



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, DELL'AMBIENTE,  
DEL TERRITORIO E ARCHITETTURA - DICATeA

---

## ASPETTI GEOTECNICI LEGATI ALLA STABILITA' DEGLI ARGINI GOLENALI: LA GOLENA DI GHIAROLE

GEOTECHNICAL ASPECTS RELATED TO THE STABILITY OF  
LEVEES IN FLOODPLAINS: GHIAROLE'S FLOODPLAIN

Relatore:

Prof. Ing. SEGALINI Andrea

Correlatori:

Ing. GRAZIANI Davide

Prof. Ing. TANDA Maria Giovanna

Tesi di Laurea di:  
GESSICA CARPEGGIANI

ANNO ACCADEMICO 2015/2016

*“Cadendo, la goccia scava la pietra,  
non per la sua forza, ma per la sua costanza.”*  
(Lucrezio)

# Indice

Indice delle Figure .....	6
Indice delle Tabelle .....	10
Introduzione .....	12
Capitolo 1: Cos'è un argine .....	17
Capitolo 2: Inquadramento del Territorio.....	21
Caratterizzazione Geografica.....	21
Cenni Storici.....	25
L'Abitato di Ghiarole.....	25
Il Sistema Arginale a Difesa di Ghiarole.....	27
Il Consorzio di Ghiarole .....	28
Capitolo 3: Lo Studio Preliminare dell'Argine .....	30
Il Rilievo dell'Argine .....	32
Le Prove Geognostiche .....	41
Indagini Geognostiche Precedenti.....	41
Campagna di Indagini in situ 2016.....	43
Prova Penetrometrica Statica Elettrica con Piezocono (CPTU) .....	44
Prova di Dissipazione .....	50
Prove Geoelettriche con Stendimento .....	52
Sondaggi a Carotaggio Corti .....	56
Prove di Permeabilità in Foro di Tipo Lefranc.....	58
Capitolo 4: Le Sezioni Analizzate .....	60
Sezione 43.....	70
Sezione 1250 .....	72
Sezione 1680 .....	74
Sezione 1855 .....	75
Sezione 2100 .....	77

Sezione 2400 .....	78
Sezione 2700 .....	79
Sezione 2980 .....	80
Sezione 3308 .....	83
Sezione 3380 .....	84
Sezione 3600 .....	86
Sezione 3900 .....	87
Capitolo 5: Le Verifiche di Stabilità.....	89
Il Metodo agli Elementi Finiti.....	89
I Metodi dell'Equilibrio Limite .....	92
Verifica 1: L'Argine come una Diga in Terra - Regime Stazionario .....	95
Sezione 43.....	97
Sezione 1250.....	98
Sezione 1680.....	99
Sezione 1855.....	100
Sezione 2100.....	102
Sezione 2400.....	103
Sezione 2700.....	104
Sezione 2980.....	105
Sezione 3308.....	106
Sezione 3380.....	107
Sezione 3600.....	108
Sezione 3900.....	109
In Sintesi.....	110
Verifica 2: L'Argine come una Diga in Terra – Regime Transitorio .....	111
Sezione 43.....	115
Sezione 1250.....	117

Sezione 1680.....	118
Sezione 1855.....	119
Sezione 2100.....	121
Sezione 2400.....	122
Sezione 2700.....	123
Sezione 2980.....	124
Sezione 3308.....	125
Sezione 3380.....	126
Sezione 3600.....	127
Sezione 3900.....	129
In Sintesi.....	130
Possibile Intervento di Miglioramento .....	131
Verifica 3: Resistenza dell'Arginatura in Condizioni Sismiche.....	134
Calcolo dei Coefficienti Sismici Equivalenti .....	137
Esecuzione delle Simulazioni .....	139
Sezione 43.....	139
Sezione 1250 .....	139
Sezione 1855 .....	140
Sezione 2980 .....	140
Sezione 3380 .....	141
Sezione 3900 .....	141
In Sintesi.....	142
Conclusioni .....	143
Bibliografia.....	145
Ringraziamenti.....	146

# Indice delle Figure

Figura 1: Sistema Arginale del Fiume Po .....	12
Figura 2: Delimitazione Fasce Fluviali.....	15
Figura 3: Argine a Trapezio Singolo .....	19
Figura 4: Argine a Trapezi Composti.....	19
Figura 5: Esempio di Ringrosso Arginale sul Delta del Po, Successivo alla Piena del 1951 .....	20
Figura 6: Golena Chiusa di Ghiarole .....	21
Figura 7: Golena Aperta (ovale verde) e zona “delle Due Enze” (ovale azzurro).....	23
Figura 8: Mappa Storica dell'Archivio di Stato (1).....	29
Figura 9: Mappa Storica dell'Archivio di Stato (2).....	29
Figura 10: Laser Spectra GL720 .....	32
Figura 11: Stadia Metrica .....	32
Figura 12: Chiavica " <i>Scutellara</i> ", che interrompe l'argine consortile .....	33
Figura 13: Indicazione Punti Quotati .....	37
Figura 14: Indicazione Lunghezze Misurate .....	38
Figura 15: Tracciamento Linea Imbibizione .....	38
Figura 16: Scostamento Linea Imbibizione .....	39
Figura 17: Dettaglio di Sezione Senza Banca Intermedia, con Sorgente Sospesa.....	39
Figura 18: Dettaglio di Sezione con Sorgente Sospesa Sopra la Banca Intermedia .....	39
Figura 19: Schema dei Punti di Misura di una Tomografia Elettrica .....	53
Figura 20: Esempio di Sezione Bidimensionale di Resistività .....	55
Figura 21: Esempio di Cassetta Catalogatrice Realizzata Durante un Carotaggio .....	57
Figura 22: Argine Consortile con Sezioni Analizzate .....	60
Figura 23: Esempio di Sezione Trasversale, con Indicazione dei Punti Notevoli.....	61
Figura 24: Schema del Fosso di Innesto .....	63
Figura 25: Andamento Coronamento Arginale e Limiti di Stratificazione .....	65
Figura 26: Esempio di Sezione Arginale con Stratificazione Interna.....	67
Figura 27: Sezione Trasversale alla Progressiva 43 .....	70
Figura 28: Grafici della Prova CPTU, Sezione 43 .....	70

Figura 29: Sezione 43 in "Slide" .....	71
Figura 30: Sezione Trasversale alla Progressiva 1250 .....	72
Figura 31: Grafici della Prova CPTU, Sezione 1250 .....	72
Figura 32: Sezione 1250 su "Slide" .....	73
Figura 33: Sezione Trasversale alla Progressiva 1680 .....	74
Figura 34: Sezione 1680 su "Slide" .....	74
Figura 35: Sezione Trasversale alla Progressiva 1855 .....	75
Figura 36: Grafici della Prova CPTU, Sezione 1855 .....	75
Figura 37: Sezione 1855 su "Slide" .....	76
Figura 38: Sezione Trasversale alla Progressiva 2100 .....	77
Figura 39: Sezione 2100 su "Slide" .....	77
Figura 40: Sezione Trasversale alla Progressiva 2400 .....	78
Figura 41: Sezione 2400 su "Slide" .....	78
Figura 42: Sezione Trasversale alla Progressiva 2700 .....	79
Figura 43: Sezione 2700 su "Slide" .....	79
Figura 44: Sezione Trasversale alla Progressiva 2980 .....	80
Figura 45: Grafici della Prova CPTU, Sezione 2980 .....	81
Figura 46: Sezione 2980 su "Slide" .....	82
Figura 47: Sezione Trasversale alla Progressiva 3308 .....	83
Figura 48: Sezione 3308 su "Slide" .....	83
Figura 49: Sezione Trasversale alla Progressiva 3380 .....	84
Figura 50: Grafici della Prova CPTU, Sezione 3380 .....	84
Figura 51: Sezione 3380 su "Slide" .....	85
Figura 52: Sezione Trasversale alla Progressiva 3600 .....	86
Figura 53: Sezione 3600 su "Slide" .....	86
Figura 54: Sezione Trasversale alla Progressiva 3900 .....	87
Figura 55: Grafici della Prova CPTU, Sezione 3900 .....	87
Figura 56: Sezione 3900 su "Slide" .....	88
Figura 57: Visualizzazione della Mesh Automatica Generata dal Programma in una Sezione .....	91
Figura 58: Suddivisione del Pendio in Conci .....	92
Figura 59: Forze Applicate su Ogni Concio .....	92

Figura 60: Risultato dell'Applicazione del Metodo di Bishop Semplificato .....	94
Figura 61: Risultato della Simulazione con Carico=29.48 m, Sezione 43 .....	97
Figura 62: Risultato della Simulazione con Carico=27.48 m, Sezione 43 .....	97
Figura 63: Risultato della Simulazione con Carico=29.43 m, Sezione 1250 .....	98
Figura 64: Risultato della Simulazione con Carico=29.74 m, Sezione 1680 .....	99
Figura 65: Risultato della Simulazione con Carico=28.24 m, Sezione 1680 .....	99
Figura 66: Risultato della Simulazione con Carico=29.66 m, Sezione 1855 .....	100
Figura 67: Ingrandimento Sorgente Sospesa, con Velocità di Filtrazione, Sezione 1855 .....	100
Figura 68: Risultato della Simulazione con Carico=27.66 m, Sezione 1855 .....	101
Figura 69: Risultato della Simulazione con Carico=29.52 m, Sezione 2100 .....	102
Figura 70: Ingrandimento Sorgente Sospesa, con Velocità di Filtrazione, Sezione 2100 .....	102
Figura 71: Risultato della Simulazione con Carico=28.02 m, Sezione 2100 .....	102
Figura 72: Risultato della Simulazione con Carico=29.61 m, Sezione 2400 .....	103
Figura 73: Risultato della Simulazione con Carico=28.11 m, Sezione 2400 .....	103
Figura 74: Risultato della Simulazione con Carico=29.84 m, Sezione 2700 .....	104
Figura 75: Risultato della Simulazione con Carico=28.84 m, Sezione 2700 .....	104
Figura 76: Risultato della Simulazione con Carico=29.17 m, Sezione 2980 .....	105
Figura 77: Risultato della Simulazione con Carico=29.29 m, Sezione 3308 .....	106
Figura 78: Risultato della Simulazione con Carico=28.29 m, Sezione 3308 .....	106
Figura 79: Risultato della Simulazione con Carico=29.46 m, Sezione 3380 .....	107
Figura 80: Risultato della Simulazione con Carico=27.96 m, Sezione 3380 .....	107
Figura 81: Risultato della Simulazione con Carico=29.52 m, Sezione 3600 .....	108
Figura 82: Risultato della Simulazione con Carico=28.02 m, Sezione 3600 .....	108
Figura 83: Risultato della Simulazione con Carico=29.44 m, Sezione 3900 .....	109
Figura 84: Onda di Piena Massima .....	112
Figura 85: Grafico delle Onde di Piena, Confronto fra Piena Reale e Simulata.....	114
Figura 86: Situazione al Giorno 15 della Simulazione, Sezione 43 .....	115
Figura 87: Situazione al Giorno 30 della Simulazione, Sezione 43 .....	116
Figura 88: Situazione al Giorno 24 della Simulazione, Sezione 1250 .....	117
Figura 89: Situazione al Giorno 45 della Simulazione, Sezione 1250 .....	117

Figura 90: Situazione al Giorno 8 della Simulazione, Sezione 1680.....	118
Figura 91: Situazione al Giorno 24 della Simulazione, Sezione 1680 .....	118
Figura 92: Situazione al Giorno 29 della Simulazione, Sezione 1855 .....	119
Figura 93: Situazione al Giorno 7 della Simulazione, Lato Campagna, Sezione 1855....	120
Figura 94: Ingrandimento Sorgente Sospesa, con Velocità di Filtrazione, al Giorno 24, Sezione 1855.....	120
Figura 95: Situazione al Giorno 6 della Simulazione, Sezione 2100.....	121
Figura 96: Ingrandimento Sorgente Sospesa, con Velocità di Filtrazione, al Giorno 18, Sezione 2100.....	121
Figura 97: Situazione al Giorno 27 della Simulazione, Sezione 2400 .....	122
Figura 98: Situazione della Linea di Imbibizione al Giorno 24, Sezione 2700 .....	123
Figura 99: Situazione al Giorno 24 della Simulazione, Sezione 2980 .....	124
Figura 100: Situazione al Giorno 6 della Simulazione, Sezione 3308 .....	125
Figura 101: Situazione al Giorno 27 della Simulazione, Sezione 3380 .....	126
Figura 102: Situazione al Giorno 14 della Simulazione, Sezione 3600 .....	127
Figura 103: Situazione al Giorno 30 della Simulazione, Sezione 3600 .....	127
Figura 104: Situazione al Giorno 27 della Simulazione, Sezione 3900 .....	129
Figura 105: Situazione al Giorno 45 della Simulazione, Sezione 3900 .....	129
Figura 106: Nuova Geometria Sezioni, con Nucleo di Argilla.....	131
Figura 107: Situazione Esemplificativa al Giorno 5.....	132
Figura 108: Situazione Esemplificativa al Giorno 24.....	132
Figura 109: Situazione con Carico Idraulico e Sismico, Sezione 43.....	139
Figura 110: Situazione con Carico Idraulico e Sismico, Sezione 1250 .....	139
Figura 111: Situazione con Carico Idraulico e Sismico, Sezione 1855 .....	140
Figura 112: Situazione con Carico Idraulico e Sismico, Sezione 2980 .....	140
Figura 113: Situazione con Carico Idraulico e Sismico, Sezione 3380 .....	141
Figura 114: Situazione con Carico Idraulico e Sismico, Sezione 3900 .....	141

# Indice delle Tabelle

Tabella 1: Confronto Quote Rilievo-Riferimento Assoluto .....	35
Tabella 2: Sezioni con Problemi nella Linea di Imbibizione .....	40
Tabella 3: Classificazione Generale delle Terre CNR-UNI 10006 .....	42
Tabella 4: Permeabilità Terreni Ottenuta dalle Indagini del 1996 .....	42
Tabella 5: Caratteristiche Punta Elettrica-Piezcono .....	45
Tabella 6: Valori Tipici di Permeabilità all'Acqua .....	47
Tabella 7: Valori dell'Indice SBT .....	48
Tabella 8: Riassunto Prove CPTU .....	49
Tabella 9: Riassunto Prove Geoelettriche .....	55
Tabella 10: Caratteristiche Tecniche Apparecchio di Trivellazione .....	56
Tabella 11: Riassunto Sondaggi a Carotaggio .....	57
Tabella 12: Riassunto Prove di Permeabilità di Tipo Lefranc .....	59
Tabella 13: Esempio di Tabella delle Coordinate dei Punti Notevoli di una Sezione .....	61
Tabella 14: Esempio di Dati che Indicano il Passaggio fra Litologie .....	62
Tabella 15: Ricostruzione Profondità dei Limiti di Stratificazione per ogni Sezione .....	65
Tabella 16: Esempio di Calcoli per la Determinazione dei Punti Limiti degli Strati .....	66
Tabella 17: Parametri Meccanici Sezione 43 .....	71
Tabella 18: Parametri Meccanici Sezione 1250 .....	73
Tabella 19: Parametri Meccanici Sezione 1680 .....	74
Tabella 20: Parametri Meccanici Sezione 1855 .....	76
Tabella 21: Parametri Meccanici Sezione 2100 .....	77
Tabella 22: Parametri Meccanici Sezione 2400 .....	78
Tabella 23: Parametri Meccanici Sezione 2700 .....	79
Tabella 24: Parametri Meccanici Sezione 2980 .....	81
Tabella 25: Parametri Meccanici Sezione 3308 .....	83
Tabella 26: Parametri Meccanici Sezione 3380 .....	85
Tabella 27: Parametri Meccanici Sezione 3600 .....	86
Tabella 28: Parametri Meccanici Sezione 3900 .....	88
Tabella 29: Tabella Riassuntiva Carichi Idraulici.....	110

## Indice delle Tabelle

Tabella 30: Tabella Riassuntiva Onde di Piena .....	111
Tabella 31: Sintesi Prove a Regime Transitorio .....	130
Tabella 32: Coefficiente di Riduzione dell'Accelerazione Massima .....	135
Tabella 33: Coefficiente di Amplificazione Stratigrafica .....	136
Tabella 34: Coefficiente di Amplificazione Topografica .....	136

# Introduzione

Gli argini sono uno strumento fondamentale per il controllo delle piene fluviali, perché permettono di contenere all'interno dell'alveo le portate in transito nel corso d'acqua, ma non possono essere considerati l'unica difesa attuabile.

Il bacino idrografico del Po ha un sistema di argini che si suddivide principalmente in tre componenti:

1. Argini dell'asta principale del fiume, dalla confluenza con il fiume Sesia al mare, lunghi complessivamente 864 km (in verde in Figura 1);
2. Argini degli affluenti nei tratti di rigurgito, pari a 1424 km in totale (in giallo in Figura 1);
3. Argini del delta, sviluppati per 154 km (in rosso in Figura 1).

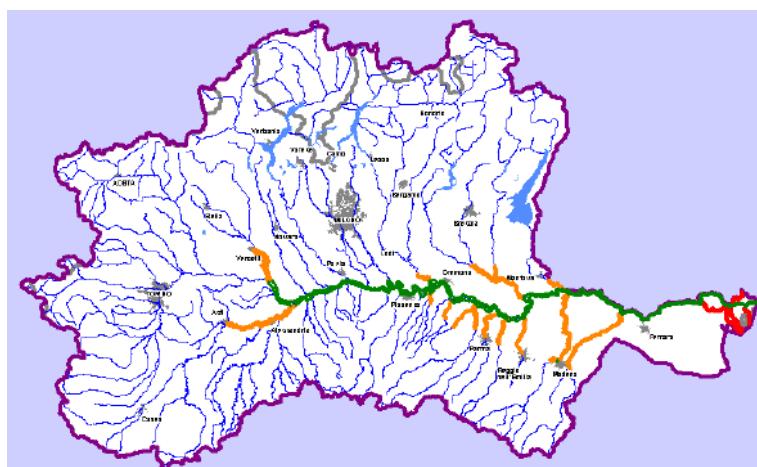


Figura 1: Sistema Arginale del Fiume Po

L'arginatura di questo grande fiume è quindi pari, in totale, a 2442 km, e gestirla, mantenendola funzionale, non è un'operazione banale; di questo sistema di argini, come dell'intero bacino del Po, si occupa infatti un ente specifico, l'Autorità di Bacino del Fiume Po.

Le Autorità di bacino per i bacini idrografici di rilievo nazionale sono state istituite con l'articolo 12 della Legge 183/1989, poi "assorbita" nella Parte Terza del D.L.vo 152/2006, la quale si occupa della materia ambientale "Acque" in tutte le sue declinazioni; l'Autorità di Bacino è un organismo misto, costituito da Stato e Regioni insieme, che si occupa dei

bacini idrografici come se fossero sistemi unitari: il bacino del Po, infatti, si estende su 8 regioni, raccoglie le acque di un territorio che va dal Monviso al delta del fiume stesso, e l'Autorità di Bacino è il sistema pensato per avere un'intesa unitaria ed un'operatività sinergica fra tutti gli organi istituzionali interessati alla salvaguardia ed allo sviluppo del bacino di questo fiume, caratterizzato da complesse problematiche ambientali.

Per raggiungere gli obiettivi di salvaguardia e sviluppo, l'Autorità di Bacino ha approvato il PAI, cioè il Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico, attraverso il quale si pone di ridurre il rischio idrogeologico entro valori compatibili con gli usi del suolo, in modo da salvaguardare l'incolinità delle persone e da ridurre al minimo i danni ai beni presenti sui territori a rischio; il PAI infatti consolida ed unifica la pianificazione di bacino per l'assetto idrogeologico, e coordina i precedenti piani straordinari e stralci di piani, precisando ed apportando gli adeguamenti necessari per garantire le interrelazioni e le integrazioni proprie di un piano di bacino. Per fare questo l'Autorità di Bacino ha condotto, dal 1990, le attività di ricognizione, studio e predisposizione del piano, attraverso il coinvolgimento nei programmi di lavoro delle Regioni e degli enti locali.

Attraverso il PAI il bacino del Po è stato classificato in funzione del rischio, cioè in funzione dell'entità del danno atteso in un'area, in un certo periodo di tempo, in seguito al verificarsi di un particolare evento; l'equazione che fornisce il livello di rischio ( $R$ ), contenuta nel piano, è:

$$R = H \cdot E \cdot V$$

I fattori che compongono il rischio sono:

- La pericolosità  $H$ , cioè la probabilità che l'evento accada in quel luogo, in un certo intervallo di tempo;
- Il valore esposto  $E$ , cioè il valore dei beni (persone e cose) presenti in quell'area;
- La vulnerabilità  $V$ , cioè l'attitudine degli elementi a subire danni.

E' importante notare che se uno dei fattori che compongono il rischio è nullo, anche il rischio diventa nullo, quindi si devono valutare attentamente le componenti, e definire di conseguenza quali aree devono essere protette attraverso le misure di salvaguardia.

Il rischio è classificato in 4 categorie, da R4 (molto elevato, con perdita di vite umane e gravi danni economici) a R1 (moderato, con danni sociali ed economici marginali), e l'obiettivo del PAI è eliminare i rischi classificati come R4 e R3, portandoli ad essere R2 e R1; la riduzione del rischio può essere attuata attraverso diversi strumenti, come gli

*interventi strutturali* a difesa degli insediamenti esistenti (arginature), i *vincoli sulle aree a rischio* per impedire nuovi insediamenti, l'*allontanamento degli insediamenti incompatibili*, l'*uso dei sistemi di previsione* di piena e la *diffusione della conoscenza del rischio* presso la popolazione.

Si vuole quindi raggiungere un livello di rischio compatibile, per salvaguardare l'incolumità delle persone e ridurre al minimo i danni dei beni esposti.

Nell'ultimo secolo si evidenzia una tendenza all'aumento dei colmi e dei volumi defluiti, per effetto della progressiva costruzione di argini sempre più a monte lungo il corso del fiume, ma il continuo rialzo degli argini per contenere il rischio delle inondazioni, da solo, non costituisce più una difesa efficace; non è possibile continuare ad innalzare la sommità degli argini, o costruire opere di ringrosso strutturale, perché ad oggi si è arrivati alle dimensioni limite, e per questo si deve mantenere ed ottimizzare il sistema delle golene chiuse collocate nel tratto medio di Po (circa 500 milioni metri cubi), si deve attuare una manutenzione periodica dell'alveo del fiume, e si devono porre vincoli alle trasformazioni d'uso del suolo nelle golene aperte e chiuse.

Le golene chiuse costituiscono un sistema arginato all'interno del bacino del Po che si invasa solamente in occasione delle piene più gravose, e svolge una funzione di laminazione dei colmi essenziale per la protezione del tratto terminale del fiume; il PAI prevede una consistente manutenzione di questo sistema di golene chiuse, ai fini della laminazione della piena, intervenendo sulle stesse per garantire una migliore affidabilità di funzionamento: gli argini goleinali, che permettono di invasare un volume notevole di acqua in prossimità del passaggio del colmo, devono essere solidi, e non possono essere soggetti a rottura, poiché in assenza di questi le aree goleinali produrrebbero un effetto di laminazione molto inferiori.

Le golene chiuse ricadono in fascia B, nella suddivisione delle fasce fluviali, e la delimitazione delle fasce fluviali costituisce lo strumento per ridurre il rischio idrogeologico e recuperare e mantenere l'ambiente fluviale; le fasce in cui è suddiviso l'alveo di un fiume sono tre:

- Fascia A, fascia di deflusso della piena; è costituita dalla porzione di alveo che è sede dell'intero deflusso della corrente (alveo di piena).

- Fascia B, fascia di esondazione; esterna alla precedente rispetto all'alveo, è costituita dalla porzione di alveo interessata da inondazione per una piena di riferimento. Con l'accumulo temporaneo in tale fascia di parte del volume di piena si attua la laminazione dell'onda di piena, ed il suo limite è definito dal punto in cui le quote naturali del terreno sono superiori ai livelli idrici di riferimento, materializzato da argini o altre opere di contenimento.
- Fascia C, anche chiamata area di inondazione per piena catastrofica, costituita dalla porzione di alveo interessata da inondazione per una piena superiore a quella di riferimento.

La fascia A deve essere riservata al deflusso della piena ed alle evoluzioni naturali dell'alveo, mentre la fascia B deve essere riservata alle aree di espansione naturale per laminare la piena; in fascia C si registrano invece condizioni di rischio residuali.

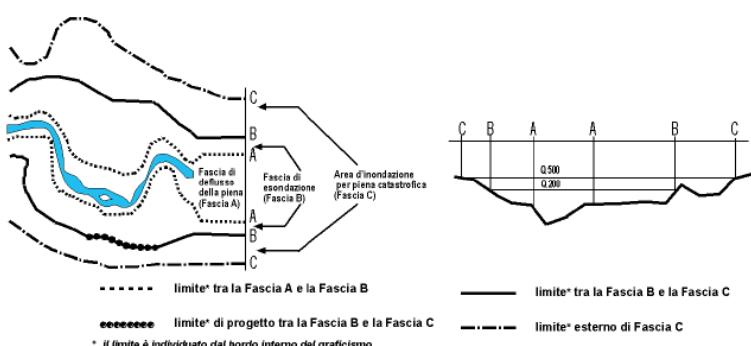


Figura 2: Delimitazione Fasce Fluviali

I centri abitati esistenti sono sempre stati difesi attraverso la definizione delle fasce fluviali, ma all'interno di esse vi sono numerosi insediamenti sparsi, anche in fascia B e nelle golene chiuse, e questi hanno un diverso grado di compatibilità con il deflusso della piena; questi edifici devono essere preservati dagli eventi di piena il più possibile, quindi le opere arginali a difesa delle golene chiuse devono essere resistenti, e le golene devono essere invasate solo per sormonto della protezione, non per rottura, instabilità o sifonamento della stessa. Nel caso in cui debba avvenire l'invaso della golena chiusa per sormonto arginale, si devono adeguare le infrastrutture incompatibili (rialzare di un piano le costruzioni, ad esempio), oppure si devono attuare strumenti economici di incentivazione per allontanare gli insediamenti incompatibili: si convince la popolazione

ad abbandonare un insediamento perché è più economico ricostruirlo in un altro luogo, piuttosto che ripristinarlo dopo ogni piena dannosa; si potrebbero inoltre istituire strumenti assicurativi per la copertura dei danni ad insediamenti incompatibili situati in una fascia fluviale, ma non nel nostro Paese, mentre è possibile farlo in altri Stati, come U.S.A. e Paesi del Nord Europa.

In questo lavoro di tesi si va a verificare la stabilità di un argine golendale, che può essere sormontato da una piena con tempo di ritorno maggiore rispetto a quello per cui è stato progettato, ma che deve resistere alle sollecitazioni che comporta una piena prima dell'effettivo sormonto, affinché non avvenga la rottura di questa importante difesa.

# Capitolo 1: Cos'è un argine

L'argine è un'opera strutturale di difesa passiva per i territori che si trovano nelle vicinanze di corsi d'acqua, e che possono per questo essere soggetti ad inondazioni.

Lo scopo di un argine è quello di contenere in alveo le portate di piena di una assegnata frequenza, e di permettere lo straripamento solo durante eventi di portata maggiore di quella assegnata; per svolgere questo compito esso deve resistere in tutte le condizioni, e non deve avere cedimenti che potrebbero essere causati da scosse sismiche, imbibizione per il contatto nel lato fiume con la portata transitante, o sifonamento. Negli ultimi anni una delle problematiche maggiori riguardante gli argini è però causata dalla proliferazione di tane di animali selvatici all'interno delle strutture: queste sono veri e propri tunnel, che spesso attraversano trasversalmente il corpo arginale, indebolendo la struttura e permettendo il passaggio di acqua dal lato fiume al lato campagna.

Un'arginatura è infatti solitamente costituita da un rilevato impermeabile in terra, simile ad una diga per costruzione e risposta alle sollecitazioni, e può raggiungere anche altezze considerevoli; oggi il fiume Po, come l'Adige, ha argini di contenimento che superano i 10 metri di altezza rispetto al piano campagna, e questo crea problemi, soprattutto nei tratti di valle dei corsi d'acqua: il continuo innalzamento dei sistemi arginali anche nelle zone di monte, ha permesso fino ad oggi il contenimento di onde di piena sempre maggiori, le quali arrivano a valle con tutto il loro carico idraulico, e fuoriescono dagli argini di valle, allagando le pianure circostanti. Questo avviene perché l'innalzamento delle arginature non può proseguire all'infinito, per motivi economici, di costruzione e mantenimento delle strutture, e per ragioni ambientali, poiché si deve permettere ai fiumi di seguire il più possibile il loro corso, e di riappropriarsi del territorio eccessivamente antropizzato. Le strutture arginali quindi non possono inseguire all'infinito "l'ultima piena", ma devono essere dimensionate in altezza, e di conseguenza in larghezza, in base all'entità degli eventi di piena previsti in un arco di tempo pluriennale, chiamato tempo di ritorno; gli argini del fiume Po sono progettati per un evento di piena con tempo di ritorno pari a 200 anni, e si ha un livello di rischio residuale se l'evento accade con una frequenza maggiore. La quota della sommità arginale viene determinata attraverso i livelli di piena, ricavati

dalle portate transitanti, e a questo valore deve essere aggiunto un franco arginale, cioè un margine di sicurezza che permetta di contenere la portata; questo margine ha un'altezza variabile, che raggiunge i livelli maggiori quanto più elevato è il grado di importanza e pericolosità del corso d'acqua che deve essere contenuto, in relazione anche al contesto territoriale che lo circonda.

L'efficacia delle arginature come strutture di protezione è quindi localmente elevata, in senso teorico, ma in un discorso più ampio e globale si devono prendere in considerazione più fattori, e si deve studiare il bacino di un fiume nella sua totalità, per evitare di proteggere una sola area a scapito di molte altre; gli argini sono infatti classificati come un sistema di controllo delle piene di tipo intensivo, atti cioè a proteggere piccole porzioni di territorio, ma dovrebbero essere considerati come estensivi, per poterli sviluppare come una struttura unica, adatta a proteggere contemporaneamente più aree dello stesso bacino, se non questo in modo completo.

Gli argini vengono classificati in diversi modi, ed in base alla loro tipologia si distinguono in:

- Argine maestro, che è l'argine di vero contenimento della piena;
- Argine golena, più basso del maestro, che ha la funzione di difendere quello che si trova in golena, ma anche di creare una piccola cassa di espansione (golena chiusa), che si invasa solo dopo la tracimazione del colmo arginale da parte dell'onda di piena.

Anche la forma di un argine è un elemento variabile: si possono infatti trovare semplici strutture a trapezio singolo, ma sono rare, perché troppo esposte agli agenti esterni, oppure costruzioni a trapezi sovrapposti. Gli argini composti da più trapezi sovrapposti sono strutture migliori, perché interpongono fra un pendio e l'altro le banche, cioè tratti orizzontali o sub-orizzontali che interrompono il ruscellamento dell'acqua piovana, la quale potrebbe creare un piccolo reticolo idrografico ad azione erosiva sulla superficie della struttura, sia lato fiume sia lato campagna; queste porzioni di terreno pianeggiante inoltre, nei casi in cui siano sufficientemente estese a lato fiume, permettono un'espansione della corrente durante un evento di piena, quindi ne rallentano la corsa, ed in questi casi non si parla più di banche (piarde), ma di golene aperte.

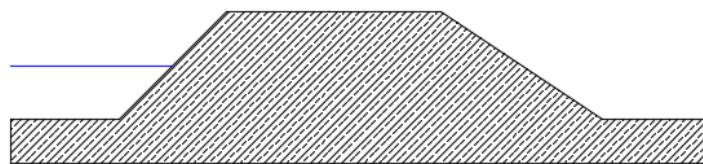


Figura 3: Argine a Trapezio Singolo

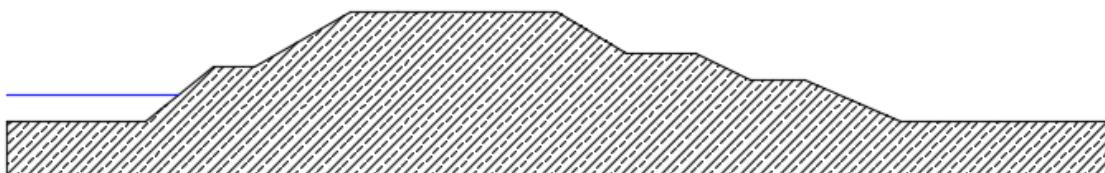


Figura 4: Argine a Trapezi Composti

Un'altra classificazione per gli argini riguarda la loro disposizione rispetto al corso d'acqua che devono contenere:

- Si parla di “argine in frodo” quando la struttura è a diretto contatto con il flusso idrico, è lambita dalla corrente idrica, quindi è facilmente erodibile da essa; sono argini in frodo quelli costituiti da un singolo trapezio, oppure quelli che presentano una o più banche solo sul lato campagna.
- Si parla invece di “argine completo” quando la struttura non è a diretto contatto con il corso d'acqua, ma si ha almeno una banca (golena aperta) che la separa dal letto vivo del fiume.

I rilevati arginali sono costruiti in terra, quindi sono spesso ricoperti da erba e piante selvatiche, ma l'inerbimento degli argini con alberi o con piante non approvate è dannoso, a causa delle radici: esse provocano un movimento interno al corpo arginale, e ne causano cadute; per questo motivo si predispone su queste strutture uno sfalcio periodico, che permetta di mantenerli in buone condizioni, ed è vietato piantumarli in modo artificiale con alberi o siepi; sono invece consentite le graminacee a radici rizomatose, che con le loro particolari radici proteggono la superficie arginale dal dilavamento.

I sistemi arginali, soprattutto le arginature maestre, sono spesso sedi di strade sulla sommità sub-orizzontale, chiamata coronamento arginale, ed anche la continua evoluzione degli argini nella loro struttura ha contribuito allo sviluppo della rete viaria su

essi; nel corso del tempo infatti queste opere sono state alzate, per poter contenere piene sempre maggiori, ed i continui sovralzi sono stati conseguentemente seguiti da ringrossi laterali, per mantenere la stabilità delle strutture. Queste modifiche successive dei rilevati implicano conseguenze dal punto di vista geotecnico: non sempre le operazioni di rialzo e ringrosso sono state documentate in modo appropriato, quindi per conoscere il materiale di cui è costruito un argine sono necessarie opportune prove geognostiche, che forniscano informazioni circa i terreni utilizzati e le stratificazioni eventualmente presenti. Questo è fondamentale anche in previsione di nuovi interventi.

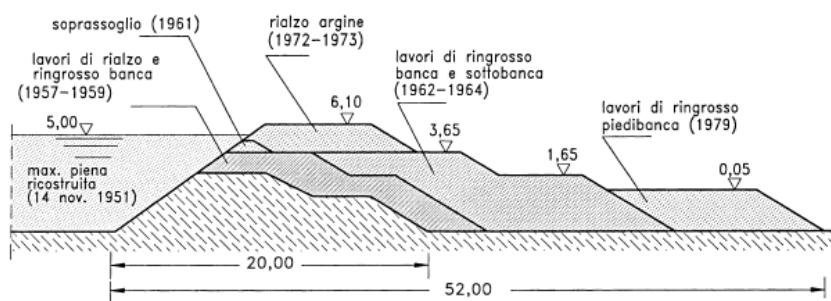


Figura 5: Esempio di Ringrosso Arginale sul Delta del Po, Successivo alla Piena del 1951

L'argine che si va ad analizzare è un argine goleñale che presenta banche sia a lato campagna, sia a lato fiume.

## Capitolo 2: Inquadramento del Territorio

### Caratterizzazione Geografica

Ghiarole è una frazione del comune di Brescello, in provincia di Reggio Emilia, distante dal paese maggiore solo pochi chilometri, che ha la particolarità di trovarsi molto vicina alla parte terminale del corso del torrente Enza, sviluppatasi per circa 4 km poco prima del suo ingresso nel fiume Po; questo piccolo centro abitato si colloca pienamente nella Pianura Padana, nella zona detta “Bassa Padana”, e per questo la sua quota altimetrica è molto modesta, pari a circa 25 metri sul livello del mare. La vicina confluenza del torrente Enza con il Po ha probabilmente dato origine anche al nome di questa frazione: esso infatti sembra derivare dalla presenza di ghiaia nella campagna su cui sorgono gli edifici, e questo tipo di materiale è stato trasportato durante i secoli, dagli Appennini fino a valle, dalle acque dell’Enza; la presenza di ghiaia nel territorio di Ghiarole è dovuta probabilmente alla presenza di un paleo-alveo dello stesso torrente Enza, che in passato scorreva in una posizione diversa rispetto a quella odierna, e che crea una forma ben definita nel paesaggio, visibile ancora oggi anche per un occhio non esperto. A causa della sua vicinanza al bacino del fiume Po ed al corso del torrente Enza, la frazione di Ghiarole è stata, fin dall’antichità, soggetta ad inondazioni, ed oggi è circondata da due sistemi arginali che la racchiudono all’interno di una golena chiusa.

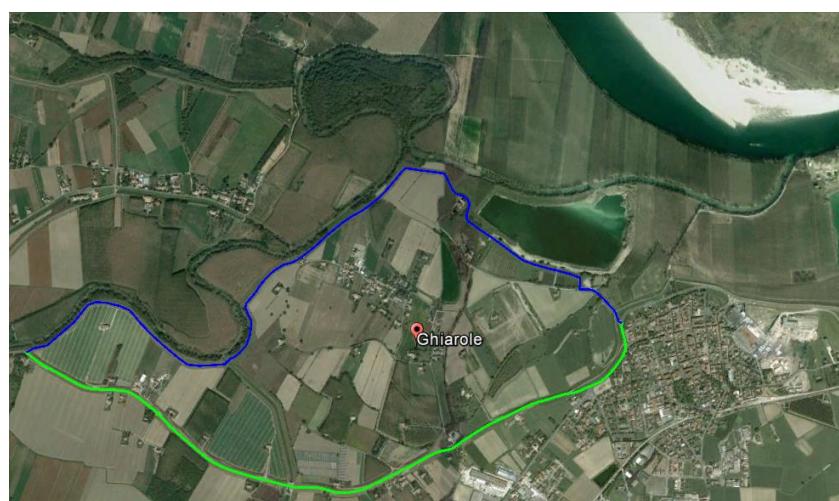


Figura 6: Golena Chiusa di Ghiarole

In quanto golena chiusa, questa porzione di territorio è compresa fra un tratto dell'argine maestro del fiume Po ed un argine consortile, e grazie alla presenza di quest'ultimo le inondazioni non sono molto frequenti: in questo modo il comprensorio non si allaga ogni volta che si ha un evento di piena, e ci si deve assicurare che l'argine consortile, anche chiamato goleale, non subisca cedimenti in caso di piena, perché per eventi eccezionali la golena deve poter invasare acqua, e dare origine ad una laminazione dell'onda.

In Figura 6 si può vedere indicato l'argine maestro del Po (in verde), sul quale si innesta in due punti l'argine goleale (in blu), lungo circa 4000 m: l'inizio dell'argine goleale è fissato come l'innesto a sinistra, localizzato nella frazione di Coenzo a Mane, mentre la fine è definita nell'innesto a destra, che si trova a margine dell'abitato di Brescello. L'argine consortile si sviluppa per circa 4 km, e nella prima parte segue molto da vicino il corso del torrente Enza; si allontana per un tratto, a circa 1500 m dall'innesto a Coenzo, quindi torna a seguirlo dopo 300 m di sviluppo quasi rettilineo, ed in questo modo si crea una golena aperta, all'esterno rispetto a quella chiusa di Ghiarole, che può essere allagata durante le piene.

Le onde di piena che allagano questa piccola golena aperta sono quelle che si formano nel torrente Enza ma, data la vicinanza con il fiume Po, in questo tratto di torrente si risente in modo consistente del rigurgito del fiume maggiore, che dallo sbocco risale nel letto del torrente affluente; la presenza di questa golena aperta in posizione intermedia fra il corso del torrente e l'argine consortile permette all'onda di piena di espandersi e di rallentare la sua corsa, anche grazie alla vegetazione presente, costituita da pioppi: essa è un fattore di contenimento importante rispetto all'azione della corrente, quindi l'acqua che raggiunge l'argine goleale ha meno capacità erosiva, e meno forza distruttiva. Un'altra zona di espansione delle piene, che permette di guadagnare tempo prima dell'invaso dell'onda all'interno della golena chiusa, è quella della porzione di territorio detta "delle Due Enze": questa zona è uno dei pochi esempi di penisola fluviale, è generata da un'ampia ansa naturale del torrente, si estende per circa 18 ettari, e presenta una ricca vegetazione, che permette quindi di rallentare la piena; non ci si può però addentrare nella vegetazione che la ricopre perché la zona è stata destinata ad area privata, ed è possibile arrivare solamente fino al punto in cui il fiume forma il suo caratteristico "cappio".

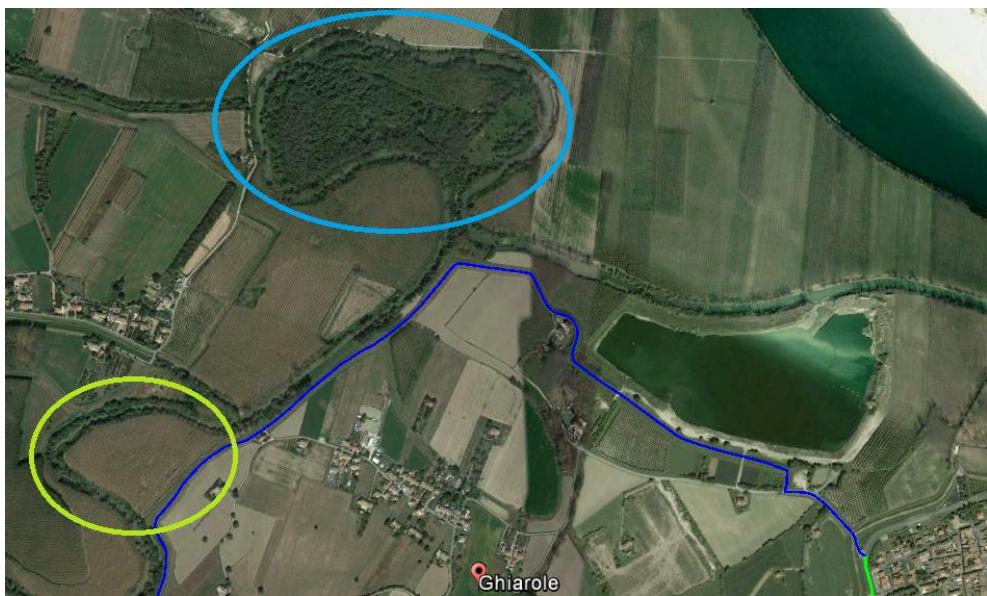


Figura 7: Golena Aperta (ovale verde) e zona “delle Due Enze” (ovale azzurro)

Quando il torrente Enza inizia il suo corso per formare l’ansa “delle Due Enze”, l’argine smette di seguire questo andamento, e si sviluppa maggiormente verso il centro abitato, ponendo così una porzione di territorio maggiore fra i due corsi d’acqua (torrente Enza e fiume Po) e la golena chiusa. In questa parte di terreni allagabili si può notare la presenza di una vecchia cava di sabbia, oggi riempita di acqua fino a formare un piccolo bacino permanente: questo è stato riqualificato dopo la dismissione della cava, è diventato un lago palustre, e contribuisce a generare un ambiente caratteristico, che non è ancora stato raggiunto dall’urbanizzazione incontrollata.

Le vie di accesso alla frazione sono due, entrambe prevedono di percorrere un tratto dell’argine maestro, ed al momento del loro sviluppo in golena ripercorrono quello che era il vecchio percorso arginale delle “quadre”; una delle due strade, infatti, segue l’innesto finale dell’argine consortile con il maestro, percorre un pezzo della sommità dell’arginatura minore e, entrando in golena scendendo da essa, prende il nome di “via Quadra Tagliata”, mentre l’altra scende direttamente dal maestro, più o meno a metà del tratto di quest’opera che racchiude la golena stessa, ed è chiamata più semplicemente “via Ghiarole”. Il comprensorio di Ghiarole è quindi collocato al margine delle principali vie di comunicazione, e non subisce troppe interferenze esterne dal punto di vista ambientale.

Il sistema arginale che racchiude la frazione di Ghiarole permette al piccolo centro abitato di non subire allagamenti frequenti, e questo è importante dal punto di vista della vulnerabilità e degli elementi esposti agli eventi calamitosi: nella golena sono infatti presenti complessivamente circa 200 edifici, di cui molti adibiti a funzioni residenziali, per ospitare le diverse famiglie presenti sul territorio; tutte le costruzioni sono elevate due piani fuori terra, ma oggi in caso di allagamento non previsto, quindi non preceduto da evacuazione, i residenti non potrebbero comunque ripararsi salendo al piano superiore. La vulnerabilità degli edifici in golena è infatti diventata più critica da quando l'argine maestro è stato alzato da una quota di 29/30 metri s.l.m. ad una di 30.70 metri s.l.m.: durante le piene del 1951 e del 1994, con il coronamento del maestro ad una quota inferiore, l'acqua è arrivata fino a metà del primo piano degli edifici, e da allora il comprensorio non si è più allagato, ma se si avesse un sormonto, dopo il rialzo del maestro, si allagherebbe completamente il primo piano, e l'unico riparo possibile sarebbero le mansarde, se esistenti.

In questo contesto si potrebbe pensare ad un adeguamento delle strutture, imponendo il rialzo attraverso la costruzione di piani direttamente sotto le coperture, ma ci sono elementi che lo impediscono: tutti gli edifici presenti sono stati costruiti prima del 1950, anno in cui è stato posto sulla golena un vincolo di inedificabilità, per preservarla da un'eccessiva antropizzazione, ed è inoltre presente su questo territorio un vincolo paesaggistico imposto dalla “Sovrintendenza per i beni architettonici e paesaggistici”, per il quale è vietato rialzare le costruzioni; non è quindi possibile ricavare spazio ad una quota idraulica di sicurezza.

La golena di Ghiarole deve poter essere invasata, durante eventi particolarmente gravosi per il corso d'acqua, ma in queste condizioni il patrimonio edilizio sarebbe altamente compromesso, ed un'ulteriore problematica è rilevata nello svuotamento del comprensorio dopo il sormonto arginale: se la golena venisse allagata, l'unico modo per poter evadere velocemente l'acqua sarebbe tagliando parte dell'arginatura consortile, poiché le due chiaviche presenti sono insufficienti per la realizzazione di questa operazione in tempi brevi.

## Cenni Storici

### L’Abitato di Ghiarole

Il comprensorio di Ghiarole compare dal XVI secolo nelle cronache conservate negli archivi di tre diverse province, Parma, Reggio Emilia e Modena; vista la sua posizione strategica, però, questa porzione di territorio era abitata sicuramente già da secoli precedenti: la zona è infatti elevata di circa due metri rispetto ai territori circostanti, ed è collocata vicino a diversi corsi d’acqua. Proprio la presenza di questi garantiva agli abitanti una maggiore probabilità di sopravvivenza, poiché potevano spostarsi più facilmente, avevano più disponibilità di cibo, ed erano inoltre in una posizione idonea per difendersi da eventuali attacchi delle popolazioni vicine; nonostante la presenza di più torrenti limitrofi, le inondazioni non costituivano un particolare problema, poiché se si correlano i livelli di piena registrati nelle cronache storiche con quelli odierni, è facile accorgersi che le piene allora ritenute straordinarie, oggi avrebbero tempi di ritorno molto bassi, dell’ordine di vent’anni.

Il tessuto urbanistico della frazione di Ghiarole come lo si conosce oggi si consolida già a partire da metà del 1700, e si inserisce in un contesto di confine con tre realtà diverse ma ugualmente importanti: il Ducato di Parma, lo Stato Estense ed il Ducato di Mantova; per questo motivo Ghiarole assume il ruolo di dogana, e diventa un importante nodo commerciale per molti traffici, leciti ma anche illeciti. I confini di questo piccolo borgo, proprio per la sua posizione particolarmente centrale, sono spesso stati modificati, già nelle prime registrazioni storiche, fino all’avvento di Napoleone Bonaparte, e i due principali contendenti erano lo Stato Estense ed il Ducato di Parma; tutto questo lascia ricordi ancora oggi, poiché nell’etimologia del luogo è frequente trovare le espressioni “bando parmigiano” e “bando modenese”, per indicare le due grandi potenze che confinavano con questo piccolo pezzetto di territorio.

All’inizio dell’autunno del 1747 è stata registrata una piena particolarmente notevole dell’Enza, i territori di Ghiarole furono completamente sommersi, e si fa risalire a quel momento l’inizio dell’erosione che ha poi portato alla nascita del nuovo corso del torrente Enza; anche dopo questa piena però questi territori non furono abbandonati,

tanto che nel 1823 venne costruito il ponte in muratura sul canale del Mulino Cases, per agevolare le comunicazioni e gli spostamenti degli abitanti da Ghiarole al capoluogo ed ai paesi vicini.

La posizione di confine, la dogana e le guarnigioni sparirono da Ghiarole con l'Unità di Italia, ma le fonti di sostentamento e di guadagno come la pesca, il commercio e l'agricoltura permisero agli abitanti di mantenere comunque un alto tenore di vita, e la popolazione non abbandonò questi luoghi: agli inizi del secolo scorso gli abitanti di questo piccolo borgo erano circa 830, ed in questo periodo furono istituiti la scuola elementare statale, composta da tre classi, e l'asilo infantile parrocchiale. Oggi però, a causa delle ridotte opportunità offerte da un'economia prettamente agricola, si contano solamente circa 220 residenti, e la diretta conseguenza di questo calo demografico è stata la chiusura dell'asilo e la soppressione, nel 1977, della scuola elementare, assorbita dalla sede del capoluogo brescellese.

Rimane invece attiva ancora oggi in questa piccola frazione la chiesa, un piccolo santuario dedicato alla Beata Vergine di Caravaggio, con una storia secolare: si racconta che questa opera sia stata inizialmente fatta costruire da un signore veneziano agli inizi del 1400, quando Brescello era sotto il dominio della Serenissima di S. Marco; egli infatti, scampato ad un grave pericolo in questa località, ha sciolto il voto fatto per salvarsi facendo erigere una piccola cappella, nel luogo in cui oggi sorge il santuario. L'edificio fu poi ingrandito ed abbellito, e nel 1700 divenne un vero e proprio oratorio, con un suo cappellano per tutte le funzioni di culto; nel 1846 fu eretto il campanile, grazie ad offerte dei devoti, ed in questo stesso periodo la chiesa fu dipinta a damasci in alcune parti, stuccata a lucido in altre, e dotata di organo e di un altare di marmo. Non essendovi nessun altro santuario nella zona, i brescellesi e le popolazioni dei paesi vicini furono molto devoti a quello di Ghiarole, il quale entrò a far parte della fabbriceria parrocchiale di Brescello nel 1870; a causa dell'alluvione del 1951 subì danni rilevanti, ma venne restaurato subito dopo, per portarlo alle condizioni odierne.

## Il Sistema Arginale a Difesa di Ghiarole

I primi documenti riguardanti gli argini a difesa di questa porzione di territorio sono contemporanei alle prime registrazioni del comprensorio, quindi risalgono anch'essi al XVI secolo; queste prime arginature erano costituite da una serie di opere discontinue, erette per la difesa locale di alcuni nuclei abitativi o di piccole coltivazioni, ma già collegate all'arginatura maestra, costruita a quei tempi sulla parte più alta del comprensorio, per ridurre il quantitativo di materiale necessario per la sua realizzazione. Le cronache dell'epoca riconducono inoltre l'arginatura maestra all'argine destro del canale Cases, il quale alimentava l'omonimo mulino.

L'evoluzione di queste prime arginature è iniziata nel 1700, quando fu realizzata una serie di comprensori, definiti "*quadre*", a resilienza crescente: questi erano piccole porzioni di territorio circondate sui quattro lati da argini, come se fossero dei quadrati, ed erano progettati per laminare l'effetto delle piene con un allagamento progressivo; per un migliore funzionamento di queste strutture, i torrenti Parma ed Enza sono stati deviati, nei secoli XVIII e XIX, con lo scopo di riunire tutte queste porzioni in un'unica area. Grazie alla presenza delle arginature a quadre, solo le piene del 1917 e del 1951 hanno allagato l'intero comprensorio di Ghiarole, poiché erano costituite da una portata tale da riuscire a sormontare anche gli argini posti a difesa delle quadre più lontane dal corso d'acqua.

Il sistema di arginature a quadre fu demolito a metà degli anni '70 del 1900: venne così mantenuta solamente l'arginatura perimetrale, attualmente esistente, e si andarono ad eliminare tutti gli argini minori posti fra quello golenale ed il maestro, i quali servivano per definire i comprensori interni alla golena.

L'argine perimetrale, dopo lo smantellamento delle quadre, fu soggetto ad una rottura per imbibizione nel 1994, in seguito alla quale venne ringrossato, e venne localmente sormontato dall'onda di piena registrata in un evento particolarmente gravoso del 2000; un nuovo intervento, completato nel 2009 per volere di AIPO (Agenzia Interregionale per il fiume PO) e del comune di Brescello, permise di aumentare la resilienza di questo manufatto, e da allora fino ad oggi non si sono verificati fenomeni di rottura arginale o di sormonto dello stesso, anche se in occasione di particolari piene si è dovuto ricorrere ad una sacchettatura di emergenza per evitare l'allagamento del comprensorio.

## Il Consorzio di Ghiarole

“Consorzio di Ghiarole” è il nome con cui è più comunemente conosciuto il “Consorzio Unico di Difesa Terre Golenali del Comune di Brescello”; esso è un consorzio di difesa obbligatorio, è stato approvato con il decreto prefettizio n° 5596 del 21/05/1927, istituito ai sensi del Regio Decreto 523/1904, ed è stato formato dall'unione di tutte quelle organizzazioni che gestivano le arginature di Ghiarole alla fine del 1800.

Infatti, in quegli anni, il sistema arginale era gestito non come una unica struttura, ma come se i diversi argini interni, interposti a quelli principali, fossero delle entità a sé stanti: i diversi comprensori esistenti erano gestiti per questo motivo da piccoli consorzi di difesa o da istituzioni private, denominate “quadre” per richiamare le porzioni di territorio in cui era divisa la golena, e prima della nascita del Consorzio Unico si contavano 4 consorzi minori e 3 quadre.

Il Consorzio di Ghiarole nacque quando era ancora in vigore la suddivisione del territorio in quadre, ma dagli anni ’70, dopo il loro smantellamento, questa istituzione difende, attraverso l'arginatura consortile sul torrente Enza, un territorio di circa 3 km<sup>2</sup>, pari al 10% dell'estensione del comune di Brescello.

In questo ente tutte le cariche sono elettive, e non prevedono alcuna retribuzione; gli organi direttivi sono stati eletti a novembre 2014, mentre il presidente è in carica da giugno 2015.

Ad oggi, il Consorzio Unico di Difesa Terre Golenali del Comune di Brescello è il consorzio privato che difende il maggior numero di unità immobiliari sul corso del fiume Po.

In Figura 8 è possibile notare il nucleo abitato di Ghiarole, racchiuso dall'arginatura a “quadre”, ed il vecchio corso del torrente Enza, che si univa con il Parma prima di sfociare nel fiume Po; in Figura 9, invece, il corso dell’Enza è già stato modificato, e si getta direttamente nel Po.



Figura 8: Mappa Storica dell'Archivio di Stato (1)

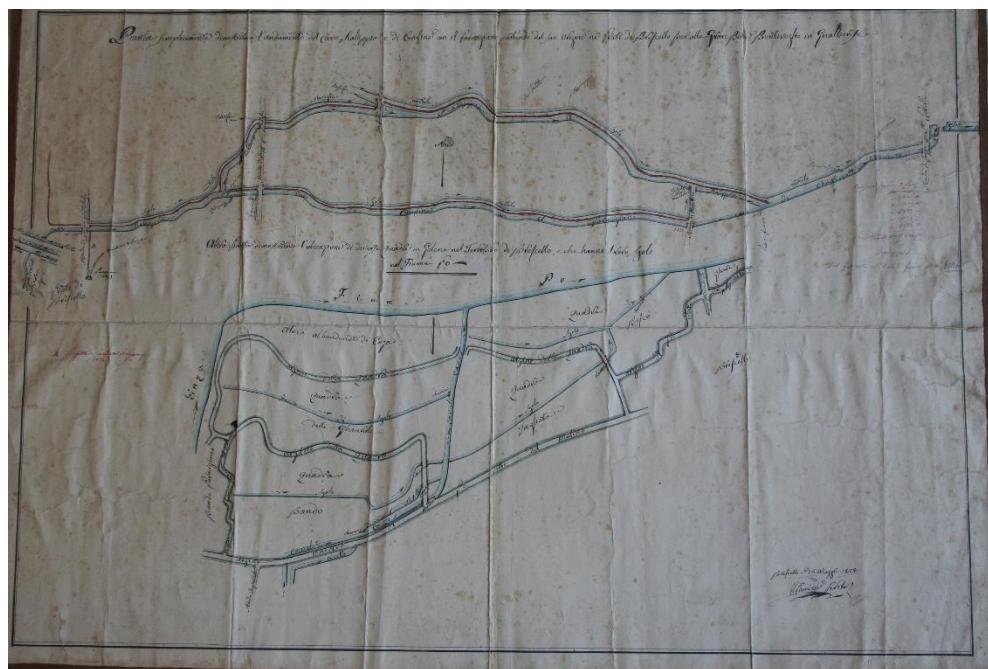


Figura 9: Mappa Storica dell'Archivio di Stato (2)

## Capitolo 3: Lo Studio Preliminare dell'Argine

In questo lavoro di tesi si deve verificare che l'argine consortile posto a protezione della golena di Ghiarole non subisca rotture per instabilità, causata da imbibizione o sifonamento, prima che l'onda di piena nel torrente Enza, rigurgitata dal letto del Po, giunga ad un livello tale da causare il sormonto dell'opera stessa; inoltre, la stabilità deve essere garantita anche in caso di sormonto, affinché l'eventuale allagamento avvenga solo attraverso la sommità dell'arginatura e non per mezzo di rotture intermedie nel corpo arginale, e possa quindi essere più facilmente gestito.

Questa verifica verrà eseguita per mezzo di simulazioni numeriche, le quali andranno a ricreare diverse condizioni di carico rispetto alle quali la struttura deve resistere:

- L'arginatura si deve comportare come una diga in terra, quindi si deve stabilire l'eventuale quota di carico in condizioni permanenti per la quale la struttura cesserà di comportarsi in questo modo, permettendo l'imbibizione, quindi il passaggio e la fuoriuscita di acqua dal lato fiume al lato campagna; questa quota è quella per la quale la verifica non è più soddisfatta, quindi l'argine smette di comportarsi come una diga in terra. Questa è una simulazione estrema, che non si verificherà mai nella pratica, perché l'argine non sarà mai perennemente sottoposto a questo battente idraulico, ma serve anche per determinare la presenza di eventuali fenomeni di sifonamento sul lato campagna.
- Le reali condizioni di carico a cui sarà sottoposto l'argine però non saranno mai stazionarie all'infinito con un valore di quota idrica elevato, quindi si imposta una condizione di piena transitoria, e si va a determinare il tempo impiegato dall'onda per imbibire completamente l'arginatura, quindi per dare origine ad un fenomeno di sifonamento a lato campagna. A questo punto la struttura non si comporta più come una diga in terra.
- L'arginatura deve resistere anche in condizioni sismiche, quindi si verifica la stabilità dell'opera durante un evento sismico definito, che accade quando essa è sottoposta ad un carico idrico che permetta ancora il funzionamento di diga in

terra; questa combinazione è quella prescritta perché è statisticamente improbabile che due eventi calamitosi, che possono mettere a repentaglio la sicurezza del comprensorio accadano contemporaneamente.

Queste simulazioni sono eseguite attraverso l'utilizzo del codice di calcolo “*Slide 7.0*”, prodotto dalla “*Rocscience*”, ma per poter implementare questi calcoli all'interno del programma è necessario conoscere a priori alcuni dati geotecnici riguardanti lo stesso argine consortile.

Per poter determinare i parametri utili alle simulazioni è stato eseguito un rilievo della struttura, e questa operazione è stata suddivisa in due momenti distinti:

1. Come prima cosa si è dovuto rilevare manualmente l'argine, per arrivare a conoscerne la forma e le dimensioni, e per determinare le sezioni trasversali più critiche; infatti, la struttura non è uniforme a livello costruttivo, presenta punti in cui la quota sommitale è minore, oppure in cui la banca è assente, e questo può causare più facilmente fenomeni di instabilità.
2. Successivamente sono state eseguite diverse prove geognostiche, per stabilire in modo inequivocabile il materiale di cui è costituita la struttura; essendo un'opera non recente, l'argine consortile ha subito nel tempo diverse modifiche, è stato più volte ringrossato attraverso successive pose di nuovo terreno, ma queste operazioni non sono state eseguite lungo tutto lo sviluppo longitudinale, quindi il materiale di cui è costituito non è omogeneo, e non sempre è stata tenuta traccia di ciò che è stato eseguito.

## Il Rilievo dell'Argine

Per poter definire le sezioni trasversali critiche dell'argine consortile, sulle quali eseguire le verifiche di stabilità, come prima cosa si è dovuto realizzare un rilievo manuale dell'arginatura stessa.

Un elemento che può determinare la criticità di una sezione rispetto ad un'altra è la minore quota raggiunta dal coronamento, quindi il primo dato da registrare durante lo studio è il valore della quota di sezioni definite; l'arginatura è lunga circa 4 km, e si è deciso di misurare la quota di sezioni distanti 20 metri l'una dall'altra. Per eseguire queste misurazioni si sono utilizzati un dispositivo laser, prodotto dalla "Spectra", modello "GL720", una stadia metrica, ed una cordella metrica; il dispositivo laser è costituito essenzialmente da due parti distinte: una è lo strumento emettitore del segnale, mentre l'altra è la parte che riceve il segnale, ed è questa che permette la lettura della misura, essendo appoggiata sulla stadia. Il segnale laser è costituito da un fascio di raggi monocromatici, unidirezionali e collimati, cioè in grado di mantenersi paralleli anche su lunghi percorsi, e viene emesso in modo da spazzare a 360° il terreno che circonda lo strumento emettitore. La stadia serve per definire la quota di arrivo del raggio laser nel punto definito, mentre la cordella metrica serve per determinare i punti, circa nella mezzeria del coronamento arginale, di cui si vuole determinare la quota; come controllo delle misure effettuate con la cordella ci si è avvalsi di indicatori fissi in cemento, precedentemente posizionati e validati, posti ogni 100 metri e collocati sulla banca a lato campagna: di questi si conosce la posizione longitudinale lungo lo sviluppo arginale (ad esempio, 2300 m dopo l'innesto a Coenzo), e la quota nel sistema assoluto.



Figura 10: Laser Spectra GL720



Figura 11: Stadia Metrica

Le misure sono state effettuate in 3 giorni distinti, successivi ad un periodo di pioggia particolarmente intenso: durante tutto l'arco della giornata del 5/5/2016 e 6/5/2016, e nel pomeriggio del giorno 8/5/2016.

Il procedimento di misura non si è svolto a partire dalla sezione iniziale dello sviluppo longitudinale, ma da quella posta a 1210 metri dall'innesto dell'argine consortile con quello maestro, nella frazione di Coenzo, per poi spostarsi rispetto ad essa; si è deciso di lavorare in questo modo perché in corrispondenza della sezione 1200 si trova la chiavica detta “*Scutellara*”, e per essa si conosce la quota nel sistema di riferimento assoluto WGS84. Una chiavica è un’opera in muratura che interrompe gli argini di un fiume, creando negli stessi un varco attraverso cui le acque di scolo provenienti dalle campagne si scaricano nel fiume in periodi di magra; nei periodi di piena invece le paratoie della chiavica impediscono l’accesso delle acque fluviali alle campagne contigue poste a quota inferiore rispetto al livello di piena, ed è proprio di questa opera in muratura che si conosce la quota assoluta sul livello del mare, motivo per cui è stata presa come riferimento per stabilire le quote assolute, in primo luogo di tutto il coronamento arginale, ed in un successivo momento di altri punti notevoli appartenenti alle sezioni critiche.



Figura 12: Chiavica “*Scutellara*”, che interrompe l’argine consortile

Per effettuare il rilievo delle quote del coronamento arginale si è, come prima cosa, piazzato lo strumento emettitore del raggio laser in un punto che fosse visibile dalla chiavica, quindi con il ricevitore si è andati a leggere, tramite la stadia, la quota a cui si incontrava il raggio rispetto alla quota “zero” data dal manufatto in cemento; in questo

modo si fissa un punto per il quale si conosce sia la quota assoluta, sia quella relativa alla posizione dello strumento in quel momento, e tramite questo è stato possibile legare al sistema di riferimento assoluto anche tutte le misure successive.

Dopo aver creato questo riferimento relativo, associato a quello assoluto, è stata misurata la quota di tutte le altre sezioni: mantenendo invariata la posizione dello strumento emettitore, partendo dalla sezione 1210 (la sezione 1200 è collocata nel mezzo della chiavica, quindi nel canale, e per questo non rilevabile) ed avvalendosi della cordella, ci si è posizionati in corrispondenza della sezione 1100, quindi si sono misurate le quote dei punti intermedi fra le due, distanziati di 20 metri l'uno dall'altro (ad esempio, 1160); ci si è poi spostati verso la sezione 1000, quindi verso la 900, ed è stata eseguita la stessa procedura. In questo modo è stata registrata la quota di 16 punti, sul coronamento arginale, posti prima del punto avente doppio riferimento, e con la stessa stazione dello strumento emettitore sono stati quotati altri punti, successivi rispetto alla sezione 1200. In totale, con il primo piazzamento dello strumento, sono state prese le quote di 23 punti sul coronamento, fino a quello appartenente alla sezione 1360.

Da questo momento si è smontato e piazzato nuovamente lo strumento su altre 9 stazioni durante tutti e tre i giorni di rilievo, per coprire tutto lo sviluppo arginale; dalla sezione 1360 si è proceduto avanzando verso quella terminale, e si è terminata questa parte del rilievo nelle due giornate di giovedì 5/5/2016 e venerdì 6/5/2016. Nel pomeriggio di domenica 8/5/2016 si è ripartiti dalla chiavica “*Scutellara*”, con un nuovo piazzamento ed una nuova misura differenziale, per avere un nuovo confronto sulle misure mancanti, ed una conferma riguardante quelle già eseguite; da lì sono state prese nuovamente le misure delle quote dei punti corrispondenti alle sezioni 900, 1000 e 1100, sia per quanto riguarda il coronamento, sia per i riferimenti fissi in cemento armato. Si è andati quindi a ritroso verso la sezione dell'innesto iniziale, sempre misurando le quote dei punti distanti 20 metri sul coronamento, e leggendo i risultati anche per i punti centrali dei riferimenti in cemento; questo è stato fatto perché questi punti fissi erano già stati rilevati in precedenza, si conoscono le loro coordinate piano-altimetriche nel sistema di riferimento assoluto WGS84, ed è quindi possibile ricondurre tutte le misure a questo sistema di riferimento attraverso le quote note.

Rielaborando i dati ottenuti durante il rilievo attraverso il programma di calcolo Microsoft Excel si è potuto osservare che le misure registrate differiscono di pochi centimetri

rispetto a quelle riportate nei rilievi precedenti, e queste piccole differenze possono derivare da molti fattori, tra cui errori grossolani nella misura durante uno o l'altro rilievo, ed assestamento dei terreni che costituiscono l'argine.

Tabella 1: Confronto Quote Rilievo-Riferimento Assoluto

Descrizione Punto	Quota WGS84	Quota Rilevata	$\Delta$ Quota
Sella Innesto Coenzo	30.69	30.71	0.02
Consortile Sezione 200	29.70	29.76	0.06
Consortile Sezione 400	29.63	29.70	0.07
Consortile Sezione 600	29.65	29.67	0.03
Consortile Sezione 800	29.82	29.85	0.03
Consortile Sezione 1000	29.51	29.52	0.01
Consortile Sezione 1400	29.43	29.44	0.01
Consortile Sezione 1800	29.69	29.71	0.02
Consortile Sezione 2200	29.82	29.80	0.02
Consortile Sezione 2400	29.67	29.63	0.04
Consortile Sezione 3200	29.55	29.55	0.00
Consortile Sezione 3400	29.44	29.44	0.00
Consortile Sezione 3600	29.47	29.53	0.06
Consortile, 150m Innesto Brescello	29.36	29.34	0.02

Come si può vedere dai dati riportati in Tabella 1, le quote assolute del coronamento arginale si attestano intorno ai 29.6 metri sul livello del mare.

Durante il rilievo sono stati poi misurati anche punti considerati "notevoli", cioè di particolare interesse geometrico, perché appartenenti a selle o depressioni del coronamento stesso. In questo modo si è trovato un valore di quota massimo dell'argine

pari a 29.86 metri s.l.m., appartenente alla sezione 3040, ed un valore minimo di 28.96 metri s.l.m., corrispondente al colmo della sezione 3775. Sono stati inoltre rilevati altri elementi caratteristici:

- Una corda molle, cioè un tratto costituito da punti a quota minore di quella media arginale, localizzata dalla sezione 1120 alla sezione 1300, avente una quota media pari a 29.4 metri s.l.m., ed il minimo di 29.29 metri s.l.m., punto di colmo della sezione 1160;
- Un piccolo avvallamento alla sezione 2300, avente quota 29.47 metri s.l.m.;
- Una seconda corda molle dalla sezione 3360 alla sezione 3540, con una quota media di 29.35 metri s.l.m., avente un minimo di 29.33 metri s.l.m. per la sezione 3440;
- Un'ultima corda molle dalla sezione 3740 alla sezione 3900, con una quota media di 29 metri s.l.m. ed il minimo assoluto di tutta l'arginatura, appartenente alla sezione 3775.

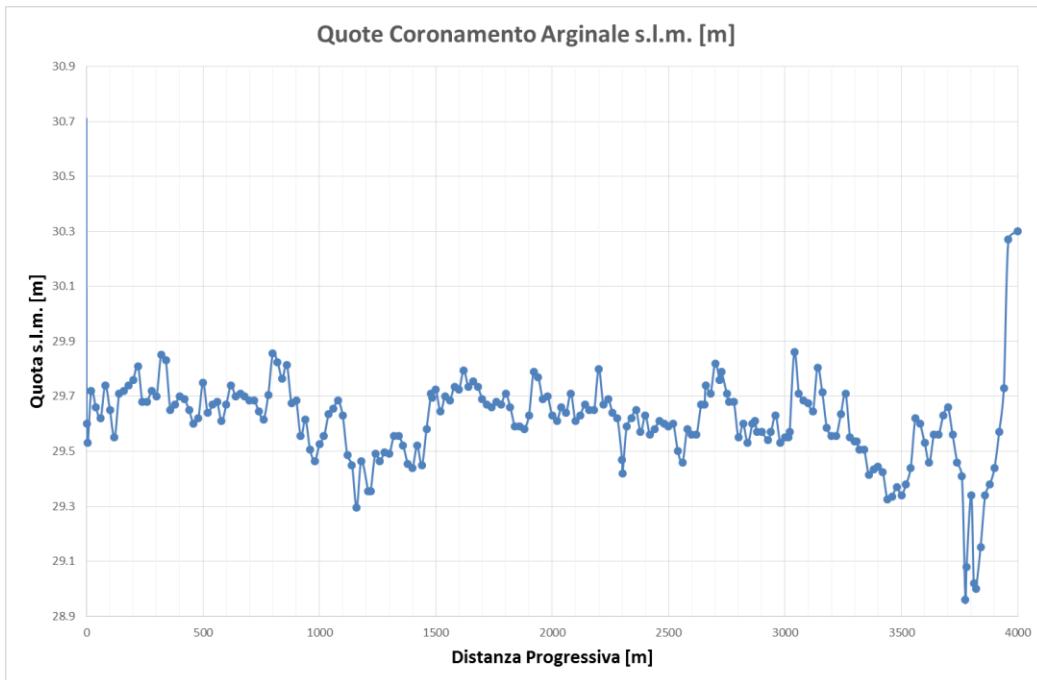


Grafico 1: Andamento Quote Coronamento Arginale

Durante la misura delle quote del coronamento arginale sono state rilevate anche alcune sezioni trasversali, lungo tutto lo sviluppo della struttura, ed anche in punti non corrispondenti a quelli distanti 20 metri fra loro, ma intermedi rispetto a questi; quali

fossero le sezioni per le quali si sarebbero dovute acquisire le informazioni geometriche è stato determinato da osservazioni di carattere pratico: si è deciso infatti di rilevare sezioni che potessero essere potenzialmente problematiche nei confronti delle verifiche da eseguire, e questo significa sezioni senza banca intermedia fra il coronamento ed il piano campagna, oppure sezioni vicine alle case costruite in prossimità dell'arginatura, oppure ancora sezioni il cui colmo è riconducibile a selle o corde molli.

Le misure sono state eseguite in due momenti consecutivi, con l'ausilio del dispositivo laser e della cordella metrica:

- 1) Dopo aver misurato la quota nel centro del coronamento arginale, ci si è spostati con la stadia ed il rilevatore del raggio laser per misurare la quota dei punti caratterizzanti la sezione, cioè i punti iniziali e terminali di pendii e banche, sia a lato fiume, sia a lato campagna; non è stato possibile misurare il punto terminale del pendio inferiore a lato fiume, poiché si tratta di un punto in frodo, quindi costantemente a contatto con l'acqua del torrente Enza.

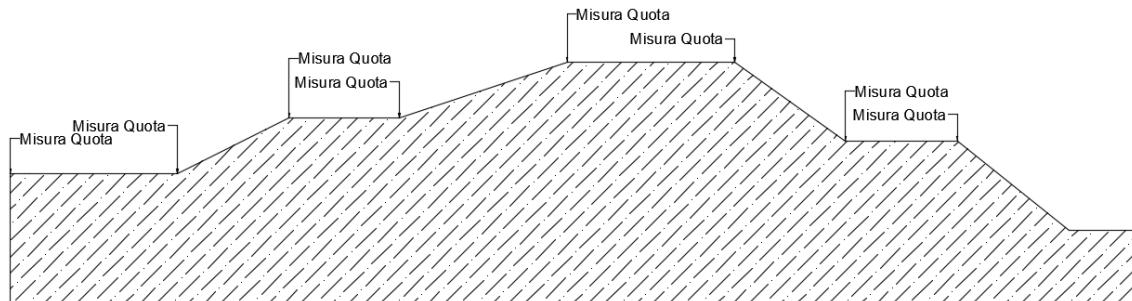


Figura 13: Indicazione Punti Quotati

- 2) Successivamente, utilizzando la cordella metrica, sono state misurate le lunghezze dei tratti sub-orizzontali, cioè del coronamento arginale e delle banche intermedie, di tutti i pendii interposti fra i tratti più pianeggianti, e di un tratto di piano campagna; questo è stato considerato rappresentativo dell'andamento del terreno all'interno della golena, come se esso si estendesse nello stesso modo per una distanza molto maggiore rispetto a quella effettivamente misurata (solitamente intorno ai 10 metri).

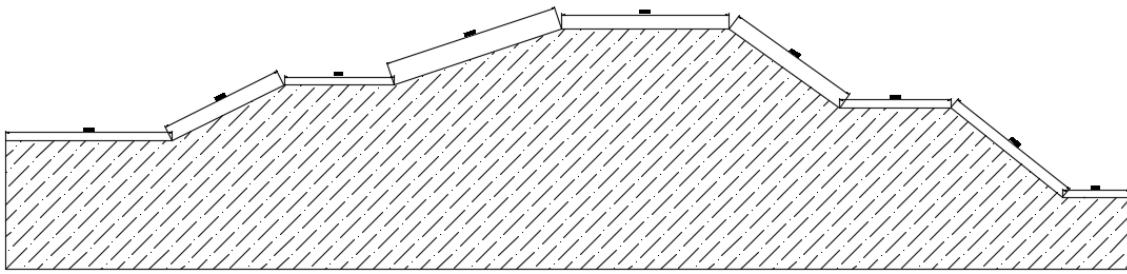


Figura 14: Indicazione Lunghezze Misurate

Sono state rilevate in questo modo 18 sezioni, disposte lungo tutto lo sviluppo dell'argine consortile.

Di tutte le 18 sezioni trasversali rilevate, le verifiche di stabilità attraverso il codice di calcolo "Slide" sono state implementate solamente su 12 di esse, e per la maggior parte di queste la motivazione deriva dalla normativa italiana in materia di argini: infatti, secondo queste disposizioni, ponendo un livello di piena al colmo del lato fiume, e tracciando la linea di imbibizione ideale del corpo arginale con una pendenza di 1:6 (più cautelativa rispetto all'altra proposta, di 1:5), essa deve rimanere tutta all'interno dell'argine, non si deve creare nessuna sorgente sospesa nel contorno arginale a lato campagna.

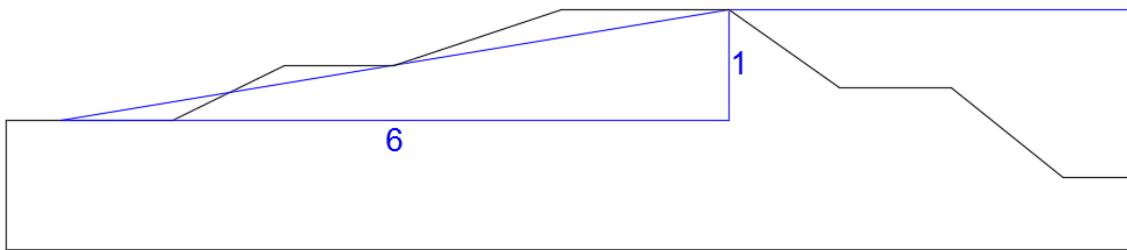


Figura 15: Tracciamento Linea Imbibizione

In Figura 15 è riportato un esempio di tracciamento di una linea di imbibizione: si determina la distanza tra il punto di colmo della piena a lato fiume ed il punto in cui l'argine interseca il lato campagna, detto "unghia arginale", e si è così definito un cateto del triangolo rettangolo che ha per ipotenusa la linea di imbibizione stessa; per determinare il secondo cateto si moltiplica il primo per 6, e lo si traccia verso il lato campagna della struttura arginale. Chiudendo il triangolo si ricava l'ipotenusa, che è rappresentativa della linea di imbibizione nel corpo arginale, e si va a vedere se essa interseca il contorno dell'argine prima dell'unghia dell'arginatura; se questo succede si ha la formazione di una sorgente sospesa.

In tutte le sezioni rilevate si ha questa particolare formazione, e per decidere su quali andare ad eseguire le verifiche si è applicata una selezione data ancora da considerazioni geometriche: dopo aver ricavato la linea di imbibizione 1:6, ed aver visto che essa interseca il contorno dell'argine a lato campagna, il punto terminale di questa linea ideale è stato traslato fino a portarlo in corrispondenza dell'unghia arginale, sempre a lato campagna; questa nuova linea traslata interseca ora il contorno arginale a lato fiume, in un punto a quota sicuramente inferiore rispetto a quella del colmo utilizzato per tracciare la linea di imbibizione ideale.

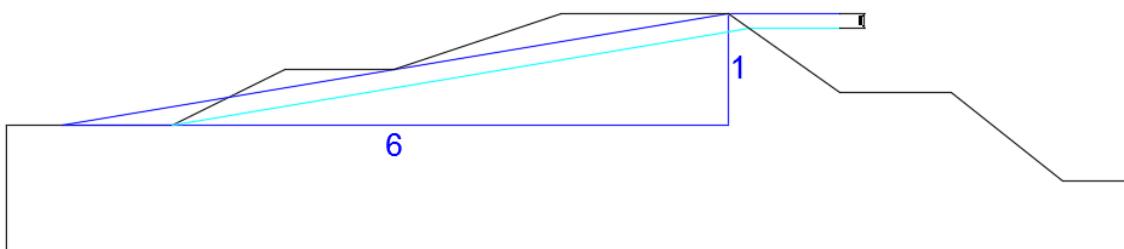


Figura 16: Scostamento Linea Imbibizione

Si arriva quindi ad avere un abbassamento del punto di intersezione, e questa distanza può essere più o meno elevata; si è scelto di analizzare attraverso le simulazioni quelle sezioni per cui questa distanza risulta maggiore di 50 cm, perché la differenza nelle due configurazioni è troppo elevata, e si è visto che in tutti questi casi, tranne due, le sezioni che presentano questa distanza maggiore di 0.5 metri sono le stesse che non presentano banca intermedia, oppure per le quali la formazione della sorgente sospesa si verifica al di sopra della banca intermedia stessa.

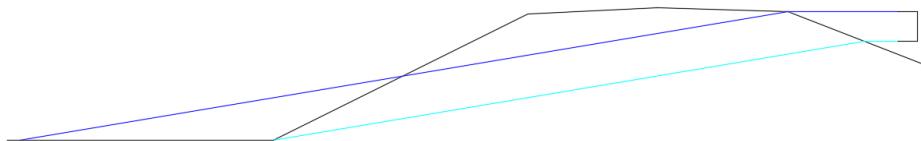


Figura 17: Dettaglio di Sezione Senza Banca Intermedia, con Sorgente Sospesa

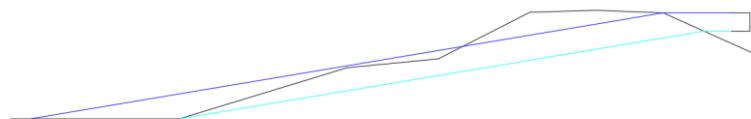


Figura 18: Dettaglio di Sezione con Sorgente Sospesa Sopra la Banca Intermedia

Tabella 2: Sezioni con Problemi nella Linea di Imbibizione

Sezione	Problematica Evidenziata	$\Delta$ Linea d'Imbibizione [cm]	Sezione	Problematica Evidenziata	$\Delta$ Linea d'Imbibizione [cm]
1680	Sorgente sopra la banca intermedia	65.3	2980	NO banca intermedia	62.4
1855	NO banca intermedia	89.2	3308	$\Delta > 50$ cm	87.3
2100	Sorgente sopra la banca intermedia	81.8	3380	$\Delta > 50$ cm	75.8
2400	Sorgente sopra la banca intermedia	127.8	3600	Sorgente sopra la banca intermedia	124.6
2700	Sorgente sopra la banca intermedia	57	3900	NO banca intermedia	88.6

Le verifiche sono quindi state eseguite su queste sezioni, che presentano particolari condizioni, e a quelle già elencate sono state aggiunte due ulteriori sezioni trasversali, per motivazioni diverse:

- 1) La sezione 43, analizzata perché rappresentativa della parte iniziale dell'argine consortile, poco dopo l'innesto sul maestro nella frazione di Coenzo;
- 2) La sezione 1250, perché si pensava potesse presentare problemi dal punto di vista geologico, per i terreni di costruzione dell'arginatura stessa.

## Le Prove Geognostiche

Una prima campagna di indagini in situ e di laboratorio riguardante l'argine consortile di Ghiarole è stata realizzata nel 1996, e questa è stata successivamente integrata da una serie di prove in situ, eseguite a gennaio 2006; entrambe queste campagne hanno permesso di valutare le caratteristiche dei terreni costituenti le fondazioni delle opere arginali e le arginature stesse, ed a completamento del lavoro eseguito è stata redatta, nel 2006, una relazione geologica.

### Indagini Geognostiche Precedenti

L'analisi geologica e geomorfologica eseguita attraverso diverse prove geognostiche, nel 1995 e nel 2006, ha evidenziato la presenza di alcune forme fluviali relitte all'interno dell'area goleale, costituite in particolare dalle tracce dei 2 paleovallei del torrente Enza, e questo particolare ambiente sedimentario caratterizza la stratigrafia superficiale dei depositi della zona; le caratteristiche idrogeologiche dell'area sono quindi simili a quelle di tutta la fascia di territorio comprendente le aree goleali ed i paleovallei del fiume Po, definita per questo motivo “Unità Idrogeologica del Fiume Po”.

Gli argini poggiano infatti su uno strato superficiale di sedimenti fluviali più recenti, a grana fine, ed avente uno spessore variabile tra 1 metro e 4 metri; più in profondità si trova invece uno strato di sedimenti a grana più grossa. I depositi più superficiali sono quindi costituiti da terre sottili (limi-sabbiosi e limi-argillosi, con rare lenti di materiali sabbiosi più grossolani), e per questo sono strati sostanzialmente impermeabili, mentre quelli più profondi sono di sabbia medio-grossa, di conseguenza più permeabili; questi depositi sabbiosi profondi si estendono fino al di sotto del limite dei sondaggi eseguiti, posto a 10 m, ed in essi si colloca la superficie libera della falda freatica. Il limite superiore di questa falda è rappresentato dai materiali fini superficiali, mentre quello inferiore è circa alla profondità di 50 m sotto il piano campagna, ed essa è in contatto con il fiume Po, quindi il suo livello risulta notevolmente influenzato dalle altezze idrometriche del fiume stesso.

I corpi arginali, invece, sono costituiti quasi interamente da terre di tipo sottile, appartenenti alle classi A4 e A6 secondo la classificazione CNR-UNI 10006.

Tabella 3: Classificazione Generale delle Terre CNR-UNI 10006

Classificazione generale	Terre ghiaccia - sabbiosa						Terre limo - argillose				Torbe e terre organiche palustri	
	Frazione passante al setaccio 0,075 UNI 2332 ≤ 35%						Frazione passante al setaccio 0,075 UNI 2332 >35%					
	A1	A1 b	A3	A2-4	A2-5	A2-6	A2-7	A4	A5	A6	A7	
Gruppo												
Sottogruppo	A1 a	A1 b										
Analisi granulometrica - Frazione passante al setaccio												
2 UNI 2332 %	≤ 80											
0,4 UNI 2332 %	≤ 30	≤ 80	≥ 80									
0,075 UNI 2332 %	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	
Caratteristiche della frazione passante al setaccio 0,4 UNI 2332												
Limite liquido	0			≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	≤ 40	≤ 40	
Indice di plasticità	≤ 6		N.P.	≤ 10	≤ 10max	> 10	> 10	≤ 10	≤ 10	> 10	> 10 (IP>LL30)	> 10 (IP>LL30)
Indice di gruppo	0		0	0		≤ 4		≤ 8	≤ 12	≤ 18	≤ 20	
Tipi usuali dei materiali caratteristici costituenti il gruppo	ghiaccia e breccia, sabbione, sabbia grossa, pomicie, scorie vulcaniche, pozzolane	Sabbia fine	ghiaccia e sabbia limosa e argillosa				Lim. poco compressibili	Lim. fort. compressibili	Argille poco compressibili	Argille fort. compressibili med. plastiche	Argille fort. plastiche	Torbe di recente o remota formazione e, detriti organici di origine palustre
Qualità portanti quale terreno di sottofondo in assenza di gelo	da eccellenti a buone						Da mediocre a scadente					Da scartare come sottofondo
Azione del gelo sulla qualità portanti del terreno di sottofondo	Nessuna o lieve			Media			media	elevata	Media	elevata	Media	
Ritiro o rigonfiamento	Nullo			Nullo o lieve			Lieve o media	elevato	elevato	elevato	molti elevati	
Permeabilità	Elevata			Media o scarsa					Scarsa o nulla			
Identificazione dei territori in situ	Facilmente individuabili a vista	Aspri al tatto incoerenzi allo stato asciutto	La maggior parte dei granuli sono individuabili ad occhio nudo - Aspri al tatto - Una tenacità media e elevata allo stato asciutto indica la presenza di argilla				Reagiscono alla prova di scuotimento - Poveri enti o poco tenaci allo stato asciutto - Non facilmente modellabili allo stato umido	Non reagiscono alla prova di scuotimento - Tenaci allo stato asciutto - Facilmente modellabili in bastoncini sottili allo stato umido			Fibrosi di colore bruno a nero - facilmente individuabili a vista	

Attraverso le indagini sono stati ricavati anche i seguenti valori del parametro di permeabilità, per tutti i terreni costituenti il sistema arginale:

Tabella 4: Permeabilità Terreni Ottenuta dalle Indagini del 1996

TERRENO	PERMEABILITÀ k [cm/s]
Argine (argille e limi)	$10^{-5}/10^{-6}$
Fondazione (primo strato, limi sabbiosi e argilosoi)	$10^{-6}/10^{-7}$
Fondazione (secondo strato, sabbia medio-grossa)	$10^{-3}/10^{-4}$

La permeabilità dei materiali costituenti le arginature ed i primi strati delle fondazioni di queste strutture riduce la possibilità di una filtrazione rilevante all'interno del corpo arginale stesso, e questa è ridotta ulteriormente dal fatto che i carichi idraulici su esso non sono fissi, ma molto variabili nel tempo: il carico idraulico fuori dall'ordinario dato da

una piena, infatti, ha una durata limitata, e per la maggior parte del tempo il sistema arginale non è sottoposto ad esso.

Dopo aver riesaminato questa relazione geologica si è deciso di integrarla, attraverso nuove prove geognostiche, al fine di avere delle conferme riguardo i risultati precedenti, e per cercare di ottenere una migliore definizione degli strati di terreno costituenti il corpo arginale e le fondazioni dello stesso.

## Campagna di Indagini in situ 2016

La nuova campagna di indagini geognostiche sull'argine consortile di Ghiarole è stata eseguita su commissione del "Consorzio Unico di Difesa Terre Golenali del Comune di Brescello", e l'impresa esecutrice delle prove richieste è stata la ditta "Subsoil srl".

Le indagini sono state eseguite nei mesi di giugno e luglio 2016, e nell'ambito di questa campagna sono state eseguite diverse tipologie di prove geognostiche, in numero diverso in base alla tipologia di prova:

- 6 prove penetrometriche statiche elettriche con piezoccono, anche dette CPTU;
- 1 prova di dissipazione eseguita durante una prova CPTU;
- 5 prove geoelettriche con stendimento;
- 2 sondaggi a carotaggio corti;
- 2 prove di permeabilità in foro di tipo Lefranc.

## Prova Penetrometrica Statica Elettrica con Piezocono (CPTU)

Questa prova consiste nella misura della resistenza a penetrazione dei terreni, e questa misura viene eseguita mediante l'utilizzo di una punta conica, di dimensioni e caratteristiche standard, che viene infissa nel terreno ad una velocità costante, per mezzo di un dispositivo di spinta agente su una batteria di aste.

La punta conica permette la misura continua, durante l'esecuzione della prova, della resistenza alla punta imposta dal terreno ( $q_c$ ) e dell'attrito laterale locale generato nel terreno dall'avanzamento della batteria di aste ( $f_s$ ); nel caso specifico delle indagini sull'arginatura di Ghiarole è stata utilizzata una particolare punta, detta piezoconica: questa è una punta elettrica dotata di un filtro poroso il quale, situato subito dietro la base del cono e collegato ad un trasduttore di pressione, consente anche la misura continua della pressione interstiziale dell'acqua all'interno dei pori del terreno indagato ( $U$ ).

Le prove penetrometriche sono state eseguite basandosi sulle prescrizioni riportate nelle normative di riferimento (ASTM D3441-86, "Deep, quasi static, cone and friction cone penetration tests of soil"; ISSMFE, "Technical Committee on Penetration Testing. Cone Penetration Testing (CPT): International Reference Test Procedure"), e per questo motivo la procedura di esecuzione è stata quella standard: l'infissione della punta elettrica è avvenuta alla velocità costante di 2 cm/s, e la registrazione dei valori di resistenza alla punta ( $q_c$ ) e dell'attrito laterale locale ( $f_s$ ) è stata eseguita in modo puntuale ogni 2 cm di profondità; tramite il piezocono utilizzato in questa prova, opportunamente saturato a grasso di litio prima dello svolgimento della prova, è stato possibile acquisire un terzo parametro, cioè la pressione neutra dell'acqua all'interno dei pori del terreno, e contemporaneamente è stata misurata l'inclinazione dello strumento per mezzo di inclinometri

L'attrezzatura utilizzata è composta da diverse parti:

- Il dispositivo di spinta è un penetrometro statico tipo "TECNOTEST", zavorrato e montato su un camion "FIAT PC90 4x4"; esso è caratterizzato da una spinta nominale di 20 tonnellate, da una corsa di 1.2 metri, per permettere l'inserimento delle aste una ad una durante l'esecuzione della prova, e da una velocità di infissione della batteria di aste nel terreno pari a  $2\pm0.5$  cm/s.

- Il piezocono è prodotto dalla ditta “*Tecnopenta Sas*” ed è il modello “*TP-CPL2IN*”, avente le seguenti caratteristiche:

Tabella 5: Caratteristiche Punta Elettrica-Piezocono

<b>Punta Conica</b>		
Diametro	35.7	mm
Altezza Nominale	30.9	mm
Angolo di Apertura	60	°
Area Nominale	10	cm <sup>2</sup>
<b>Piezocono</b>		
Area Punta	10	cm <sup>2</sup>
Diametro	35.7	mm
Area Netta	6.6	cm <sup>2</sup>
Superficie Manicotto	150	cm <sup>2</sup>
Lunghezza Manicotto	133.7	mm
Area Superiore Manicotto	2.22	cm <sup>2</sup>
Area Inferiore Manicotto	3.31	cm <sup>2</sup>
Lunghezza Totale Punta	600	mm
Peso Complessivo	3	kg
Lunghezza Raccordo Punta-Aste	250	mm

- Il sistema per l’acquisizione e restituzione dei dati è di tipo analogico digitale, ed è composto da diversi dispositivi: è munito di “encoder”, per sincronizzare l’avanzamento delle aste nel terreno con l’acquisizione dei dati, di un registratore grafico, per visualizzare la resistenza alla punta, la resistenza laterale, la pressione interstiziale e l’inclinazione delle aste, e di un registratore grafico della variazione nel tempo della pressione interstiziale, per le prove di dissipazione; questo sistema è costituito dalla centralina di interfaccia (un PC), da un cavo di collegamento tra la punta e la centralina, interno alle aste di penetrazione, da un interruttore di comando, e da un software di gestione del sistema.

Questa tipologia di prova ha fornito il maggior numero di dati utili in previsione delle verifiche da eseguire; essa infatti produce come output grafici facilmente interpretabili che rappresentano le tre grandezze rilevate direttamente dalla punta conica: resistenza alla punta, attrito laterale e pressione neutra, incontrati nel terreno durante l’esecuzione della prova; è inoltre indicata l’inclinazione dello strumento misurata dal sistema.

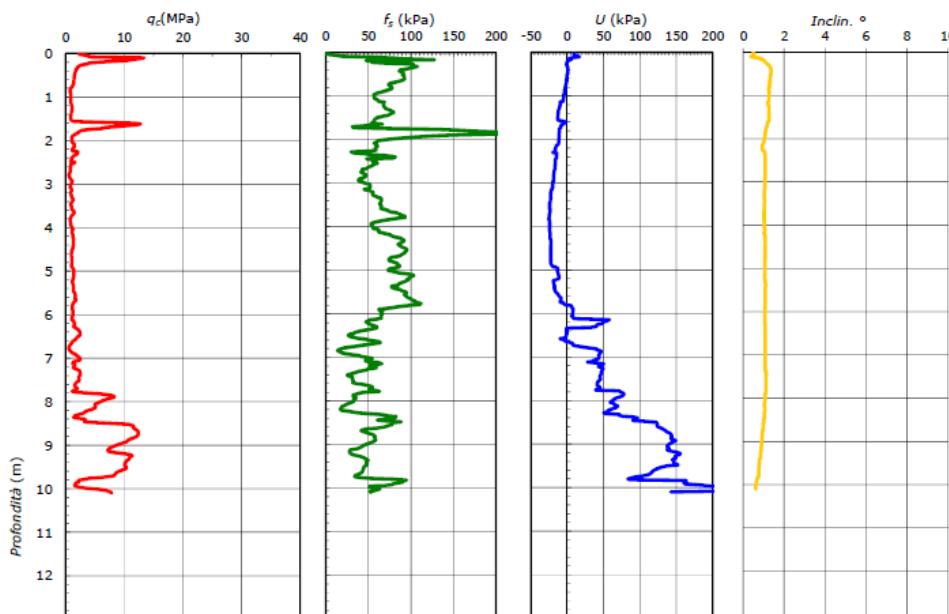


Grafico 2: Esempio Grafici di Output di una Prova CPTU

Dal primo di questi elementi, che ha in ascissa la profondità di indagine ed in ordinata la resistenza alla punta, si può avere una prima opinione riguardo il terreno costituente gli strati indagati: se la resistenza è superiore a  $2/3$  MPa, il terreno oppone una maggiore resistenza alla penetrazione, quindi è un terreno a grana più grossa, e si può ipotizzare che si tratti di sabbie, o limi con una forte componente sabbiosa; se il valore di resistenza alla punta è minore, invece, il terreno attraversato è un terreno a grana più fine, e per questo si parla di argilla, o di limi con una forte componente argillosa. Il grafico dei valori di resistenza alla punta è un grafico continuo, anche se i valori sono registrati per punti, e per questo motivo è possibile identificare degli strati all'interno del terreno indagato. I dati registrati durante le prove vengono poi implementati su appositi software di calcolo poiché questi, attraverso formule empiriche di letteratura, ricavano ulteriori elementi caratteristici dei terreni indagati, e questi sono utili ai fini delle verifiche che devono essere eseguite; i parametri ricavati in modo empirico da questa tipologia di prova sono 3: permeabilità, angolo d'attrito e coesione non drenata.

La PERMEABILITA' K (Conductivity, in inglese) rappresenta la capacità di un terreno di essere attraversato dai fluidi, in particolare da acqua. Questa grandezza ha le dimensioni di una velocità, ed il suo valore è strettamente correlato al tipo di terreno analizzato, poiché dipende fortemente dal grado di coesione dello stesso: un terreno fortemente coesivo, come l'argilla, mostra più reticenza a farsi attraversare dall'acqua, quindi esso impiega molto tempo per assorbirla, ma anche molto tempo per rilasciarla dopo

l'assorbimento, e per questo la sua permeabilità è bassa; un terreno poco coesivo, invece, come la sabbia, si lascia attraversare facilmente dai fluidi, quindi ha un valore di permeabilità più elevato.

Tabella 6: Valori Tipici di Permeabilità all'Acqua

Nomenclatura Terreno	Tipologia Terreno	Permeabilità K [m/s]
GHIAIA GROSSOLANA	Terreno NON coesivo	$10^{-1}/10^{-2}$
SABBIE E GHIAIE	Terreno POCO coesivo	$10^{-2}/10^{-5}$
SABBIE FINI E LIMI	Terreno MEDIAMENTE coesivo	$10^{-5}/10^{-9}$
ARGILLE E LIMI GLACIALI	Terreno COESIVO	$10^{-9}/10^{-13}$

La formula empirica utilizzata per ottenere questo parametro è inclusa nel manuale del codice di calcolo che ha prodotto i risultati delle prove:

$$I_c < 3.27 \text{ and } I_c > 1.00 \text{ then } k = 10^{0.952-3.04 \cdot I_c}$$

$$I_c \leq 4.00 \text{ and } I_c > 3.27 \text{ then } k = 10^{-4.52-1.37 \cdot I_c}$$

Queste due formule, da utilizzare ad esclusione, dipendono dal valore di  $I_c$ , il quale è il parametro detto “Indice del SBT”, cioè indice del tipo di terreno (Soil Behavior Type); questo parametro è riconoscibile dai valori di prova (rapporto fra attrito laterale e resistenza alla punta  $R_f$ , resistenza alla punta  $q_c$ , e pressione di riferimento  $P_a$ , non nota a priori), i quali vengono messi in relazione con grafici che ne individuano i diversi ambiti di appartenenza, quindi che definiscono il comportamento dei terreni indagati. In particolare, l'indice  $I_c$  rappresenta il raggio dei cerchi, essenzialmente concentrici, che indicano i limiti delle zone omogenee, quindi delle diverse tipologie di terreno, su un grafico empirico.

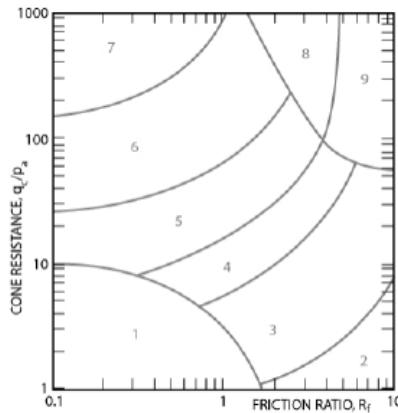


Grafico 3: Grafico dei Diversi Tipi di Terreno

A questo grafico è associata una tabella, che lega ad ogni diversa zona individuata un tipo di terreno, avente un diverso comportamento meccanico e geotecnico, ed un valore di  $I_c$ :

Tabella 7: Valori dell'Indice SBT

N° Zona	Tipo di Suolo e Comportamento	Indice $I_c$
1	A Grana Fine, Sensibile all'Acqua	-
2	Suolo Organico-Argilla	>3.6
3	Argilla-Argilla Limosa	2.95-3.6
4	Argilla Limosa-Limo Argilloso	2.6-2.95
5	Limo Sabbioso-Sabbia Limosa	2.05-2.6
6	Sabbia Limosa-Sabbia	1.31-2.05
7	Sabbia Densa-Sabbia Grossolana	<1.31
8	Sabbia Compatta-Argillosa	-
9	A Grana Fine, Molto Compatto	-

Dalla conoscenza dell'indice  $I_c$  si arriva quindi a determinare, in modo empirico, il valore di permeabilità  $K$  dei terreni studiati.

L'ANGOLO D'ATTRITO  $\varphi$  è il parametro meccanico che rappresenta la resistenza al taglio dei terreni sabbiosi, i quali manifestano un comportamento a rottura di tipo attritivo; questo parametro è intrinseco per questi tipi di terreni, ed assume valori variabili intorno a 40°. Questo valore si ricava da una seconda formulazione empirica, la quale lo pone in relazione con la resistenza alla punta  $q_c$  ed il valore SBT normalizzato attraverso il parametro  $Q_{tn}$ , che indica la resistenza penetrometrica normalizzata:

$$\varphi = 17.6 + 11 \cdot \log(Q_{tn})$$

La COESIONE NON DRENATA  $C_u$ , invece, non è un parametro meccanico intrinseco del terreno, ma è un parametro di resistenza al taglio “fittizio”, che rappresenta la condizione di rottura delle argille a breve termine; infatti, nei terreni a grana fine, dopo l’applicazione di un carico, l’acqua non ha modo di filtrare velocemente, entra in pressione, e realizza la “condizione di breve termine non drenata”. In questo caso la pressione neutra è diversa da zero, e questo è visibile anche dai grafici restituiti dalla prova CPTU.

Il programma sul quale sono stati implementati i risultati delle prove CPTU ricava la coesione non drenata da una formula ampiamente accettata in letteratura:

$$C_u = \frac{q_t - \sigma_v}{N_{kt}}$$

In questa formula compaiono la resistenza alla punta corretta in base alle specifiche caratteristiche della stessa ( $q_t$ ), lo sforzo verticale  $\sigma_v$ , ed il nuovo parametro  $N_{kt}$ , a sua volta espresso da una formula:

$$N_{kt} = 10.5 + 7 \cdot \log(F_r)$$

Questo nuovo parametro dipende quindi dal rapporto di frizione normalizzato  $F_r$ , dato dal rapporto tra attrito laterale e resistenza alla punta.

Tutti questi parametri sono fondamentali per l’esecuzione delle verifiche di stabilità, perché sono utili ad una completa descrizione della meccanica delle terre indagate, la quale influisce in modo preponderante alla stabilità delle stesse.

In questa campagna di indagini la prova penetrometrica è stata eseguita su 6 sezioni:

Tabella 8: Riassunto Prove CPTU

<b>Sezione</b>	<b>Profondità finale [m da P.C.]</b>	<b>Profondità falda [m da P.C.]</b>	<b>Data Esecuzione Prova</b>
43	10.18	assente	4/7/2016
1250	10.18	9.38	23/6/2016
1855	10.02	9.40	23/6/2016
2980	20.12	9.42	23/6/2016
3380	15.04	9.40	23/6/2016
3900	10.10	foro chiuso	4/7/2016

## Prova di Dissipazione

La prova di dissipazione si realizza arrestando la discesa del piezocono durante la prova penetrometrica, e graficando l'andamento della sovrappressione idrica in funzione del tempo; in questo modo si ottiene la “curva di dissipazione” della pressione neutra, poiché, con il trascorrere del tempo, la sovrappressione dovuta alla penetrazione della punta conica inizia a dissiparsi, fino a raggiungere gradualmente la pressione idrostatica. La velocità di dissipazione della pressione neutra dipende dal coefficiente di consolidazione del terreno, quindi dalla sua compressibilità e dalla sua permeabilità, e se si volesse raggiungere la pressione interstiziale di equilibrio presente in situ, questa prova dovrebbe continuare fino a quando non si arriva ad avere nessuna ulteriore diminuzione della pressione interstiziale; essendo questa velocità dipendente dalla permeabilità del terreno, la prova ha durata molto breve nelle sabbie, che essendo non coesive non creano sovrappressioni, mentre ha durata molto lunga nelle argille, che trattengono acqua al loro interno e la rilasciano molto gradualmente.

L'attrezzatura per eseguire questa prova è la medesima di quella utilizzata per la prova penetrometrica, ed il risultato che si ottiene è il grafico della curva di dissipazione; questo grafico può essere ottenuto con due diversi tipi assi coordinati, sempre in scala semilogaritmica:

- La variazione della pressione neutra viene espressa in funzione del tempo, il quale è in scala logaritmica;

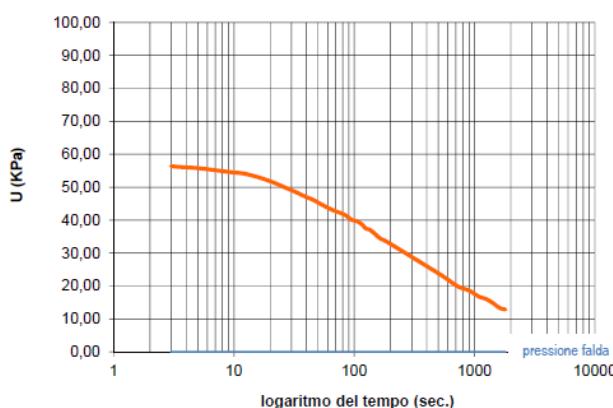


Grafico 4: Curva di Dissipazione su Grafico (Tempo-Pressione Neutra)

- In funzione del tempo, sempre in scala logaritmica, viene espressa la variazione della pressione neutra, normalizzata però secondo la formula:

$$\frac{U_t - U_0}{U_i - U_0}$$

nella quale  $U_t$  è la pressione interstiziale misurata ad un dato istante di tempo,  $U_i$  è il valore iniziale della sovrappressione, mentre  $U_0$  è la pressione idrostatica.

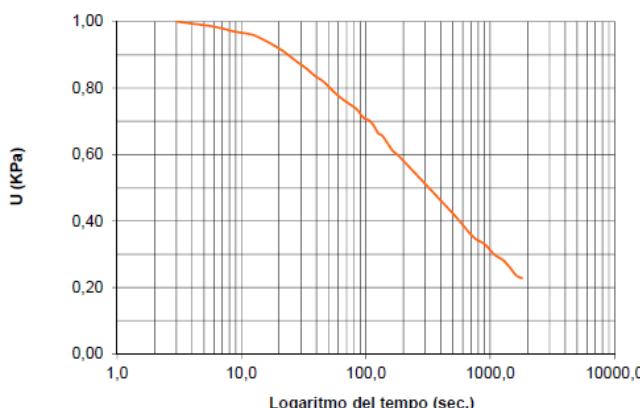


Grafico 5: Curva di Dissipazione su Grafico (Tempo-Pressione Neutra Normalizzata)

Anche da questa prova si ottiene un'indicazione riguardo la permeabilità dei terreni, ed anche in questo caso per esprimere questo parametro caratteristico si utilizza una relazione empirica, che contiene il tempo (espresso in secondi) corrispondente al momento in cui si arriva al 50% della dissipazione totale:

$$K = \frac{1}{251 \cdot T_{50}} \cdot 1.25$$

Le due permeabilità ricavate con le diverse tipologie di prove non avranno sicuramente lo stesso valore, ma dovrebbero avere ordini di grandezza simili, attribuibili allo stesso terreno secondo la Tabella 6.

Da questa prova si possono ottenere risultati anche riguardo il coefficiente di consolidazione radiale  $c_h$ , ma esso non è utile ai fini delle verifiche da eseguire.

Durante l'esecuzione delle prove geognostiche sull'arginatura di Ghiarole, la prova di dissipazione è stata realizzata solamente in corrispondenza della sezione trasversale 2980, nella perforazione della prova CPTU, ad una profondità di 7,36 metri dal piano campagna.

## Prove Geoelettriche con Stendimento

Le prove chiamate “geoelettriche” rappresentano uno dei metodi geofisici più utilizzati per la caratterizzazione dei materiali del sottosuolo: esse infatti, studiando le deformazioni del flusso di corrente elettrica, causate dai diversi terreni che lo costituiscono, permettono di caratterizzare queste terre, e di ricostruire la loro distribuzione spaziale; questo è possibile grazie all’analisi del parametro fondamentale per queste prove, cioè la RESISTIVITÀ ELETTRICA, proprietà fisica che esprime la “resistenza” dei materiali al passaggio della corrente elettrica. Questa proprietà è determinata, all’interno di un terreno, da diverse caratteristiche dello stesso:

- Porosità, intesa come dimensione, forma e continuità dei pori all’interno del materiale;
- Contenuto d’acqua nei pori;
- Salinità dell’acqua contenuta nei pori;
- Presenza di terreni a granulometria fine;
- Conducibilità intrinseca delle terre costituenti il sottosuolo.

Per questo motivo, i materiali grossolani, come sabbie e ghiaie, che hanno una permeabilità elevata, presentano un’alta resistività, poiché non trattengono acqua al loro interno ed ostacolano il passaggio della corrente, mentre i materiali fini, associati alla presenza di acqua, hanno una resistività inferiore, perché in essi la corrente elettrica si propaga più facilmente.

La misura di questo valore di resistività si realizza creando un campo elettrico artificiale nel mezzo da indagare, e studiando quindi la sua distribuzione nel sottosuolo attraverso dei sondaggi elettrici verticali SEV ed orizzontali SEO; questo campo elettrico è generato da un dispositivo quadripolare, generalmente simmetrico rispetto ad un punto centrale O, costituito da due coppie di elettrodi, collegate al terreno per mezzo di picchetti di metallo infissi in esso: una coppia, denominata C1-C2 o A-B, è quella che immette corrente nel terreno, mentre l’altra, denominata P1-P2 o M-N, misura la differenza di potenziale generata nel terreno dal passaggio della corrente. In questo modo è possibile conoscere le variazioni del campo elettrico, dalle quali si deducono le diverse realtà litologiche presenti nel sottosuolo, e le variazioni di campo possono essere più o meno

marcate, in funzione del contrasto di resistività elettrica esistente tra i terreni presenti. Le variazioni di resistività con la profondità vengono rilevate eseguendo diverse misure, per diverse distanze degli elettrodi di corrente, espandendo lateralmente gli stendimenti, ma mantenendoli simmetrici rispetto al punto O, al quale si riferisce la resistività apparente misurata; allargando progressivamente il quadripolo, aumenta il volume di terreno interessato dal passaggio della corrente, quindi anche la profondità massima di indagine con quella configurazione. Oltre che dalla distanza fra i due elettrodi che immettono corrente nel sottosuolo, quindi, la profondità massima indagabile attraverso questa tipologia di prove dipende anche dalle caratteristiche intrinseche del mezzo stesso che lo costituisce; dalla misura dell'intensità di corrente che fluisce fra gli elettrodi "emettitori" C1-C2, e dalla differenza di potenziale che si genera fra gli elettrodi "misuratori" P1-P2, è quindi possibile calcolare la resistività apparente del sottosuolo. L'acquisizione tomografica dei valori consiste nella misura degli stessi in corrispondenza di un elevato numero di punti lungo la sezione rilevata, e la densità di questi punti consente di ricostruire la sezione in modo dettagliato, anche grazie all'applicazione di algoritmi di calcolo bidimensionali.

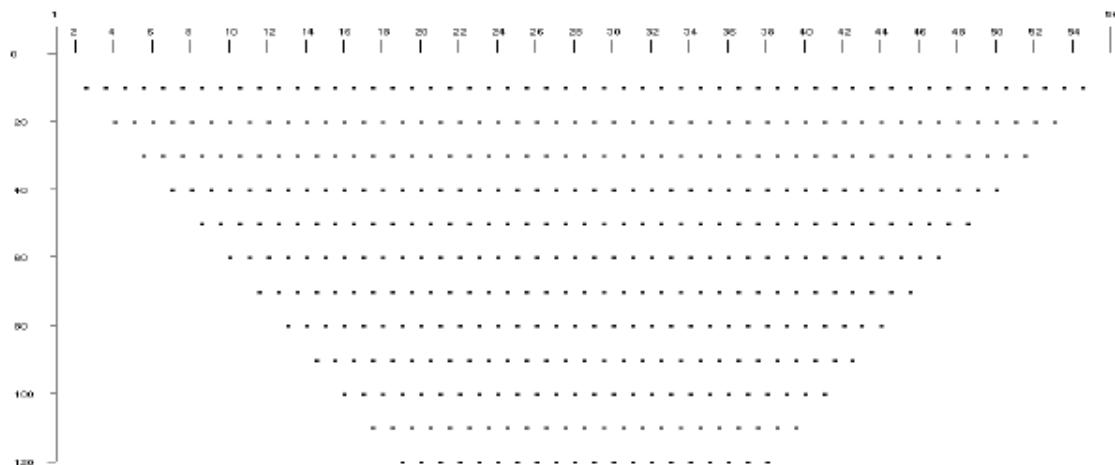


Figura 19: Schema dei Punti di Misura di una Tomografia Elettrica

L'acquisizione dei dati è stata realizzata tramite l'utilizzo di una centralina "PASI", modello "16SG24N"; lo strumento indica inizialmente la posizione di ogni picchetto nel terreno, e successivamente inizia a gestire i vari elettrodi collegati ai picchetti stessi, trasformandoli in base alle necessità in elettrodi di misura o elettrodi di corrente, fino al completamento

del sondaggio. La configurazione di stendimento scelta per realizzare queste prove è quella detta di “*Wenner-Schlumberger*”, che deriva da una combinazione degli stendimenti più semplici “*Wenner*” e “*Schlumberger*”. La prima di queste configurazioni prevede una disposizione del quadripolo con gli elettrodi in linea e tra loro equidistanti, e la serie di misure viene eseguite aumentando la distanza tra tutti i picchetti con progressione esponenziale, oppure traslando l’intero quadripolo lungo un allineamento per passi successivi, di lunghezza pari alla distanza fra i singoli picchetti; la configurazione *Schlumberger*, invece, prevede che gli elettrodi emettitori siano posti tra loro ad una distanza molto maggiore rispetto a quelli misuratori, e le misure sono eseguite aumentando la distanza fra gli elettrodi C1-C2, e mantenendo invariata quella degli elettrodi P1-P2 entro opportuni intervalli di quella fra gli emettitori. Con la seconda configurazione, ogni misura prevede, quasi sempre, lo spostamento sul terreno di due soli picchetti, mentre quella di *Wenner* impone lo spostamento di tutti e 4 gli elettrodi per ogni misurazione. La configurazione usata durante questa campagna, invece, è una combinazione delle precedenti: inizialmente, infatti, la spaziatura fra i quattro elettrodi è la stessa, è pari ad “a”, e per questo la disposizione è uguale a quella della metodologia di *Wenner*; se si definisce “n” il rapporto fra le due distanze C1-P1 e P1-P2, durante le prime misurazioni esso assume valore unitario, ma proseguendo nella prova il valore del parametro “n” assume valori crescenti, e questo rispecchia la configurazione suggerita da *Schlumberger*. Con lo spostamento laterale del sistema quadripolo si registrano le variazioni orizzontali di resistività, mentre con l’allargamento della spaziatura fra gli elettrodi si ottengono informazioni sugli strati più profondi, ed in questo modo si arriva ad avere una sezione bidimensionale di resistività.

I valori acquisiti durante ogni singola misurazione vengono riportati in tabelle, ma i risultati possono anche essere visualizzati in un diagramma [distanza C1-C2/resistività apparente], e questo permette di avere un primo controllo diretto sulla qualità di acquisizione, per registrare eventuali anomalie; si può quindi valutare caso per caso se sia necessario ripetere ogni singola acquisizione.

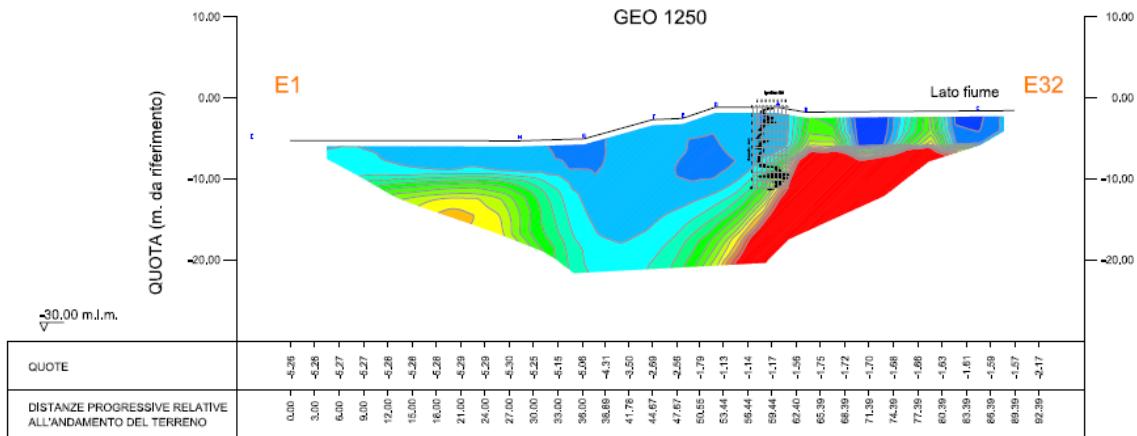


Figura 20: Esempio di Sezione Bidimensionale di Resistività

La resistività elettrica è strettamente collegata alla porosità, quindi al tipo di terreno che costituisce gli strati del sottosuolo, e per questo possiamo correlare questa tipologia di prova con le CPTU, per avere un controllo incrociato dei risultati ottenuti da entrambe, e confermare la tipologia di terre su cui si andranno ad implementare le analisi di stabilità.

Le sezioni indagate attraverso questa tipologia di prova sono cinque, quattro trasversali all'argine ed una parallela ad esso:

Tabella 9: Riassunto Prove Geoelettriche

Sezione	N° Elettrodi	Passo Elettrodi [m]	Lunghezza Stendimento [m]	Data Esecuzione Prova
Trasv. 1250	32	3	96	14/6/2016
Trasv. 1855	32	3	96	14/6/2016
Trasv. 2980	32	3	96	14/6/2016
Trasv. 3380	32	3	96	14/6/2016
Parallelia	32	5	160	15/6/2016

## Sondaggi a Carotaggio Corti

Nell'ambito della campagna di indagini sull'argine consortile di Ghiarole sono stati eseguiti anche 2 sondaggi a carotaggio corti, in corrispondenza dei fori lasciati dopo l'esecuzione delle prove penetrometriche statiche, per poter constatare anche a livello visivo e tattile gli effettivi terreni presenti nel sottosuolo.

I sondaggi sono stati realizzati utilizzando attrezature a rotazione idraulica, secondo il metodo del carotaggio continuo verticale, e con carotieri semplici, aventi lunghezza pari a 150 cm e diametro esterno di 101 mm; la stabilità delle pareti è stata assicurata mediante l'impiego di rivestimenti metallici provvisori, aventi diametro di 127 mm: questi rivestimenti seguono ogni manovra di avanzamento del carotiere, e sono estratti e recuperati alla fine della perforazione.

La sonda utilizzata durante queste prove era montata su un autocarro "FIAT PC 90", avente le seguenti caratteristiche tecniche:

Tabella 10: Caratteristiche Tecniche Apparecchio di Trivellazione

<b>Apparecchio di Trivellazione</b>	ATLAS COPCO A35C
Allestimento	Autocarro trazione integrale
Velocità Massima di Rotazione [giri/min]	0-470
Coppia Massima [Kg·m]	800
Corsa Continua [mm]	3700
Spinta [N]	3100
Tiro [N]	3100
<b>Pompa Fluidi</b>	NENZI TRIPPLEX 200
Pressione Massima [bar]	70
Portata [l/min]	200

Questa prova è stata condotta garantendo una percentuale di recupero pari al 100% del terreno rimosso, per poter realizzare una dettagliata ricostruzione stratigrafica del sottosuolo: il materiale estratto è stato posizionato in apposite cassette catalogatrici in plastica, sulle quali sono stati riportati tutti i dati necessari al loro riconoscimento.

Da questa prova è possibile ottenere informazioni riguardanti le litologie presenti nel sottosuolo grazie ad un semplice esame visivo e tattile (condotto da un geologo) delle carote estratte: si osserva il colore del terreno prelevato, quindi si studia come si presenta fisicamente la carota al tatto, e da queste prime osservazioni si hanno indicazioni di

massima sulla tipologia di terreno e sul grado di umidità da esso contenuto. Un dato importante è quello della concordanza: le conclusioni derivanti da questa prima analisi devono essere confermati dai risultati delle altre prove eseguite.



Figura 21: Esempio di Cassetta Catalogatrice Realizzata Durante un Carotaggio

I due sondaggi sono stati realizzati in corrispondenza di due sezioni trasversali all'argine per le quali sia possibile confrontare i risultati, perché indagati anche attraverso le prove penetrometriche statiche:

Tabella 11: Riassunto Sondaggi a Carotaggio

Sezione	Profondità Fondo Foro [m da P.C.]	Data Esecuzione Prova
1855	2	4/7/2016
2980	3	4/7/2016

## Prove di Permeabilità in Foro di Tipo Lefranc

Questa tipologia di prova è stata eseguita all'interno dei fori realizzati durante i carotaggi, subito dopo il termine di queste prove, quindi con la stessa strumentazione di base, ed essa consente di misurare la permeabilità del terreno circostante il foro; considerando la direzione del flusso che si instaura durante la prova si possono rilevare diverse permeabilità caratteristiche: si può determinare la permeabilità orizzontale  $K_h$ , quella verticale  $K_v$ , oppure una media fra le due, calcolata come  $\sqrt{K_h \cdot K_v}$ .

Per poter realizzare la prova si sono dovuti tenere in considerazione alcuni aspetti tecnici fondamentali:

- La perforazione è stata eseguita senza l'impiego di fanghi, quindi come fluido di circolazione è stata utilizzata solo acqua pulita;
- Si è cercato di evitare che all'esterno del rivestimento metallico utilizzato per sostenere la parete del foro al di sopra della profondità limite superiore si creasse una via preferenziale di passaggio per l'acqua immessa durante la prova.
- Si è cercato di evitare che, durante la perforazione, le pareti del foro risultassero eccessivamente alterate; infatti una "bruciatura" del fondo del foro, oppure un taglio della parete laterale tale da "spalmare" il terreno, potrebbero modificare la compattezza del materiale, compromettendo la prova.

La prova può essere condotta imponendo sul foro un carico idraulico costante, oppure variabile, ma vista l'entità degli abbassamenti del livello di acqua all'interno della colonna di tubi che rivestivano la parte superiore del foro, si è deciso di eseguire prove a carico variabile. Per poter eseguire la prova si è dovuto, come prima cosa, misurare il livello della falda prima dell'inizio della stessa; in un secondo momento il rivestimento metallico, che durante il carotaggio era stato posizionato fino a contatto con il fondo del foro, è stato sollevato, ed il foro stesso è stato riempito con acqua fino all'estremità superiore del tubo, che fuoriusciva rispetto al piano campagna. Da quando l'acqua arriva all'estremità superiore del tubo è stata interrotta l'immissione, e si è misurato il livello idrico all'interno del rivestimento metallico ad intervalli di tempo frequenti, avendo cura di annotarli scrupolosamente unitamente al livello misurato; la frequenza di queste letture di livello sono state decise in base alla velocità di discesa dell'acqua, quindi sono variabili da prova

a prova. Si ottiene, come dato di output, un grafico che lega gli abbassamenti misurati ai tempi di registrazione degli stessi abbassamenti:

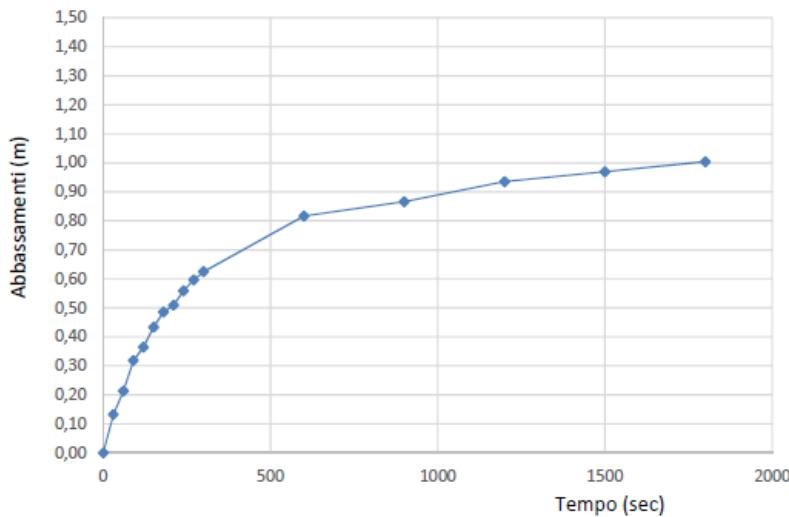


Grafico 6: Grafico Ottenuto dalla Prova di Permeabilità di Tipo Lefranc

Anche da questa prova è possibile ricavare, come informazione riguardo il comportamento meccanico del terreno, il valore di permeabilità, e questo viene determinato utilizzando la formula proposta dalle Raccomandazioni AGI del 1997:

$$K = \frac{A}{C_f \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

All'interno di questa formulazione compaiono, a due a due, i livelli idrici misurati ed i tempi corrispondenti a queste misure, insieme ad altre due grandezze caratteristiche: l'area di base del foro in cui è stata eseguita la prova, ed un coefficiente di forma  $C_f$ , che dipende dal diametro del foro, dall'altezza del cilindro di terreno attraverso cui è consentito il passaggio dell'acqua per la misura, e dall'altezza totale del carico idrico imposto durante la prova.

Il valore ottenuto non sarà identico a quelli ricavati con le altre prove, ma è auspicabile che l'ordine di grandezza di ogni valore descriva lo stesso terreno, in base ai valori indicati dalla Tabella 6; durante le indagini sull'arginatura di Ghiarole questa tipologia di prova è stata eseguita sulle due sezioni oggetto di sondaggi a carotaggio:

Tabella 12: Riassunto Prove di Permeabilità di Tipo Lefranc

Sezione	Limite Superiore [m da P.C.]	Limite Inferiore [m da P.C.]	Data Esecuzione Prova
1855	1	2	4/7/2016
2980	2	3	4/7/2016

## Capitolo 4: Le Sezioni Analizzate

Durante lo studio dell'argine consortile sono state rilevate alcune sezioni trasversali dello stesso, che lo descrivono geometricamente dal lato campagna al lato fiume.

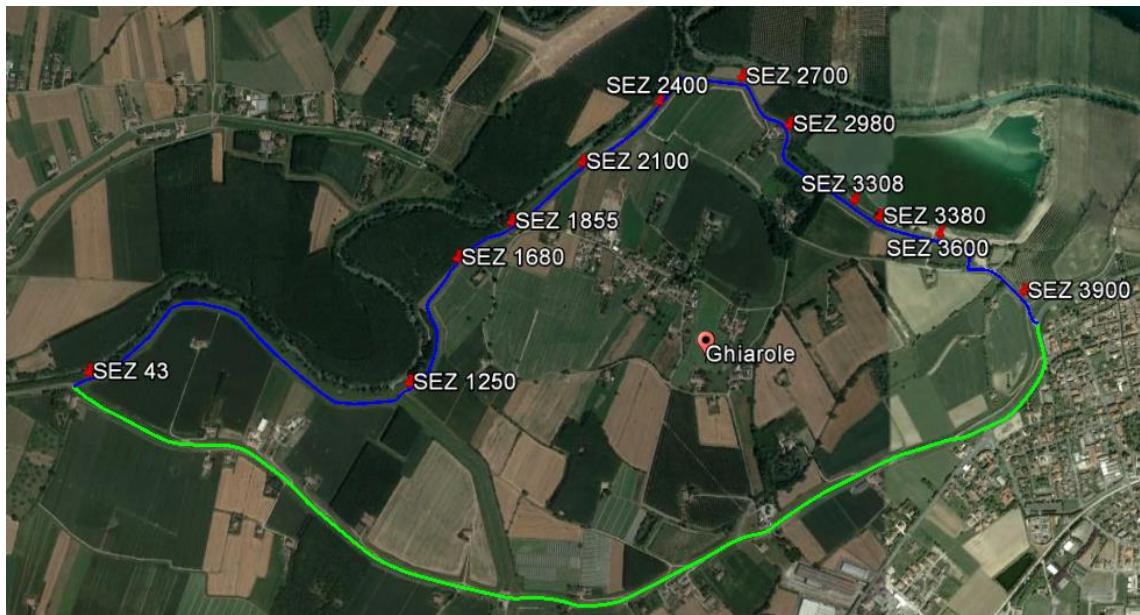


Figura 22: Argine Consortile con Sezioni Analizzate

Come spiegato nel Capitolo 3, paragrafo “Il Rilievo dell’Argine”, per ogni sezione rilevata sono state eseguite misure per collocare spazialmente i punti notevoli: sono state determinate le quote e le distanze relative fra questi punti, seguendo la linea di massima pendenza nei pendii e sui tratti sub-orizzontali. In un primo momento le coordinate ( $x;z$ ) di questi punti sono state collocate in un sistema di riferimento relativo ed arbitrario, ma per poter caricare le sezioni sul codice di calcolo “*Slide*”, ed impostare le corrette condizioni al contorno, utili per eseguire le verifiche di stabilità, tutte le misure sono state traslate in un sistema di riferimento che fosse assoluto per le coordinate verticali; questa operazione è stata fatta basandosi su punti noti a priori nel sistema di riferimento assoluto, e registrati nuovamente durante il rilievo, ma solamente per la coordinata verticale, poiché il sistema di riferimento in cui è espressa quella orizzontale è ininfluente ai fini della soluzione del problema.

Tabella 13: Esempio di Tabella delle Coordinate dei Punti Notevoli di una Sezione

Punto	x [m]	z relativa [m]	Punto	x [m]	z assoluta [m s.l.m.]
1	0	0	1	0	25.52
2	10	0	2	10	25.52
3	13.63	0.42	3	13.63	25.94
4	19.66	2.24	4	19.66	27.76
5	22.94	2.57	5	22.94	28.09
6	26.25	4.22	6	26.25	29.74
7	28.65	4.22	7	28.65	29.74
8	31.05	4.22	8	31.05	29.74
9	39.26	0.54	9	39.26	26.06
10	59.26	0.54	10	59.26	26.06
11	68.26	-8.46	11	68.26	17.06
12	78.26	-8.46	12	78.26	17.06
13	78.26	-18.46	13	78.26	7.06
14	0	-18.46	14	0	7.06
15	0	0	15	0	25.52

In questo modo è stata creata, su un foglio di calcolo elettronico, una coppia di tabelle per ogni sezione analizzata, e quella che riporta la coordinata “z assoluta” deve essere convertita in un file di testo, per poter essere importata nel programma “Slide” al fine di definire il contorno esterno; è da notare che il codice di calcolo lavora solamente su contorni chiusi, quindi l’ultimo punto della tabella che definisce il limite di indagine deve corrispondere al primo. Il punto evidenziato in giallo in Tabella 13 corrisponde al centro del coronamento arginale, ed è quello che è stato preso come riferimento per la conversione di tutti gli altri dal sistema di riferimento relativo all’assoluto, poiché è l’unico di cui fossero note entrambe le coordinate.

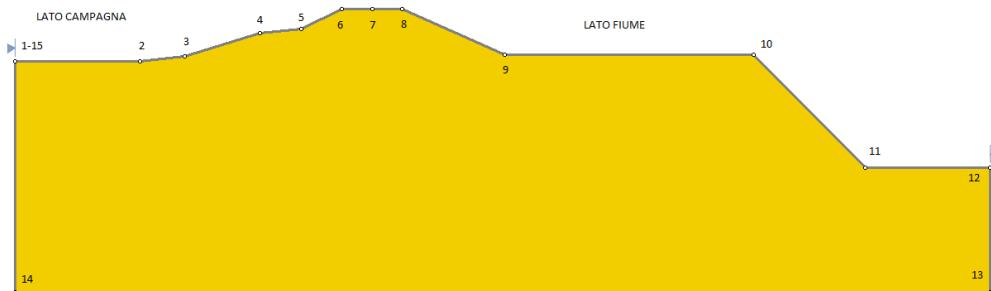


Figura 23: Esempio di Sezione Trasversale, con Indicazione dei Punti Notevoli

Come ipotesi di partenza, le sezioni sono state tutte rappresentate con 10 metri di sviluppo del lato campagna in più rispetto a quelli rilevati, e con le stesse condizioni a lato fiume:

- La banca interposta fra il letto del fiume ed il corpo arginale è orizzontale e larga al massimo 20 metri; nelle sezioni in cui è stato possibile rilevarla effettivamente si è mantenuta la misura registrata, mentre per le sezioni che distano maggiormente dal fiume si è stabilita questa misura, poiché è inutile ragionare su una distanza troppo elevata, e ci si pone così a favore di sicurezza.
- Il pendio del letto del fiume è considerato come la diagonale di un quadrato avente lati di 9 metri; questa ipotesi è risultata necessaria vista l'impossibilità di rilevarlo in modo esatto.
- Il letto del fiume rappresentato è stato posto pari a 10 metri, con sviluppo orizzontale, e si è scelta questa misura perché è una misura intermedia ragionevole.

Dopo aver caricato su “Slide” il contorno esterno della sezione, si devono definire i materiali che costituiscono la stratificazione interna del corpo arginale; dalle prove CPTU è visibile che, per ogni sezione indagata, intorno alla profondità di 2 metri dal piano campagna si ha un cambiamento di litologia, e la stessa cosa succede, quasi per tutte le sezioni studiate, intorno ai 7/8 metri di profondità, sempre rispetto alla sommità arginale.

Per definire con esattezza la quota a cui si colloca la separazione fra i diversi strati ci si è basati sui risultati riportati dalle prove CPTU, in particolare su quelli riguardanti i valori dei parametri meccanici  $K$ ,  $C_u$  e  $\phi$ , ricavati empiricamente; il programma utilizzato per elaborare i risultati della prova, infatti, restituisce come output due tabelle elettroniche di dati, tutti ricavati in modo empirico dalle misurazioni fatte, e da questi è possibile estrapolare ed elaborare solamente quelli utili.

Andando ad esaminare le colonne riguardanti i dati di interesse si nota che è presente un cambiamento netto nei valori quando si ha cambiamento di litologia nel corpo arginale:

Tabella 14: Esempio di Dati che Indicano il Passaggio fra Litologie

<b>Profondità [m]</b>	<b><math>K</math> [m/s]</b>	<b><math>C_u</math> [kPa]</b>	<b>Angolo di Attrito [°]</b>
1.86	5.98E-07	0	39
1.88	5.11E-07	267.3709	0

Nell'esempio riportato in Tabella 14, la differenza dei materiali non si vede tanto nel valore della permeabilità, quanto in quelli della coesione non drenata e dell'angolo di attrito: l'ordine di grandezza di  $K$  rimane infatti invariato mentre, con l'aumento della profondità, si riscontra la comparsa della coesione, prima assente, e l'annullamento dell'angolo di attrito. Si deve verificare che questa situazione di  $\varphi=0$  e  $C_u>0$  si mantenga per un tratto abbastanza esteso nel corpo arginale, perché se così non fosse, ed i parametri assumessero questi valori solo per pochi centimetri, essi apparterrebbero ad una lente di materiale diverso all'interno di uno strato omogeneo; eseguita questa verifica, si può porre il limite inferiore dello strato superficiale del corpo arginale alla quota intermedia fra quella dei due valori rilevati, in questo caso esemplificativo pari a 1.87 metri dal piano campagna.

Determinando in questo modo i parametri meccanici dello strato più superficiale ci si pone a favore di sicurezza, perché le prove CPTU sono state eseguite in corrispondenza del centro del coronamento arginale, e lungo questa verticale si colloca anche il fosso di innesto, realizzato quando è stato eseguito il rialzo dell'argine; infatti, per poter collocare sull'opera esistente un nuovo strato di terreno utile al rialzo della struttura, e far sì che esso non scivolasse su quello sottostante lungo il suo piano sommitale, si è dovuto eseguire uno scavo sul colmo della struttura già esistente, in cui inserire un dente realizzato con il nuovo terreno, per aumentarne la stabilità.



Figura 24: Schema del Fosso di Innesto

In questo modo, con le prove penetrometriche, si è attribuita una profondità maggiore al limite di stratificazione, e si è così considerato uno spessore maggiore per lo strato a caratteristiche peggiori; il dente di terreno più permeabile è nella realtà circondato da terreno meno permeabile, quindi la filtrazione nei primi metri a lato fiume e a lato campagna, parallelamente alla collocazione del dente, è più lenta di quella simulata, e l'imbibizione sarà minore. Per questo nelle simulazioni ci si pone a favore di sicurezza, considerando più spesso lo strato avente caratteristiche peggiori, e più sottile quello con caratteristiche meccaniche migliori.

Per inserire correttamente la stratificazione ipotizzata all'interno della sezione è di fondamentale importanza collocare sul contorno esterno i punti di intersezione fra i limiti degli strati ed il contorno stesso, ed anche in questo caso si utilizza un foglio di calcolo elettronico; avendo individuato, in quasi tutte le sezioni, 3 diverse litologie di stratificazione, le linee di separazione tra queste sono due, ed i punti da individuare sono quindi due sul lato campagna e due sul lato fiume. Si ipotizza che gli strati siano orizzontali, così come le linee di separazione fra essi, e come prima cosa si deve determinare la coordinata assoluta della profondità a cui si trovano: partendo dalla quota del punto centrale del coronamento, si diminuisce questo valore della quantità indicata dalla prova penetrometrica come punto di passaggio tra le stratificazioni, e si determina così la quota assoluta cercata. Questo procedimento è valido per le 6 sezioni che sono state indagate attraverso le prove CPTU, mentre per quelle sulle quali non è stata eseguita alcuna prova il discorso è più complesso: è ragionevole ipotizzare che l'arginatura sia stata costruita in modo omogeneo, quindi che l'andamento degli strati sia il più possibile lineare, ma si è visto che il coronamento arginale non raggiunge la stessa quota assoluta in tutti i punti, quindi per determinare la quota dei limiti di stratificazione nelle sezioni delle quali è stato solamente rilevato il contorno si deve eseguire un'interpolazione lineare dei dati ricavati dalle CPTU, mediati sulla distanza reciproca fra le sezioni. Su un foglio di calcolo elettronico sono state riportate le coordinate lineari progressive delle sezioni da verificare, la loro quota in coronamento espressa nel sistema di riferimento assoluto e, per le sezioni indagate tramite prova penetrometrica, anche le profondità, rispetto al coronamento, a cui si incontrano i limiti di stratificazione; ipotizzando che i limiti delle stratificazioni seguano l'andamento delle quote del coronamento, e che la variazione di quota avvenga in modo lineare, si è applicata la seguente formula:

$$Q_{lim} = Q_{lim,prec} + \frac{Q_{lim,seg} - Q_{lim,prec}}{x_{seg} - x_{prec}} \cdot (x - x_{prec})$$

In questa formula  $Q_{lim}$  indica la profondità a cui si colloca il limite fra le stratificazioni rispetto al piano di coronamento,  $Q_{lim,prec}$  e  $Q_{lim,seg}$  sono le profondità del limite rilevate tramite CPTU per la sezione che precede e che segue quella incognita da ricostruire,

rispettivamente,  $x$  è la coordinata progressiva della sezione non indagate con prova penetrometrica, mentre  $x_{\text{prec}}$  e  $x_{\text{seg}}$  sono le coordinate progressive delle sezioni indagate più vicine a quella che si sta studiando.

Tabella 15: Ricostruzione Profondità dei Limiti di Stratificazione per ogni Sezione

Progressiva [m]	Q C ass [m s.l.m.]	Q <sub>lim1</sub> da C [m]	Q <sub>lim2</sub> da C [m]	Q <sub>lim1</sub> [m s.l.m.]	Q <sub>lim2</sub> [m s.l.m.]
43	29.55	-1.87		27.68	
1250	29.48	-1.41	-7.35	28.07	22.13
1680	29.74	-1.94	-8.15	27.80	21.59
1855	29.59	-2.15	-8.47	27.44	21.12
2100	29.61	-1.94	-8.18	27.67	21.43
2400	29.63	-1.68	-7.82	27.95	21.81
2700	29.82	-1.41	-7.46	28.41	22.36
2980	29.53	-1.17	-7.13	28.36	22.40
3308	29.53	-1.66	-7.24	27.87	22.29
3380	29.44	-1.77	-7.27	27.67	22.17
3600	29.53	-1.76	-7.49	27.77	22.04
3900	29.44	-1.75	-7.79	27.69	21.65

Dalla tabella è possibile ricavare un grafico a dispersione con andamento lineare, nel quale si riporta l'andamento in quota del coronamento e quello dei limiti di stratificazione: "Figura 25: Andamento Coronamento Arginale e Limiti di Stratificazione".

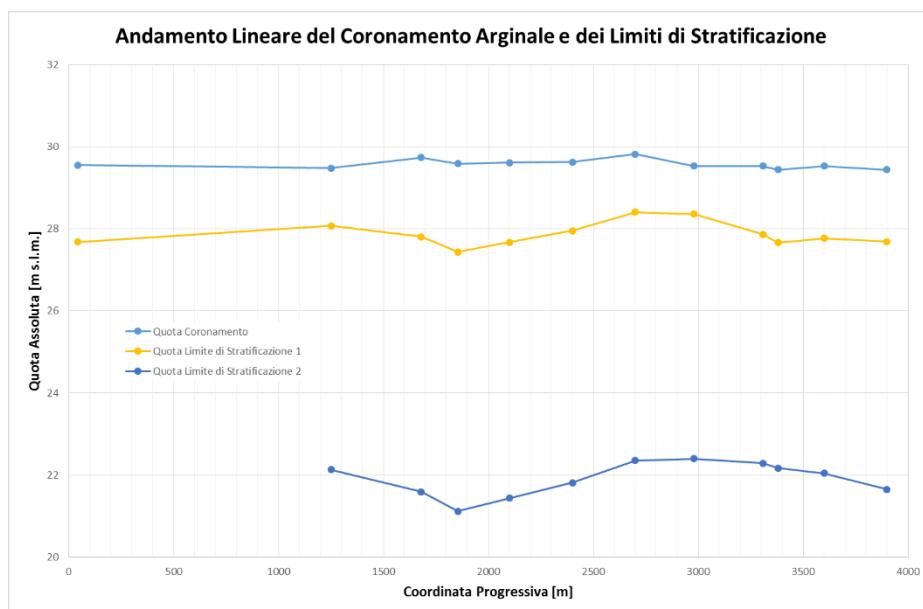


Figura 25: Andamento Coronamento Arginale e Limiti di Stratificazione

Per trovare la coordinata x dei punti di intersezione fra i limiti di stratificazione ed il contorno arginale si deve eseguire un'interpolazione lineare fra i due punti misurati sulla sezione aventi i valori di quota immediatamente inferiore e superiore rispetto a quello del limite di stratificazione, e questo è da fare per tutte le 12 sezioni analizzate; con due punti noti, ed uno di cui è nota la profondità ma non la coordinata longitudinale, si può applicare la formula di interpolazione, per trovare la coordinata incognita:

$$x_s = x_{\text{inf}} + \frac{x_{\text{sup}} - x_{\text{inf}}}{z_{\text{sup}} - z_{\text{inf}}} \cdot (z_s - z_{\text{inf}})$$

In questa formula “ $x_s$ ” è la coordinata incognita del limite di stratificazione, “ $z_s$ ” è la quota del limite di stratificazione, appena trovata, “ $x_{inf}$ ” e “ $z_{inf}$ ” sono le coordinate longitudinale e verticale del punto noto posto a quota inferiore rispetto a quella del limite, mentre “ $x_{sup}$ ” e “ $z_{sup}$ ” sono quelle del punto noto posto a quota superiore rispetto a quella del limite.

Questa operazione viene ripetuta per tutti i punti di intersezione da trovare, e si costruiscono così delle nuove tabelle di calcolo:

Tabella 16: Esempio di Calcoli per la Determinazione dei Punti Limiti degli Strati

Lato Campagna		Lato Fiume	
x	z [m s.l.m.]	x	z [m s.l.m.]
19.66	27.76	31.05	29.74
22.94	28.09	39.26	26.06
<b>S1</b>	20.10	35.37	27.80
		59.26	26.06
		68.26	17.06
<b>S2</b>	0	63.73	21.59

In Tabella 16 i punti trovati, rappresentativi dell'intersezione fra il contorno esterno dell'argine ed i limiti separatori degli strati, sono stati evidenziati in giallo, e gli altri dati presenti sono le coordinate dei punti che precedono e seguono queste intersezioni, utilizzate per eseguire i calcoli; è da notare che il punto di intersezione del secondo limite

con il contorno a lato campagna ha la coordinata “x” pari a 0, e questo significa che questo punto si trova al di sotto del corpo arginale, nella parte di fondazione.

Dopo averli determinati, questi punti vengono aggiunti sul contorno arginale all’interno del codice di calcolo, ed in esso vengono tracciati i limiti distintivi della stratificazione:

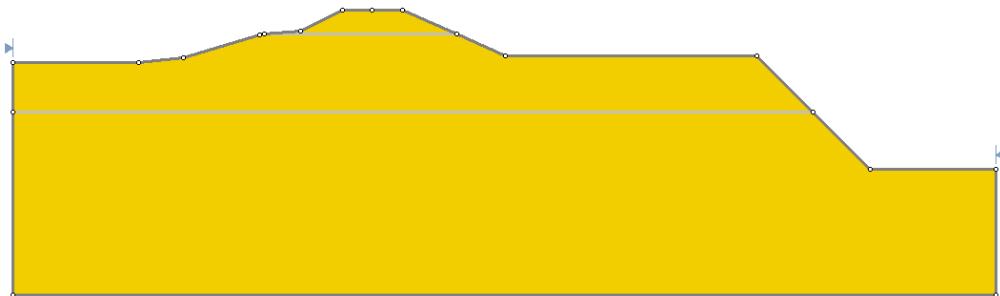


Figura 26: Esempio di Sezione Arginale con Stratificazione Interna

Una volta trovate le quote di passaggio fra i diversi strati si devono determinare i valori medi dei parametri, da attribuire ad ogni diversa formazione litologica, e per farlo si è eseguita una media pesata sull’altezza dei valori ricavati dalle misurazioni in situ: la prova penetrometrica registra i valori di resistenza ogni 2 cm di profondità, quindi anche i valori dei parametri sono ricavati puntualmente a queste quote, e per riuscire ad attribuire un valore anche alle porzioni di terreno intermedie fra due punti rilevati si è operato come se il valore appartenente al punto in cui si è registrato il dato fosse quello del punto centrale di un “parallelepipedo” di terra avente altezza pari a 2 cm; in questo modo tutto il “parallelepipedo” sarebbe caratterizzato dagli stessi valori dei parametri. Per eseguire la media pesata ci si è serviti di un foglio elettronico, e si è moltiplicato ogni valore registrato per lo “spessore di influenza”, pari a 2 cm, uno precedente ed uno seguente rispetto al punto in cui è stata eseguita la misura; il passaggio successivo è stato sommare tutti i valori appena ottenuti, quindi dividere questa somma per la somma totale delle altezze considerate, pari allo spessore dello strato.

Nel calcolo della media dei parametri della litologia più superficiale non sono stati utilizzati i valori attribuiti ai primi 20 cm di profondità; si è deciso di operare in questo modo poiché in quello spessore di terreno si ha l’influenza di molti fattori che possono alterare il terreno e le sue proprietà, come gli agenti atmosferici, le radici delle piccole piante spontanee, i passaggi di persone ed animali.

In questo modo si è ottenuto un valore medio per la permeabilità, uno per la coesione non drenata ed uno per l’angolo di attrito, e questa modalità è stata applicata su tutti gli

strati di tutte le 6 sezioni indagate con prova CPTU. In corrispondenza di 4 delle 6 sezioni indagate durante la campagna di indagini del 2016, è stata eseguita più di una tipologia di prova, quindi per esse i valori ricavati dallo studio delle CPTU sono stati confrontati e validati grazie alle altre analisi geognostiche; questo permette di avere una maggiore sicurezza riguardo i dati utilizzati nelle simulazioni. Per le 6 sezioni in corrispondenza delle quali invece questa prova non è stata eseguita, sono stati interpolati i dati ottenuti dalle 2 sezioni indagate più vicine, una precedente ed una seguente, ed anche in questo caso è stata eseguita una media pesata sulla distanza: la sezione 1680, ad esempio, non è stata indagata con prove penetrometriche, ma si trova in una posizione intermedia rispetto a due sezioni sulle quali questa prova è stata eseguita, cioè la 1250 e la 1855; per tutti e tre i parametri da calcolare si è quindi applicata la stessa formula, che media l'influenza del valore a partire dalla distanza fra le sezioni:

$$K_{1680} = K_{1250} + \frac{K_{1855} - K_{1250}}{1855 - 1250} \cdot (1680 - 1250)$$

Sono state prese come esempio queste tre sezioni, ma il discorso è il medesimo in tutti gli altri casi per i quali è necessaria un'interpolazione, ed è valido per tutti i 3 parametri meccanici da conoscere, non solo per la permeabilità.

Nell'eseguire le interpolazioni sono stati presi in considerazione, come dati di partenza, i valori ricavati empiricamente dalle prove CPTU del 2016, e sono stati messi da parte i risultati delle precedenti prove penetrometriche statiche, realizzate nel 1995 e nel 2006; si è deciso di operare in questo modo poiché la due tipologie di prove sono diverse, ed i dati ottenuti non sono fra loro confrontabili:

- Le prove più datate sono prove penetrometriche dette anche CPT, quindi nella loro esecuzione non era compreso il piezocono, e per questo non è stato possibile rilevare nulla circa la pressione dell'acqua e le sue variazioni durante l'esecuzione della prova; i parametri di permeabilità e di coesione non drenata però dipendono strettamente dalla pressione che l'acqua assume nei pori del terreno, quindi l'assenza di questa misura implica l'impossibilità di determinare questi parametri.
- Le prove CPTU effettuano misure puntuali ogni 2 cm di profondità, mentre le prove CPT registrano valori ogni 20 cm, quindi la numerosità dei dati ricavati con

le indagini precedenti è molto inferiore rispetto a quella ottenuta dalle prove più recenti, e per questo i valori del terzo parametro meccanico, cioè l'angolo di attrito, ottenuti con le due diverse tipologie di prova non sono tra loro confrontabili.

Nelle pagine seguenti si riporta, per ogni sezione, prima la geometria costruita sul programma “Autocad 2016”, poi quella implementata sul codice di calcolo “Slide”; le due geometrie di una stessa sezione possono mostrare piccole differenze, perché nel programma di disegno sono state inserite le misure prese in campagna durante il rilievo manuale, per quanto riguarda la struttura arginale, mentre sul codice di calcolo numerico sono state caricate le coordinate dei punti definiti attraverso le ipotesi fatte successivamente rispetto al rilievo.

Le simulazioni per le verifiche verranno sempre eseguite sulle sezioni implementate sul codice di calcolo.

## Sezione 43

Questa sezione è rappresentativa dell'innesto iniziale dell'argine consortile con l'arginatura maestra, e non presenta particolari problematiche geometriche: ha una banca intermedia a lato campagna, e la linea di imbibizione teorica 1:6 indica la formazione di una ipotetica sorgente sospesa al di sotto di questa banca; inoltre, lo scarto fra questa linea teorica e quella che termina in corrispondenza dell'unghia dell'argine, rimanendo completamente all'interno del corpo arginale, è di poco minore di 50 cm.



Figura 27: Sezione Trasversale alla Progressiva 43

Andando ad analizzare i dati ottenuti dalla prova CPTU eseguita in corrispondenza di questa sezione, si vede che il corpo arginale è sostanzialmente costituito da 2 strati:

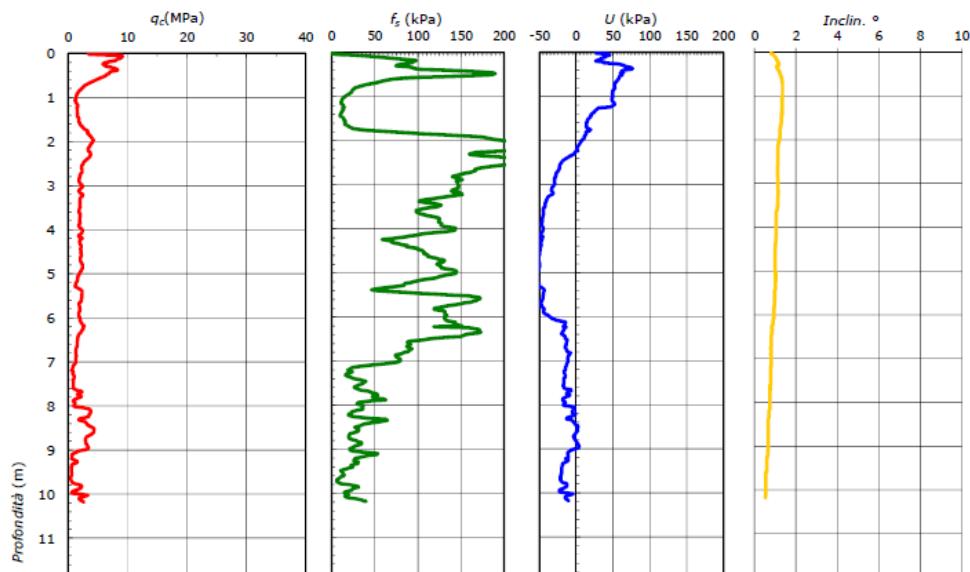


Figura 28: Grafici della Prova CPTU, Sezione 43

La profondità raggiunta con la prova è di 10.18 metri rispetto al piano di coronamento arginale, ed è evidente un cambiamento di litologia solamente in corrispondenza di 1.85

metri di profondità; i valori ottenuti dalle elaborazioni numeriche sui dati registrati durante la prova sono riassunti in Tabella 17:

Tabella 17: Parametri Meccanici Sezione 43

	<b>K [m/s]</b>	<b>Cu [kPa]</b>	<b><math>\varphi</math> [°]</b>
<b>STRATO 1</b>	1.36E-05	0	39
<b>STRATO 2</b>	7.84E-08	115	3

In questa sezione non sono state eseguite ulteriori prove geognostiche durante la campagna di indagine, ma i valori ottenuti sono in linea con quelli delle altre sezioni analizzate, quindi sono considerati soddisfacenti; da questi parametri è evidente che lo strato più superficiale, fino a 1.85 metri di profondità, è costituito prevalentemente da limi con una forte componente sabbiosa, essendo nulla la coesione non drenata ed avendo un valore dell'angolo di attrito pari a 39°, mentre al di sotto si trova uno strato di limo con presenza consistente di argilla, e questo si nota dal diverso valore di permeabilità, molto più bassa, dalla comparsa della coesione non drenata, e dal ridotto valore dell'angolo di attrito.

La sezione, dopo l'assegnazione dei parametri meccanici agli strati, nel codice di calcolo “Slide” appare come mostrato in Figura 29:

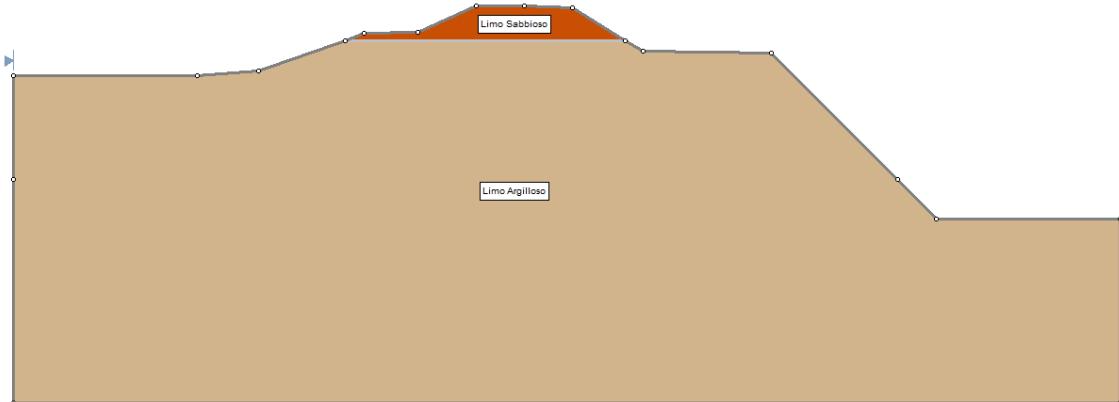


Figura 29: Sezione 43 in “Slide”

## Sezione 1250

Questa sezione non presenta particolari problematiche geometriche, in vista delle verifiche di stabilità dell'argine consortile, ma si è voluto indagare il terreno costituente il corpo arginale, non essendone chiara la composizione.



Figura 30: Sezione Trasversale alla Progressiva 1250

La prova penetrometrica statica ha in questo caso evidenziato la presenza di 3 strati all'interno del corpo arginale:

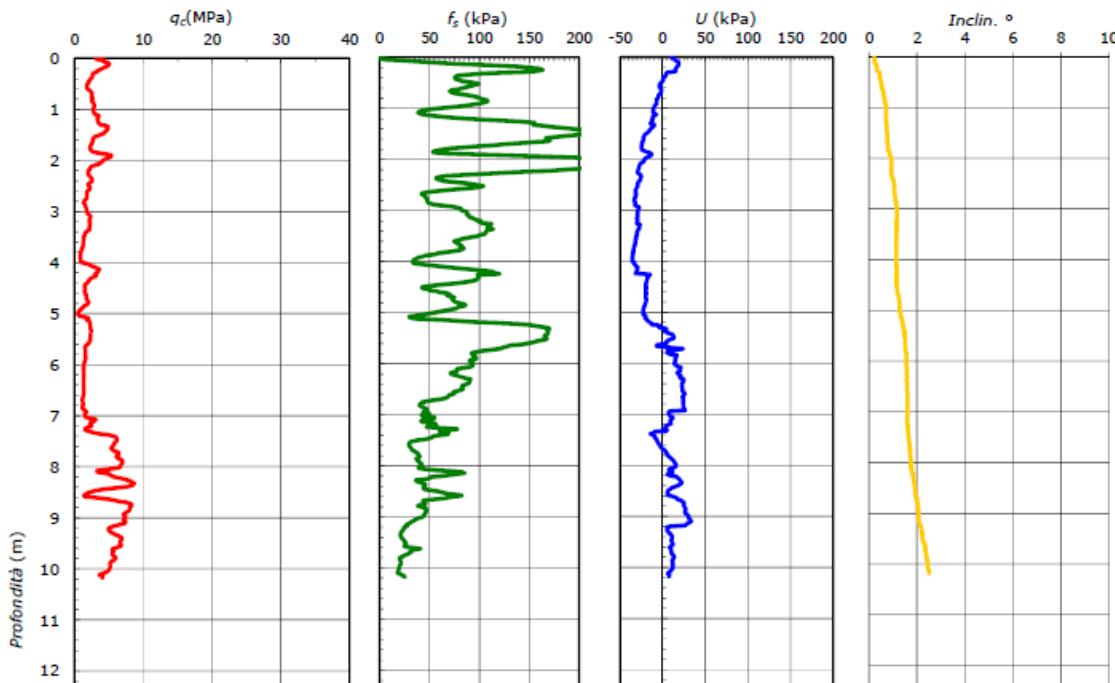


Figura 31: Grafici della Prova CPTU, Sezione 1250

Dal grafico della prova non è distinguibile in modo netto lo strato più superficiale, rispetto a quello intermedio; se si vanno ad analizzare le tabelle di valori registrati, si nota infatti che nei primi 1.39 metri di profondità si ha più volte il passaggio da coesione non drenata nulla a valori di coesione elevati, e questo rispecchia quello che è stato ottenuto dal

grafico. Al di sotto di questa quota, invece, la coesione assume valori maggiori di zero in modo quasi esclusivo, fino alla profondità di 7.35 metri rispetto al coronamento arginale, quindi si va a definire uno strato intermedio, che va da 1.39 a 7.35 metri di profondità, e lo strato di fondazione si trova al di sotto di questa quota.

I valori dei parametri meccanici ricavati dai dati registrati durante la penetrazione statica sono riassunti in Tabella 18:

Tabella 18: Parametri Meccanici Sezione 1250

	<b>K [m/s]</b>	<b>Cu [kPa]</b>	<b><math>\varphi</math> [°]</b>
<b>STRATO 1</b>	1.82E-06	51	29
<b>STRATO 2</b>	1.22E-07	121	2
<b>STRATO 3</b>	4.34E-06	14	32

Da questi valori è ragionevole ipotizzare che lo strato più superficiale sia composto principalmente da limi con evidenti intrusioni sabbiose, lo strato intermedio sia invece formato da limi prevalentemente argillosi, mentre lo strato più profondo sia costituito da una sabbia limosa; in corrispondenza di questa sezione è stato anche realizzato uno stendimento geoelettrico, ed i dati restituiti da esso vanno a conferma dell'ipotesi ricavata dalla prova CPTU, quindi la sezione nel programma utilizzato per le verifiche appare come in Figura 32:

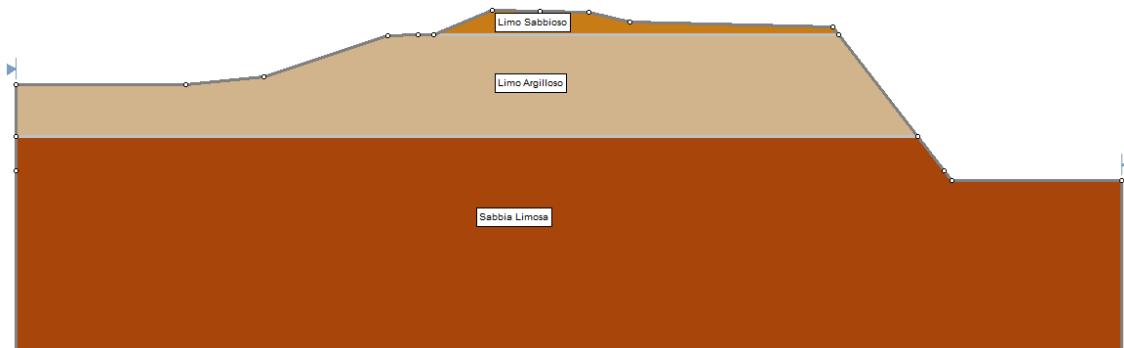


Figura 32: Sezione 1250 su "Slide"

## Sezione 1680

In corrispondenza di questa sezione non sono state eseguite indagini geognostiche, quindi di essa si conoscono in modo certo solamente le coordinate dei punti notevoli posti sul contorno esterno.

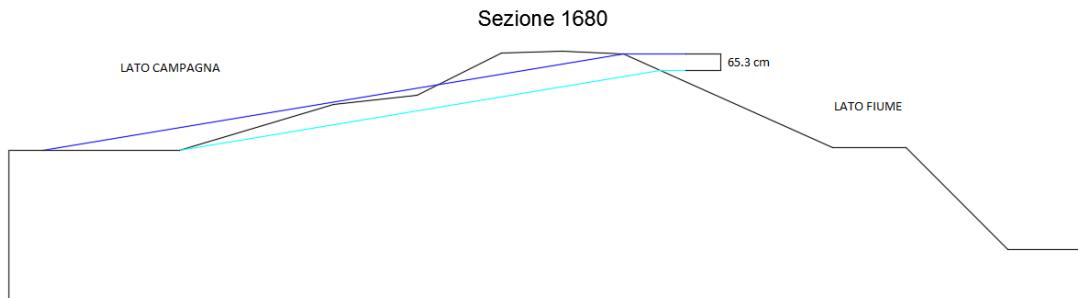


Figura 33: Sezione Trasversale alla Progressiva 1680

Le quote a cui probabilmente si trovano i limiti delle stratificazioni ed i valori assunti dai parametri meccanici sono quindi dati interpolati:

Tabella 19: Parametri Meccanici Sezione 1680

	K [m/s]	Cu [kPa]	$\varphi$ [°]
<b>STRATO 1</b>	3.04E-05	15	38
<b>STRATO 2</b>	1.16E-07	119	2
<b>STRATO 3</b>	1.25E-05	4	35

Come si vede in Tabella 19, il primo strato è composto da una limo sabbioso, ed esso si colloca fino ad una profondità di 1.94 metri rispetto al coronamento; lo strato intermedio è invece un limo con presenza consistente di argilla, e si estende fino alla profondità di 8.15 metri al di sotto del piano di coronamento, mentre lo strato più profondo è nuovamente una sabbia limosa.

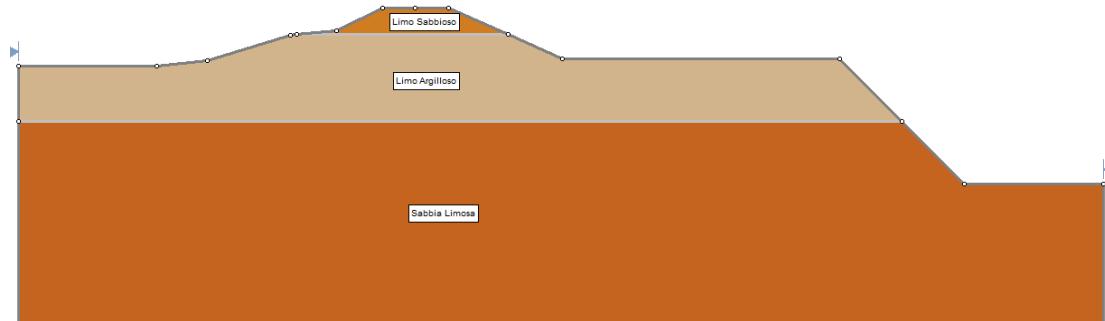


Figura 34: Sezione 1680 su "Slide"

## Sezione 1855

In corrispondenza di questa sezione sono state eseguite una prova penetrometrica con piezocono, una prova geoelettrica, un sondaggio a carotaggio corto, ed una prova di permeabilità di tipo Lefranc; la motivazione di questo studio approfondito è data dalla presenza, sulla linea di questa sezione trasversale, di un'abitazione posta a pochi metri dall'argine sul lato campagna, e da elementi ad essa connessi che potrebbero creare più facilmente instabilità: un serbatoio per gas ad uso domestico, ed alberi sempreverdi ad alto fusto con radici molto invasive.

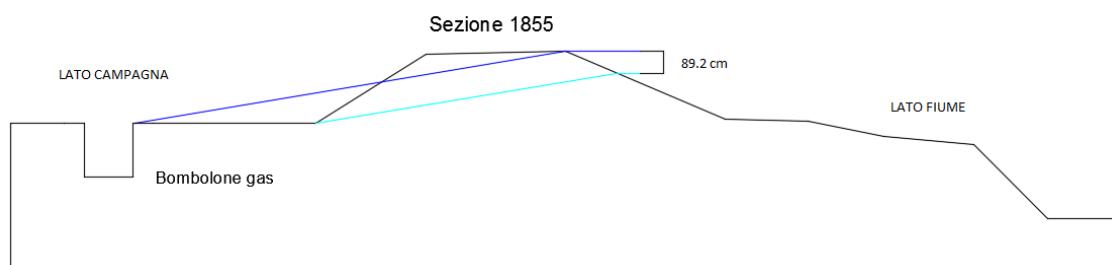


Figura 35: Sezione Trasversale alla Progressiva 1855

La prova CPTU eseguita al centro di questa sezione ha evidenziato la presenza di 3 strati nel corpo arginale:

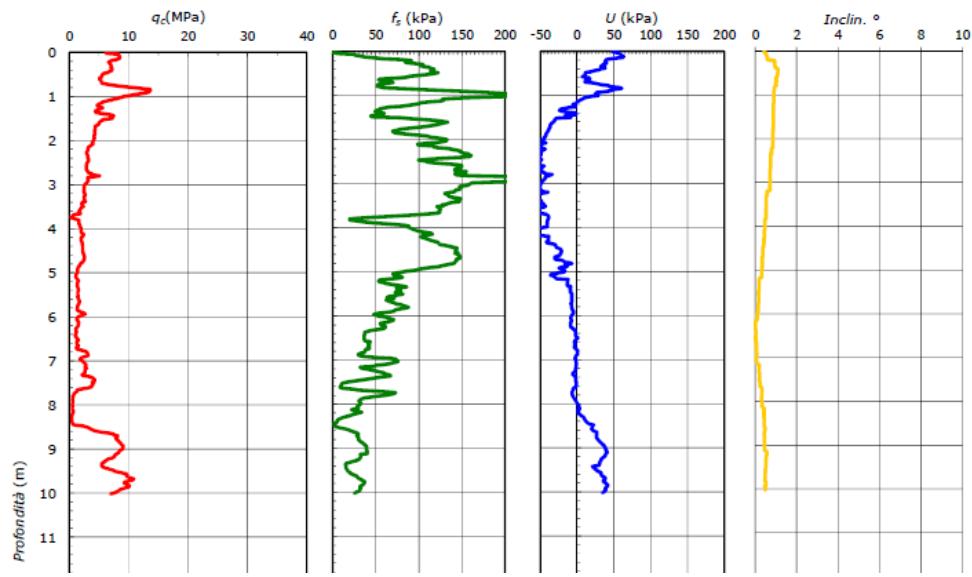


Figura 36: Grafici della Prova CPTU, Sezione 1855

Le tabelle correlate ai grafici collocano i limiti di stratificazione alle profondità di 2.15 metri e 8.47 metri rispetto al piano di coronamento, e questo è confermato dalla tomografia elettrica ricavata dallo stendimento geoelettrico.

I valori dei parametri meccanici degli strati sono stati ricavati come media dei dati empirici risultati dalla prova di permeabilità:

Tabella 20: Parametri Meccanici Sezione 1855

	<b>K [m/s]</b>	<b>Cu [kPa]</b>	<b>φ [°]</b>
<b>STRATO 1</b>	4.20E-05	0	42
<b>STRATO 2</b>	1.14E-07	117	2
<b>STRATO 3</b>	1.58E-05	0	36

La prova di permeabilità di tipo Lefranc può confermare o smentire uno solo di questi dati, cioè quello di permeabilità relativo allo strato più superficiale, essendo stata eseguita in uno spessore compreso fra 1 e 2 metri di profondità; il valore ricavato da questa prova, utilizzando la formula riportata a pagina 51, è pari a  $1.17 \cdot 10^{-6}$ , quindi è più basso rispetto a quello inserito in Tabella 20. Quello che conta è l'ordine di grandezza, e basandosi sulla tabella riportata a pagina 39, entrambi i valori indicano un limo sabbioso; questo valore numerico è confermato anche dall'analisi del terreno estratto dalla carota di sondaggio.

All'interno del programma però, in vista delle verifiche da eseguire, è più opportuno inserire come dato di permeabilità quello maggiore, perché in questo caso il terreno è più permeabile all'acqua, e verificando la sua resistenza in questa condizione ci si pone a favore di sicurezza. Da limo sabbioso si passa a limo argilloso nello strato intermedio, quindi si incontra ancora limo sabbioso nello strato di fondazione.

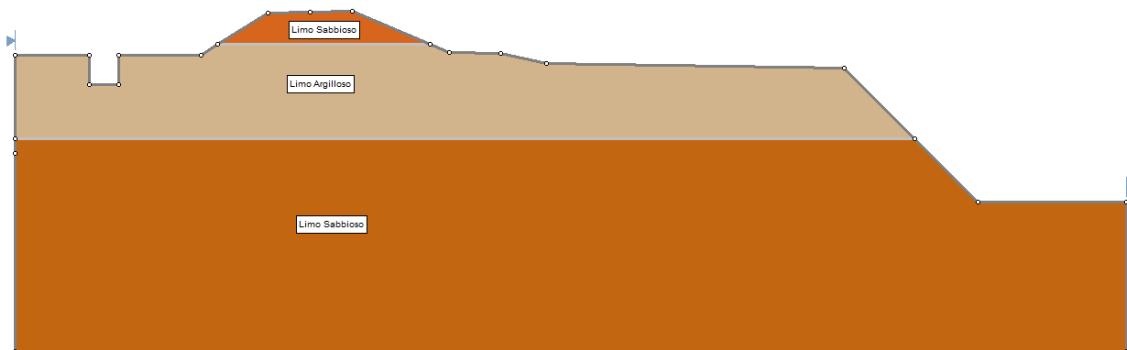


Figura 37: Sezione 1855 su "Slide"

## Sezione 2100

Questa sezione è rappresentativa del punto medio dell'arginatura, ed inoltre la linea di imbibizione 1:6 crea una sorgente sospesa al di sopra della banca intermedia a lato campagna:



Figura 38: Sezione Trasversale alla Progressiva 2100

In corrispondenza di essa però non è stata eseguita alcuna indagine geognostica, quindi i valori dei parametri meccanici attribuiti ad essa derivano dall'interpolazione lineare mediata sulla distanza dei valori caratteristici degli strati delle due sezioni più vicine a questa, la 1855 e la 2980.

Tabella 21: Parametri Meccanici Sezione 2100

	K [m/s]	Cu [kPa]	$\varphi$ [°]
<b>STRATO 1</b>	3.69E-05	1	40
<b>STRATO 2</b>	1.54E-07	112	3
<b>STRATO 3</b>	1.59E-05	0	36

Il primo strato è un terreno limoso con intrusioni sabbiose, lo strato intermedio è un limo con presenza di argilla al suo interno, mentre lo strato più profondo è nuovamente un limo sabbioso.

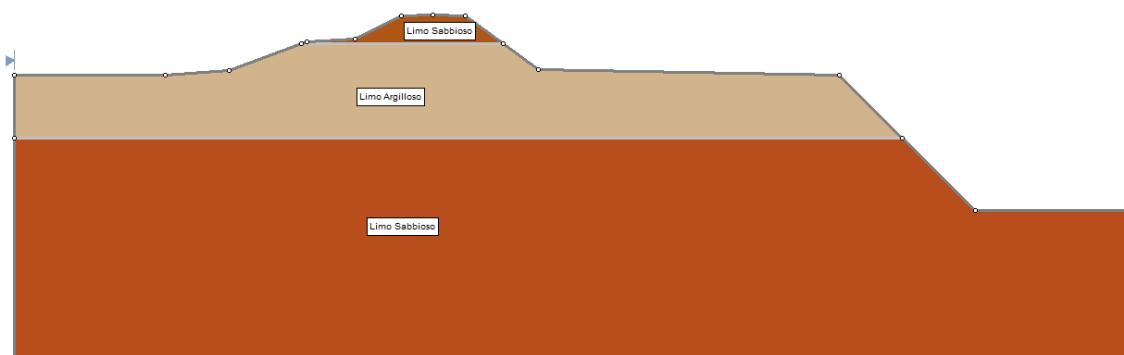


Figura 39: Sezione 2100 su "Slide"

## Sezione 2400

Questa sezione deve essere analizzata perché, come per la precedente, la linea di imbibizione 1:6 forma una sorgente sospesa a lato campagna, e questo può causare instabilità maggiori; è quindi stato rilevato il profilo della sezione:

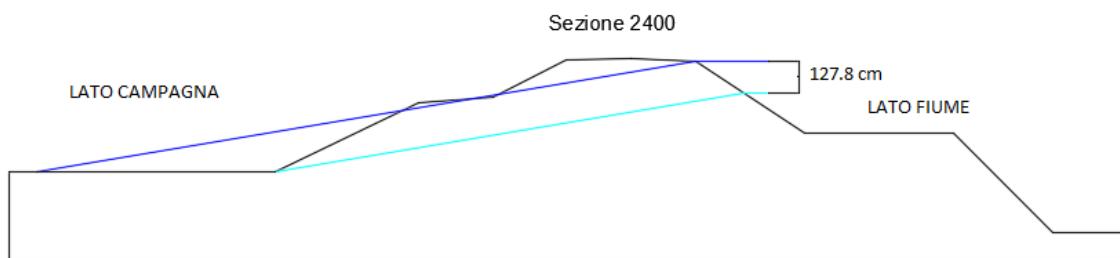


Figura 40: Sezione Trasversale alla Progressiva 2400

I valori dei parametri meccanici sono stati derivati dall'interpolazione lineare dei dati rilevati nelle sezioni più vicine, poiché in corrispondenza di questa sezione non è stata eseguita alcuna indagine geognostica.

Tabella 22: Parametri Meccanici Sezione 2400

	K [m/s]	Cu [kPa]	$\varphi$ [°]
<b>STRATO 1</b>	3.07E-05	3	39
<b>STRATO 2</b>	2.03E-07	106	4
<b>STRATO 3</b>	1.61E-05	0	36

Lo strato più superficiale è costituito da un limo sabbioso, quello intermedio da un limo molto argilloso, mentre il più profondo è nuovamente un limo sabbioso, probabilmente con maggiore presenza di sabbia, visto il valore nullo assunto dalla coesione non drenata.

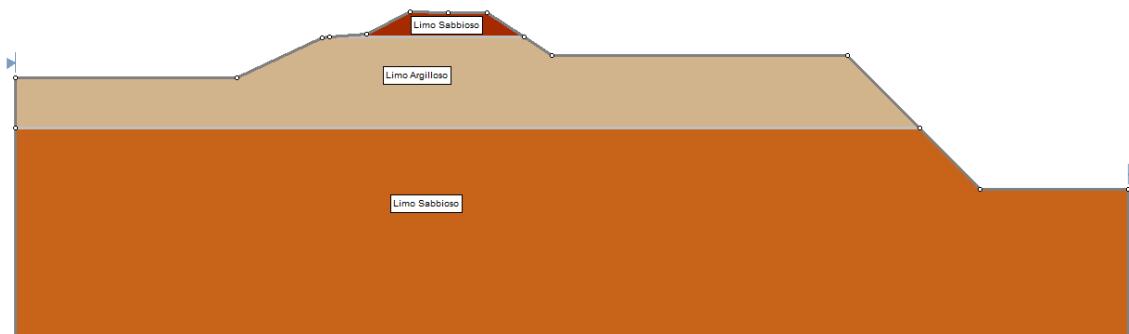


Figura 41: Sezione 2400 su "Slide"

## Sezione 2700

Anche questa sezione, come le precedenti, ha evidenziato la presenza di una sorgente sospesa in caso di carico stazionario al colmo dell'argine, quindi si è deciso di eseguire la verifiche di stabilità.

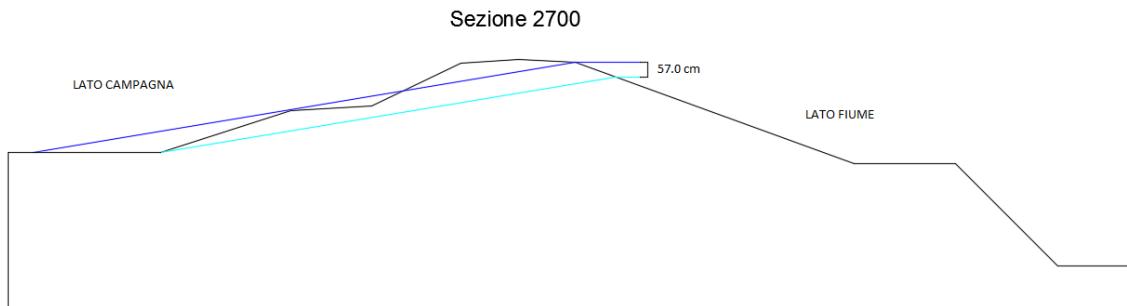


Figura 42: Sezione Trasversale alla Progressiva 2700

I calcoli per determinare i parametri meccanici, da attribuire ad ogni strato che la compone, sono riassunti nella tabella seguente:

Tabella 23: Parametri Meccanici Sezione 2700

	K [m/s]	Cu [kPa]	$\varphi$ [°]
<b>STRATO 1</b>	2.45E-05	4	38
<b>STRATO 2</b>	2.52E-07	100	5
<b>STRATO 3</b>	1.63E-05	0	36

Le litologie si mantengono coerenti con quelle attribuite alle sezioni precedenti: lo strato più superficiale risulta composto da un limo sabbioso, quello intermedio da un limo argilloso, mentre quello più profondo nuovamente da un limo sabbioso, con maggiore presenza di sabbia.

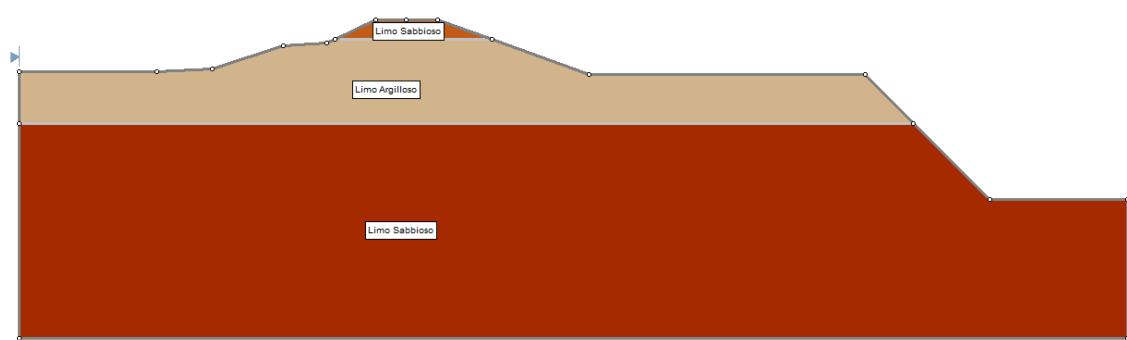


Figura 43: Sezione 2700 su "Slide"

## Sezione 2980

La sezione 2980 è stata indagata, durante l'ultima campagna di indagini geognostiche, attraverso tutte e quattro le tipologie di prove realizzate; si è deciso di applicare uno studio così approfondito su questa sezione poiché essa si trova in corrispondenza di un'abitazione situata ai piedi dell'arginatura, e se l'argine consortile cedesse in questo punto la costruzione sarebbe gravemente danneggiata, e si avrebbero probabilmente anche perdite di vite umane. Inoltre, l'arginatura in questo tratto non presenta la banca intermedia a lato campagna, è costituita solamente da un trapezio semplice, e questa geometria particolare può causare problematiche maggiori.



Figura 44: Sezione Trasversale alla Progressiva 2980

In corrispondenza del colmo di questa sezione è quindi stata eseguita una prova penetrometrica statica, fino alla profondità di 20 metri rispetto al coronamento; questa prova ha evidenziato la presenza di 3 litologie stratificate, i cui limiti si collocano a 1.15 metri ed a 7.13 metri di profondità. Dal grafico si vede che la resistenza alla punta misurata nel primo tratto corrisponde a quella di un terreno sabbioso o limoso, quella del tratto intermedio è la resistenza alla penetrazione posta da un terreno limoso-argilloso, mentre quella dello strato di fondazione è di nuovo una resistenza solitamente attribuita a sabbie o a limi con intrusioni di sabbia. Queste ipotesi iniziali, date dall'analisi del grafico di output, sono poi state confermate dallo studio dei valori numerici ad esso allegati.

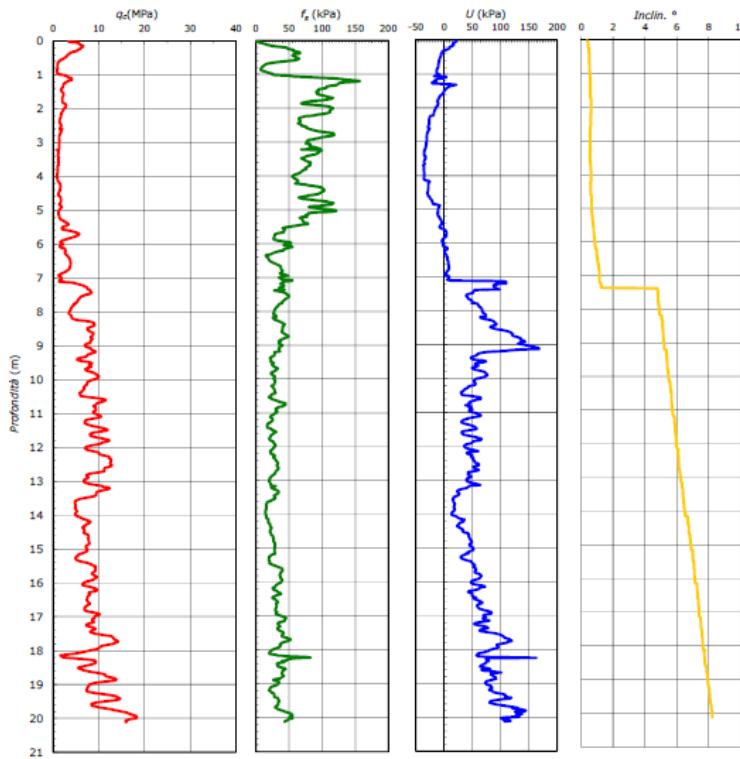


Figura 45: Grafici della Prova CPTU, Sezione 2980

Tabella 24: Parametri Meccanici Sezione 2980

	K [m/s]	Cu [kPa]	$\varphi$ [°]
<b>STRATO 1</b>	1.88E-05	6	36
<b>STRATO 2</b>	2.98E-07	95	6
<b>STRATO 3</b>	1.65E-05	0	36

Durante la prova di penetrazione statica è poi stata eseguita una prova di dissipazione, l'unica in questa campagna, ad una profondità di 7.36 metri; riferendosi ai risultati precedenti, si ipotizza che in questo punto del corpo arginale si abbia a che fare con un terreno prevalentemente sabbioso, ed anche questa prova conferma questi dati: la sovrappressione idraulica è stata dissipata in circa mezz'ora, e la permeabilità che è stata indicata come risultato è pari a  $2.76 \cdot 10^{-6}$  m/s. I due valori di permeabilità non presentano lo stesso ordine di grandezza, ma entrambi questi ordini sono attribuibili allo stesso tipo di terreno, quindi è più che ragionevole pensare che a questa profondità, quindi all'interno delle fondazioni del corpo arginale, si collochi uno strato di limo sabbioso. Per l'esecuzione delle verifiche si utilizza il valore di permeabilità maggiore, per essere a favore di sicurezza.

Il sondaggio a carotaggio continuo è stato eseguito ad una profondità compresa fra 2 e 3 metri rispetto al piano di coronamento, quindi all'interno dello strato intermedio, ed anche questa prova ha evidenziato la presenza di un terreno limo-argilloso in questa porzione del corpo arginale.

Lo stendimento geoelettrico ha confermato tutti i dati ricavati dalle prove precedenti, quindi la stratificazione dell'arginatura consortile si presenta come riportata in Figura 46:

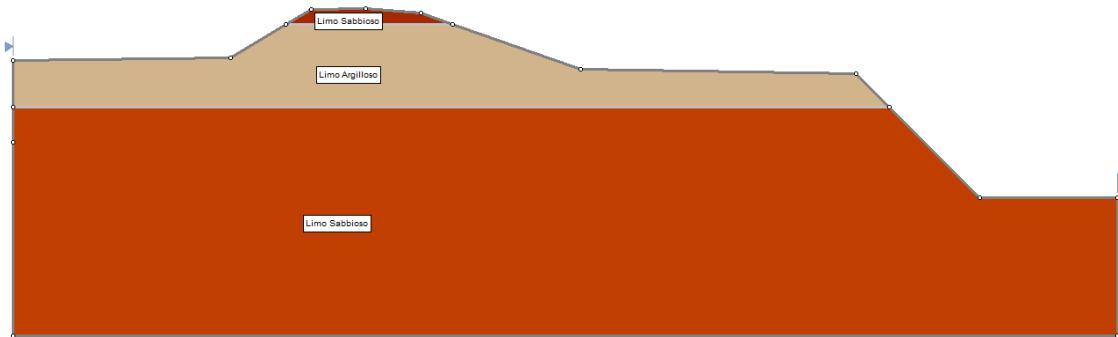


Figura 46: Sezione 2980 su "Slide"

## Sezione 3308

Questa sezione trasversale presenta la banca intermedia a lato campagna, e la linea di imbibizione teorica evidenzia la formazione di una sorgente sospesa sotto essa, ma il franco che permette alla stessa linea di rimanere completamente all'interno del corpo arginale è maggiore di 50 cm, quindi si è deciso di eseguire le verifiche di stabilità.

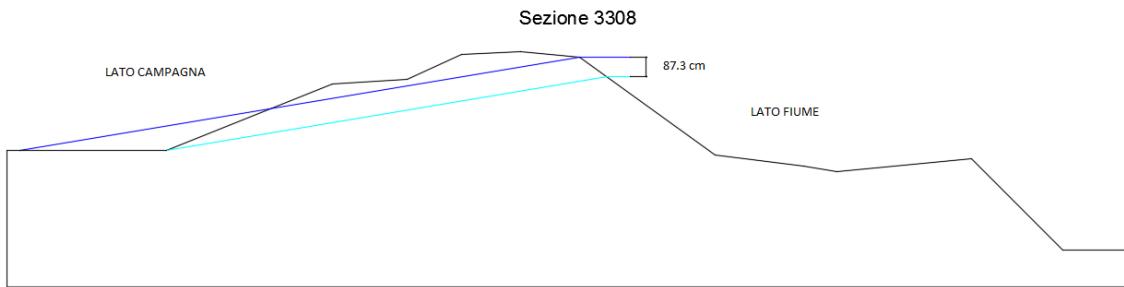


Figura 47: Sezione Trasversale alla Progressiva 3308

Non avendo eseguito su questa sezione nessuna indagine geognostica, i valori dei parametri meccanici sono stati ricavati per interpolazione:

Tabella 25: Parametri Meccanici Sezione 3308

	K [m/s]	Cu [kPa]	$\varphi$ [°]
<b>STRATO 1</b>	9.29E-06	1	39
<b>STRATO 2</b>	7.27E-08	108	1
<b>STRATO 3</b>	4.25E-06	21	29

Rimanendo in linea con i risultati delle altre sezioni, il primo strato risulta composto da limo sabbioso, lo strato intermedio da argilla, mentre quello più profondo nuovamente da limo sabbioso; la stratigrafia è riportata in Figura 48:

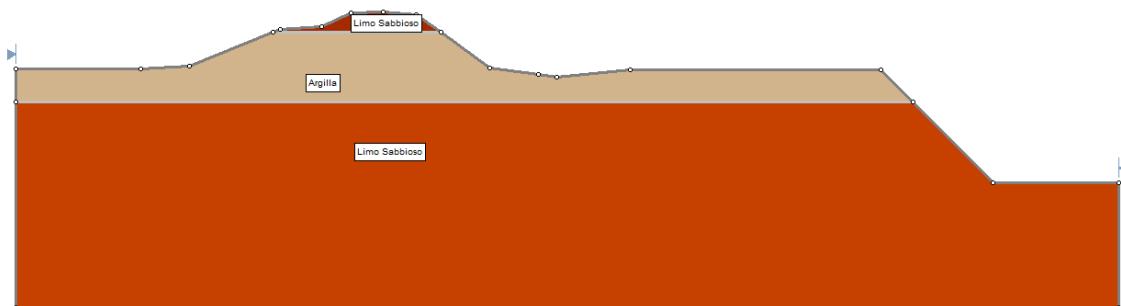


Figura 48: Sezione 3308 su "Slide"

## Sezione 3380

Questa sezione, come la precedente, presenta problemi per la linea di imbibizione 1:6, che forma una sorgente sospesa al di sotto della banca intermedia, e non rimane completamente all'interno del corpo arginale.

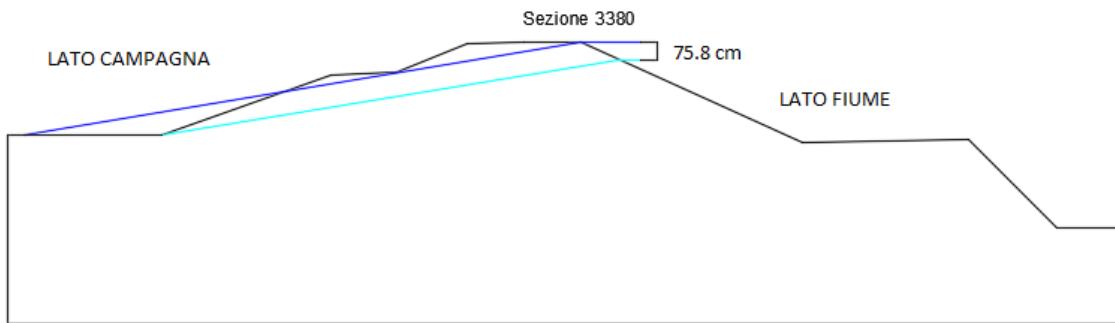


Figura 49: Sezione Trasversale alla Progressiva 3380

In corrispondenza di questa geometria, però sono state eseguite due prove durante la campagna di indagini: una prova penetrometrica ed uno stendimento geoelettrico; il grafico di output della prova CPTU ha rilevato in questo caso una differenza rispetto alle altre sezioni: la profondità raggiunta è stata di 15 metri rispetto al piano di coronamento, ed in questa porzione di corpo arginale sono state individuate 5 diverse litologie stratificate.

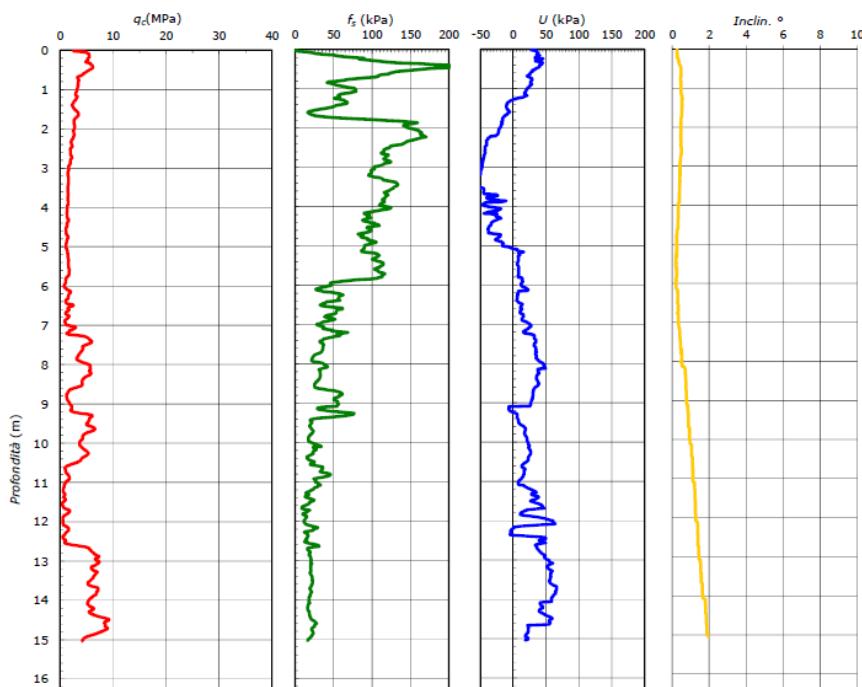


Figura 50: Grafici della Prova CPTU, Sezione 3380

Andando ad esaminare i valori numerici relativi a questo grafico si vede infatti che ad 1.77 metri di profondità si ha il primo cambiamento nei dati riportati, seguito poi da un secondo collocato a 7.27 metri, da un terzo a 10.51 metri, e dal quarto ed ultimo, posto a 12.61 metri sotto il colmo del coronamento; gli strati individuati sono quindi 5, ed i parametri meccanici assumono i valori riportati in Tabella 26.

Tabella 26: Parametri Meccanici Sezione 3380

	<b>K [m/s]</b>	<b>Cu [kPa]</b>	<b><math>\varphi</math> [°]</b>
<b>STRATO 1</b>	7.20E-06	0	40
<b>STRATO 2</b>	2.29E-08	111	0
<b>STRATO 3</b>	1.55E-06	25	27
<b>STRATO 4</b>	4.27E-09	60	0
<b>STRATO 5</b>	5.79E-06	0	34

Interpretando i valori riportati in tabella, poi confermati dallo stendimento geoelettrico, si può dire che il primo strato è costituito da un limo sabbioso, il secondo da un limo fortemente argilloso, il terzo da un limo sabbioso, che contiene però meno sabbia rispetto a quello più superficiale, il quarto da un'argilla, mentre quello di fondazione è nuovamente un limo fortemente sabbioso.

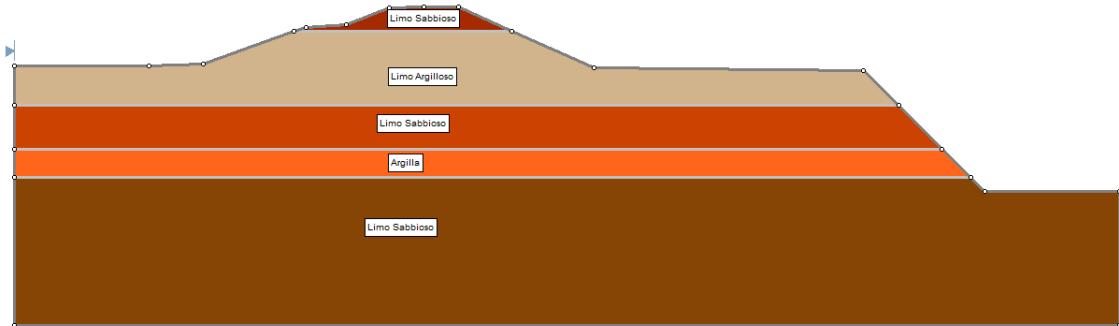


Figura 51: Sezione 3380 su "Slide"

## Sezione 3600

La problematica relativa a questa sezione trasversale è la formazione di una sorgente sospesa al di sopra della banca intermedia collocata a lato campagna, e si è per questo deciso di eseguire su essa le verifiche di stabilità.

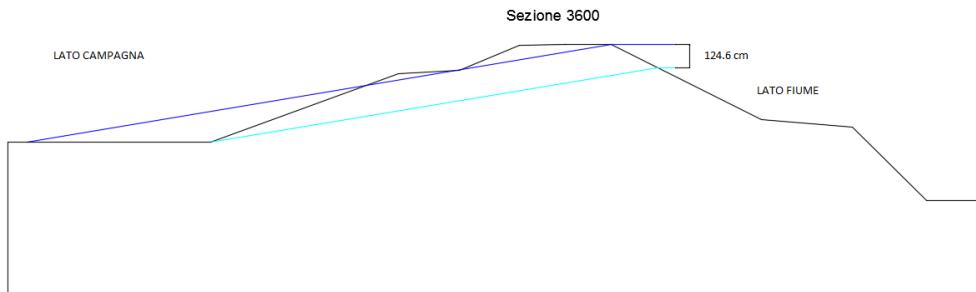


Figura 52: Sezione Trasversale alla Progressiva 3600

La campagna di indagini geognostiche non ha però previsto alcuna prova da eseguire in corrispondenza di questa sezione, quindi i valori attribuiti ai parametri meccanici sono ricavati tramite interpolazione mediata sulla distanza.

Tabella 27: Parametri Meccanici Sezione 3600

	K [m/s]	Cu [kPa]	$\varphi$ [°]
<b>STRATO 1</b>	1.14E-05	28	27
<b>STRATO 2</b>	2.19E-08	102	0
<b>STRATO 3</b>	6.91E-06	27	28

La stratificazione ricavata in questo modo ricalca quella riscontrata nelle altre sezioni: lo strato più superficiale presenta una permeabilità caratteristica di un limo fortemente sabbioso, quello intermedio ha i dati corrispondenti a quelli di un limo prevalentemente argilloso, mentre la litologia di fondazione è ancora un limo sabbioso, ma con presenza di meno sabbia rispetto a quello in sommità.

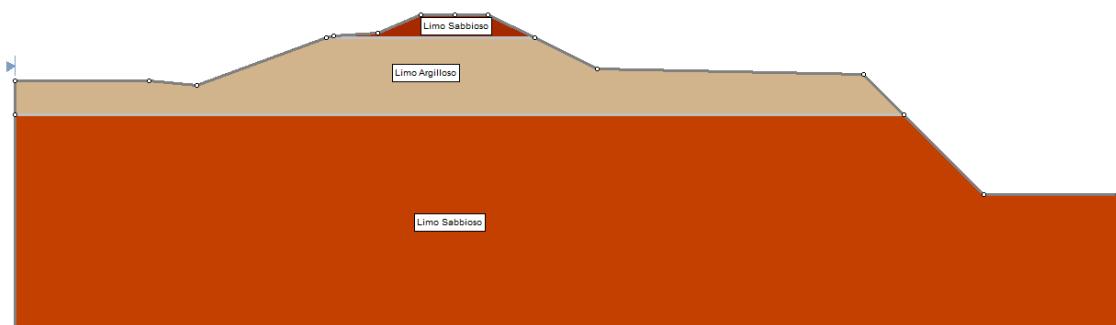


Figura 53: Sezione 3600 su "Slide"

## Sezione 3900

Questa sezione è rappresentativa della parte terminale dell'argine consortile, e si trova infatti poco distante dall'innesto fra questo e l'arginatura maestra, a Brescello; si è deciso di eseguire su essa le verifiche di stabilità per questa sua caratteristica rappresentativa, ma soprattutto perché in questa porzione l'argine è costituito da un trapezio semplice, non presentando la banca intermedia a lato campagna, e la linea di imbibizione teorica forma una sorgente sospesa al di sopra dell'unghia arginale. Tutti questi elementi possono portare a potenziali instabilità.



Figura 54: Sezione Trasversale alla Progressiva 3900

In corrispondenza di questa sezione è stata realizzata una prova penetrometrica statica, ma è risultato impossibile eseguirla al centro del coronamento arginale, poiché questo ultimo tratto della parte sommitale della struttura è asfaltato, per permettere alle auto una più agevole uscita dalla golena; la presenza di una sovrastruttura stradale è visibile anche dal grafico risultante dalla prova CPTU:

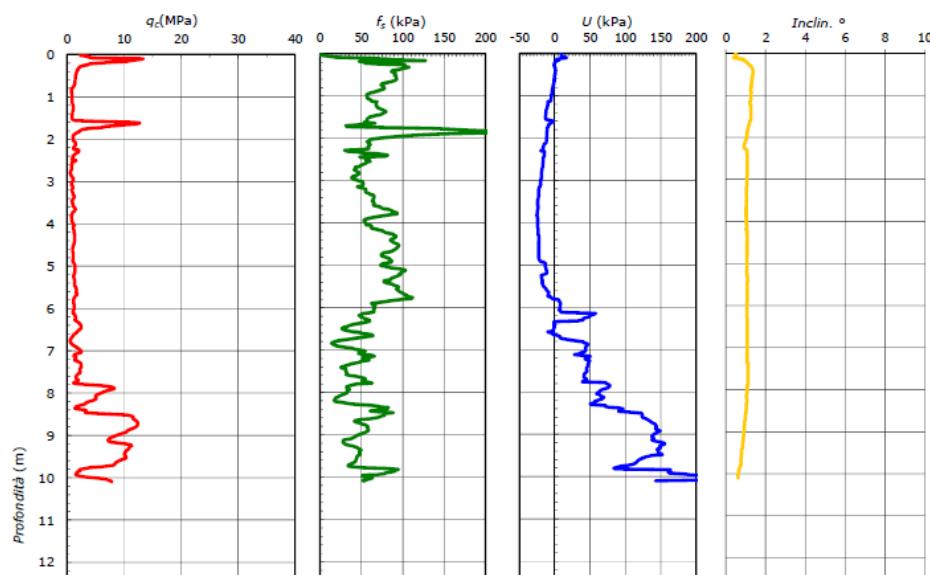


Figura 55: Grafici della Prova CPTU, Sezione 3900

Nel grafico rappresentativo della resistenza alla punta si evidenzia infatti un picco di valore molto elevato nei primi centimetri, e questo indica la presenza di una formazione più compatta, associabile alla presenza della strada; al di sotto di questo picco si vede che la resistenza si attesta al di sotto dei 2 MPa fino alla profondità di 7.79 metri, con l'eccezione di un picco rilevato a 1.65 metri al di sotto del piano di inizio delle prove. Dalla tabella allegata al grafico, si vede che i centimetri superficiali influenzati dalla presenza della strada sono 30, quindi si è deciso, in questo caso, di non prendere in considerazione questo spessore, e di suddividere il corpo arginale in due stratificazioni sovrapposte: la prima parte dalla profondità di 30 cm, mentre la seconda ha inizio a 7.79 metri al di sotto del piano di coronamento, e prosegue fino al termine della prova.

I parametri meccanici ricavati assumono quindi i valori riportati in Tabella 28:

Tabella 28: Parametri Meccanici Sezione 3900

	K [m/s]	Cu [kPa]	$\varphi$ [°]
<b>STRATO 1</b>	3.05E-06	86	1
<b>STRATO 2</b>	1.42E-05	29	30

Tutto il corpo arginale risulta quindi composto da un limo sabbioso, con più evidente inclusione di sabbia nello strato più profondo.

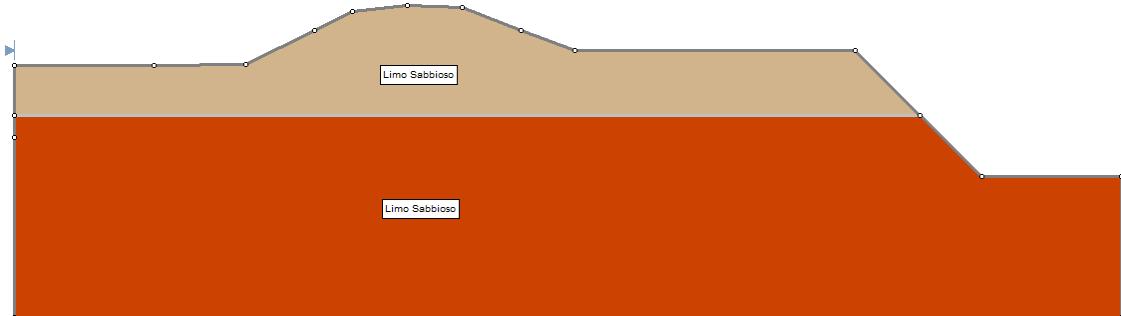


Figura 56: Sezione 3900 su "Slide"

# Capitolo 5: Le Verifiche di Stabilità

## Il Metodo agli Elementi Finiti

Tutte le verifiche di stabilità sono eseguite dal programma “Slide” attraverso un’analisi agli ELEMENTI FINITI; il metodo agli elementi finiti consiste in una tecnica numerica in grado di trovare soluzioni approssimate per problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali, andando a ridurre queste ultime ad un sistema di più semplici equazioni algebriche.

Nel caso oggetto di studio, l’implementazione del problema con la tecnica degli elementi finiti è idonea poiché le condizioni al contorno del problema sono variabili, ed inoltre l’accuratezza richiesta alla soluzione non è omogenea sul dominio: è importante conoscere precisamente quello che succede sul contorno delle sezioni, soprattutto a lato campagna, mentre nel corpo arginale la dinamica del flusso idrico è marginale.

Con questo metodo matematico, i corpi fisici vengono suddivisi in un certo numero di elementi, di forma definita e dimensioni contenute, la cui somma deve restituire il dominio stesso, ed ogni singolo elemento viene considerato come un campo di integrazione a sé stante, avente caratteristiche omogenee:  $K$ , ad esempio, può variare da elemento ad elemento, ma all’interno di ogni elemento deve essere costante. Questa suddivisione avviene attraverso la creazione di una griglia, chiamata mesh, la quale è composta da elementi di forma codificata, come triangoli a 3 o a 6 nodi per i domini bidimensionali. Su ogni elemento avente la forma decisa, la soluzione del problema è espressa come una combinazione lineare di funzioni di base, quindi l’equazione viene risolta in un numero finito di punti di calcolo: quando si lavora su un problema discretizzato, la soluzione si calcola solamente su alcuni punti.

La soluzione definitiva del metodo, in questo caso, deriva dalla formulazione in termini di “residui pesati”: la funzione nei punti di calcolo può essere approssimata, quindi i valori calcolati nei punti in questo caso non sono quelli esatti, ma sono quelli che forniscono il minor errore su tutta la soluzione.

Il metodo si applica ad un'equazione differenziale del tipo:

$$L(\varphi(x, y, z)) - G(x, y, z) = 0$$

In questa,  $L$  è l'operatore differenziale che agisce sulla funzione  $\varphi$  delle tre coordinate spaziali  $(x, y, z)$ ; una soluzione approssimata per l'equazione differenziale iniziale è  $\varphi'$ :

$$\varphi = \varphi'(x, y, z)$$

Ma andando a sostituire nell'equazione differenziale di partenza questa soluzione approssimata al posto della funzione  $\varphi$ , l'equazione non è soddisfatta, perché  $\varphi'$  non è la soluzione esatta:

$$L(\varphi'(x, y, z)) - G(x, y, z) \neq 0$$

Il risultato di questa equazione è quindi diverso da 0, ed il residuo risultante da essa viene chiamato  $r(x, y, z)$ :

$$r(x, y, z) = L(\varphi'(x, y, z)) - G(x, y, z) \neq 0$$

Il residuo è quindi il risultato che deriva, per ogni punto, dall'utilizzo di una soluzione approssimata nell'equazione differenziale di partenza; questo valore è diverso per ogni punto del dominio di calcolo, ed imporlo nullo in alcuni punti potrebbe aumentarlo in altri. Per questo si impone che il residuo, pesato in modi opportuni, sia mediamente nullo in tutto il dominio:

$$\int_{\Omega} W(x, y, z) \cdot r(x, y, z) \cdot d\Omega = 0$$

$W(x, y, z)$  è la funzione che definisce la modalità dell'operazione di "peso del residuo", ed imponendo che quest'ultima equazione sia soddisfatta si ricava la soluzione approssimata  $\varphi'$ . Per ogni punto di calcolo si impone che questa espressione sia verificata, ed essendo essa un integrale applicato su elementi finiti aventi caratteristiche omogenee e funzioni semplificate, lo stesso integrale si riduce ad un'equazione algebrica; il risultato finale è quindi un sistema di equazioni algebriche, da risolvere con i metodi del calcolo numerico.

Nel caso in esame il dominio di calcolo è bidimensionale, e per questo si è deciso di utilizzare come elementi di calcolo i triangoli a 6 nodi; la mesh viene generata in automatico dal codice di calcolo, che la rende più fitta nei punti in cui l'analisi deve essere più accurata.

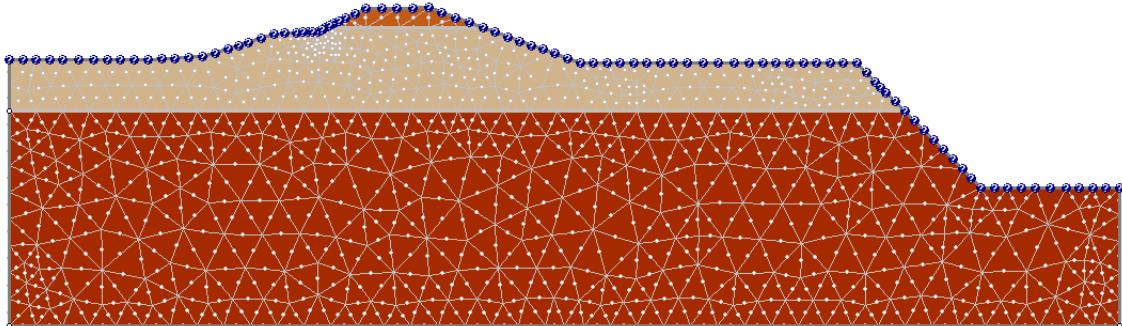


Figura 57: Visualizzazione della Mesh Automatica Generata dal Programma in una Sezione

Si può infatti notare come gli elementi abbiano dimensioni maggiori all'interno del corpo arginale, mentre siano di dimensioni minori, quindi in un numero maggiore, sul contorno della sezione, e nei punti in cui si hanno condizioni particolari, come cambiamenti di pendenza o si incontrano i limiti delle stratificazioni; il limite di stratificazione è una caratteristica molto importante all'interno del dominio di calcolo, poiché gli elementi devono avere al loro interno caratteristiche omogenee, quindi non può esistere un elemento che attraversa questi limiti, non potendo avere caratteristiche diverse al suo interno.

Le condizioni al contorno sulla sezione sono variabili: alcune sono note, e sono quelle imposte all'inizio della simulazione, per eseguire i calcoli, mentre altre sono incognite, poiché durante l'applicazione del metodo non si conoscono a priori i punti in cui si avrà un carico idrico dato dalla filtrazione, e l'entità dello stesso.

Tutte le verifiche di tipo idraulico verranno eseguite applicando questo metodo di calcolo numerico.

## I Metodi dell'Equilibrio Limite

Per eseguire la verifica di stabilità geotecnica del pendio, quindi per determinarne il valore del fattore di sicurezza, il codice di calcolo si basa su metodi chiamati DELL'EQUILIBRIO LIMITE; con questi metodi il pendio da analizzare viene suddiviso in conci di larghezza infinitesima, ed è su essi che si vanno ad implementare i calcoli di equilibrio delle forze. Su ogni concio vengono applicate forze variamente inclinate, e queste rappresentano forze "proprie" di ogni concio, come il peso, o come la spinta che il terreno sottostante oppone al peso stesso, e forze "di interstriscia" che i conci adiacenti si scambiano tra loro:

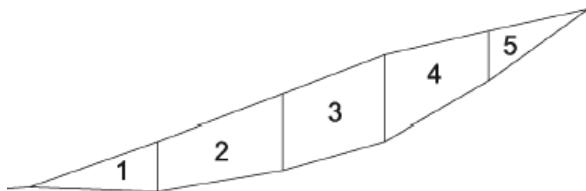


Figura 58: Suddivisione del Pendio in Conci

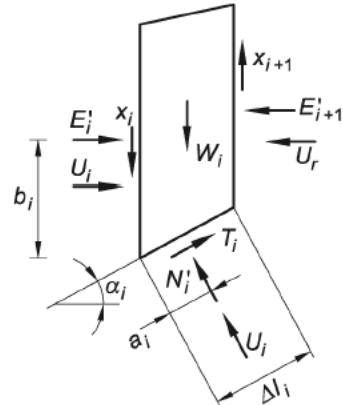


Figura 59: Forze Applicate su Ogni Concio

Le incognite nella soluzione di questo problema di stabilità sono:

- $n$  forze  $N'_i$ , perché sono forze applicate su ogni concio;
- $(n-1)$  componenti  $E'_i$  e  $X_i$ , perché sono forze che i conci adiacenti si scambiano fra loro;
- $n$  coordinate  $a_i$ , per definire il punto di applicazione delle forze  $N'_i$ ;
- $(n-1)$  coordinate  $b_i$ , per definire il punto di applicazione delle componenti  $E'_i$ ;
- 1 fattore di sicurezza  $F_s$ .

Il numero delle incognite è quindi pari a  $(5n-2)$ , mentre le equazioni di equilibrio applicabili su ogni concio sono 3: equilibrio alla traslazione verticale, orizzontale, ed alla rotazione; avendo a disposizione  $3n$  equazioni, il problema non è staticamente

determinato. Ogni metodo cerca di superare il problema dell'indeterminatezza statica in modi diversi, e questa metodologia è la differenza sostanziale tra i singoli metodi di analisi. I metodi RIGOROSI cercano n-2 equazioni supplementari che possano pareggiare il numero di equazioni ed incognite, mentre i metodi SEMPLIFICATI adottano procedure di semplificazione più drastiche, ponendo uguale a zero alcune delle forze che agiscono sulle strisce; in questo modo si riduce il numero delle incognite, ma la soluzione a cui si perviene con questi metodi non è equilibrata: dopo aver determinato il fattore di sicurezza, le forze calcolate non soddisfano le condizioni di equilibrio dell'intero cuneo di terreno.

Il codice di calcolo utilizzato per eseguire le verifiche ci mette a disposizione due metodi per eseguire il calcolo del fattore di sicurezza, entrambi semplificati: il metodo di BISHOP SEMPLIFICATO, e quello di JANBU SEMPLIFICATO; si è scelto di utilizzare il metodo di Bishop poiché esso rientra fra i metodi semplificati che, per il calcolo di  $F_s$ , utilizzano l'equazione di equilibrio alla rotazione dell'intero cuneo di terreno: questi metodi considerano superfici di scivolamento circolari, la condizione di equilibrio alla rotazione viene calcolata attorno ad un centro O, e le forze  $N'_i$  non intervengono nel calcolo, in quanto sono forze radiali. Il metodo di Janbu, invece, si adatta a superfici non circolari, e rientra nella categoria dei metodi "delle forze".

Nel metodo di Bishop rigoroso, l'equilibrio di partenza è quello alla rotazione, e con esso si arriva ad un'espressione del fattore di sicurezza per tutto il pendio:

$$F_s = \frac{\sum(c' \cdot \Delta l_i + N'_i \tan \varphi')}{\sum W_i \sin \alpha_i}$$

Si utilizza poi l'equilibrio alla traslazione verticale di ogni striscia, e si ottiene un'espressione di  $N'_i$  in cui  $F_s$  compare sia al numeratore, sia al denominatore, quindi è un'espressione implicita in  $F_s$ :

$$N'_i = \frac{W_i + \Delta X_i - U_{bi} \cos \alpha_i - F_s^{-1} c' \Delta l_i \sin \alpha_i}{\cos \alpha_i + F_s^{-1} \sin \alpha_i \tan \varphi'}$$

Attraverso numerosi passaggi matematici rigorosi, con l'ausilio del coefficiente  $m_{\alpha i}$ , si perviene ad un'espressione esplicita del fattore di sicurezza:

$$F_s = \frac{\sum(c' b_i + (W_i - U_{bi} \cos \alpha_i) \tan \varphi' + \Delta X_i \tan \varphi') m_{\alpha i}^{-1}}{\sum W_i \sin \alpha_i}$$

Il metodo di Bishop rigoroso soddisfa quindi l'equilibrio alla rotazione intorno al punto O, e contemporaneamente le due equazioni di equilibrio alla traslazione.

Il metodo di Bishop semplificato, invece, pone le forze verticali di interstriscia  $X_i$  pari a 0, ponendo per ipotesi che un concio ed il successivo possano scorrere liberamente uno sull'altro; attraverso questa semplificazione, l'espressione del fattore di sicurezza perde una componente:

$$F_s = \frac{\sum(c' b_i + (W_i - U_{bi} \cos \alpha_i) \tan \varphi') m_{\alpha i}^{-1}}{\sum W_i \sin \alpha_i}$$

Con questo metodo semplificato il programma esegue tutte le simulazioni, e restituisce come output il fattore di sicurezza minimo calcolato per il pendio in esame:

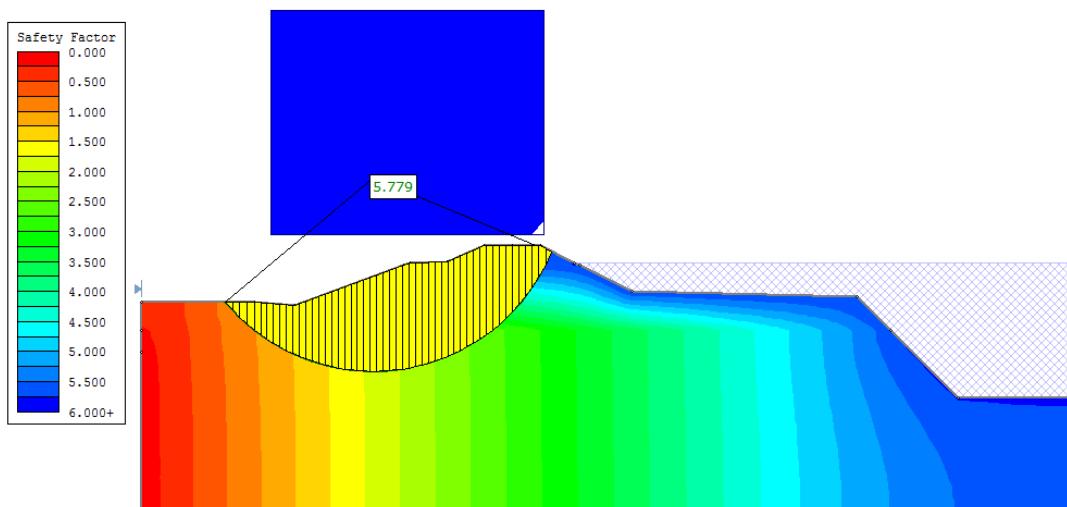


Figura 60: Risultato dell'Applicazione del Metodo di Bishop Semplificato

Affinché il pendio sia stabile, il fattore di sicurezza minimo deve essere maggiore di 1.

## Verifica 1: L'Argine come una Diga in Terra - Regime Stazionario

Durante una piena fluviale, l'argine goleale si deve comportare come una diga costruita in terra, quindi al suo interno non deve avvenire una filtrazione tale da permettere il passaggio di acqua dal lato fiume al lato campagna; questo è importante perché la filtrazione potrebbe portare acqua all'interno della golena, ed il passaggio di una corrente ad alta velocità all'interno del corpo arginale ne ridurrebbe la resistenza, agevolando la rottura della struttura, e causando allagamenti non preventivamente annunciati.

L'obiettivo della prova è quindi quello di determinare una quota di sicurezza in regime stazionario, ed individuare le sezioni più critiche; la prova non rispecchia una situazione reale, ma una condizione molto più gravosa di quelle che si potrebbero realizzare sulla struttura, poiché non vi sarà mai un carico gravante sulla struttura elevato come quello simulato. Ci si pone in questo modo a favore di sicurezza, andando ad ipotizzare una situazione molto peggiore rispetto a quelle reali, ed anche i valori dei parametri meccanici sono sempre stati assunti in modo cautelativo: se le permeabilità attribuibili ad uno strato erano due, derivanti da due diverse tipologie di prove, si è sempre scelto quello maggiore, perché una più alta permeabilità crea più problemi all'interno dell'arginatura.

Per verificare che questo non accada, in corrispondenza delle sezioni appena descritte sono state implementate verifiche di tipo stazionario:

1. Come prima cosa si è imposto un carico idrico stazionario a lato fiume, pari al punto più alto dell'arginatura; vista la conformazione interna degli argini, è facile aspettarsi che con un carico di questo tipo la filtrazione avvenga, soprattutto attraverso lo strato più superficiale, che è più permeabile. Si deve quindi verificare che l'acqua non entri in golena passando all'interno del corpo arginale, o creando un fenomeno di SIFONAMENTO: questo è dato da un'infiltrazione di acqua al piede di un rilevato arginale, e può causare un franamento locale di parte dell'opera, ed è causato dalla risalita verticale di fluido in un suolo che non è in grado di opporsi a tale spinta; il risultato è la rottura degli strati superficiali di terreno, seguita da inondazione. Anche questo fenomeno è quindi legato alla

filtrazione, che varia il regime delle pressioni, ed è innescato da una differenza di pressione tra monte e valle della struttura, come nel caso studiato.

2. Se questo succede, si deve abbassare il carico idrico, risultante da un'ipotetica piena stazionaria, fino al punto in cui non si abbiano più fenomeni di filtrazione che causino l'ingresso di acqua in golena; a questo punto l'argine funziona come una diga in terra, e si conosce così la quota massima a cui la struttura può resistere senza rotture per imbibizione.
3. Contemporaneamente a queste verifiche di tipo idraulico si esegue anche la verifica di stabilità di tipo geotecnico, per assicurarsi che il pendio a lato campagna sia stabile anche in presenza di acqua all'interno del corpo arginale, e che l'eventuale filtrazione non causi rotture della struttura: il programma ricerca tutte le possibili superfici di scivolamento su questo versante, e restituisce il valore minimo del fattore di sicurezza.

Questo tipo di verifica è stata implementata, attraverso il codice di calcolo, su tutte le sezioni significative, e per eseguire le simulazioni è stata utilizzata la funzione del programma detta “Groundwater Seepage”; grazie ad essa è possibile impostare diverse condizioni idrauliche sul contorno esterno della struttura: a lato campagna, all'interno del sottosuolo, vi è la condizione di livello di falda stazionario, il quale è stato ricavato dalle prove CPTU mediamente pari a 20.1 metri s.l.m., mentre a lato fiume possono essere imposti i diversi carichi idrici dati dalle piene simulate. Anche questi carichi sono considerati stazionari, quindi presenti a quel livello per un tempo infinito, ed il programma restituisce come risultato la linea di imbibizione che si innesca dal lato fiume a quello campagna; è anche possibile inserire delle sezioni verticali, sovrapposte alla sezione indagata, per conoscere l'eventuale quantità di acqua persa con la formazione della sorgente sospesa.

Dopo aver impostato e verificato le condizioni che si innescano con il carico idrico massimo, pari al punto più alto dell'arginatura a lato fiume, si procede andando a diminuire lo stesso, con passo pari a 50 cm, fino al raggiungimento della completa stabilità.

## Sezione 43

Il carico idrico iniziale viene posto pari a 29.48 metri, a lato fiume, ed il programma mostra la presenza di una evidente sorgente sospesa; la fuoriuscita di acqua è evidenziata dalla presenza delle sezioni verticali, poiché quella posta al centro dell'arginatura registra il passaggio di una quantità di acqua molto maggiore rispetto a quella che interseca la sezione nella parte terminale a lato campagna: questo significa che una parte dell'acqua che si infiltrava viene persa a causa della fuoriuscita dal corpo arginale.

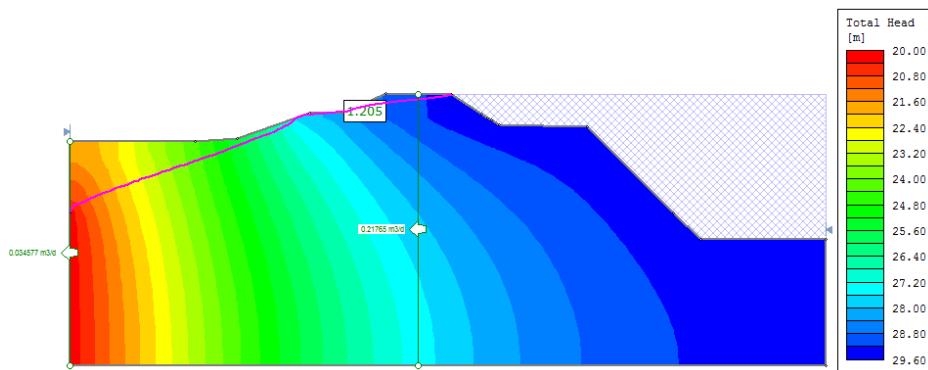


Figura 61: Risultato della Simulazione con Carico=29.48 m, Sezione 43

Visualizzando la velocità di filtrazione, attraverso una funzione del programma, è possibile vedere che la velocità di uscita dell'acqua è bassa, inferiore a 20 cm/giorno, quindi la filtrazione non causa trasporto solido all'interno del corpo arginale, e per questo non si hanno cedimenti della struttura.

Si procede ora imponendo un franco di 50 cm, ed in questo modo il carico idraulico risulta pari a 28.98 metri; la sorgente sospesa però permane nelle simulazioni fino a quando non si raggiunge la quota di 27.48 metri, per la quale si ottiene una distanza significativa tra la linea di imbibizione ed il contorno della sezione a lato campagna.

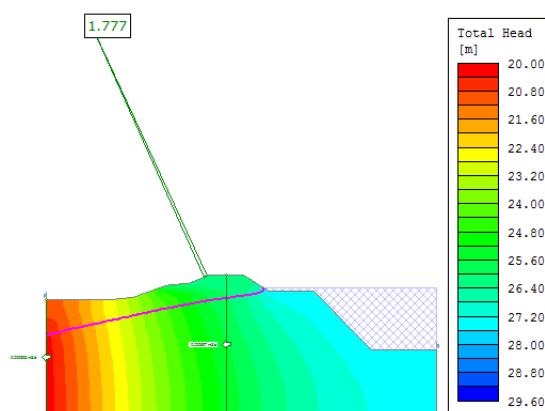


Figura 62: Risultato della Simulazione con Carico=27.48 m, Sezione 43

Da questa simulazione risulta che la quantità di acqua entrante ed uscente dalle sezioni di controllo verticali è la stessa (il fatto che sia lievemente maggiore quella uscente è causato da un errore del programma), e da questo si deduce che non si verifica più la formazione di una sorgente sospesa; in questa sezione l'argine si comporta quindi come una diga in terra fino al raggiungimento di un carico idrico pari a 27.48 metri.

Grazie alle simulazioni si verifica anche la completa stabilità del pendio a lato campagna, anche in presenza dell'acqua di infiltrazione: il coefficiente di sicurezza per le verifiche a stabilità assume il valore minimo in presenza della sorgente sospesa, pari a 1.205, il quale aumenta quando la filtrazione non attraversa più il corpo arginale.

## Sezione 1250

Il carico idrico iniziale a lato fiume è posto pari a 29.43 metri, ed in questo caso non si ha la formazione di una sorgente sospesa:

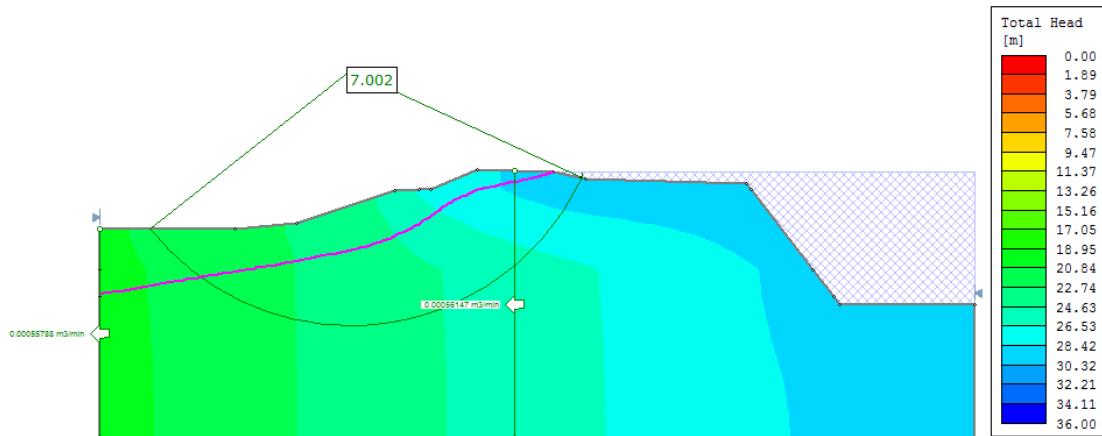


Figura 63: Risultato della Simulazione con Carico=29.43 m, Sezione 1250

Non è quindi necessario imporre nessun franco di sicurezza, poiché si è già ottenuta una condizione di stabilità; la leggera differenza nelle due quantità di acqua registrate dalle sezioni di controllo dipende dall'esecuzione delle simulazioni da parte del programma, ma è una differenza ininfluente ai fini della verifica eseguita.

Anche per questa sezione il pendio a lato campagna è completamente stabile, con un fattore di sicurezza pari a 7.002 nella condizione di carico più gravosa.

## Sezione 1680

Il carico idraulico iniziale è pari a 29.74 metri, ma questa sezione è in una condizione geometrica più favorevole rispetto alle precedenti: infatti nelle due sezioni studiate fino ad ora il punto più alto a lato campagna si colloca ad una quota maggiore rispetto a quello più alto a lato fiume, quindi si hanno centimetri di franco in più, mentre in questo caso il coronamento è costituito da un tratto orizzontale, e questi centimetri aggiuntivi vengono a mancare.

Si imposta comunque la simulazione come nelle analisi precedenti:

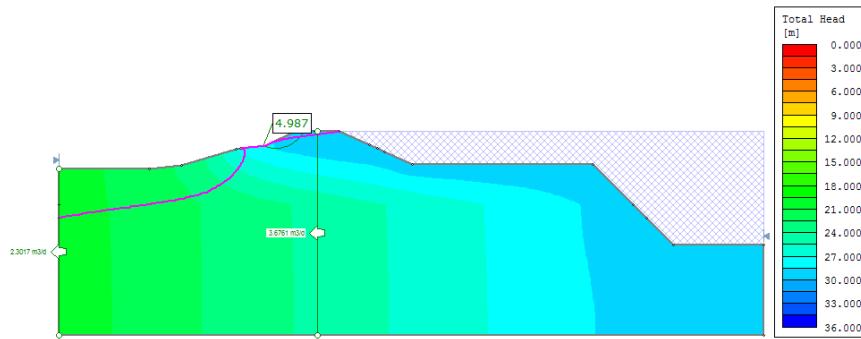


Figura 64: Risultato della Simulazione con Carico=29.74 m, Sezione 1680

In questo caso è visibile la formazione della sorgente sospesa, e la velocità con cui l'acqua fuoriesce dal corpo arginale è variabile, pari fino a 85 cm/giorno, ma non si hanno comunque fenomeni di trasporto solido all'interno del corpo arginale. Si procede lo studio imponendo carichi diminuiti progressivamente di 50 cm, e si ottiene che la condizione per la quale la filtrazione non consente il passaggio dell'acqua a lato campagna si ha con un carico idraulico pari a 28.24 metri:

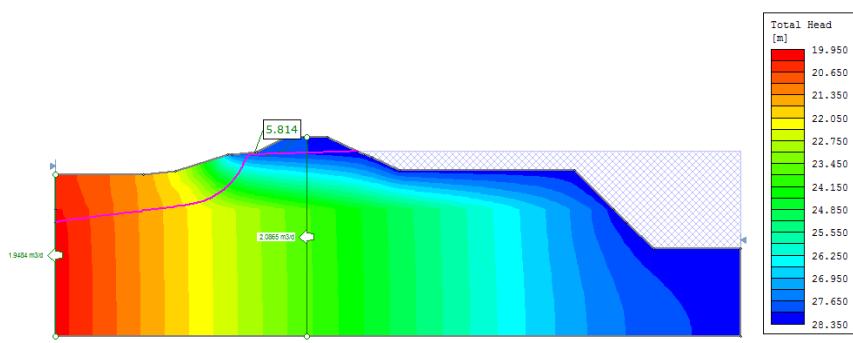


Figura 65: Risultato della Simulazione con Carico=28.24 m, Sezione 1680

La stabilità geotecnica è sempre verificata, con un fattore di sicurezza superiore a 1: 4.987 nella condizione di carico massimo, e 5.814 per il carico massimo di sicurezza.

## Sezione 1855

Il carico idrico iniziale imposto è quello di 29.66 metri, e questo è anche il valore della quota massima che si raggiunge nel coronamento in questa sezione, quindi il tratto sommitale è inclinato verso il lato campagna; imponendo questo carico si hanno diversi problemi: si ha la formazione di una sorgente sospesa, ed inoltre il pendio a lato campagna non è in condizioni di stabilità, essendo il fattore di sicurezza pari a 0.464.

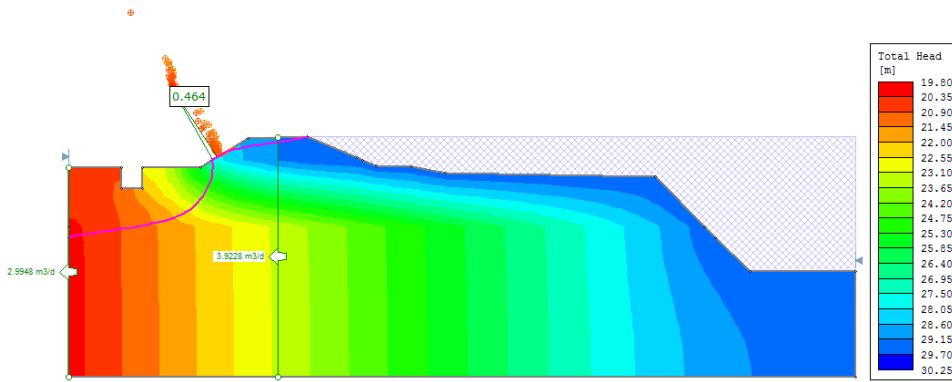


Figura 66: Risultato della Simulazione con Carico=29.66 m, Sezione 1855

Il fattore di sicurezza mostra quindi la presenza di superfici di scivolamento, ma esse sono concentrate nella parte più superficiale del pendio, quindi non destano particolari preoccupazioni: nelle simulazioni eseguite non è stato inserito il cotico erboso di graminacee che ricopre l'arginatura, ma nella realtà esso, con le sue radici, contribuisce alla stabilità della superficie dei versanti, quindi questi scivolamenti potrebbero non essere reali, perché impediti dalle radici. La possibile instabilità superficiale del versante nella parte sommitale della struttura può essere causata dall'elevata velocità di filtrazione all'interno del corpo arginale: l'acqua raggiunge quasi i 2 metri/giorno, quindi si deve necessariamente abbassare il carico idraulico, per avere una condizione di sicurezza.

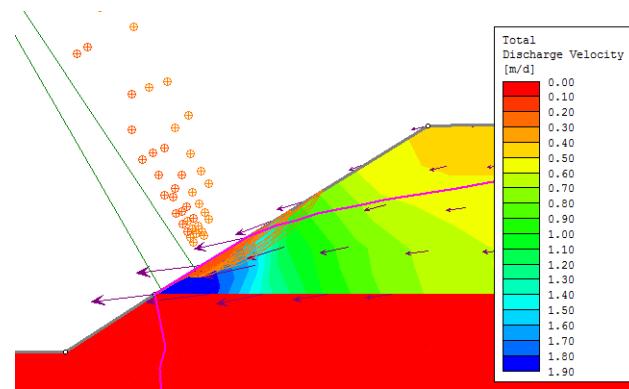


Figura 67: Ingrandimento Sorgente Sospesa, con Velocità di Filtrazione, Sezione 1855

La stabilità del pendio è raggiunta già con l'abbassamento del carico a 29.16 m, quindi imponendo un franco di 50 cm al coronamento, mentre per impedire che l'acqua di infiltrazione arrivi all'interno della golena si deve ulteriormente ridurre il carico, fino ad una quota di 27.66 metri.

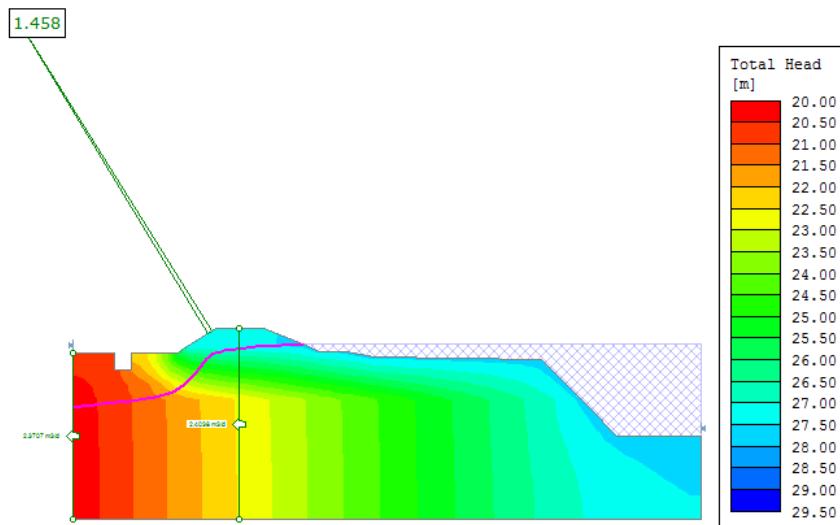


Figura 68: Risultato della Simulazione con Carico=27.66 m, Sezione 1855

Il fattore di sicurezza per la stabilità del pendio non è superiore ad 1.5 nemmeno quando non si ha più sorgente sospesa: il valore massimo raggiunto è 1.458, ma non si ha comunque nessun fenomeno di franamento a lato campagna. Un dato positivo è invece quello dell'assenza di fenomeni di sifonamento al piede dell'arginatura: in corrispondenza di questa sezione vi è la presenza del serbatoio di gas, ed esso avrebbe potuto creare una via di accesso preferenziale per l'acqua, ma ciò non succede, quindi non si ha l'ingresso di acqua in golena per fenomeni di infiltrazione al di sotto del corpo arginale.

## Sezione 2100

Il punto più alto dell'arginatura per questa sezione è il centro del coronamento, posto a quota 29.61 m s.l.m., ma il carico idrico imposto a lato fiume è pari a 29.52 metri, per raggiungere il punto più alto a lato fiume; con questo carico si ha la formazione di una sorgente sospesa, ma il pendio a lato campagna è comunque stabile, con un fattore di sicurezza di 1.656. L'acqua fuoriesce dal corpo arginale ad una velocità variabile, la quale raggiunge anche 1 metro/giorno, ma questa non causa instabilità.

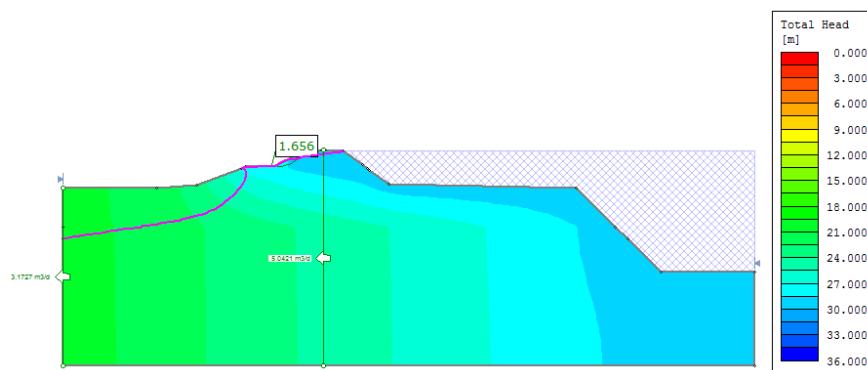


Figura 69: Risultato della Simulazione con Carico=29.52 m, Sezione 2100

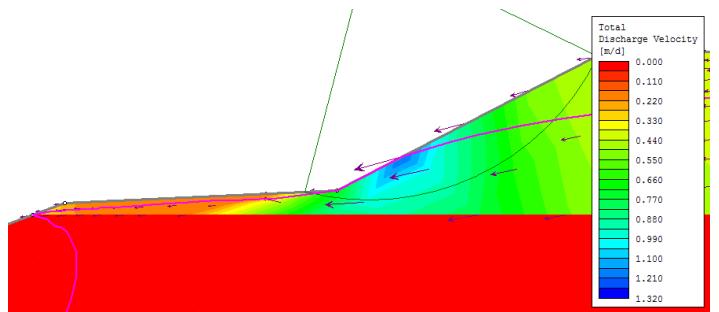


Figura 70: Ingrandimento Sorgente Sospesa, con Velocità di Filtrazione, Sezione 2100

La quota per la quale il carico idrico non genera più il passaggio di acqua a lato campagna è quella di 28.02 metri, quindi non si ha più la presenza di una sorgente sospesa, ed il pendio rimane stabile, con un fattore di sicurezza pari a 2.607.

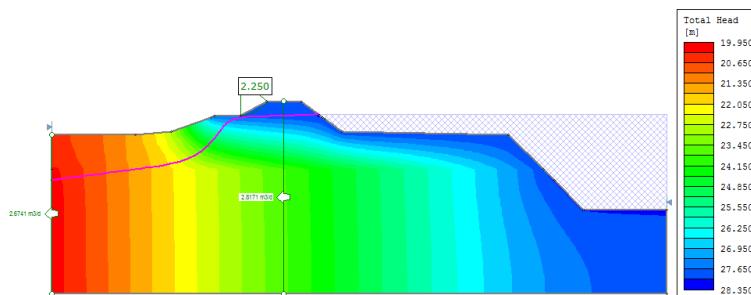


Figura 71: Risultato della Simulazione con Carico=28.02 m, Sezione 2100

## Sezione 2400

La piena più gravosa per questa sezione è considerata quella che pone a lato fiume un carico idrico pari a 29.61 metri; il colmo arginale è a quota 29.63 metri s.l.m., quindi anche in condizioni di piena si hanno 2 cm di franco rimanenti, che potrebbero essere la salvezza in caso di pericolo sormonto. Con questo livello di piena si ha l'innesto di un fenomeno di filtrazione:

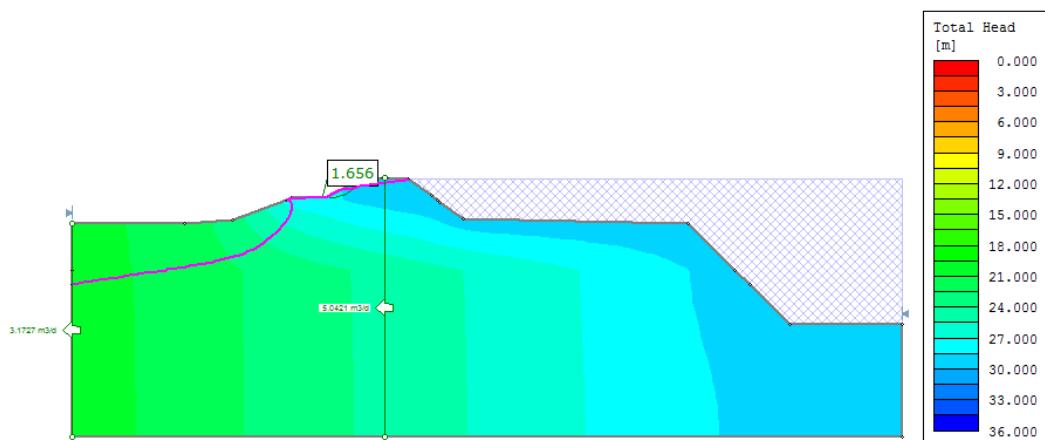


Figura 72: Risultato della Simulazione con Carico=29.61 m, Sezione 2400

La velocità di filtrazione è abbastanza elevata, pari circa a 75 cm/giorno nel punto di fuoriuscita della vena d'acqua, ma è comunque verificata la stabilità geotecnica del pendio a lato campagna, con un fattore minimo di 1.656.

Affinché si abbia l'assenza della sorgente sospesa a lato campagna si deve scendere con la piena fino alla quota di 28.11 metri, ed il fattore di sicurezza per lo scivolamento aumenta fino a 2.907.

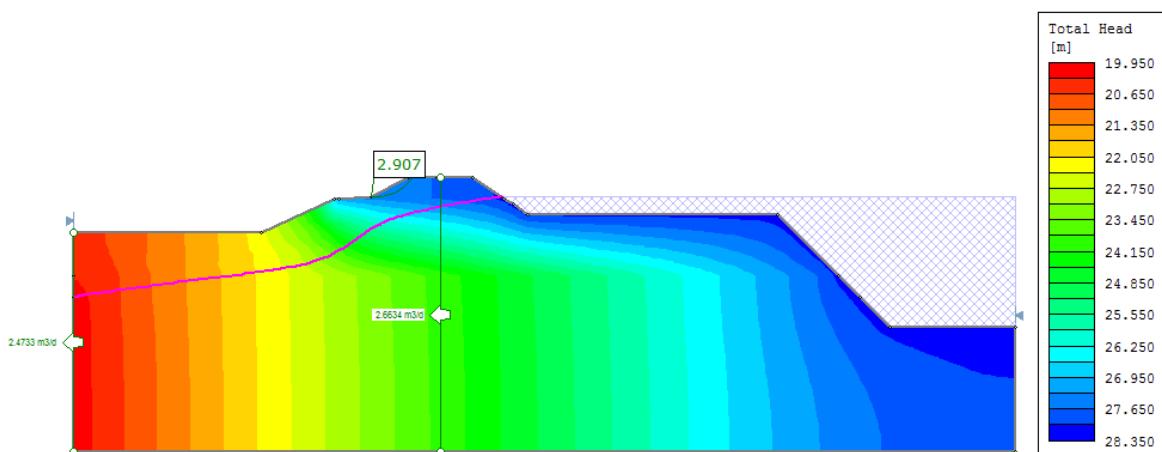


Figura 73: Risultato della Simulazione con Carico=28.11 m, Sezione 2400

## Sezione 2700

Il punto più alto dell'arginatura, in corrispondenza di questa sezione, si raggiunge a lato fiume, quindi la piena che si impone in questo caso come iniziale non può essere superata, altrimenti si avrebbe un allagamento della golena causato dal sormonto della struttura di protezione; il carico idraulico imposto inizialmente per la simulazione è quindi pari a 29.84 metri.

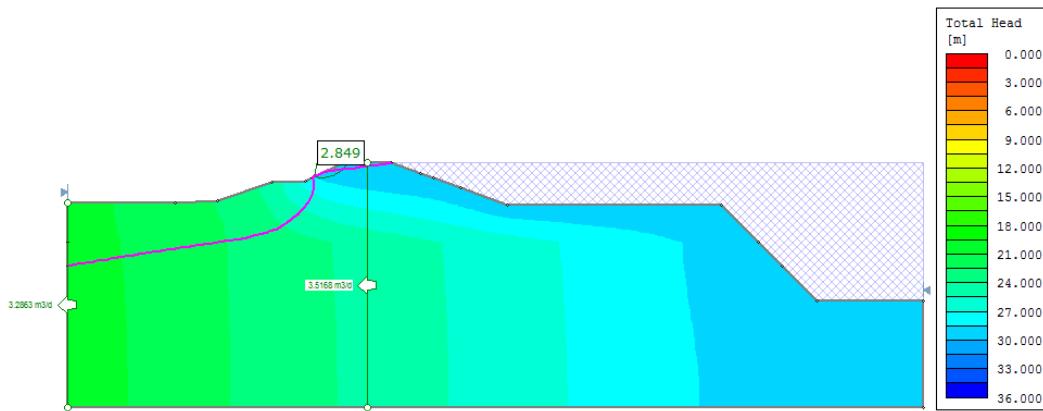


Figura 74: Risultato della Simulazione con Carico=29.84 m, Sezione 2700

Con questo livello di piena si ha la formazione di una sorgente sospesa, con l'ingresso di acqua in golena, ed affinché questo non si verifichi si deve scendere con il livello fino ad una quota pari a 28.84 metri; la velocità di filtrazione è circa pari a 1 metro/giorno, ma nonostante questo la stabilità geotecnica è verificata, e questa condizione è agevolata dai parametri meccanici del terreno dello strato superiore.

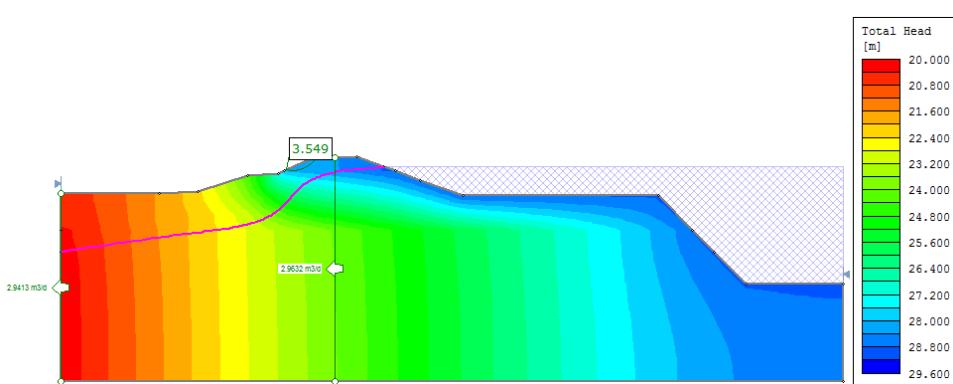


Figura 75: Risultato della Simulazione con Carico=28.84 m, Sezione 2700

La stabilità geotecnica del pendio a lato campagna è quindi sempre verificata, anche in condizioni di filtrazione, poiché il fattore di sicurezza passa dal valore di 2.849 a quello di 3.549, ed è sempre maggiore di 1.

## Sezione 2980

La stabilità di questa sezione è di fondamentale importanza, poiché essa è situata in prossimità di un'abitazione; si è quindi scelto di porre il carico massimo della simulazione pari alla quota del punto più alto a lato fiume, avente quota pari a 29.17 metri s.l.m., per mantenere un franco aggiuntivo rispetto al centro del coronamento arginale, posto ad una quota di 29.53 metri s.l.m.

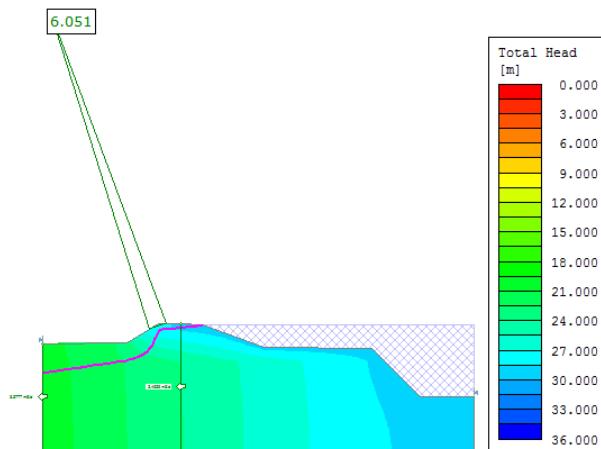


Figura 76: Risultato della Simulazione con Carico=29.17 m, Sezione 2980

Si vede come in questo caso la sezione sia verificata anche nelle condizioni idraulicamente più gravose: con un carico idrico pari a 29.17 metri non si innescano fenomeni di filtrazione, ed anche la stabilità del pendio è verificata: il fattore di sicurezza è pari a 6.051, e la velocità di filtrazione non raggiunge i 10 cm/giorno.

## Sezione 3308

Questa sezione presenta una piarda a lato fiume particolarmente estesa, ed è situata in corrispondenza della ex cava di sabbia, quindi il letto del fiume non è in prossimità della struttura di protezione della golena, ma tra i due vi sono interposte alcune centinaia di metri; al fine delle simulazioni per la verifica di stabilità questo però non è rilevante, e la distanza eccessiva è stata ridotta a 20 metri, per snellire i calcoli e porsi a favore di sicurezza: se il tratto sub-orizzontale allagabile è più esteso di quello simulato, nella realtà l'acqua raggiungerà l'arginatura in tempi più elevati, quindi l'imbibizione sarà più lenta di quella ipotizzata nei calcoli.

Il carico di partenza è stato posto pari a 29.29 metri, ed si ha la formazione di una sorgente sospesa, che comunque non compromette la stabilità del pendio a lato campagna: il fattore di sicurezza è infatti pari a 2.195, e la velocità di filtrazione rimane inferiore a 15 cm/giorno

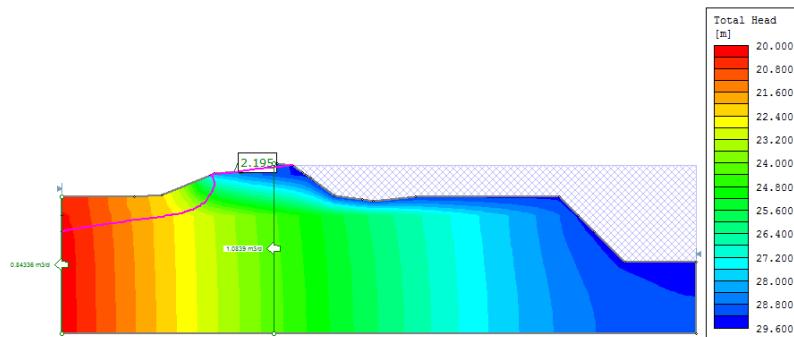


Figura 77: Risultato della Simulazione con Carico=29.29 m, Sezione 3308

Per arrivare ad avere una condizione di stabilità completa si deve portare il carico ad una quota pari a 28.29 metri: in questo caso non si ha più la presenza della sorgente sospesa, ed il fattore di sicurezza che indica la stabilità del pendio a lato campagna aumenta fino a 3.639.

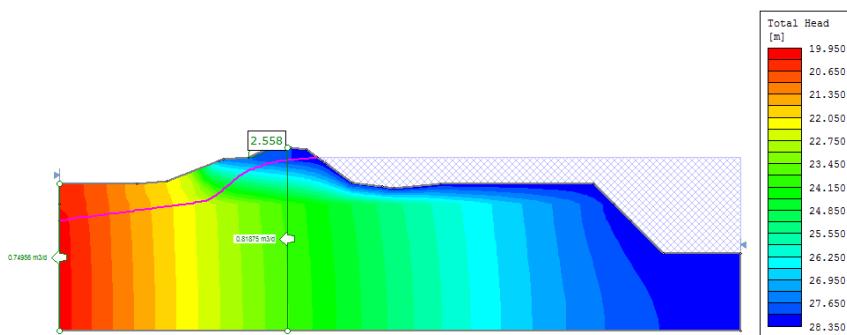


Figura 78: Risultato della Simulazione con Carico=28.29 m, Sezione 3308

## Sezione 3380

Anche questa sezione, come la precedente, si trova in corrispondenza della vecchia cava di sabbia, quindi la piarda a lato fiume è molto più estesa di quella simulata, per rimanere a favore di sicurezza.

Il carico idrico massimo ipotizzato è posto pari a 29.46 metri, ed in corrispondenza di questo si ha la formazione di una sorgente sospesa a lato campagna; nonostante questo il pendio risulta stabile, con un fattore di sicurezza pari a 1.264, ed una velocità di filtrazione minore di 20 cm/giorno.

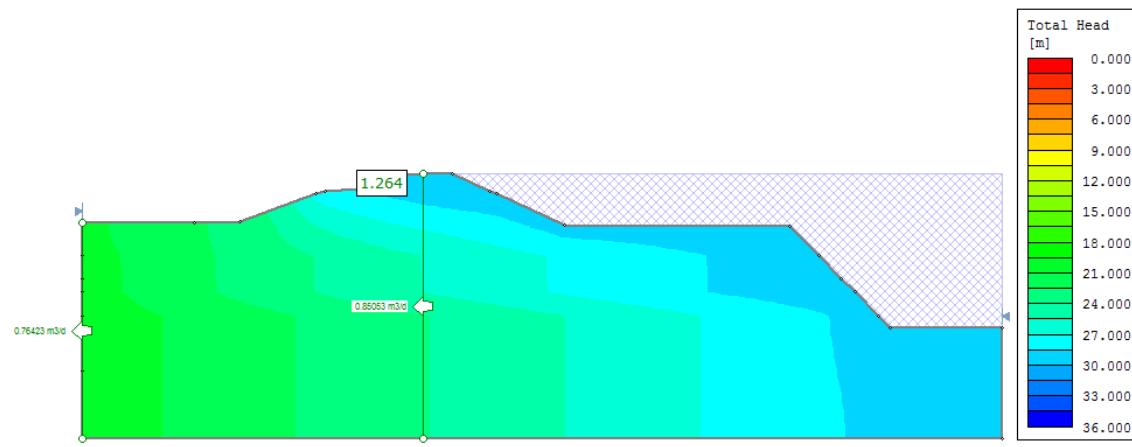


Figura 79: Risultato della Simulazione con Carico=29.46 m, Sezione 3380

La quota massima per la quale non si ha il fenomeno di sifonamento è pari a 27.96 metri, quindi con un franco di 1.5 metri rispetto al punto più alto dell'arginatura; in questo caso il valore del fattore di sicurezza non si modifica molto, aumenta leggermente fino a 2.066, e la sezione è quindi completamente stabile.

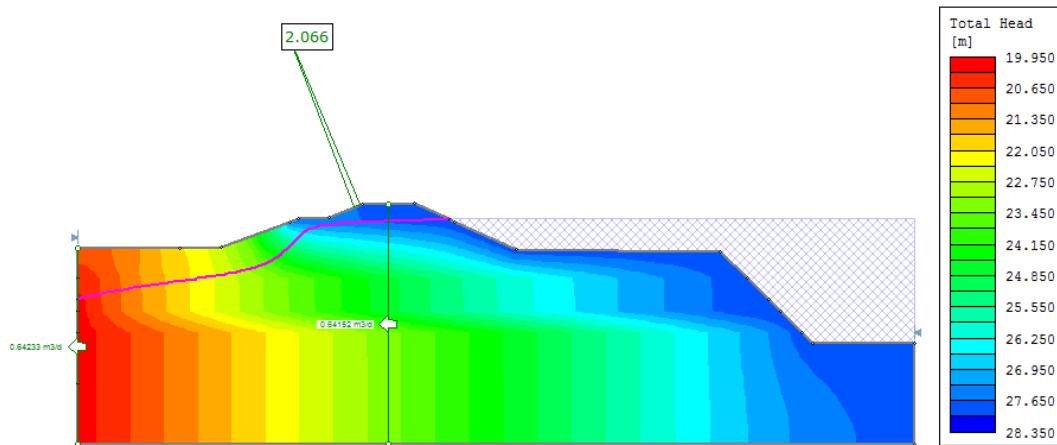


Figura 80: Risultato della Simulazione con Carico=27.96 m, Sezione 3380

## Sezione 3600

Il coronamento arginale in corrispondenza della progressiva 3600 ha una leggera pendenza verso il lato campagna, quindi il punto a quota maggiore in questa sezione è il limite del coronamento a lato fiume; il valore del carico massimo è quindi pari a quello di questa quota: 29.52 metri.

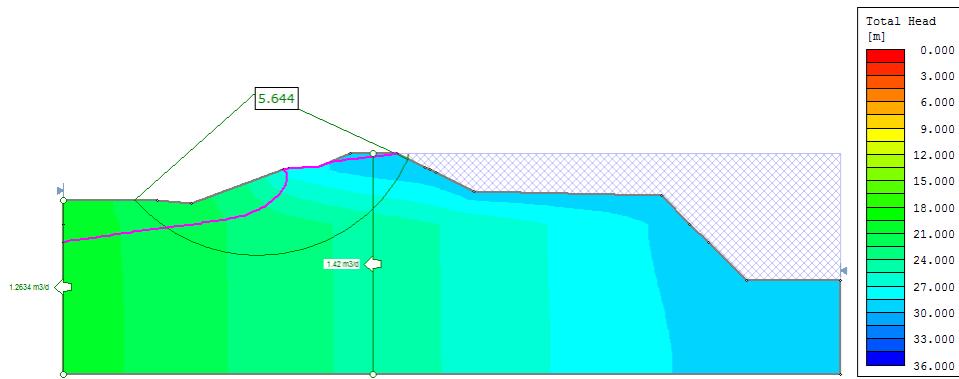


Figura 81: Risultato della Simulazione con Carico=29.52 m, Sezione 3600

Con questa condizione di carico si ha la stabilità geotecnica del pendio, nonostante la formazione di una sorgente sospesa in corrispondenza del tratto sub-orizzontale della banca intermedia a lato campagna, e la velocità di filtrazione si mantiene inferiore a 30 cm/giorno. Per non riscontrare più l'innesto di questo fenomeno di filtrazione si deve portare la quota del carico idraulico fino al livello di 28.02 metri.

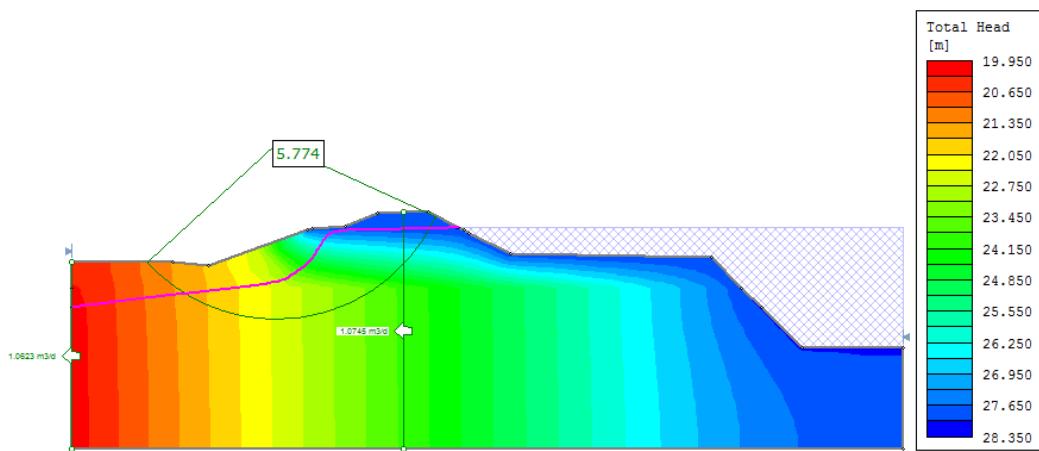


Figura 82: Risultato della Simulazione con Carico=28.02 m, Sezione 3600

Con questo livello di piena la sezione è completamente stabile, perché non si ha ingresso di acqua in golena, ed il fattore di sicurezza per lo scivolamento del pendio a lato campagna è pari a 5.774.

## Sezione 3900

Il carico idraulico massimo imposto in corrispondenza di questa sezione è pari a 29.44 metri, pari alla quota del punto più alto dell'argine a lato fiume:

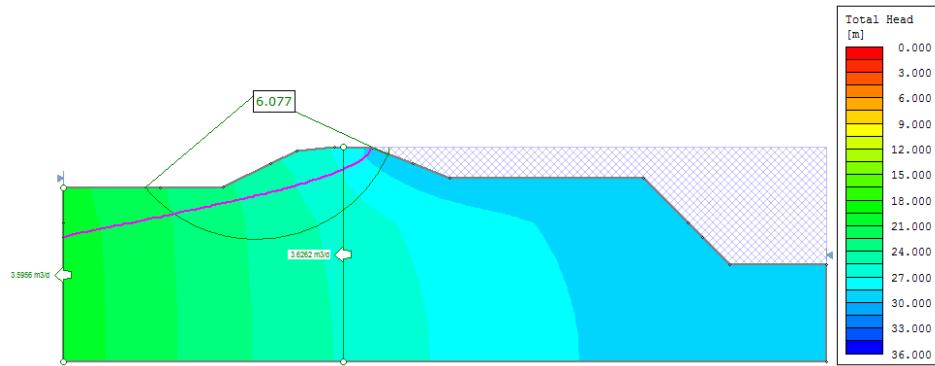


Figura 83: Risultato della Simulazione con Carico=29.44 m, Sezione 3900

Si nota che, in questa sezione, anche la piena più gravosa non crea problemi di stabilità all'arginatura consortile, perché non si ha la formazione di nessuna sorgente sospesa, quindi non si ha filtrazione di acqua all'interno della golena, ed il pendio a lato campagna è completamente stabile, con un fattore di sicurezza pari a 6.077.

## In Sintesi

Solamente 3 sezioni di quelle analizzate sono in grado di sostenere una piena di livello pari alla massima quota raggiunta dall'argine a lato campagna; per tutte le altre è necessario che il livello si trovi ad un franco di sicurezza, per impedire l'ingresso di acqua in golena, causato da una filtrazione. Il sifonamento al piede della struttura non si verifica mai, così come il sifonamento sul piano di campagna, quindi se vi è filtrazione essa è sempre collocata sul corpo arginale.

La sezione 43 è quella per cui si ha avuto il risultato minore riguardante il carico massimo di sicurezza, quindi se si vuole considerare un carico stazionario per il quale tutta l'arginatura sia in sicurezza, esso non deve superare i 27.48 metri di quota.

Tabella 29: Tabella Riassuntiva Carichi Idraulici

<b>Sezione</b>	<b>Carico Idraulico Massimo</b>	<b>Carico Idraulico di Sicurezza</b>	<b>Franco</b>
43	29.48	27.48	2
1250	29.43	29.43	0
1680	29.74	28.24	1.5
1855	29.66	27.66	2
2100	29.52	28.02	1.5
2400	29.61	28.11	1.5
2700	29.84	28.84	1
2980	29.17	29.17	0
3308	29.29	28.29	1
3380	29.46	27.96	1.5
3600	29.52	28.02	1.5
3900	29.44	29.44	0
			27.48

Le situazioni simulate in queste verifiche sono però situazioni quantomeno improbabili nella realtà, perché si basano sull'ipotesi che il livello del fiume sia costantemente al livello imposto, e questo non è reale. Una situazione più realistica è fornita dalle simulazioni eseguite in regime transitorio.

## Verifica 2: L'Argine come una Diga in Terra – Regime Transitorio

Le situazioni simulate durante la verifica precedente imponevano un carico di piena stazionario sull'arginatura; questo equivale a dire che l'onda di piena ha quella quota massima per un tempo infinito, ma non è ciò che succede nella realtà: all'inizio di un fenomeno di piena, infatti, il carico sull'arginatura è ad un livello minimo, poi esso cresce durante la piena, quindi torna a diminuire con il trascorrere del tempo.

L'obiettivo della prova è la determinazione di una quota di sicurezza in regime transitorio, e la conseguente individuazione delle sezioni più critiche.

Il tratto di argine analizzato si colloca affianco al corso del torrente Enza, ma le piene da considerare sono quelle del fiume Po, che rigurgita nel primo tratto del suo affluente, ed i tempi normali di piena in questo caso sono di un paio di settimane.

Per impostare queste simulazioni sono stati utilizzati i dati ricavati dalle analisi idrauliche delle piene: sono stati studiati gli andamenti di 3 onde di piena realmente avvenute (una nell'anno 2000, una nel 2009, ed una nel 2014), e le altezze raggiunte dall'acqua sono state misurate in corrispondenza dei punti che hanno le quote minori nel coronamento arginale.

Tabella 30: Tabella Riassuntiva Onde di Piena

Giorno di Piena	2000				2009				2014			
	Sez. 1160	Sez. 1200	Sez. 2300	Sez. 3820	Sez. 1160	Sez. 1200	Sez. 2300	Sez. 3820	Sez. 1160	Sez. 1200	Sez. 2300	Sez. 3820
1	27.97	25.79	25.84	25.75	27.62	27.53	26.56	26.63	28.11	27.98	27.98	26.71
2	29.10	27.21	27.22	27.11	27.77	27.74	27.57	27.83	27.84	27.74	27.74	26.88
3	29.85	28.53	28.53	28.41	28.31	28.30	28.24	28.11	27.68	27.67	27.67	27.61
4	29.87	29.77	29.79	29.67	28.30	28.29	28.23	27.89	28.13	28.13	28.13	28.10
5	29.20	29.87	29.88	29.76	27.56	27.55	27.46	26.85	28.13	28.13	28.13	28.10
6	28.27	29.59	29.59	29.46	26.77	26.72	26.40	25.76	28.08	28.03	28.03	27.98
7	27.37	28.67	28.66	28.55					28.63	28.62	28.62	28.53
8	26.64	27.76	27.75	27.64					28.69	28.68	28.68	28.64
9	26.50	26.94	26.93	26.82					28.59	28.59	28.59	28.55
10	26.50	26.26	26.24	26.13					27.79	27.79	27.79	27.75
11		25.51	25.46	25.35					27.03	27.02	27.02	26.94
12		24.69	24.63	25.07					26.54	26.51	26.51	26.35

Da questa tabella si nota che le piene più lunghe sono state quelle del 2000 e del 2014, perché i livelli si sono mantenuti ad un'altezza non ordinaria per 12 giorni, e che le altezze maggiori sono state registrate durante la piena del 2000, nella quale si è raggiunta la quota di 29.88 metri s.l.m., in corrispondenza della sezione 2300; nelle simulazioni da eseguire si decide quindi di utilizzare la parte iniziale di quest'onda di piena.

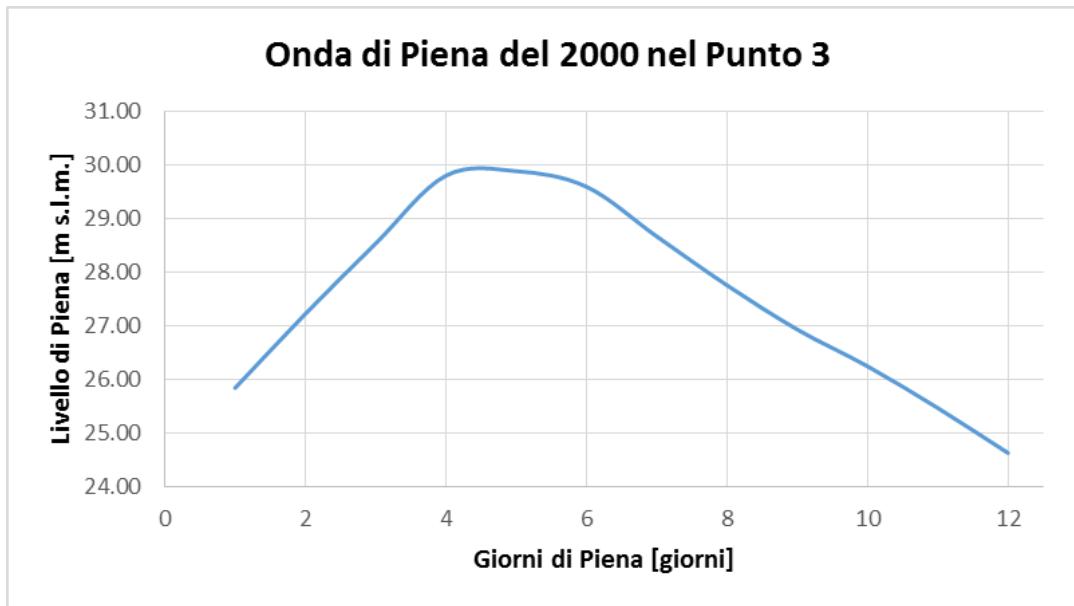


Figura 84: Onda di Piena Massima

Per simulare un regime transitorio, il codice di calcolo necessita, come input, di un certo numero di giorni, con relativa quota di piena raggiunta, ma si deve prestare attenzione al suo metodo di esecuzione della simulazione: la piena del 2000 non ha causato il sormonto dell'argine solo grazie ad una sacchettatura, e considerare interamente quest'onda, affiancandola alle sezioni rilevate, significa causare il sormonto dell'arginatura, perché la quota di massimo colmo della piena è maggiore rispetto alla quota di colmo dell'argine. Questo non è simulabile in modo corretto dal programma, perché successivamente ad un sormonto esso pone il livello alla stessa quota orizzontale da entrambi i lati della struttura: in questo modo si va a porre sul lato campagna una condizione non reale, che va a creare una falsa condizione di filtrazione, quindi si deve prestare attenzione alla quota massima che può raggiungere il carico idraulico.

L'onda di piena sarà quindi così strutturata, per tutte le sezioni:

- Il giorno 0 il livello è posto pari a quello di falda in condizioni stazionarie, quindi a 20.1 metri.
- Dal giorno 1 al giorno 3 si riprendono i valori registrati durante la piena del 2000 nella sezione 2300.
- La quota raggiunta da questa piena nel giorno quattro causerebbe già il sormonto dell'arginatura, quindi si decide di porre la quota massima di carico idraulico della piena pari a 29.20 metri, per rimanere sempre in condizioni di non sormonto.
- Si mantiene questo carico idraulico per 21 giorni. La piena reale analizzata ha raggiunto un livello massimo maggiore, ma la permanenza di questo è stata molto più breve, quindi andando a simulare un carico minore per un tempo più lungo ci si pone a favore di sicurezza: al fine di valutare il livello di imbibizione del terreno, è una condizione peggiore quella di mantenimento del carico per un tempo più lungo, perché anche i terreni a bassa permeabilità hanno il tempo di assorbire acqua; se il carico ha il colmo più elevato, ma la sua durata è minore, il problema è il sormonto, e difficilmente sarà l'imbibizione, perché i terreni a bassa permeabilità non sono in grado di incamerare acqua in poco tempo.
- A partire dal giorno 25 si inizia a svasare, e da questo momento fino al giorno 30 si utilizzano gli ultimi 6 valori registrati nella piena iniziale; questo processo di diminuzione lenta della piena è impostato per simulare la reale condizione di svaso che può accadere durante un evento di piena.
- Si ipotizza che la piena si svuoti completamente 15 giorni dopo la fine, quindi in corrispondenza del giorno 45 si impone nuovamente il carico corrispondente al livello di falda.

Questi sono i dati che servono al programma per simulare il regime transitorio di un evento di piena, ed eseguendo i calcoli attraverso la funzione "Transient Groundwater" esso mostra come output la situazione in ogni giorno che viene assegnato dall'utente; si decide di visualizzare, come risultato delle simulazioni, anche la situazione a 50, 100 e a 150 giorni dall'inizio dell'evento di piena, per vedere l'andamento della linea di imbibizione all'interno del corpo arginale.

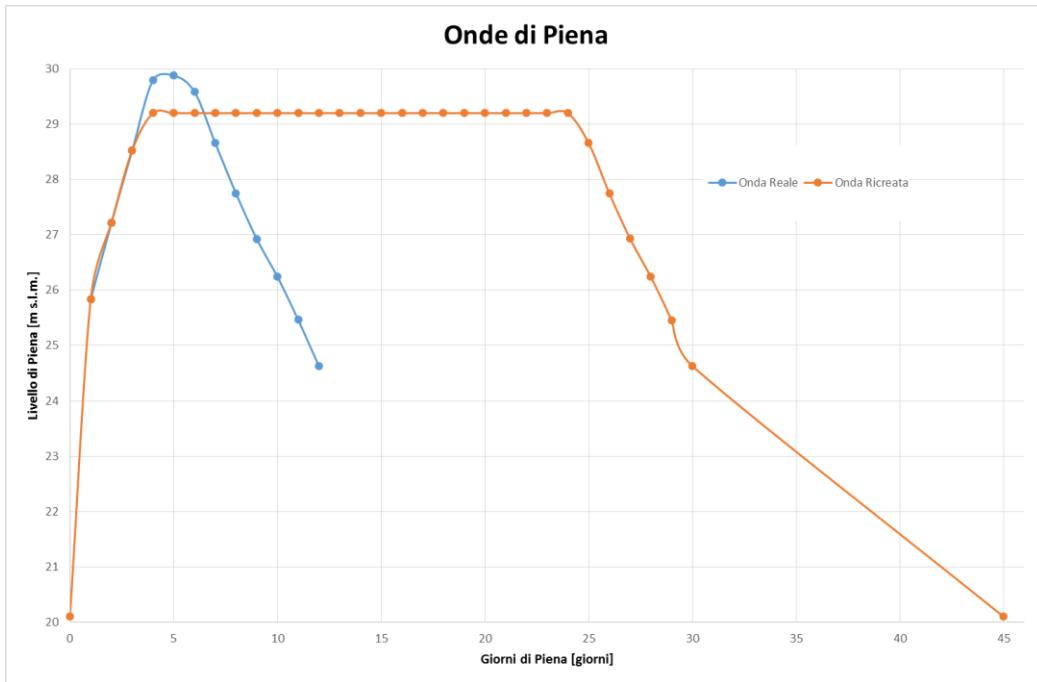


Figura 85: Grafico delle Onde di Piena, Confronto fra Piena Reale e Simulata

Per quanto riguarda le verifiche di stabilità dei pendii, la ricerca delle superfici di scivolamento aventi fattore di sicurezza minore viene fatta eseguire in automatico dal programma sia sul il versante a lato fiume, su cui le condizioni idrauliche cambiano maggiormente, sia su quello a lato campagna, per essere sicuri che la filtrazione non causi instabilità verso la golena, andando a compromettere la funzionalità dell'opera.

## Sezione 43

La situazione iniziale in questa sezione è di completa stabilità, con un fattore di sicurezza per la stabilità del versante a lato fiume pari a 1.296, ed a lato campagna pari a 1.777.

Procedendo con la simulazione dell'onda di piena, è evidente l'aumento del livello di imbibizione del corpo arginale già dopo i primi giorni, e dal giorno 15 si ha la formazione di una sorgente sospesa: la linea di imbibizione arriva a lambire il versante opposto al corso d'acqua, ma basandosi sulla piena registrata nel 2000, la piena ha avuto una durata minore, quindi la condizione simulata non ha avuto il tempo di generarsi.

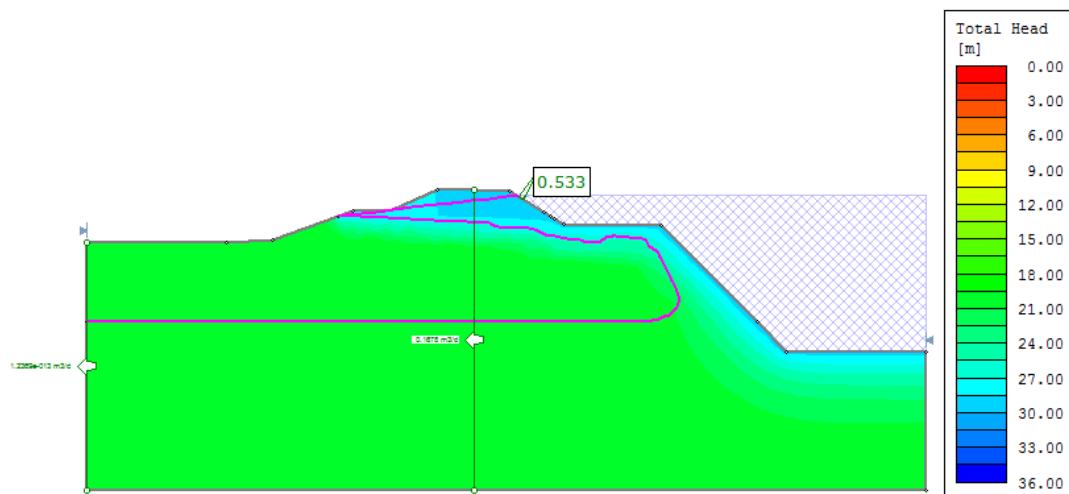


Figura 86: Situazione al Giorno 15 della Simulazione, Sezione 43

Le sezioni di controllo mostrano che la quantità di acqua persa con la filtrazione è notevole; passando dalla sezione centrale a quella terminale, infatti, si registra una quantità di acqua minore, e questo avviene per due motivi: una parte viene persa a causa della fuoriuscita a lato campagna, mentre l'altra parte rimane all'interno del corpo arginale, come acqua di saturazione dei pori del terreno.

La stabilità geotecnica a lato campagna è sempre mantenuta: il fattore di sicurezza è costante, e pari a 1.777, quindi la filtrazione non innesca superfici di scivolamento verso l'interno della golena. Essa non è invece verificata a lato fiume: fenomeni di scivolamento si innescano nella parte superiore della struttura già dal giorno 4, nel quale si registra il valore minimo, pari a 0.023; questo potrebbe essere un fattore rilevante, perché scivolamenti del versante sulla sommità possono compromettere la funzionalità dell'argine, riducendone lo spessore e facilitandone l'erosione, ma si nota che le superfici di scivolamento aventi fattore di sicurezza minore di 1 sono limitate alla superficie del

pendio, quindi non causano instabilità preoccupanti: non potendo inserire il cotico erboso, non si è in grado di stabilire se le radici della piante presenti sarebbero in grado di evitare gli scivolamenti, ma data la profondità delle superfici questo è probabile. Il giorno 25 il fattore di sicurezza torna ad essere maggiore di 1, ma fino al giorno 26 è presente la sorgente sospesa.

L'imbibizione dello strato sommitale dell'argine permane fino al giorno 30, e questa condizione è indicata dal programma con una linea di imbibizione che si chiude su sé stessa; la forma di questa linea ricalca la geometria delle stratificazioni interne: la parte alta è quasi orizzontale, ed è sovrapposta alla linea di passaggio fra i due strati, e l'imbibizione rimane al di sotto, nello strato meno permeabile. Questo succede perché lo strato superiore, a permeabilità maggiore, rilascia più velocemente l'acqua dopo il termine della piena, mentre quello inferiore, a permeabilità minore, la trattiene all'interno dei pori, e causa una linea di imbibizione di questo tipo.

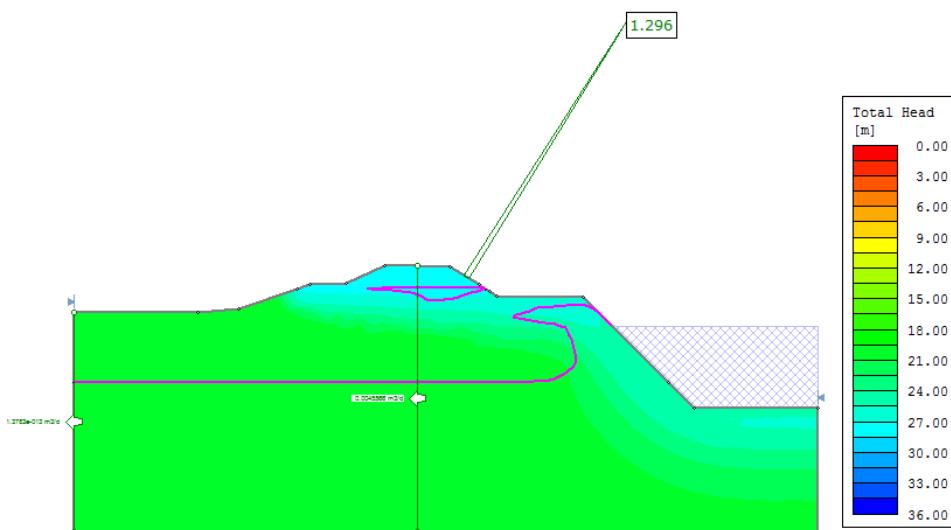


Figura 87: Situazione al Giorno 30 della Simulazione, Sezione 43

Nei giorni seguenti, con il continuo abbassamento del livello del fiume, si ha il ripristino delle condizioni iniziali.

La sezione non risulta particolarmente critica perché la completa filtrazione avviene con tempistiche più elevate rispetto a quelle che si sono riscontrate nelle piene reali, e l'instabilità dei versanti è limitata alla parte superficiale di quello a lato fiume.

## Sezione 1250

Questa sezione presenta, a lato fiume, una banca più ampia rispetto alla precedente, quindi l'acqua deve percorrere un tratto più lungo all'interno del corpo arginale prima di poter arrivare al lato campagna; questo è ben visibile dalle simulazioni in transitorio, che mostrano come la struttura non venga mai del tutto attraversata dalla linea di imbibizione. Il giorno in cui essa raggiunge la sua maggiore estensione è il 24, ma si è molto distanti dalla formazione di una sorgente sospesa:

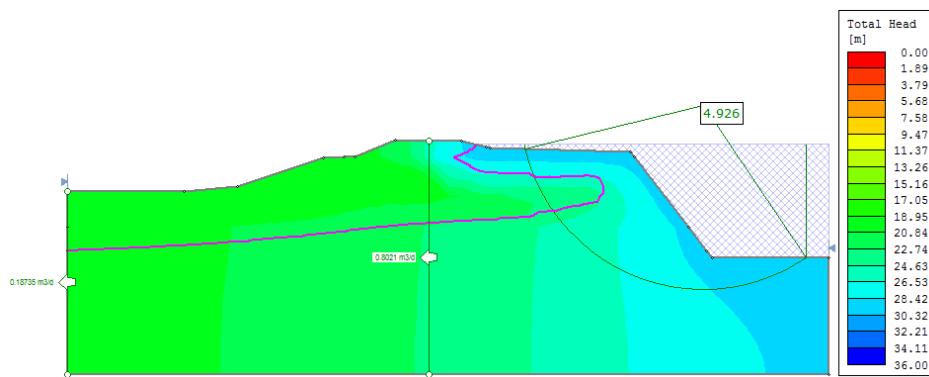


Figura 88: Situazione al Giorno 24 della Simulazione, Sezione 1250

Nessun versante dell'arginatura è mai soggetto a fenomeni di instabilità: a lato campagna il fattore di sicurezza è sempre maggiore di 7, mentre a lato fiume i valori si modificano; il giorno in cui questo coefficiente raggiunge il suo valore minimo, pari a 2.465, è il 45esimo, e questo succede perché, dopo l'evento di piena, il livello del fiume diminuisce, e viene a mancare la spinta idraulica sul pendio, che può instabilizzarsi. In questo caso, però, è confermata la stabilità in ogni situazione.

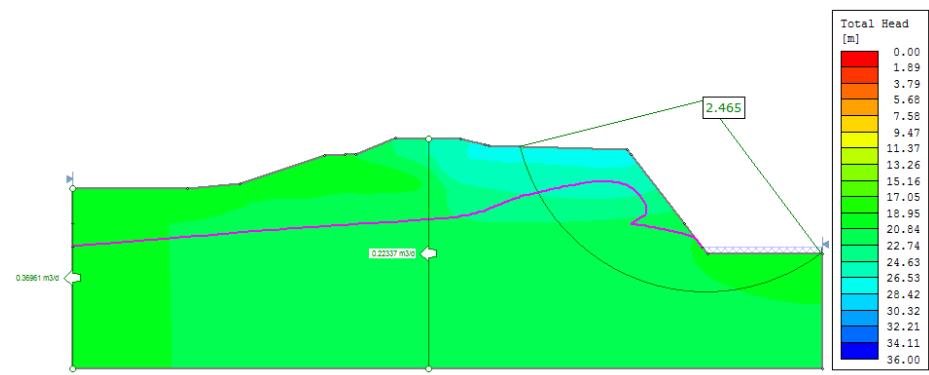


Figura 89: Situazione al Giorno 45 della Simulazione, Sezione 1250

Questa sezione è quindi verificata per l'onda di piena simulata, che ipotizza una condizione peggiore di quella reale.

## Sezione 1680

In corrispondenza di questa sezione, la simulazione in regime stazionario aveva evidenziato la formazione di una sorgente sospesa a lato campagna, ed anche il regime transitorio ha confermato questa ipotesi: durante il giorno 8 della simulazione la linea di imbibizione arriva a lambire il contorno della struttura a lato campagna, e questa filtrazione è agevolata dall'alta permeabilità dello strato superiore; la velocità con cui l'acqua si sposa all'interno del corpo arginale rimane sempre inferiore a 60 cm/giorno.

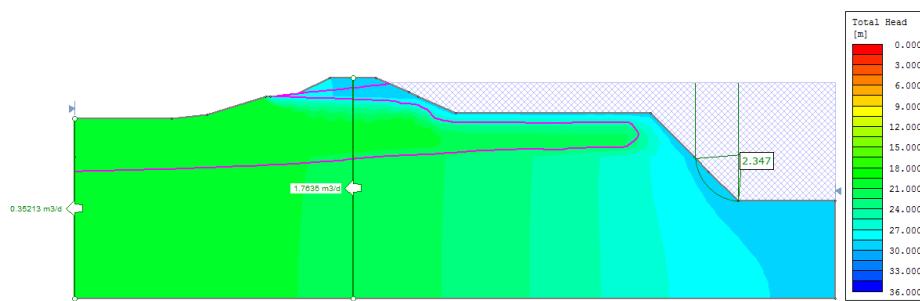


Figura 90: Situazione al Giorno 8 della Simulazione, Sezione 1680

Questa condizione di filtrazione si mantiene fino al giorno 28 durante il quale, con il ritiro della piena, si ha la scomparsa della vena d'acqua; la condizione di imbibizione più gravosa per il corpo arginale si rileva il 24esimo giorno, nel quale si ha la maggior porzione di esso allagata:

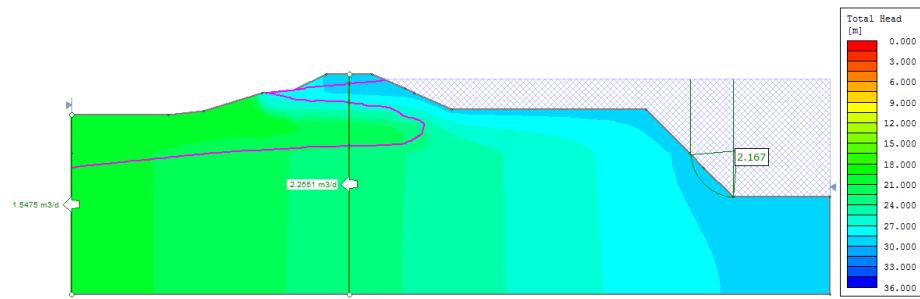


Figura 91: Situazione al Giorno 24 della Simulazione, Sezione 1680

Come per la sezione precedente, anche in questo caso la stabilità dei versanti è sempre verificata: a lato campagna il coefficiente di sicurezza è sempre maggiore di 5, mentre a lato fiume esso assume il suo valore più basso, pari a 1.354, in corrispondenza del giorno 45, quando il livello di piena si è completamente svasato, si torna al livello di falda, ed il carico idraulico prima presente sul pendio viene a mancare.

La criticità in questa sezione è quindi mediamente elevata, perché l'acqua entra in golena in un lasso di tempo che è di poco superiore rispetto a quello di una piena reale.

## Sezione 1855

In corrispondenza di questa sezione la situazione durante lo svolgimento delle simulazioni in regime stazionario è risultata critica, e questa criticità si è confermata con la simulazione in regime transitorio. Durante le fasi iniziali, con il carico idraulico stazionario a livello di falda, il pendio che contiene l'alveo attivo non è stabile, presenta una leggera instabilità superficiale, ma questo non deve essere considerato un elemento significativo: infatti, non si conoscono le reali caratteristiche geometriche di questo pendio, la sua conformazione è stata ipotizzata per poter eseguire le simulazioni, e non si può parlare di criticità per un elemento che è stato completamente ipotizzato; inoltre, le superfici di scivolamento sono limitate alla parte più esterna, quindi non causano cedimenti alla struttura.

A partire dal giorno 6 si ha la presenza di una sorgente sospesa causata dalla filtrazione, che si mantiene stabile fino al giorno 28; dal giorno 29 si ha una progressiva diminuzione della saturazione dei pori.

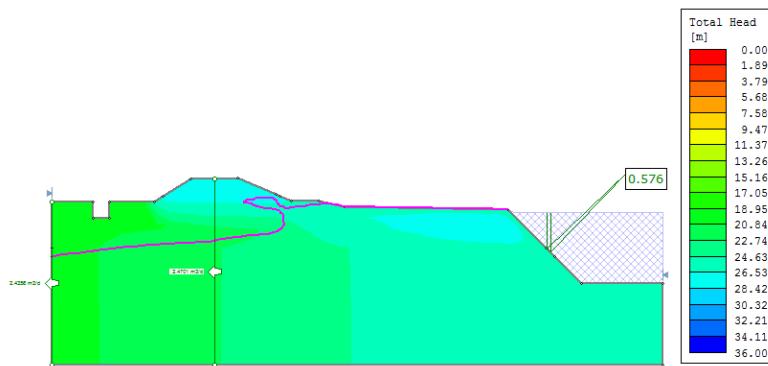


Figura 92: Situazione al Giorno 29 della Simulazione, Sezione 1855

Con il crescere della piena, dal giorno 7, si innescano fenomeni di scivolamento nei pendii arginali, sia a lato fiume sia a lato campagna: in piccole porzioni superficiali si registrano infatti superfici di scivolamento aventi fattore di sicurezza minore di 1, e a lato fiume si raggiunge il valore minimo di 0.908; sul versante a lato campagna, invece, il valore medio assunto dopo l'innesto degli scivolamenti è pari a 0.540. Le superfici di scivolamento sono però limitate alla parte più esterna della struttura, quindi non destano preoccupazione, perché il cotico erboso, non simulato, può aiutare a mantenere la stabilità; se esse si trovassero ad una profondità maggiore, invece, la situazione sarebbe peggiore, perché gli

scivolamenti interessano entrambi i lati della sommità arginale, e la struttura potrebbe subire danneggiamenti elevati.

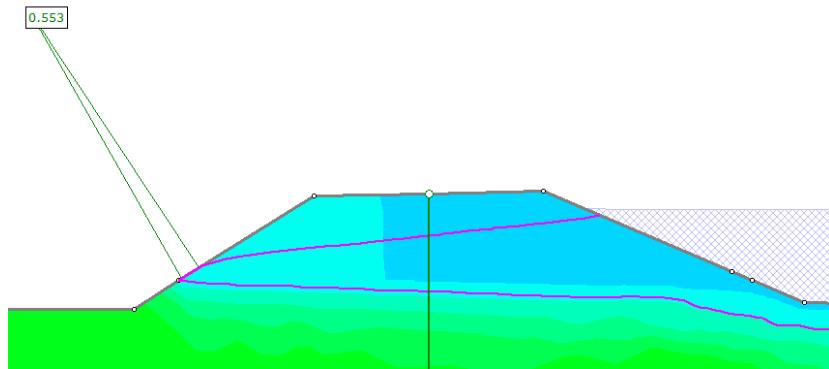


Figura 93: Situazione al Giorno 7 della Simulazione, Lato Campagna, Sezione 1855

In corrispondenza del giorno 25 si ristabilisce la condizione di stabilità geotecnica dei pendii della struttura arginale.

I parametri caratteristici dello strato superficiale del corpo arginale in questa sezione indicano che il terreno è molto permeabile, e per questo la velocità di uscita della vena d'acqua, in condizioni di regime transitorio, arriva circa a 1.25 m/giorno; è questa velocità di filtrazione la causa più probabile della formazione dell'instabilità superficiale a lato campagna.

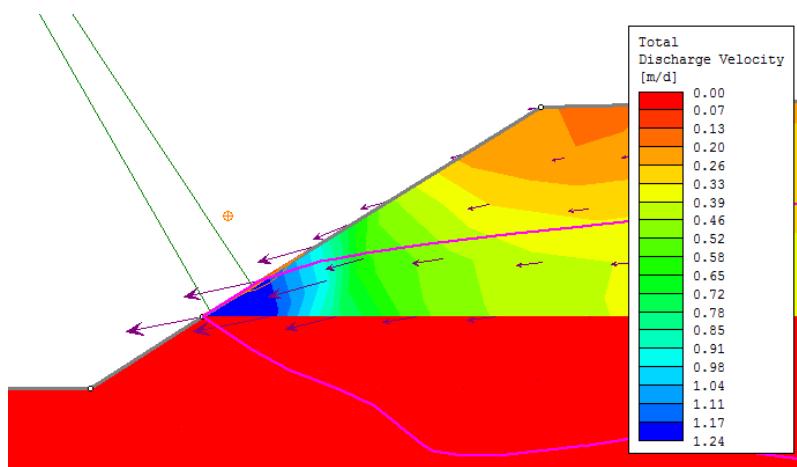


Figura 94: Ingrandimento Sorgente Sospesa, con Velocità di Filtrazione, al Giorno 24, Sezione 1855

La criticità di questa sezione è notevole, poiché l'instabilità e la completa filtrazione avvengono con tempistiche paragonabili a quelle della piena reale presa come riferimento.

## Sezione 2100

Il versante a lato campagna non presenta mai fenomeni di scivolamento, ed il valore minimo assunto dal coefficiente di sicurezza, pari a 1.898, è riscontrabile nel 24esimo giorno di piena, quando la saturazione dei pori è massima. Con l'inizio dello svuotamento della piena il coefficiente vede un significativo aumento.

Il giorno 6 si ha la formazione di una sorgente sospesa a lato campagna, e questa condizione permane fino al giorno 26.

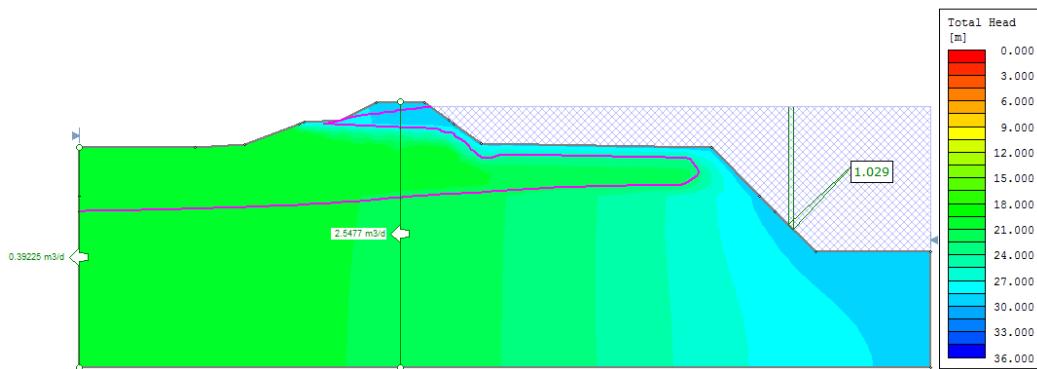


Figura 95: Situazione al Giorno 6 della Simulazione, Sezione 2100

La velocità assunta dall'acqua in uscita dal corpo arginale è inferiore a 95 cm/giorno, e si può notare dall'immagine che la filtrazione avviene solamente attraverso lo strato superiore del corpo arginale; in quello sottostante, infatti, la velocità di filtrazione è nulla, e questa differenza è dovuta ai parametri meccanici caratteristici dei diversi strati.

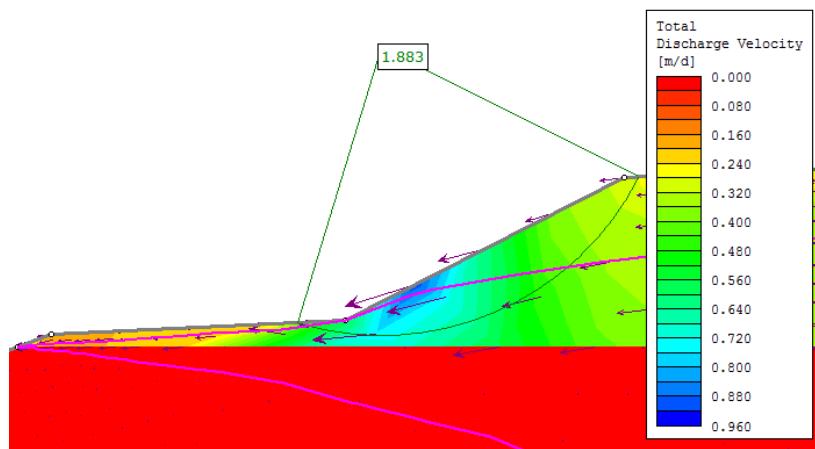


Figura 96: Ingrandimento Sorgente Sospesa, con Velocità di Filtrazione, al Giorno 18, Sezione 2100

Anche per questa sezione la simulazione mostra criticità, poiché la filtrazione fino a lato campagna avviene in tempi compatibili con la durata reale di una piena.

## Sezione 2400

In corrispondenza di questa sezione è importante segnalare l'assenza di instabilità della parte superiore dell'arginatura, da entrambi i lati: se questa parte non è soggetta a scivolamento, la funzionalità della sommità della struttura non è compromessa.

Il decimo giorno, però, si ha una progressione della linea di imbibizione tale da formare una sorgente sospesa a lato campagna, e questa si mantiene fino al giorno 26.

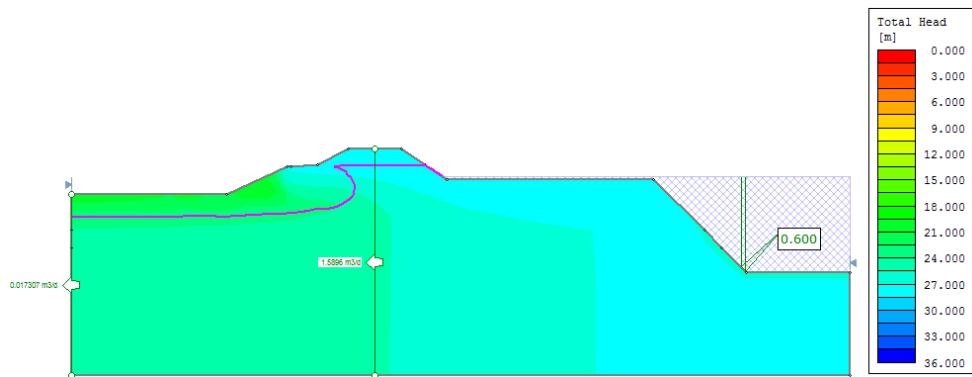


Figura 97: Situazione al Giorno 27 della Simulazione, Sezione 2400

Per una piena strutturata come quella che è stata simulata, la sezione presenta criticità; se però si considera la piena reale, in corrispondenza del decimo giorno il livello di acqua era molto minore rispetto a quello utilizzato nel codice di calcolo. Inoltre, nella simulazione, i giorni precedenti a quello in cui si ha completa filtrazione presentano un carico stazionario molto elevato, mentre nella realtà già dal settimo giorno il livello di piena è notevolmente inferiore.

Per questi motivi, la sezione è critica per la piena simulata, ma sarebbe probabilmente in grado di resistere al carico imposto da una piena reale.

## Sezione 2700

In corrispondenza di questa sezione la filtrazione non è mai completa: la linea di imbibizione si avvicina al versante del lato campagna fino al giorno 24, nel quale la vena d'acqua arriva quasi a fuoriuscire, ma questo non succede; si ha quindi la saturazione dei pori, ma non la formazione di una sorgente sospesa, e dal giorno 25 inizia il progressivo ritiro della linea stessa.

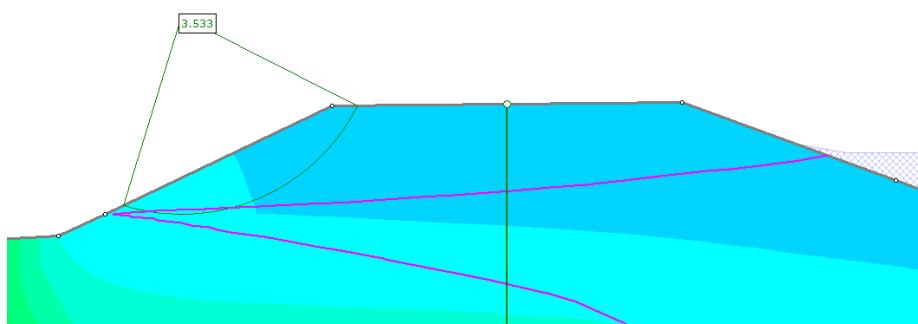


Figura 98: Situazione della Linea di Imbibizione al Giorno 24, Sezione 2700

Il giorno 24, cioè l'ultimo giorno in cui è stato imposto il livello idraulico massimo sull'arginatura, è anche quello in cui si raggiunge il minimo fattore di sicurezza sul pendio a lato campagna, ed il valore è pari a 3.533; questo versante è quindi sempre stabile, come quello sommitale a lato fiume: il pendio della parte superiore di arginatura non presenta superfici di scivolamento.

Questa sezione quindi non risente di particolari criticità, anche con una piena che simula condizioni molto peggiori rispetto a quelle date dalla piena reale considerata.

## Sezione 2980

La sezione 2980, con il carico idraulico simulato, non presenta mai il corpo arginale completamente attraversato dalla filtrazione: nel giorno 24 si riscontra l'imbibizione maggiore, ma la linea di filtrazione non arriva mai a toccare il versante a lato campagna.

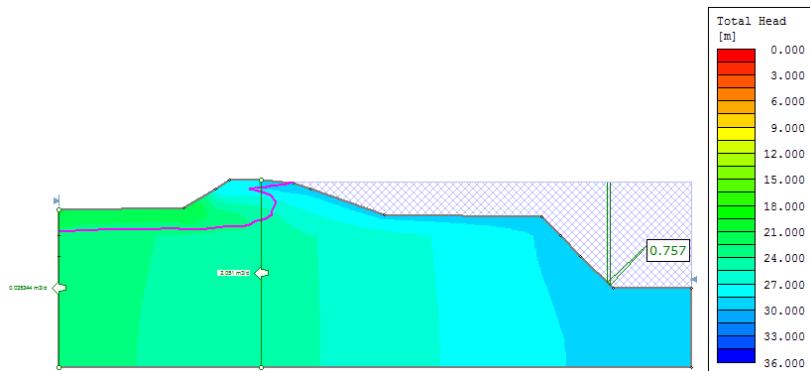


Figura 99: Situazione al Giorno 24 della Simulazione, Sezione 2980

Il versante a lato campagna della struttura non risente quindi molto della filtrazione durante il fenomeno di piena, e per questo non si innescano fenomeni di scivolamento su esso: il fattore di sicurezza si mantiene sempre maggiore di 6, ed il valore minimo di 6.031 lo si ottiene nelle prime fasi della simulazione; anche il versante a lato fiume non presenta l'innesto di superfici, quindi la stabilità della struttura non viene intaccata dalla filtrazione all'interno del corpo arginale.

La sezione risulta quindi ampiamente verificata, anche nelle condizioni simulate, peggiori di quelle realmente registrate in passato.

## Sezione 3308

Questa sezione, a differenza delle precedenti, durante il sesto giorno dall'inizio della piena è soggetta alla formazione di una sorgente sospesa a lato campagna:

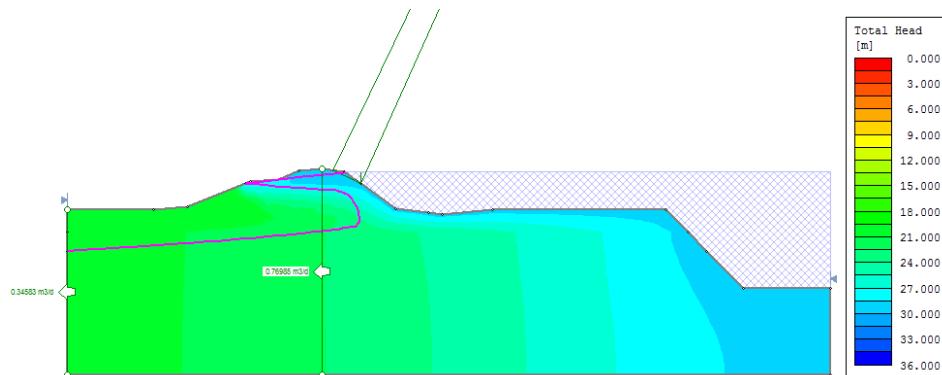


Figura 100: Situazione al Giorno 6 della Simulazione, Sezione 3308

La linea di imbibizione attraversa completamente il corpo arginale fino al giorno 25, e dal 26 la saturazione dei pori inizia a diminuire; questa condizione di filtrazione non compromette però la stabilità del versante a lato campagna: il fattore di sicurezza si mantiene sempre maggiore di 2, e raggiunge il valore minimo di 2.275 durante gli ultimi 5 giorni di permanenza del carico idraulico massimo sulla struttura. Anche a lato fiume il versante dell'arginatura non presenta superfici di scivolamento instabili: il fattore di sicurezza è sempre maggiore di 2, anche nella porzione superiore della struttura, quindi la sezione è verificata per quanto riguarda la stabilità dei versanti.

La verifica non è superata invece per la filtrazione: la sorgente sospesa si forma con tempistiche pienamente raffrontabili a quelle della piena del 2000, presa in considerazione, perché il livello raggiunto nel sesto giorno di quell'evento è superiore a quello ipotizzato; la piena simulata pone quindi la struttura in condizioni leggermente migliori, durante i primi giorni, rispetto a quelle della piena reale, e per questo la sezione non sarebbe verificata nemmeno in condizioni reali.

## Sezione 3380

Per questa sezione si ha la formazione di una sorgente sospesa a lato campagna in corrispondenza del giorno 21 della simulazione, e la presenza di acqua nello strato più superficiale permane fino al giorno 30; questo è indicato da una linea di imbibizione circolare, e la situazione particolare che si viene a creare è giustificata dalla permeabilità dello strato superiore: essa è più bassa rispetto a quella dello stesso strato nelle sezioni adiacenti, e ciò fa sì che l'acqua non venga rilasciata immediatamente, ma impieghi più tempo per fuoriuscire dall'arginatura.

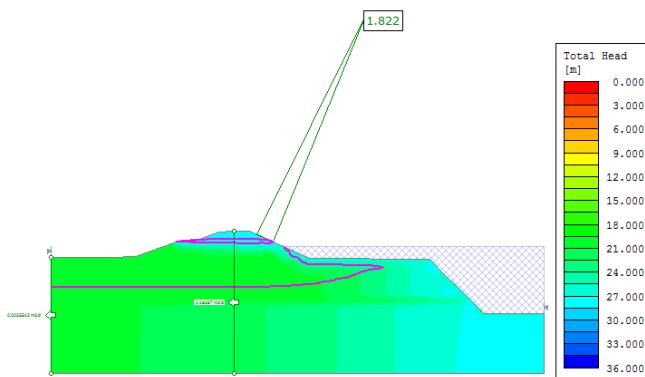


Figura 101: Situazione al Giorno 27 della Simulazione, Sezione 3380

La filtrazione all'interno del corpo arginale non compromette comunque la stabilità del pendio a lato campagna, ed il valore minimo del fattore di sicurezza è pari a 1.869, raggiunto nel giorno 24. Il versante a lato fiume è invece soggetto ad instabilità nella parte superiore, dal giorno 12 al giorno 24, ed il valore minimo del coefficiente di sicurezza, nel giorno 24, è pari a 0.167.

La simulazione eseguita su questa sezione rileva alcune criticità potenziali, ma esse soprattutto con tempi molto maggiori rispetto a quelli rilevati nel contesto di piena reale: la sorgente sospesa si crea in corrispondenza del 21esimo giorno, ma la piena del 2000 ha avuto una durata molto inferiore, quindi con tutta probabilità la filtrazione completa non avrebbe avuto il tempo di formarsi.

## Sezione 3600

In questa sezione è evidente come la caratteristica che attribuisce maggiori criticità sia lo strato posto in sommità nella struttura: in corrispondenza del giorno 14 si ha la formazione di una sorgente sospesa, e dalla Figura 102 è evidente che la linea di imbibizione segue il limite tra le due litologie di stratificazione più elevate, portando a saturazione i pori dello strato superiore. Questo succede perché la permeabilità dello strato sommitale è alta, mentre quello della stratificazione intermedia è di 3 ordini di grandezza inferiore rispetto alla prima; si crea così una netta separazione all'interno della struttura, ed una via preferenziale per lo scorrimento della vena di filtrazione.

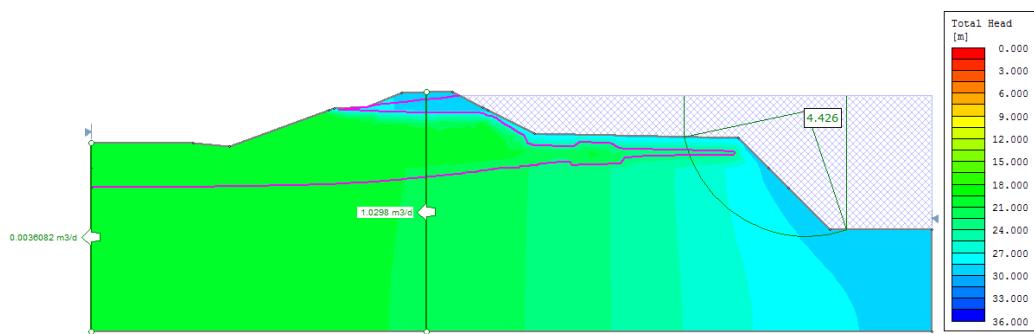


Figura 102: Situazione al Giorno 14 della Simulazione, Sezione 3600

I pori al di sotto di questo limite di stratificazione, a causa del carico idraulico imposto per un lungo periodo di tempo, risultano comunque saturi di acqua, ed il tempo impiegato per la sua fuoriuscita è elevato: fino al giorno 30 si rileva una linea di imbibizione chiusa su sé stessa, posta subito al di sotto del limite, che indica questa permanenza di saturazione.

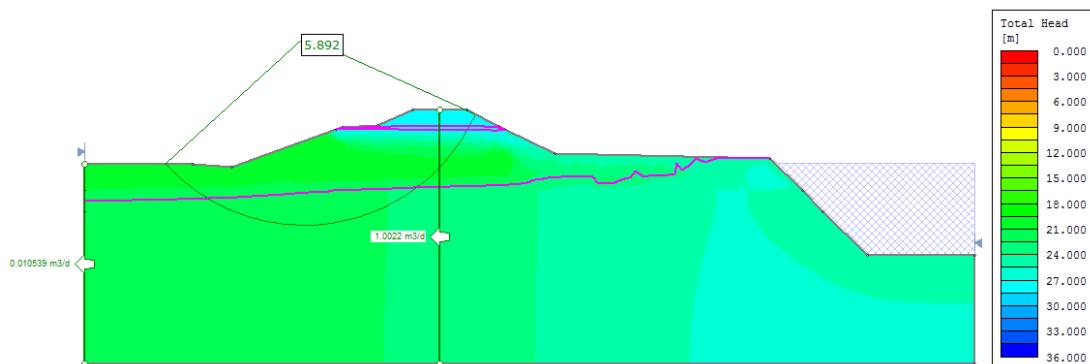


Figura 103: Situazione al Giorno 30 della Simulazione, Sezione 3600

La filtrazione non compromette comunque la stabilità del pendio a lato campagna, che non presenta superfici di scivolamento aventi coefficiente di sicurezza inferiore a 5.785, ed anche il pendio a lato fiume è stabile, con fattore di sicurezza minimo pari a 2.494.

La sola criticità rilevata in corrispondenza di questa sezione è quindi la formazione della sorgente sospesa, ma questo fenomeno avviene con tempistiche molto diverse rispetto a quelle della piena reale di riferimento: l'acqua arriva all'interno della golena nel giorno 14 della piena simulata, dopo 10 giorni nei quali sull'arginatura è stato posto costantemente un carico idraulico molto elevato, ma l'evento di piena del 2000 è stato molto più breve, ed i carichi massimi sono stati registrati per tempi più ridotti. E' quindi probabile che una piena come quella reale non avrebbe causato il fenomeno di filtrazione rilevato da quella simulata.

## Sezione 3900

Questa è l'unica sezione in cui la sorgente sospesa si forma al piede dell'argine, e questo avviene durante il 27esimo giorno dall'inizio dell'evento di piena; questo succede perché in corrispondenza della parte terminale della struttura, a lato campagna non è presente una banca intermedia.

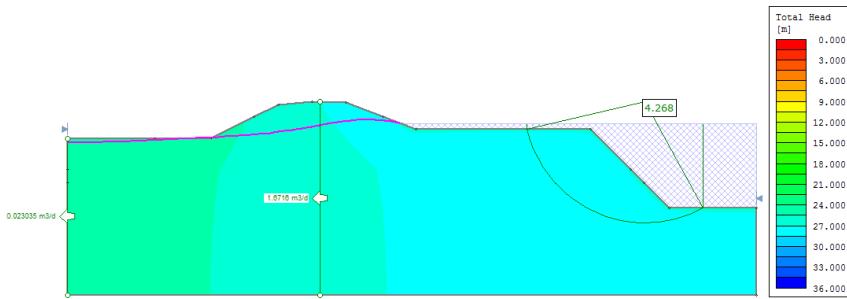


Figura 104: Situazione al Giorno 27 della Simulazione, Sezione 3900

L'acqua permane sul piano di campagna all'interno della golena per molti giorni dopo l'inizio della filtrazione, e dopo 45 giorni dall'inizio dell'evento di piena si vede un'inversione del flusso di acqua all'interno del terreno: essa infatti si muove dal lato campagna al lato fiume, richiamata dal livello di falda che si è ristabilito all'interno del letto del torrente.

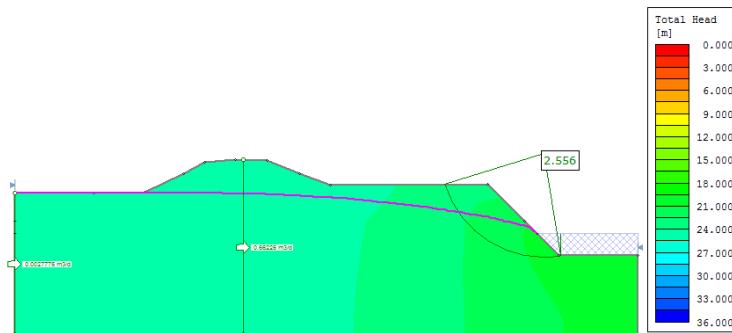


Figura 105: Situazione al Giorno 45 della Simulazione, Sezione 3900

La stabilità del versante arginale a lato campagna è comunque sempre verificata, poiché il valore minimo raggiunto è di molto superiore a 1, ed anche il versante a lato fiume è stabile, con un valore minimo del coefficiente di sicurezza pari a 2.556. La sola criticità rilevata in questa sezione è quindi la formazione della sorgente sospesa, ma le tempistiche sono largamente superiori rispetto a quelle riscontrate nella reale piena del 2000, quindi la simulazione è a favore di sicurezza, ed è ragionevole ipotizzare che non vi sarebbero criticità nel caso di una piena reale.

## In Sintesi

L'evento di piena simulato è solo in parte basato su un evento di piena reale, e le condizioni complessive imposte da esso sull'arginatura sono molto più gravose rispetto a quelle che si sono verificate durante la reale piena considerata, per quanto riguarda l'imbibizione del corpo arginale.

Tabella 31: Sintesi Prove a Regime Transitorio

<b>Sezione</b>	<b>Sorgente Sospesa</b>	<b>Versante L.C.</b>	<b>Versante L.F.</b>
43	Sì-Giorno 15	Stabile	Stabile
1250	No	Stabile	Stabile
1680	Sì-Giorno 9	Stabile	Stabile
1855	Sì-Giorno 6	Instabile-Giorno 7	Instabile-Giorno 7
2100	Sì-Giorno 6	Stabile	Stabile
2400	Sì-Giorno 10	Stabile	Stabile
2700	No	Stabile	Stabile
2980	No	Stabile	Stabile
3308	Sì-Giorno 6	Stabile	Stabile
3380	Sì-Giorno 21	Stabile	Instabile-Giorno 12
3600	Sì-Giorno 14	Stabile	Stabile
3900	Sì-Giorno 27	Stabile	Stabile

In Tabella 31 sono riassunti i risultati ottenuti dalle simulazioni in regime transitorio, ed è evidente che la sezione più critica è la 1855: essa infatti vede la formazione di una sorgente sospesa in tempi confrontabili con quelli di una piena reale, e mostra delle instabilità nella parte sommitale della sezione, le quali possono portare ad una riduzione della funzionalità della struttura. Solo tre sezioni mostrano la condizione di filtrazione completa in tempi brevi, e questo è positivo perché la piena simulata è più gravosa per la struttura rispetto a quella reale presa come riferimento; quindi, se l'arginatura nel suo complesso è in grado di resistere a questa sollecitazione, a maggior ragione resisterà a quella fornita da un carico idraulico minore.

Mantenendo l'arginatura in queste condizioni, senza apportare alcuna modifica, si può dire che essa sia in grado di resistere ad un fenomeno di piena come quello simulato, con colmo posto sempre a 29.20 metri s.l.m., senza presentare nessun tipo di criticità fino al giorno 6 dopo l'inizio dell'evento; si vuole però cercare di stabilizzare i versanti soggetti ad instabilità, e di allungare i tempi di formazione della sorgente sospesa, per quelle sezioni in cui essi sono comparabili con quelli della piena del 2000 presa a riferimento.

## Possibile Intervento di Miglioramento

In Tabella 31 sono riportate le criticità presentate dalle sezioni analizzate, e si è deciso di andare ad intervenire su quelle 5 sezioni che presentano il tempo di formazione della sorgente sospesa minore di 14 giorni (2 settimane).

La proposta di intervento consiste nel realizzare uno scavo, sulla sommità dell'arginatura e centrale rispetto alla larghezza del coronamento, in corrispondenza di tutte le sezioni da stabilizzare; esso avrà larghezza pari a 1 metro, mentre la profondità sarà variabile, ma sempre maggiore rispetto a quella a cui si colloca il primo limite di stratificazione all'interno del corpo arginale, per permettere un innesto stabile. Questo scavo sarà poi riempito con un terreno limo-argilloso, a permeabilità inferiore rispetto a quella dello strato che lo circonda; in questo modo si arriva a porre un nucleo di argilla all'interno di una formazione limo-sabbiosa, per ridurre la permeabilità dello strato superficiale, ed allungare i tempi di formazione della sorgente sospesa.

Si ipotizza di utilizzare lo stesso terreno in tutte le sezioni, la sua permeabilità è ipotizzata pari a  $10^{-6}$ , ed i suoi parametri meccanici vengono posti pari a 0; viene fatta questa ipotesi perché la caratteristica di questo terreno che interessa, al fine di queste simulazioni, è la permeabilità, per ridurre la filtrazione, mentre gli altri parametri meccanici, che influenzano la stabilità, in questo caso non sono importanti, poiché questo terreno viene posto all'interno di uno strato, quindi è sicuramente stabile.

Questo nocciolo a permeabilità minore serve quindi per creare una barriera verticale all'interno del corpo arginale, che riduca la possibilità di filtrazione dell'acqua in esso.

Dopo l'intervento, la geometria di tutte le 5 sezioni studiate risulta modificata, e si riporta come esempio quella in Figura 106:

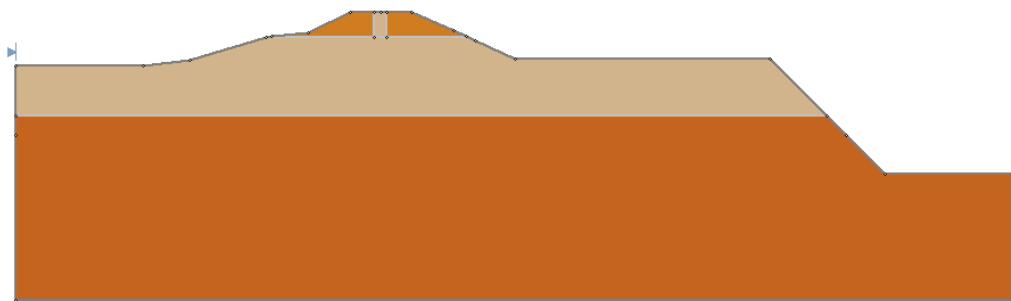


Figura 106: Nuova Geometria Sezioni, con Nucleo di Argilla

Eseguendo nuove simulazioni in transitorio, su queste geometrie modificate, si ottengono i risultati sperati: non si ha più la formazione di una sorgente sospesa a lato campagna, e si ottiene la stabilità di tutti i versanti arginali, in ogni sezione studiata.

Eseguendo queste analisi è evidente che la filtrazione nel corpo arginale avviene all'interno degli strati superiore ed inferiore, non in quello intermedio; per questo motivo è sufficiente che il taglione limo-argilloso si innesti per pochi centimetri nello strato sottostante, al fine di impedire la filtrazione fino a lato campagna. Si riporta come esempio la situazione rilevata il giorno 5, in una sezione esemplificativa: è evidente come la linea di imbibizione si arresti in corrispondenza del taglione a bassa permeabilità, formando un segmento verticale, e non riesca a penetrare all'interno dello strato sottostante.

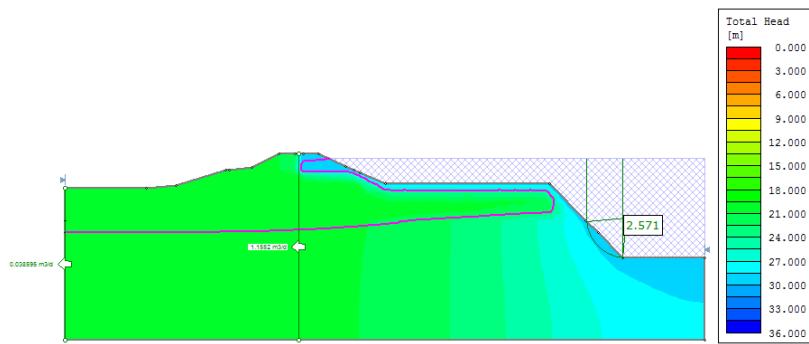


Figura 107: Situazione Esemplificativa al Giorno 5

L'ultimo giorno di permanenza del massimo carico sulla struttura è il 24esimo, ed in corrispondenza di questo si ha la maggior saturazione degli strati; si riporta come esempio la Figura 108, in cui si nota la linea di filtrazione molto allungata verso il lato campagna, ma è evidente la rientranza verso il lato fiume in corrispondenza dello strato intermedio: ciò indica che questa parte del corpo arginale non viene saturata in maniera analoga a quelle sovrastante e sottostante, aventi maggiore permeabilità.

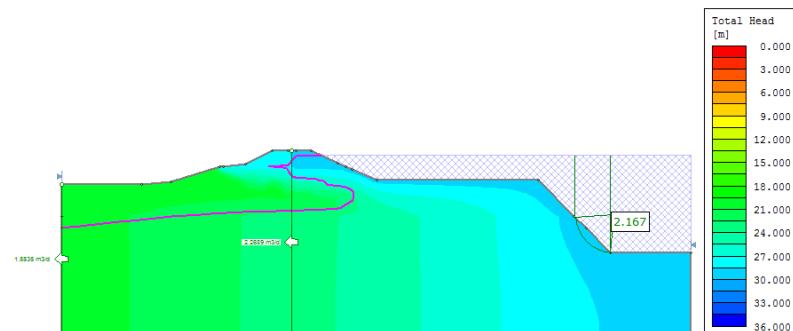


Figura 108: Situazione Esemplificativa al Giorno 24

Come conclusione di queste nuove simulazioni è quindi possibile determinare le tempistiche con cui l'argine arriva a permettere la filtrazione a lato campagna: con una piena come quella simulata, in cui il carico idraulico imposto di 29.20 metri permane sulla struttura per 21 giorni (3 settimane), allo stato dell'arte vi sono sezioni che permettono la completa filtrazione all'interno del corpo arginale già a partire dal 3° giorno di carico massimo, anche se con velocità molto basse e non preoccupanti; si registrano inoltre alcune instabilità nei pendii arginali.

Se si stabilizza la struttura attraverso il metodo suggerito, invece, si ha la formazione di una sorgente sospesa a lato campagna solo durante il 14esimo giorno, quindi dopo due settimane dall'inizio dell'evento di piena, e la struttura non mostra più alcuna instabilità di tipo geotecnico sui pendii. Con questo intervento si ottiene quindi la stabilità della struttura, anche quando essa è soggetta ad un carico molto superiore a quello reale preso in considerazione; inoltre, l'evento più gravoso che ha interessato questa arginatura nell'ultimo secolo è quello del 1951, e la sua durata è stata più breve di quella ipotizzata per l'onda simulata, quindi la ricostruzione è stata fatta in pieno favore di sicurezza.

## Verifica 3: Resistenza dell'Arginatura in Condizioni Sismiche

Il codice di calcolo “Slide” permette di studiare la stabilità di un pendio quando questo è soggetto ad un evento sismico, ed è possibile combinare la forza impressa dal sisma sul terreno con altri carichi, come quello idraulico imposto da una piena; questa combinazione viene eseguita considerando per intero l’azione sismica, ma si ipotizza che questa non agisca sull’arginatura contemporaneamente ad un evento di piena al colmo, perché la probabilità che due calamità naturali si abbattano contemporaneamente sullo stesso luogo è molto ridotta.

Il carico idraulico viene imposto in regime stazionario, perché è quello più gravoso per la stabilità della struttura, e si decide di considerarlo pari a quello che, nella Verifica 1, rende stabili tutte le sezioni, quindi il minimo registrato, pari a 27.48 metri.

Il moto generato da un sisma in un particolare luogo dipende dalle condizioni locali, cioè dalle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno, quindi dalle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono; per determinare la forza sismica da applicare sull’arginatura ci si basa quindi sulle prescrizioni riportate nelle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008, che seguono questo principio. Essa viene assunta come una forza statica equivalente, proporzionale al peso della massa potenzialmente instabile, e viene suddivisa nelle due componenti, orizzontale e verticale:

$$F_h = K_h \cdot W$$

$$F_v = K_v \cdot W$$

In queste equazioni compaiono i due coefficienti sismici equivalenti, che servono per descrivere gli effetti del sisma sul pendio,  $K_h$  e  $K_v$ ; la loro determinazione avviene attraverso formule empiriche:

$$K_h = \beta_s \cdot \frac{a_{\max}}{g}$$

$$K_v = 0.5 \cdot K_h$$

Il coefficiente  $\beta_s$  è riferito agli spostamenti indotti dal sisma sul pendio, ed esprime la capacità di quest’ultimo di subire spostamenti senza mostrare collasso di tipo fragile; esso è utile per descrivere in modo più appropriato gli effetti del sisma sul pendio stesso,

perché ricordando che le sollecitazioni indotte da un sisma sono di breve durata e variabili per intensità, direzione e verso nel tempo e nello spazio, non si assume il valore massimo dell'accelerazione attesa al sito, ma si utilizza un suo valore ridotto, e questa riduzione viene applicata attraverso l'utilizzo del coefficiente  $\beta_s$ .

I valori assunti dal coefficiente  $\beta_s$  sono tabulati all'interno delle NTC2008, e dipendono dalla categoria di sottosuolo presente nel sito indagato:

Tabella 32: Coefficiente di Riduzione dell'Accelerazione Massima

	Categoria di Sottosuolo	
	A	B, C, D, E
	$\beta_s$	$\beta_s$
<b><math>0.2 \leq a_g \leq 0.4</math></b>	0.3	0.28
<b><math>0.1 \leq a_g \leq 0.2</math></b>	0.27	0.24
<b><math>a_g \leq 0.1</math></b>	0.2	0.2

Il parametro  $a_{\max}$ , da calcolare per poi essere ridotto, indica l'accelerazione massima attesa al sito, e si ricava attraverso una formula empirica:

$$a_{\max} = S_S \cdot S_T \cdot a_g$$

La risposta sismica locale dipende quindi dall'accelerazione massima che ci si può aspettare nel sito oggetto di studio, ed essa è influenzata principalmente da due parametri:

- $S_S$ , che rappresenta l'influenza della stratigrafia nella trasmissione delle onde sismiche al suolo.
- $S_T$ , che rappresenta l'influenza della topografia del sito sull'azione sismica.

Il coefficiente di amplificazione stratigrafica viene determinato in base alla categoria di suolo di cui è composto il sito indagato, e questa classificazione viene eseguita sulla base della velocità di propagazione delle onde sismiche in esso: nelle NTC 2008 è presente una tabella, in cui sono indicate 5 tipologie diverse, ed il discriminante è proprio il valore di velocità  $V_{S30}$ , espresso in m/s. Questo rappresenta la velocità di propagazione delle onde di taglio entro 30 metri di profondità nel sottosuolo, ed una sua stima può essere ricavata dalle prove penetrometriche statiche CPTU. Esistono anche classificazioni: una è definita in base al valore di resistenza ricavato dalle prove penetrometriche dinamiche  $N_{SPT30}$ , mentre l'altra è in base al valore della coesione non drenata attribuibile al suolo  $C_{u30}$ , ma

queste classificazioni dovrebbero essere limitate a valutazioni locali di prima approssimazione, ed è da preferire quella basata sulla velocità di propagazione delle onde di taglio.

Tabella 33: Coefficiente di Amplificazione Stratigrafica

<b>Suolo</b>	<b><math>V_{S30}</math> [m/s]</b>	<b><math>S_s</math></b>
A	>800	1
B	360-800	$1 \leq 1.4 - 0.4 F_0(a_g) \leq 1.2$
C	180-360	$1 \leq 1.7 - 0.6 F_0(a_g) \leq 1.5$
D	<180	$0.9 \leq 2.4 - 1.5 F_0(a_g) \leq 1.8$
E	<20 m di suolo di tipo C o D su suolo di tipo A	$1 \leq 2 - 1.1 F_0(a_g) \leq 1.6$

Il coefficiente di amplificazione topografica, invece, viene attribuito in base alla categoria topografica in cui rientra la superficie del sito studiato, ed anche questi valori sono tabulati.

Tabella 34: Coefficiente di Amplificazione Topografica

<b>Categoria Topografica</b>	<b>Caratteristiche della Superficie Topografica</b>	<b><math>S_t</math></b>
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$	1
T2	Pendii con inclinazione media $i \geq 15^\circ$	1.2
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base, e inclinazione media $i \geq 30^\circ$	1.2
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base, e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$	1.4

Per il calcolo dell'accelerazione massima è necessario conoscere anche il valore dell'accelerazione attesa al sito  $a_g$ , e questo parametro dipende dalle coordinate geografiche del sito studiato e dai tempi di ritorno ipotizzati per il sisma, così come il coefficiente  $F_0$ , utilizzato per la determinazione del coefficiente di amplificazione stratigrafica; questi ultimi due coefficienti prendono il nome di "Parametri Spettrali", ed è possibile determinarli attraverso un codice di calcolo, pubblicato come foglio elettronico scaricabile e modificabile, sul sito internet del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, alla sezione "Azioni Sismiche-Spettri di Risposta".

## Calcolo dei Coefficienti Sismici Equivalenti

Per determinare i coefficienti sismici  $K_h$  e  $K_v$  relativi al sito analizzato si devono innanzitutto conoscere le coordinate geografiche dello stesso, per poterle inserire all'interno del programma rilasciato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, ed ottenere così i parametri spettrali  $a_g$  e  $F_0$ .

Utilizzando il programma “Google Earth”, ed inserendo come ricerca il nome del sito specifico, “Ghiarole”, si ottengono le coordinate del centro della golena chiusa, espresse in gradi sessualiimali di longitudine e latitudine; essa si trova ad una latitudine di  $44^{\circ} 54' 3.2''$  Nord, e ad una longitudine di  $10^{\circ} 29' 55.13''$  Est.

Il foglio di calcolo utilizza però le coordinate espresse in gradi decimali, quindi sono stati convertiti questi dati fino ad ottenere due nuove coordinate: 44.9008 Nord come latitudine e 10.4986 Est come longitudine.

Sono poi stati inseriti come dati la vita nominale dell’opera, che per l’arginatura è assunta pari a 100 anni, ed il coefficiente d’uso della costruzione, considerato di 1.5 perché l’opera in questione protegge un luogo affollato; si deve inoltre scegliere lo stato limite a cui la costruzione deve corrispondere dopo l’avvento del sisma: esso deve essere uno stato limite di esercizio, perché se l’arginatura presenta cedimenti strutturali, ai quali si arriva considerando gli stati limite ultimi, non riesce più ad assolvere allo scopo per cui è stata costruita, e fra i due possibili si è scelto di considerare uno Stato Limite di Danno.

Per questa tipologia, a seguito del sisma, la costruzione subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti, e da non compromettere in modo significativo la capacità di resistenza nei confronti dei carichi imposti, mantenendosi immediatamente utilizzabile. Dalla combinazione di questi dati si ricava il tempo di ritorno del sisma da considerare, che è pari a 150 anni.

Una volta inseriti questi dati, il programma restituisce il valore dei due parametri spettrali di interesse, e considerando che le coordinate cui corrisponde la golena di Ghiarole sono classificate, dalla microzonazione sismica, appartenenti ad un territorio di categoria 3, per il quale il rischio sismico è molto basso, i valori restituiti sono molto bassi: l’accelerazione attesa al sito è pari a 0.062, mentre il coefficiente  $F_0$  restituito è pari a 2.62.

Si deve ora calcolare l'accelerazione massima attesa al sito, e per fare ciò si devono determinare i coefficienti di amplificazione stratigrafica e topografica; il suolo su cui si trova il sito studiato rientra nella categoria C, dall'analisi della velocità di propagazione delle onde sismiche, quindi il valore del parametro  $S_S$  dovrebbe risultare compreso fra 1 e 1.5. In realtà, eseguendo il calcolo riportato in tabella, inserendo i parametri spettrali restituiti dal foglio elettronico, si ottiene un valore maggiore di 1.5, quindi il valore assunto per questo coefficiente è pari al massimo della fascia rispondente alla categoria di sottosuolo analizzata.

Per determinare il coefficiente di amplificazione topografica, invece, si vanno a vedere le caratteristiche della superficie topografica; nel caso di studio si ha una superficie che rientra nella tipologia T3, quindi il coefficiente di amplificazione topografica viene considerato pari a 1.2.

L'accelerazione massima viene quindi così calcolata:

$$a_{\max} = S_S \cdot S_T \cdot a_g = 1.5 \cdot 1.2 \cdot 0.0062 = 0.1116$$

Per poter determinare il coefficiente sismico equivalente orizzontale serve anche il coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima, che dipende direttamente dal valore di  $a_g$ : essendo  $a_g$  inferiore a 0.1,  $\beta_s$  assume il valore di 0.2.

I due coefficienti sismici equivalenti risultano quindi pari a:

$$K_h = 0.2 \cdot \frac{0.1116}{9.806} = 0.0023$$

$$K_v = 0.5 \cdot 0.0023 = 0.0012$$

Il coefficiente a componente verticale viene approssimato per eccesso, per rimanere a favore di sicurezza.

Questi sono quindi i valori da inserire all'interno del codice di calcolo per eseguire le simulazioni in condizioni sismiche, ed esse vengono applicate su entrambi i versanti, per verificare che non si formi alcuna superficie di scivolamento durante il sisma.

## Esecuzione delle Simulazioni

Le simulazioni in condizioni sismiche sono state eseguite solamente per le 6 sezioni indagate con prove geognostiche, considerandole rappresentative di tutta la struttura arginale.

### Sezione 43

Con il carico idraulico in regime permanente posto alla quota di sicurezza, e l'azione sismica applicata con i valori ricavati dai calcoli, si ottiene la completa stabilità di questa sezione, e la superficie di scivolamento con fattore di sicurezza minimo si colloca sul versante a lato fiume.

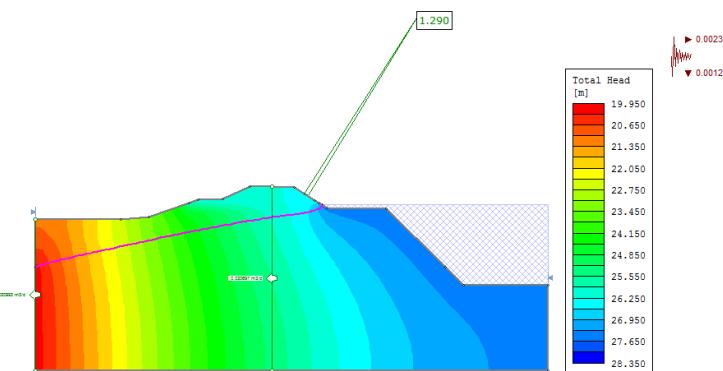


Figura 109: Situazione con Carico Idraulico e Sismico, Sezione 43

### Sezione 1250

Anche questa sezione, come la precedente, risulta completamente stabile con questi carichi applicati, ed il fattore di sicurezza minimo è sempre sul versante a lato fiume:

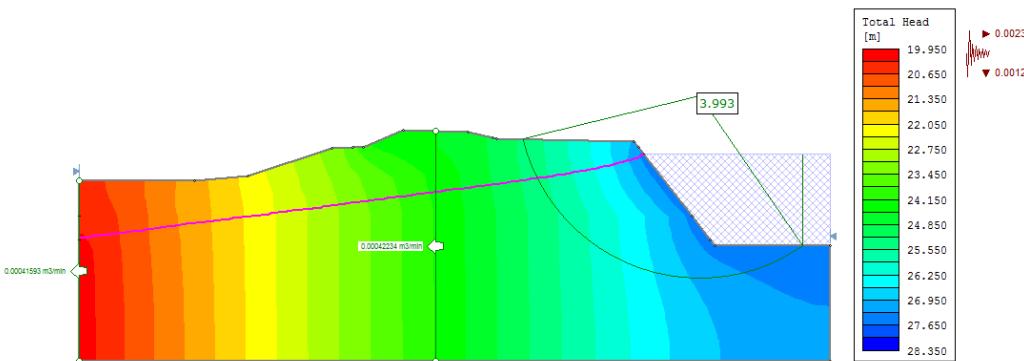


Figura 110: Situazione con Carico Idraulico e Sismico, Sezione 1250

## Sezione 1855

In questo caso il valore minimo del fattore di sicurezza si colloca sul versante a lato campagna, ma la sezione risulta completamente stabile, nonostante l'applicazione del carico sismico.

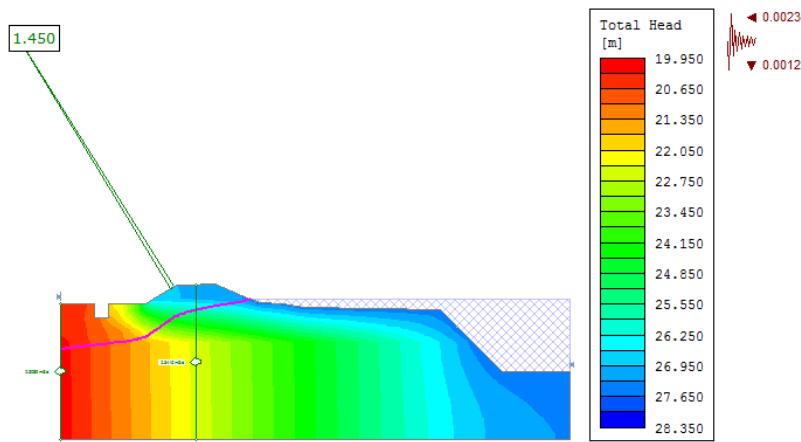


Figura 111: Situazione con Carico Idraulico e Sismico, Sezione 1855

Il risultato ottenuto è molto positivo, poiché questa sezione è risultata quella più problematica per le altre situazioni simulate, mentre in questo caso non presenta caratteristiche particolari di instabilità.

## Sezione 2980

In corrispondenza di questa sezione sono risultate positive tutte le verifiche precedenti, e questa condizione di completa stabilità è stata confermata anche da questa nuova simulazione:

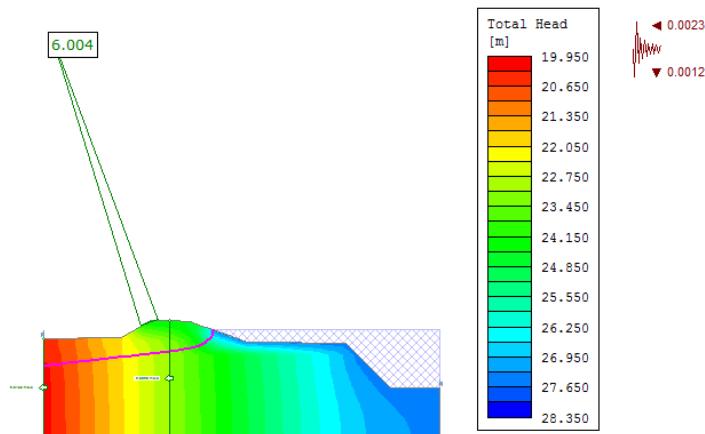


Figura 112: Situazione con Carico Idraulico e Sismico, Sezione 2980

## Sezione 3380

Il valore minimo del fattore di sicurezza per la stabilità dei pendii lo si trova, in corrispondenza di questa sezione, a lato fiume, ma esso è maggiore di 1, quindi la condizione è di completa stabilità, anche se la sezione è soggetta alla combinazione dei due carichi, sismico ed idraulico.

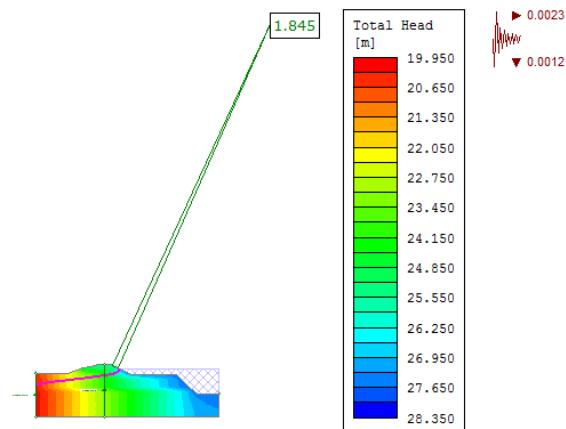


Figura 113: Situazione con Carico Idraulico e Sismico, Sezione 3380

## Sezione 3900

La stabilità rilevata durante la verifica con carico stazionario al coronamento viene confermata grazie a questa simulazione: il carico idraulico è minore, viene composto con l'azione sismica, ma la sezione è comunque in condizioni di completa stabilità.

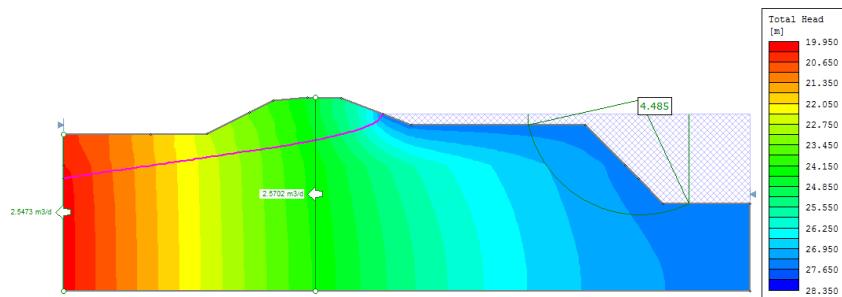


Figura 114: Situazione con Carico Idraulico e Sismico, Sezione 3900

## In Sintesi

Le verifiche eseguite sull'arginatura in condizioni sismiche hanno mostrato una completa resistenza della struttura nelle condizioni ipotizzate; il carico idraulico gravante su essa è stato imposto pari a quello di sicurezza trovato con le verifiche in regime stazionario, mentre l'azione sismica è quella derivante dai calcoli basati sulle NTC 2008, mantenendosi sempre a favore di sicurezza.

# Conclusioni

L'analisi dell'arginatura consortile posta a protezione della golena chiusa di Ghiarole è stata eseguita andando a verificare la stabilità dell'opera stessa quando essa è sottoposta a diverse tipologie di azioni, e da ogni verifica sono stati ottenuti risultati utili per la valutazione del piano di sgombero della frazione durante un evento di piena.

La prima verifica è stata eseguita ponendo sulla struttura un carico stazionario, e si è valutata la risposta dell'argine ad esso; in queste condizioni il livello massimo di piena è pari a 27.48 metri s.l.m., perché se esso si innalza vi sono sezioni che permettono la filtrazione dell'acqua all'interno del corpo arginale, fino al versante a lato campagna, e si arriva alla formazione di una sorgente sospesa. Si deve sottolineare che questa condizione non rispecchia una situazione reale, perché non è possibile che vi sia un carico permanente così elevato; se così fosse, il torrente Enza sarebbe sempre in piena, poiché il livello di falda si attesta a 20.1 metri s.l.m., e questo non è possibile.

Con il risultato ottenuto da questa prima verifica è stata implementata la terza, nella quale la struttura è soggetta non solo ad un carico idraulico permanente, ma anche ad un'azione sismica. Si ipotizza di combinare le due azioni in modo che l'azione sismica sia massima, mentre il carico idraulico sia più elevato rispetto a quello di un periodo di magra, ma comunque sopportabile dall'arginatura, e per questo si sceglie il valore di sicurezza derivante dalla prima simulazione. Il risultato delle simulazioni è stato analogo per tutte le sezioni analizzate, e si è infatti riscontrata una completa stabilità della struttura.

La seconda verifica è stata eseguita invece in regime transitorio, quindi con una condizione idraulica più simile a quella reale. Le ipotesi con cui essa è stata implementata però sono a favore di sicurezza, perché a fronte di piene realmente accadute, aventi durata complessiva di 12 giorni, è stato simulato un evento lungo complessivamente 45 giorni, con una durata del colmo di piena gravante sulla struttura di 21 giorni. In questo caso la struttura non è completamente verificata, perché vi sono sezioni che permettono

la completa filtrazione dell'acqua, quindi il suo ingresso in golena, con tempi paragonabili a quelli registrati per le piene reali, e si riscontra una parziale instabilità dei versanti marginali. Per questo motivo si propone l'inserimento, al centro dello strato più superficiale, di un taglione argilloso, avente permeabilità minore di quella dello strato attualmente presente, per ridurre il fenomeno di filtrazione. Simulando anche questa nuova condizione proposta si ottengono risultati migliori: i versanti sono completamente stabilizzati, e non si registra la formazione di una sorgente sospesa fino al 14esimo giorno dall'inizio dell'evento; i tempi in cui ciò avviene sono quindi molto più lunghi di quelli in cui sono avvenuti gli eventi reali, e la struttura è verificata con un carico gravante su essa pari a 29.20 metri s.l.m., che si mantiene per 11 giorni.

# Bibliografia

- Prof. Maria Giovanna Tanda, *Dispense di Idrologia Sotterranea* - Università degli Studi di Parma - Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Ambiente, del Territorio e Architettura;
- Prof. Paolo Mignosa, *Dispense di Sistemazione dei Bacini Idrografici* – Università degli Studi di Parma - Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Ambiente, del Territorio e Architettura;
- Prof. Andrea Segalini, *Dispense di Geologia Applicata e Stabilità dei Pendii A* - Università degli Studi di Parma - Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Ambiente, del Territorio e Architettura;
- Prof. Roberto Valentino, *Dispense di Meccanica delle Rocce e Stabilità dei Pendii B* - Università degli Studi di Parma - Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Ambiente, del Territorio e Architettura;
- Lorella Montrasio, 2012, *Lezioni di Geotecnica*;
- Anselmo Mori, 2001, *Brescello nei suoi Ventisei Secoli di Storia*;
- Dott. Geol. Fabrizio Giorgini, *Documentazione Verbale Lavori sull'Argine*;
- <http://www.regione.emilia-romagna.it>, *Classificazione Sismica dei Comuni dell'Emilia Romagna*;
- <http://www.georadar.it>, *I Sondaggi Elettrici Verticali*;
- Dott. Ing. Cesare Covri, 2006, *Relazione Geologica-Geotecnica*;
- Dott. Ing. Cesare Covri, 2006, *Relazione Descrittiva*;
- Dott. Geol. Angelo Scotti, *Studio dei Terreni di Fondazione del P.I.I. per Insediamento Media Struttura di Vendita in Via Commenda a Castelleone (CR)*;
- <http://www.agenzainterregionalepo.it>;
- <http://www.adbpo.it>, *Piano di Stralcio per l'Assetto Idrogeologico*;
- <http://www.cspl.it>, *Azioni Sismiche – Spettri di Risposta ver. 1.03*;
- <https://it.wikipedia.org>;
- <http://www.consorzioghiarole.it>;
- <http://italia.indettaglio.it>, *La Frazione di Ghiarole*;
- <http://www.comune.brescello.re.it>, *Località Ghiarole*;

# **Ringraziamenti**

Questo lavoro di tesi non sarebbe stato possibile senza l'aiuto fondamentale di coloro che mi sono stati accanto e che mi hanno aiutato e supportato durante tutto il percorso di studi.

Ringrazio innanzitutto i miei genitori e mio fratello, senza i quali nulla di questo sarebbe stato possibile.

Ringrazio Davide, che con la sua pazienza non mi ha mai fatto mancare il supporto per andare avanti.

Ringrazio l'Ingegner Graziani Davide, la Professoressa Tanda Maria Giovanna e, last but not least, il Professor Andrea Segalini, per l'aiuto fornитоми nella realizzazione di questo progetto.

Ringrazio infine le mie compagne di studi Chiara e Margherita, per aver reso più piacevoli gli anni della specializzazione.