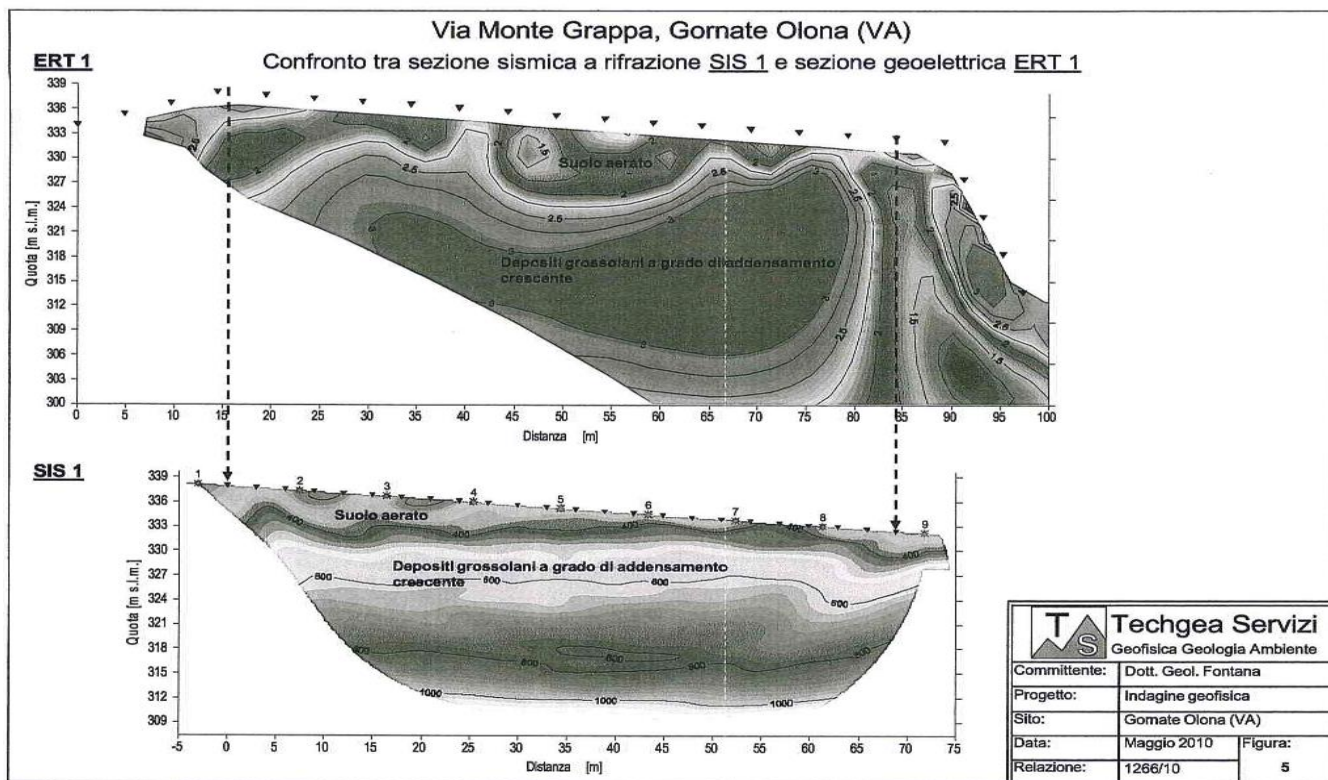


Figura 34 - Confronto tra sezione sismica a rifrazione SIS 1 (valori in m/s) e sezione geoelettrica ERT 1 (valori in  $\log(\Omega m)$ ) (Fontana, 2010)

In particolare, i risultati delle indagini geoelettriche evidenziano la presenza di livelli cementati (resistività elettrica dell'ordine di  $1000 \Omega m$ ) e di locali zone detensionate (resistività elettrica dell'ordine di  $20-30 \Omega m$ ), con possibile presenza di acqua. Tali zone detensionate si localizzano in corrispondenza del margine del terrazzo e interessano il deposito per una profondità di circa 10m dal margine del terrazzo stesso. Le indagini geosismiche a rifrazione evidenziano l'assenza di un substrato lapideo fino ad almeno 20m di profondità; le modeste velocità sismiche (inferiori ai 500 m/s) riscontrate nei primi metri confermano lo scarso stato di addensamento messo in evidenza anche dalle indagini penetrometriche.

Per la definizione del geomateriale è comunque possibile fare riferimento ad alcune delle prove penetrometriche presenti nello stesso studio, che sono state svolte lungo la stessa sezione sismica mostrata in precedenza. Queste indagini ha evidenziato la presenza di una litozona caratterizzata da terreni a granulometria mediamente grossolana, riconducibili a ghiaia e sabbia con ciottoli con stato di addensamento molto compatto, caratterizzati da un valore di  $N_{spt}=40$ .

Basandosi su questi risultati le caratteristiche del geomateriale che costituisce la litozona D sono le seguenti:

- Peso specifico di circa 21 kN/m<sup>3</sup>
- Angolo d'attrito pari a 39°
- Coesione da 50 a 80 kPa
- Modulo di Young compreso tra 50 e 70 MPa

Oltre a quanto riportato, è possibile inoltre fare alcune considerazioni basate sui riscontri emersi in occasione dei rilievi in sito: infatti, all'interno del conglomerato costituente la Litozona D sono presenti delle cavità aventi dimensioni molto varie, da pochi centimetri ai alcuni metri di diametro (Figura 35). Tali cavità si formano in seguito a fenomeni di dissoluzione carsica della componente carbonatica presente sia nei clasti che nella matrice e nel cemento.

La maggior parte delle cavità in conglomerato può quindi attribuirsi a fenomeni carsici, ma cavità di dimensione ragguardevoli possono formarsi anche per asportazione del prodotto di alterazione del conglomerato: la diffusione di queste cavità fa sì che il conglomerato sia assimilabile, per quanto riguarda le condizioni di fratturazione e permeabilità, a un substrato carsificato, caratterizzato da estesa e diffusa franosità.



Figura 35 - Esempio di cavità metrica nel Ceppo dell'Olona (occhio pollino)



Per la definizione dei geomateriali che compongono la litozona E si è fatto riferimento al PGT di Castelseprio (2013) all'interno del quale sono presenti delle prove penetrometriche svolte nella piana del fiume Olona, situata ad Est del territorio comunale. Le indagini situate in questa zona permettono quindi di ricavare i parametri geologico-tecnici relativi a questa litozona, che vengono riportati di seguito:

- Peso specifico attorno a 19 kN/m<sup>3</sup>
- Angolo d'attrito di circa 43°
- Coesione pari a 90 KPa
- Modulo di Young di circa 10-12 MPa

### 3.3. DESCRIZIONE DEI PROCESSI GEOMORFOLOGICI E IDROGEOLOGICI

L'integrazione del modello fisico-geologico con le proprietà tecniche porta alla definizione del cosiddetto modello geologico-tecnico. Al fine di giungere al modello concettuale vero e proprio è necessario considerare anche i processi in atto, di natura sia idrogeologica sia geomorfologica.

Particolarmente rilevanti all'interno dell'area di studio sono i fenomeni di *piping*, che causano la formazione di cavità nel conglomerato in seguito ad azioni di erosione sotterranea. Oltre al conseguente aumento della franosità, i processi di *piping* portano alla formazioni dei cosiddetti "occhi pollini", cavità di dimensioni variabili con profondità che vanno da pochi decimetri a 10-20 metri (Figura 36). Vari studi (Strini 2004, Colombo et al. 2015) hanno mostrato come questi fenomeni, che interessano in particolar modo l'Alta Pianura Lombarda, portino alla creazione di un sistema di vuoti interconnessi nei depositi più superficiali all'interno dei quali l'acqua si sposta fino ad un recapito, come la falda sotterranea, un corpo idrico superficiale o una risorgenza.

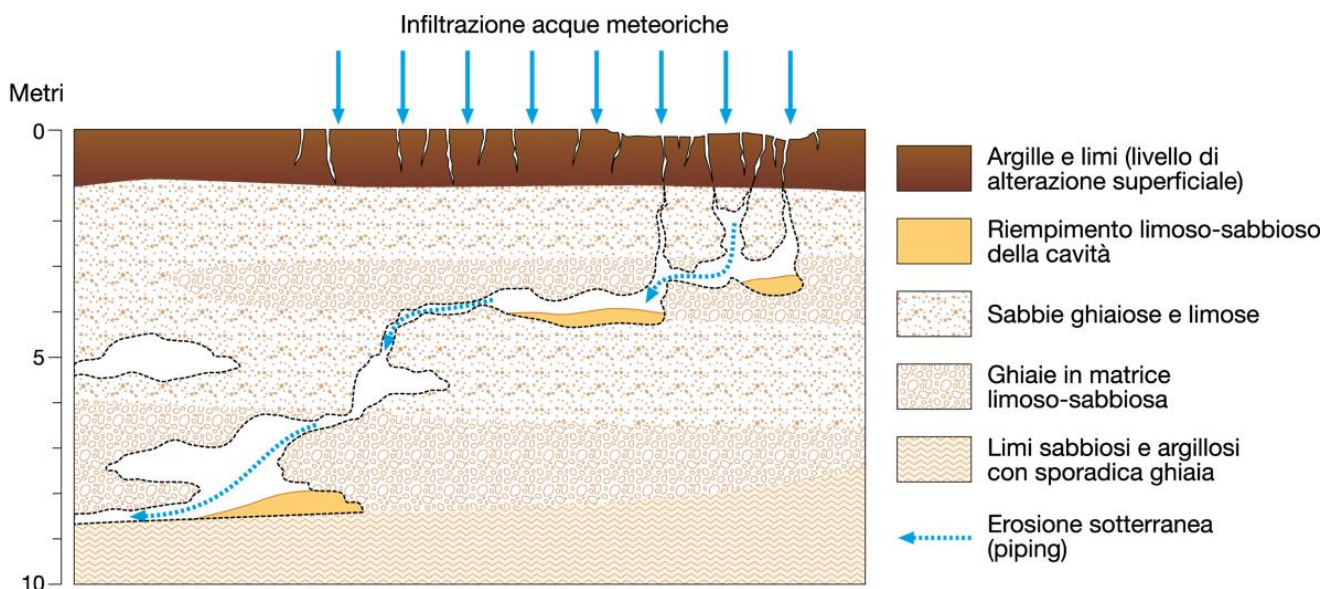


Figura 36 – Schema di galleria e cavità (occhi pollini) generati da fenomeni di erosione sotterranea (Scesi et al., 2015)

Sebbene gli occhi pollini possano essere identificati da un'eventuale riduzione della resistenza del terreno in una prova penetrometrica, è molto difficile riuscire a trovare la correlazione tra le diverse cavità a causa della distanza a cui queste indagini sono solitamente eseguite: la gestione delle aree interessate da questi fenomeni e la programmazione di interventi mirati a limitare i possibili danni risultano perciò molto delicate.

L'abbondanza di vuoti intercomunicanti, unitamente alla struttura idrogeologica della zona e nei depositi più superficiali, favorisce la formazione di falde sospese, che possono avere forti interazioni coi processi gravitativi e di evoluzione morfologica dei versanti.

Più in particolare, le basse pendenze e la ridotta permeabilità della Litozona A possono determinare la formazione di locali ristagni di acqua sul pianalto. L'acqua piovana tenderà invece ad infiltrarsi all'interno della Litozona B, dove sono talora presenti cavità aventi dimensioni di qualche  $\text{dm}^3$ , all'interno delle quali può circolare acqua, con conseguente formazione di falde sospese. A contatto con l'acqua, soprattutto nelle porzioni più superficiali del versante, tali depositi possono perdere la loro coesione, dando origine a locali movimenti franosi: i numerosi dissesti localizzati lungo l'orlo di scarpata del pianalto sono testimonianza di queste instabilità, che hanno già portato alla formazione di numerosi accumuli di frana e possono costituire un elemento di rischio particolarmente significativo per il sito archeologico, in quanto un arretramento della scarpata potrebbe arrivare a coinvolgere il sito stesso.



Figura 37 - Esempio di *piping* nella Formazione di Castronno (Barozzi et al., 2015)

A conferma dell'elevata instabilità delle litozone B e C viene riportata una stima delle altezze critiche (Taylor, 1948) di tali depositi dapprima in condizioni non drenate, dove con altezza critica viene indicata la massima altezza di una parete in terreno sciolto coesivo per la quale in condizioni non

drenate può essere garantita la stabilità. Tale altezza dipende dal peso specifico del terreno, dalla sua coesione, dalla pendenza del versante e dalla profondità alla quale si colloca il substrato più competente.

Considerando la litozona D un livello a maggiore competenza, noti gli intervalli di valori di peso specifico e coesione, si è considerato un intervallo di pendenza delle scarpate mediamente compreso tra 40° e 60°: per tali condizioni le altezze critiche variano da un minimo di circa 10 m ad un massimo di 16 m. Laddove le pendenze delle scarpate sono inferiori, ovviamente le altezze critiche aumentano, fino a raggiungere valori intorno ai 20 per pendenze dell'ordine dei 30°.

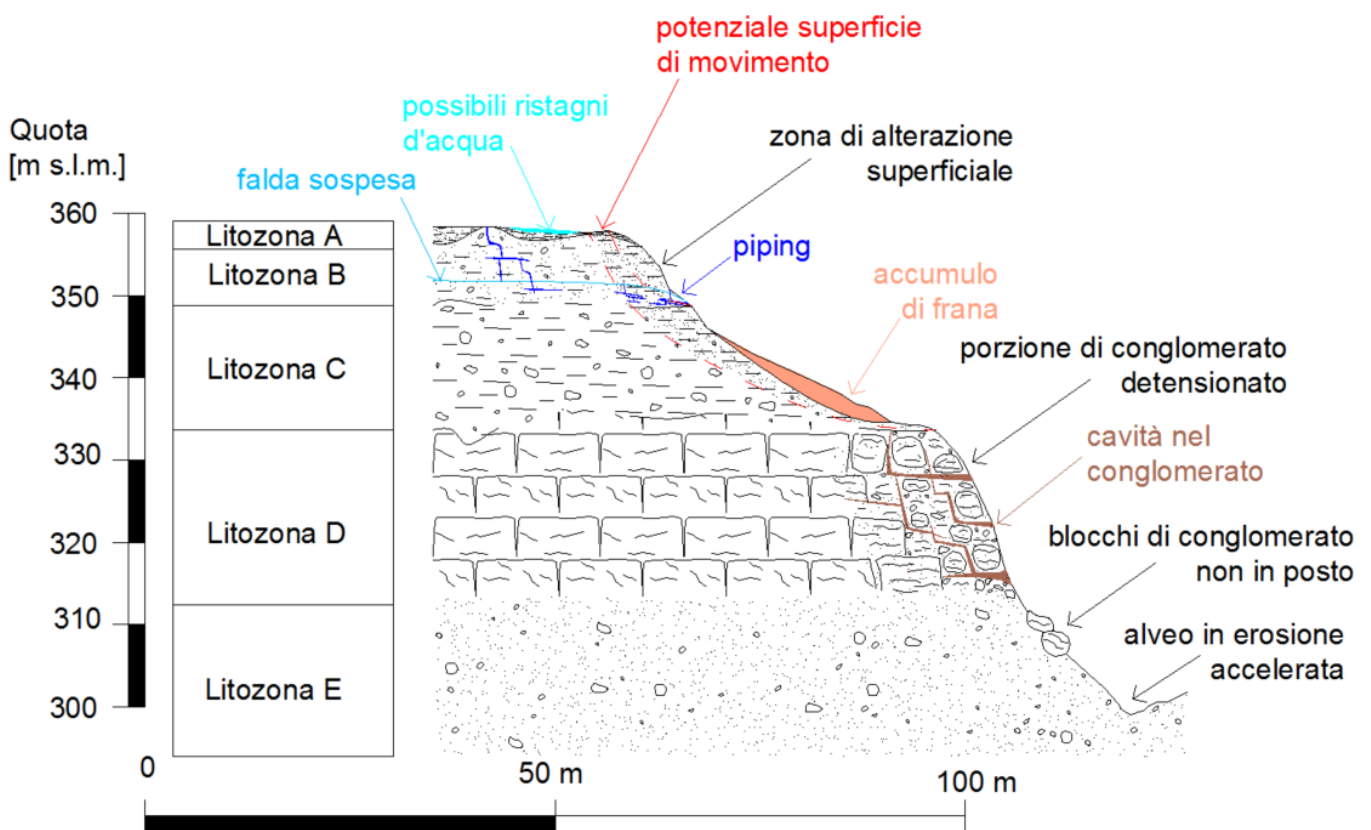


Figura 38 - Rappresentazione schematica del modello concettuale di riferimento

## 4. IL FENOMENO DEL PIPING

### 4.1. DESCRIZIONE DEL FENOMENO

Lo sviluppo di cavità sotterranee dovute a processi di erosione è un problema piuttosto diffuso, e viene solitamente studiato in quanto portatore di condizioni di rischio per versanti naturali ed artificiali: in particolare, l'azione erosiva dell'acqua può portare al collasso di argini fluviali, dighe e generare fenomeni di instabilità nei versanti. La conseguenza principale di questo processo è quindi la formazione di cavità nel sottosuolo determinata dalla filtrazione dell'acqua, il cui flusso causa la rimozione delle particelle più fini del terreno; questo fenomeno, mostrato in Figura 39, viene solitamente indicato con il termine *piping*.

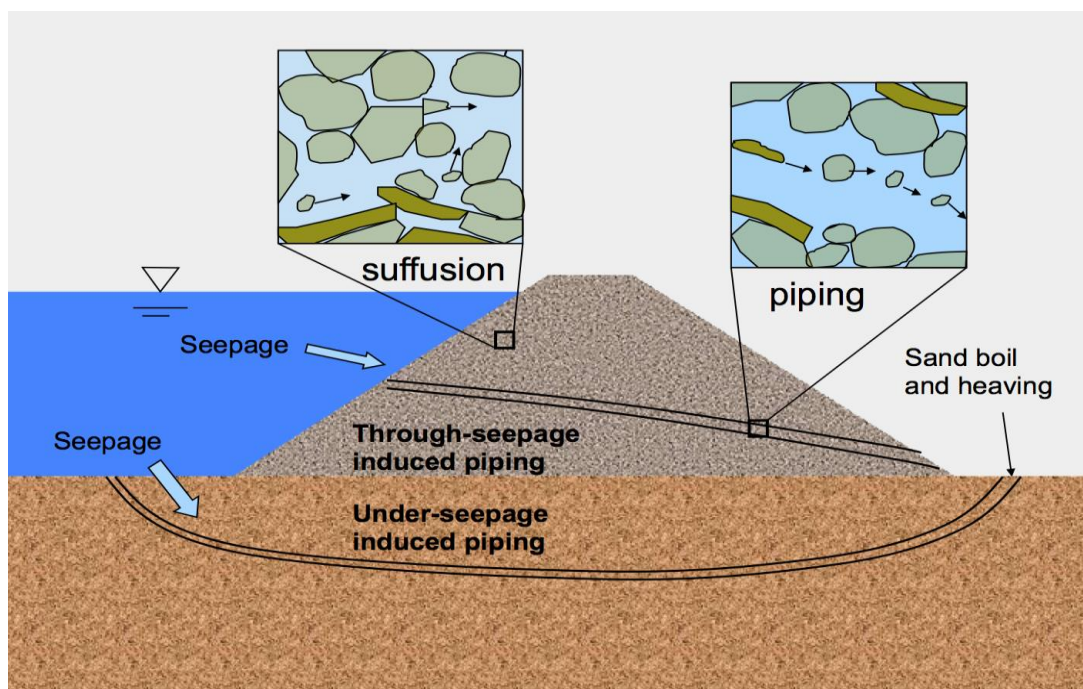


Figura 39 - Esempio di piping indotto da filtrazione (Xiao, 2015)

Questo termine può trarre in inganno, dato che nella bibliografia sia italiana che straniera viene sostituito da altri vocaboli, oppure utilizzato per indicare fenomeni di diverso tipo. Come mostrato anche da Richards e Reddy (2007) il gran numero di studi volti all'analisi e alla descrizione del piping ha portato alla formulazione di diverse definizioni di questo fenomeno, partendo da autori come Lane (1934) e Terzaghi (1939) che propongono un modello del piping in cui le particelle vengono rimosse dalla matrice per effetto delle forze di trazione prodotte dal flusso intergranulare dell'acqua; il risultato è un aumento dell'azione erosiva a causa dell'incremento della concentrazione di flusso nei punti dove le particelle di terreno sono state rimosse. In questo particolare caso la resistenza dei grani alla rimozione è dipendente dal gradiente idraulico e dallo stato di sforzo che si genera attorno all'apertura formata dall'erosione del materiale. Questo fenomeno viene parzialmente distinto dall'erosione interna in senso stretto, che tende a svilupparsi lungo aperture preesistenti come, ad esempio, fratture in materiali coesivi o vuoti nei piani di



contatto terreno-struttura; anche in questo caso il fenomeno può essere generato dall'aumento del gradiente idraulico.

Vari autori, tra cui Jones (1981) e McCook (2004) associano il termine "suffusion" al graduale spostamento di materiale fine attraverso una matrice più grossolana: questo processo può portare a un indebolimento della struttura del terreno, con un incremento del flusso d'acqua che può portare al collasso dello scheletro solido. Questo fenomeno può svilupparsi molto più lentamente rispetto al piping, legato all'erosione concentrata in una cavità, ed è solitamente legato a problemi di infiltrazione a lungo termine.

#### 4.2. ANALISI DELLE CONDIZIONI DI INNESCO

I fattori che influenzano la formazione delle cavità a causa dell'erosione interna sono stati oggetto di vari studi; nel loro lavoro Bonomi e Villa (2006) hanno riportato alcune condizioni elaborate da diversi autori, tra cui Hagerty (1991), che devono essere verificate affinché il fenomeno del piping possa iniziare.

Le cavità possono formarsi solo nel caso in cui sia presente una superficie libera dalla quale il materiale rimosso dall'azione erosiva dell'acqua possa fuoriuscire; secondo altri autori questa condizione risulta superflua in presenza di un serbatoio costituito dai vuoti di strati di terreno, in grado di immagazzinare il materiale eroso in precedenza.

Un fattore essenziale perché possa svilupparsi un'azione erosiva è la presenza di una ricarica d'acqua, necessaria affinché possa avvenire la separazione dei granuli dallo scheletro solido; non è comunque necessario un flusso continuo, poiché in generale il materiale può essere rimosso a intermittenza. L'infiltrazione d'acqua può essere facilitata dalla presenza di cavità preesistenti e fratture superficiali generate da forze di trazione.

Un altro parametro che determina lo sviluppo e l'evoluzione del piping è l'instaurarsi di una concentrazione del flusso d'acqua; questa condizione è dominata principalmente dalla conduttività idraulica. Infatti, essendo il terreno raramente omogeneo, si possono osservare strati a diversa permeabilità che influenzano la formazione di flussi d'acqua concentrati.

In aggiunta alle condizioni già citate, affinché il piping si sviluppi è necessario che venga raggiunto un determinato valore di gradiente idraulico critico, superato il quale le forze esercitate dall'acqua sono sufficienti per vincere quelle intergranulari e dare luogo al processo erosivo. La differenza di permeabilità è uno dei fattori che influenzano il gradiente, perciò la presenza di vuoti e di superfici libere può risultare rilevante per l'instaurarsi di un valore superiore a quello critico.

Gli autori riportano infine un'ultima condizione legata alla granulometria del materiale e alla sua influenza sul fenomeno del piping; sebbene gli studi non siano concordi su una singola teoria al riguardo, viene generalmente accettato che sia necessaria la presenza di una granulometria più grossolana che funga da scheletro solido, mentre una parte più fine è inizialmente presente nei vuoti e rimossa dall'azione del flusso dell'acqua.

Per un esempio di quale possa essere lo schema di formazione e di evoluzione del fenomeno si può fare riferimento alla Figura 40, che illustra un modello proposto da Higgins (1984): la ricarica d'acqua è data dalle precipitazioni, che penetrano nel terreno fino ad incontrare uno strato impermeabile che agisce da ostacolo all'infiltrazione. Viene così generata una via di flusso preferenziale che porta l'acqua a scorrere lateralmente finché non intercetta la superficie libera della scarpata. A questo punto l'aumento del gradiente idraulico causa la rimozione delle particelle più fini di terreno, e l'evoluzione dell'azione erosiva porta ad un progressivo allargamento della cavità formando, nel tempo, una vera e propria galleria.

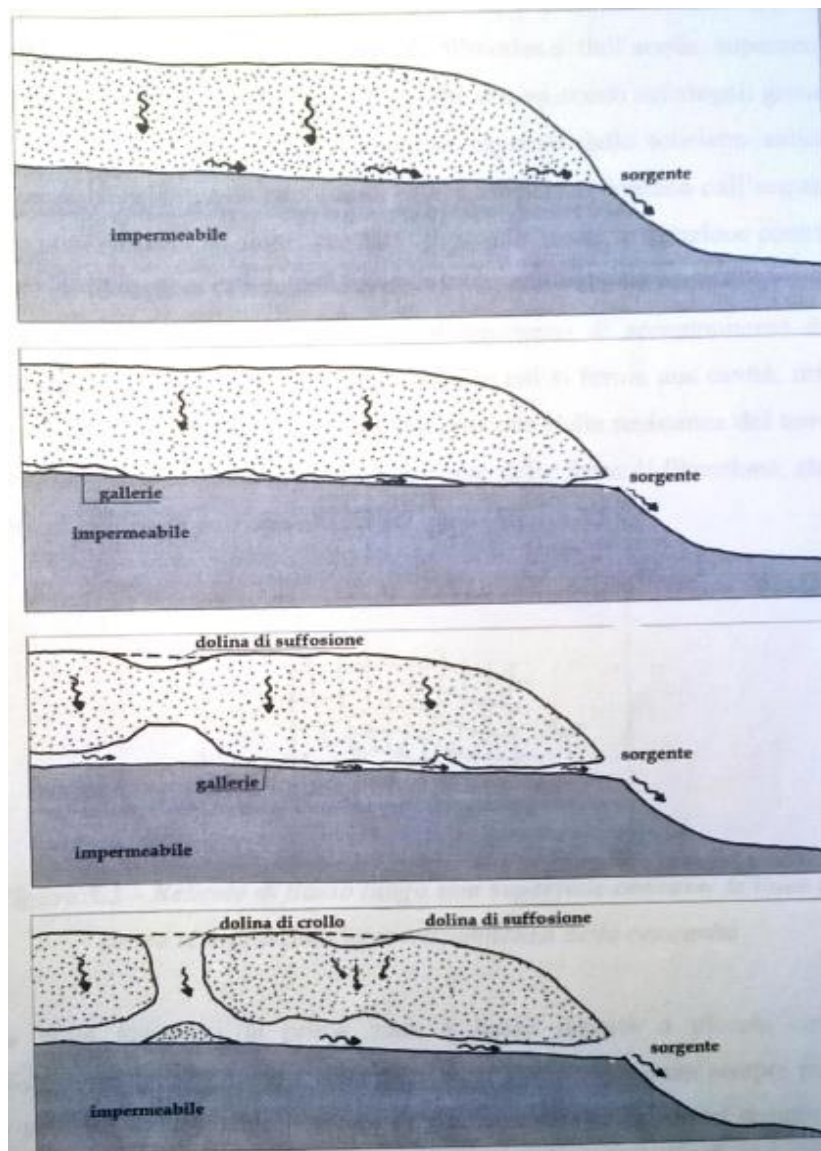


Figura 40 - Evoluzione delle cavità in presenza di un'interfaccia tra strato permeabile e substrato impermeabile (modificato da Bonomi e Villa, 2006)

Di seguito vengono riportati due diversi metodi che, basandosi sulle condizioni precedentemente esposte, possono essere applicati con l'obiettivo di mostrare l'eventuale suscettibilità a fenomeni di piping.

Il primo è un metodo elaborato da Kenney e Lau (1985) e si basa sulla valutazione della stabilità della granulometria del materiale; gli autori sfruttano la curva granulometrica per costruire un diagramma con F in ascissa e H in ordinata, indicando con F la percentuale di grani con diametro inferiore a un particolare valore D, mentre H rappresenta la percentuale di grani di dimensioni comprese tra D e 4D; in Figura 41 viene mostrata la metodologia che gli autori hanno seguito per il tracciamento della curva nel piano H-F partendo dalla curva granulometrica, riportata nel grafico più grande, mentre la retta identifica il minimo ammissibile per ottenere la stabilità del sistema. La granulometria viene ritenuta stabile per valori di H/F maggiori o uguali a 1,3.

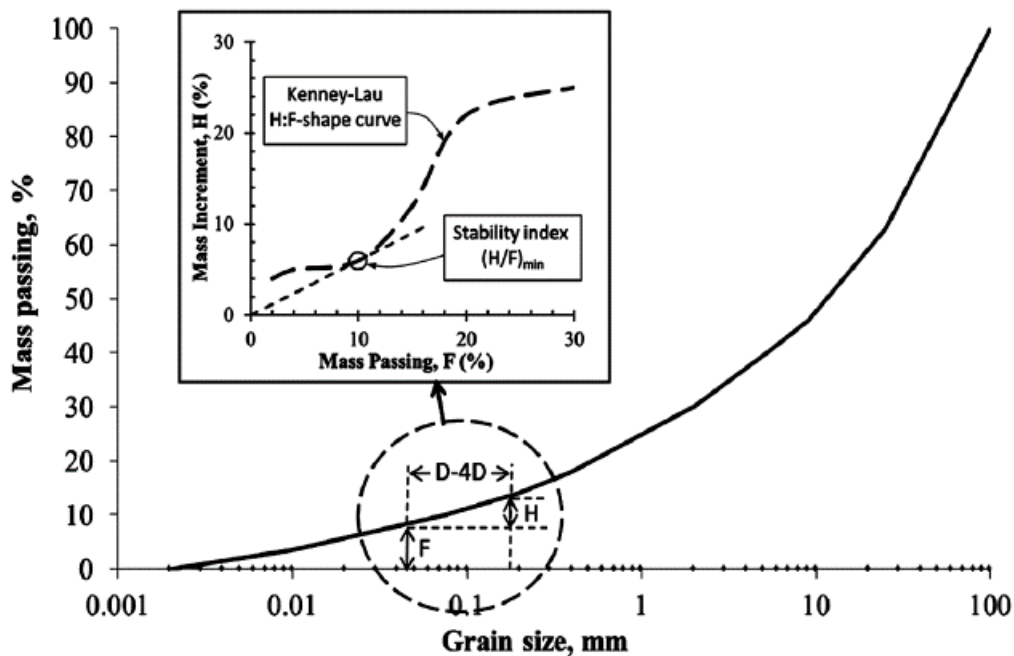


Figura 41 - Diagramma di Kenney e Lau (Ronnqvist e Viklander, 2015)

Il secondo metodo è stato elaborato da Zaslavsky e Kassif (1965) per stimare il coefficiente di sicurezza alla rottura per piping. Gli autori prendono in esame le forze agenti su un elemento di terreno fine all'interfaccia in modo da studiarne la stabilità: nel momento in cui le forze stabilizzanti non riescono più a bilanciare le azioni destabilizzanti della gravità e del gradiente idraulico la particella viene rimossa. Il gradiente critico individua quindi la soglia superata la quale si ha l'innescio del piping; questo valore viene ottenuto ponendo un fattore di sicurezza pari a 1.

$$j_{cr} = \frac{(G - 1)(1 - n)\cos\alpha}{a_1}$$

Nella formula riportata sono presenti i seguenti parametri:

- $j_{cr}$ : gradiente idraulico critico
- $G$ : gravità specifica dei grani
- $n$ : porosità del terreno
- $\alpha$ : angolo di inclinazione della superficie del terreno rispetto all'orizzontale
- $a_1$ : fattore correttivo legato alla proporzionalità tra misure di gradiente e di flusso specifico per un singolo granulo e quelle macroscopiche

### 4.3. ANALISI DELL'EVOLUZIONE DEL FENOMENO

Data la diffusione del piping, e a causa dei problemi che questo processo può causare, è possibile trovare in letteratura vari studi volti alla modellazione numerica del fenomeno, in particolare attraverso l'utilizzo di software per analisi agli elementi finiti (FEA) o modelli agli elementi discreti (DEM) che consentono di risolvere il problema accoppiato idromeccanico.

Un approccio più semplice è stato seguito da alcuni autori, che hanno scelto di studiare il fenomeno analizzando l'erosione interna in un campione sottoposto a carichi triassiali. Wang e Li (2015), per analizzare l'impatto del piping su un campione di terreno, hanno scelto di modellare numericamente un apparato triassiale con un approccio agli elementi discreti; per simulare l'azione erosiva, le particelle più fini vengono rimosse lasciando così le granulometrie più grossolane a sostenere i carichi esterni. Dalle analisi svolte viene fatto notare come il legame costitutivo elastoplastico introdotto dagli autori riproduca adeguatamente il comportamento del materiale: in particolare, il modello agli elementi discreti trova un buon riscontro con i risultati teorici per quanto riguarda il processo di riduzione degli sforzi per effetto dell'erosione interna. Questa provoca anche un danneggiamento della rete di forze generate dall'interazione tra le particelle, che viene meno quando queste vengono rimosse dal modello; il fenomeno è osservabile tramite l'approccio DEM, dato che il suo sviluppo in una prova sperimentale è quasi istantaneo e non studiabile.

Anche Scholtès et al. (2010) seguono questo approccio, studiando il riarrangiamento della microstruttura in seguito all'estrazione delle particelle dal campione. È interessante notare come il processo di rimozione tenda ad incrementare la porosità del materiale, sia in presenza di comportamento dilatante che contraente; le modifiche apportate alla microstruttura sono inizialmente limitate, a causa dell'influenza marginale delle particelle inizialmente rimosse sulla stabilità del campione, e per questo motivo alla variazione della porosità corrispondono riarrangiamenti limitati. Pur non approfondendo l'analisi del problema accoppiato idromeccanico, gli autori mostrano come un approccio agli elementi discreti consenta di ottenere buoni risultati nella modellazione dell'erosione interna del materiale, sottolineando come la variazione della porosità sia un parametro valido e di facile controllo per rappresentare l'estrazione delle particelle dal campione analizzato.

I modelli agli elementi discreti, come mostrato finora, sono uno strumento molto efficace per analizzare la dinamica accoppiata fluido-particelle nei materiali granulari saturi; tuttavia, analisi alla microscala sono poco applicabili nei problemi pratici in scala reale a causa dell'altro costo



computazionale. Per ovviare a questo problema, sono stati sviluppati metodi alternativi basati su un approccio multiscala, che rappresentano le particelle attraverso una modellazione micromeccanica agli elementi discreti, mentre per la parte fluida viene applicato un modello alla mesoscala basato sulla legge di Darcy. La natura mesh-free dei DEM consente di tracciare il movimenti delle particelle in risposta alle forze di filtrazione.

Questo approccio è stato utilizzato da El Shamy e Aydin (2008) che risolvono il problema idromeccanico con un'analisi accoppiata agli elementi discreti utilizzando il software PFC-3D (Itasca); come illustrato in Figura 42, il dominio viene suddiviso tramite una griglia sfalsata (staggered grid), dove la pressione e i parametri di stato della fase solida sono valutati ai nodi della griglia mentre la velocità del fluido viene misurata al centro della singola cella. In aggiunta gli autori si sono serviti del software SEEP/W (Geoslope Ltd) per svolgere un'analisi bidimensionale agli elementi finiti volta alla determinazione delle condizioni iniziali e delle condizioni al contorno, valutando così la variazione della velocità flusso sotterraneo.

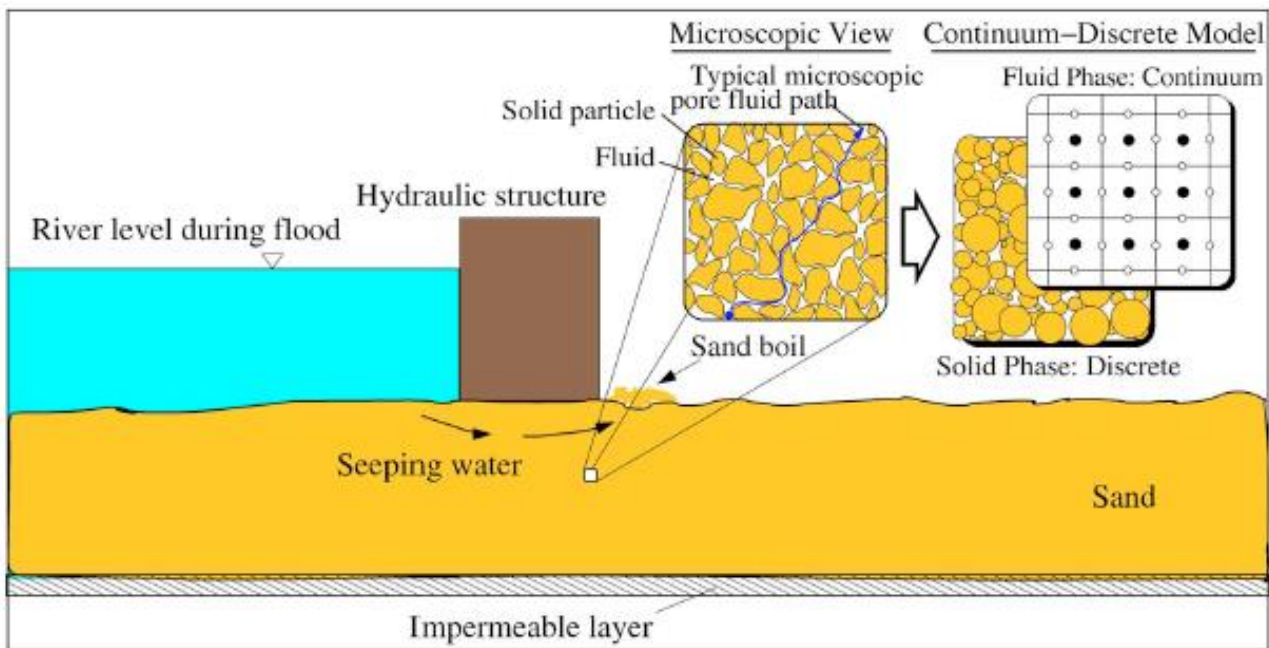


Figura 42 - Modello proposto per la rappresentazione del flusso attraverso il materiale granulare (El Shamy e Aydin, 2008)

Dai risultati dell'analisi viene fatto notare come il trasporto solido indotto dall'azione erosiva provochi un incremento della porosità del terreno; inoltre, per ridurre l'impatto computazionale dell'analisi, gli autori hanno scelto di incrementare il diametro delle particelle solide nell'analisi numerica; di conseguenza, anche le dimensioni delle celle sono state aumentate. L'analisi svolta dagli autori ha mostrato come questo accorgimento vada a influire sulla sensibilità della porosità valutata nella cella rispetto al volume della singola particella in entrata o in uscita dalla cella stessa.

Un approccio DEM viene impiegato anche da Wang e Ni (2013) che valutano l'evoluzione del processo di erosione interna risolvendo il problema accoppiato idromeccanico utilizzando il

software PFC-3D come nel caso precedente. Nel modello utilizzato dagli autori la posizione e la velocità delle particelle viene aggiornata risolvendo l'equazione del moto all'interno dello stesso spazio temporale: in questo modo si ha una variazione della porosità del mezzo che influenza la distribuzione delle pressioni e del campo di velocità. Viene inoltre tenuto conto della possibile variazione del flusso da laminare a turbolento, con conseguente passaggio rispettivamente da una legge di Darcy lineare a una non lineare: questa variazione, come fanno osservare gli autori, può essere simulata utilizzando una modellazione agli elementi discreti. In Figura 43 viene riportato lo sviluppo nel tempo del processo di erosione in uno dei provini modellati con PFC-3D: nella fase iniziale solo una piccola parte delle particelle più fini viene rimossa dall'acqua, fuoriuscendo dal provino attraverso il foro di uscita circolare le cui dimensioni sono state scelte dagli autori in fase di modellazione. Successivamente, l'incremento del carico idraulico provoca un aumento del flusso che inizia a coinvolgere anche le particelle più grossolane del terreno, fino a raggiungere la formazione di un "pozzo" di uscita nella fase finale dell'analisi. Per mostrare la validità di questo procedimento, gli autori riportano un confronto tra il modello numerico e le prove in laboratorio, evidenziando una ragionevole somiglianza tra i risultati ottenuti con i due metodi.

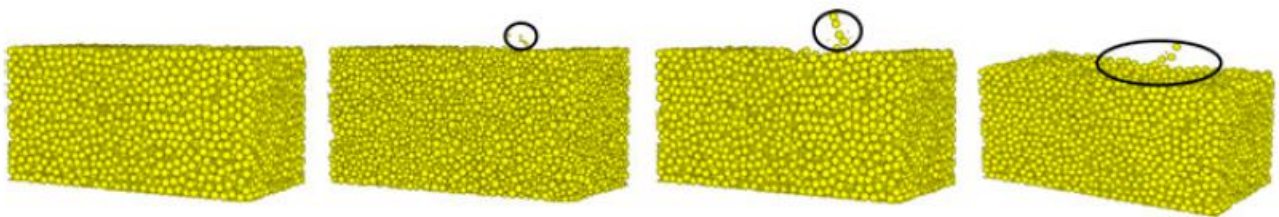


Figura 43 - Sviluppo del tempo dell'azione erosiva, partendo dallo stato iniziale (a sinistra) fino al completo sviluppo del fenomeno (a destra) (Wang e Ni, 2013)

Uno schema per l'analisi numerica del fenomeno è stato realizzato da Fujisawa et al. (2010), che utilizzano un modello agli elementi finiti (FEM) per analizzare la formazione e lo sviluppo delle cavità nel terreno; questa sequenza, riportata in Figura 44, è riferita al singolo step temporale, e viene perciò ripetuta fino alla fine della simulazione. Durante l'avanzamento dell'analisi numerica, per effetto dell'azione erosiva, la rimozione delle particelle causa l'aumento della porosità nel terreno; di conseguenza nei successivi istanti temporali la cavità continua a svilupparsi creando un percorso preferenziale per il flusso.

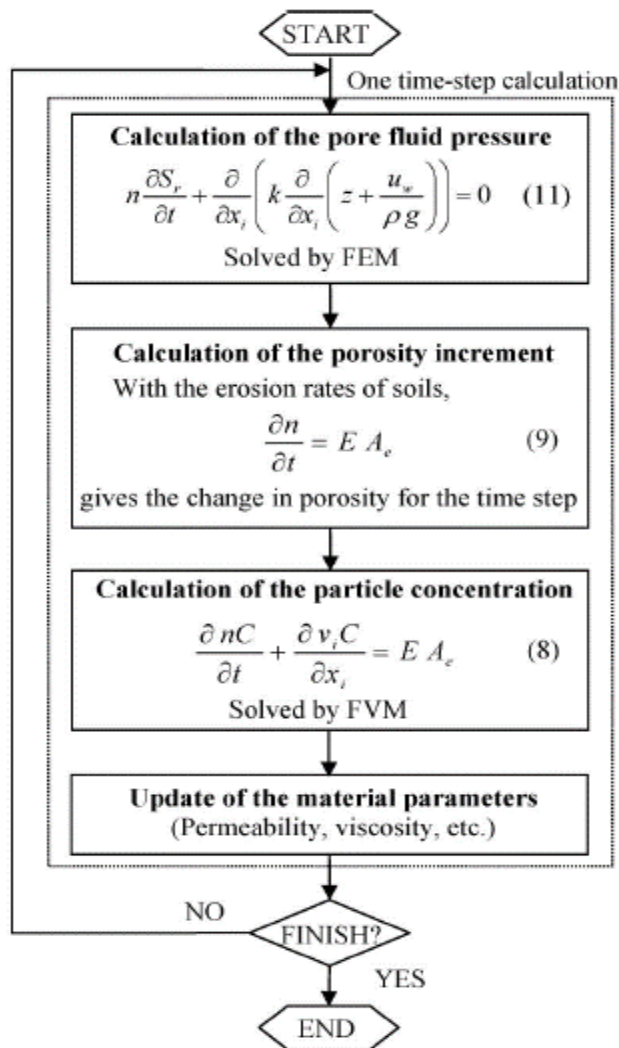


Figura 44 - Diagramma dell'analisi numerica (Fujisawa et al., 2010)

PARAMETRI:  $S_r$ : grado di saturazione;  $n$ : porosità del terreno;  $k$ : permeabilità;  $h$ : carico idraulico;  $z$ : quota;  $u_w$ : pressione del fluido;  $\rho$ : densità del terreno;  $g$ : accelerazione di gravità;  $E$ : tasso di erosione del terreno;  $A_e$ : area della regione erodibile per unità di volume;  $C$ : concentrazione volumetrica di particelle solide;  $v_f$ : velocità di filtrazione.

All'interno del singolo passo temporale viene innanzitutto risolta l'equazione di filtrazione rispetto alla pressione  $u_w$ , attraverso un'analisi agli elementi finiti. Nella fase successiva viene aggiornato il valore della porosità per ogni cella, e con il dato così ottenuto si va a calcolare la concentrazione delle particelle utilizzando un metodo ai volumi finiti (FVM) basato sul FEM applicato finora. Alla fine di questo processo è quindi possibile aggiornare i parametri del materiale, che verranno utilizzati per ripetere il procedimento al successivo step temporale. In particolare, a causa dell'azione erosiva, si assiste alla variazione della densità e della viscosità per quanto riguarda la fase fluida, oltre alla permeabilità del terreno. Per i primi due parametri vengono applicate le seguenti equazioni (Julien, 1998):

$$\rho = C\rho_s + (1 - C)\rho_w$$

$$\mu = \eta(1 + 2,5C)$$

dove  $\rho_w$  e  $\eta$  indicano rispettivamente la densità e la viscosità dell'acqua, mentre  $\rho_s$  rappresenta la densità della fase solida. Per il calcolo della permeabilità viene invece impiegata la seguente equazione, applicata da autori quali Lambe e Whitman (1979) e Budhu (2007):

$$k_s = D_r^2 \frac{\rho g}{\mu} \frac{C_T n^2}{(1-n)^3}$$

In questa formula vengono indicati con  $C_T$  e  $D_r$  rispettivamente una costante relativa al materiale e il diametro rappresentativo delle particelle solide; si noti come sia presente una diretta dipendenza dalla porosità del materiale.

Sempre tramite un'analisi agli elementi finiti, Bersan et al. (2013) hanno svolto uno studio con l'obiettivo di confrontare diverse strategie di modellazione del problema; il software COMSOL utilizzato dagli autori descrive il flusso nel mezzo poroso con la legge di Darcy, mentre per il moto all'interno della cavità vengono utilizzate le equazioni di Navier-Stokes. Nella scelta delle dimensioni della mesh gli autori fanno notare come, per risolvere queste equazioni, sia necessaria una distribuzione degli elementi particolarmente fitta vicino alla cavità; la differente dimensione degli elementi è mostrata in Figura 45.

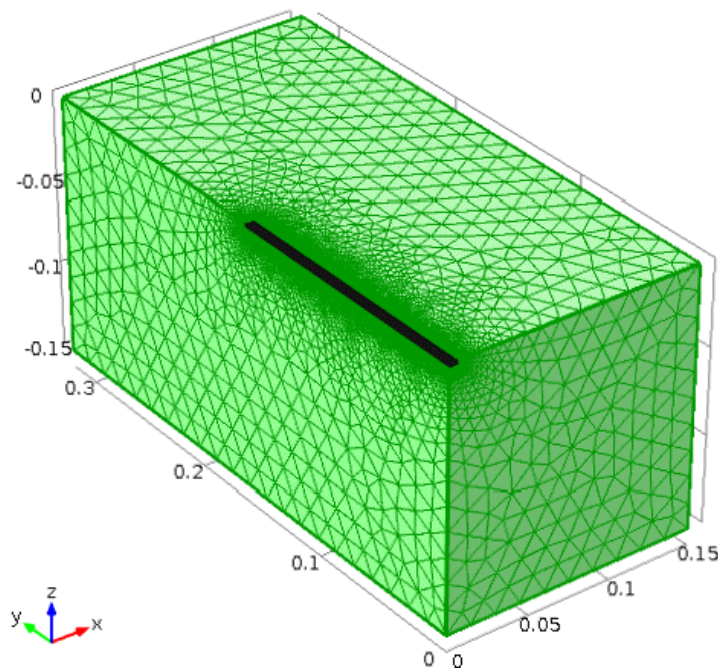


Figura 45 - Modello numerico tridimensionale; l'area in nero corrisponde alla cavità (Bersan et al., 2013)



Per risolvere l'analisi in esame gli autori presentano tre diversi approcci, nei quali vengono risolte diverse equazioni per descrivere flusso nel materiale e nella cavità:

- Free and Porous Media (FPM), che usa l'equazione di Brinkman per la matrice e Navier-Stokes per la cavità.
- Darcy's Law (DL), basato sulla sola legge di Darcy.
- Darcy's Law + Fracture Flow (DL+FF), dove viene risolta la legge di Darcy per la matrice e una formulazione modificata della medesima equazione, integrata in COMSOL, per la cavità.

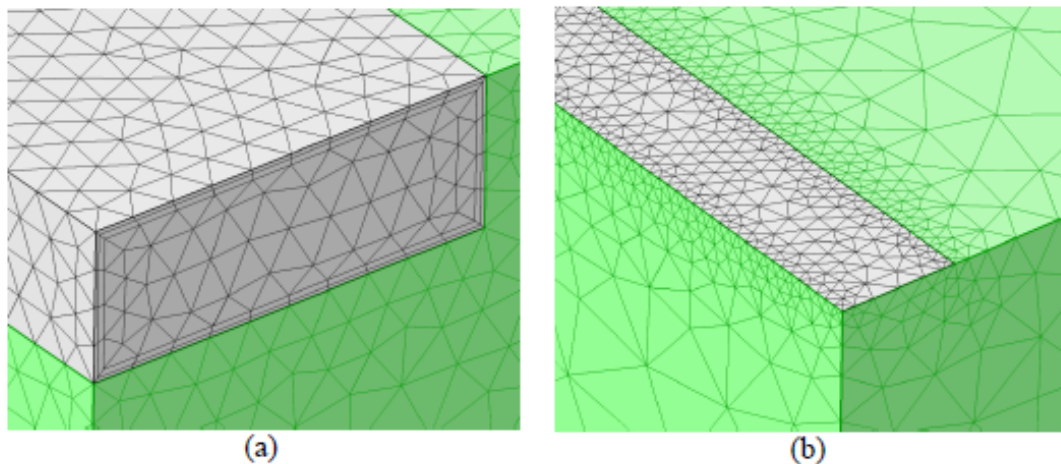


Figura 46 - Dettaglio della discretizzazione: a) dominio 3D b) dominio 2D utilizzato nell'interfaccia Fracture Flow (Bersan et al., 2013)

Rispetto all'approccio FPM, l'utilizzo della legge di Darcy consente di ridurre leggermente il numero di elementi, guadagnando in termini di costo computazionale; un ulteriore miglioramento in questo senso si ottiene con il terzo approccio, sia nel caso bidimensionale che tridimensionale. Infatti, quando viene utilizzata l'interfaccia Fracture Flow, la discretizzazione della cavità viene semplificata attraverso la rappresentazione di un contorno bidimensionale invece che un dominio 3D, come mostrato in Figura 46, riducendo così il numero di elementi necessari. Dai risultati delle analisi si nota come, a livello fisico, la cavità generata dal piping agisca come un dreno: per questo motivo avvicinandosi al pipe le pressioni diminuiscono, fino ad annullarsi quando si raggiunge la cavità stessa. Questa regione del dominio è quindi caratterizzata da alti valori permeabilità, di conseguenza la velocità del flusso al suo interno risulta di alcuni ordini di grandezza maggiore rispetto a quella misurata nella matrice porosa.

Il metodo agli elementi finiti viene inoltre applicato da Vandenoer et al. (2015), che utilizzano il software Abaqus 6.12 (Simulia) per descrivere l'evoluzione del piping sia nel caso bidimensionale che tridimensionale; il caso 2D è preso dagli autori come punto di partenza per lo studio del problema, che viene ampliato da un'analisi 3D nella quale viene approfondita l'influenza della larghezza del dominio sui risultati numerici. Per svolgere l'analisi bidimensionale agli elementi finiti, gli autori hanno scelto di impiegare elementi quadrilateri a 4 nodi (CPE4P), la cui dimensione viene variata nel dominio al fine di ottenere risultati sufficientemente precisi senza incidere troppo sul tempo di calcolo. Nel caso tridimensionale vengono utilizzati i corrispondenti elementi 3D (C3D8P).

In questo secondo caso viene inizialmente scelto di simulare la presenza di cavità sotterranee introducendo un materiale poroso ad alta permeabilità; con l'ausilio di risultati derivanti da prove sperimentali, il modello è stato affinato aumentando anche la permeabilità della sabbia circostante la cavità. Gli autori prendono in considerazione diverse tipologie di punti di uscita a valle di un argine: i risultati delle analisi mostrano come un punto singolo punto di uscita in uno strato impermeabile risulti più suscettibile al piping rispetto ad una configurazione con punti più numerosi o con l'introduzione di un canale. Le analisi svolte sul modello tridimensionale mostrano valori di velocità del flusso in uscita superiori rispetto al caso 2D, evidenziando anche una dipendenza di questo parametro dalla larghezza del modello; gli autori osservano come la velocità di uscita segua un andamento crescente finché la larghezza del modello risulta pari alla lunghezza della cavità, dove si raggiunge un valore costante che rimane invariato anche per modelli di maggiori dimensioni.

L'influenza di questo parametro viene approfondita valutando, nelle diverse fasi di sviluppo della cavità, il rapporto tra la velocità di uscita al centro del foro nel caso 3D con quella misurata in 2D: come viene mostrato in Figura 47 la dipendenza dalla larghezza del modello introdotta nel caso tridimensionale risulta molto evidente nelle fasi intermedie (dallo stage 2 al 5), mentre risulta pressoché ininfluenza quando la cavità è completamente sviluppata (stage 6 e 7) e fornisce quindi contributo dominante rispetto all'area di afflusso. In base ai dati ottenuti gli autori osservano quindi come sia necessario imporre una larghezza del modello pari almeno al triplo della lunghezza di erosione per descrivere correttamente l'evoluzione del fenomeno nel caso 3D.

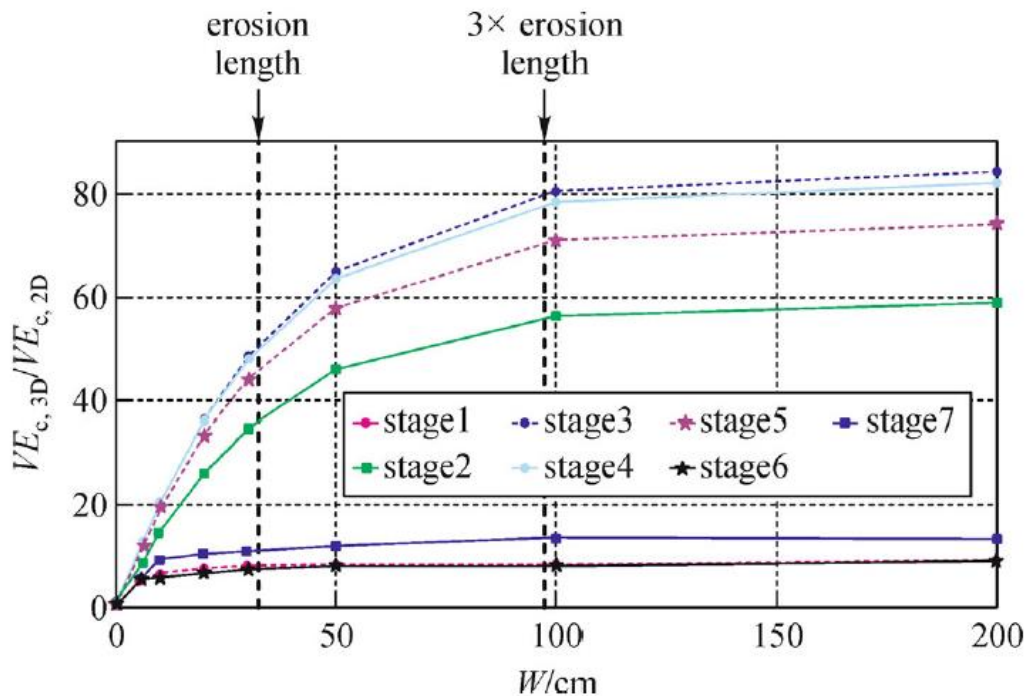


Figura 47 - Evoluzione della massima velocità di uscita in funzione della larghezza del modello W nelle diverse fasi di sviluppo del piping (Vandenboer et al., 2015)

#### 4.4. ANALISI DEGLI EFFETTI SULLE CONDIZIONI DI STABILITA'

Come mostrato in precedenza, lo sviluppo di cavità nel terreno a causa dell'erosione interna è in grado di generare effetti instabilizzanti nell'area interessata dal fenomeno; spesso il piping è indicato come una delle cause principali del collasso di strutture idrauliche, quali dighe o argini di contenimento, e per questo motivo vari studi sono stati compiuti per mostrare come l'evoluzione di questo processo porti a una condizione di instabilità. Ad esempio, El Shamy e Aydin (2008) studiano la risposta di un argine all'aumento del carico idraulico, mettendo in evidenza come lo sviluppo dell'azione erosiva sotterranea provochi una diminuzione della resistenza del terreno di fondazione, con conseguente collasso della struttura.

Un'altra analisi del fenomeno del piping e dei suoi effetti sulle condizioni di stabilità viene presentata nel lavoro di Bonomi e Villa (2006) nell'ambito di uno studio idrogeologico sul dissesto della Val di Stava, dove nel 1985 si è assistito al crollo di due bacini di decantazione; nel ricercare le cause che hanno provocato la liquefazione e il conseguente collasso delle due opere, gli autori considerano la presenza di cavità all'interno delle strutture studiandone lo sviluppo nel tempo.

Lo studio è basato sull'implementazione di un modello numerico per un'analisi alle differenze finite tramite il software FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua, Itasca), con l'obiettivo di simulare l'evoluzione delle cavità nel tempo. Anche in questo caso la dimensione delle celle è variabile a seconda dell'area, creando una mesh più fitta nella zona di interesse, come mostra la Figura 48.

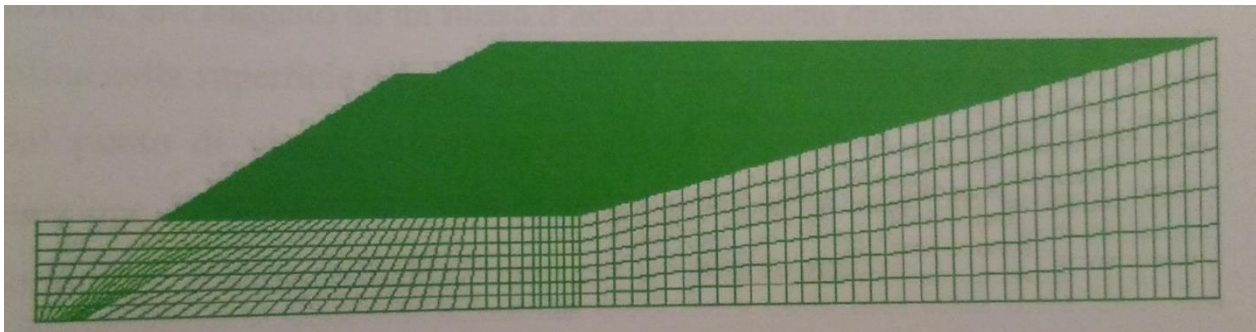


Figura 48 - Discretizzazione del dominio; si noti l'infittimento nell'area di interesse (Bonomi e Villa, 2006)

Inizialmente gli autori hanno verificato la potenziale suscettibilità della granulometria al piping, successivamente per trovare le aree instabili rispetto a tale fenomeno gli autori hanno fatto riferimento al metodo di Zaslavsky e Kassif (1965), ricavando i valori di gradiente idraulico di ciascuna cella in modo da confrontarli con i gradienti critici precedentemente calcolati; si considerano vulnerabili al piping le celle nelle quali il gradiente risultante dall'analisi è superiore al valore di soglia, come mostrato in Figura 49.

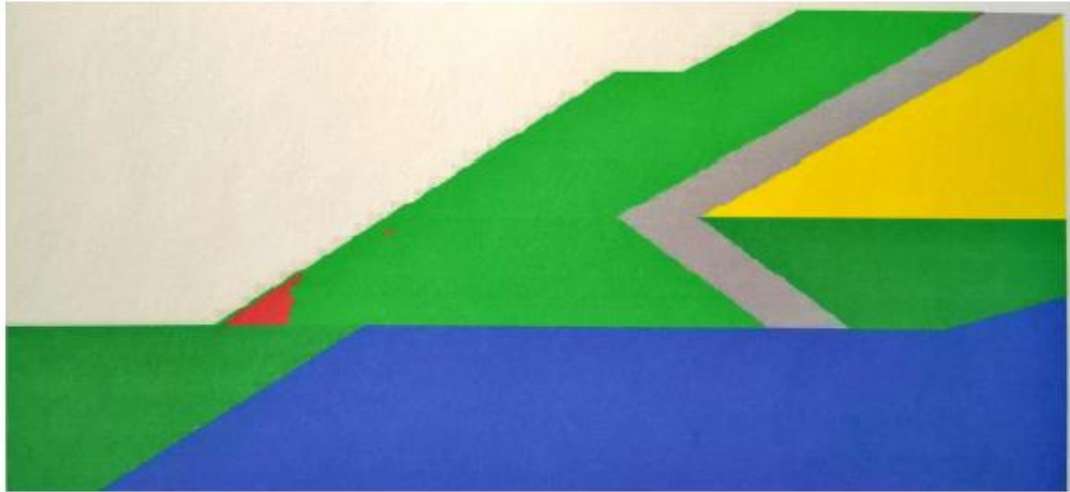


Figura 49 - Sezione del bacino di decantazione; in rosso sono indicate le celle con gradiente idraulico superiore al valore critico, perciò vulnerabili a fenomeni di piping (Bonomi e Villa, 2006)

Per studiare lo sviluppo nel tempo gli autori hanno modellato le cavità introducendo un materiale equivalente con una maggior permeabilità; inoltre, per rappresentare l'asportazione delle particelle più fini, è stata incrementata la porosità del materiale e diminuita la densità dello stesso. Come si osserva nella Figura 50 riportata di seguito, l'introduzione dei pipes causa la generazione di nuove zone suscettibili all'azione erosiva, rappresentanti di fatto la propagazione delle cavità a causa dell'aumento del gradiente idraulico: si può quindi osservare come questo sia un fenomeno autoinnescante, in quanto la presenza di una piccola cavità può dare inizio al processo di erosione, con un'evoluzione nel tempo della filtrazione e conseguente indebolimento del materiale interessato. A conferma dell'ipotesi iniziale, gli autori mostrano come lo sviluppo e l'evoluzione delle cavità nei bacini di decantazione sia una delle principali cause del liquefazione del terreno con conseguente collasso delle strutture idrauliche.



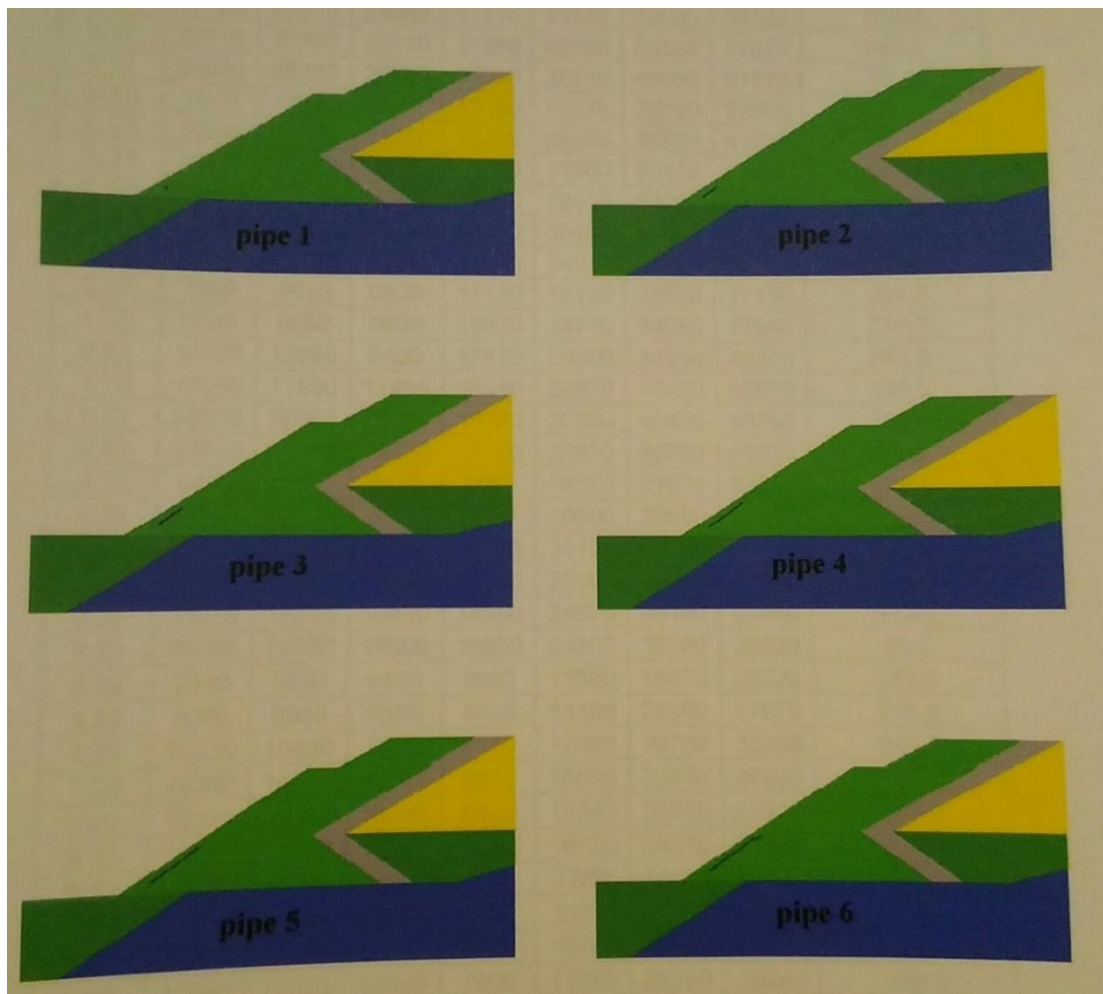


Figura 50 - Evoluzione del piping all'interno del bacino di decantazione (Bonomi e Villa, 2006)

## 5. DAL MODELLO CONCETTUALE ALLA MODELLAZIONE NUMERICA 2D

### 5.1. INTRODUZIONE

Grazie alle informazioni e ai dati precedentemente riportati è stato possibile completare la caratterizzazione geologico-tecnica dell'area in esame; si è proceduto quindi alla ricostruzione del modello concettuale del versante da utilizzare per l'implementazione del modello matematico, con l'obiettivo di valutare la dinamica del versante e l'evoluzione dei fenomeni in atto.

In particolare, le analisi condotte attraverso la modellazione numerica hanno permesso di simulare il processo di erosione causato dal *piping*, mostrando l'andamento del fattore di sicurezza con l'evolversi del fenomeno. Inizialmente, le analisi di stabilità sono state svolte senza ricarica superficiale; successivamente sono state introdotte precipitazioni gradualmente più intense, passando da dati medi stagionali a valori relativi a eventi critici, al fine di studiarne l'impatto sull'evoluzione dell'erosione interna e la conseguente variazione del fattore di sicurezza associato al pendio.

Di seguito vengono illustrate le varie fasi di implementazione del modello numerico.

### 5.2. GEOMETRIA E DEFINIZIONE DELLA MESH

Le analisi sono state condotte considerando la geometria riportata in Figura 51, ricostruita sulla base delle considerazioni esposte nei paragrafi precedenti.

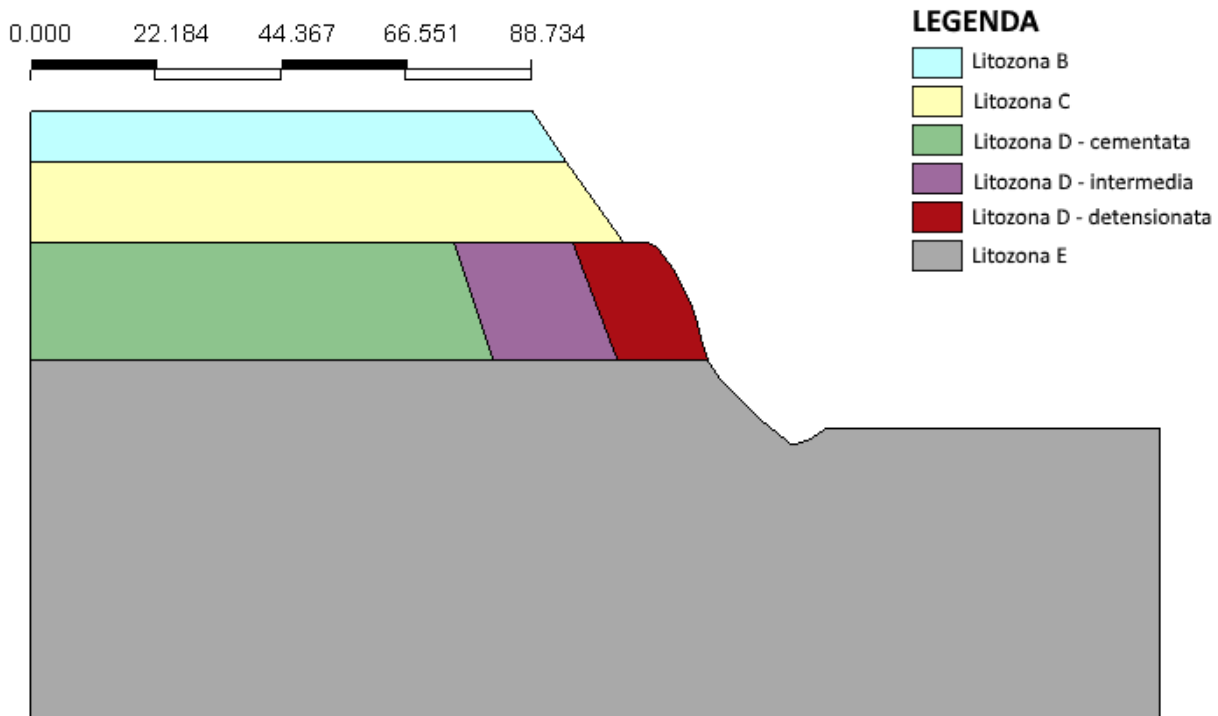


Figura 51 - Geometria 2D del pendio

Come si può notare dalla geometria riportata, la litozona D è stata suddivisa in tre diverse aree caratterizzate da differenti valori dei parametri meccanici: con questa scelta è stata rappresentata la condizione non omogenea del Ceppo dell'Olona che, come osservato nello studio dell'assetto idrogeologico del PGT di Gornate Olona (2014), presenta alcune zone detensionate caratterizzate da una minore resistenza meccanica e una permeabilità maggiore. Inoltre, rispetto a quanto esposto in precedenza, nel modello matematico si è scelto di non rappresentare la litozona A, caratterizzata da uno spessore ridotto che la rende trascurabile nell'analisi di stabilità del versante.

Per la discretizzazione del dominio si è scelto di utilizzare una mesh di elementi quadrangolari a 8 nodi, riportata in Figura 52.

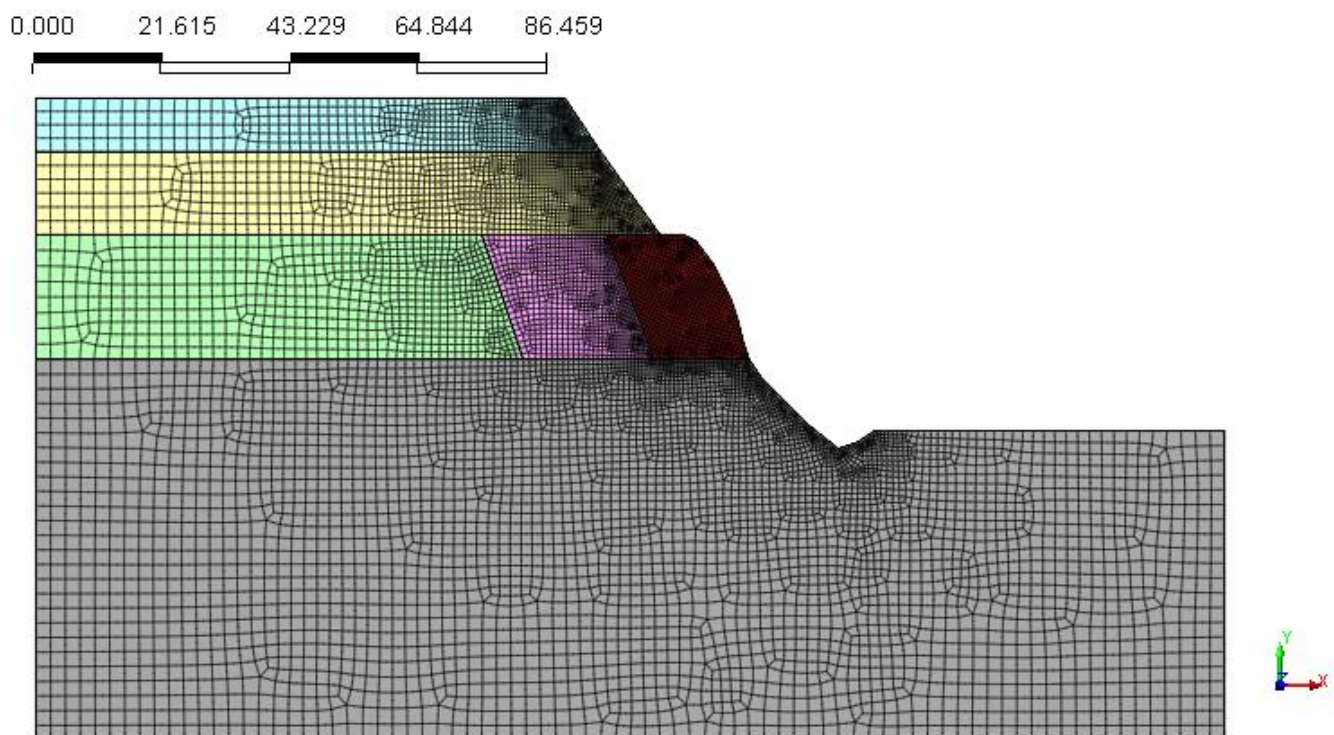


Figura 52 - Mesh del dominio 2D

La mesh è stata realizzata in modo da essere più fitta nell'area di interesse, ovvero nella parte destra del versante, al fine di ottenere un maggior grado di dettaglio; in questa zona gli elementi finiti, mostrati più in dettaglio in Figura 53, hanno dimensione 0,5m. In direzione sia orizzontale che verticale la mesh è stata gradualmente allargata fino al raggiungimento dei confini del dominio, dove gli elementi hanno dimensione pari a 2,5m.

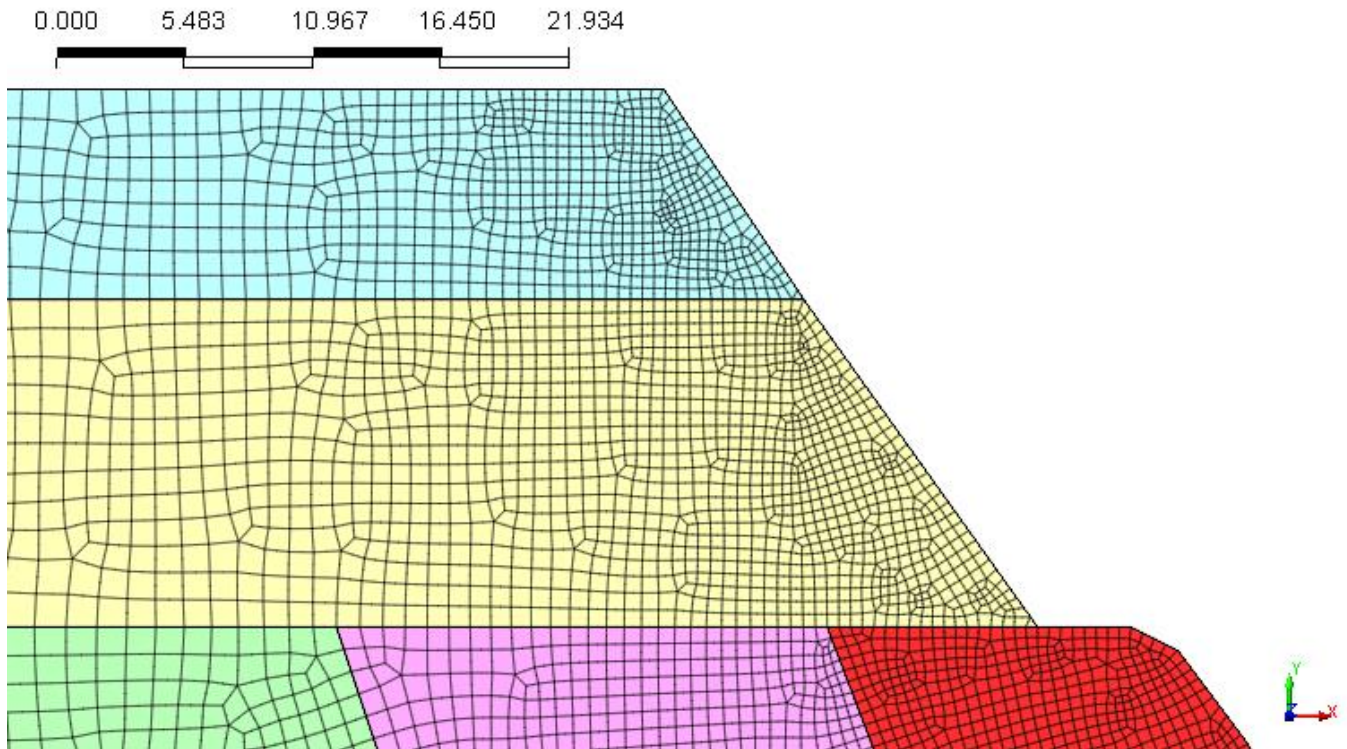


Figura 53 - Dettaglio della mesh 2D

### 5.3. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI

Sulla base del modello concettuale precedentemente esposto è stato possibile giungere alla definizione dei parametri meccanici e idraulici relativi a ciascun materiale incluso nel modello. Per descrivere il comportamento dei terreni è stato utilizzato un legame costitutivo elasto-plastico perfetto con criterio di rottura alla Mohr-Coulomb; sono stati perciò ricavati i parametri necessari all'implementazione di tale modello per l'analisi numerica.

I valori dei parametri meccanici e idraulici sono riportati nella Tabella 2; non sono presenti i dati relativi alla litozona A, che come specificato in precedenza non è stata considerata nello svolgimento delle analisi numeriche.



	LITAZONA					
	B	C	D-cementata	D-intermedia	D-detensionata	E
<b>E [KPa]</b>	5000	10000	70000	60000	50000	12000
<b>v [-]</b>	0.35	0.3	0.27	0.27	0.27	0.32
<b><math>\gamma_{sat}</math> [KN/m<sup>3</sup>]</b>	17	19	21	21	21	19
<b><math>\gamma'</math> [KN/m<sup>3</sup>]</b>	7	9	11	11	11	9
<b>c [KPa]</b>	35	70	80	70	50	90
<b><math>\phi</math> [°]</b>	28	32	39	39	39	43
<b>k [m/s]</b>	10 <sup>-5</sup>	5·10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-3</sup>

Tabella 2 - Caratteristiche meccaniche e idrauliche dei materiali

#### 5.4. CONDIZIONI INIZIALI E CONDIZIONI AL CONTORNO

Per analizzare le condizioni di stabilità del pendio sono state svolte diverse analisi numeriche; dopo aver definito il dominio di calcolo, si è proceduto alla sua discretizzazione e all'assegnazione dei diversi materiali. Infine, per inizializzare il modello, si è proceduto imponendo le condizioni iniziali e al contorno, variabili a seconda del caso in esame.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno e iniziali, per tutte le analisi 2D si sono considerati:

- Spostamenti nulli in direzione orizzontale sui bordi del dominio;
- Spostamenti nulli in direzione orizzontale e verticale lungo la base del dominio;
- Stato di sforzo iniziale dipendente dal peso proprio del materiale.

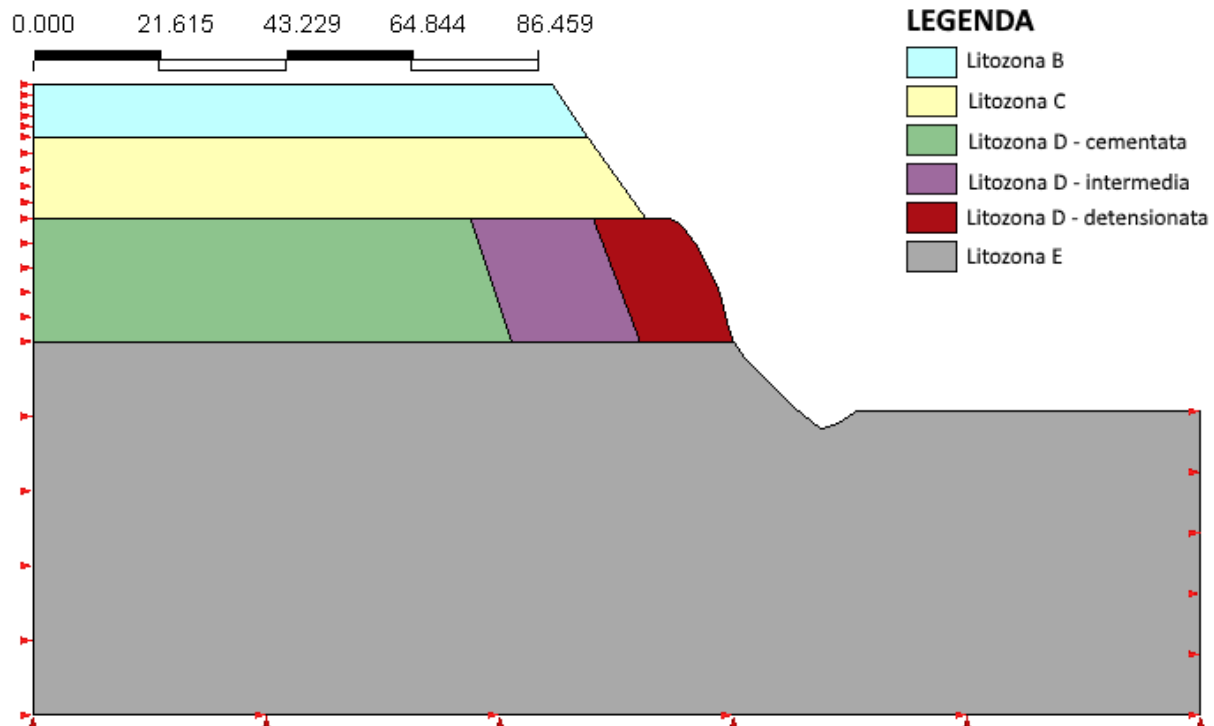


Figura 54 - Condizioni al contorno imposte ai confini del dominio

Per quanto riguarda le analisi che includono la componente idraulica sono state imposte le seguenti condizioni al contorno aggiuntive, mostrate in Figura 55:

- Carico costante a monte dell'acquifero più superficiale, all'interno della Litozona C, pari a 348 m s.l.m.
- Carico costante a monte dell'acquifero più profondo, che interessa la Litozona E, pari a 301 m s.l.m.
- Carico costante a valle, imposto sulla superficie libera della litozona E, pari a 299 m s.l.m.
- Ricarica per infiltrazione imposta sulla superficie del pianalto, calcolata utilizzando dati di pioggia depurati dalle perdite dovute all'evapotraspirazione.

Inoltre, nelle analisi di stabilità, è stata imposta come condizione iniziale la distribuzione delle pressioni ricavata grazie alle analisi di filtrazione, eseguite con le condizioni precedentemente esposte.

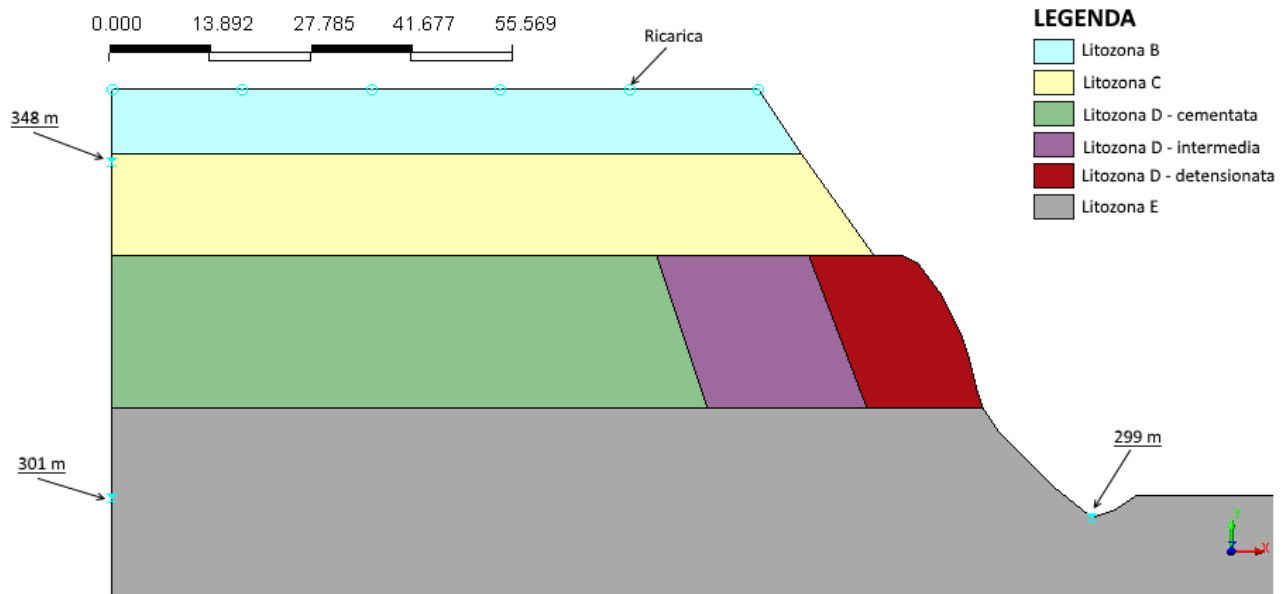
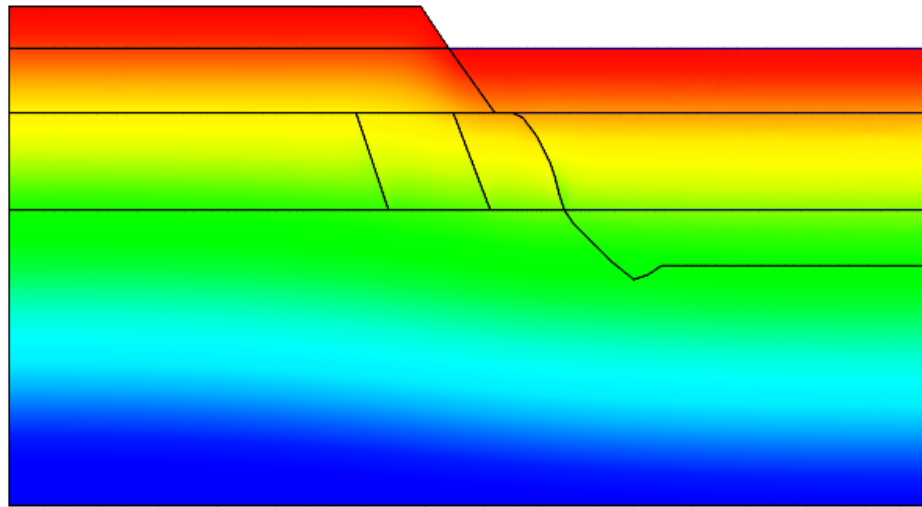


Figura 55 - Condizioni idrauliche al contorno

La stato di sforzo iniziale è stato ricavato simulando la generazione del pendio, inserendo in corrispondenza delle litozone che compongono il versante una serie di strati che sono stati di volta in volta rimossi fino al raggiungimento della geometria considerata in Figura 51.

Come si può osservare dalla Figura 56 inizialmente lo stato di sforzo verticale è puramente geostatico. Con la progressiva rimozione del materiale l'intera superficie del topografica del pendio è caratterizzata da valori di sforzo gradualmente minori caratterizzati da un colore tendente al rosso, con l'eccezione dell'area tra le litozone D ed E colorata di giallo (Figura 59). Nel caso di sforzo orizzontale, inizialmente uniforme (Figura 60) si osserva invece una zona con valori tendenti allo zero all'interno della litozona D (Figura 63), giustificata in parte dall'influenza delle condizioni al contorno e dai parametri meccanici di questa litozona, significativamente maggiori rispetto agli altri strati.

0.000 24.186 48.372 72.558 96.744

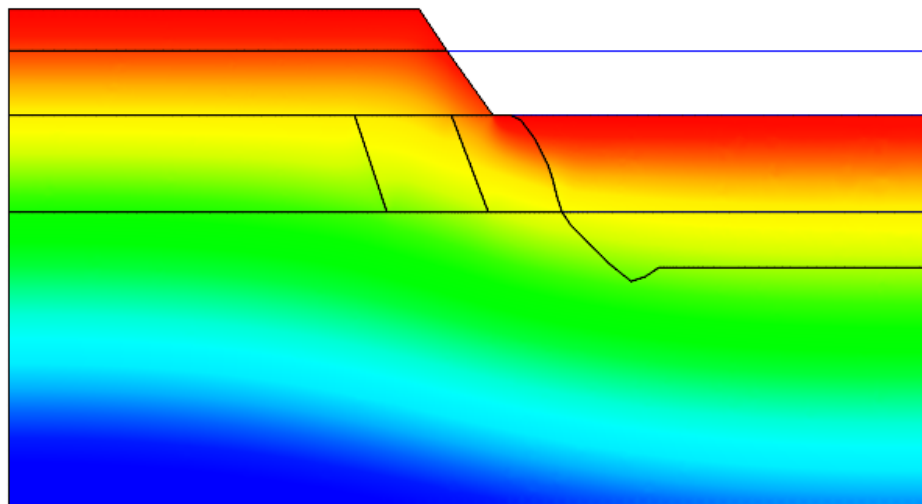


[UNIT] kN , m  
 [DATA] CSNL : CondINizi , Soil SYY' Center , Iniziale\_CDE-Step 001(1)



Figura 56 - Stato di sforzo verticale iniziale nel caso di pendio asciutto

0.000 24.186 48.372 72.558 96.744



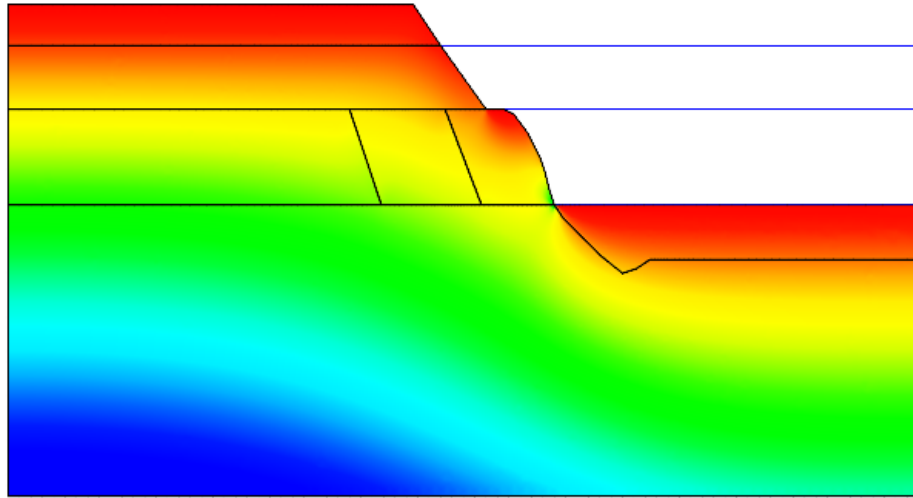
[UNIT] kN , m  
 [DATA] CSNL : CondINizi , Soil SYY' Center , DE-Step 001(1)



Figura 57 - Stato di sforzo verticale nel caso di pendio asciutto (Fase 1)



0.000 24.186 48.372 72.558 96.744



2D ELEMENT STRESS  
Soil SYY' Center  
UNIT(kN/m<sup>2</sup>)

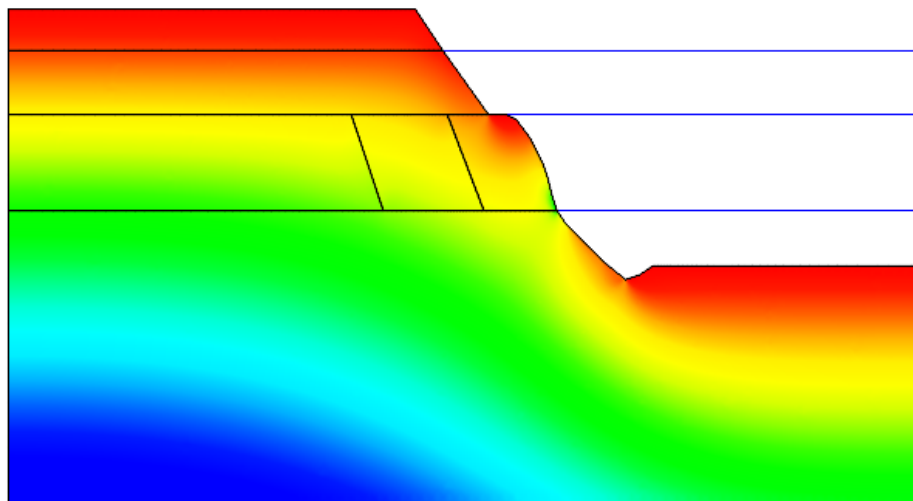
7.2%	+0.00000e+000
10.0%	-1.00000e+002
12.4%	-2.00000e+002
11.5%	-3.00000e+002
11.2%	-4.00000e+002
10.2%	-5.00000e+002
6.6%	-6.00000e+002
5.2%	-7.00000e+002
4.2%	-8.00000e+002
3.6%	-9.00000e+002
3.2%	-1.00000e+003
2.9%	-1.10000e+003
2.6%	-1.20000e+003
2.0%	-1.30000e+003
1.8%	-1.40000e+003
1.5%	-1.50000e+003
1.3%	-1.60000e+003
1.1%	-1.70000e+003
0.9%	-1.80000e+003
0.6%	-1.90000e+003
0.6%	-2.00000e+003

[UNIT] kN , m  
[DATA] CSNL : CondINizi , Soil SYY' Center , E-Step 001(1)



Figura 58 - Stato di sforzo verticale nel caso di pendio asciutto (Fase 2)

0.000 24.186 48.372 72.558 96.744



2D ELEMENT STRESS  
Soil SYY' Center  
UNIT(kN/m<sup>2</sup>)

8.5%	+0.00000e+000
9.9%	-1.00000e+002
12.0%	-2.00000e+002
10.7%	-3.00000e+002
10.8%	-4.00000e+002
11.0%	-5.00000e+002
6.8%	-6.00000e+002
5.3%	-7.00000e+002
4.3%	-8.00000e+002
3.6%	-9.00000e+002
3.2%	-1.00000e+003
2.5%	-1.10000e+003
2.2%	-1.20000e+003
2.0%	-1.30000e+003
1.7%	-1.40000e+003
1.5%	-1.50000e+003
1.3%	-1.60000e+003
1.1%	-1.70000e+003
0.9%	-1.80000e+003
0.6%	-1.90000e+003
0.6%	-2.00000e+003

[UNIT] kN , m  
[DATA] CSNL : CondINizi , Soil SYY' Center , Finale-Step 001(1)



Figura 59 - Stato di sforzo verticale nel caso di pendio asciutto (Fase 3)

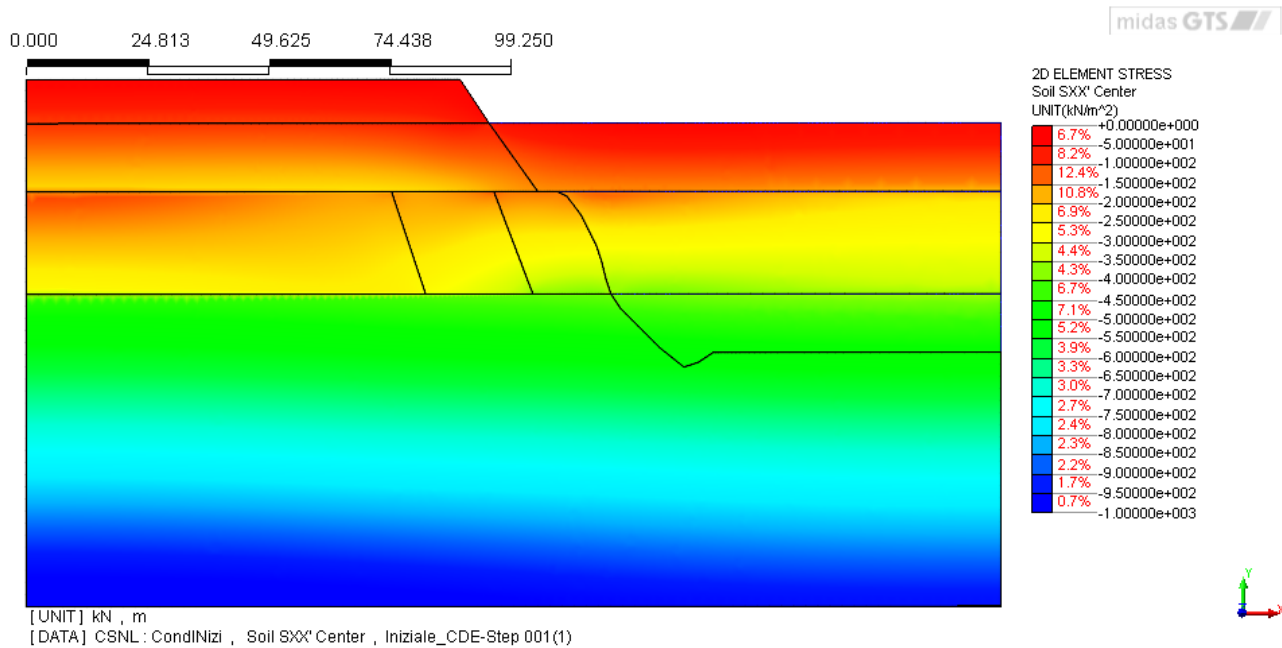


Figura 60 - Stato di sforzo orizzontale iniziale nel caso di pendio asciutto

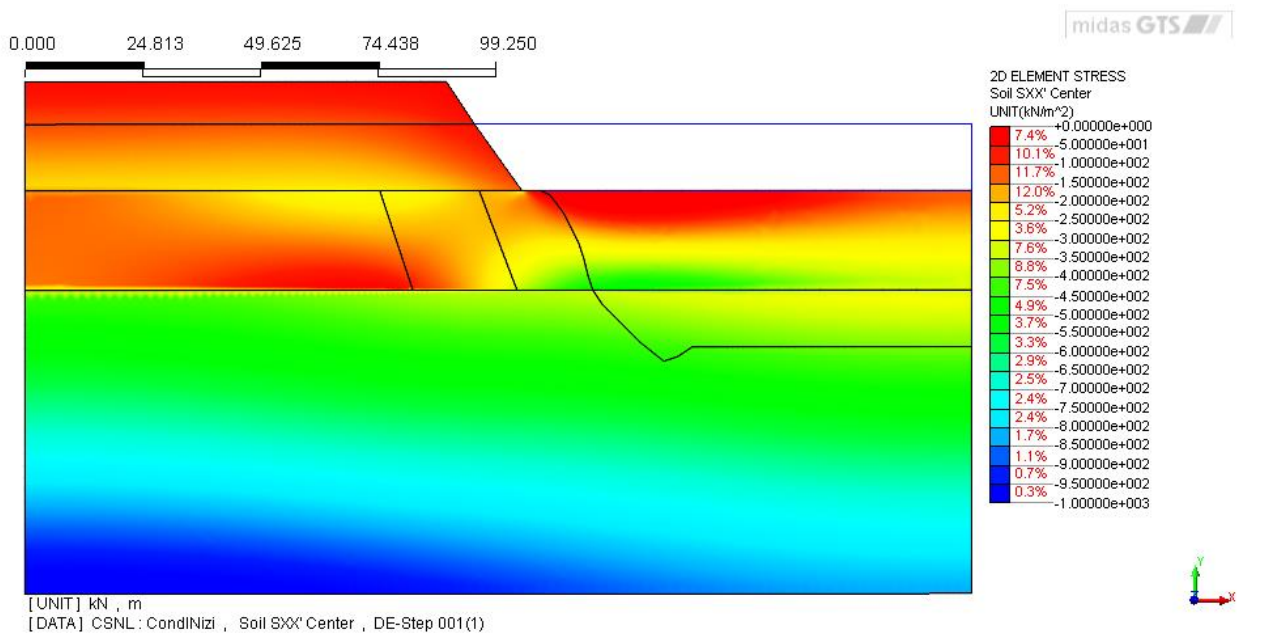


Figura 61 - Stato di sforzo orizzontale nel caso di pendio asciutto (Fase 1)

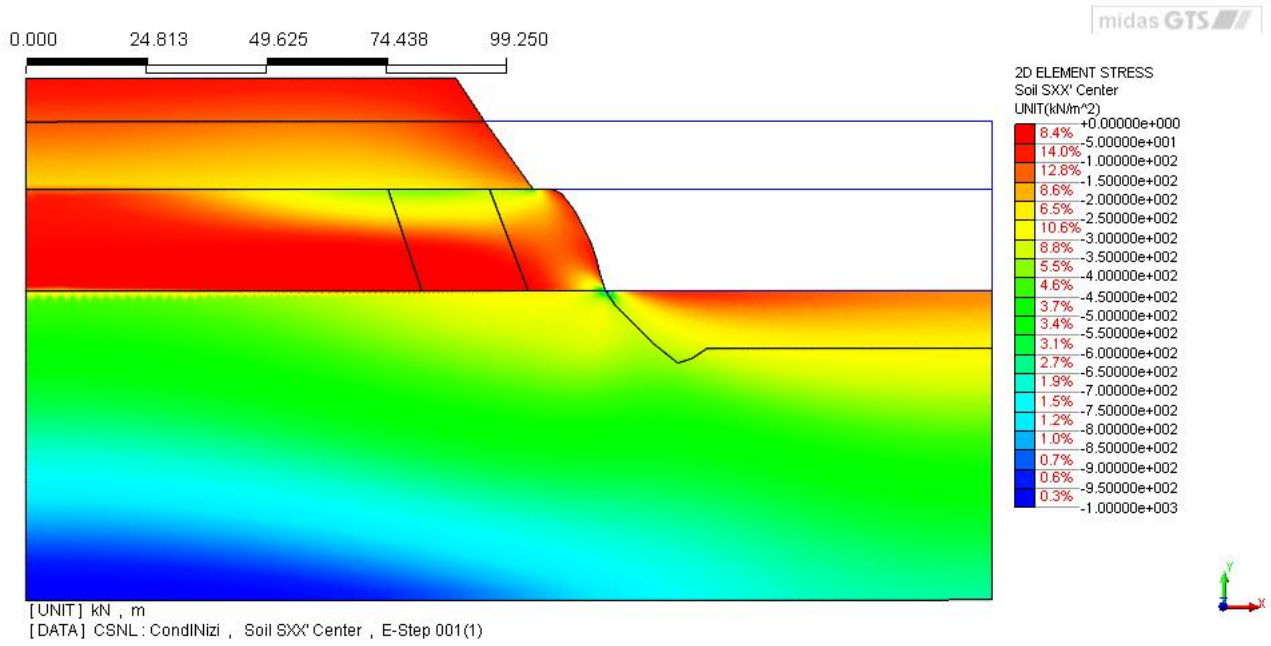


Figura 62 - Stato di sforzo orizzontale nel caso di pendio asciutto (Fase 2)

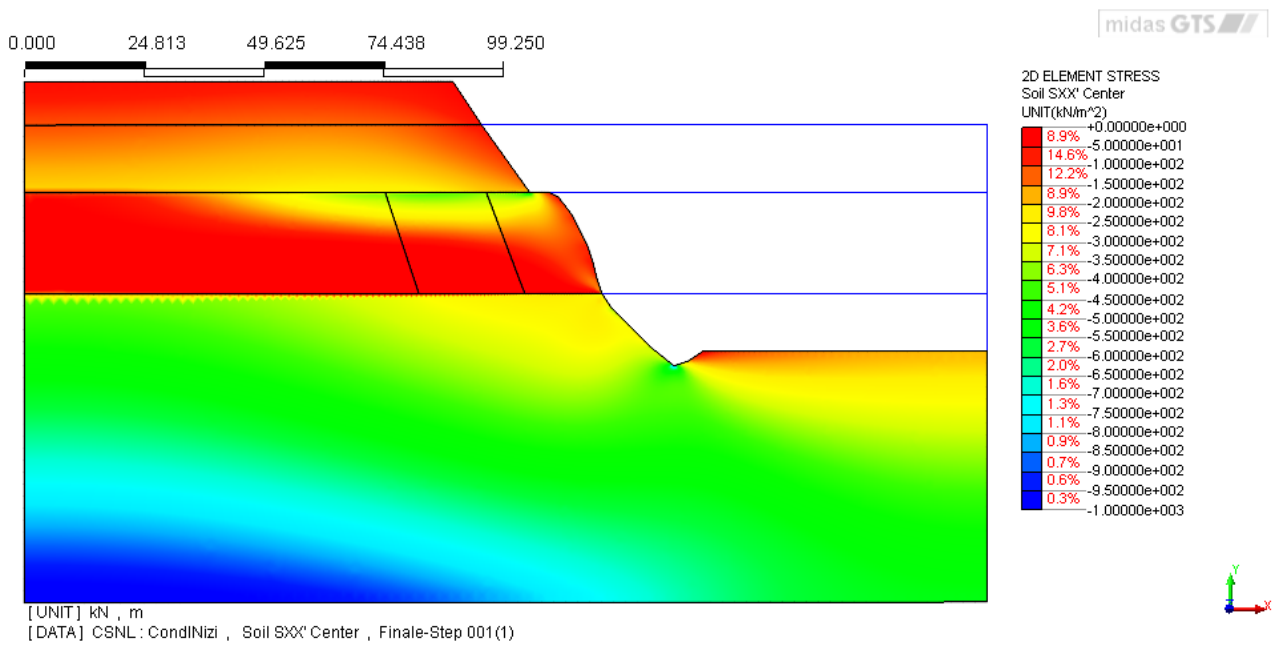


Figura 63 - Stato di sforzo orizzontale nel caso di pendio asciutto (Fase 3)

## 6. ANALISI NUMERICHE 2D – RISULTATI

### 6.1. INTRODUZIONE

Dopo aver implementato il modello sono state condotte le simulazione numeriche, prendendo in considerazione diversi scenari.

In particolare sono state condotte simulazioni in 7 condizioni idrogeologiche al fine di valutare l'influenza dell'acqua sulla stabilità del pendio e sul processo di erosione interna del versante; per osservare l'evoluzione di tale fenomeno sono state condotte diverse simulazioni, mostrando in più passi l'espansione delle aree interessate dal piping e la conseguente variazione delle condizioni di stabilità

### 6.2. ANALISI IN CONDIZIONI ASCIUTTE

La prima analisi condotta sul modello è relativa alle condizioni di pendio asciutto.

La Figura 64 rappresenta i risultati relativi alle deformazioni a taglio e permette di identificare la superficie di rottura, che si origina all'interno della zona detensionata del Ceppo e coinvolge le due litozone soprastanti.

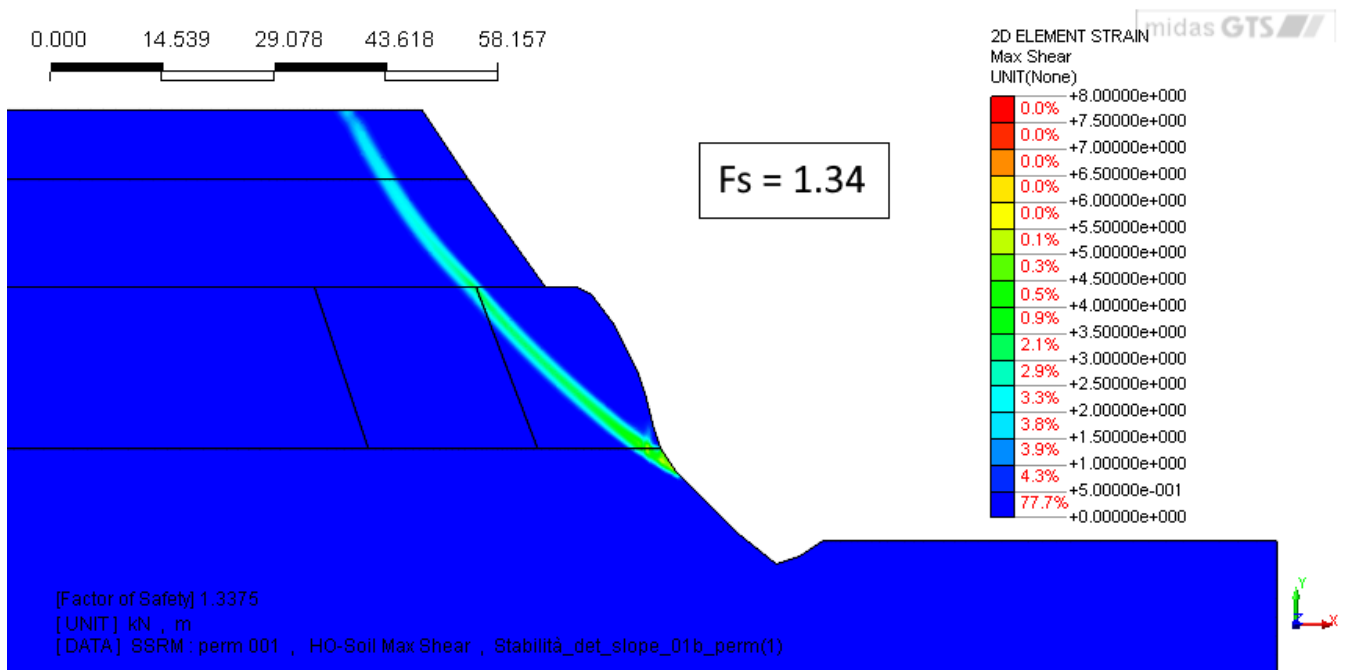


Figura 64 - Dettaglio delle deformazioni a taglio nel caso di pendio asciutto

Osservando la risultante delle due componenti di spostamento nel piano x-y, (Figura 65), si nota come i valori ottenuti siano positivi e risultino pressoché uniformi in tutta la parte del pendio interessata dall'instabilità, con un leggero incremento degli spostamenti alla base del blocco,



mentre la litozona E non presenta valori significativi in quanto non coinvolta nella superficie di rottura.

Infine si è calcolato il fattore di sicurezza del sistema, risultato pari a 1.34: in base a questo risultato si può affermare che il pendio si trovi in condizioni di stabilità in assenza di acqua.

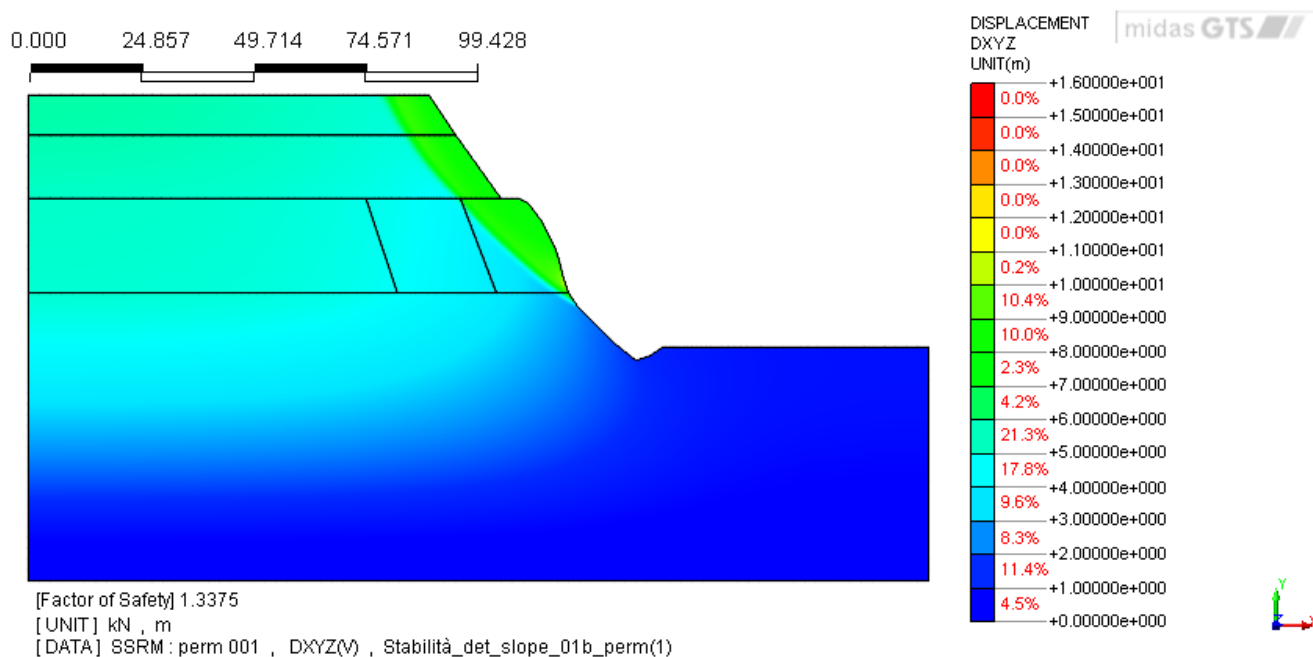


Figura 65 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y nel caso di pendio asciutto

### 6.3. ANALISI IN PRESENZA DI ACQUA

Dopo aver analizzato la stabilità del versante in condizioni asciutte è stata considerata la presenza dell'acqua all'interno del modello; con queste analisi si vuole andare a valutare come l'azione erosiva interna possa condizionare la stabilità del versante al variare delle condizioni al contorno.

Le simulazioni sono state condotte tramite diverse fasi, nelle quali sono state applicate le condizioni idrogeologiche precedentemente illustrate nel capitolo 5.4: un primo caso prende in considerazione la presenza dei soli carichi idraulici sul contorno del dominio, considerando quindi una ricarica unicamente da monte. Nei casi successivi sono stati introdotte precipitazioni di diversa entità, iniziando con valori medi stagionali e passando in seguito a dati relativi ad eventi critici corrispondenti a diversi tempi di ritorno.

Queste analisi sono state svolte con l'obiettivo di individuare le aree caratterizzate da un gradiente idraulico superiore a un valore critico, calcolato con il metodo di Zaslavsky e Kassif (1965) presentato nel capitolo 4.2: i parametri relativi al terreno incluso in tali aree saranno adeguatamente modificati

in modo da rappresentare l'azione del *piping*, che porta ad un indebolimento del terreno eroso e ad un incremento della permeabilità con conseguenti variazioni delle condizioni di stabilità.

### 6.3.1. ANALISI CON ALIMENTAZIONE SOLO DA MONTE

La modellazione è stata condotta in modo disaccoppiato: prima si è ricostruito il moto di filtrazione dell'acqua e, in un secondo momento, si è condotta l'analisi sforzi-deformazioni.

In Figura 66 è riportato l'andamento delle pressioni neutre derivanti dall'alimentazione da monte, dove si osserva la presenza di due acquiferi distinti: uno superiore, la cui circolazione si concentra nella litozona C, e l'altro profondo, situato all'interno della litozona E. In funzione delle considerazioni precedentemente esposte, si può ipotizzare che l'acquifero più profondo non influenzi la stabilità del pendio essendo localizzato in un substrato stabile. Al contrario, la presenza dell'acquifero situato nella litozona C potrebbe risultare un fattore rilevante sia nelle condizioni iniziali di stabilità, sia per quanto concerne lo sviluppo di cavità causate dall'erosione interna.

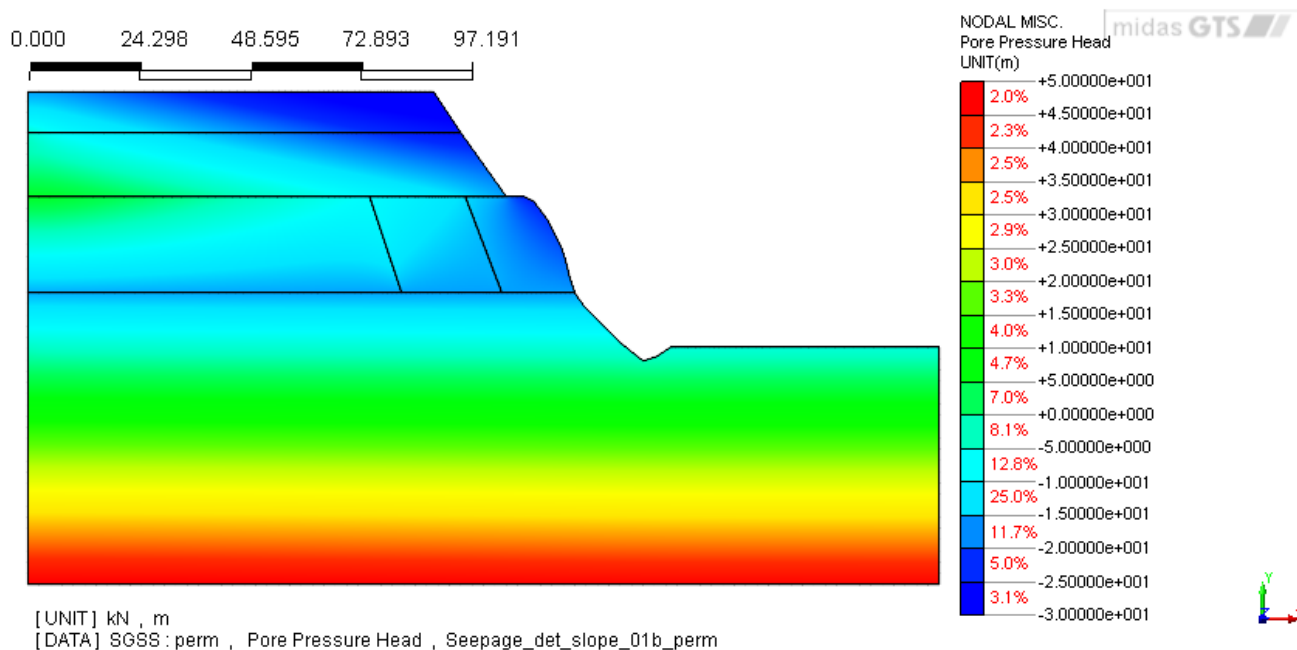


Figura 66 - Andamento delle pressioni iniziali in presenza di carichi idraulici costanti

Viene inoltre mostrato l'andamento della velocità di filtrazione in Figura 67, dal quale si può osservare come il valore di velocità si mantenga costante fino al raggiungimento della porzione detensionata del Ceppo dell'Olonà: la maggior permeabilità di questa litozona provoca un sensibile aumento della velocità di filtrazione, in particolare al piede della litozona C.

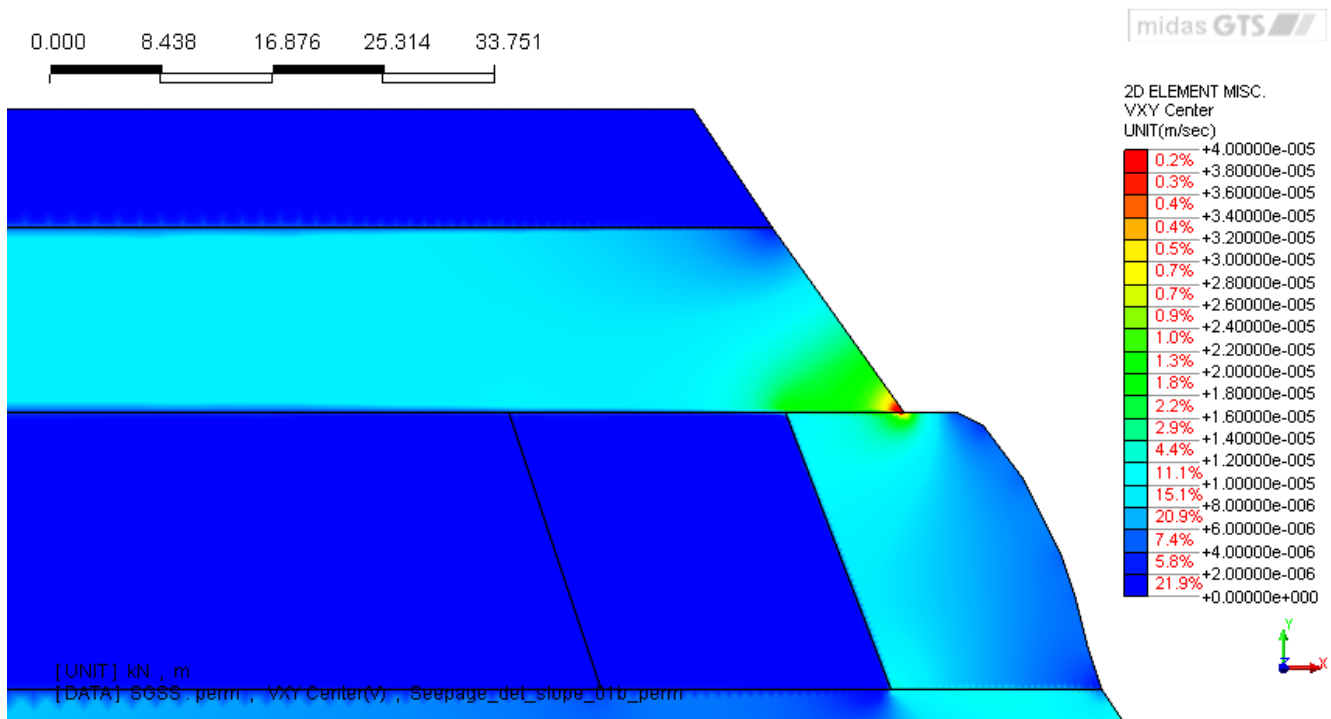


Figura 67 - Velocità di filtrazione nel piano x-y

Osservando l'acquifero superficiale si può notare come, sebbene la circolazione avvenga nella litozona interessata dalla superficie di rottura, lo zero piezometrico non raggiunga il blocco soggetto ad instabilità: ne consegue che l'influenza esercitata dai carichi idraulici applicati non è sufficiente a modificare direttamente le condizioni di stabilità del versante, il cui fattore di sicurezza rimane infatti invariato.

Come affermato in precedenza, per analizzare l'indebolimento del versante a causa dell'erosione interna si vuole in primis ricavare il gradiente idraulico critico in corrispondenza del quale si osserva una diminuzione della resistenza meccanica del materiale per lo sviluppo del *piping*. Per ottenere tale dato è stato applicato il metodo elaborato da Zaslavsky e Kassif (1965) esposto in precedenza nel capitolo 4.2; per la litozona C si è ottenuto un valore di gradiente critico pari a 0.287. Il procedimento seguito per lo svolgimento delle simulazioni è schematizzato in Figura 68.

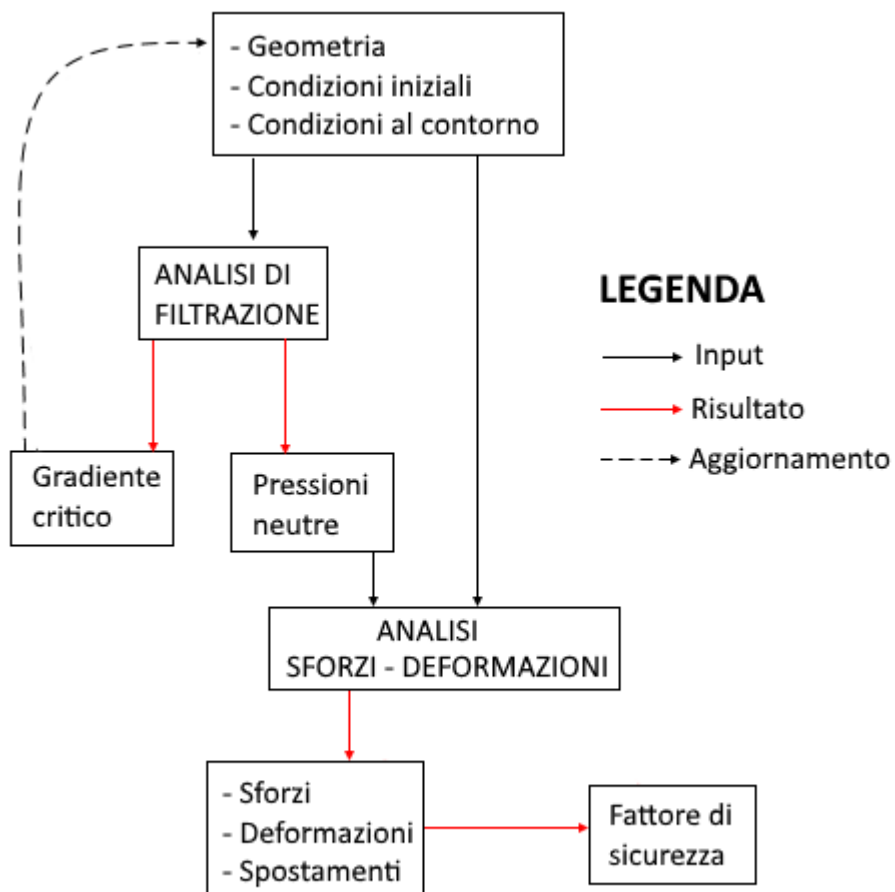


Figura 68 - Schema del procedimento utilizzato per lo svolgimento delle analisi numeriche

Sulla base dei risultati ottenuti dalle prove penetrometriche utilizzate in precedenza, e in accordo con le osservazioni fatte da autori che hanno studiato l'evoluzione del *piping* e i suoi effetti (Benites 1968, Lorenzo et al. 2015), i parametri del terreno soggetto a erosione sono stati modificati come mostrato in Tabella 3.

LITAZONA	C	C-piping
E [KPa]	10000	10000
v [-]	0.3	0.3
$\gamma_{sat}$ [KN/m <sup>3</sup> ]	19	17
c [KPa]	70	20
$\phi$ [°]	32	26
k [m/s]	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$

Tabella 3 - Parametri del materiale soggetto a piping relativo alla litozona C



Un esempio di quanto esposto finora è mostrato di seguito, dove si va ad analizzare la costruzione della geometria per la prima simulazione del *piping*, partendo dalla Figura 69 che mostra il gradiente critico ricavato dall'analisi di filtrazione nella geometria iniziale. Come si può osservare, l'area interessata si localizza sulla superficie destra del pendio in corrispondenza del confine tra la litozona C, soggetta al fenomeno di erosione interna, e il Ceppo dell'Olona detensionato che costituisce la litozona D sottostante. Di contro, a cause dell'assenza di ricarica superficiale, la litozona B non risulta interessata da questo fenomeno.

Sulla base di questo risultato, la geometria del modello è stata modificata come mostrato in Figura 70, dove la zona colorata di blu è stata caratterizzata con il materiale descritto in Tabella 3. Anche la mesh iniziale è stata modificata in modo da adattarsi alla nuova geometria portando la dimensione degli elementi finiti a 0.5 per tutta l'area soggetta a *piping*, in modo da aumentare il grado di dettaglio.

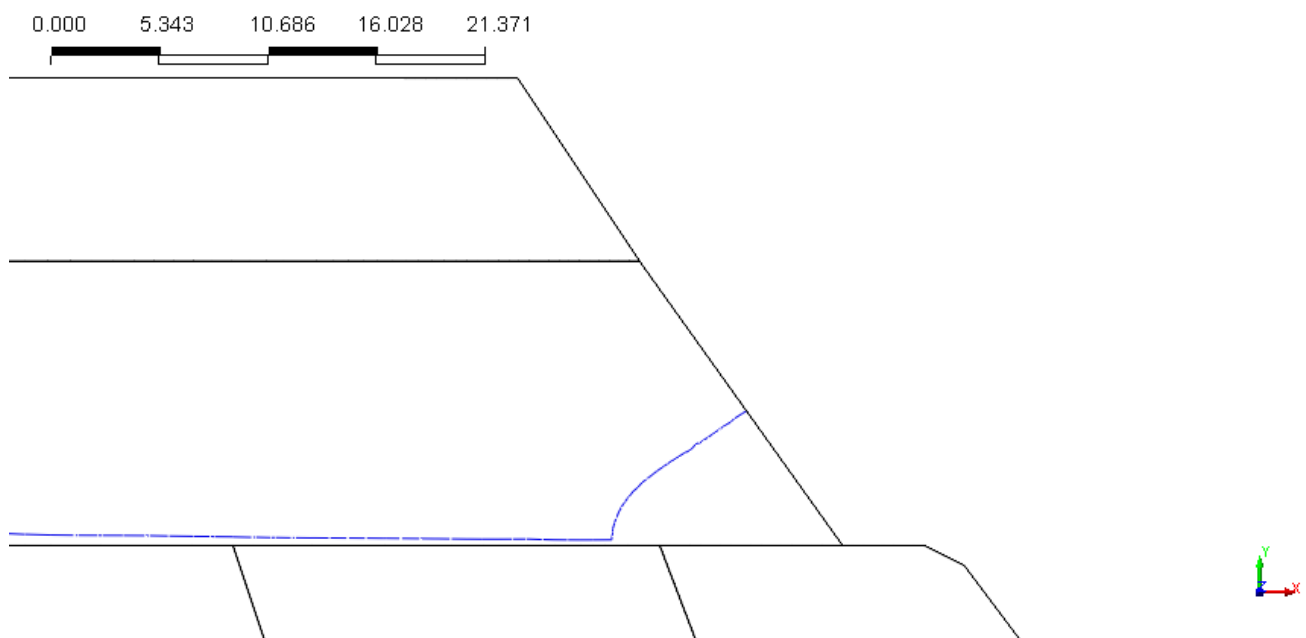


Figura 69 - Andamento del gradiente critico nella litozona C in assenza di ricarica

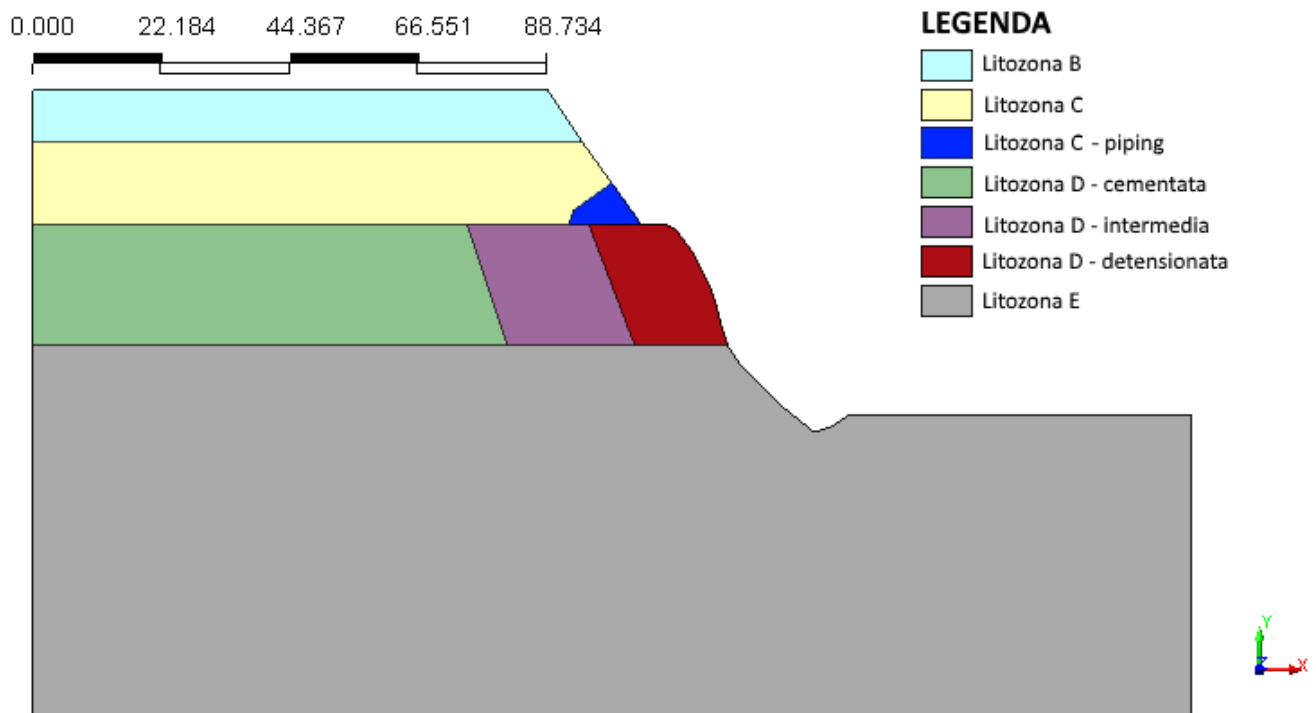


Figura 70 - Geometria del modello aggiornata sulla base dei risultati ottenuti dalla simulazione iniziale in assenza di ricarica superficiale

L'analisi di stabilità evidenzia come l'inserimento del materiale interessato dal *piping* porti ad una variazione significativa del comportamento del pendio, come mostrano distribuzione delle deformazioni a taglio riportata in Figura 71. Nella nuova configurazione il Ceppo dell'Olona risulta meno sollecitato rispetto al caso precedente a causa del materiale soprastante, il cui peso specifico è stato ridotto a causa dell'erosione interna portando ad un alleggerimento della litozona D, con conseguente effetto stabilizzante. Tuttavia, la presenza dello stesso materiale indebolito ha dato luogo ad una nuova superficie di rottura che, come evidenziato in Figura 71, coinvolge principalmente le litozone C e B e si origina proprio dalla parte di terreno interessata dal *piping*.

A questa nuova superficie di rottura è associato un fattore di sicurezza minore di quello ottenuto nella simulazione iniziale, pari a 1.26.

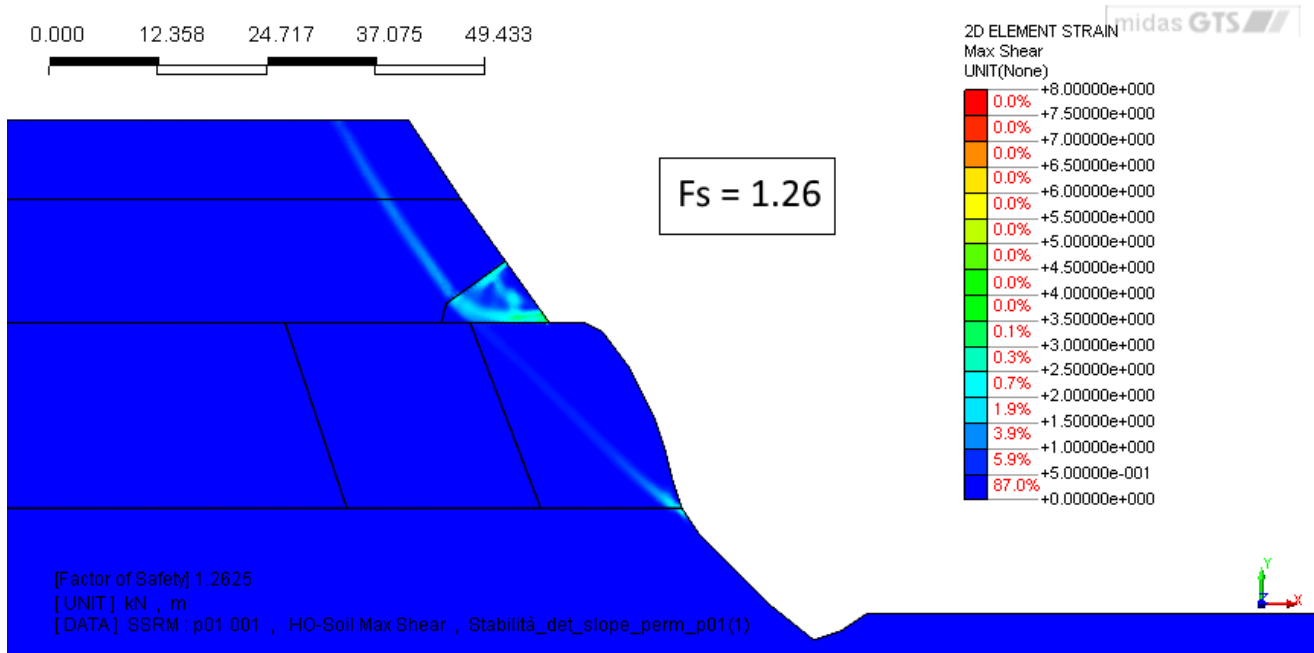


Figura 71 - Dettaglio delle deformazioni a taglio ottenute dalla prima analisi con materiale soggetto a piping

Dalla Figura 72, che mostra la risultante degli spostamenti nel piano x-y, è evidente come i valori più alti di spostamento si concentrino nell'area indebolita dell'erosione interna, in particolare in prossimità della litozona inferiore. A causa dell'effetto stabilizzante discusso in precedenza, nella litozona D si osserva una distribuzione uniforme degli spostamenti, caratterizzata da valori minori rispetto al blocco soggetto ad instabilità. Anche in questo caso la litozona E più profonda non risulta coinvolta nel meccanismo di rottura e non è contraddistinta da spostamenti significativi.

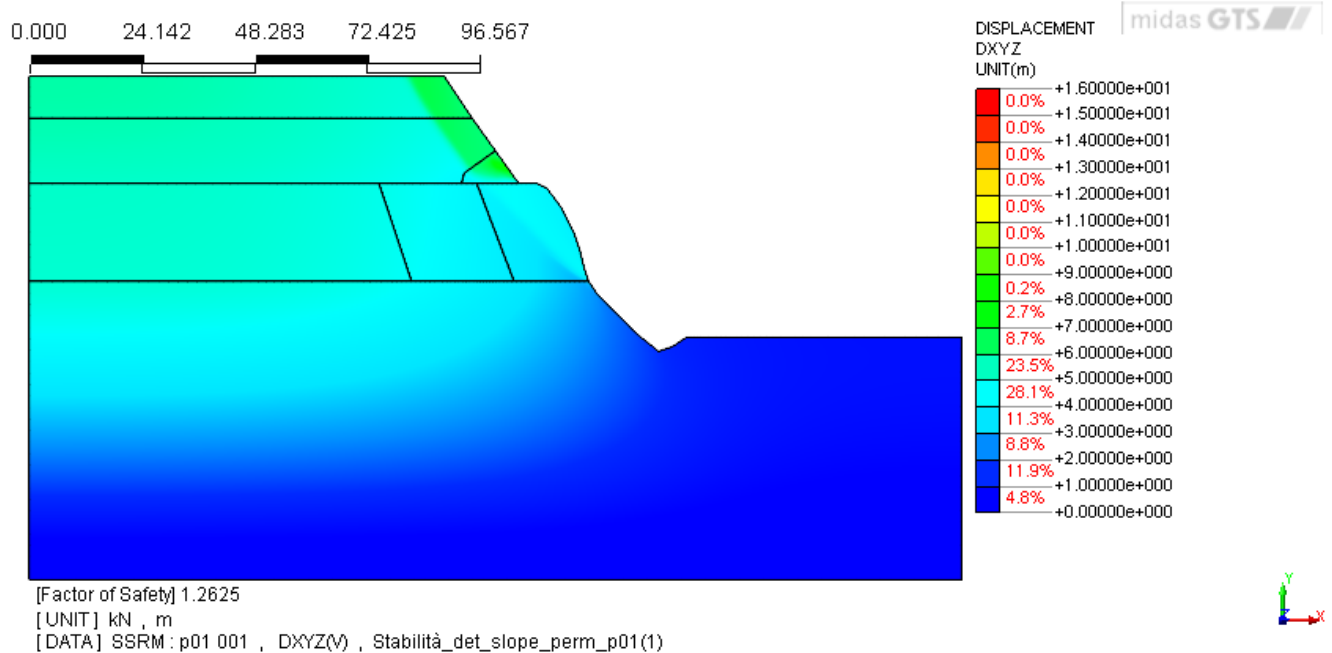


Figura 72 – Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuti dalla prima simulazione con materiale indebolito dal piping

Il procedimento esposto è stato ripetuto per un totale di 6 analisi, con l'obiettivo di studiare l'evoluzione del fenomeno del *piping* all'interno del dominio; ad ogni passo la geometria e la mesh sono state aggiornate sulla base della distribuzione del gradiente idraulico ricavata dall'analisi di filtrazione svolta al passo precedente. Di seguito vengono riportati e discussi i risultati di queste simulazioni.

Nella Figura 73 sono riportati i diagrammi del gradiente critico ottenuti a ciascun passo e, in Figura 74, le modifiche apportate alla geometria sulla base di questi dati; si può notare come, con il procedere delle simulazioni, le aree interessate dal fenomeno del *piping* tendano a svilupparsi in profondità nel dominio e, partendo dalla quarta simulazione, risalgano gradualmente la litozona C. Si osserva inoltre una graduale riduzione dell'estensione di tali aree con il procedere delle simulazioni.



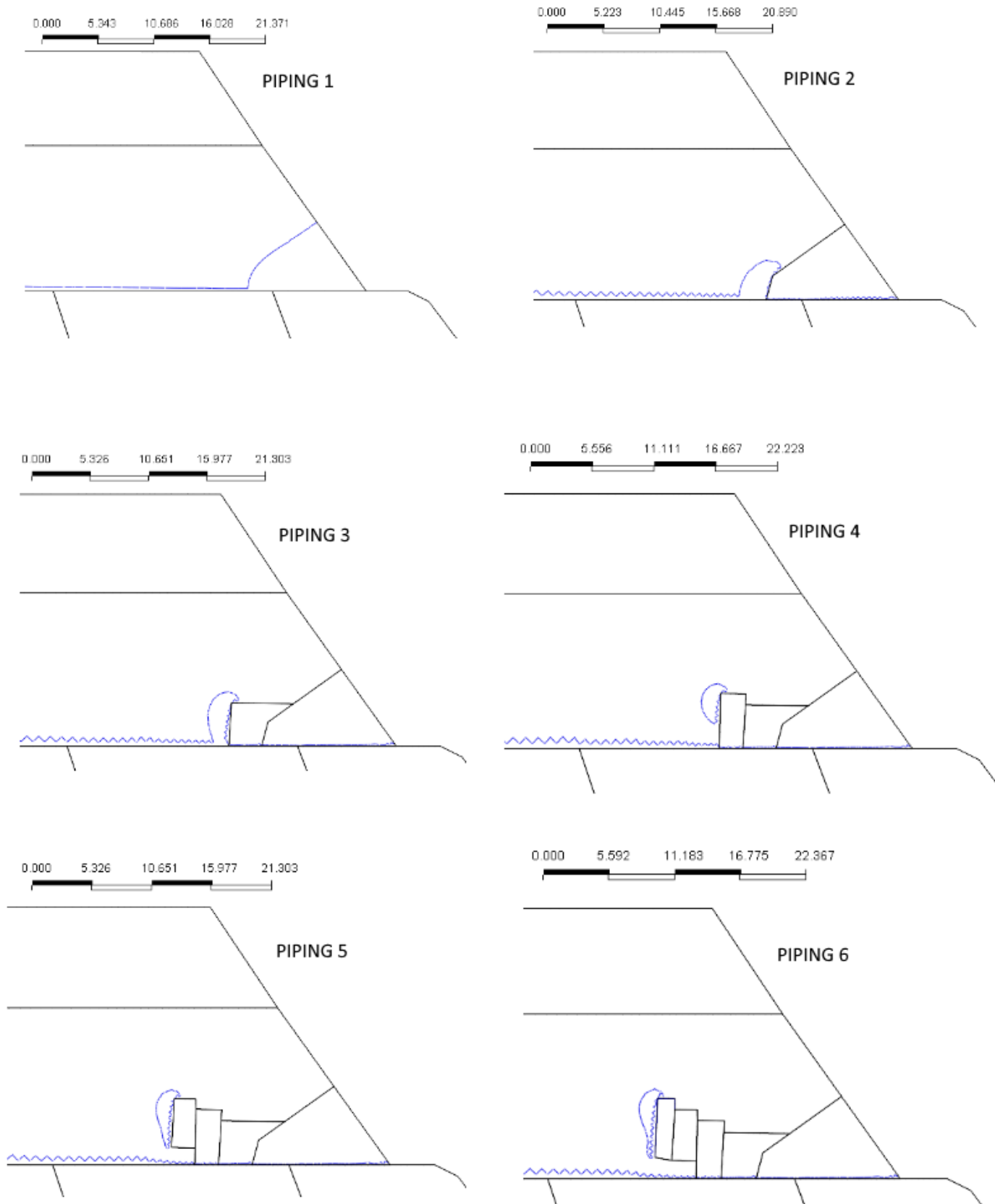


Figura 73 - Distribuzione del gradiente idraulico critico in ciascuna simulazione

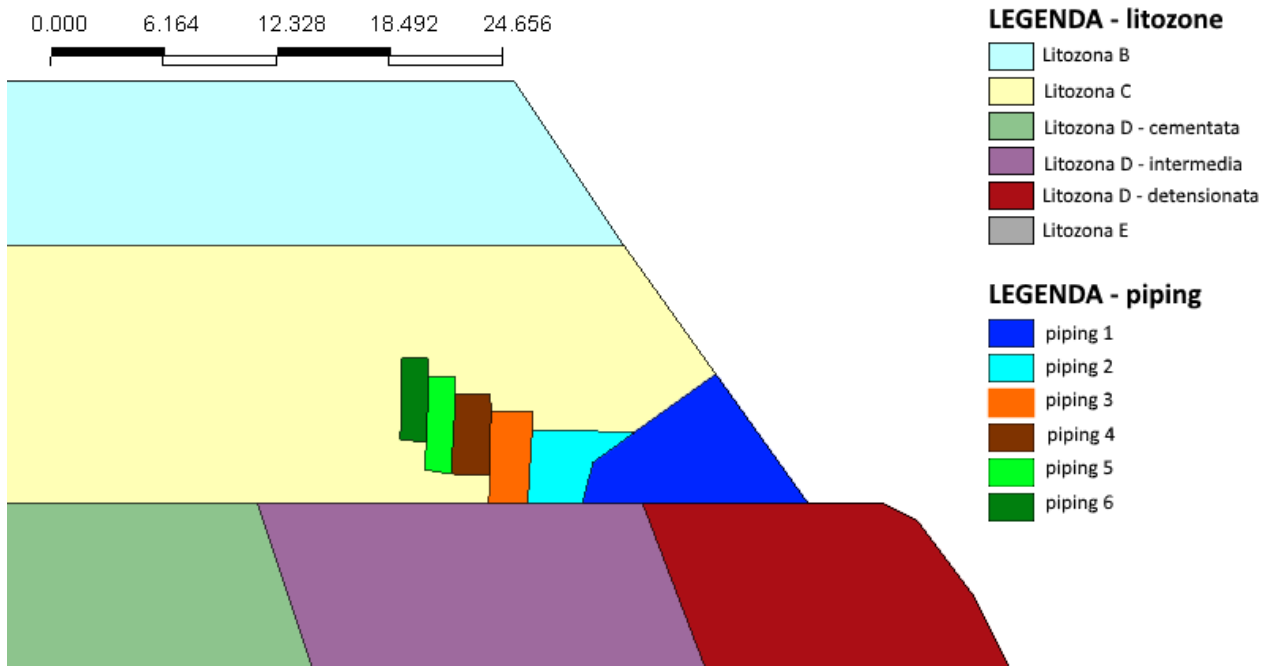


Figura 74 - Evoluzione della geometria del pendio con l'inserimento del materiale indebolito dal piping

Per valutare l'evoluzione della superficie di scorrimento del blocco soggetto a instabilità vengono riportate di seguito in Figura 75 le deformazioni a taglio ottenute nell'ultimo passo di analisi. Come osservato in precedenza, l'introduzione del materiale soggetto a *piping* ha provocato lo spostamento dell'instabilità nella litozona C; si può notare come lo svilupparsi del fenomeno abbia portato la superficie di rottura a propagarsi all'interno delle aree più deboli inserite di volta in volta nelle simulazioni.

La variazione del fattore di sicurezza può essere osservata nel grafico riportato in Figura 76 dove sono indicati i valori associati ai diversi passi di analisi effettuati. Partendo da un valore iniziale di 1.34 il fattore di sicurezza diminuisce gradualmente con l'aumentare dell'estensione dell'area indebolita dal *piping*, raggiungendo nella sesta simulazione un valore pari a 1.16.

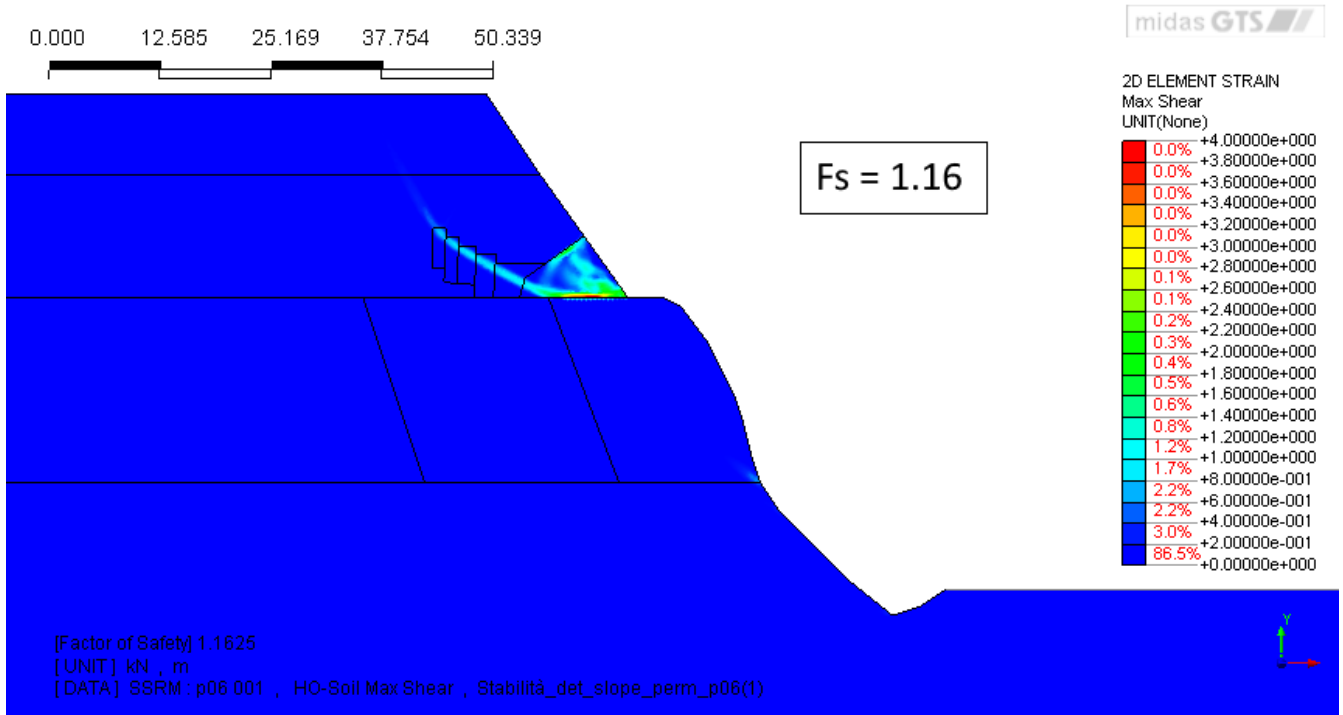


Figura 75 - Deformazioni a taglio ottenute alla sesta analisi con materiale indebolito dal piping

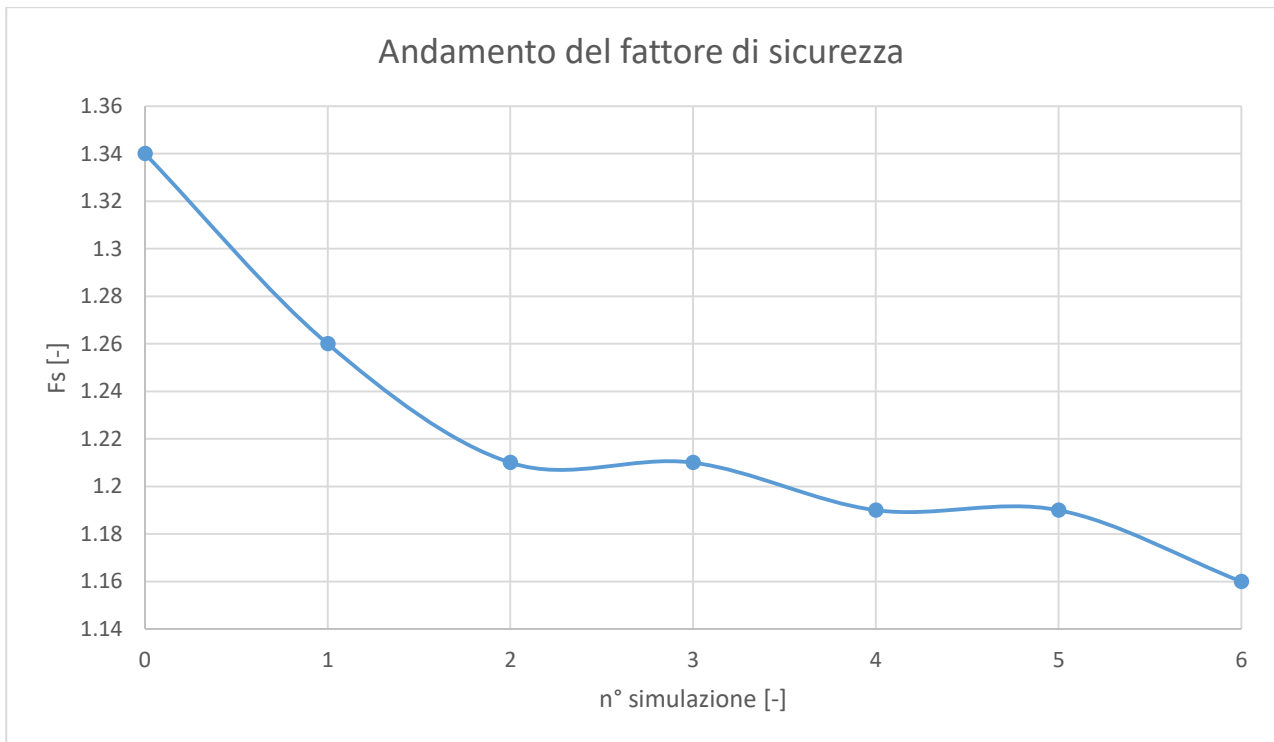


Figura 76 - Variazione del fattore di sicurezza al progredire del piping nel dominio

Per un confronto con la situazione iniziale e con il primo passo di simulazione dello sviluppo del *piping* vengono riportate gli spostamenti relativi alla sesta analisi svolta, alla quale è associato il minor valore di fattore di sicurezza. Dal confronto tra questi risultati si può osservare come, sebbene gli spostamenti siano diminuiti in modulo, l'instabilità coinvolga un porzione maggiore della scarpata a causa dell'azione erosiva interna al pendio.

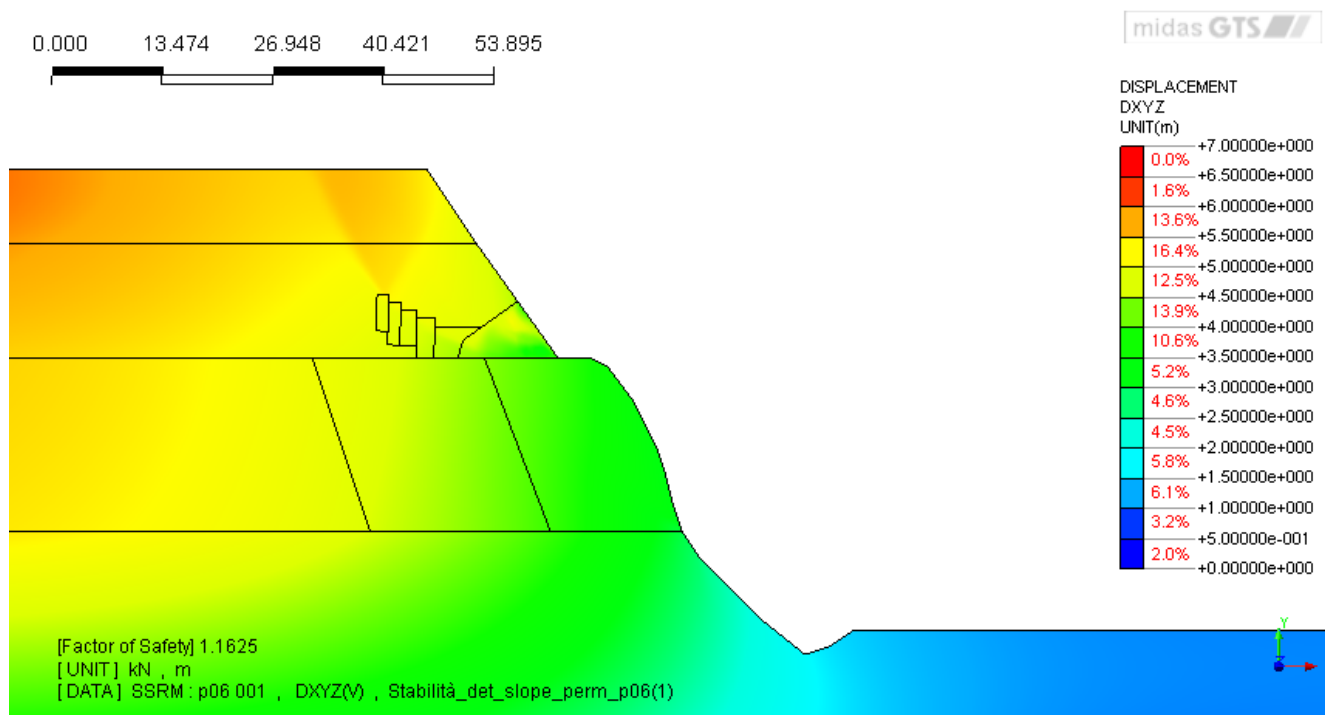


Figura 77 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuta dalla sesta analisi con materiale indebolito dal piping

### 6.3.2. ANALISI CON ALIMENTAZIONE DA MONTE E RICARICA SUPERFICIALE

Dopo aver svolto le analisi con la ricarica imposta solo a monte del dominio, viene ora considerata la presenza di una ricarica superficiale come condizione idraulica aggiuntiva; il procedimento seguito per lo svolgimento di queste simulazioni è il medesimo del caso precedente, partendo dalla geometria iniziale per verificare l'influenza dell'acqua sulla stabilità del pendio. Successivamente si procede alla valutazione del gradiente idraulico per verificare in quali aree del versante tale parametro supera il valore critico; la geometria del dominio viene aggiornata di conseguenza inserendo il materiale indebolito dall'erosione, ripetendo le analisi di filtrazione e di stabilità per valutare il campo di sforzi, deformazioni e spostamenti, ricavando infine il fattore di sicurezza associato.

Le simulazioni svolte con queste ipotesi e i risultati ottenuti vengono discussi nei paragrafi seguenti.



### 6.3.2.1. ANALISI CON RICARICA MEDIA STAGIONALE

I primi valori di ricarica inseriti nel modello sono relativi alle precipitazioni medie valutate su scala stagionale, calcolati sulla base dei dati riportati dai PGT di Gornate Olona (2013) e di Castelseprio (2014). Dato che questi sono valori di precipitazione lorda, è necessario ricavare la parte di precipitazione effettivamente infiltrata nel terreno per implementare correttamente la condizione al contorno nel modello: si è quindi proceduto a depurare i dati di partenza delle componenti di evapotraspirazione e ruscellamento.

Sulla base del bilancio idrico presentato nel PGT di Gornate Olona (2013) è stato scelto un valore di evapotraspirazione pari al 40% della precipitazione lorda; per quanto riguarda la componente di ruscellamento, essendo il pianalto su cui è imposta la condizione pressoché orizzontale, è stato imposto un valore nullo. I dati di precipitazione netta, espressi in millimetri al mese, sono quindi stati convertiti in valori di portata (Tabella 4) per essere implementati nel modello.

Dai dati riportati si nota come i valori medi maggiori siano registrati in autunno, mentre nella stagione invernale le medie mensili sono caratterizzate dai valori minori; primavera ed estate presentano valori intermedi, molto simili tra loro.

STAGIONE	Precipitazione media [mm/mese]	Evapotraspirazione [%]	Ricarica effettiva [mm/mese]
<b>Primavera</b>	96.85	40	58.11
<b>Estate</b>	99.33	40	59.60
<b>Autunno</b>	121.68	40	73.01
<b>Inverno</b>	83.82	40	50.29

Tabella 4 - Precipitazioni medie mensili per ciascuna stagione

Le immagini riportate in Figura 78 mostrano la distribuzione delle nel caso con precipitazioni più intense (autunnali) e meno intense (invernali). Da queste immagini non si riesce ad osservare una differenza rilevante nelle pressioni neutre ottenute nei diversi casi, che risultano molto simili alla condizione precedente nella quale non era imposto alcun valore di ricarica: questo è probabilmente dovuto ai bassi valori di pioggia considerati in queste simulazioni. Anche osservando la linea che individua lo zero piezometrico riportata, per le piogge medie autunnali, in Figura 79, non si notano variazioni rilevanti rispetto al caso senza ricarica. Per questo motivo la stabilità non risulta direttamente influenzata dalla presenza dell'acqua, e il fattore di sicurezza risulta invariato rispetto ai casi precedenti con un valore pari a 1.34.

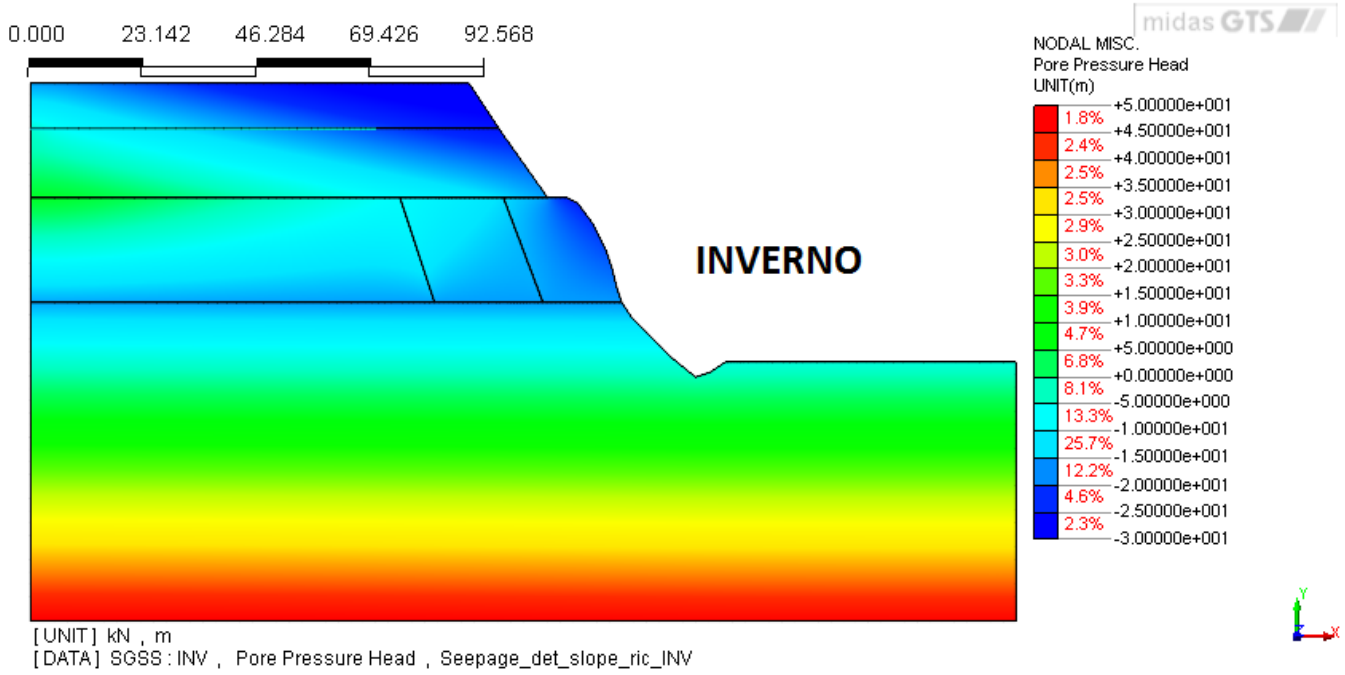
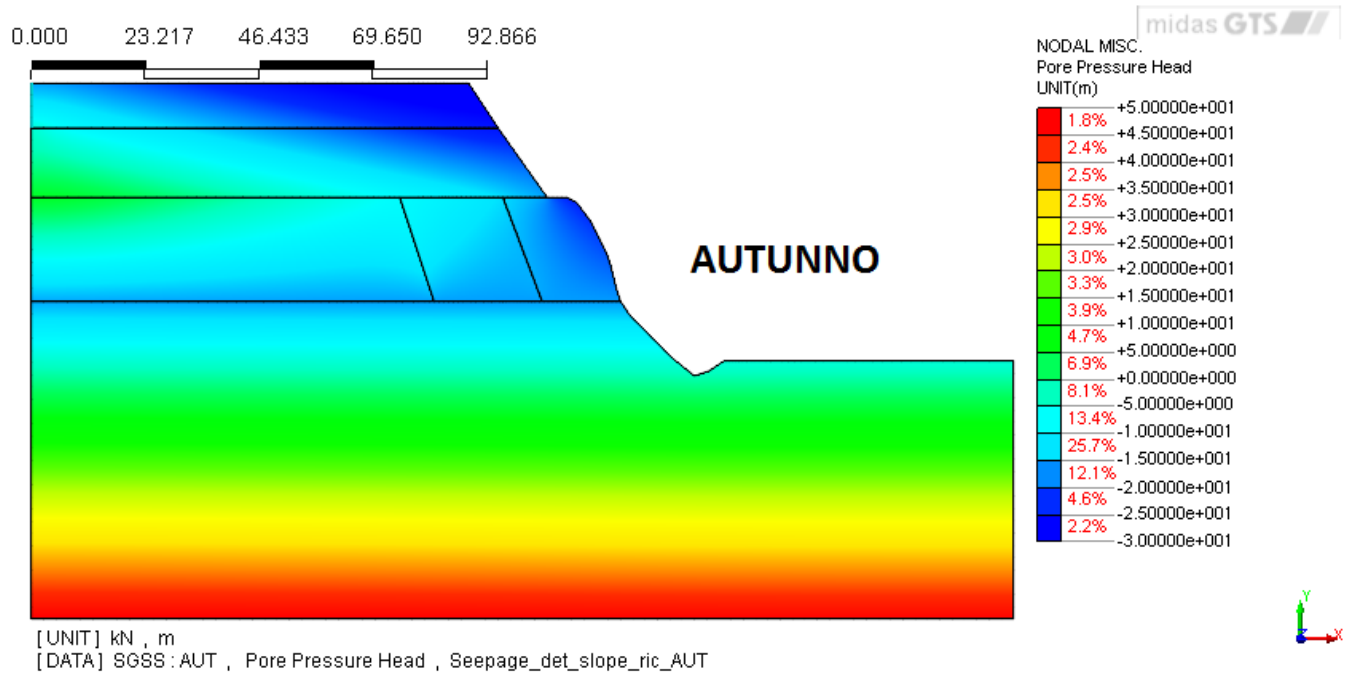


Figura 78 - Distribuzione delle pressioni iniziali con ricarica media autunnale e invernale

0.000 23.217 46.433 69.650 92.866

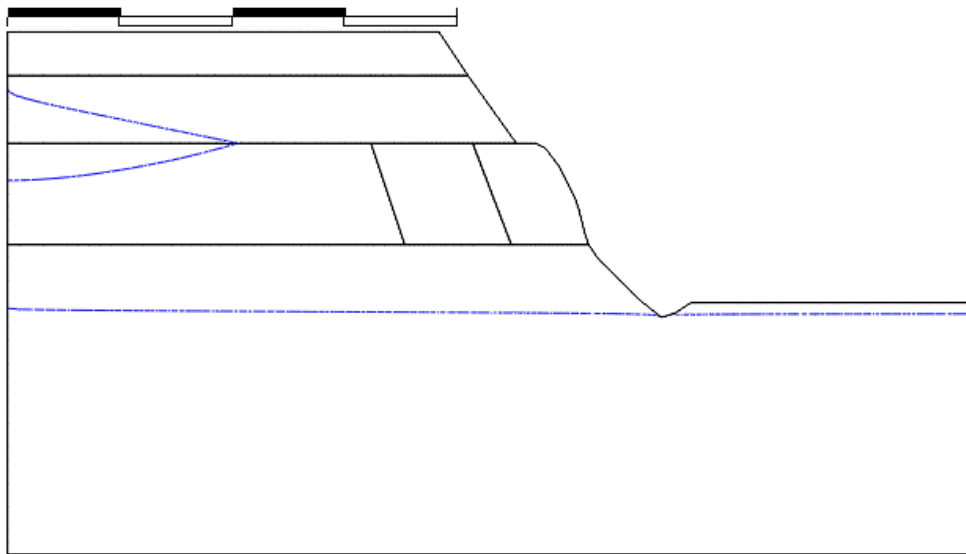


Figura 79 - Andamento dello zero piezometrico ottenuto dall'analisi iniziale con precipitazioni medie autunnali

La presenza di questa nuova condizione al contorno ha invece un effetto più evidente sullo sviluppo del *piping* all'interno del dominio: infatti, come viene mostrato in Figura 80 nel caso di precipitazioni autunnali, la litozona B risulta essere quasi interamente inclusa nell'area caratterizzata da un gradiente idraulico superiore al valore critico corrispondente, pari a 0.166 in questa litozona, ad eccezione di una porzione di terreno situata a destra del dominio sulla superficie del pianalto. In questo caso, l'entità dell'influenza dei valori di portata imposti è invece osservabile dall'estensione dell'area non soggetta a *piping*, che risulta meno ampia all'aumentare della precipitazione. La differenza all'interno della litozona C risulta meno evidente, con gli elementi soggetti all'azione erosiva concentrati sulla destra del dominio al confine con la litozona D detensionata.

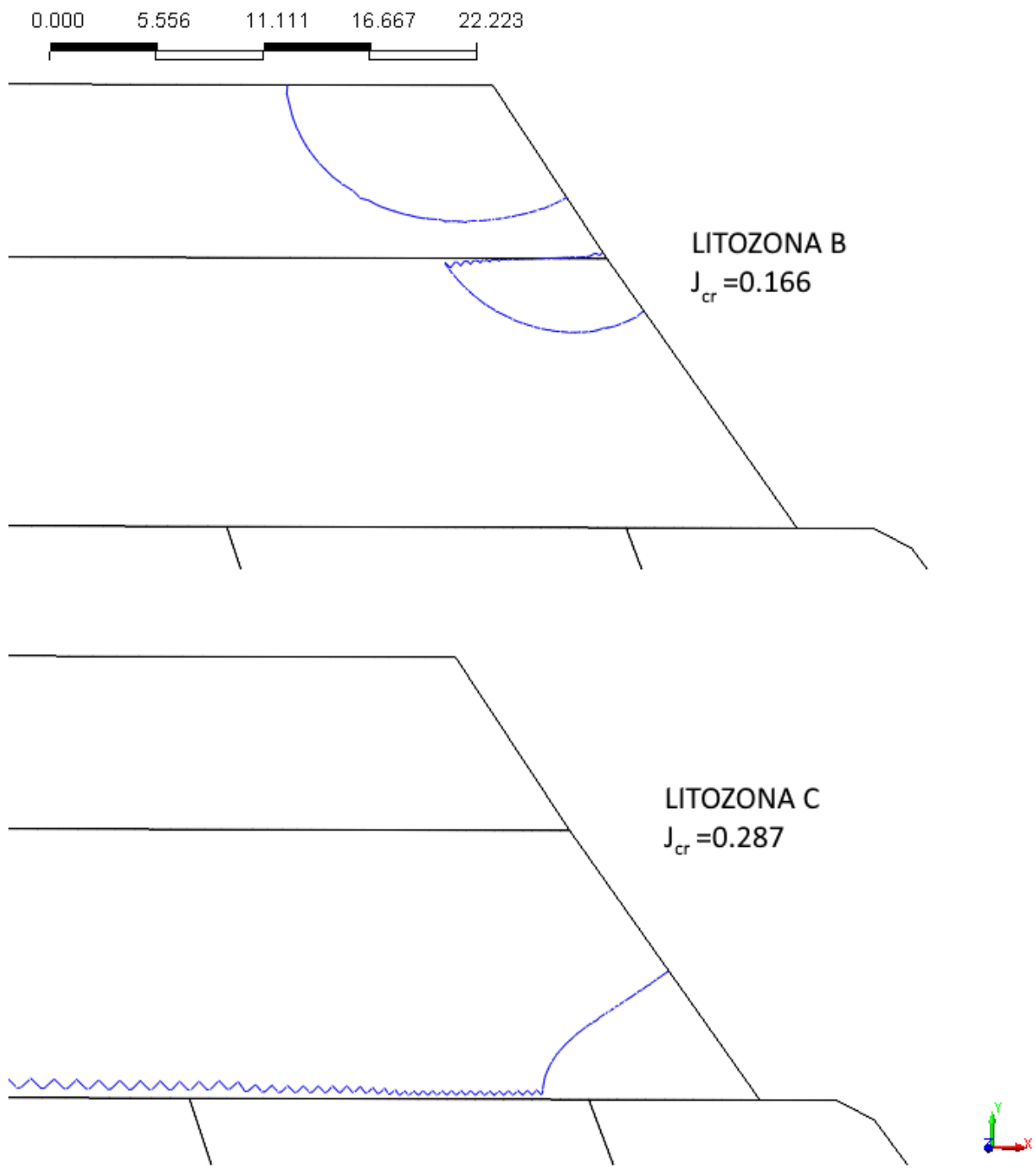


Figura 80 - Distribuzione del gradiente critico all'interno della litozona B (immagine superiore) e della litozona C (immagine inferiore) nel caso di precipitazioni medie autunnali

Diversamente dal caso precedente, la geometria del dominio è stata aggiornata introducendo due nuovi materiali con parametri meccanici ridotti e permeabilità incrementata per rappresentare l'azione erosiva nel terreno in entrambe le litozone; oltre a quanto precedentemente detto per la litozona C viene quindi riportata di seguito la Tabella 5 relativa al materiale che costituisce la litozona B.

LITOZONA	B	B - piping
E [KPa]	5000	5000
$\nu$ [-]	0.35	0.35
$\gamma_{sat}$ [KN/m <sup>3</sup> ]	17	15
c [KPa]	35	10
$\phi$ [°]	28	24
k [m/s]	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>

Tabella 5 - Parametri dei materiali soggetti a piping relativi alla litozona B

Le superfici di rottura dopo il primo passo di analisi sono visibili dalla distribuzione delle deformazioni a taglio riportate in Figura 81 e Figura 82 riferite rispettivamente alle precipitazioni medie autunnali e invernali. Dai risultati ottenuti emerge come l'instabilità sia ancora localizzata principalmente nella litozona D e non siano presenti differenze rilevanti nella distribuzione dei valori, probabilmente a causa della scarsa intensità della ricarica fornita dalle condizioni considerate. L'indebolimento del versante ha comunque un effetto sul valore del fattore di sicurezza, che scende a 1.26 per tutti i casi analizzati.

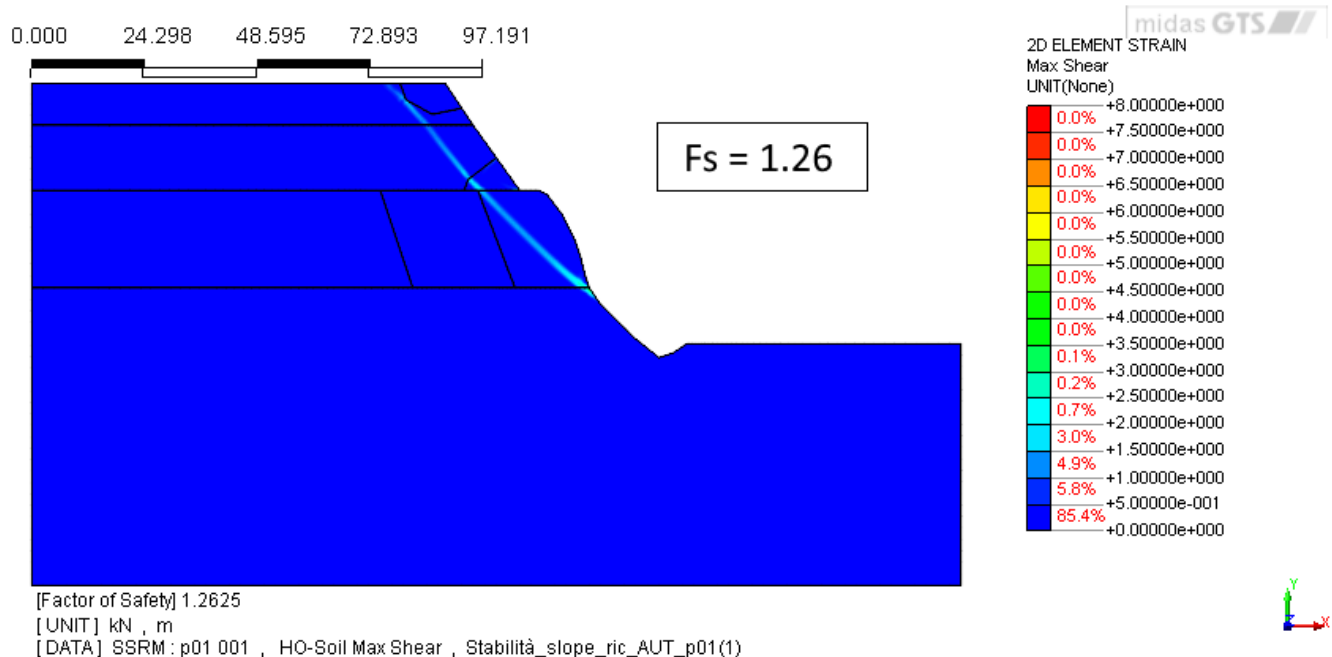


Figura 81 - Deformazioni a taglio ottenute dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni medie autunnali



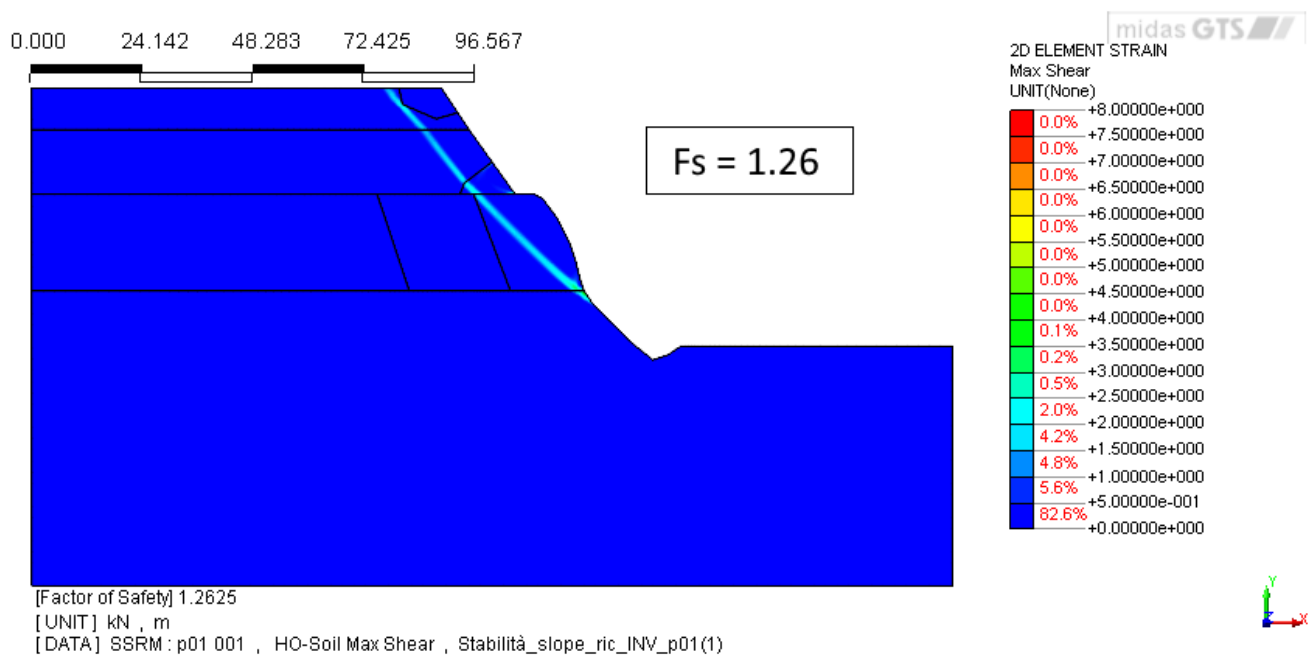


Figura 82 - Deformazioni a taglio ottenute dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni medie invernali

I risultati risultano più differenziati quando si va ad osservare gli spostamenti nel piano x-y indicati in Figura 83 e Figura 84, rispettivamente ottenuti dalle simulazioni con piogge autunnali e invernali: in questo caso i valori massimi sono relativi alle simulazioni effettuate con le precipitazioni più basse, corrispondenti alla stagione invernale. Questo comportamento è dovuto alla presenza della porzione di materiale all'interno della litozona B il quale, non essendo danneggiato dal *piping*, risulta caratterizzato da un maggior peso specifico e agisce da sovraccarico sulle litozone inferiori: dato che l'estensione di tale area aumenta al diminuire dell'azione erosiva, la media invernale risulta essere la condizione per la quale il sovraccarico assume il massimo valore. Al contrario le precipitazioni autunnali causano una maggior erosione nel versante con conseguente indebolimento del pendio, portando allo stesso tempo ad un minor sovraccarico delle litozone C e D.

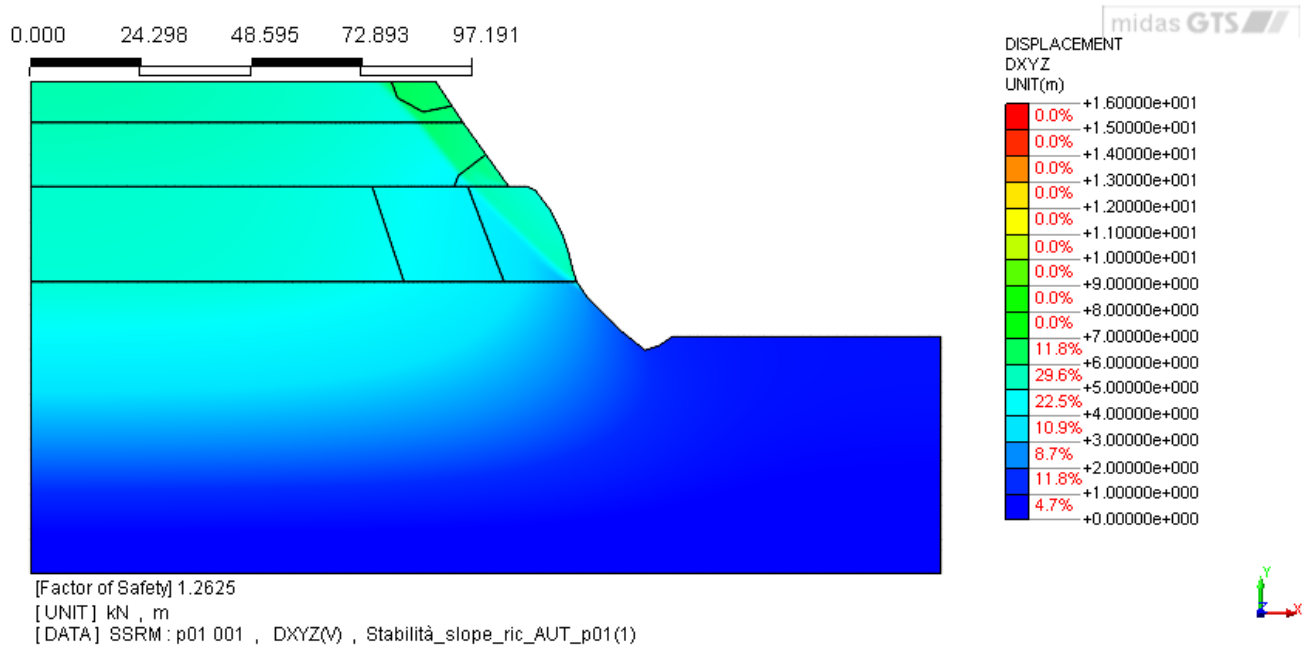


Figura 83 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuta dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni autunnali

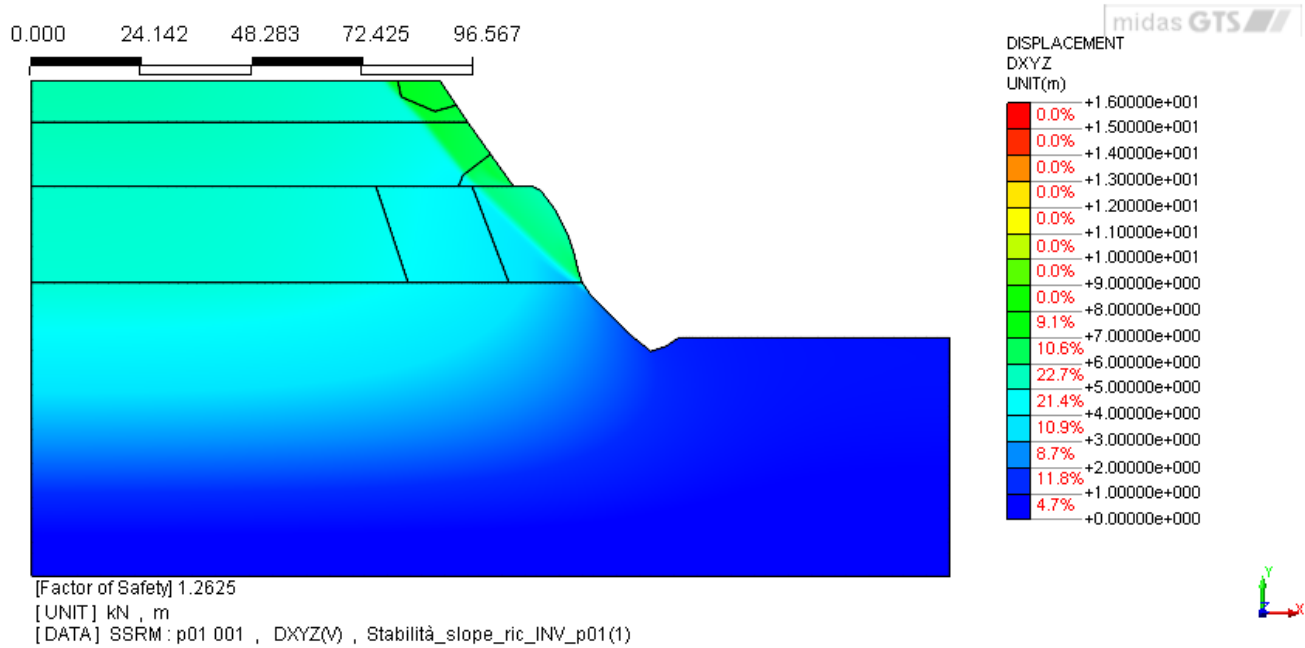


Figura 84 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuta dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni invernali

Per osservare l'evoluzione del fenomeno è stato svolto un altro passo di analisi utilizzando come geometria di partenza quella ottenuta dalle simulazioni appena discusse; si è quindi proceduto a individuare le nuove aree indebolite dal *piping* utilizzando il metodo del gradiente critico. Come viene mostrato in Figura 85 per il caso delle precipitazioni medie autunnali l'area all'interno della litozona B che precedentemente risultava integra subisce un restringimento a causa dell'erosione provocata dalle piogge; il gradiente idraulico risulta superiore al valore critico nella parte inferiore, confinante con il materiale già indebolito all'interno della stessa litozona. Si osserva inoltre un progressivo incremento dell'area indebolita anche all'interno della litozona C, dove il gradiente critico viene superato in prossimità del materiale eroso in precedenza. In questo secondo passo l'aumento del materiale indebolito è maggiore rispetto alle analisi con i soli carichi costanti: la causa di questo comportamento è da ricercarsi nell'azione combinata delle precipitazioni e del materiale della litozona B che, a causa dell'azione del *piping*, è caratterizzato da una maggior permeabilità.

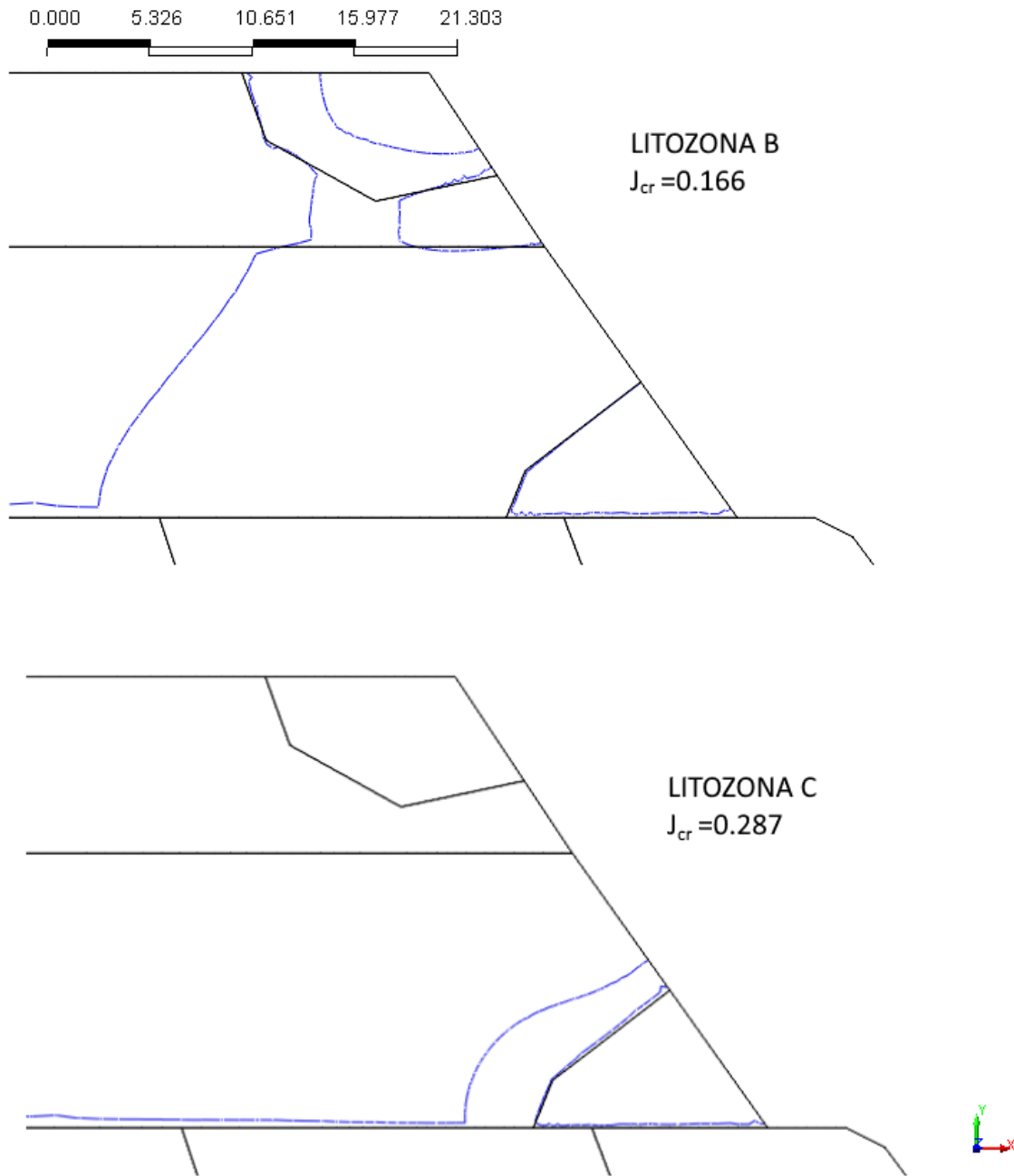


Figura 85 - Distribuzione del gradiente critico all'interno della litozona B (immagine superiore) e della litozona C (immagine inferiore) ottenuta dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping nel caso di precipitazioni medie autunnali

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per il caso appena descritto; osservando la distribuzione delle deformazioni a taglio in Figura 86 si può notare come l'ampliamento dell'area soggetta a *piping* abbia provocato la generazione di una diversa superficie di rottura che si origina nella litozona. In questo passo di analisi iniziano ad essere visibili valori non nulli di deformazione al taglio anche all'interno della litozona B, localizzate sulla superficie destra del versante in prossimità del blocco di materiale ancora integro, che indicano la possibile nascita di fenomeni di instabilità

nelle zone più superficiali. Analogamente al passo precedente, l'aggiunta di materiale indebolito ha causato una riduzione del fattore di sicurezza, che in questa simulazione ha valore pari a 1.21.

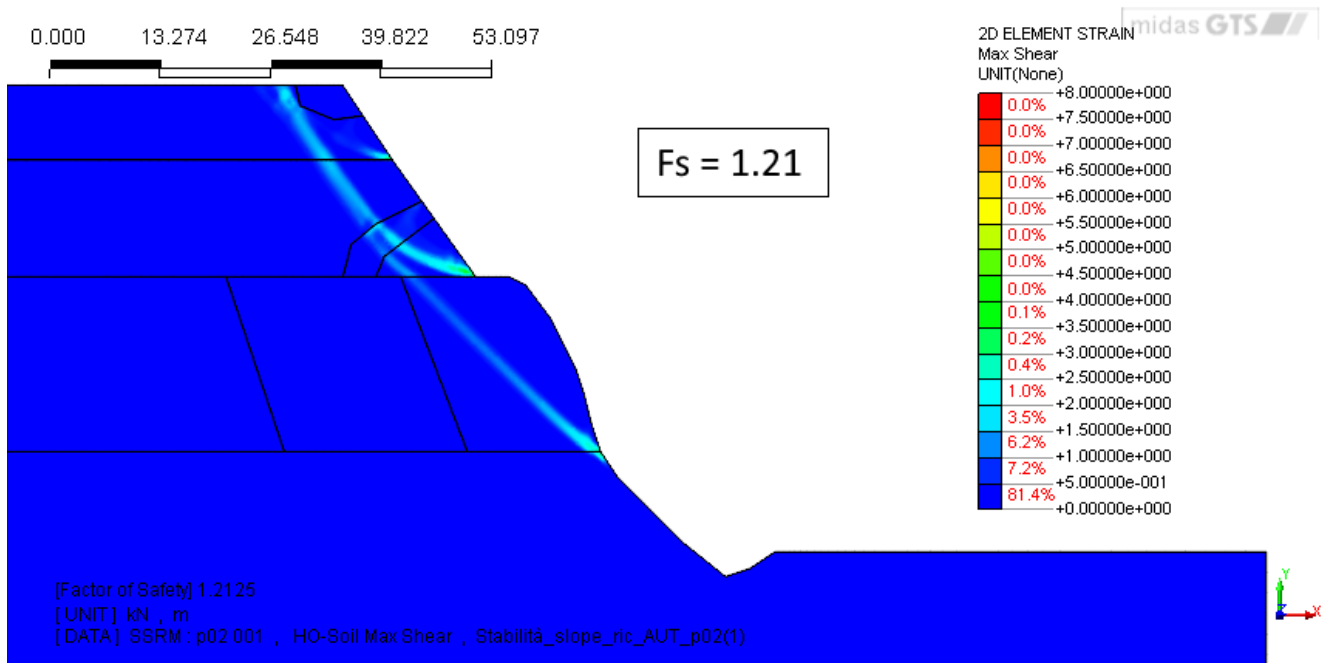


Figura 86 - Dettaglio delle deformazioni a taglio ottenute dalla seconda analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni medie autunnali

L'importanza di queste nuove instabilità è visibile anche dal campo di spostamenti, dove è evidente come l'indebolimento delle due litozone superiori, pur avendo un effetto parzialmente stabilizzante sulla litozona D, provochi l'insorgere di nuove instabilità nel versante con conseguente diminuzione del fattore di sicurezza associato. La risultante degli spostamenti nel piano x-y riportata in Figura 87, conferma quanto appena affermato, mostrando valori di spostamento maggiori all'interno delle litozone B e C rispetto alla litozona inferiore.



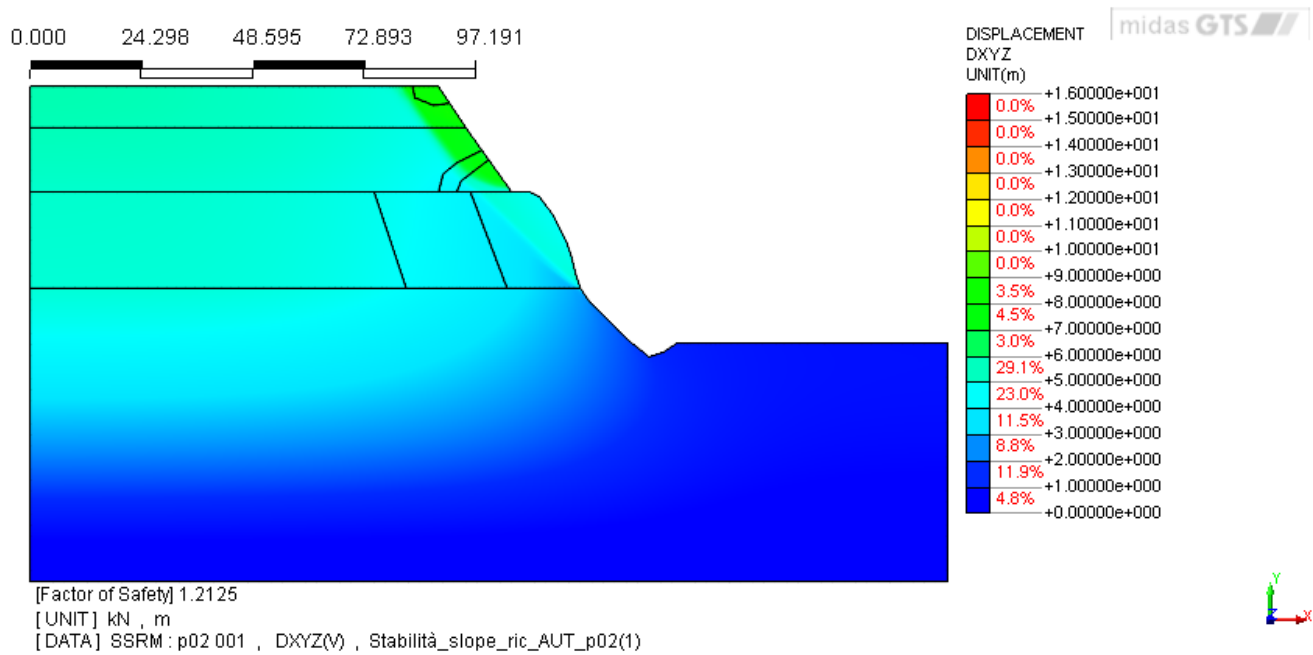


Figura 87 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuta dalla seconda analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni autunnali

### 6.3.2.2. ANALISI CON PRECIPITAZIONI INTENSE

Dopo aver utilizzato come condizione al contorno la ricarica derivante da precipitazioni medie stagionali si passa ora a considerare una serie di eventi critici a tempo di ritorno variabile, analizzando la loro influenza sullo sviluppo del *piping* e sulla stabilità del versante.

Per ottenere i dati di precipitazione è stata costruita la curva di probabilità pluviometrica relativa all'area di Castelseprio, tramite la formula riportata di seguito che mette in relazione, al variare del tempo di ritorno, l'altezza di pioggia attesa  $h_T$  con la durata  $D$  dell'evento:

$$h_T(D) = a_1 w_T D^n$$

I parametri necessari per la valutazione dell'altezza di pioggia sono forniti dal servizio idrografico di ARPA Lombardia e sono riportati nella Tabella 6 mentre in Figura 88 sono mostrate le curve ottenute al variare del tempo di ritorno, per una durata da 1 a 5 giorni.

PARAMETRO	VALORE
$a_1$ - Coefficiente pluviometrico orario	24.142759
n - Coefficiente di scala	0.40226331
$W_2$ - Tempo di ritorno 2 anni	0.93751079
$W_5$ - Tempo di ritorno 5 anni	1.217641
$W_{10}$ - Tempo di ritorno 10 anni	1.412905
$W_{20}$ - Tempo di ritorno 20 anni	1.60937
$W_{50}$ - Tempo di ritorno 50 anni	1.874405
$W_{100}$ - Tempo di ritorno 100 anni	2.0866001
$W_{200}$ - Tempo di ritorno 200 anni	2.3067279

Tabella 6 - Parametri per il calcolo della curva di probabilità pluviometrica (Dati: ARPA Lombardia)

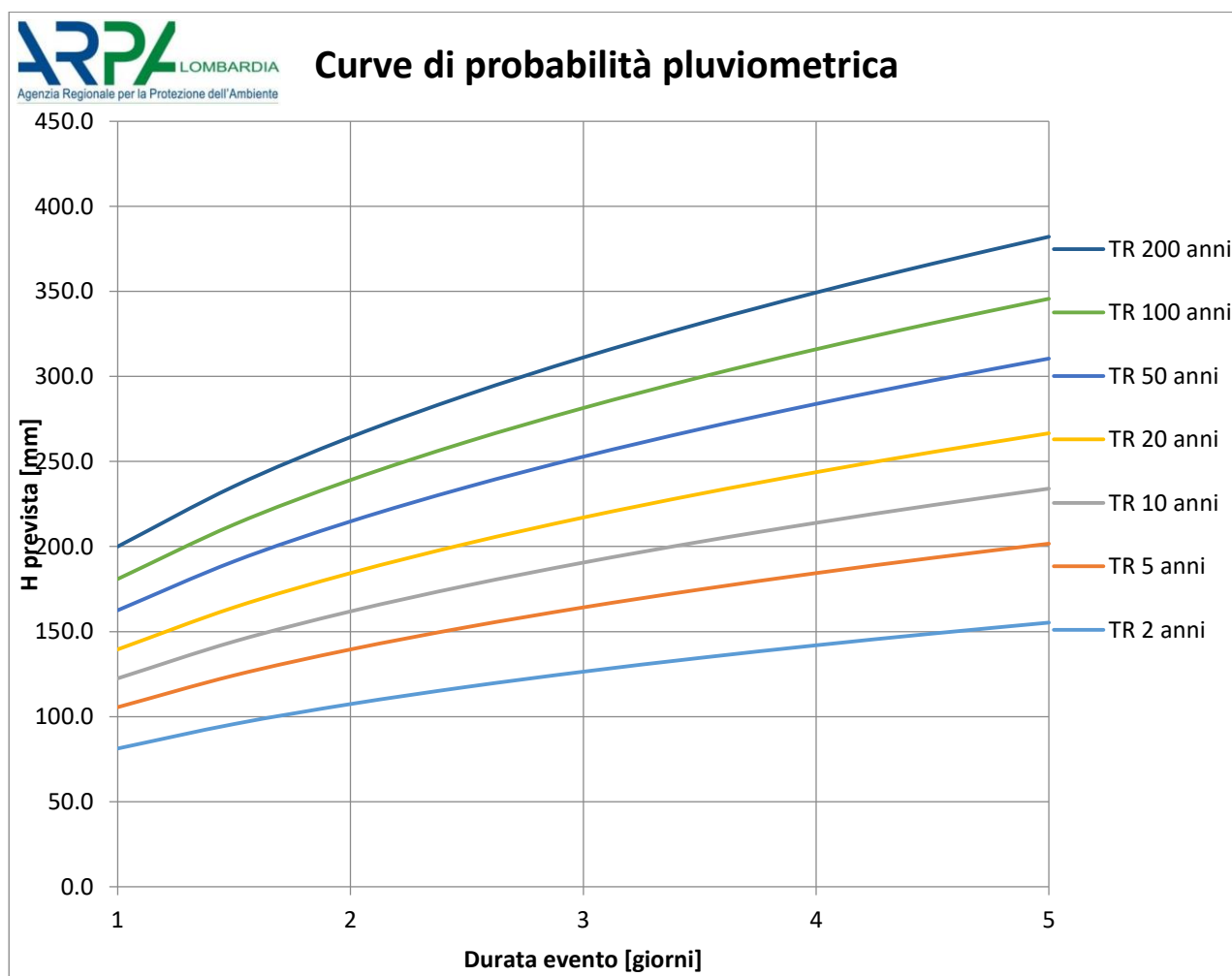


Figura 88 - Curve di probabilità pluviometrica relative al comune di Castelseprio

Per lo svolgimento delle analisi di filtrazione e di stabilità si è scelto di utilizzare i dati relativi a una durata di pioggia pari a 1 giorno: i valori di altezza prevista sono stati perciò estratti dalle curve di probabilità pluviometrica e vengono riportati in Tabella 7, con la corrispondente conversione in portata per l'implementazione nel modello numerico.

<b>Tempo di ritorno [anni]</b>	<b>Precipitazione lorda [mm/d]</b>	<b>Evapotraspirazione [%]</b>	<b>Ricarica effettiva [mm/d]</b>
<b>2</b>	81.3	40	48.77
<b>5</b>	105.6	40	63.34
<b>10</b>	122.5	40	73.50
<b>20</b>	139.5	40	83.71
<b>50</b>	162.5	40	97.50
<b>100</b>	180.9	40	108.54
<b>200</b>	200.0	40	119.99

Tabella 7 - Dati di precipitazione relativi agli eventi critici con durata pari a 1 giorno al variare del tempo di ritorno

Dai dati riportati si può notare come, rispetto alle medie stagionali analizzate in precedenza, ci sia una differenza più marcata tra la ricarica di minor entità, corrispondente ad un tempo di ritorno di 2 anni, rispetto al massimo valore associato a  $Tr=200$  anni.

Questa differenza incide innanzitutto sulla distribuzione delle pressioni, come si può osservare dalle figure riporta di seguito, che mostrano l'andamento nel caso di ricarica minima (Figura 89,  $Tr=2$  anni) e massima (Figura 91,  $Tr=200$  anni), oltre alla distribuzione ricavata con un valore intermedio (Figura 90,  $Tr=50$  anni). Rispetto ai casi precedenti, le pressioni nulle vengono raggiunte in un punto più avanzato superando, per il tempo di ritorno più alto, il confine tra litozona D cementata e intermedia.

Anche in questo caso, tuttavia, la stabilità del pendio non risulta direttamente influenzata dalla presenza dell'acqua e il fattore di sicurezza ottenuto dalle analisi iniziali con le condizioni imposta risulta pari a 1.34 come nei casi precedenti.

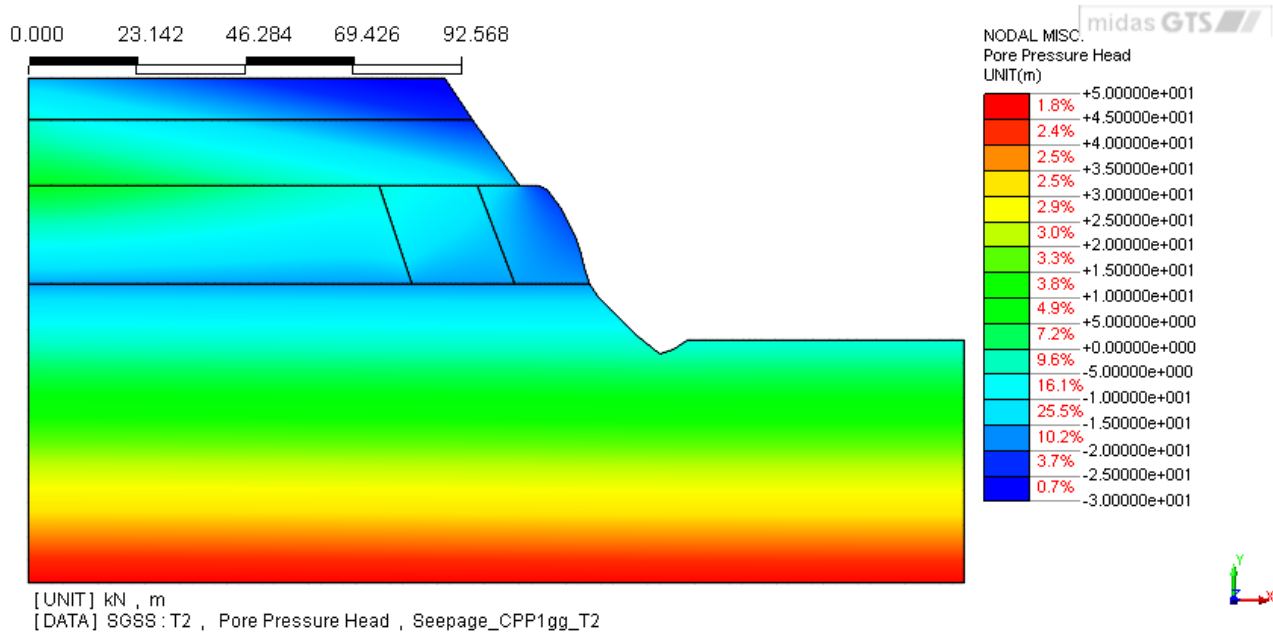


Figura 89 - Distribuzione delle pressioni iniziali con Tr=2 anni

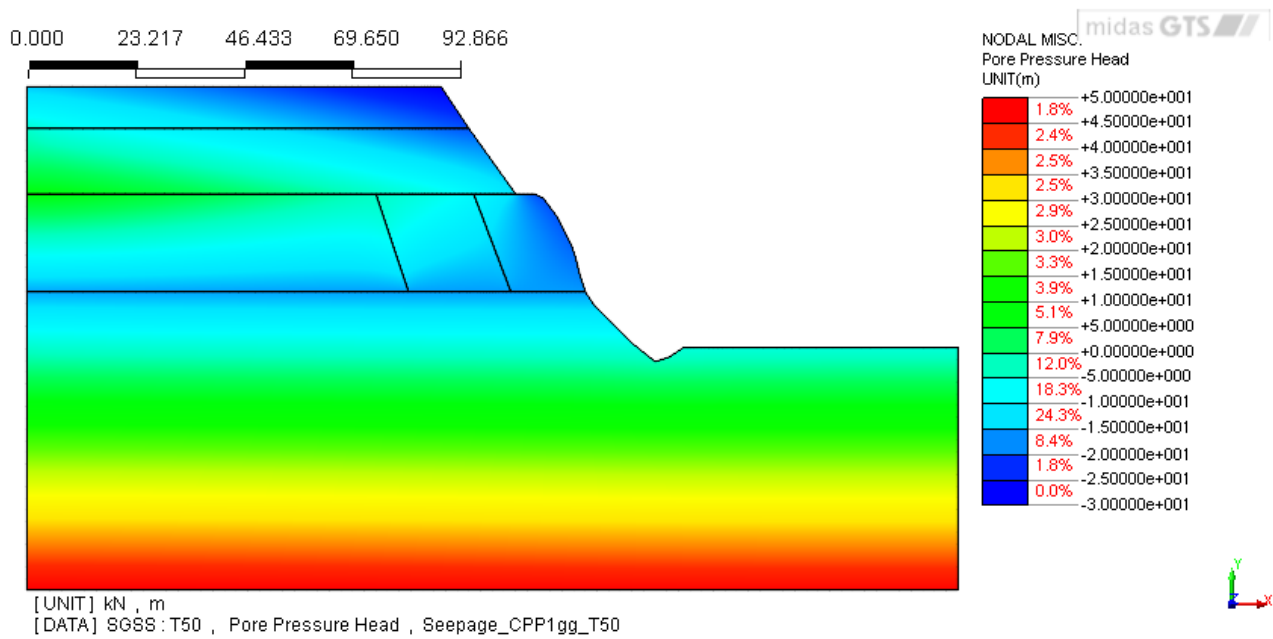


Figura 90 - Distribuzione delle pressioni iniziali con Tr=50 anni

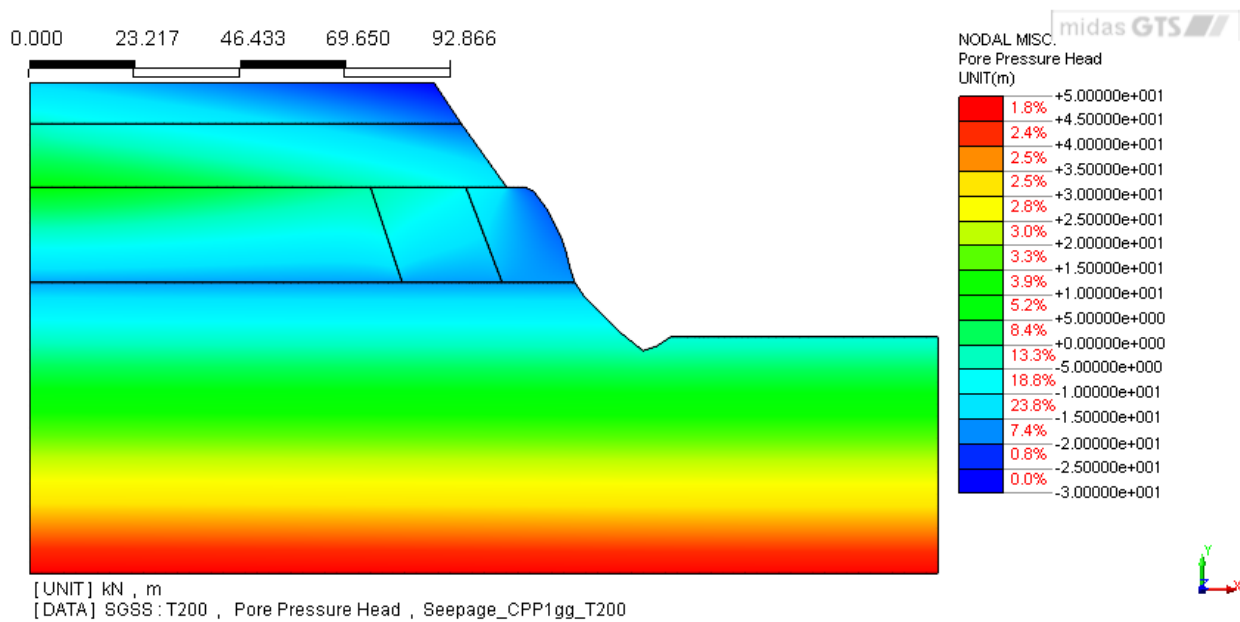


Figura 91 - Distribuzione delle pressioni iniziali con  $T_r=200$  anni

Seguendo lo stesso procedimento utilizzato finora, si procede ad analizzare lo sviluppo del *piping* nel versante e l'influenza che hanno su di esso le condizioni di ricarica imposte, in base all'andamento del gradiente idraulico. Innanzitutto si è osservato che, per tutti gli eventi presi in considerazione, la litozona B presenta valori di gradiente idraulico maggiori in ogni punto rispetto al gradiente critico, e viene perciò considerata interamente indebolita dall'azione erosiva del *piping*. Per quanto riguarda la litozona C, invece, viene fatto riferimento alla Figura 92 dove sono riportati sulla stessa geometria gli andamenti del gradiente critico ottenuti dalle simulazioni iniziali con le diverse condizioni al contorno: si può osservare come l'aumento delle precipitazioni provochi un ampliamento dell'area soggetta a *piping*, pur mantenendo la stessa forma nei diversi casi.

Le simulazioni svolte con le geometrie aggiornate vengono discusse di seguito.



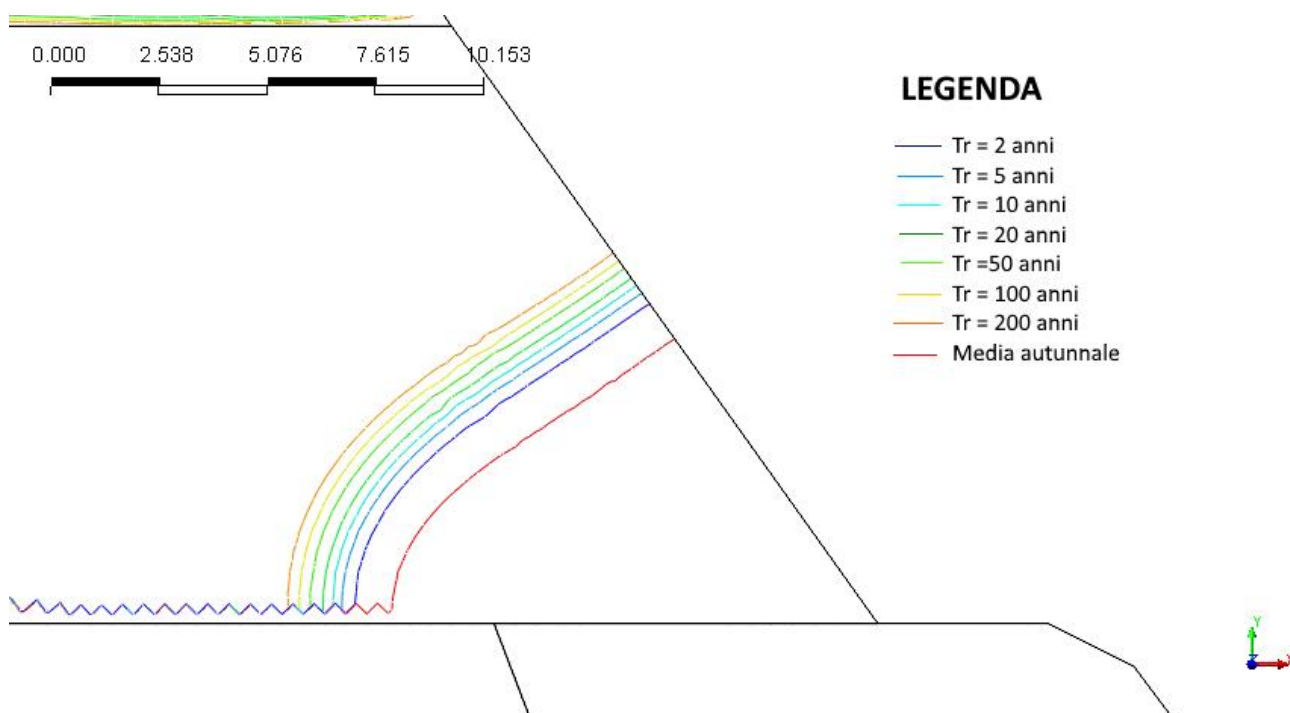


Figura 92 - Andamento del gradiente critico all'interno della litozona C al variare del valore di ricarica superficiale

Dalle immagini relative alle deformazioni di taglio ottenute dalle diverse analisi si può osservare come inizialmente, nel caso di  $Tr=2$  anni (Figura 93) l'instabilità sia localizzata quasi unicamente nella litozona B dove è ben visibile la superficie di scorrimento, alla quale risulta associato un fattore di sicurezza pari a 1.24. L'aumento progressivo delle precipitazioni, e la conseguente espansione dell'area indebolita nella litozona C, provoca la generazione di nuove superfici di rottura in questa litozona e in quella inferiore, come mostrato nella Figura 94 corrispondente ad un tempo di ritorno di 10 anni e nella Figura 95 relativa all'evento con  $Tr=50$  anni, dove questo fenomeno è più evidente; anche in questo caso il fattore di sicurezza ha valore 1.24.

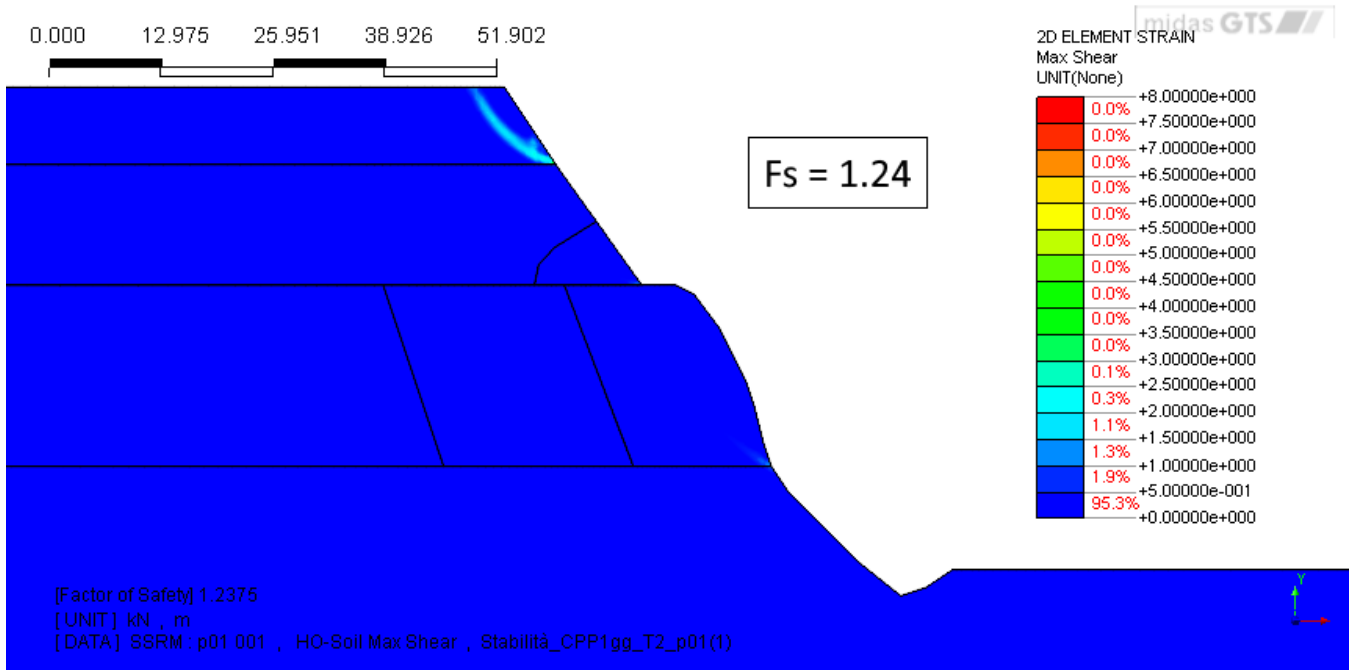


Figura 93 - Deformazioni a taglio ottenute dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno  $T_r=2$  anni

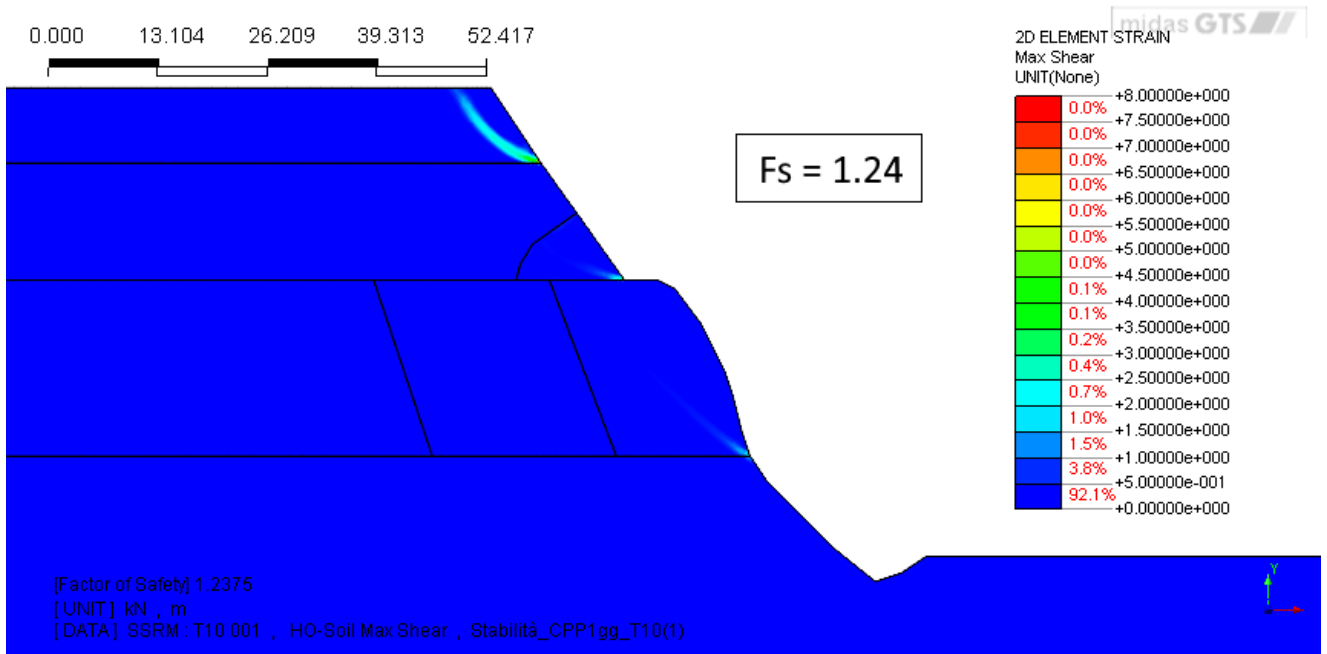


Figura 94 - Deformazioni a taglio ottenute dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno  $T_r=10$  anni

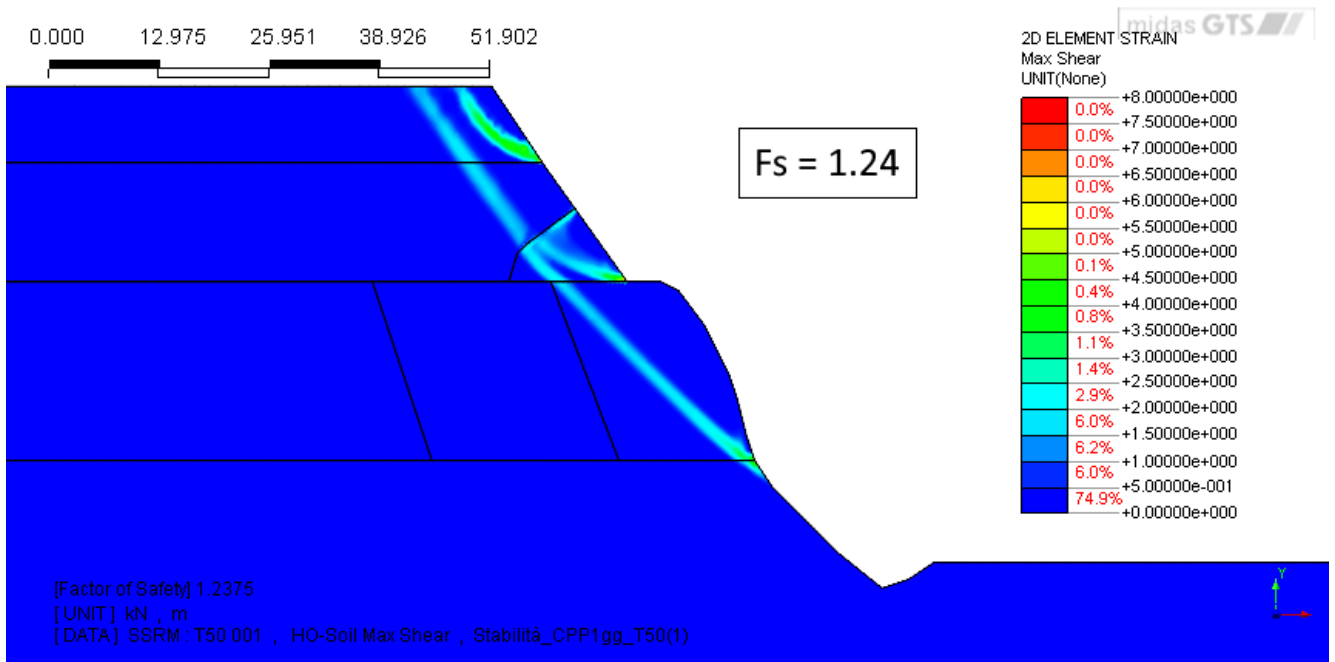


Figura 95 - Deformazioni a taglio ottenute dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno  $T_r=50$  anni

Per quanto riguarda il caso più critico con tempo di ritorno di 200 anni il comportamento del pendio è in linea con i casi appena esposti, in quanto valori non nulli di deformazione a taglio sono riscontrati in tutte e tre le litozone (Figura 96): tuttavia, il fattore di sicurezza ottenuto da questa simulazione risulta minore di quelli ricavati per tempi di ritorno più bassi, ed è pari a 1.21.

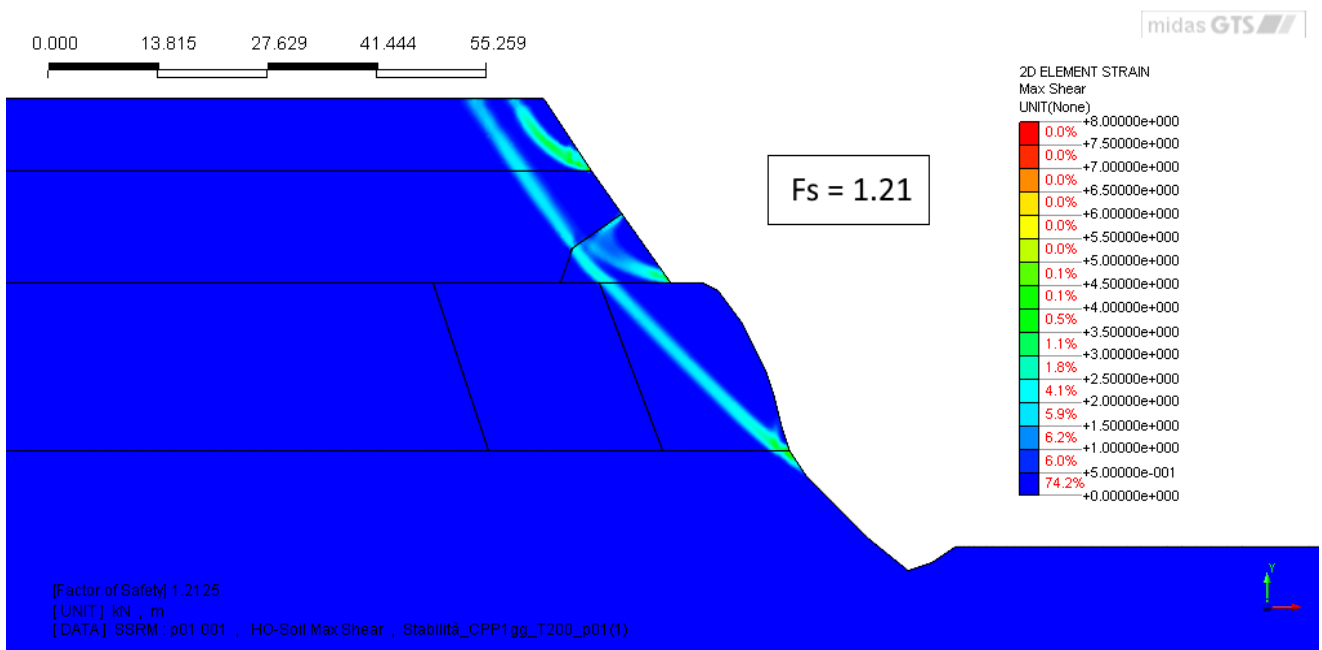


Figura 96 - Deformazioni a taglio ottenute dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno  $T_r=200$  anni

Anche per quanto riguarda la distribuzione degli spostamenti è possibile osservare quanto appena descritto: nel caso di tempo di ritorno di 2 anni la risultante riportata in Figura 97 è concentrata nella litozona B, mentre per i casi a tempo di ritorno maggiore ( $Tr=50$  anni, Figura 98) sono stati ottenuti spostamenti rilevanti nelle litozone C e D, in corrispondenza delle superfici di rottura individuate dalle immagini precedenti, con valori che diminuiscono nelle litozone inferiori. Sempre in accordo con quanto visto nelle deformazioni a taglio, gli spostamenti ottenuti dalla simulazione a  $Tr=200$  anni (Figura 99) non mostrano andamenti dissimili da quelli riscontrati nel caso con tempo di ritorno pari a 50 anni.

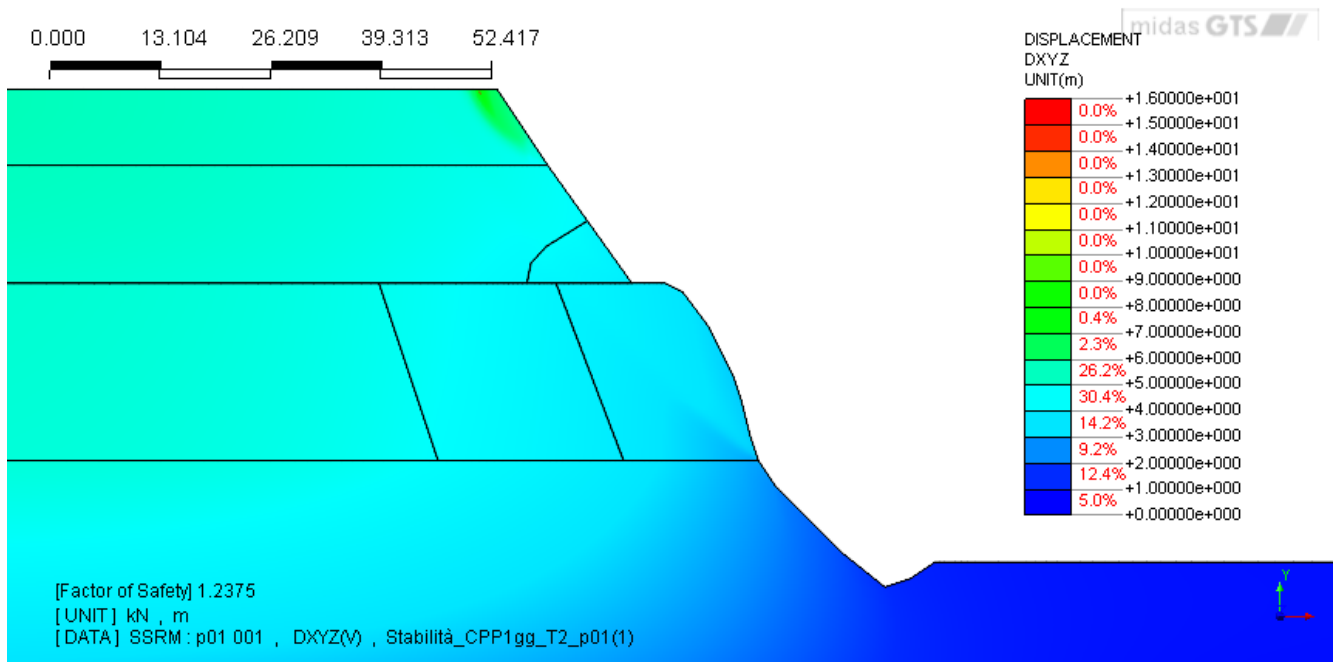


Figura 97 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuta dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno pari a 2 anni

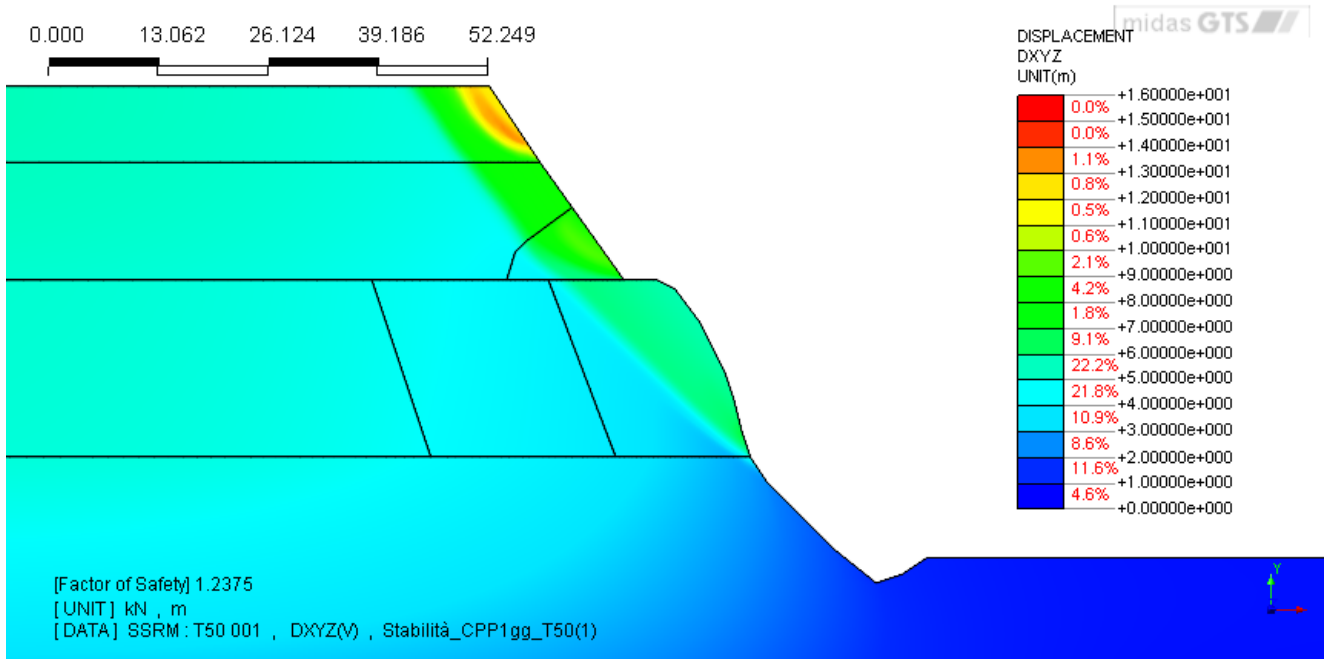


Figura 98 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuta dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno pari a 50 anni

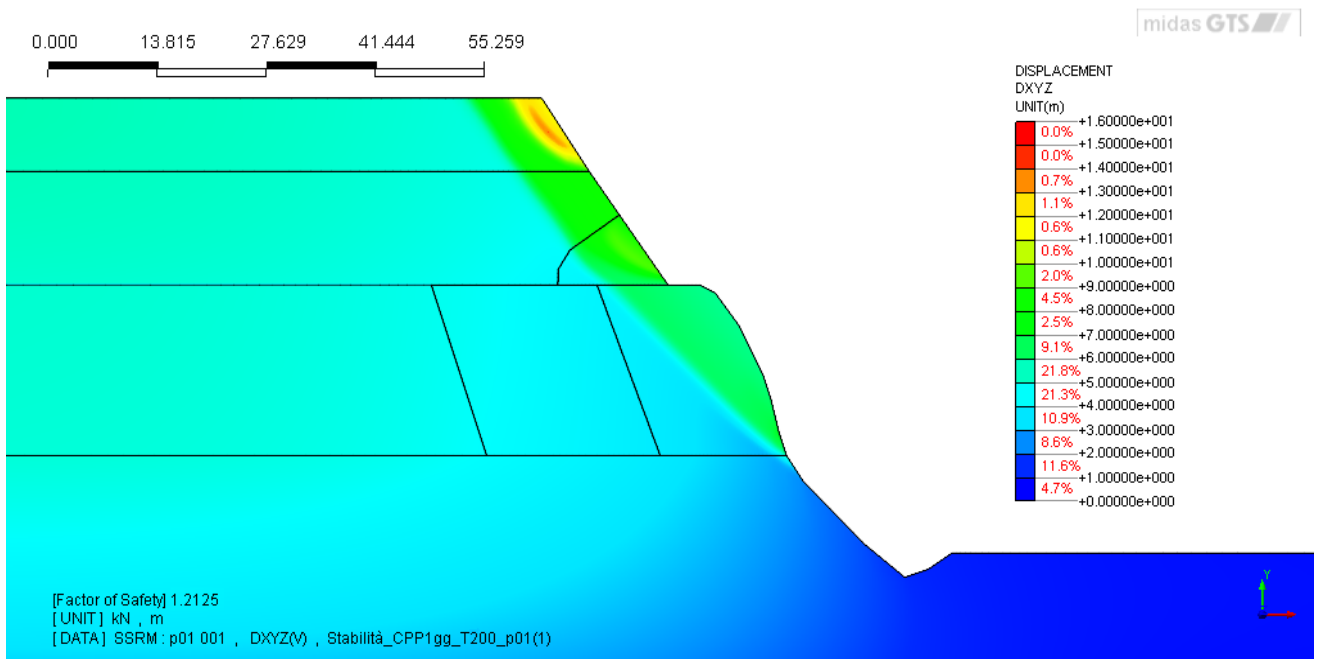


Figura 99 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuta dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno pari a 200 anni



Come in precedenza, si è proceduto ad un secondo passo di analisi per simulare lo sviluppo del *piping*, modificando le geometrie in base al valore di gradiente idraulico ricavato dalle analisi svolte al passo precedente; l'andamento del valore critico e la corrispondente geometria aggiornata per le simulazioni sono riportate per un tempo di ritorno di 2 anni (gradiente critico in Figura 100 e geometria in Figura 101 rispettivamente) e 200 anni (Figura 102 e Figura 103).

Per entrambi i casi è stato riportato l'andamento del gradiente critico nella sola litozona C, in quanto già al passo di analisi precedente la litozona B risultava essere completamente indebolita dal *piping*. Confrontando i due andamenti si può notare come le piogge più intense provochino non solo un aumento dell'area erosa in prossimità di quella già inserita precedentemente, ma causi anche la generazione di una nuova zona indebolita sulla superficie destra del pendio che parte dal confine con la litozona soprastante: già nella Figura 100 relativa al tempo di ritorno minore si osserva una porzione molto ridotta di quest'area, che con l'aumentare dell'intensità delle precipitazioni si propaga verso il basso fino a congiungersi con la parte sottostante, dando origine ad un'unica area continua indebolita dal *piping* osservabile in Figura 102 che coinvolge l'intera superficie esterna della litozona C.

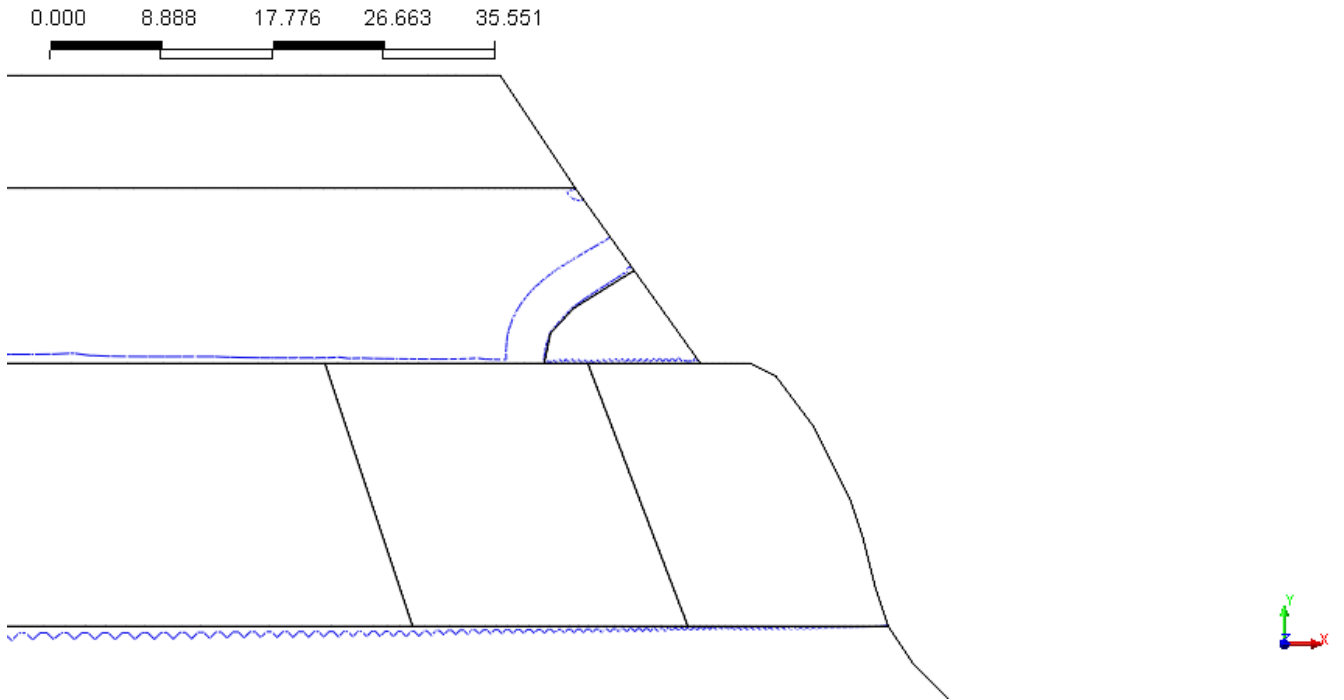


Figura 100 - Andamento del gradiente idraulico ottenuto dal primo passo di analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno  $T_r=2$  anni

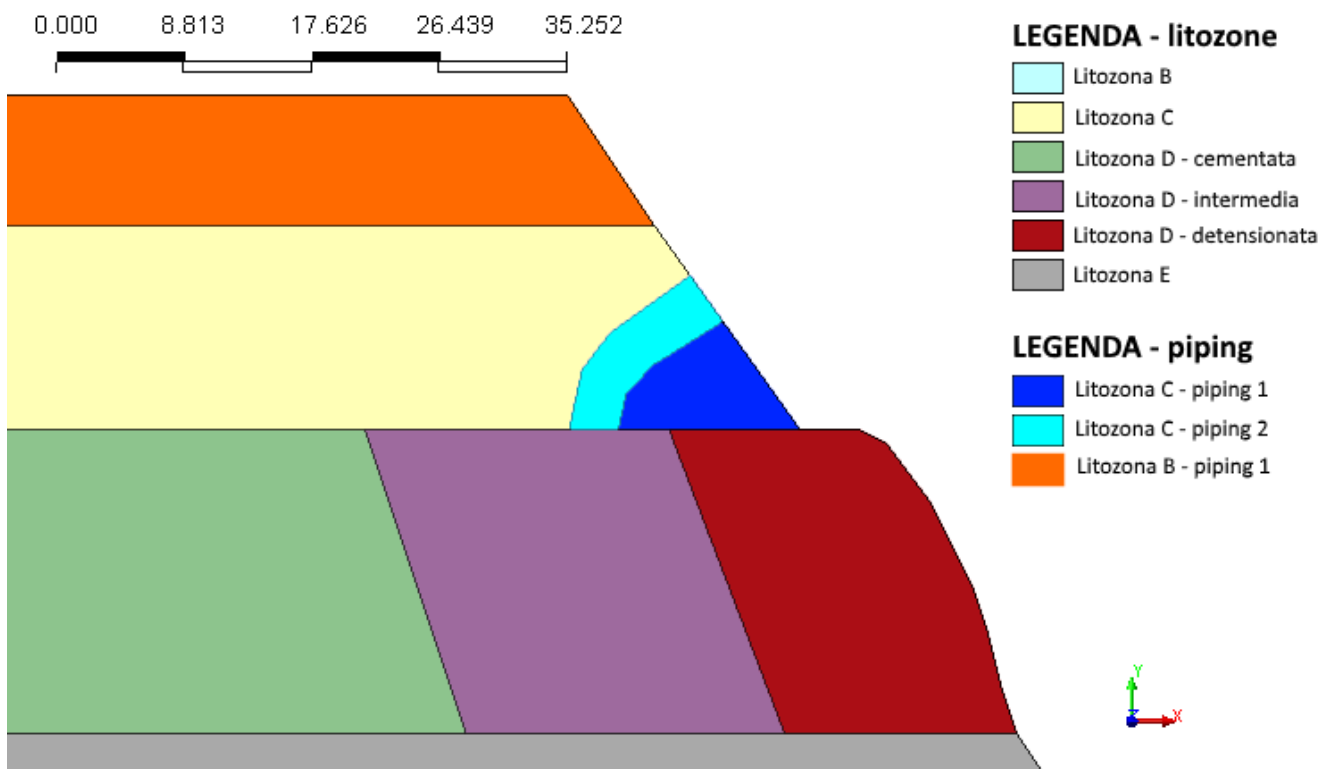


Figura 101 - Geometria aggiornata sulla base dei risultati ottenuti dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno  $T_r=2$  anni

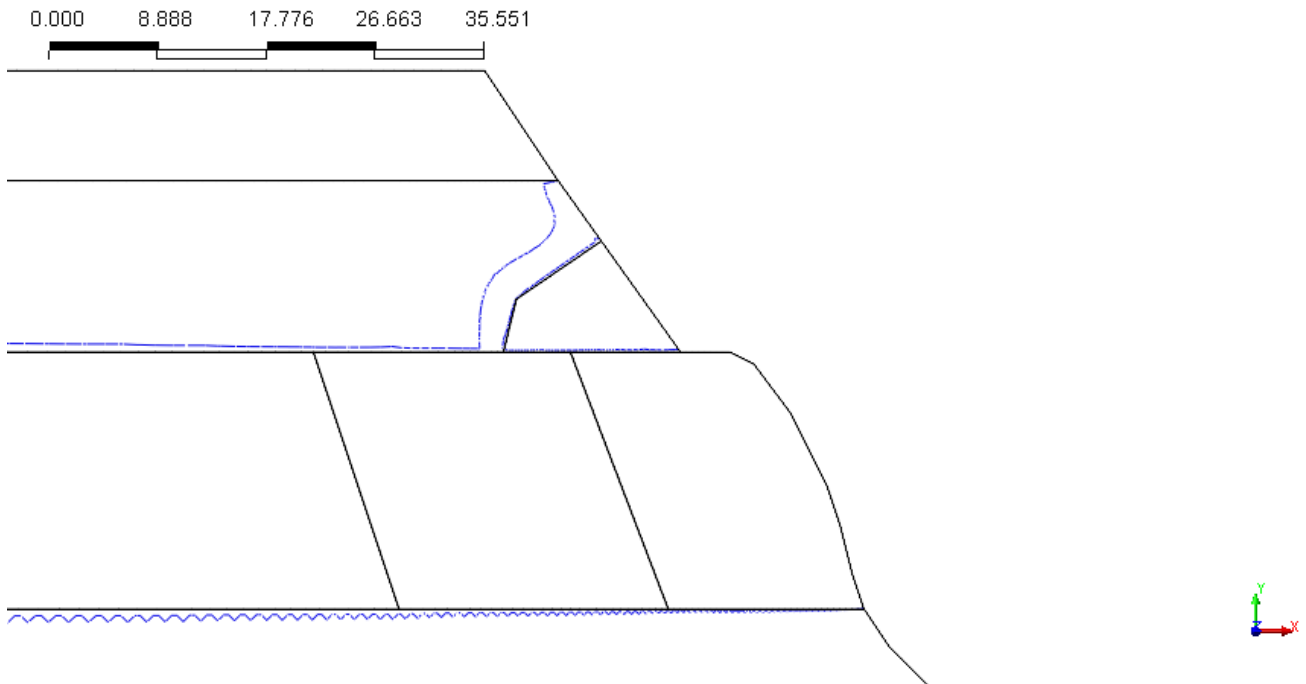


Figura 102 - Andamento del gradiente idraulico ottenuto dal primo passo di analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno  $T_r=200$  anni

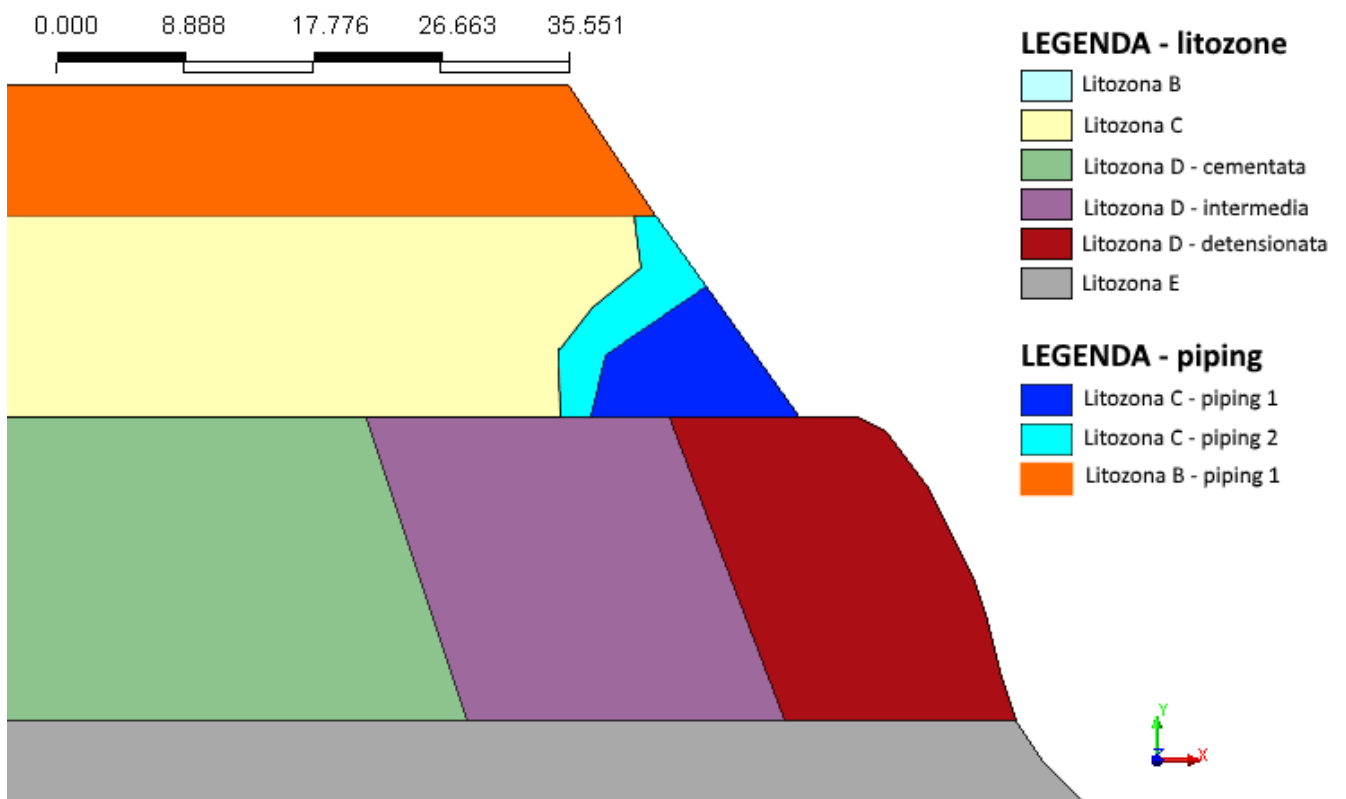


Figura 103 - Geometria aggiornata sulla base dei risultati ottenuti dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno  $T_r=200$  anni

Anche in questo secondo passo di analisi le simulazioni svolte con le precipitazioni con tempo di ritorno di 2 anni hanno portato ad una instabilità prevalentemente all'interno della litozona B: come si può osservare dalle deformazioni a taglio (Figura 104), la superficie di scorrimento è simile a quella individuata in precedenza e riportata in Figura 93. Tuttavia, in questo caso, si riscontra un ulteriore abbassamento del fattore di sicurezza, che scende a un valore di 1.19.

Per quanto riguarda l'analisi relativa al tempo di ritorno di 200 anni si può notare dalla Figura 105 come l'inserimento della nuova superficie indebolita abbia provocato un aumento delle deformazioni nella litozona C, dove la superficie di rottura si è ora estesa in modo più significativo, eliminando allo stesso tempo le instabilità precedentemente localizzate nella litozona D. Anche in questo caso l'analisi ha restituito un fattore di sicurezza inferiore al passo di analisi precedente, pari a 1.16.

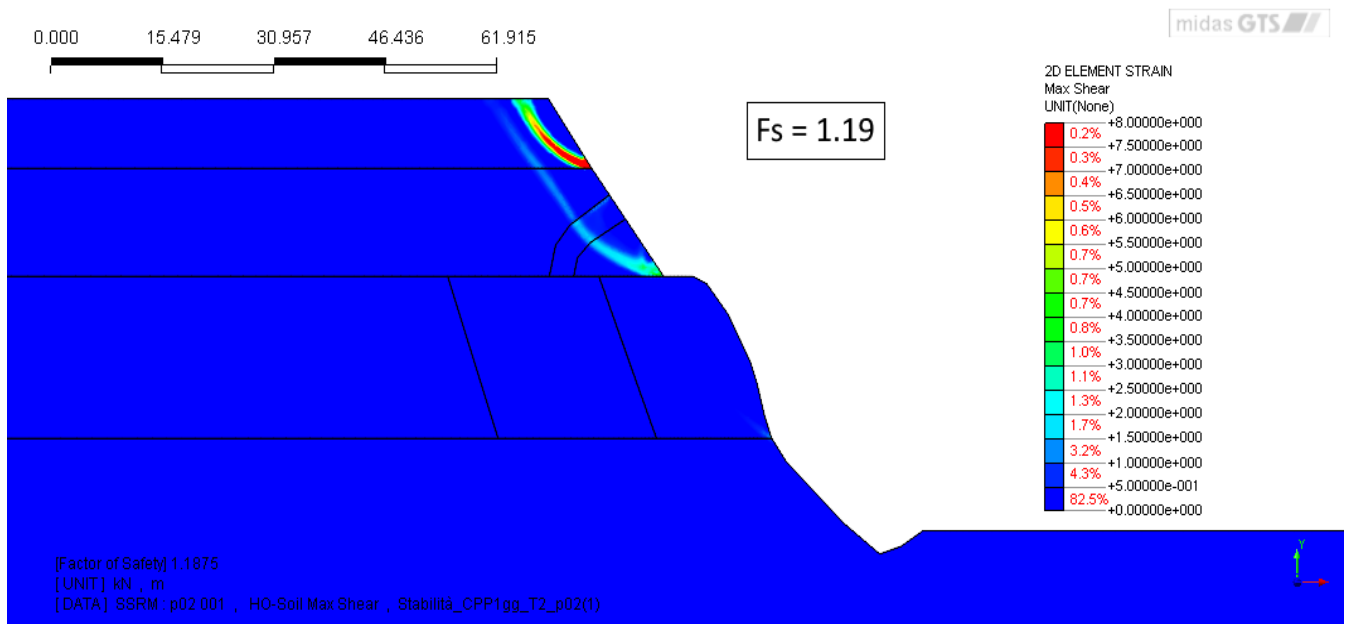


Figura 104 - Deformazioni a taglio ottenute dalla seconda analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno  $T_r=2$  anni

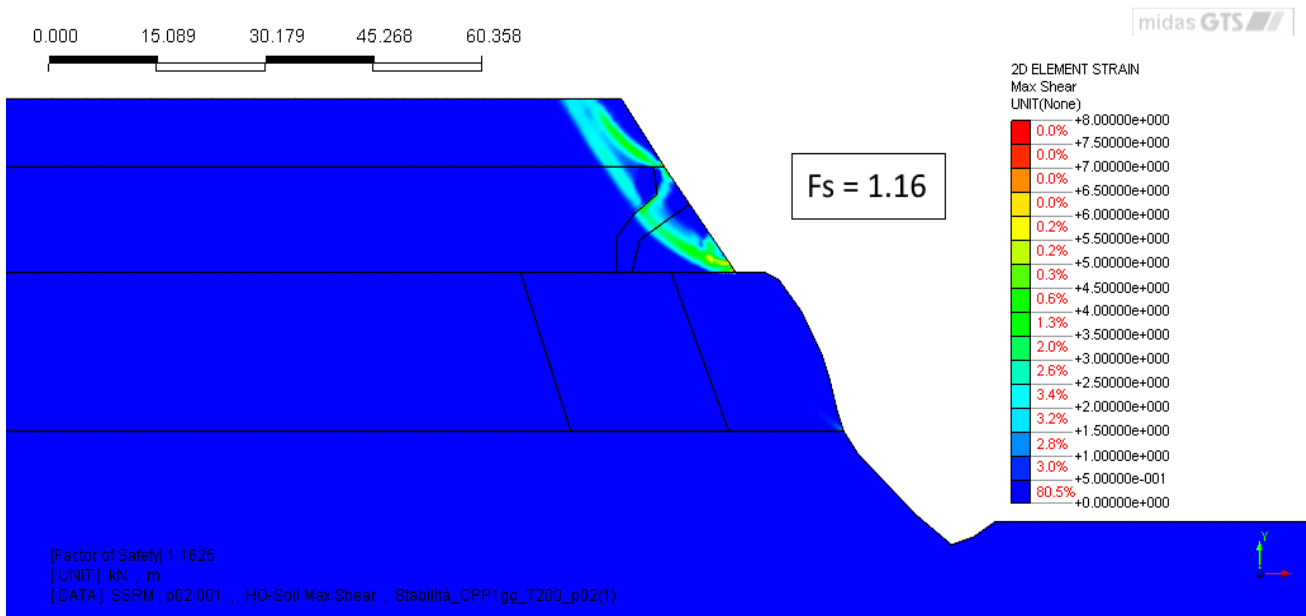


Figura 105 - Deformazioni a taglio ottenute dalla seconda analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno  $T_r=200$  anni

Osservando gli spostamenti ottenuti da queste simulazioni si nota come la litozona B rimanga la parte soggetta ai valori di spostamento più significativi per tempi di ritorno bassi ( $T_r=2$  anni, Figura 106), nonostante l'inserimento del nuovo materiale indebolito abbia provocato un significativo aumento degli spostamenti nella litozona C. Per quanto riguarda il caso corrispondente ad un tempo di ritorno pari a 200 anni, mostrato in Figura 107, l'indebolimento della litozona C causa l'aumento dei valori di spostamenti nella Formazione di Castronno che costituisce le due litozone superficiali, mentre la litozona D non mostra spostamenti significativi.



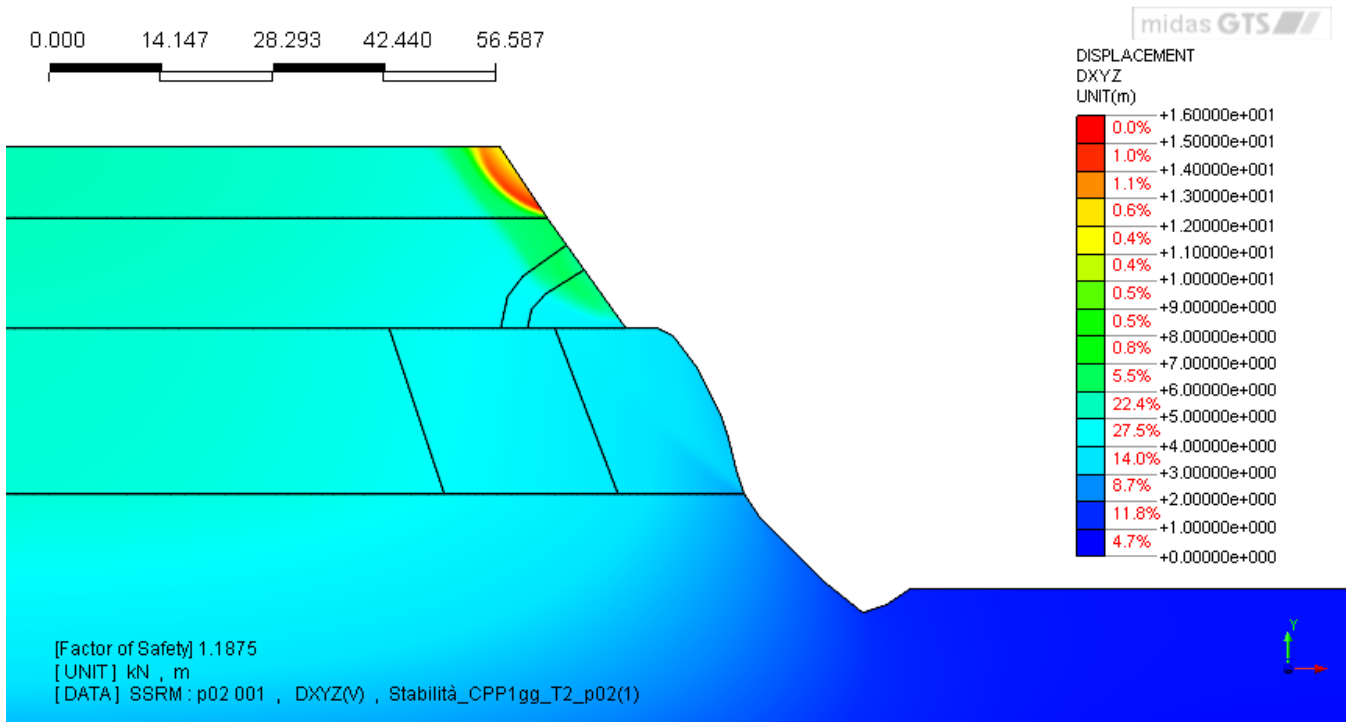


Figura 106 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuta dalla seconda analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno pari a 2 anni

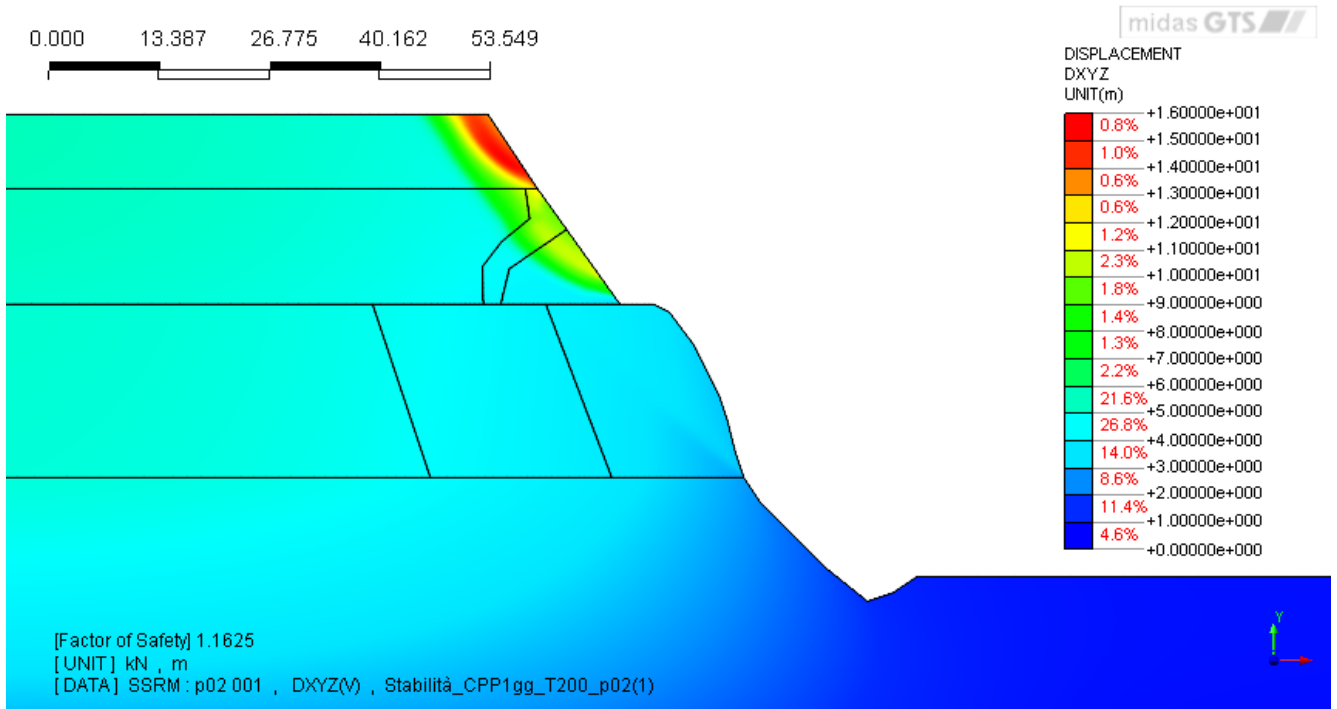


Figura 107 - Risultante degli spostamenti nel piano x-y ottenuta dalla prima analisi con materiale indebolito dal piping e precipitazioni con tempo di ritorno pari a 200 anni

#### 6.4. ANALISI DI SENSITIVITÀ

Le analisi numeriche hanno mostrato, per tutti i casi presi in esame, una riduzione del fattore di sicurezza a seguito dell'azione erosiva del *piping* e del conseguente indebolimento del materiale che costituisce il versante; tuttavia i valori ottenuti sono tutti superiori all'unità, suggerendo che l'indebolimento del pendio non sia sufficiente a generare situazioni di imminente collasso.

Sono state quindi condotte delle analisi di sensitività sui parametri meccanici relativi alla Formazione di Castronno che compone la litozona C, inserendo inizialmente un valore costante di coesione e variando l'angolo di attrito per osservare l'influenza di tale dato sulla stabilità del pendio e sul fattore di sicurezza associato. Si è poi ridotta gradualmente la coesione, svolgendo le analisi di stabilità mantenendo costante il valore dell'angolo di attrito. Le analisi numeriche sono state svolte sulla base della geometria riportata in Figura 103.

I dati in Tabella 8 riassumono i risultati ottenuti con una coesione pari a 20KPa e un angolo di attrito gradualmente ridotto; l'andamento del fattore di sicurezza segue un andamento quasi lineare fino ad un angolo di attrito di 24°, diminuendo in modo più sensibile passando ad un valore di 22°, al quale corrisponde un fattore di sicurezza pari a 1.06 molto vicino all'unità. I risultati sono stati inseriti in un grafico, riportato in Figura 108.

<b>Coesione c [KPa]</b>	<b>Angolo di attrito <math>\phi</math> [°]</b>	<b>Fattore di sicurezza Fs [-]</b>
20	32	1.21
20	30	1.21
20	28	1.18
20	26	1.16
20	24	1.14
20	22	1.06

Tabella 8 - Valori del fattore di sicurezza ottenuti al variare dell'angolo d'attrito

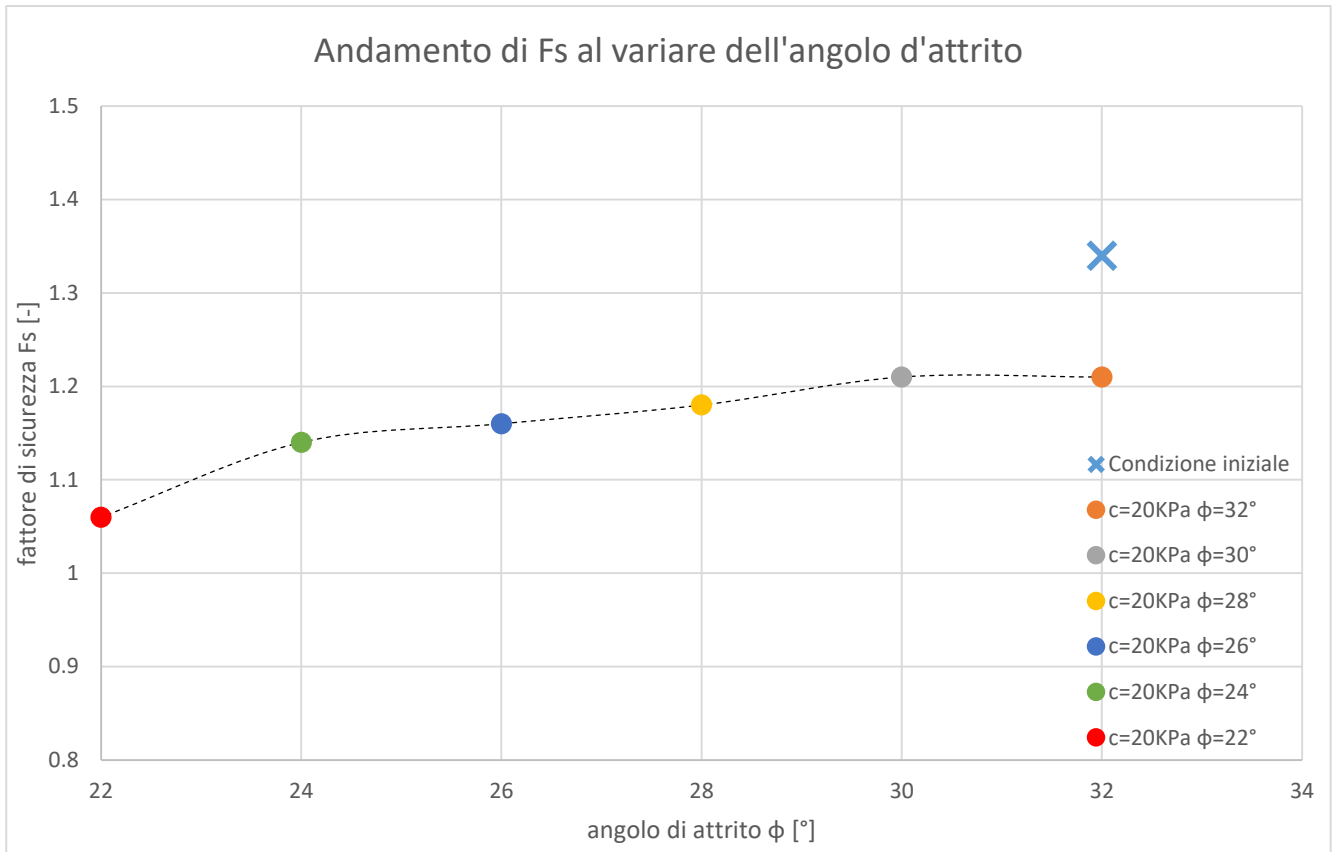


Figura 108 - Andamento del fattore di sicurezza al variare dell'angolo d'attrito

In Tabella 9 sono invece riportati i risultati relativi alle analisi di stabilità svolte al diminuire della coesione, mantenendo un angolo di attrito costante pari a  $26^\circ$ ; in questo caso la diminuzione del fattore di sicurezza segue un andamento lineare fino ad un valore di coesione pari a 20 KPa come osservabile in Figura 109. Tuttavia, diminuendo ulteriormente questo parametro, la pendenza della retta che rappresenta l'andamento del fattore di sicurezza aumenta in modo significativo portando al raggiungimento di un valore pressoché unitario in corrispondenza di una coesione pari a 10 KPa, scendendo a valori ancora inferiori in assenza di coesione. Si può inoltre notare come, rispetto al caso precedente, l'allontanamento dalla condizione iniziale con il primo dato inserito risulti meno significativo se la variazione riguarda l'angolo di attrito, mentre è maggiore quando a diminuire è la coesione; questo comportamento, in aggiunta agli andamenti appena descritti, indica come la variazione del fattore di sicurezza abbia una dipendenza maggiore dalla coesione rispetto all'angolo di attrito.

Coesione c [KPa]	Angolo di attrito $\phi$ [°]	Fattore di sicurezza Fs [-]
70	26	1.29
50	26	1.26
30	26	1.21
20	26	1.16
10	26	1.01
0	26	0.86

Tabella 9 - Valori del fattore di sicurezza ottenuti al variare della coesione

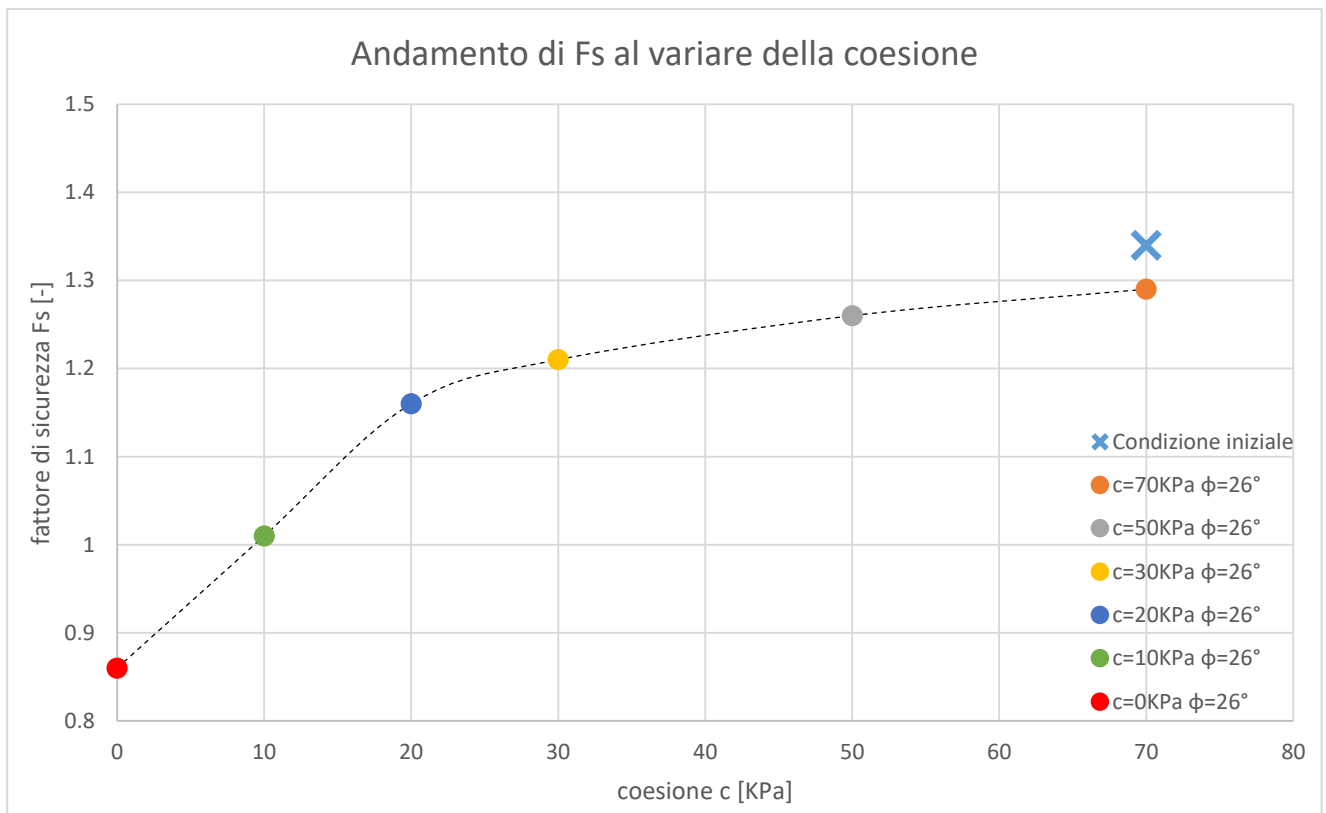


Figura 109 - Andamento del fattore di sicurezza al variare della coesione

## 7. IL MODELLO TRIDIMENSIONALE

### 7.1. GEOMETRIA DEL MODELLO

Alla luce dei risultati ottenuti dalle analisi bidimensionali, si è passati all'analisi del problema in campo tridimensionale, al fine di valutare la stabilità dell'area di studio in diversi scenari. Come caso iniziale è stato considerato uno scenario in assenza di pioggia; in un secondo momento è stata inserita la ricarica superficiale indotta da un evento critico di precipitazione, al fine di valutare l'influenza del *piping* sulla stabilità del versante. Sulla base dei risultati ottenuti verranno individuate le aree a maggior pericolosità, sulle quali è quindi prioritario l'intervento tramite opere di stabilizzazione e messa in sicurezza.

Per ricostruire la geometria del sistema tridimensionale è stato utilizzato un modello digitale del terreno avente risoluzione di 5m: questo ha consentito di definire un solido rappresentante la topografia del pianalto di Castelseprio, includendo nel modello, oltre a una parte della valle dell'Olonza, anche le due valli laterali del Malmonte e del Vallone lungo le quali si individuano pendenze significative che potrebbero dare luogo a potenziali instabilità.

Per agevolare le analisi nel campo 3D, per motivi di carattere computazionale, il modello geologico è stato semplificato come segue:

- La litozona D è stata rappresentata con un unico materiale, senza tenere conto delle variazioni dello stato di cementazione con la profondità.
- In accordo con i risultati ottenuti nelle analisi bidimensionali, le litozone B e C sono state unite in un unico strato superficiale, con caratteristiche corrispondenti alla litozona C, trascurando quindi le variazioni di alterazione con la profondità.

Sulla base di quanto detto viene riportata in Figura 110 la geometria del dominio di calcolo.



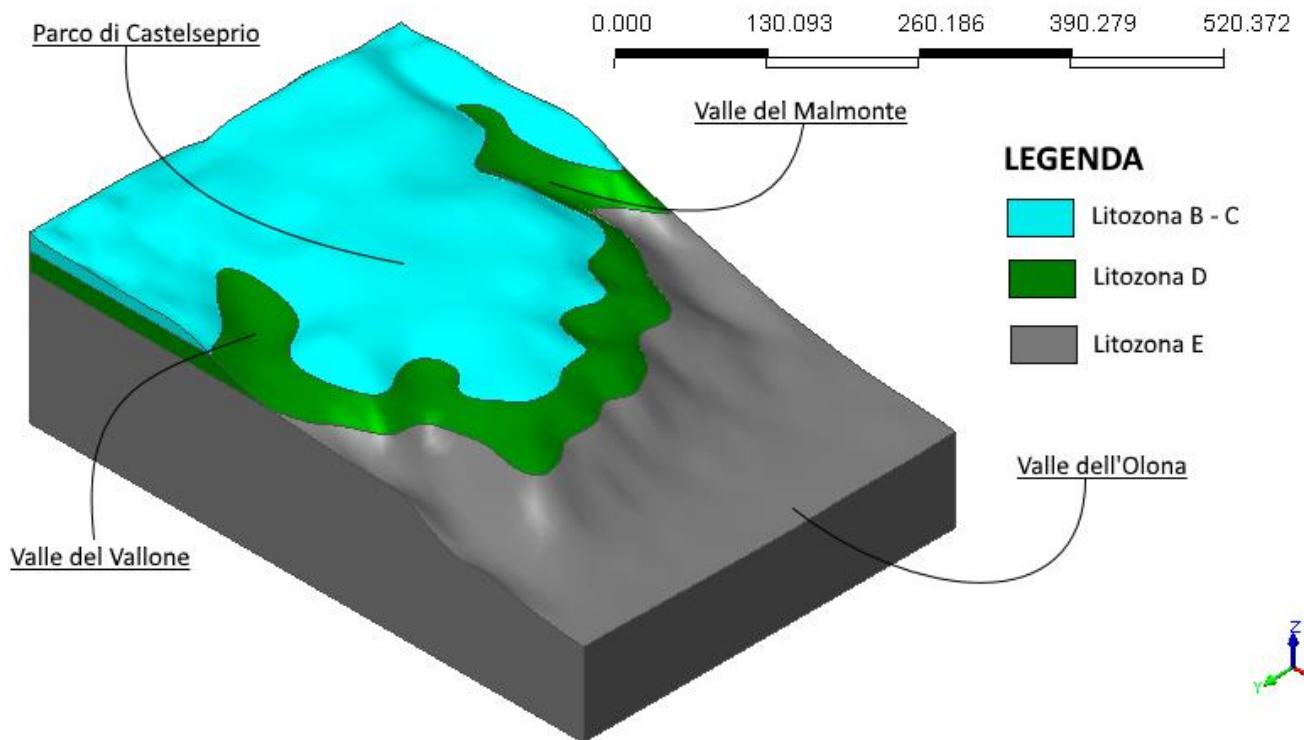


Figura 110 - Geometria del modello tridimensionale

## 7.2. DEFINIZIONE DELLA MESH E PROPRIETÀ DEI MATERIALI

Il dominio tridimensionale è stato discretizzato tramite l'impiego di una mesh composta da elementi tetraedrici, come mostrato in Figura 111. Gli elementi presentano una dimensione massima di 50 metri in corrispondenza della parte inferiore della litozona E, riducendosi gradualmente all'avvicinarsi alla frontiera con la litozona D: in questo punto è stata costruita una mesh composta da elementi di lato 15 metri nella parte posteriore del dominio, che diminuiscono fino a raggiungere dimensioni pari a 5 metri sulla superficie del versante.

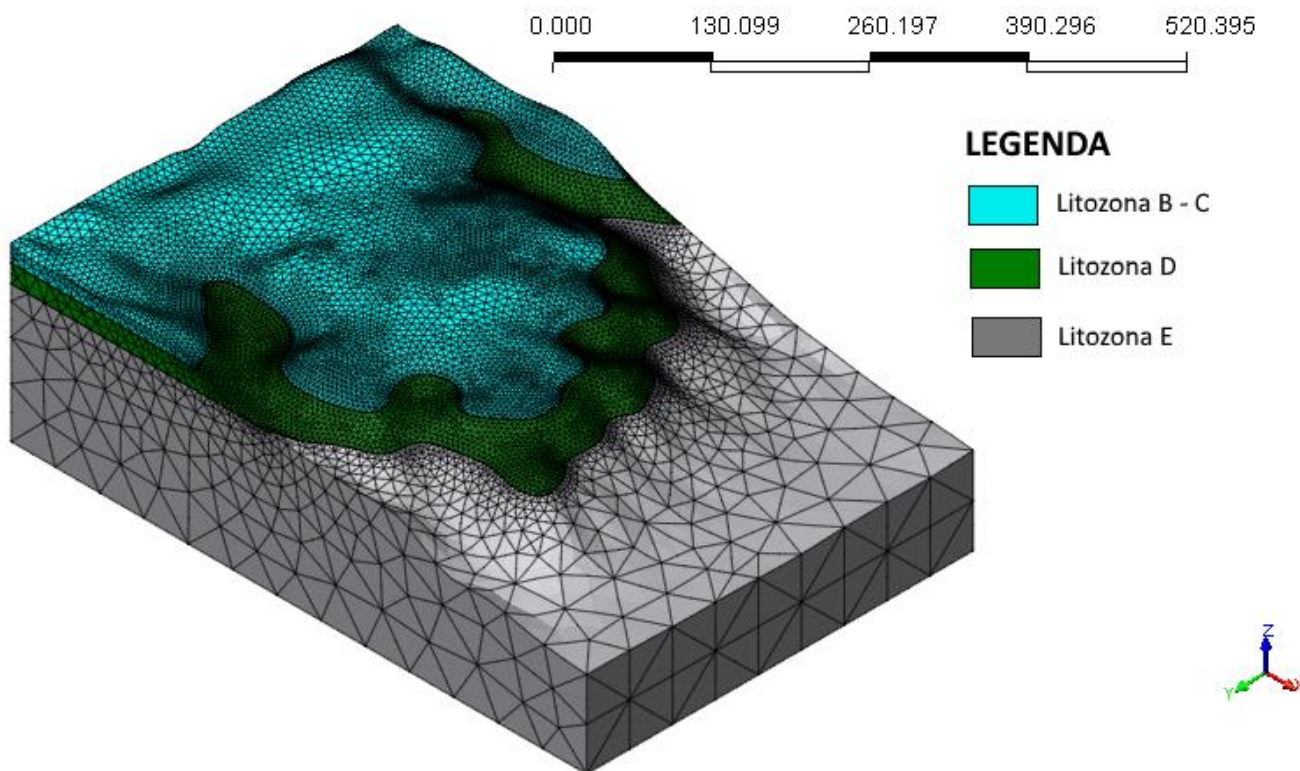


Figura 111 - Mesh del modello tridimensionale

Per quanto riguarda la scelta delle caratteristiche delle litozone, i parametri meccanici e idraulici relativi ai diversi materiali coinvolti sono stati definiti sulla base del modello concettuale esposto in precedenza. Per quanto riguarda il modello costitutivo, anche nel caso delle analisi tridimensionali il modello scelto per descrivere il comportamento dei materiali è quello che prevede un legame costitutivo elasto-plastico con criterio di rottura alla Mohr-Coulomb. Quindi le proprietà utilizzate sono quelle riportate in Tabella 2.

### 7.3. CONDIZIONI INIZIALI E CONDIZIONI AL CONTORNO

Dopo aver definito il dominio di calcolo e la dimensione degli elementi per la discretizzazione, si è proceduto imponendo le condizioni iniziali e al contorno come riassunto di seguito:

- Spostamenti nulli in direzione x e y, rispettivamente sulle facce del dominio ortogonali agli assi.
- Vincolo ad incastro imposto alla base del dominio, che impedisce spostamenti e rotazioni degli elementi.
- Stato di sforzo iniziale dipendente esclusivamente dal peso proprio.

Per quanto riguarda la componente idraulica sono state imposte le seguenti condizioni al contorno aggiuntive:

- Carico a monte superiore, che interessa la litozona C, pari a 344 m s.l.m.
- Carico a monte inferiore all'interno della litozona D, pari a 260 m s.l.m.
- Carico a valle per l'acquifero più profondo, pari a 255 m s.l.m.
- Ricarica per infiltrazione sulla superficie del pianalto, calcolata utilizzando dati di pioggia depurati dalle perdite dovute all'evapotraspirazione; per il caso tridimensionale si farà riferimento all'evento critico con tempo di ritorno pari a 200 anni.

Di seguito vengono riportati i risultati relativi allo stato di sforo iniziale, dove è possibile notare come lo stato tensionale verticale riportato in Figura 112 sia puramente geostatico.

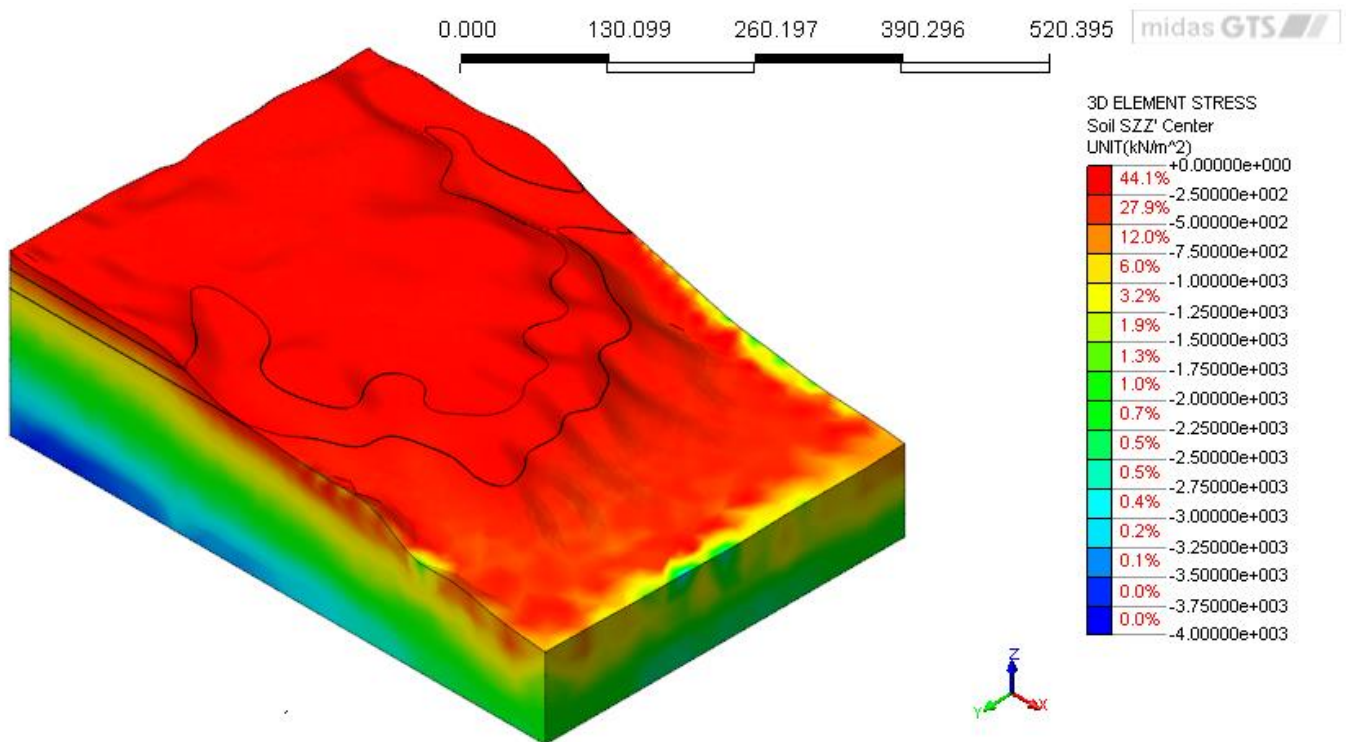


Figura 112 - Sforzi verticali nel modello tridimensionale

Dopo aver implementato il modello tridimensionale sono state condotte le simulazioni numeriche; il caso inizialmente considerato prevede l'inserimento delle condizioni relative ai carichi idraulici costanti, corrispondenti a un caso di alimentazione unicamente da monte. Successivamente sono state introdotte le condizioni relative alla ricarica superficiale, rappresentata da un evento di precipitazione che coinvolge il pianalto su cui sorgono gli scavi, analizzando infine uno scenario in cui viene presa in considerazione l'azione erosiva del *piping* e il conseguente indebolimento del versante.

#### 7.4. ANALISI CON ALIMENTAZIONE DA MONTE E RICARICA SUPERFICIALE

Anche nel caso tridimensionale la modellazione è stata condotta in modo disaccoppiato, ricostruendo il moto di filtrazione dell'acqua nel dominio tramite un'analisi di tipo Seepage, dalla quale è stata estratta la distribuzione delle pressioni neutre da inserire come condizione iniziale per l'analisi sforzi-deformazioni.

Tale andamento è mostrato in Figura 113. A conferma di quanto rilevato nelle analisi bidimensionali si osserva la presenza di due acquiferi distinti: l'acquifero più profondo, la cui circolazione avviene unicamente all'interno della litozona E, e quello superiore, delimitato inferiormente dalla presenza della litozona D a bassa permeabilità, che coinvolge la litozona più superficiale.

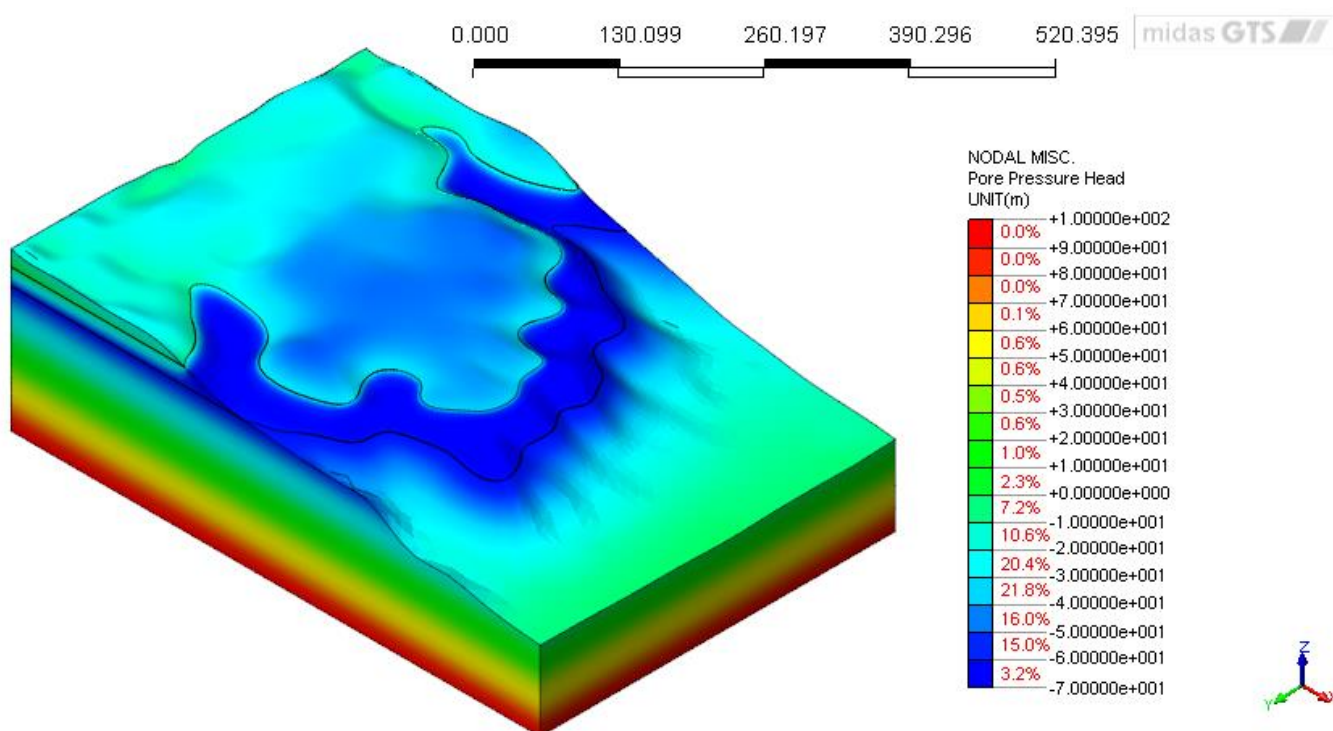


Figura 113 - Distribuzione delle pressioni neutre con alimentazione solo da monte

La Figura 114 riportata di seguito si riferisce invece alle deformazioni a taglio ottenuto dall'analisi di stabilità con alimentazione da monte; da questa immagine si può osservare come, sulla superficie topografica del versante, siano visibili delle aree soggette ad instabilità lungo le valli del Malmonte e del Vallone, in particolare sul versante del pianalto su cui si trova il Parco Archeologico. Si notano inoltre valori non nulli anche nell'area della litozona E a valle del pianalto, in direzione della valle dell'Olna. L'analisi di stabilità restituisce, con le condizioni imposte, un fattore di sicurezza pari a 1.73.

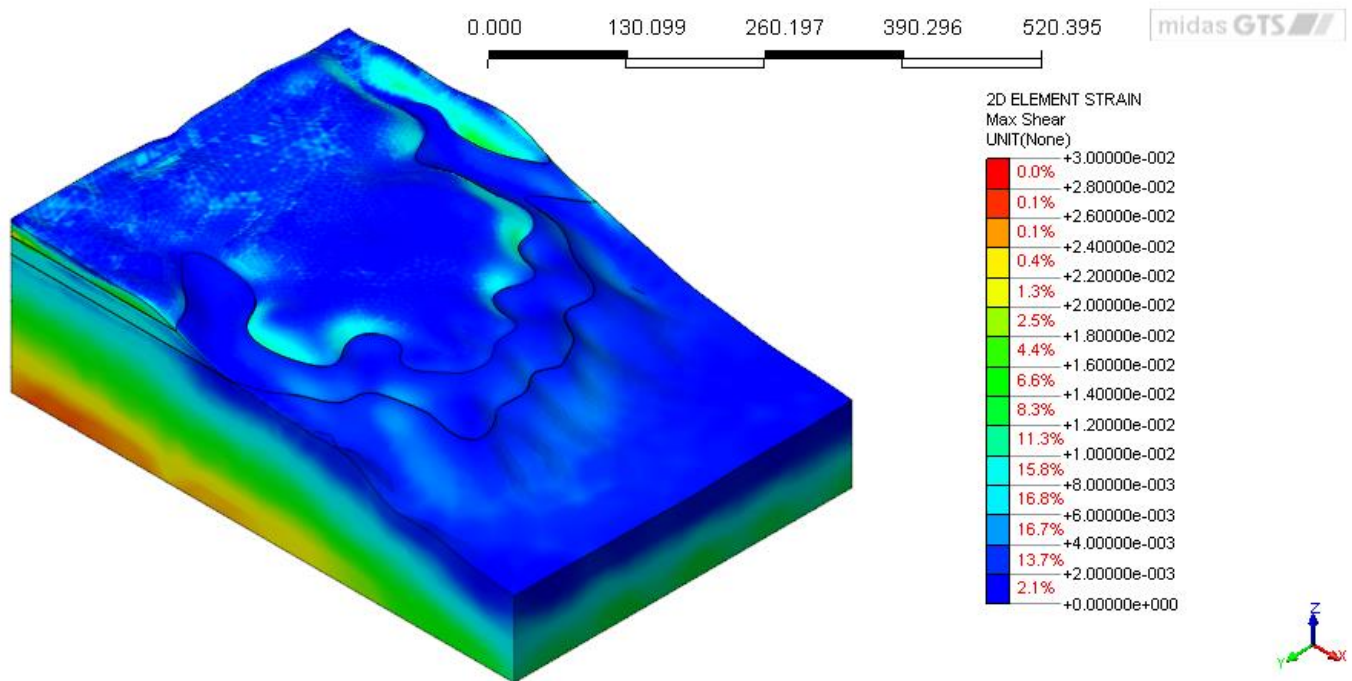


Figura 114 - Distribuzione delle deformazioni a taglio

Dalla distribuzione degli spostamenti lungo l'asse x riportata in Figura 115 si nota come i valori maggiori si concentrino al piede del versante nella valle dell'Olonia, con alcune aree sulla superficie del pianalto interessate da spostamenti di minor entità.

Per quanto riguarda gli spostamenti in direzione y, riportati in Figura 116, risulta evidente come le aree soggette a maggior instabilità siano i versanti del pianalto che costituiscono le valli laterali nelle quali scorrono le rogge Malmonte e Vallone: in questo caso la litozona maggiormente soggetta agli spostamenti risulta essere quella più superficiale, con un parziale coinvolgimento del Ceppo nella litozona D.

Vengono infine riportati gli spostamenti in direzione verticale (Figura 117) corrispondente all'asse z, dai quali è osservabile l'effetto di consolidazione agente sul dominio.



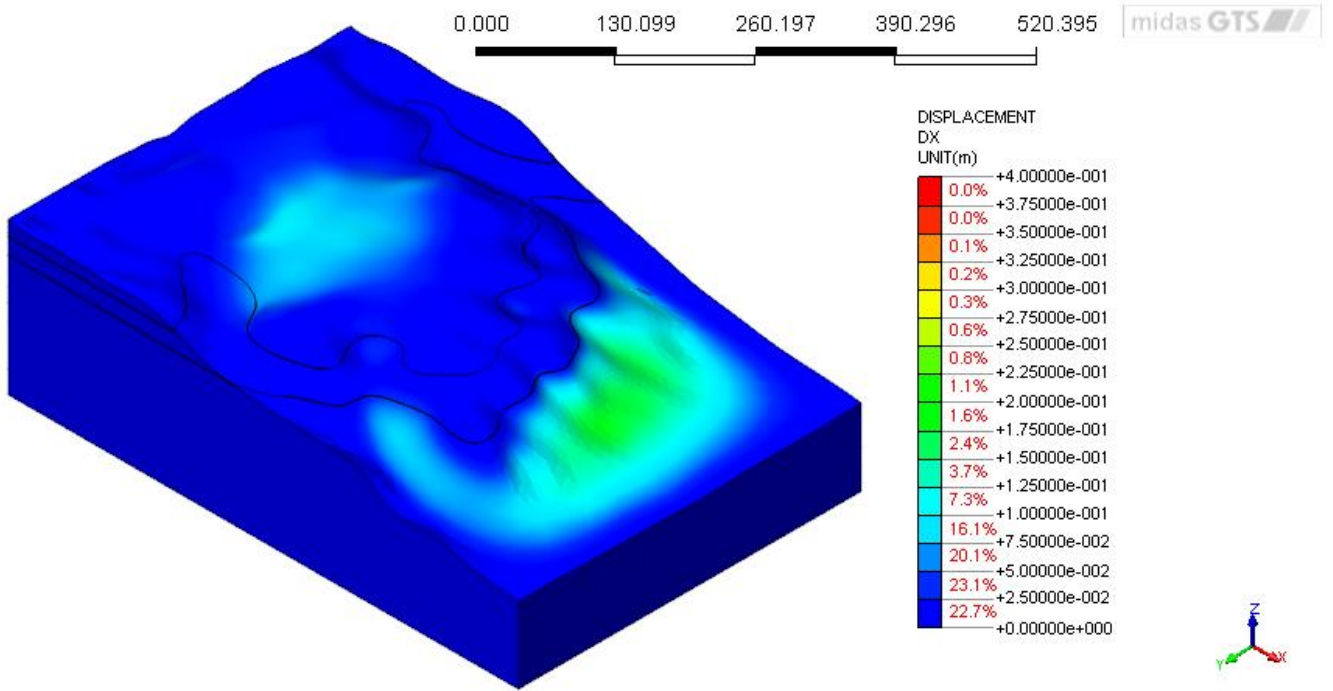


Figura 115 - Spostamenti in direzione x nel modello tridimensionale

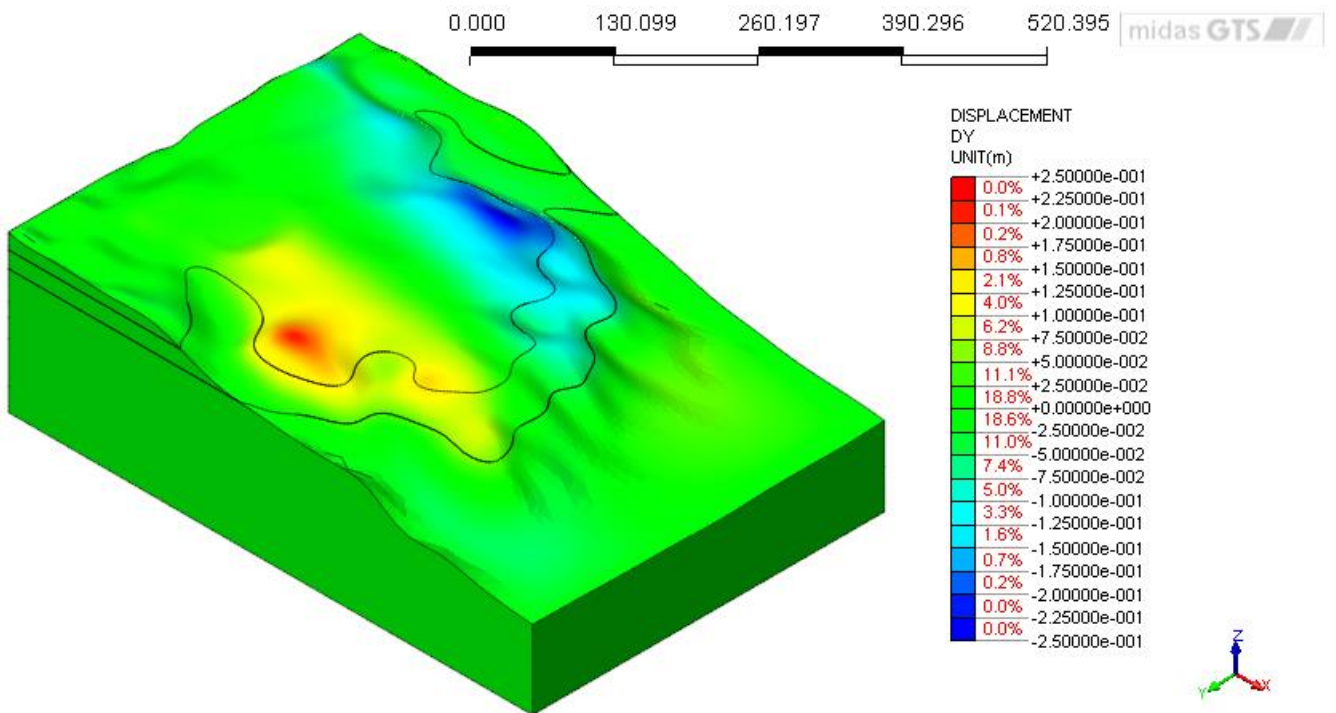


Figura 116 - Spostamenti in direzione y nel modello tridimensionale



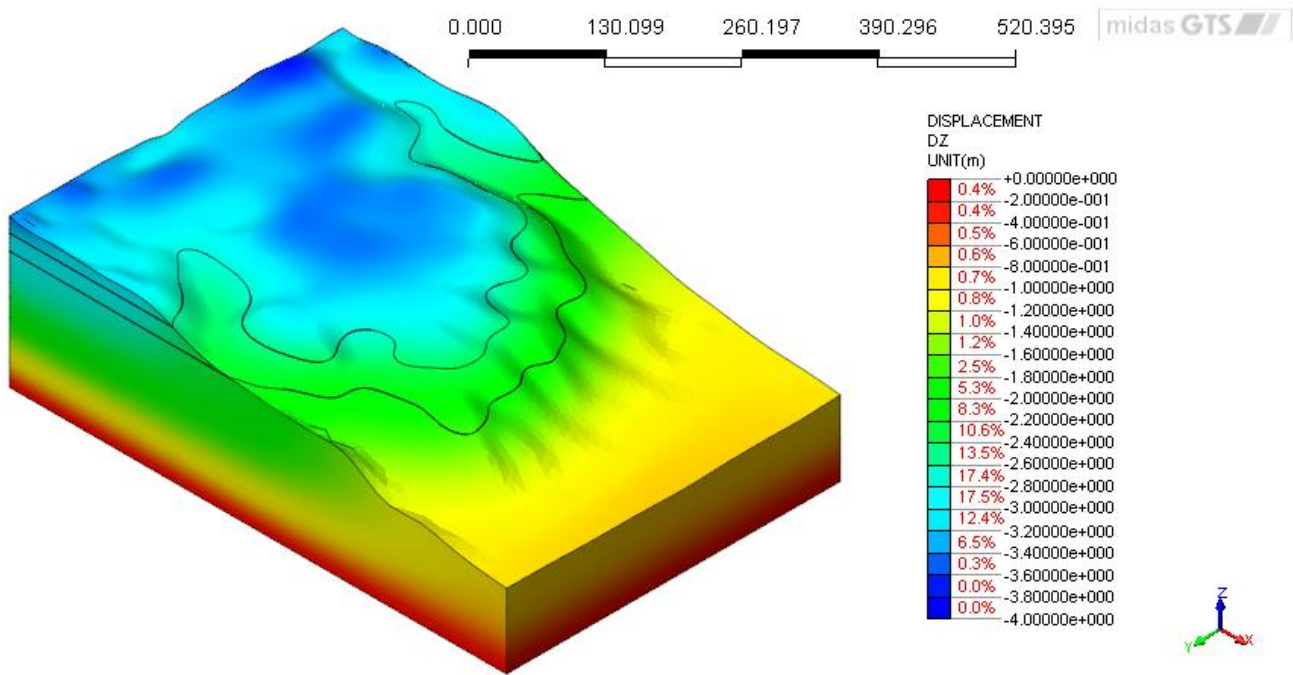


Figura 117 - Spostamenti verticali in direzione z nel modello tridimensionale

Dopo aver analizzato il caso con alimentazione unicamente da monte data dai carichi idraulici costanti, si considera ora la presenza di una ricarica superficiale provocata dalle precipitazioni sul pianalto di Castelseprio; il dato di precipitazione utilizzato è relativo ad un evento critico con tempo di ritorno pari a 200 anni, riportato precedentemente in Tabella 7.

Poiché la modellazione è condotta in modo disaccoppiato, la condizione relativa alla ricarica verrà imposta nell'analisi di filtrazione stazionaria sotto forma di valore di portata per unità di superficie. In Figura 118 è riportata la distribuzione delle pressioni neutre ottenuto da tale analisi: si può notare come l'inserimento della condizione di ricarica superficiale abbia causato un incremento significativo delle pressioni all'interno dell'acquifero superficiale. Tuttavia, come risultato dalle analisi 2D, l'inserimento della ricarica non è sufficiente a modificare le condizioni di stabilità del versante; si rende quindi necessario lo svolgimento una simulazione che prenda in considerazione la presenza di cavità nel terreno, che si generano per effetto del *piping* indotto da queste precipitazioni.

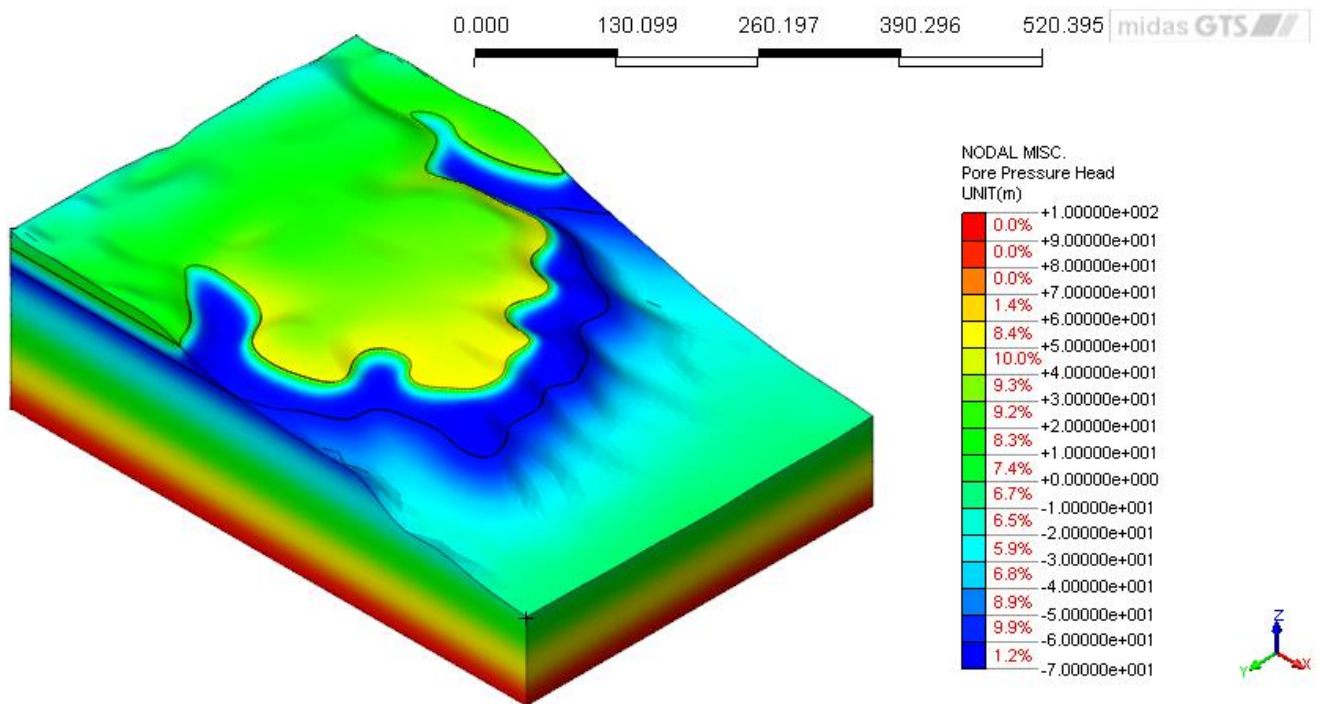


Figura 118 - Distribuzione delle pressioni neutre nel caso di ricarica superficiale con tempo di ritorno pari a 200 anni

### 7.5. ANALISI CON MATERIALE INDEBOLITO DAL PIPING

Dopo aver analizzato l'influenza delle condizioni al contorno sulla stabilità del versante si vuole simulare, in maniera affine al caso bidimensionale, una situazione nella quale l'azione combinata di alimentazione da monte e precipitazioni abbia generato fenomeni di erosione interna: verrà quindi considerato un caso in cui il materiale della litozona superficiale risulti indebolito per effetto dell'azione del *piping*.

Per la scelta dell'area interessata da questo fenomeno sono stati presi in considerazione i risultati ottenuti dalle analisi bidimensionali relativi alle simulazioni con eventi critici di precipitazione: in queste l'erosione coinvolge parte della litozona C, in particolare su tutta la superficie topografica del pendio, mentre la litozona B risulta interamente interessata dal *piping*. Sulla base di queste valutazioni si è scelto di condurre l'analisi di stabilità inserendo un materiale indebolito in tutta la litozona superficiale. La geometria ottenuta è riportata in Figura 119, mentre i parametri scelti sono gli stessi utilizzati per la litozona C nel caso 2D, come indicato in Tabella 3. Per quanto riguarda la mesh è stata applicata la stessa discretizzazione esposta in precedenza nella Figura 111.

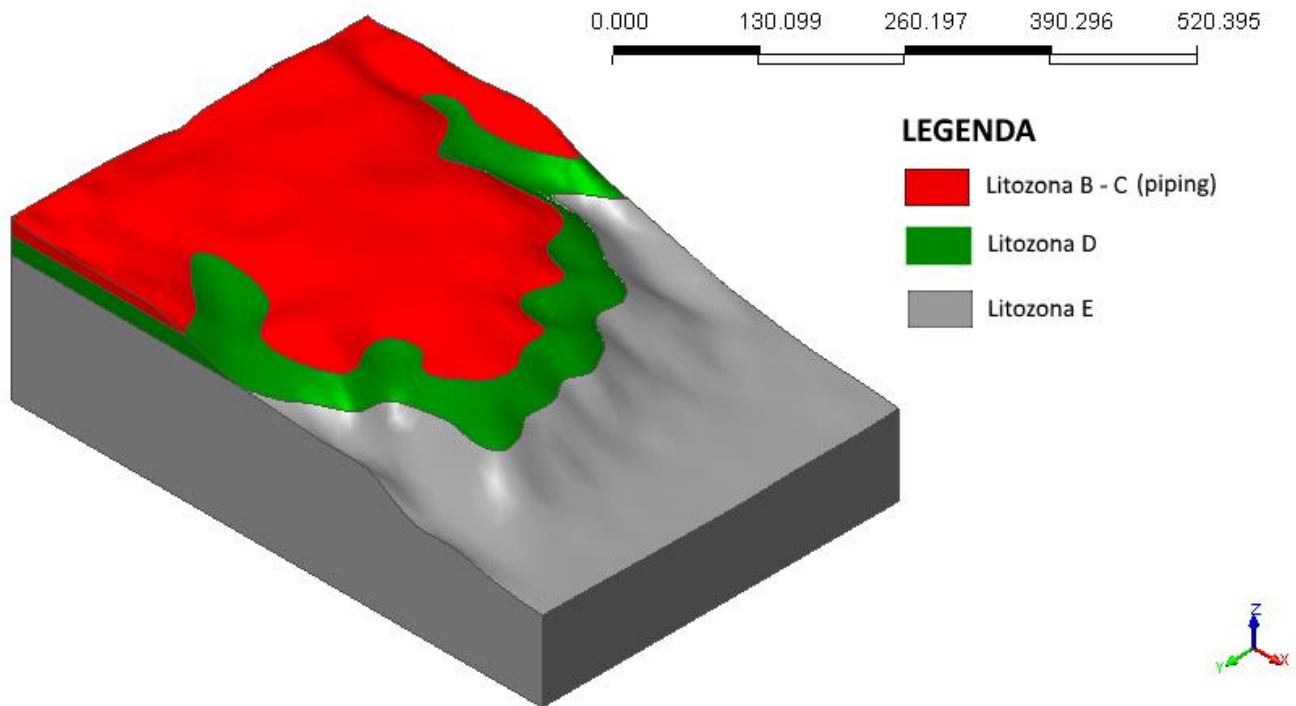


Figura 119 - Geometria del modello tridimensionale con materiale indebolito dal piping

Anche in questo caso è stata innanzitutto svolta un'analisi di filtrazione stazionaria per ricavare le pressioni neutre, la cui distribuzione è riportata in Figura 120: si può notare come l'inserimento del materiale indebolito abbia portato ad una variazione delle pressioni all'interno della litozona C, a causa dell'aumento della permeabilità provocato dall'erosione del terreno. Le pressioni così ricavate sono state imposte come condizione iniziale per l'analisi di stabilità svolta al passo successivo.

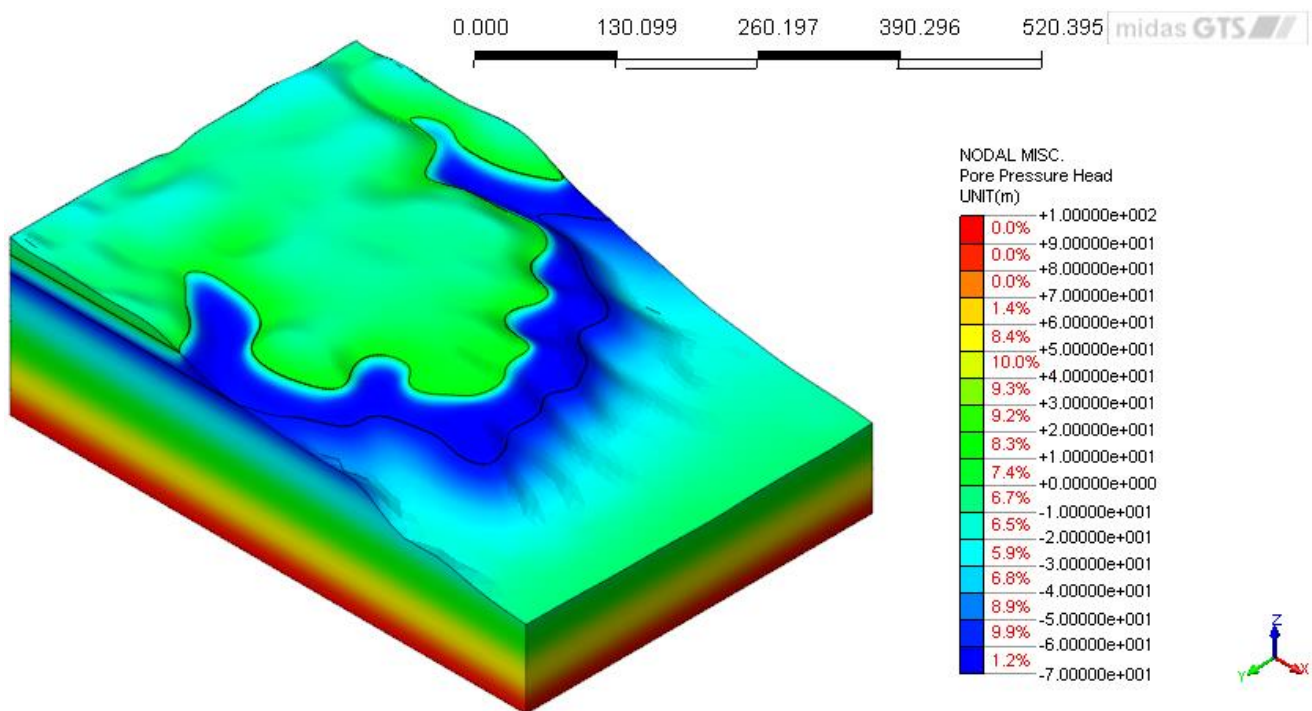


Figura 120 - Distribuzione delle pressioni neutre con materiale indebolito dal piping

Osservando le deformazioni a taglio riportate in Figura 121 si può notare come l'indebolimento del materiale causato dal *piping* abbia portato ad una concentrazione dei valori maggiori al confine con la litozona D; le aree maggiormente interessate dal fenomeno erosivo rimangono i versanti che formano le valli del Malmonte e del Vallone. Con i dati inseriti per la modellazione numerica l'analisi di stabilità ha mostrato una sensibile diminuzione del fattore di sicurezza, risultato pari a 0.74, corrispondente ad una condizione di collasso.

Le immagini relative agli spostamenti in direzione x e y confermano quanto ottenuto dalle analisi precedenti: dall'andamento mostrato in Figura 122 si osserva come i maggiori valori siano localizzati all'interno della litozona E nella scarpata degradante nella valle dell'Olona, mentre la distribuzione riportata in Figura 123 evidenzia la condizione di instabilità che caratterizza le valli nelle quali scorrono le rogge Malmonte e Vallone.

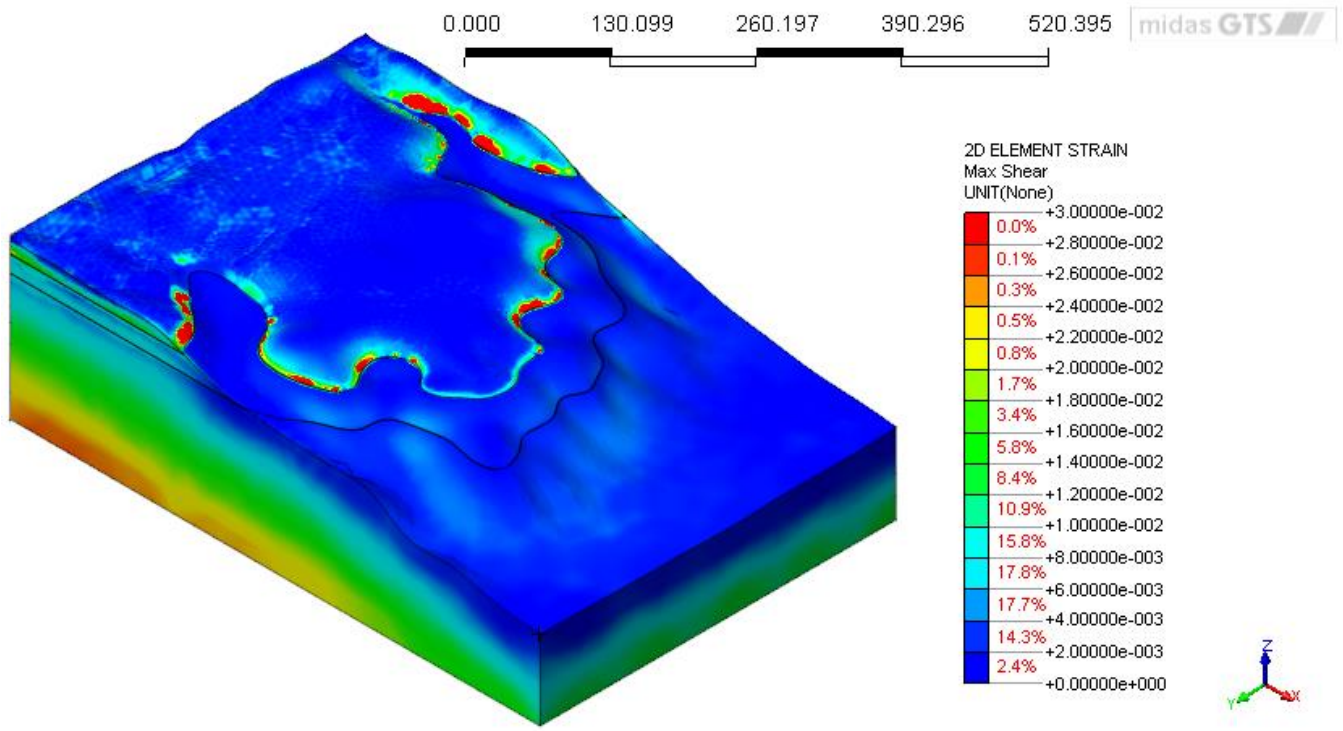


Figura 121 - Deformazioni a taglio ottenute dall'analisi con materiale indebolito dal piping

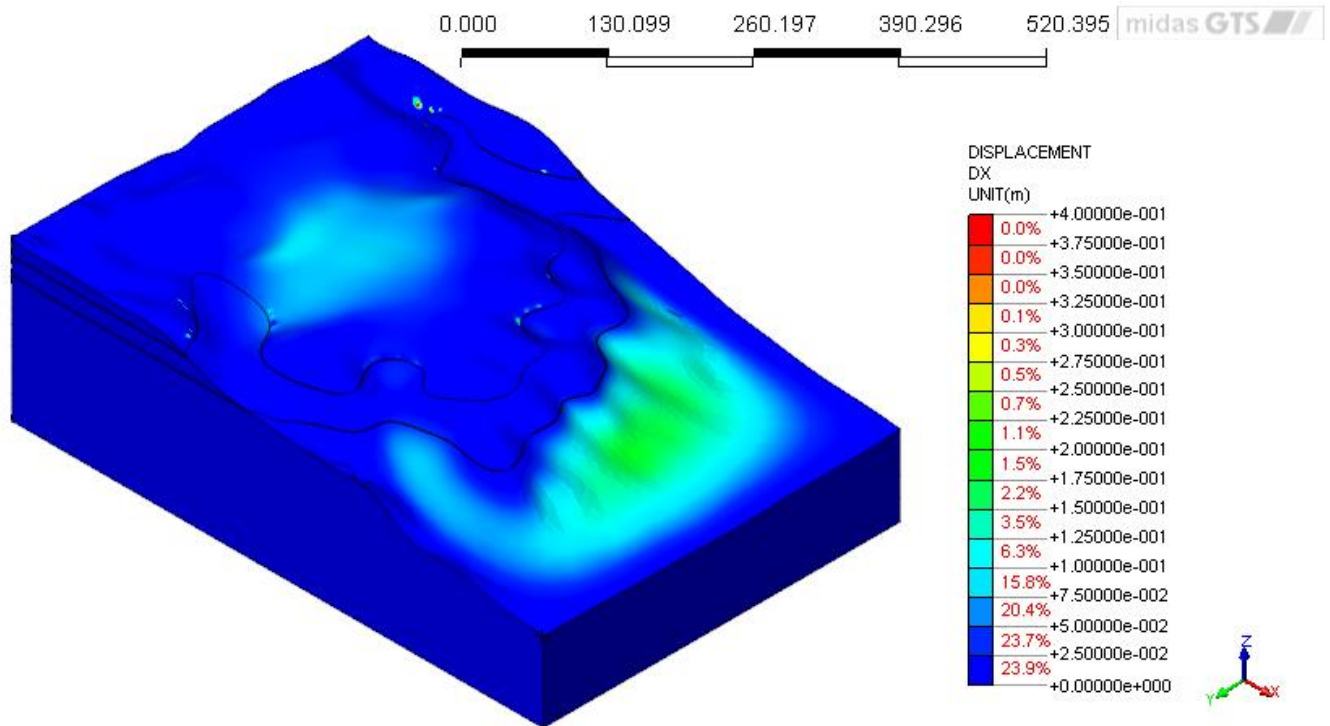


Figura 122 - Spostamenti in direzione x ottenuti dall'analisi con materiale indebolito dal piping



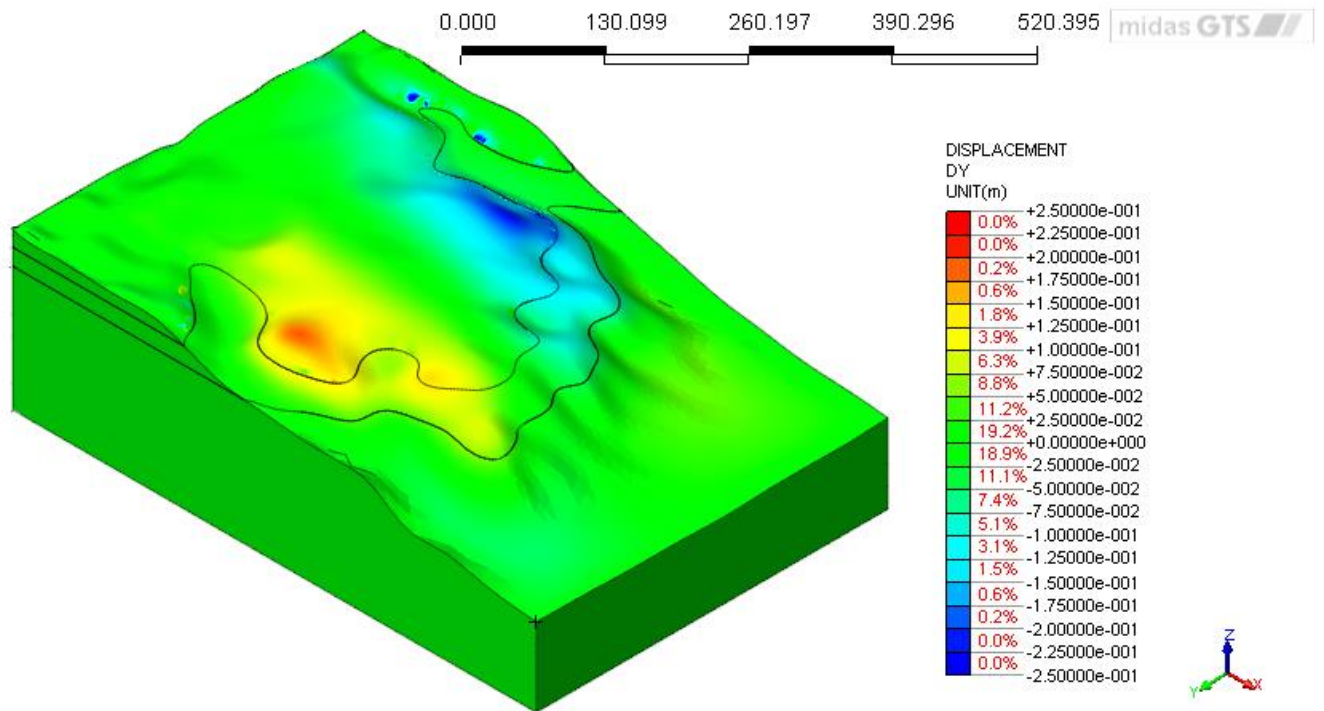


Figura 123 - Spostamenti in direzione y ottenuti dall'analisi con materiale indebolito dal piping

## 7.6. PERICOLOSITÀ E INTERVENTI DI MITIGAZIONE

Le analisi presentate hanno evidenziato le problematiche relative alla dinamica dell'area circostante il parco archeologico; sulla base di questi risultati si è proceduto alla costruzione di una carta di pericolosità del pianalto su cui sorge sito di Castelseprio. A questo proposito sono stati considerati anche i seguenti sentieri percorribili per l'accesso al sito, mostrati in Figura 124:

- Il **sentiero interno al Castrum**, che risale direttamente il versante prospiciente il Monastero di Torba, fino ad arrivare all'Antiquarium, per una distanza complessiva di circa 250 m.
- Il **sentiero Malmonte**, che risale dal Monastero al Parco Archeologico lungo la valle della Roggia Malmonte, fino ad arrivare alla Chiesa di Santa Maria Foris Portas, per una distanza complessiva di circa 650 m.
- Il **sentiero storico**, che risale dal Monastero al Parco Archeologico lungo il Vallone fino ad arrivare all'antico ponte levatoio, per una distanza di circa 1km.

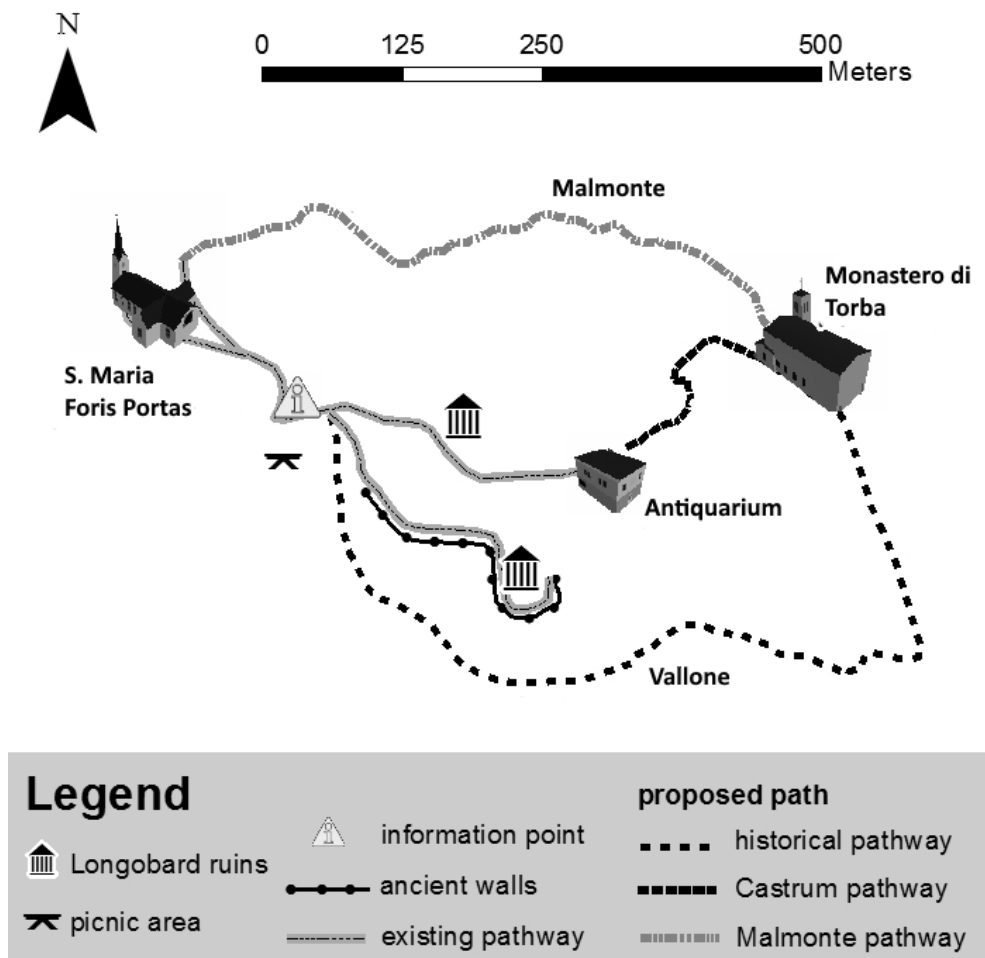


Figura 124 - Mappa dei percorsi che permettono l'accesso al sito e i collegamenti interni (De Finis et al., 2015)

In Figura 125 sono riportate due carte: la prima è relativa alla suscettibilità all'innesco ed è basata sulle deformazioni a taglio, mentre la seconda riporta la magnitudine ed è ottenuta a partire dalla risultante degli spostamenti nel piano x-y, ricavata dall'analisi con materiale indebolito dal *piping*. Si può notare come le aree maggiormente interessate siano i versanti che compongono le valli del Malmonte e del Vallone, dove sono localizzate porzioni della cinta muraria e alcuni dei sentieri che consentono l'accesso agli scavi. Si osservano valori elevati di magnitudine anche nella zona di raccordo tra il pianalto e la scarpata degradante verso il fondovalle, nei pressi del Monastero di Torba, che tuttavia presenta un grado di suscettibilità decisamente minore rispetto alle aree precedentemente discusse.

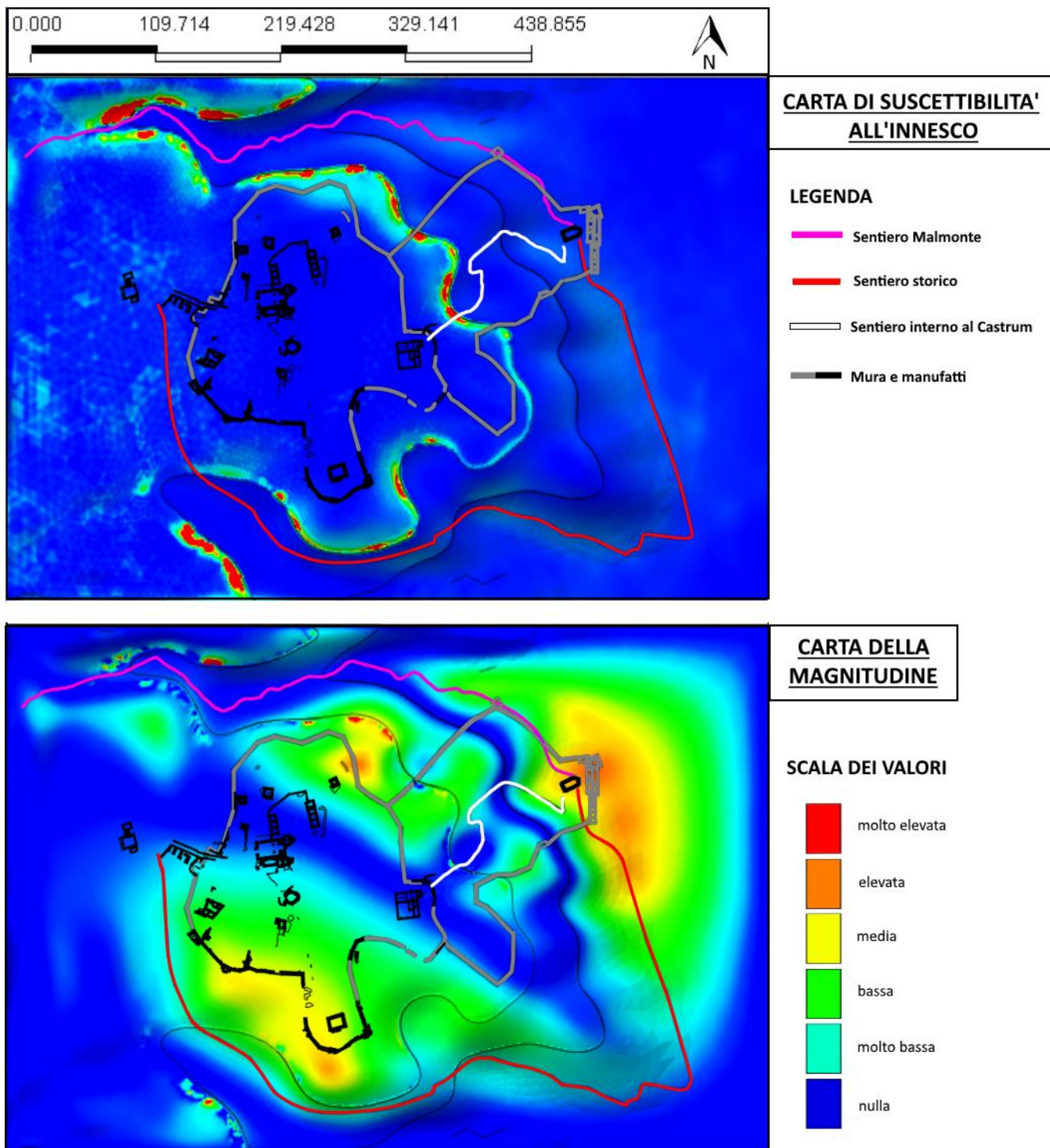


Figura 125 - Carta di suscettibilità all'inesco (in alto) e carta della magnitudine (in basso) del sito archeologico di Castelseprio e delle aree circostanti

Come esposto in precedenza, la dinamica in atto nell'area in esame ha già compromesso in parte la fruibilità di questi percorsi, rendendone difficile l'utilizzo per l'accesso al sito di Castelseprio.

Il **Sentiero interno al Castrum**, che ha il vantaggio di svilupparsi interamente all'interno dell'area del sito archeologico, presenta localmente forti pendenze e si sviluppa all'interno di una zona ad elevata suscettibilità al franamento, ed è interessato da alcuni movimenti franosi attivi riconducibili sia al

distacco di blocchi di conglomerato sia a fenomeni di scivolamento superficiale. È quindi necessario prevedere la realizzazione di apposite opere di messa in sicurezza:

- Reti in aderenza lungo la parete subverticale di conglomerato soggetta a crolli;
- Salti di fondo lungo l'impluvio in erosione accelerata;
- Palificate in legno in corrispondenza delle due nicchie di frana adiacenti al sentiero (una di queste è in parte già sistemata con una geostuoia di modeste dimensioni, insufficienti per garantire la sicurezza).

Il **Sentiero Malmonte**, pur caratterizzato da pendenze di percorrenza non troppo elevate, si colloca in una valle dal diffuso stato di dissesto, a causa del periodico distacco di blocchi di roccia che invadono poi l'alveo lungo il quale si sviluppa il tracciato del sentiero. Dal punto di vista della stabilità, la parte più critica è sicuramente il tratto centrale della valle dove sono presenti numerose frane attive sui versanti adiacenti al percorso. Per la messa in sicurezza del sentiero è quindi necessario prevedere:

- La posa di reti in aderenza lungo le pareti soggette a crolli;
- La realizzazione di opere di protezione del sentiero (palificate, gabbionate, muretti) lungo il tratto che attraversa la zona maggiormente instabile (tratto intermedio della valle).

Anche il **Sentiero storico** attraversa aree instabili, in relazione sia alla dinamica dei versanti (numerose aree soggette a crolli di blocchi di conglomerato e almeno 3 frane di scivolamento piuttosto estese) sia alla dinamica torrentizia (fenomeni di erosione accelerata interessano tutte le incisioni torrentizie presenti nel bacino, e sono diffusamente presenti accumuli in alveo, nonché alberi divelti). Questi fenomeni di instabilità richiedono significativi interventi di messa in sicurezza:

- Sistemazione idraulica dell'impluvio principale e dei suoi affluenti con briglie e salti di fondo per il controllo dei fenomeni erosivi;
- Pulizia e manutenzione del bosco;
- Messa in sicurezza dei tratti di sentiero che attraversano le aree maggiormente instabili (attualmente è presente solo una gabbionata a valle del movimento franoso di più recente attivazione, oltre palificate in legno e reti metalliche, che sono però insufficienti per un'efficace prevenzione del rischio lungo l'intero sentiero).

Nella Tabella 10 sono riepilogate le problematiche rilevate nelle diverse zone che compongono l'area di interesse e le tipologie di intervento suggerite per la loro messa in sicurezza. Per quanto riguarda gli interventi di carattere non strutturale si consigliano regolari operazioni di disboscamento degli alvei fluviali, di taglio e rimozione della vegetazione lungo le sponde; si raccomandano inoltre campagne periodiche di pulizia dell'alveo e del bosco, necessarie a causa della presenza di vegetazione e altri materiali in alveo e sulle sponde.

<b>LOCALIZZAZIONE</b>	<b>PROBLEMATICA RILEVATA</b>	<b>TIPOLOGIA DI INTERVENTO</b>	<b>OBIETTIVO</b>
Zona del pianalto su cui sorge il Castrum	Potenziali situazioni di drenaggio lento o difficoltoso, ristagni d'acqua prolungati	Opere di drenaggio superficiale, con canalette e setti drenanti, di profondità inferiore al metro	Evitare la formazione di ristagni d'acqua sul pianalto e la conseguente infiltrazione verso i depositi sottostanti, nonché eventuali cedimenti nelle fondazioni delle rovine
Zona di raccordo tra il pianalto e la scarpata degradante verso il fondovalle	Possibile presenza di falde idriche sospese a carattere locale e temporaneo, soprattutto al contatto fra materiali a differente conducibilità idraulica	Trincee drenanti e canalette rivestite in pietrame e/o legname	Ridurre le forze di filtrazione e aumentare le caratteristiche di resistenza dei terreni
	Potenziale instabilità dei depositi fluvioglaciali incoerenti più superficiali, caratterizzati da spessore variabile	Locali opere di stabilizzazione, principalmente con palificate, e riprofilature di versante, eventualmente con gradonature	Aumentare le forze resistenti, diminuire la deformabilità dei materiali, ridurre le forze destabilizzanti
Versanti dei bacini del Vallone e del Malmonte	Fenomeni di erosione superficiale diffusa con interessamento della copertura arbustiva	Rivestimenti antierosivi (geostuoie, geocompositi, ecc.) per il controllo dell'erosione. Pulizia e manutenzione del bosco, soprattutto in quelle zone dove sono presenti alberi divelti	Contenere l'erosione ed evitare riduzioni delle sezioni di deflusso in caso di eventi di piena, migliorando la fruibilità dei sentieri di accesso al sito
Alvei torrentizi delle rogge principali (Vallone e Malmonte)	Fenomeni di trasporto solido per deflussi idrici concentrati provenienti dalle scarpate di monte	Completamento delle opere di sistemazione idraulica, con briglie e salti di fondo, nonché protezioni dall'erosione spondale	Ridurre i fenomeni di erosione al piede dei versanti e, di conseguenza, la resistenza al taglio mobilitata
Zona di versante sovrastante il Monastero di Torba	Fenomeni gravitativi di distacco di blocchi lapidei	Opere di contenimento delle pareti soggette a distacco (reti in aderenza) e/o interventi di difesa passiva (reti o valli paramassi)	Evitare il distacco di blocchi di conglomerato o, comunque, intercettarne la caduta prima che i blocchi raggiungano persone o beni

Tabella 10 - Problematrice riscontrate nell'area in esame, con relativi interventi proposti per la messa in sicurezza



## 8. CONCLUSIONI

Negli ultimi decenni, l'analisi delle problematiche relative a pericoli di carattere idrogeologico nei siti archeologici ha acquisito una grande importanza all'interno dei provvedimenti per la tutela e la conservazione del patrimonio storico e culturale; lo studio dei fenomeni che generano tali problemi e la loro evoluzione nel tempo assumono quindi un aspetto fondamentale nella determinazione, all'interno dei parchi archeologici, delle aree sulle quali è prioritario agire per la messa in sicurezza dei siti stessi, oltre che per garantirne la fruibilità e l'unitarietà futura. La preponderanza di pericoli legati al verificarsi di eventi franosi o alluvionali nelle aree interessate rende particolarmente importante lo studio degli aspetti idrogeologici in questo contesto.

Il lavoro svolto si è quindi concentrato sullo studio degli effetti di un fenomeno erosione interna, nello specifico il *piping*, sulle condizioni di stabilità del pianalto su cui sorge il sito archeologico di Castelseprio; per l'analisi del problema sono stati considerati diversi scenari al fine di giungere alla realizzazione di una carta di pericolosità relativa che consentisse di individuare le aree più vulnerabili.

Il punto di partenza per lo svolgimento dello studio è stato perciò l'analisi e l'elaborazione dei rilievi geomorfologici e geologici disponibili per l'area in oggetto, i quali hanno consentito di definire la struttura idrogeologica della zona in esame; questo passaggio ha consentito la determinazione delle proprietà meccaniche e idrauliche dei materiali coinvolti e, in un secondo momento, la realizzazione di un modello concettuale successivamente implementato tramite delle analisi numeriche.

I risultati ottenuti dalle simulazioni in campo bidimensionale hanno mostrato inizialmente come il versante si trovi, allo stato attuale, in una condizione di stabilità; le analisi hanno comunque permesso di individuare una potenziale superficie di rottura che raggiunge, sulla superficie del pianalto, un'estensione nell'ordine dei dieci metri. A seguito dell'inserimento delle condizioni idrauliche, inizialmente costituite da carichi costanti imposti sul dominio, è stato possibile osservare come la presenza di acqua non influenzi direttamente la stabilità del versante. Tuttavia, l'insorgere del *piping* porta ad un indebolimento del versante con una conseguente diminuzione del fattore di sicurezza inizialmente calcolato. Con il proseguire delle analisi si è potuta apprezzare la propagazione dell'azione erosiva all'interno del dominio, portando ad un continuo peggioramento delle condizioni di stabilità del versante e ad un conseguente aumento delle volumetrie coinvolte.

In un secondo momento si è proceduto all'inserimento di una condizione idraulica legata alle precipitazioni, considerando valori medi stagionali ed eventi critici. Già dai casi con piogge meno intense si osserva come l'estensione delle aree interessate dal *piping* aumenti in modo significativo su tutta la superficie del pianalto: la progressiva diminuzione del fattore di sicurezza ottenuto da queste simulazioni conferma la constatazione della pericolosità di tali fenomeni, e giustifica l'importanza che riveste lo studio della loro evoluzione. L'analisi parametrica basata su queste simulazioni ha permesso di osservare la maggior influenza della coesione rispetto all'angolo di attrito sulla stabilità del versante: per valori nulli di coesione il fattore di sicurezza scende al di sotto del valore unitario, portando al collasso del versante.

Successivamente sono state svolte delle analisi su un dominio tridimensionale, al fine di individuare le aree a maggior pericolosità su cui intervenire per la messa in sicurezza del sito. La simulazione relativa alla condizione iniziale, dalla quale risulta una condizione di stabilità, evidenzia come gli spostamenti più significativi si localizzino sui versanti del pianalto che formano le valli del Malmonte e del Vallone, andando a coinvolgere parte delle strutture che compongono il sito di Castelseprio; si osservano inoltre spostamenti rilevanti sulla scarpata che degrada nella valle dell'Olona. I risultati ottenuti vengono confermati sia dalle simulazioni svolte considerando la presenza di ricarica superficiale, sia inserendo nel modello un materiale con caratteristiche meccaniche peggiorate dall'azione erosiva del *piping*: in particolare, in quest'ultimo caso, il fattore di sicurezza ottenuto dall'analisi mostra il raggiungimento di una condizione di collasso, con il potenziale coinvolgimento delle strutture del Parco Archeologico e dei percorsi che ne consentono la fruizione.

Si è proceduto quindi alla creazione di due carte dell'area, relative alla suscettibilità all'innesco e alla magnitudine: da queste si osserva come la percorrenza dei sentieri di accesso al sito archeologico, già difficoltosa a causa dei dissesti esistenti, sia ulteriormente compromessa a causa della dinamica del versante che coinvolge le due valli del Malmonte e del Vallone e, in parte, anche la valle dell'Olona. Pertanto sono stati proposti una serie di interventi di carattere strutturale per la messa in sicurezza delle aree circostanti, con particolare attenzione alla manutenzione dei bacini di impluvio dove scorrono il Malmonte e il Vallone, nei quali sono collocati due dei sentieri di accesso al sito.

## 9. APPENDICE – IL MODELLO NUMERICO

Midas GTS è un software basato su un modello numerico 2D/3D agli elementi finiti per analisi strutturali geotecniche; la risoluzione e il calcolo finale di sforzi, deformazioni e spostamenti avviene attraverso l'applicazione del metodo agli elementi finiti. Essendo stato sviluppato per l'analisi di casi geotecnici, il programma permette la definizione di molte caratteristiche geostrutturali e supporta diversi metodi di analisi.

### 9.1. ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI

Il metodo agli elementi finiti permette la determinazione di stato di sforzo e deformazione, e quindi spostamenti, per strutture per cui risulterebbe impossibile ricavare una soluzione analitica. I problemi fisico-matematici, generalmente affrontanti, sono descritti da sistemi di equazioni differenziali che vengono poi ridotti in sistemi di equazioni algebriche. La fase caratteristica dell'applicazione di questo metodo consiste nella discretizzazione del continuo. In questo modo gli infiniti gradi di libertà che lo caratterizzavano vengono ridotti ad un numero finito. Certamente questo comporta un'approssimazione della soluzione al problema. Questa discretizzazione avviene suddividendo il continuo con un insieme di elementi di dimensioni finite, reciprocamente connessi in determinati punti detti nodi di cui se ne andranno a determinare gli spostamenti. La griglia utilizzata per questa suddivisione è detta mesh e risulta composta da elementi definiti da una specifica forma elementare che varia con la geometria del problema e con il grado di dettaglio desiderato.

L'utilizzo di elementi finiti con funzioni di forma lineari permette di modellare l'andamento degli spostamenti (quindi delle deformazioni e delle tensioni) all'interno dei singoli elementi finiti attraverso funzioni lineari. Una volta noti gli spostamenti nodali è immediato il passaggio alle deformazioni e, mediante la matrice di legame sforzi-deformazioni, si passa successivamente al tensore degli sforzi.

Di seguito vengono riportati alcuni dei modelli disponibili in Midas.

- Elastico - lineare: è il più semplice modello costitutivo, secondo il quale le deformazioni sono direttamente proporzionali agli sforzi attraverso il modulo di elasticità  $E$ , come rappresentato in Figura 126.

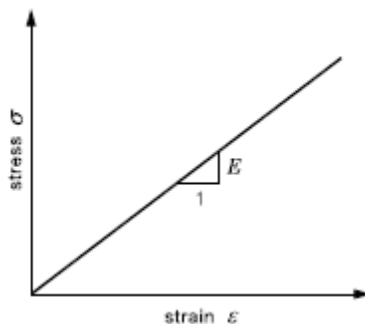


Figura 126 - Legame costitutivo elastico-lineare (fonte: Midas Manual)

- Elastico perfettamente-plastico: sforzi e deformazioni sono direttamente proporzionali fino ad un valore soglia identificato dal punto di snervamento (yield point), oltre il quale la curva che relaziona le grandezze diventa orizzontale, come mostrato in Figura 127.

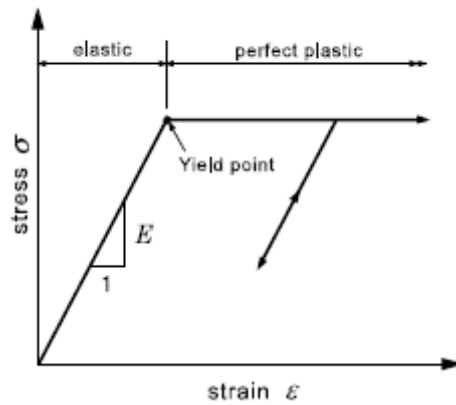


Figura 127 - Legame costitutivo elastico perfettamente-plastico (fonte: Midas Manual)

- Elastico non lineare: tiene conto del decadimento dei parametri di resistenza dei materiali, che peggiorano progressivamente fino al raggiungimento della situazione di collasso: il legame sforzi-deformazioni è quindi rappresentato da una funzione parabolica, come mostrato in Figura 128.

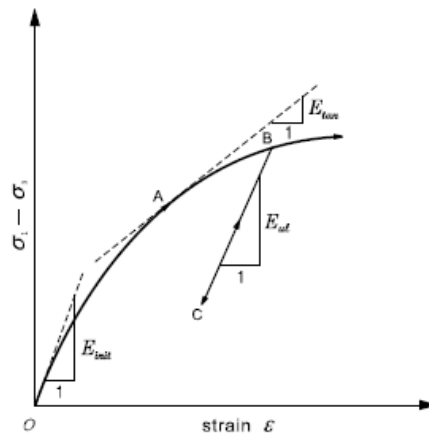


Figura 128 - Legame costitutivo elastico non lineare (fonte: Midas Manual)

- Softening: il comportamento prevede deformazioni nulle fino al raggiungimento del massimo sforzo di taglio, a cui segue una diminuzione della resistenza che termina con il raggiungimento dello sforzo residuo (Figura 129).

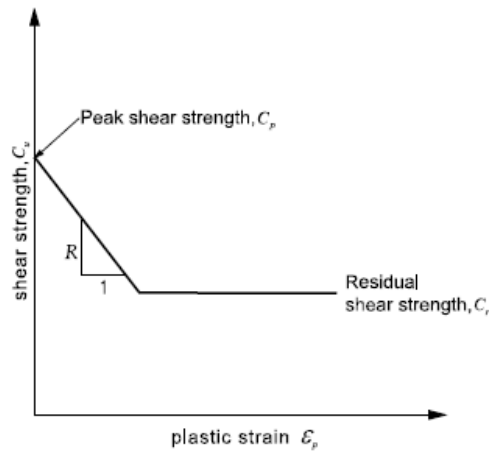


Figura 129 - Legame costitutivo incrudente (fonte: Midas Manual)

- Cam-Clay modificato: è un modello elasto-plastico che tiene conto dell'incremento delle resistenze all'aumentare delle deformazioni (hardening). La curva sforzi-deformazioni è rappresentata in Figura 130. L'origine riferimento non è stata trovata..

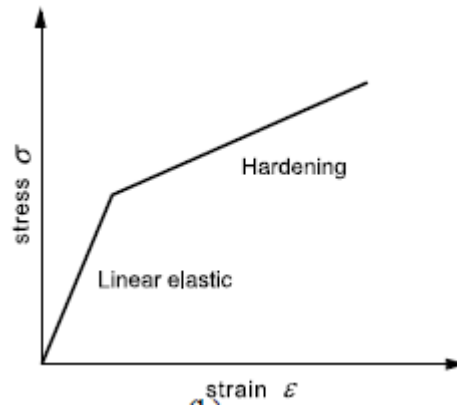


Figura 130 - Legame costitutivo di Cam-Clay (fonte: Midas Manual)



- JRC (Jointed Rock Model): è il modello utilizzato per descrivere il comportamento degli ammassi rocciosi fratturati, schematizzati come in Figura 131.

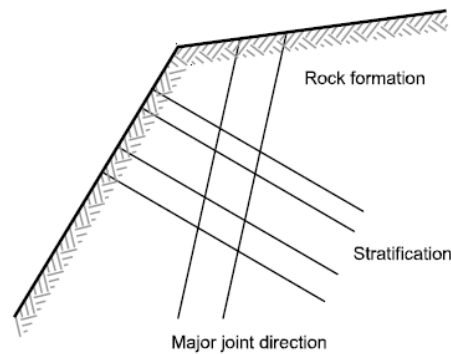


Figura 131 - Schematizzazione di un ammasso roccioso fratturato (fonte: Midas manual)

- Mohr–Coulomb: rappresenta un comportamento dato dalla combinazione di modello elastico non lineare ed elasto-plastico, dipendente dalla coesione  $c'$  e dall'angolo d'attrito  $\phi$  come mostrato in Figura 132.

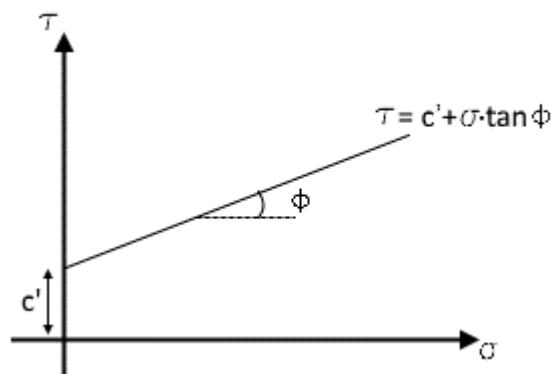


Figura 132 - Criterio di rottura alla Mohr-Coulomb

Nel presente elaborato è stato utilizzato il modello elasto-plastico con criterio di rottura alla Mohr-Coulomb, come descritto nel capitolo 5. Una volta definito il legame costitutivo del materiale, il modello numerico permette di risolvere il problema impostato mediante differenti analisi.

Per risolvere il caso studio del presente elaborato si sono scelte le seguenti simulazioni:

- Construction Stage: permette di simulare i problemi geotecnici suddivisi in fasi, ad esempio gli scavi.
- Seepage: permette di simulare la filtrazione in stato stazionario all'interno dei materiali.
- Slope Stability (SRM): tramite lo Strength Reduction Method permette di valutare le condizioni di stabilità di un pendio e di calcolare il fattore di sicurezza  $F_s$ .

### 9.1.1. CONSTRUCTION STAGE

Per simulare la generazione del versante viene utilizzata l'analisi denominata Construction Stage, che normalmente viene scelta per la simulazione del comportamento del terreno durante uno scavo. Nel caso in esame il concetto è analogo poiché il processo erosivo può essere assunto come uno scavo del terreno.

L'analisi consiste in una serie di fasi in cui variano le condizioni al contorno, i carichi imposti al sistema e gli elementi che costituiscono il dominio di calcolo.

Midas GTS permette effettuare le seguenti operazioni in un'analisi di tipo Construction Stage:

- Definizione delle fasi di calcolo.
- Definizione degli elementi attivi o non attivi in ciascuna fase.
- Definizione delle condizioni al contorno e dei carichi agenti in ciascuna fase.

Così facendo, l'attivazione o la disattivazione degli elementi ed eventuali variazioni di carichi e di condizioni al contorno vengono applicate all'inizio di ciascuna fase. Tra una fase e l'altra gli sforzi, le deformazioni e di conseguenza il campo di spostamenti vengono ricalcolati a partire dal passo precedente. Un esempio del procedimento viene mostrato in Figura 133.

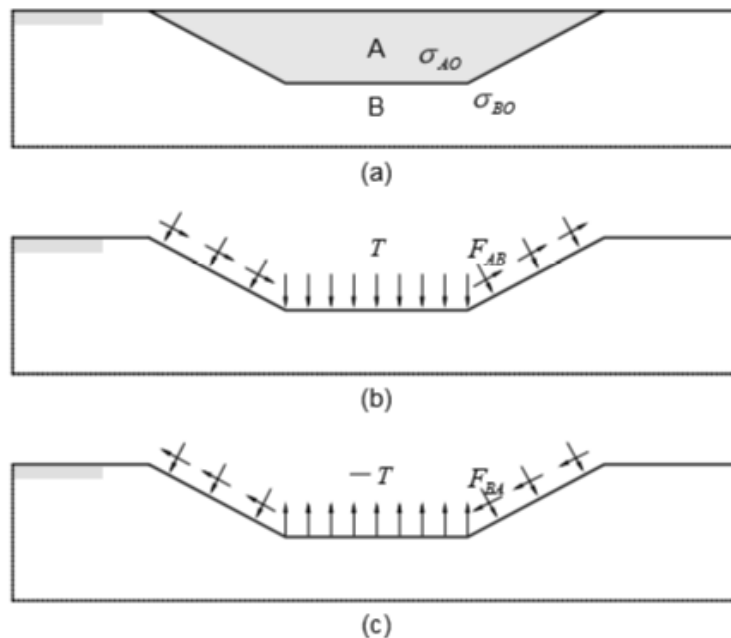


Figura 133 - Schema del funzionamento dell'analisi Construction Stage: a) situazione iniziale, b) forze che l'oggetto A esercita sull'oggetto B, c) forze che l'oggetto B esercita sull'oggetto A (fonte: Midas Manual)

Per calcolare lo stato di sforzo in sito Midas GTS permette di scegliere tra le seguenti opzioni:

- Metodo  $K_0$

In questo metodo la tensione iniziale è ottenuta calcolando le sollecitazioni orizzontali dalle sollecitazioni verticali utilizzando la costante  $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$ . Lo sforzo verticale  $\sigma_v$  viene ricavato dal peso proprio, mentre la spinta orizzontale può essere calcolata secondo l'espressione  $\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v$ . La sollecitazione di taglio viene assunta pari a 0. Se la superficie del terreno è orizzontale questo metodo non presenta alcun problema. Se invece la superficie non è orizzontale lo stato di sforzo determinato non sarà in equilibrio con le sollecitazioni dovute al peso proprio: pertanto, al fine di stabilire l'equilibrio, l'analisi deve essere eseguita introducendo una fase nulla in cui non vi sono variazioni di condizioni. Dopo la fase nulla il sistema totale rimane in equilibrio e lo stato di sforzo corrispondente è usato come lo stato di sollecitazione iniziale.

- Metodo dell'analisi del peso proprio

In questo caso invece lo stato tensionale iniziale è determinato dallo stato di sforzo legato al peso proprio. Se la superficie del terreno è orizzontale, questo metodo è identico a quello del metodo  $K_0$ , con  $K_0 = \frac{\sigma_v}{1 - \sigma_v}$ . Se invece non è orizzontale i risultati differiscono e si creerà una sollecitazione a taglio. Per questo motivo il presente metodo è più adatto per una superficie di terreno inclinata.

Nel presente elaborato, analizzando lo stato di sforzo di un pendio, è stato scelto il metodo dell'analisi del peso proprio.

### 9.1.2. SEEPAGE

Questa analisi viene utilizzata in caso di presenza di acqua e permette di valutare gli effetti della filtrazione sulla stabilità di una struttura geotecnica.

La filtrazione può avvenire in modalità stazionarie se le condizioni al contorno che determinano il moto di acqua non cambiano nel tempo, o in modalità transitorie se invece vi è una variazione delle condizioni imposte. In entrambi i casi l'analisi si basa sull'applicazione della legge di Darcy, espressa come segue:

$$v = -k \nabla h$$

dove  $v$  rappresenta il vettore velocità,  $k$  rappresenta il tensore della permeabilità, che nel caso di materiale isotropo si riduce ad una costante, e  $\nabla h$  il gradiente idraulico, ovvero la variazione di carico nello spazio.

La legge di Darcy solitamente è applicata in condizioni di suolo saturo. Tuttavia, se la permeabilità è espressa in funzione del contenuto di acqua o della pressione dell'acqua, la relazione è applicabile anche nel caso di materiale parzialmente saturo.

Quando si effettua un'analisi di filtrazione, il modello numerico ricalcola gli sforzi tenendo conto dell'accoppiamento idromeccanico, in accordo con la teoria dello sforzo efficace di Terzaghi. La simulazione quindi permette di stimare la distribuzione delle grandezze meccaniche e idrauliche nel dominio di calcolo.

### 9.1.3. SLOPE STABILITY (SRM)

Lo Strength Reduction Method è un metodo diretto che riduce gradualmente la resistenza a taglio dei materiali, ovvero i parametri angolo di attrito  $\phi$  e coesione  $c$ , fino ad arrivare al collasso. La rottura si presume sia raggiunta quando l'analisi non converge e il fattore di riduzione della resistenza nella fattispecie diventa il fattore di sicurezza del sistema.

Uno schema del funzionamento di tale analisi è riportato in Figura 134. Si osservi un punto di Gauss A di un elemento: lo stato di sollecitazione di questo punto è rappresentato dal cerchio di Mohr in Figura 134 in basso a sinistra. La sollecitazione di taglio nel punto viene divisa per un fattore di sicurezza FS che fa in modo che il cerchio di Mohr associato allo stato tensionale della superficie di scorrimento fittizia diventi tangente al criterio di rottura (Figura 134 in basso a destra). Ciò significa che lo stato tensionale del punto viene portato al punto di rottura. Nel momento in cui la soluzione agli elementi finiti diverge, l'analisi si arresta e il valore limite di FS diventa il fattore minimo di sicurezza.

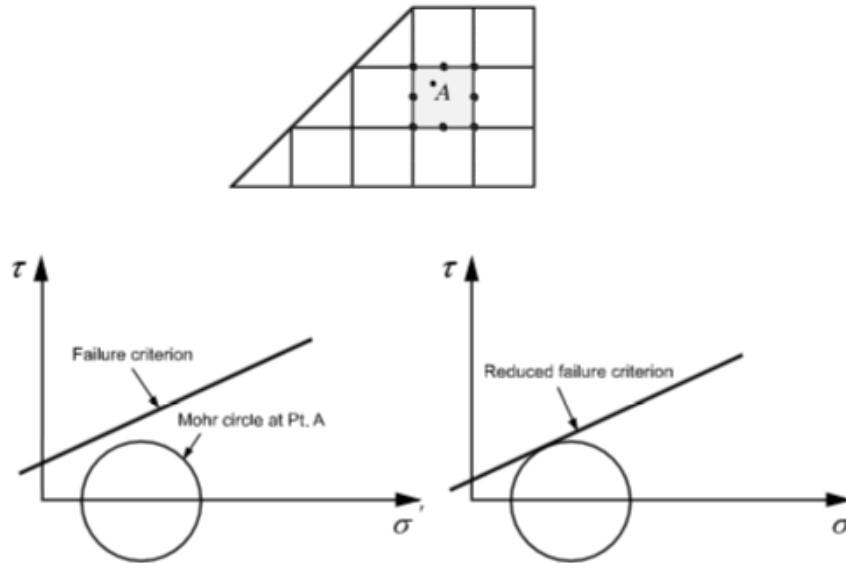


Figura 134 - Metodo SRM: in alto) punto di Gauss di un elemento, in basso a sinistra) cerchio di Mohr associato allo stato di sforzo nel punto A, in basso a destra) cerchio di Mohr a rottura (fonte: Midas Manual)

Il fattore di sicurezza minimo pertanto viene determinato tramite la seguente equazione:

$$FS = \frac{\tau}{\tau_{rott}}$$

Dove  $\tau$  è lo sforzo di taglio del materiale e  $\tau_{rott}$  è lo sforzo di taglio a rottura riferito alla superficie di scorrimento, calcolato secondo l'espressione di Mohr Coulomb:

$$\tau_{rott} = c_{rott} + \sigma \tan \varphi_{rott}$$

dove coesione e angolo di attrito sono i valori corretti dal fattore di riduzione SRF, ricavabili come mostrato di seguito.

$$c_{rott} = \frac{c}{SRF}$$

$$\varphi_{rott} = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \varphi}{SRF}\right)$$

## 10. BIBLIOGRAFIA

- Agapiou, A., Lysandrou, V., Alexakis, D.D., Thermistocleous, K., Cuca, B., Argyriou, A., Sarris, A., Hadjimitsis, D.G., (2015) "Cultural heritage management and monitoring using remote sensing data and GIS: The case study of Paphos area, Cyprus", *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, pp. 230-239, 2015
- Barozzi, A., Brambilla, D., De Finis, E., Gattinoni, P., Scesi, L., (2015) "Studio geologico-tecnico del sito archeologico di Castelseprio (VA)"
- Benites, L.A., (1968) "Geotechnical properties of the soils affected by piping near the Benson area, Cochise County, Arizona", Tesi
- Bersan, S., Jommi, C., Koelewijn, A., Simonini, P., (2013) "Applicability of the Fracture Flow Interface to the Analysis of Piping in Granular Material", Excerpt from the Proceeding of the 2013 COMSOL Conference in Rotterdam
- Bonomi, C., Villa, M., (2006) "Studio idrogeologico sul dissesto della Val di Stava", Tesi di laurea, Politecnico di Milano
- Budhu, M., (2007) "Soil mechanics and foundations, 2<sup>nd</sup> Edition", John Wiley & Sons, 83
- Canuti, P., Casagli, N., Catani, F., Fanti, R., (2000) "Hydrogeological hazard and risk in archaeological sites: some case studies in Italy", *Journal of Cultural Heritage* 1 (2000) 117–125
- Canuti, P., Margottini, C., Fanti, R. & Bromhead, E.N., (2006) "Cultural Heritage and Landslides: Research for risk Prevention and Conservation", in Sassa K. and Canuti P. (eds) *Landslides – Disaster Risk Reduction*, pp. 401-433, 2009
- Caselli, C., (2015) "Progetto di messa in sicurezza dei versanti rocciosi a monte dell'area monumentale e archeologica del Monastero di Torba" – Consulenza Tecnica.
- Colombo, L., Francani, V., Gattinoni, P., (2014) "Suffosion hazard for building and infrastructure in the High Lombardy Plain (Northern Italy)", 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014
- Coppola, L., Nardone, R., Rescio, P., Bromhead, E., (2006) "Reconstruction of the conditions that initiate landslide movement in weathered silty clay terrain: effects on the historic and architectural heritage of Pietrapertosa, Basilicata, Italy", *Landslides* (2006) 3:349–359
- D'Amato Avanzi, G., Marchetti, D. & Puccinelli, A., (2006) "Cultural heritage and geological hazards: the case of the Calomini hermitage in Tuscany (Italy)", *Landslides*, 3, pp. 331-340, 2006
- De Finis, E., Gattinoni, P., Scesi, L., (2015) "Hydrogeological hazard in the UNESCO world heritage site of Castelseprio (northern Italy)"

- El Shamy, U., Aydin, F., (2008) "Multiscale Modeling of Flood-Induced Piping in River Levees" *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* © asce / september 2008, 1385-1398
- Fanti, R., (2006) "Slope instability of San Miniato hill (Florence, Italy): possible deformation patterns", *Landslides* (2006) 3:323–330
- Fanti, R., Gigli, G., Lombardi, L., Tapete, D., Canuti, P., (2013) "Terrestrial laser scanning for rockfall stability analysis in the cultural heritage site of Pitigliano (Italy)", *Landslides*, 10, pp. 409-120, 2013
- Fontana, L., (2007) "Relazione geologica geotecnica a supporto di progettazione villa singola unifamiliare da realizzarsi in Comune di Castelseprio (VA)- via Castelvecchio"
- Fontana, L., (2010) "Verifica condizioni di stabilità di un tratto di versante prospiciente via Monte Grappa – Comune di Gornate Olona (Va)", *Consulenza Tecnica*
- Franconi, V., (1983) "Caratteristiche tecniche e pedologiche dei suoli dei terrazzi ferrettizzati della Lombardia: il terrazzo di Morazzone (VA)"
- Fujisawa, K., Murakami, A., Nishimura, S., (2010) "Numerical analysis of the erosion and the transport of fine particles within soil leading to the piping phenomenon", *Soils and Foundations* Vol.50, n°4, 471-482, Aug. 2010
- Hagerty, D.J., (1991) "Piping/Sapping erosion I: Basic Considerations", *Journal of Hydraulic engineering* 117, 991-1008
- Hagerty, D.J., (1991) "Piping/Sapping erosion II: identification-diagnosis", *Journal of Hydraulic Engineering* 117, 1009-1025
- Higgins, C.G., (1984) "Piping and sapping: development of landforms by groundwater forms" LaFleur R.G. (Ed.), *Groundwater as a Geomorphic Agent*, Allen and Unwin, Boston, pp.18-58
- IDROGEO Servizi S.r.l. (2004) "Indagine geotecnica di supporto alla progettazione" in "realizzazione di una villetta unifamiliare in via Manzoni a Gornate Olona (Va)", *Consulenza Tecnica*
- Jones, J.A.A., (1981) "The nature of soil piping: a review of research", BGRG research monograph 3. Geo Books, Norwich
- Julien, P.Y., (1998) "Erosion and Sedimentation", Cambridge University Press, 15
- Kenney, T.C., Lau, D. (1985) "Internal stability of granular filters" *Canadian Geotechnical Journal* 22, 215-225
- Lambe, T.W., Whitman, R.W., (1979) "Soil mechanics, SI version", John Wiley & Sons, 283
- Lane, E.W., (1934) "Security from under-seepage masonry dams on earth foundations", *Trans ASCE* 60(4):929–966



Lollino, G., Audisio, C., (2006) "UNESCO World Heritage sites in Italy affected by geological problems, specifically landslide and flood hazard", *Landslides*, 3, pp. 311-321, 2006

Lorenzo, C., Consonni, M., Colombo, L., Gattinoni, P., (2015) "Problemi di stabilità per le infrastrutture delle aree interessate da cavità (occhi pollini) nei edimenti pleistocenici della pianura lombarda", *Mem. Descr. Carta Geol. D'It. XCIX* (2015), pp. 315-326

Margottini, C., Antidze, N., Corominas, J., Crosta, G.B., Frattini, P., Gigli, G., Giordan, D., Iwasaky, I., Lollino, G., Manconi, A., Marinou, P., Scavia, C., Sonnessa, A., Spizzichino, D. & Vacheishvili, N., (2015) "Landslide hazard monitoring and conservation strategy for the safeguard of Vardzia Byzantine monastery complex, Georgia", *Landslides*, 12, pp. 193-204, 2015

Mazzucchelli, A., Mazzucchelli, M., Pozzi, R., (2011) "Parco archeologico di Castelseprio – Consolidamento delle mura lato est ed interventi di regimazione e drenaggio acque – Progetto definitivo/esecutivo"

McCook, D.K., (2004) "A comprehensive discussion of piping and internal erosion failure mechanisms", *Proceedings, annual dam safety conference, ASDSO*. Phoenix, Arizona

MIDAS GTS2010 – Manual

Nicoloso, A., (2012) "Interventi di compensazione forestale consistenti in opere di sistemazione idraulico forestale nella Valle del Malmonte" – Relazione Tecnica

Parmigiani, M., (2004) "Caratterizzazione geologico-tecnica del terreno sito in comune di Gornate Olona, PL S.ta Monica Lotto n°18" – Relazione geologica

PGT del Comune di Castelseprio – Componente Geologica, Idrogeologica e Sismica (2014), a cura dello Studio Geologico Integra S.r.l.

PGT del Comune di Gornate Olona – Componente Geologica, Idrogeologica e Sismica (2013), a cura dello Studio Tecnico Associato di Geologia dei dott. Carimati e Zaro

Richards, K. S., Reddy, K.R., (2007) "Critical appraisal of piping phenomena in earth dams", *Bull Eng Geol Environ* (2007) 66:381–402

Scesi., L., Papini, M., Gattinoni, P., Longoni, L., (2015) "Geologia tecnica", CEA Edizioni

Scholtès, L., Hicher, P., Sibille, L., (2010) "Multiscale approaches to describe mechanical responses induced by particle removal in granular materials", *C. R. Mecanique* 338 (2010) 627–638

Strini, A., (2000) "Erosione sotterranea e sprofondamenti nell'Alta Pianura Lombarda", tesi di dottorato, Università degli Studi di Milano

Strini, A., (2004) "Erosione sotterranea e sprofondamenti nell'Alta Pianura Lombarda: gli "occhi pollini"", Università degli Studi di Milano - Dipartimento di Scienze della Terra

- Tapete, D., Fanti, R., Cecchi, R., Petrangeli, P., Casagli, N., (2012) "Satellite radar interferometry for monitoring and early-stage warning of structural instability in archaeological sites", *Journal of Geophysics and Engineering*, 9, pp. S10-S25, 2012
- Terzaghi, K., (1939) "Soil mechanics: a new chapter in engineering science", *J Instn Civ Eng* 12:106–141
- Vandenboer, K., van Beek, V., Bezuijen, A., "3D finite element method (FEM) simulation of groundwater flow during backward erosion piping", *Front. Struct. Civ. Eng.* 2014, 8(2): 160–166
- Wang, X., Li, J., (2015) "On the degradation of granular materials due to internal erosion", *Acta Mech. Sin.* (2015) 31(5):685–697
- Wang, Y., Ni, X., (2013) "Hydro-mechanical analysis of piping erosion based on similarity criterion at micro-level by PFC-3D", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 17:sup1, s187-s204
- Xiao, M., (2015) "Mobilization of sand particles and erosion progression under various permeating fluids"
- Zaslavsky, D., Kassif, G., (1965) "Theoretical formulation of piping mechanism in cohesive soils", *Géotechnique* 15, 303-313
- Zhou, W., Chen, F., Gou, H., (2015) "Differential radar interferometry for structural and ground deformation monitoring: a new tool for the conservation and sustainability of cultural heritage sites", *Sustainability*, 7, pp. 1712-1729, 2015
- Zuccoli L., (2000) "Geologia dei Pianalti di Castelseprio e Tradate (Provincia di Varese)", *Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences* 13 (1/2), 2000, 57-80