

Fiume Po

Classifica: LO-E-31

CUP: B68H22000760002

CIG: Z13389ED5B



PROGETTO DEFINITIVO - ESECUTIVO



OPERE DI IMPERMEABILIZZAZIONE DELL'ARGINE MAESTRO DEL FIUME PO (LOTTO 1) NEI COMUNI DI SOMAGLIA, GUARDAMIGLIO E SAN ROCCO AL PORTO (LO) - DGR 6273/2022

ELABORATO

RELAZIONE GEOTECNICA

UBICAZIONE DELL'OPERA

Comune di Guardamiglio

DATA 08.03.2024 SCALA ---

AGG.TO

COMMITTENTE

Direzione Territoriale Idrografica Lombardia Occidentale
Ufficio Operativo di Milano

Palazzo Sistema Via Taramelli, 12 – 20124 Milano
Tel. 02/777141 - Fax. 02/77714222
protocollo@cert.agenziapo.it



Progettista:
Dott.Ing. Gian Pietro ARMANI

Via Manzoni,6
43014 Felegara di Medesano (PR)
E-mail : gianpietro.armani@hotmail.com

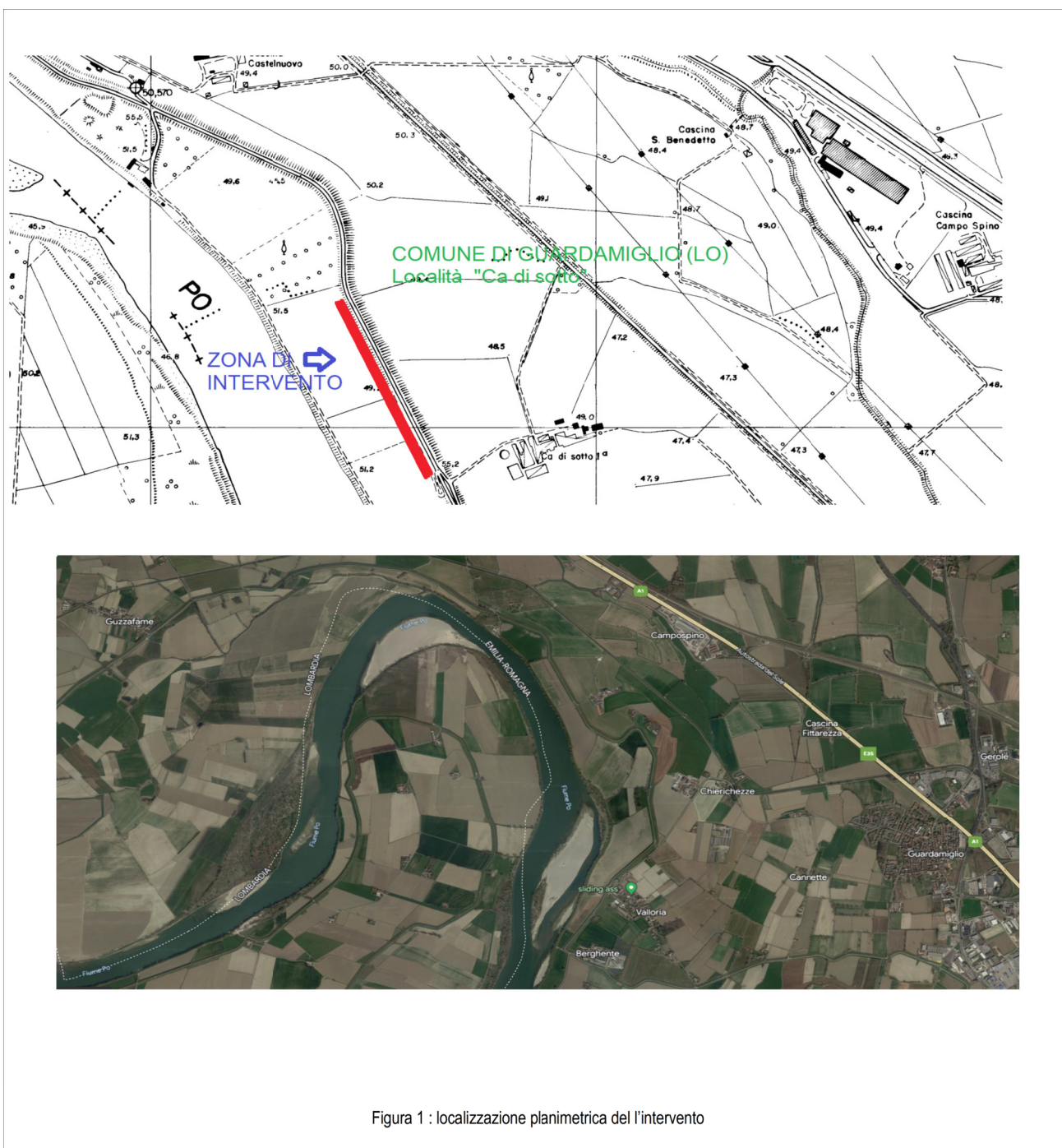
Responsabile Unico del Procedimento:
Ing. Sabrina CANALI

Il Dirigente:
Dott.Ing. Marco LA VEGLIA

2

OGGETTO: RELAZIONE GEOTECNICA : (LO-E-31) DGR 6273/2022 – Opere di impermeabilizzazione dell'argine maestro del f. Po (lotto 1) nei comuni di Somaglia, Guardamiglio, San Rocco al Porto.

Il tratto di arginature maestre del Basso Lodigiano rientra nella rete delle opere di competenza dell'Agenzia Interregionale per il Po - Direzione Territoriale Idrografica Lombardia Occidentale - Ufficio Operativo di Milano con sede in Milano via Taramelli,12.



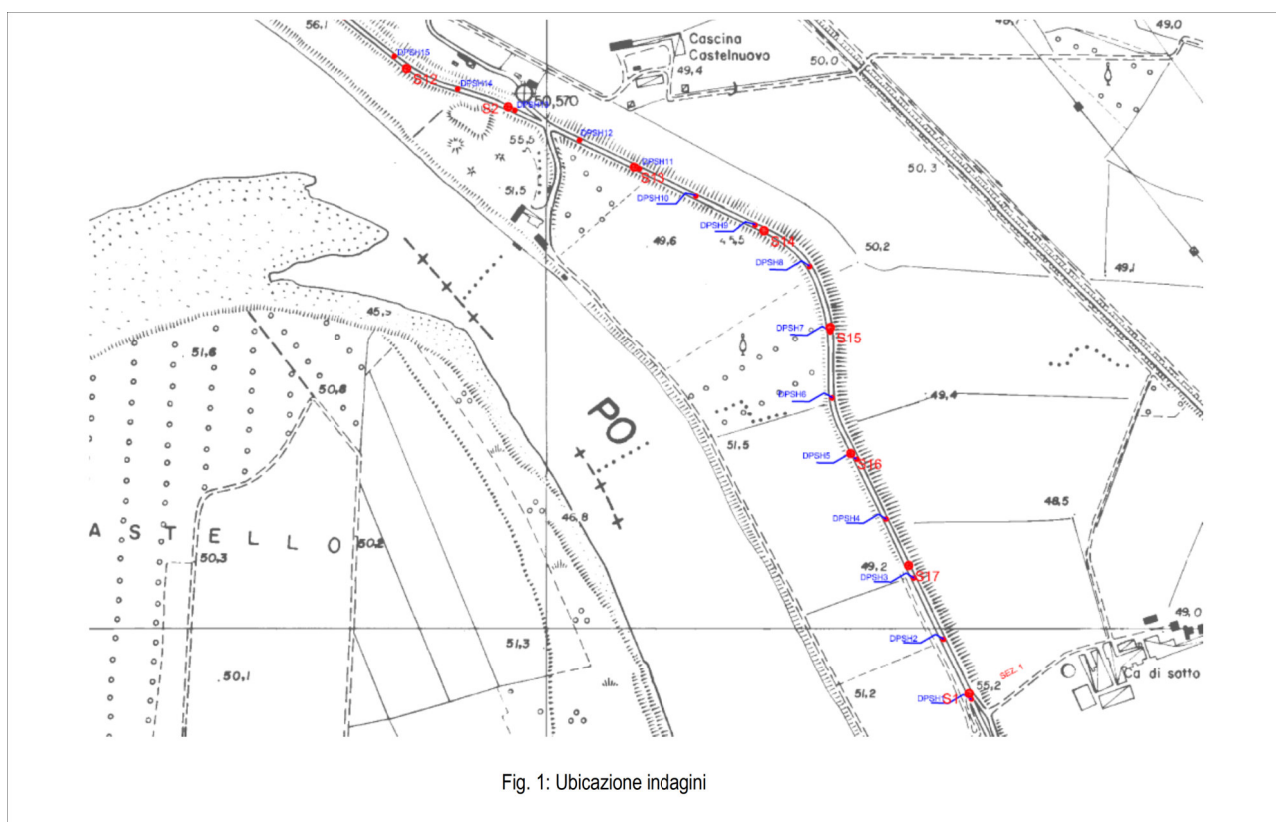
Indice generale

PREMESSA.....	3
INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E CENNI SULL'IDROGRAFIA TERRITORIALE.....	3
PROVE GEOTECNICHE.....	4
RELAZIONE SISMICA.....	4
CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL TERRITORIO DEL COMUNE DI GUARDAMIGLIO.....	8
RISULTATI DELLE INDAGINI E SINTESI DEI DATI.....	9
Indagini Geotecniche.....	9
MODELLO NUMERICO.....	10
Estratto riassuntivo della modellazione.....	10
Fasi operative.....	12
Implementazione del modello e schematizzazione di calcolo- dominio delle elaborazioni.....	13
Definizione del reticolo di calcolo e caratterizzazione geotecnica dei terreni.....	15
Condizioni al contorno - celle a livello costante.....	16
Risultanze dell'applicazione del modello - Flusso stazionario.....	17
Simulazioni con ricerca della durata critica della piena.....	18
Confronto delle simulazioni in regime stazionario-stato di fatto vs stato di progetto.....	24
Confronto delle simulazioni in regime stazionario - stato di fatto vs stato di progetto.....	25
Confronto delle simulazioni in regime transitorio -stato di fatto vs stato di progetto.....	27
Verifica al sifonamento criteri di progetto con metodi classici e formule empiriche	31
CONCLUSIONI FINALI.....	31

PREMESSA

Lo scrivente, su incarico di AIPo (Agenzia Interregionale per il Fiume Po), ha seguito la campagna di rilevazioni e prove geotecniche e geofisiche in località C.na Tosi effettuate dal Dott. Maurizio Visconti di Vigevano attraverso Performapali Srl, nel Comune Guardamiglio e Somaglia in provincia di Lodi, allo scopo di pervenire congiuntamente ai parametri intrinseci dell'ammasso da implementare alla modellazione numerica dei fenomeni di filtrazione necessaria per individuare le dimensioni di una diaframmatura e la tipologia atta ad eliminare il fenomeno dei “fontanazzi”, verificatisi reiteratamente negli ultimi trent'anni ed in particolare durante la piena (Ott-Nov. 2018).

Onde definire al meglio il modello geologico e geotecnico, sono stati eseguiti , 20 sondaggi (dei quali n. 14 spinti a -20,00 mt. dalla sommità arginale e n. 6 spinti a -28,00 mt. dalla sommità arginale) a carotaggio continuo con prelievo dei litotipi in cassetta, in 16 di essi sono state eseguite prove di permeabilità Lefranc a diverse profondità. Si veda a tal proposito lo studio geologico a firma del Dott. Geol. Maurizio Visconti - parte integrante del presente progetto.



INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E CENNI SULL'IDROGRAFIA TERRITORIALE

La località di Cascina Valle è posta in comune di Guardamiglio essa sorge alla quota di +47,00 m. dal livello del mare sul lato sinistro del Fiume Po a circa 8 km dal Comune S.Rocco al Porto che risulta orograficamente situato alla progressiva di Piacenza. Il territorio sovra comunale dell'area Somaglia, Guardamiglio e S.Rocco al Porto è caratterizzato dalla presenza del corso d'acqua più importante a livello nazionale e da una rete secondaria di canali e scoli consorziali e non, oltre che da fossati interpoderali. I principali corsi d'acqua che attraversano i territori oggetto di progettazione

1. Il F.Po , che delimita parte del confine meridionale del Comune. Tale corso d'acqua ha, qui, un andamento meandriforme.
2. La Roggia Risalola che entra nel F.Po a monte di C.na Somaglia.
3. Il Colatore Guardalobbia che corre in direzione ovest-est su tutto il fronte interessato dalle opere con andamento a tratti completamente rettilineo artificiale.

PROVE GEOTECNICHE

Come accennato in premessa, nel sito sono state realizzate numerose prove geognostiche. In particolare sono stati realizzati 20 sondaggi ed altrettante prove CPTU.

I sondaggi impostati alla quota sommitale dell'argine hanno raggiunto le seguenti profondità:

SONDAGGIO	PROFONDITA'	nota	SONDAGGIO	PROFONDITA'	nota
S1	28,00		S11	20,00	
S2	28		S12	20,00	
S3	28,00		S13	20,00	
S4	20,00		S14	20,00	
S5	20,00		S15	28,00	
S6	20,00		S16	20,00	
S7	28,00		S17	20,00	
S8	20,00		S18	20,00	
S9	20,00		S19	20,00	
S10	20,00		S20	28,00	

RELAZIONE SISMICA

Con l'entrata in vigore l'8/5/2003 della OPCM n. 3274, il territorio italiano è stato suddiviso in quattro zone sismiche; con l'introduzione della quarta zona sismica, tutto il territorio nazionale viene definito come sismico. Il Consiglio Regionale

del Veneto, con delibera n. 67 del 3/12/2003, ha fatto proprio e approvato il nuovo elenco dei comuni sismici del Veneto e la località di Cavanella Po, in Comune di Adria, è stata classificata in Zona Sismica 4, ovvero la zona meno pericolosa, dove le probabilità di danni sismici sono basse. I valori di accelerazione orizzontale massima attesi in Zona

Sismica 4, sono $a_g \leq 0.05$, su suolo rigido e pianeggiante, con probabilità di superamento del 10% in 50 anni. In realtà, anche quest'ultima classificazione è stata superata, a seguito dell'entrata in vigore delle NTC2008 e del DGRV n. 71/2008, viene approvata la nuova "Mappa di pericolosità sismica del territorio Nazionale" espressa in termini di accelerazione massima al suolo (a_g^{max}) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (tempo di ritorno 475 anni)

referita a suoli rigidi ($V_s > 800$ m/sec). Il valore di a_g per la località Guardamiglio (LO) si può vedere dalla fig.7, varia da

$$0.075 \leq a_g \leq 0.100$$

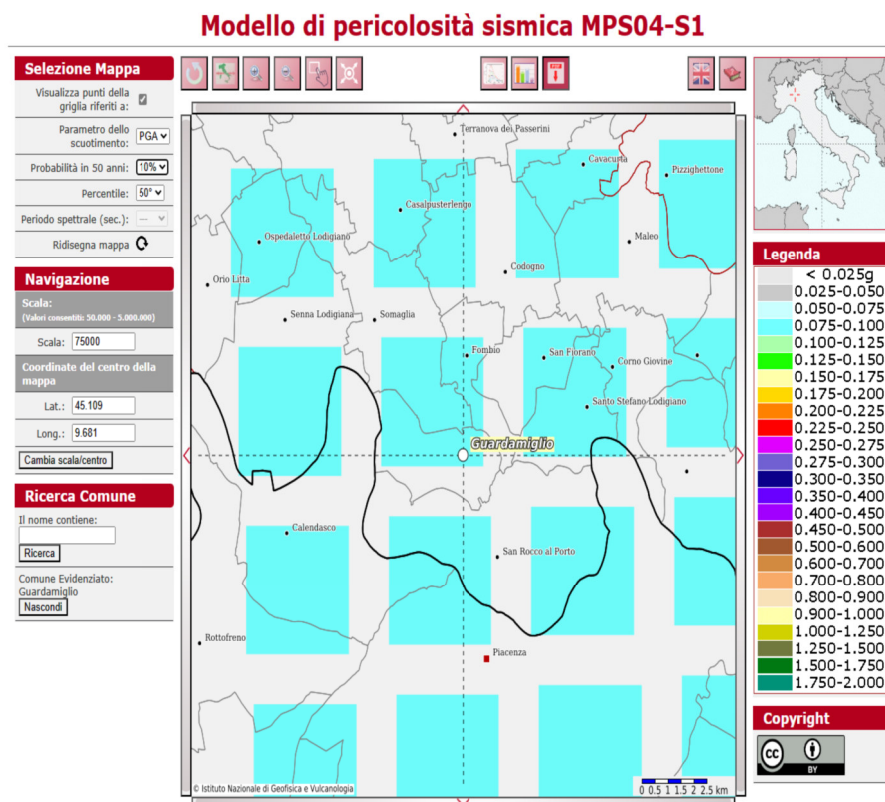


Figura 2 –Mappa della pericolosità sismica dell'area – I quadrati indicano il nodo con espressi i valori di accelerazione (Fonte – Mappe interattive dell'Istituto nazionale di Geofisica e Vulcanologia - <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>)

Trattandosi in questo caso di un argine fluviale, si è considerata una classe d'uso III e si è fatto riferimento alle grandi opere. Ne consegue un coeff. d'uso $C_u = 1.5$, con vita nominale $V_n = 100$ anni e un tempo di ritorno T_r di 1424 anni per lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.

I parametri sismici a cui fare riferimento, sono riportati nella tab. che segue.

Latitudine (WGS84)	Longitudine (WGS84)
45.12340476	9.64362114
Latitudine (ED50)	Longitudine (ED50)
45.125182	9.644703
Altitudine (mt)	52
Classe dell'edificio	
III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi ▼	
Vita Nominale Struttura	100 ▼
Periodo di Riferimento per l'azione sismica	150

Parametri di pericolosità Sismica				
Stato Limite	T_r [anni]	a_g/g [-]	F_o [-]	T^*_c [s]
Operatività	90	0.046	2.556	0.255
Danno	151	0.056	2.556	0.265
Salvaguardia Vita	1424	0.128	2.490	0.295
Prevenzione Collasso	2475	0.155	2.486	0.296

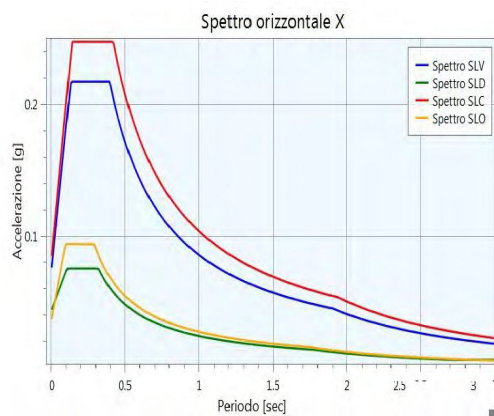
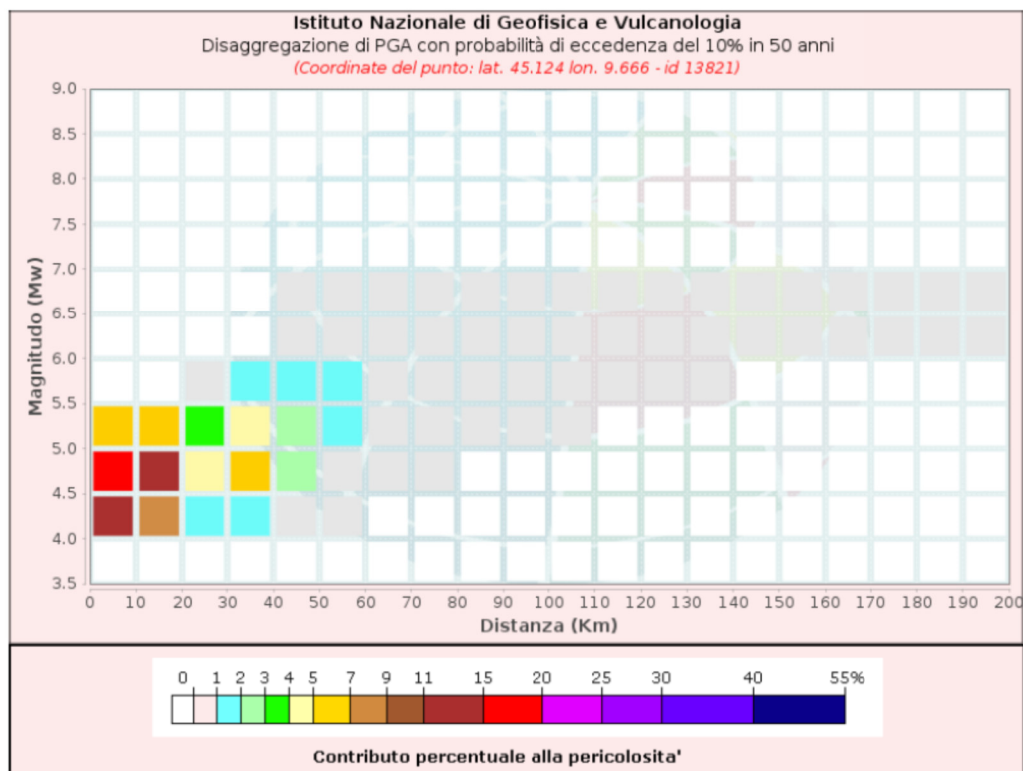


Figura 4 –Spettri di risposta elastici orizzontali

Per la Località Guardamiglio, è stata verificata l'analisi di disaggregazione della pericolosità sismica, che consente di determinare il contributo di varie sorgenti sismo genetiche alla pericolosità sismica del sito in esame. Per questo tale analisi viene condotta in termini di magnitudo (M) e distanza (R).

Come si può osservare dal grafico e dalla tabella riportati di sotto, il contributo maggiore alla pericolosità sismica dell'area, che per altro non si trova in zona sismogenetica, è da attribuirsi a terremoti con ipocentro ad almeno 10 km di distanza e con magnitudo attesa tra 4.5 e 5.5. (vedi allegato in calce)





Disaggregazione di PGA con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni											
Distanza in Km	Magnitudo										
	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	8.5-9.0
0-10	0.0000	13.9000	17.4000	5.5800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10-20	0.0000	7.0200	12.1000	5.9000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20-30	0.0000	1.9100	4.4300	3.1300	0.0653	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30-40	0.0000	1.7500	5.1100	4.3400	1.5900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40-50	0.0000	0.3870	2.4300	2.9300	1.5200	0.0998	0.0144	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
50-60	0.0000	0.0053	0.6270	1.5500	1.1700	0.3380	0.0558	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
60-70	0.0000	0.0000	0.0788	0.6600	0.8020	0.4510	0.0817	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
70-80	0.0000	0.0000	0.0018	0.2130	0.4720	0.3880	0.0757	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
80-90	0.0000	0.0000	0.0000	0.0514	0.2540	0.2660	0.0535	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
90-100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0099	0.1430	0.1810	0.0377	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
100-110	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0662	0.1220	0.0275	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
110-120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0271	0.0768	0.0192	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
120-130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0092	0.0448	0.0127	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
130-140	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0019	0.0241	0.0081	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
140-150	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0110	0.0045	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
150-160	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0057	0.0021	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
160-170	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0034	0.0012	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
170-180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0015	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
180-190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
190-200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0011	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Valori Medi: magnitudo = 4.86 ; distanza = 21.3 ; epsilon = 0.904											

Fig. 5 : Analisi di disaggregazione del sito in esame (SLV) Tab. relativa alla disaggregazione (SLV)

CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL TERRITORIO DEL COMUNE DI GUARDAMIGLIO

Sono stati rilevati ed acquisiti i dati peculiari della geologia e della sismica del sito ove si situa l'intervento oggetto di progettazione. Si è identificata la classificazione sismica del sito che riporta i dati di pericolosità sismica secondo l'elenco dei comuni con pericolosità sismica accelerazione massima e zona sismica di appartenenza. Di seguito i dati rilevati dalla relazione del Dott. Geol. M.Visconti..

ALLEGATO A – CLASSIFICAZIONE SISMICA DEI COMUNI ITALIANI

Codice Istat 2001	Denominazione	Categoria secondo la classificazione precedente (Decreti fino al 198N.C.)	Categoria secondo la proposta del GdL del 1998	Zona ai sensi del presente documento (2003)
03098029	Guardamiglio	N.C.	N.C.	4

La Regione Lombardia, con D.G.R. 11 luglio 2014, n. 2129, ha provveduto all'aggiornamento della classificazione sismica dei Comuni.

Tale provvedimento è stato emanato in attuazione della Legge 112/1998, della legge regionale 1/2000, art. 3, c. 108, lett. d), del D.P.R. 380/2001 e di specifiche O.P.C.M., tra cui la n. 3274/2003, recepita dalla D.G.R. 7 novembre 2003, n.14964.

La Giunta Regionale ha approvato il 30 marzo 2016 - D.G.R. n. X/5001 le linee di indirizzo e coordinamento per l'esercizio delle funzioni trasferite ai comuni in materia sismica, ai sensi degli artt. 3, comma 1, e 13, comma 1, della l.r. 33/2015.

La nuova zonazione sismica e la l.r. 33/2015 sono entrambe efficaci dal 10 aprile 2016.

In particolare, la l.r. n. 33/2015 aggiorna la normativa sulle costruzioni in zona sismica adeguandola al D.P.R. 6 giugno 2001, n. 380 (Testo Unico in materia Edilizia).

ESTRATTO DALL'ELENCO DEI COMUNI CON INDICAZIONE DELLE RELATIVE ZONE SISMICHE E DELL'ACCELERAZIONE MASSIMA (AGMAX) PRESENTE ALL'INTERNO DEL TERRITORIO COMUNALE (O.P.C.M. 3519/06 E DECRETO MIN. INFRASTRUTTURE 14/01/08)

ISTAT	Provincia	Comune	Zona Sismica	Ag max
03098029	LO	GUARDAMIGLIO	3	0,087466

Dr. Geol. Maurizio Visconti – LO-E-87-M – Lavori di manutenzione al reticolo idraulico del PTI-MI-1 nella Provincia di Lodi - indagini geognostiche per rinforzo difesa arginale del Fiume Po nel Comune di Guardamiglio (LO)

Zona sismica	Fenomeni riscontrati	Accelerazione con probabilità di superamento del 10% in 50 anni
1	Zona con pericolosità sismica alta . Indica la zona più pericolosa, dove possono verificarsi forti terremoti.	$a_g \geq 0,25g$
2	Zona con pericolosità sismica media , dove possono verificarsi terremoti abbastanza forti.	$0,15 \leq a_g < 0,25g$
3	Zona con pericolosità sismica bassa , che può essere soggetta a scuotimenti modesti.	$0,05 \leq a_g < 0,15g$
4	Zona con pericolosità sismica molto bassa . E' la zona meno pericolosa, dove le possibilità di danni sismici sono basse.	$a_g < 0,05g$

In successione con l'ausilio del software per il calcolo della pericolosità sismica si sono calcolati i coefficienti

- **kh = 0,0083**
coefficiente sismico orizzontale
- **kv = 0,5 kh**
coefficiente sismico verticale

RISULTATI DELLE INDAGINI E SINTESI DEI DATI

Indagini Geotecniche

L'assetto litostratigrafico ipotizzabile dall'interpretazione dei dati di pianificazione è stato confermato dalle indagini geognostiche condotte. In particolare si evidenzia quanto segue:

- Sabbie fini con interposizioni di limi sabbiosi costituiscono il rilevato arginale;
- I dati delle stratigrafie e delle CPTU/SCPTU confermano che il banco sabbioso si estende fino a profondità superiori ai 28,00 mt. dalla sommità arginale;
- La continuità della mancanza di uno strato argilloso a letto è confermata su tutto il fronte del meandro;

Di seguito si riporta una tabella di sintesi delle caratteristiche geotecniche e idrauliche utilizzate anche per la costruzione del modello di filtrazione lungo la sezione arginale. Le caratteristiche sono dedotte sia dalle prove Lefranc condotte nei fori di sondaggio, sia dalle permeabilità misurate in cella triassiale.

Strato	Profondità	Nspt	Tipo	Peso Unità di Volume (t/m³)	Peso Unità di Volume Saturo (t/m³)	Fi (°)	Cu Kg/cm² - coesione non drenata	Modulo Edometrico (Kg/cm²)	Modulo Elastico (Kg/cm²)	Modulo Poisson	Modulo di taglio G (Kg/cm²)	Velocità onde di taglio (m/s)
1	1,2	20,33	Strada arginale e sottofondo	2	1,98	37,17	0	69,22	162,64	0,31	1102,97	104,38
2	2	4,78	Limo	1,53	1,89	31,58	0	37,28	38,24	0,34	282,86	98,19
3	7,4	2,56	Limo deb. argilloso	1,43	1,87	30,62	0,16	32,72	20,48	0,35	157,27	108,51
4	10,5	14,7	Sabbia ghiaiosa	1,66	1,91	32,93	0	44,08	64,72	0,34	463,86	151,36
5	21,8	4,16	Sabbie limose	1,5	1,88	31,31	0	36,01	33,28	0,35	248,23	131,4
6	28	8,09	Sabbia deb. ghiaiosa	1,66	1,91	32,07	0	37,28	38,24	0,34	282,86	98,19

Parametri geotecnici elaborati dai dati delle indagini penetrometriche
 Parametri geotecnici elaborati per interpolazione sulla base delle stratigrafie dei sondaggi

Nella tavola 5.2 viene riportata la situazione litostratigrafica riscontrata e graficata una ipotesi di diaframma; Relativamente all'estensione di questo diaframma non si fanno ipotesi; Il punto corrispondente con S1 (sondaggio 1) dovrà essere considerato il punto di partenza di sviluppo dell'opera di progetto. L'allegata tav. 5.2 riporta il dettaglio delle indagini geognostiche effettuate.

MODELLO NUMERICO

La costruzione del modello numerico si è dunque basata sulla situazione stratigrafica e idraulica dedotta dalle indagini effettuate e dai dati pregressi.

Dalle prove geognostiche effettuate, si è preferito, adottare una sezione “critica” che, di fatto, sarebbe quella con geometria più contenuta e grandezze idrauliche sfavorevoli; La sezione è stata impiegata per effettuare le diverse simulazioni di verifica dei fenomeni di sifonamento.

La sezione tipo utilizzata per la modellazione del flusso è riportata nell'elaborato 5.2 ; essa è stata ricavata per interpolazione dal rilievo piano-altimetrico fornito dalla committenza ed evidenziato alla tavola 1.1.

Estratto riassuntivo della modellazione

Vengono qui illustrate le risultanze di un modello tridimensionale alle differenze finite applicato ad un tratto di argine maestro del fiume Po, in sinistra orografica, nei Comuni di Somaglia, Guardamiglio e San Rocco al Porto, in Provincia di Lodi, finalizzato all'investigazione dei comportamenti nei confronti del fenomeno del sifonamento potenziale.

A seguito di una dettagliata campagna di indagine, consistente nella realizzazione di numerosi sondaggi geognostici e prove Lefranc effettuati dal Dott. Maurizio Visconti di Vigevano, riportati in forma di allegato, resisi necessari per la caratterizzazione lito stratigrafica e geo tecnica dei terreni costituenti il corpo dell'argine e degli orizzonti del terreno su cui il medesimo poggia, individuata la cosiddetta sezione “critica” (corrispondente alla sezione topografica 5 con le caratteristiche geotecniche del sondaggio S1) dell'argine nei confronti di potenziali fenomeni di sifonamento in occasione di eventi di massima piena, contraddistinta dai valori peggiori a livello di filtrazione, si è proceduto all'implementazione di un modello idraulico mediante l'applicazione del software Visual Modflow, prodotto dalla Waterloo Hydrogeologic inc (U.S.A), che fornisce una modellizzazione tridimensionale alle differenze finite dell'acquifero e dei movimenti di fluido al suo interno.

La scelta progettuale e le precedenti verifiche effettuate in metodo speditivo, in sede di fattibilità, con calcoli semi empirici della letteratura classica hanno indotto dapprima all'applicazione del modello in condizioni di regime transitorio, simulando le variazioni dei livelli idrometrici lato fiume sulla base dell'involuppo degli idrogrammi di piena di riferimento corrispondente agli eventi idrologici delle piene storiche del 1951 e 2000 alla sezione idrometrografica rappresentativa di Piacenza e successivamente in condizioni stazionarie permanenti.

Da un'indagine storica l'argine in questione risulta interessato , dai livelli idrometrici di piena per una durata complessiva di 5-7 giorni, con il raggiungimento del colmo dopo 2,5-3 giorni e l'esaurimento del fenomeno entro il settimo giorno. L'evento di piena utilizzato risulta in realtà temporalmente molto più lungo ma senza interessare direttamente il corpo argine nei giorni antecedenti e successivi all'intervallo investigato. **Tuttavia, a favore di sicurezza, la simulazione è stata impostata prevedendo al giorno “zero” l'acquifero saturo sino a piano campagna, con esclusione del solo rilevato arginale.**

Al fine della presente verifica si è imposto come condizione al contorno il mantenimento per l'intera durata della simulazione di un carico equipotenziale costante al piede dell'argine lato campagna pari alla quota di piano campagna medesima.

Il software ha simulato i moti di filtrazione attivati dai carichi idrostatici variabili dovuti all'idrogramma di piena lato golena, individuando dinamicamente la superficie dei vettori velocità entro il mezzo poroso.

La durata, relativamente limitata, dell'evento di piena preso in considerazione ha evidenziato, in condizione transitoria, la mancata attivazione dei moti di filtrazione e di converso una ripida cadente della linea di imbibizione senza cioè il raggiungimento di elevati valori dei vettori velocità al piede arginale lato campagna. In questa condizione “reale” dal punto di vista idraulico, ma non per questo cautelativa in termini di sicurezza generale dei fenomeni osservati, il calcolo sembrerebbe escludere, in linea del tutto teorica, qualsivoglia innesco di fenomeni di sifonamento.,

In questo scenario di moto non stazionario, a partire dal quarto giorno a partire dall'inizio dell'evento nella fase calante dell'idrogramma di riferimento, si osserva che l'argine, saturo d'acqua, alimenta in condizioni di svuotamento rapido il fiume, il cui livello idrometrico cala ad una velocità maggiore rispetto alla piezometrica.

Successivamente, per indagare condizioni più gravose utili alla progettazione generale dell'opera di riparo, si è ricercata la **durata critica (teorica)**, generata da livelli idrometrici al colmo più duraturi non improbabili in divenire, con forma allungata, andando pertanto ad osservare l'incremento dinamico dei valori dei vettori velocità (V_x e V_y) al piede argine lato campagna, sino al raggiungimento delle condizioni limite per il fenomeno del sifonamento.

Le risultanze di tale simulazione hanno consentito di individuare in 12,5÷13,5 giorni da inizio interessamento argine dai livelli di piena (pari a 10÷11 giorni di permanenza del massimo livello di piena) la **durata critica oltre la quale il fattore di sicurezza F_s nei confronti del sifonamento risulta inferiore a 3**.

Poiché la modellazione è basata su ipotesi di condizioni *isotrope* dei vari strati di terreno interessati dai moti di filtrazione, con una loro caratterizzazione geotecnica derivante da una ampia ma inevitabilmente puntuale campagna geognostica; poiché inoltre i dati storici, per contro, testimoniano il verificarsi in tale tratto di argine di fenomeni sortuosi e sifonamenti diffusi; tenuto pertanto conto dell'anisotropia reale dei terreni e dei cicli di sollecitazione idraulica subiti negli anni in occasione degli eventi di piena più rari, si è deciso di procedere anche ad una simulazione in regime stazionario.

Tale simulazione, sebbene estremamente penalizzante rispetto alle reali condizioni di sollecitazione ad oggi conosciute, è finalizzata esclusivamente a confrontare le risultanze in configurazione di stato attuale con quelle corrispondenti ad uno stato di progetto che prevede la realizzazione di un diaframma bentonitico al piede dell'argine lato fiume e un rivestimento impermeabile parziale del rilevato arginale, onde contenerne i costi di realizzo ed individuare i benefici oggettivi derivanti da tali opere nei confronti del sifonamento potenziale.

Lo stato di progetto simulato prevede la realizzazione di un diaframma bentonitico spinto sino a -15 m dal piano campagna lato golena, dello spessore medio di 60 cm e di un rivestimento impermeabile, sempre realizzato mediante

ricoprimento bentonitico-argiloso o membrana con geogriglia ricoperta di terra vegetale, di una porzione della scarpata dell'argine lato golena, con sommità del rivestimento posta a -2,5 m dalla quota di massima piena duecentennale.

Sono pertanto state messe a confronto le rispettive distribuzioni delle curve equipotenziali e dei relativi vettori velocità all'interno del mezzo poroso per lo stato attuale e per lo stato di progetto, ricavando una riduzione significativa del gradiente locale in corrispondenza della porzione di terreno posto sulla verticale del piede arginale lato campagna.

Viste le ipotesi estremamente conservative alla base di tali simulazioni in regime stazionario, si è ritenuto ragionevole e cautelativo calcolare il gradiente quale valore medio ricavato su di un volume più esteso di acquifero sottostante il piano campagna del piede argine (una decina di metri da p.c.).

La riduzione del gradiente medio in configurazione di progetto con diaframma impermeabile di 15,00 mt. e con rivestimento spondale di ml. 7,00 è risultata apprezzabile e migliorativa rispetto alla configurazione di stato attuale, assicurando un incremento non trascurabile del Fs del 15,4%..

Fasi operative

La fase iniziale del presente lavoro ha riguardato l'elaborazione dei dati ricavati dalla campagna d'indagine geognostica al fine di definire la distribuzione della permeabilità dell'acquifero e del corpo arginale.

Il modello, a favore di sicurezza, è stato implementato sulla base dei dati corrispondenti alla sezione rappresentativa definita come "critica" (Sezione topografica n. 5 e sondaggio S1), ovvero in corrispondenza della sezione trasversale dell'argine che per geometria e caratteristiche geotecniche è risultata quella potenzialmente più soggetta all'innescarsi dei fenomeni di sifonamento.

L'argine ed il sottostante terreno sono stati suddivisi in *layer* a cui sono stati assegnati i parametri geotecnici derivanti dalle campagne geognostiche.

Si è quindi operata una discretizzazione del dominio in un numero di celle 3D opportunamente dimensionate al fine di garantire un affinamento del modello.

La sezione dell'argine è stata ricavata dal rilievo celerimetrico e dalle sezioni trasversali ottenute dalla campagna topografica. La sezione topografica adottata è la numero 5.

I livelli idrometrici del fiume Po e le loro variazioni nel tempo sono stati ricavati, nelle condizioni transitorie dall'idrogramma di piena corrispondente all'involuppo delle piene 1951+2000 e nel caso di moto stazionario da idrogrammi della durata minima di giorni 12,5 con quota massima pari alla quota di massima piena 1951+2000.

Il modello è quindi stato applicato in regime transitorio, a partire da condizioni indisturbate, per passare al giorno 2,5 al massimo livello idrometrico di piena, sino alla conclusione dell'evento sollecitante il giorno 5.

Successivamente si è ricercata la durata critica (teorica) dell'evento di piena, simulando in regime transitorio il permanere del massimo livello idrometrico corrispondente al colmo di piena lato fiume e andando ad osservare l'incremento dinamico dei valori dei vettori velocità al piede argine lato campagna, sino al raggiungimento di condizioni limite per il sifonamento.

Inoltre, tenuto conto dell'anisotropia reale dei terreni e dei cicli di sollecitazione idraulica subiti negli anni in occasione degli eventi di piena, si è deciso di procedere anche ad una simulazione in regime stazionario. Tali simulazioni si sono esclusivamente focalizzate sul confronto della risposta dell'acquifero rispettivamente in condizioni di stato attuale ed in configurazione di progetto (simulando come detto in precedenza la realizzazione di un diaframma bentonitico e un rivestimento impermeabile dell'argine lato golena).

Infine, sulla base delle conoscenze pedologiche sulla base delle accurate analisi e delle elaborazioni effettuate, sono state tratte le conclusioni.

Implementazione del modello e schematizzazione di calcolo- dominio delle elaborazioni

La specificità tipologica oggetto di analisi ha preteso la creazione di un modello 3D la cui caratterizzazione trasversale in sezione fosse del tutto prevalente rispetto a quella in pianta, in quanto si è optato per una analisi a due dimensioni sulla sezione *critica* dell'argine e non sull'intero sviluppo longitudinale del rilevato nel tratto oggetto di intervento.

Il dominio d'analisi, quindi, è stato esteso trasversalmente per 60 m, da area golenale (lato fiume) a piano campagna esterno all'arginatura.

Alla sommità dell'argine (pista di servizio) è stata assegnata convenzionalmente quota 30,00 m nel sistema di riferimento relativo del modello, avendo cioè esteso sino a quota 0 (ovvero -30 m) la profondità dell'acquifero all'interno del quale avvengono i moti di filtrazioni in studio.

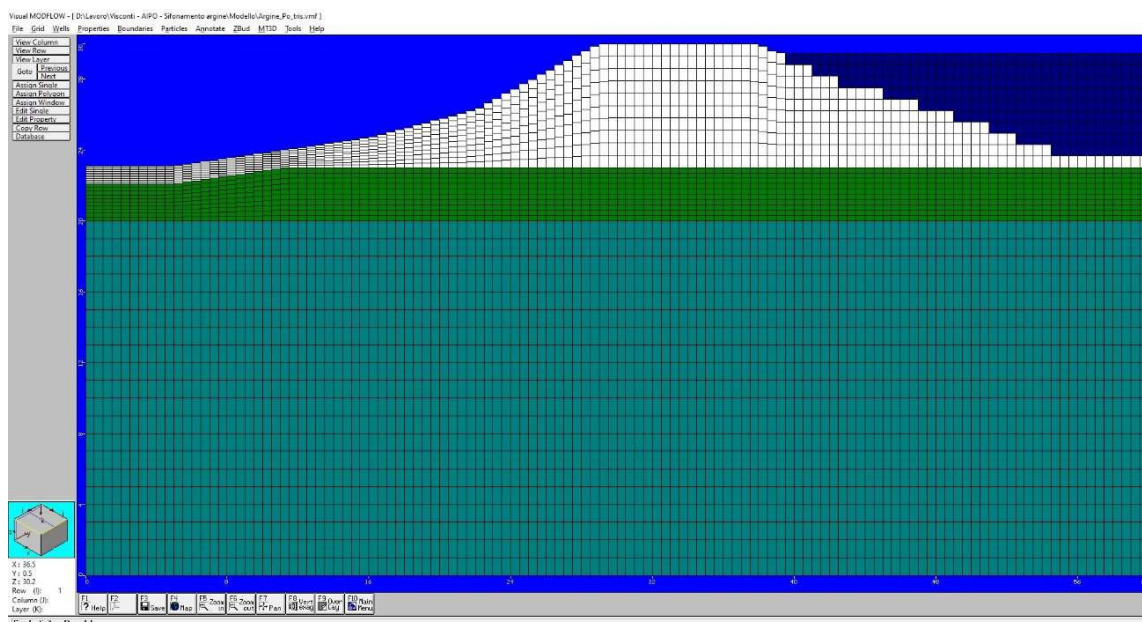


Fig: 6: Dominio del modello di calcolo

K Property Database			
	Kx [m/s]	Ky [m/s]	Kz [m/s]
1	0.0000166	0.0000166	0.0000166
2	0.1	0.1	0.1
3	0.0000131	0.0000131	0.0000065
4	0.000109	0.000109	0.000055
5	1e-10	1e-10	1e-10

Shrink OK Cancel Help

Fig. 7 : Database delle conducibilità adottate nella modellazione

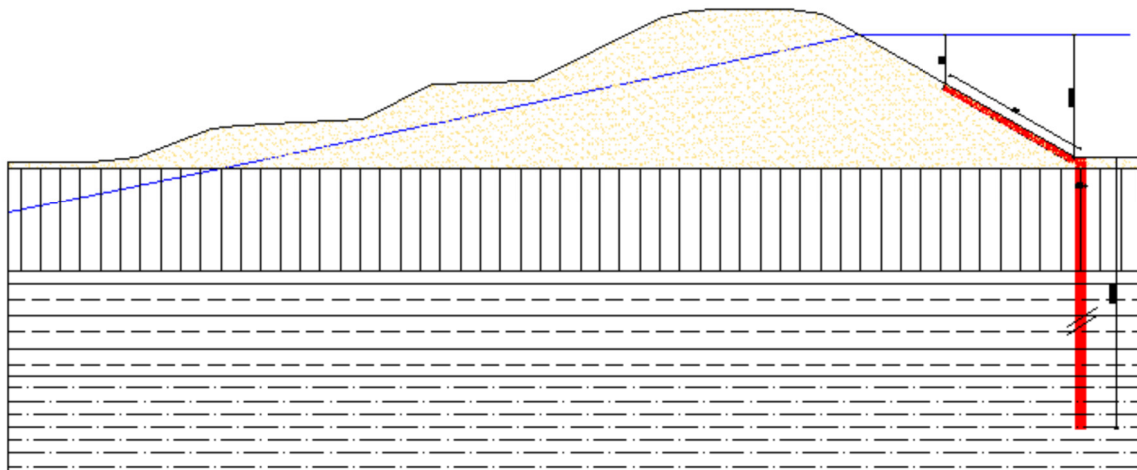


Fig. 7a: Sezione tipo con diaframma impermeabile 15,00 mt.

Definizione del reticolo di calcolo e caratterizzazione geotecnica dei terreni

La sezione in esame è stata suddivisa in un numero di celle che fosse adatto a soddisfare il compromesso tra finezza dell'elaborazione (tanto maggiore quanto più piccolo è il reticolo di calcolo) e velocità di calcolo (che diminuisce

all'aumentare del numero di celle). Per le simulazioni si è scelto un reticolo in sezione verticale di 120 colonne x 40 layer a base rettangolare variabile.

L'impostazione tridimensionale del modello consente di creare una discretizzazione verticale attraverso l'utilizzo di superfici che definiscono degli strati o layer; nel caso più semplice si tratta di piani.

La superficie topografica è stata inserita utilizzando quote del piano campagna rilevate durante la campagna di rilevamento celerimetrico. Grazie all'algoritmo di interpolazione lineare di cui il programma è dotato, ciascuna delle celle del primo layer assume una sua quota sul piano campagna.

Una volta creata la maglia 3D è stato possibile assegnare a ciascuna cella una serie di valori caratteristici di natura

geotecnica ricavati dalla campagna geognostica, quali la conducibilità idraulica nelle tre direzioni k_x, k_y, k_z [m/s].

l'immagazzinamento specifico S_s [1/m], la porosità efficace Eff.Por. [-] e quella totale Tot.Por. [-]

Si può osservare che al rilevato arginale è stato assegnato un valore di conducibilità idraulica omogeneo nelle tre direzioni e pari a $1,66 \times 10^{-5}$ m/s, mentre agli strati sottostanti, da -7 m a -10 m e da -10 m a -30 m da sommità argine è

stata assegnata una conducibilità idraulica rispettivamente pari a $k_x, k_y = 1,31 \times 10^{-5}$ m/s; $k_z = 6,5 \times 10^{-6}$ m/s e $k_x, k_y = 1,09 \times 10^{-4}$ m/s; $k_z = 5,5 \times 10^{-5}$ m/s. Al diaframma ed al rivestimento dell'argine è stato assegnato un valore di conducibilità di progetto fissato in 1×10^{-10} m/s. La permeabilità verticale dei layer costituenti il terreno naturale su cui poggia il rilevato arginale è stata posta pari al 50% del corrispondente valore orizzontale, come da consolidata pratica in fase di implementazione modellistica.

Condizioni al contorno - celle a livello costante

In tutte le simulazioni si è ipotizzato che la zona delle celle libere, alle quali vengono cioè applicate le equazioni di continuità, sia delimitata da celle a carico costante.

Nello specifico, per tutte le simulazioni, sia in regime transitorio che in regime stazionario, è stato assegnato al terreno al piede argine lato campagna un carico equipotenziale costante pari alla quota di piano campagna medesima (fissato in 23,00 m nel sistema di riferimento relativo del modello), in accordo con le ipotesi assunte ai fini della verifica dei fenomeni di sifonamento dell'argine ad azione dei livelli idrometrici di piena. Per le simulazioni in regime transitorio sono stati adottati i livelli di piena lato golena secondo le variazioni di cui all'idrogramma involucro relativo agli eventi di piena 1951+2000.:

<i>Intervallo dal giorno</i>	<i>al giorno</i>	<i>Livello idrometrico [m]</i>
0	0,5	23,50

0,5	1	25,02
1	1,5	25,75
1,5	2	27,17
2	2,5	28,65
2,5	3	29,00
3	3,5	28,77
3,5	4	27,86
4	4,5	26,66
4,5	5	25,60

Per le simulazioni in regime transitorio sono stati simulati i livelli di piena lato golena secondo le variazioni di cui all'idrogramma relativo all'involuppo degli eventi 1951+2000 .vedi tavola 5.2:

Risultanze dell'applicazione del modello - Flusso stazionario

Questa modellazione non è influenzata dall'indice dei vuoti iniziale e dalla compressibilità del fluido. Come si può vedere dalle figure che seguono la massima velocità del fluido (negativa da dx a sx e dall'alto verso il basso), si esplica in orizzontale alla sommità arginale, e in verticale nella zona dove si sono verificati i fontanazzi. Onde evitare l'infiltrazione dell'acqua sulla sommità arginale, che risulta permeabile, si consiglia di provvedere ad un' adeguata impermeabilizzazione, al fine di non vanificare l'efficacia del diaframma impermeabile. Le figura che seguono riportano le linee di flusso in condizioni naturali ed in presenza di diaframma di progetto.

In questo paragrafo vengono riportate le risultanze delle simulazioni condotte in regime transitorio per la casistica reale, ovvero simulando il passaggio della piena secondo l'idrogramma dell'evento estremo 1951+2000, e successivamente imponendo il permanere del massimo livello di piena per un periodo più lungo rispetto all'idrogramma (maggiore di 12,5 gg.), al fine di ricercare la durata critica (teorica) nei confronti dell'attivazione dei fenomeni di sifonamento dell'argine. In entrambi i casi il modello è caratterizzato da identiche configurazioni (dominio, suddivisione in mesh 3D, caratterizzazioni geotecniche, ecc.), mentre variano esclusivamente le condizioni di carico idrostatico lato fiume, come precedentemente illustrato.

Simulazioni con idrogramma di piena 1951+2000

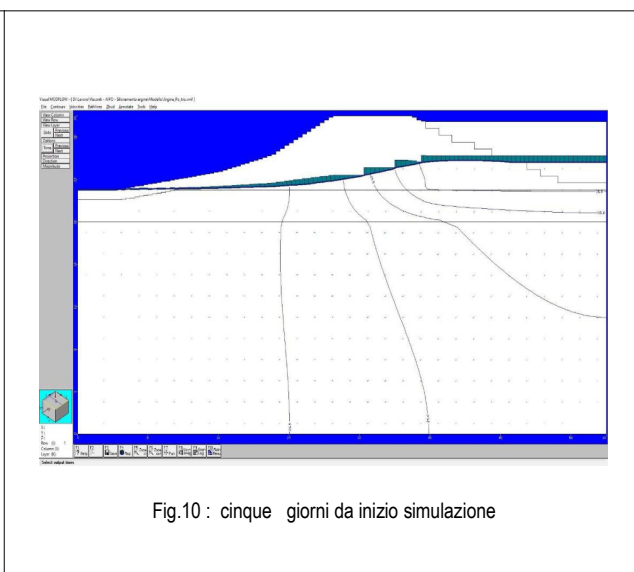
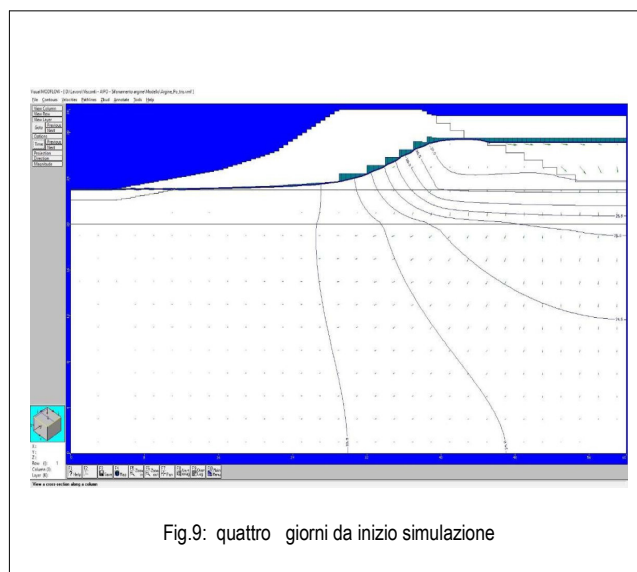
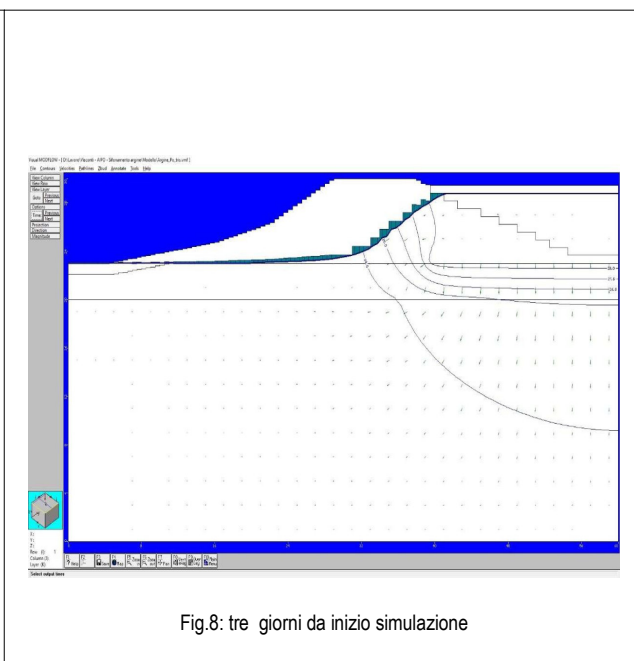
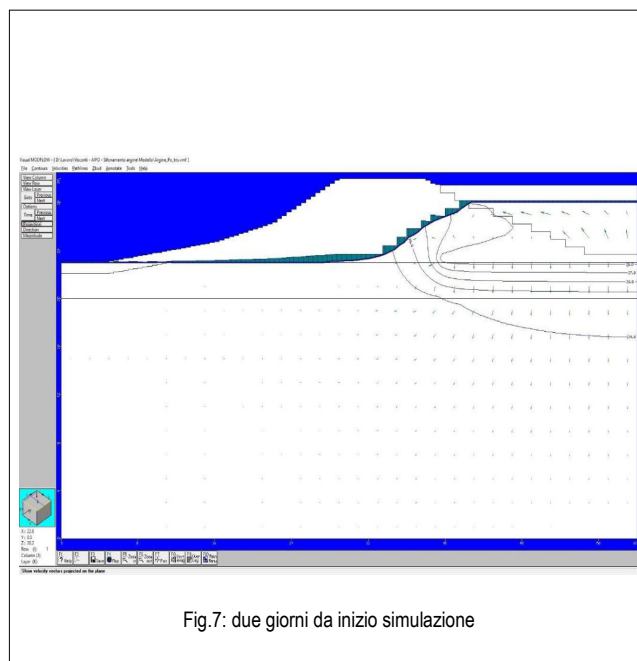
L'argine risulta interessato dai livelli idrometrici di piena per una durata complessiva di 5 giorni, con il raggiungimento del colmo dopo 2,5 giorni e l'esaurimento del fenomeno entro il quinto giorno. L'evento di piena risulta in realtà temporalmente molto più lungo ma senza interessare direttamente il corpo dell'argine nei giorni antecedenti e successivi all'intervallo investigato. Tuttavia, a favore di sicurezza, la simulazione è stata impostata prevedendo al giorno "zero" l'acquifero saturo sino a piano campagna, con esclusione del solo rilevato arginale. Al fine della presente verifica si è imposto come condizione a contorno il mantenimento per l'intera durata della simulazione di un carico equipotenziale costante al piede argine lato campagna pari alla quota di piano campagna medesima.

Il software ha simulato i moti di filtrazione attivati dai carichi idrostatici variabili dovuti all'idrogramma di piena lato golena, individuando dinamicamente la superficie liquida entro il rilevato, la distribuzione delle superfici equipotenziali e i corrispondenti vettori velocità entro il mezzo poroso.

La durata relativamente limitata dell'evento di piena con interessamento dell'argine maestro non ha consentito l'attivazione completa dei moti di filtrazione, senza cioè il raggiungimento di elevati valori dei vettori velocità al piede argine lato campagna, scongiurando in tal modo qualsivoglia innesco di fenomeni di sifonamento.

Dal quarto giorno a partire dall'inizio dell'evento si osserva che è l'argine, saturo d'acqua, ad alimentare il fiume, il cui livello idrometrico cala ad una velocità maggiore rispetto alla piezometrica.

Nel seguito la sequenza delle simulazioni rispettivamente dopo un intervallo temporale a partire dall'inizio evento di 2 – 2,5 – 3 – 3,5 – 4 – 4,5 – 5 giorni.



E' possibile rilevare , anche solo dall'osservazione obiettiva dell'output grafico, i vettori velocità all'interno del volume di terreno posto sulla verticale del piede argine lato campagna non subiscono variazione significativa durante l'intervallo di tempo investito, mantenendo valori prossimi allo zero. Ciò è conseguenza del mancato innesco completo dei moti di filtrazione dovuto da un lato alla resistenza del mezzo poroso, dall'altra alla durata limitata dei carichi idrostatici che attivano i moti medesimi (il regime transitorio dipende dalla durata effettiva della sollecitazione).. Si può pertanto affermare che sulla base delle caratteristiche intrinseche geotecniche che di condizioni al contorno adottate (tempi finiti come da idrogramma di piena) non si verificano condizioni di innesco del fenomeno di sifonamento dell'ammasso arginale. Questo sta a significare che l'innesco si manifesta per durate superiori ma non infinite.

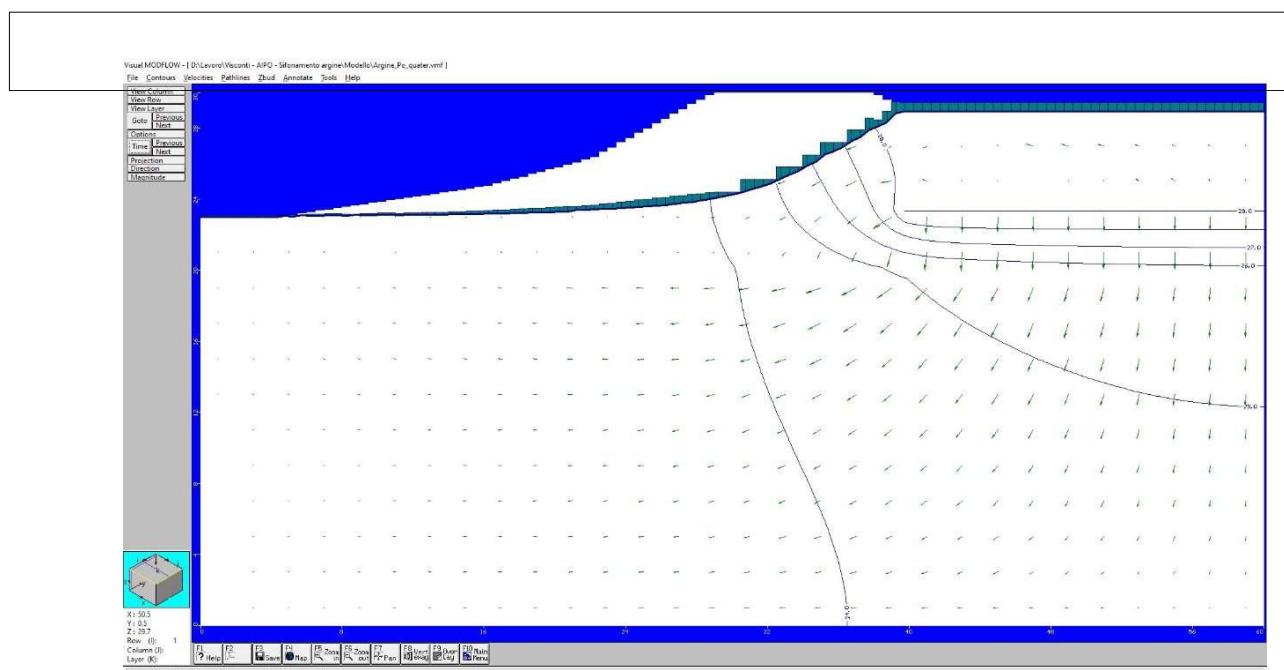
Simulazioni con ricerca della durata critica della piena

A partire dalle risultanze della precedente simulazione si è deciso di ricercare la durata critica teorica di un evento di piena (ovvero la durata di permanenza del massimo livello di piena lato golena) tale da innescare completamente i moti di filtrazione, con il raggiungimento di condizioni limite rispetto a potenziali fenomeni di sifonamento dell'argine.

Basandosi sempre sull'idrogramma inviluppo di piena 1951+2000, raggiunto il colmo dopo 2,5 giorni a partire dall'inizio dell'interessamento del rilevato arginale, è stato mantenuto costante il massimo livello idrometrico (pari a 29,00 m nel sistema di riferimento relativo del modello) per un tempo indeterminato.

Dall'osservazione dell'evolversi del moto entro il mezzo posoro, si è individuata in 12,5÷13,5 giorni a partire dall'inizio evento (ovvero con una permanenza di 10÷11 giorni del massimo livello di piena) la durata critica, superata la quale il fattore di sicurezza F nei confronti del sifonamento scende al di sotto del valore limite di 3.

Nel seguito la sequenza delle simulazioni rispettivamente dopo un intervallo temporale a partire dall'inizio evento di 5 – 7,5 – 10 – 12,5 – 13 – 14 giorni.



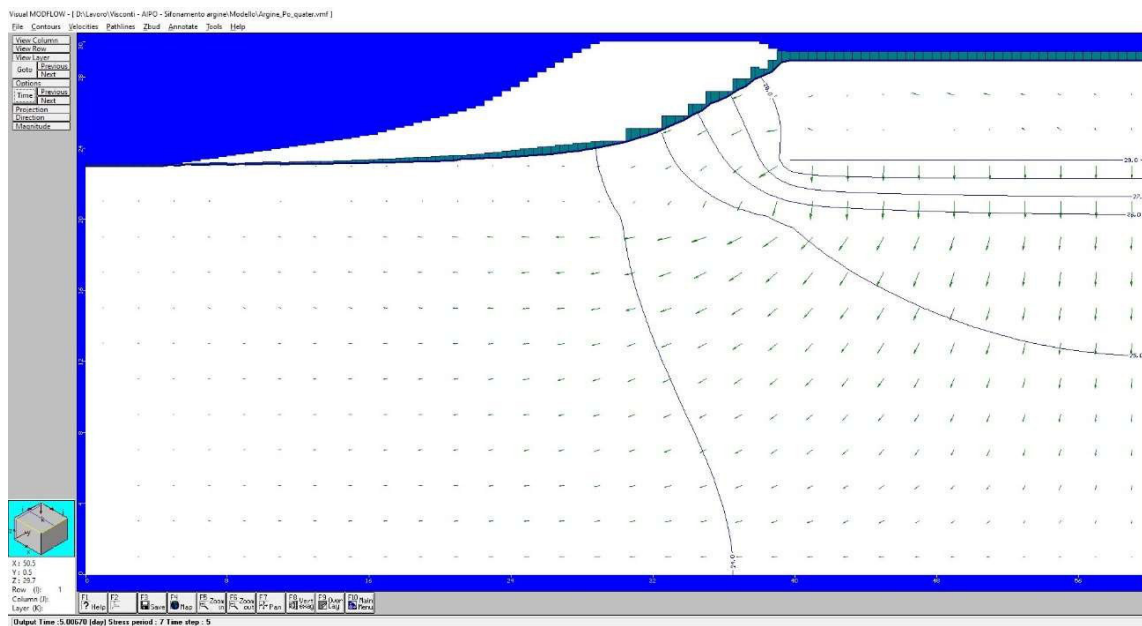


Fig.11 : ricerca della durata critica - cinque giorni da inizio simulazione

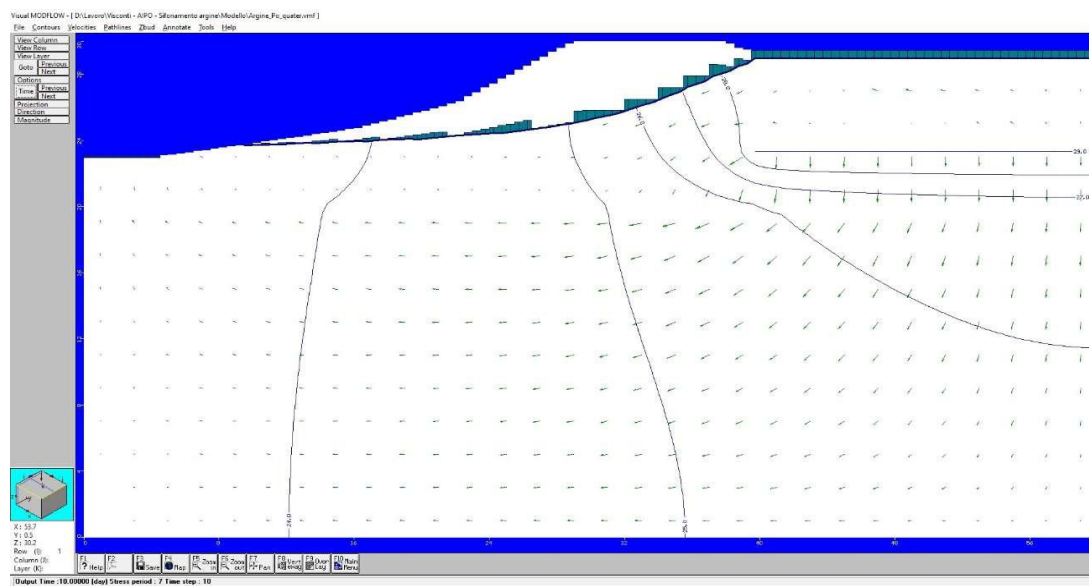


Fig.12 : ricerca della durata critica – 7,5 giorni da inizio simulazione

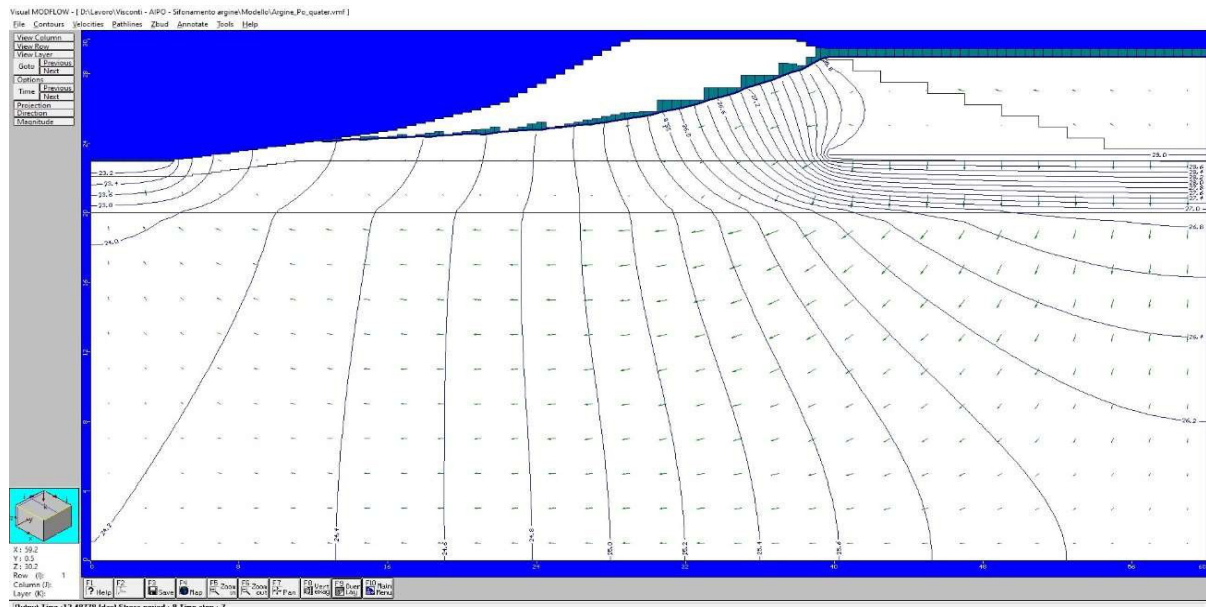


Fig.13 : ricerca della durata critica – 12,5 giorni da inizio simulazione

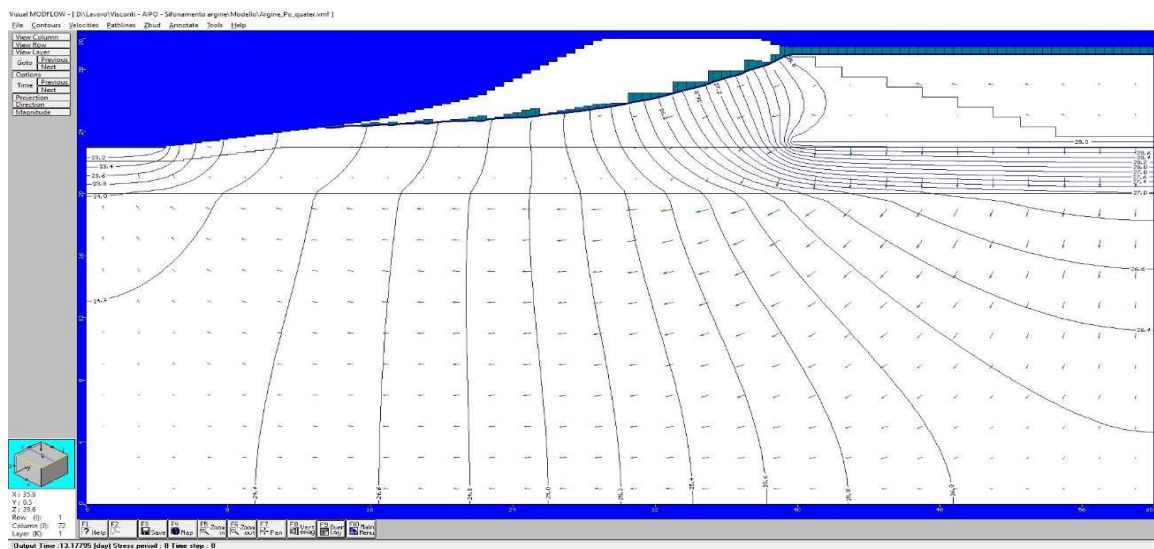


Fig.14 : ricerca della durata critica – 13 giorni da inizio simulazione

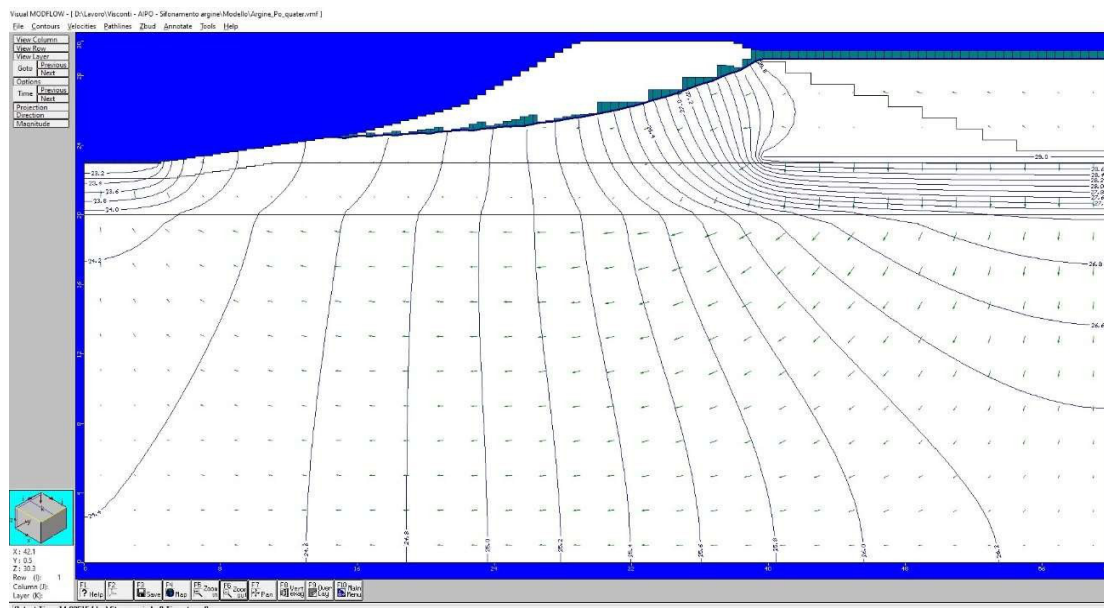


Fig.15 : ricerca della durata critica – 14giorni da inizio simulazione

La verifica a sifonamento viene effettuata in corrispondenza del piede argine lato campagna, in corrispondenza del volume immediatamente sottostante il piano campagna. La verifica viene effettuata su di uno strato di terreno dello spessore di circa 1 m.

Dai dati stratigrafici ottenuti durante la campagna d'indagine geognostica si ricava per tale volume di terreno un valore di γ_{sat} pari a 18,6 kN/m³.

Ipotizzando un livello di falda pari al piano campagna (condizione più sfavorevole è possibile) calcolare il valore della cadente critica i_c corrispondente ad un valore di pressione efficace nullo.

$$i_c = \frac{\gamma_{terreno} - \gamma_{saturo}}{\gamma_{saturo}} = \frac{1,86 - 10}{10} = 0,86$$

Noto il reticolo di filtrazione dal modello agli elementi finiti precedentemente introdotto, è possibile calcolare la cadente i che instaura i moti di filtrazione nel volume di territorio indagato.

$$i_m = \frac{\Delta h}{Lunghezza}$$

essendo Δh la differenza di carico tra due linee equipotenziali del reticolo di filtrazione ($\Delta h = 0,2$ m per impostazione dell'output) ed L la loro distanza in corrispondenza del volume di terreno considerato. In condizioni di stato transitorio istantaneo, il valore di L risulta rispettivamente pari a:

11 giorni 0,90 m

12,5 giorni 0,70 m

13 giorni 0,65 m

14 giorni 0,60 m

Si ottiene pertanto un valore di i_m rispettivamente pari a:

11 giorni 0,2222

12,5 giorni 0,2857

13 giorni 0,3077

14 giorni 0,3333

Va qui annotato che la raccomandazione di coperture lato campagna della linea 1/4-1/5 raccomandata dalla Commissione DeMarchi nel primo dopoguerra (quale indirizzo progettuale di massima cautela trattandosi di OO.PP. Strategiche), per il tratto in questione, si colloca indipendentemente dalle caratteristiche intrinseche dell'ammasso a valori di pendenza pari a **0,25 – 0,222 in linea con le risultanze del modello nella condizione permanente.**

Per verificare la sicurezza nei riguardi del sifonamento secondo consolidate indicazioni di letteratura ed in accordo con le nuove NTC 2018 (6.2.4.2 *Verifiche nei confronti degli stati limite ultimi idraulici*) è necessario calcolare un fattore di sicurezza F (definito come segue), constatando che il medesimo risulti maggiore o uguale a 3:

$$F = i_{\alpha} / i_m \geq 3$$

Sostituendo nella formula di F i valori precedentemente ottenuti si ottiene:

11 giorni 3,870 Verificato

12,5 giorni 3,010 Verificato

13 giorni 2,795 **Non
verificato**

14 giorni 2,580 **Non
verificato**

Confronto delle simulazioni in regime stazionario-stato di fatto vs stato di progetto

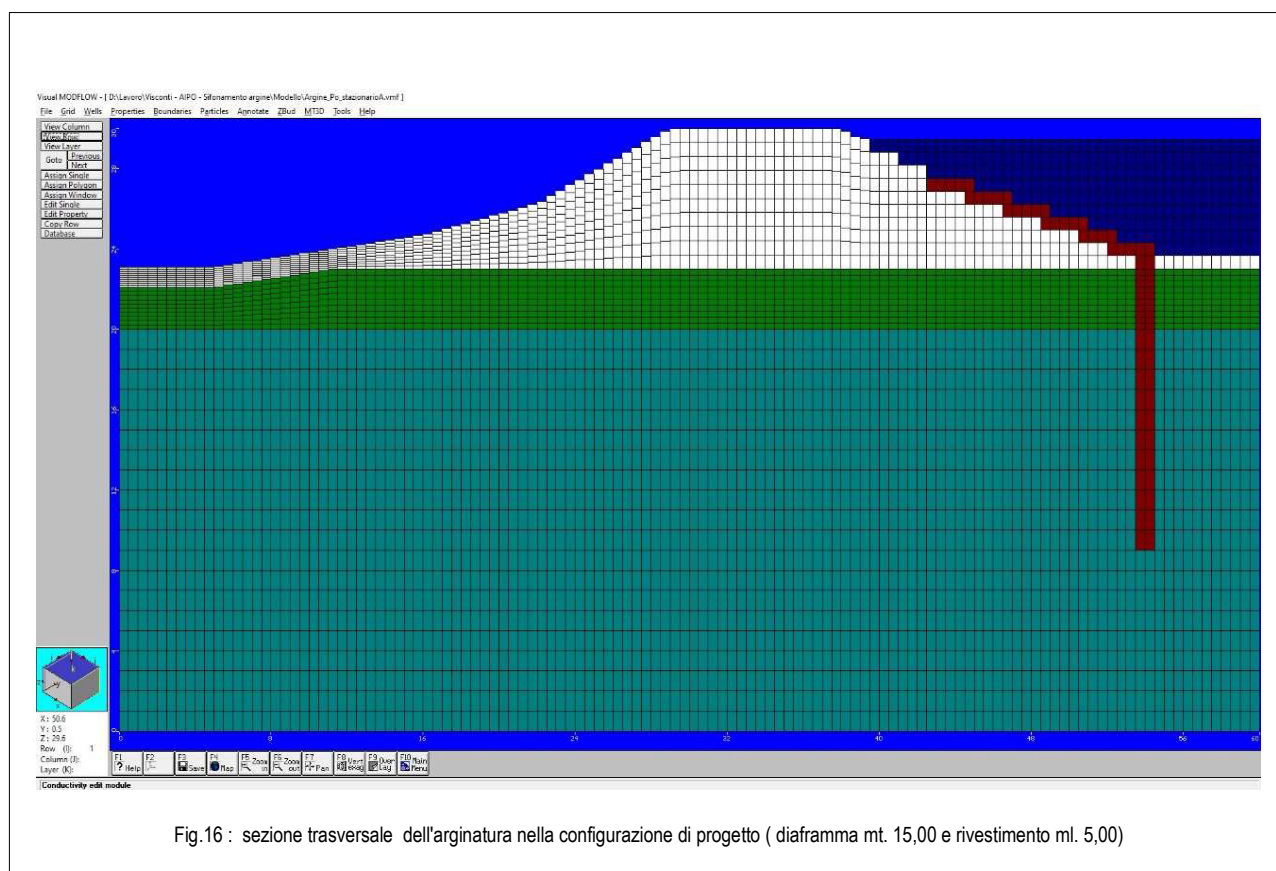
Alla luce delle risultanze delle precedenti simulazioni in regime transitorio, le quali hanno evidenziato che sulla base delle ipotesi assunte non vi sono rischi potenziali di sifonamento per l'argine investigato, considerato tuttavia che i dati storici riportano eventi in cui fenomeni sortuosi e di sifonamento localizzato hanno avuto luogo in prossimità del tratto di arginatura investigato, sono state fatte le seguenti considerazioni.

Si è tenuto in conto del fatto che, nonostante la campagna geognostica sia stata estesa e dettagliata, rappresenta pur sempre un campionamento puntuale delle caratteristiche del terreno, il quale deve essere ragionevolmente considerato anisotropo. Inoltre, proprio poiché quel tratto di argine ha subito negli anni numerosi fenomeni sollecitanti dovuti a eventi di piena, si deve tenere in conto parimenti di possibili indebolimenti localizzati, con creazione di vie preferenziali di flusso entro il mezzo poroso.

Per tali ragioni si è deciso di procedere anche ad una simulazione in regime stazionario.

Tale simulazione, sebbene estremamente penalizzante rispetto alle reali condizioni di sollecitazione, è finalizzata esclusivamente a confrontare le risultanze del modello in configurazione di stato attuale con quelle corrispondenti ad uno stato di progetto che prevede la realizzazione di un diaframma bentonitico al piede argine lato golena e un rivestimento impermeabile parziale del rilevato arginale, onde individuare i benefici oggettivi derivanti da tali opere nei confronti del sifonamento potenziale.

Lo stato di progetto simulato prevede la realizzazione di un diaframma bentonitico spinto sino a -15 mt. dal piano campagna lato golena, dello spessore medio di 60 cm e di un rivestimento impermeabile, sempre realizzato mediante ricoprimento bentonitico-argilloso, di una porzione della scarpata dell'argine lato golena, con sommità del rivestimento posta a -2,5 m dalla quota di massima piena duecentennale.



Sono pertanto state messe a confronto le rispettive distribuzioni delle curve equi- potenziali e dei relativi vettori velocità all'interno del mezzo poroso per lo stato attuale e per lo stato di progetto, ricavando una riduzione significativa del gradiente locale in corrispondenza della porzione di terreno posto sulla verticale del piede argine lato campagna.

Viste le ipotesi estremamente conservative alla base di tali simulazioni in regime stazionario, è ragionevole calcolare il gradiente quale valore medio ricavato su di un volume più esteso di acquifero sottostante il piano campagna del piede argine (una decina di metri da p.c.).

La riduzione del gradiente medio in configurazione di progetto è risultata apprezzabile rispetto alla configurazione di stato attuale, assicurando un incremento del F_s del 15,4%.

Confronto delle simulazioni in regime stazionario - stato di fatto vs stato di progetto

Nel seguito vengono riportate le risultanze dell'applicazione del modello rispettivamente in configurazione di stato attuale e di progetto in regime di stato stazionario.

Si rammenta che per tali simulazioni sono state imposte condizioni a contorno estremamente conservative, ovvero il permanere a tempo indeterminato del massimo livello idrometrico di piena (evento anno 1951+2000) lato golena e un livello freatico al piede argine lato campagna pari al piano campagna medesimo.

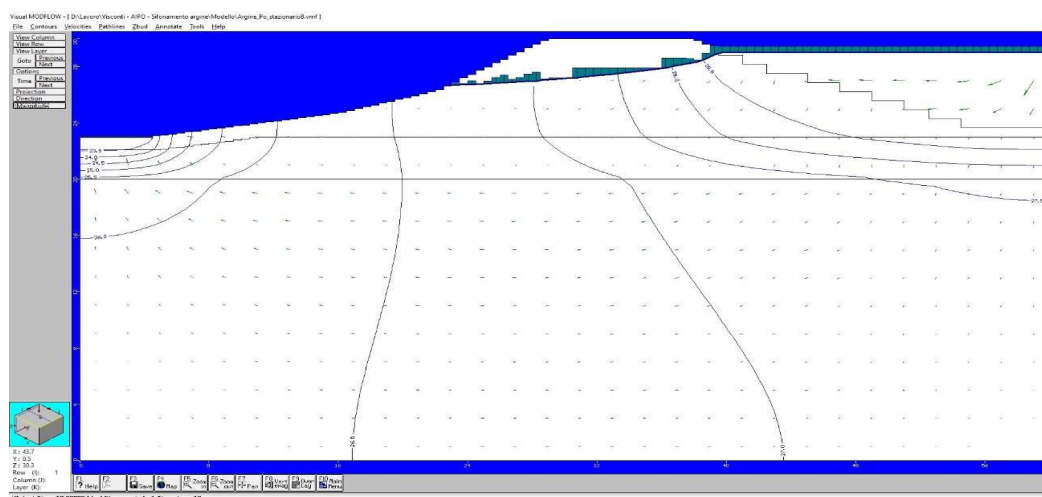


Fig.17 : configurazione dello stato attuale in regime stazionario

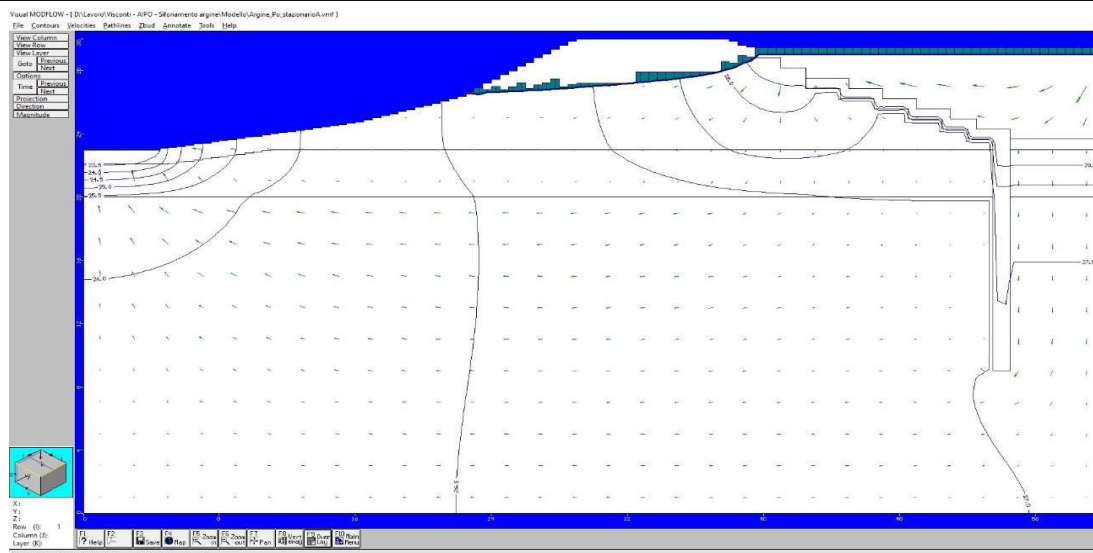


Fig.18 : configurazione dello stato di progetto in regime stazionario

Focalizzando l'attenzione sul volume di terreno posto sulla verticale del piede argine lato campagna, si può osservare come, sebbene sotto ipotesi estremamente conservative (simulazione in regime stazionario) la distribuzione del reticolo di filtrazione per lo stato di progetto presenti un apprezzabile ed obiettivo miglioramento nei confronti del sifonamento rispetto allo stato attuale.

Infatti, confrontando la posizione della superficie equipotenziale 26,00 m, si ricava che la medesima dista 7,2 m dal p.c. (23,00 m) per la configurazione di stato attuale e 8,3 m per la configurazione di progetto.

Ne consegue un gradiente medio di tale porzione di acquifero posto sulla verticale del piede argine lato campagna rispettivamente pari a 0,4167 per lo stato attuale e pari a 0,361 per la configurazione di progetto.

Ricordando il valore del gradiente critico precedentemente introdotto ($i_{cr} = 0,86$), è possibile calcolare i due fattori di sicurezza F, che risultano rispettivamente pari a:

Stato attuale $F=2,064$ Progetto $F=2,382$

L'incremento del fattore di sicurezza risulta pertanto pari a +15,4%. Sebbene il fattore di sicurezza ricavato per lo stato di progetto non soddisfi le richieste di normativa, risultando cioè ancora inferiore a 3, non va dimenticato che il modello è stato applicato in regime stazionario, ovvero simulando la permanenza di condizioni sollecitanti assolutamente lontane dalla realtà.

Ciò che emerge dal presente confronto è l'incremento significativo del fattore di sicurezza a seguito della realizzazione delle opere in progetto.

Come si vedrà in seguito tale incremento non potrà che essere ancora più marcato qualora la durata degli eventi sollecitanti (colmo di piena) sia prossima ai valori reali (circa 5 giorni) rispetto alla simulazione in regime stazionario.

Confronto delle simulazioni in regime transitorio - stato di fatto vs stato di progetto

Per completezza di indagine si è simulato il confronto tra la configurazione di stato attuale e quella di progetto non più in regime stazionario, bensì in regime transitorio, andando a ricercare la durata critica di un ipotetico evento di piena che portasse al non soddisfacimento della condizione $F_s > 3$.

Superato quindi il transitorio iniziale di crescita dei livelli idrometrici di piena secondo l'idrogramma dell'evento occorso nell'anno 2000, si è mantenuto costante il massimo livello idrometrico di piena (29,00 m nel modello) per un tempo indeterminato.

Sulla base delle risultanze del modello sono quindi stati calcolati i rispettivi gradienti medi e i corrispondenti fattori di sicurezza per determinati tempi d'osservazione in corrispondenza del volume del mezzo poroso posto sulla verticale del piede argine lato campagna.

Tali valori sono poi stati messi a confronto con i corrispondenti risultati ricavati in configurazione di stato attuale (paragrafo III.1.2). Nel seguito gli output grafici del modello in configurazione di progetto per gli intervalli 11 – 12,5-13 -14 20 -25 -30 giorni da inizio evento e una tabella comparativa tra lo stato attuale e lo stato di progetto.

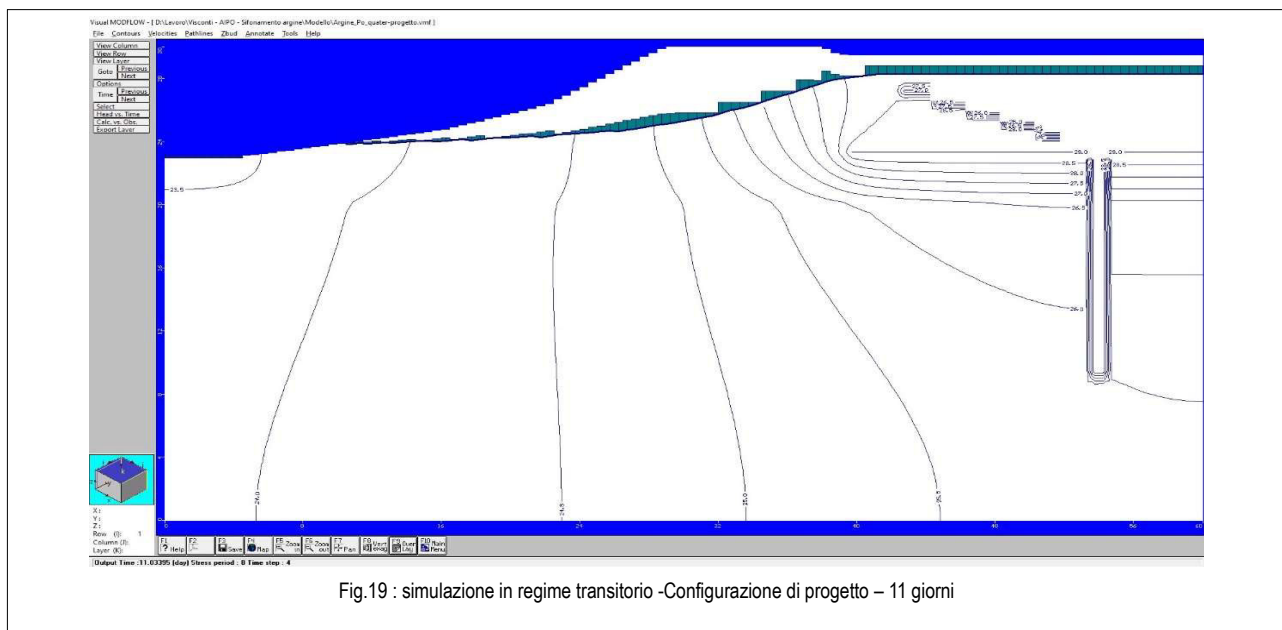


Fig.19 : simulazione in regime transitorio -Configurazione di progetto – 11 giorni

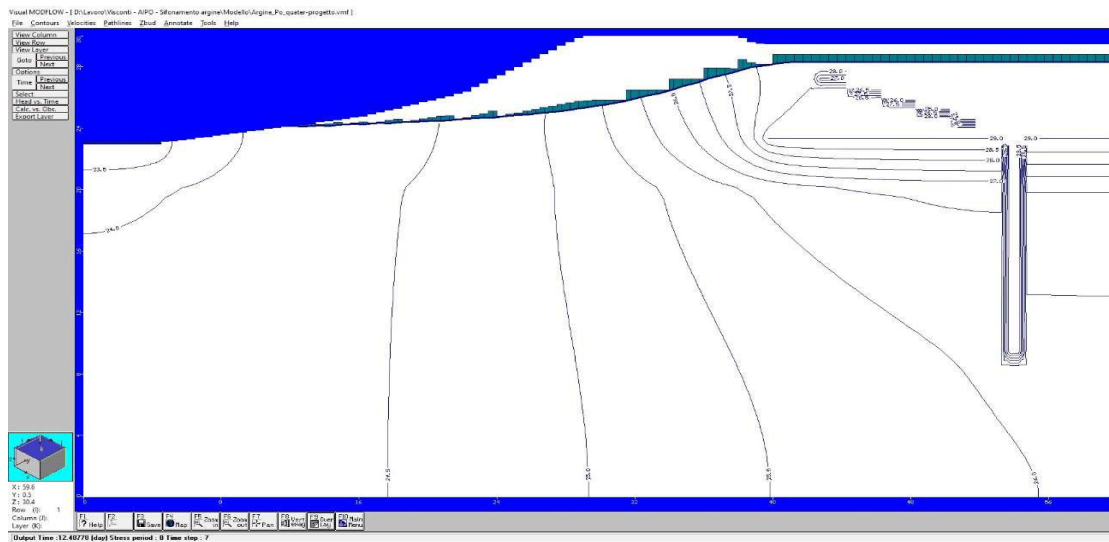


Fig.20 : simulazione in regime transitorio -Configurazione di progetto – 12,5 giorni



Fig. 21: simulazione in regime transitorio -Configurazione di progetto – 13 giorni

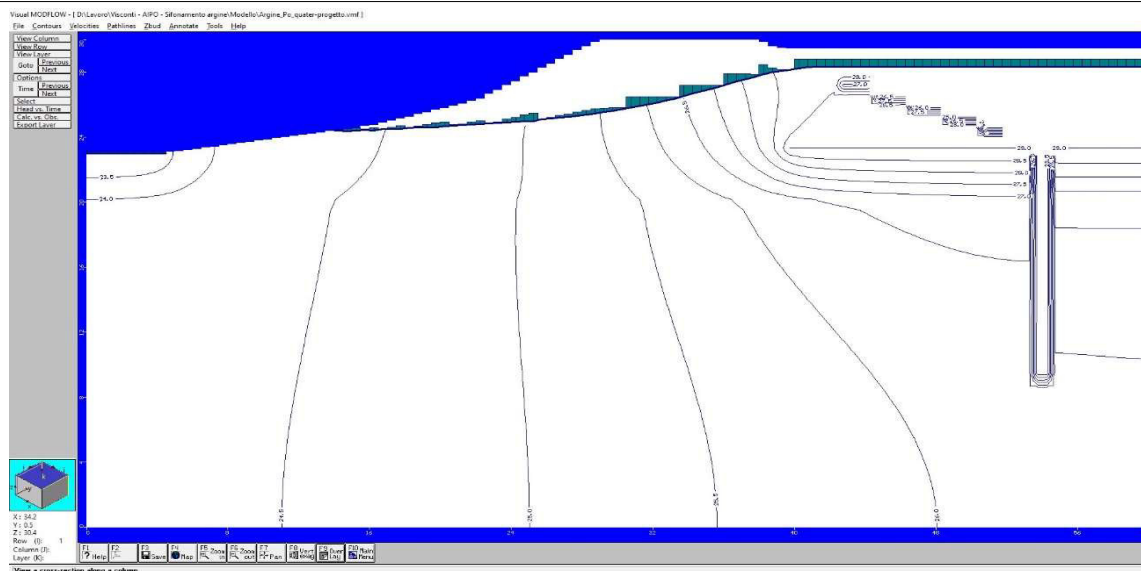


Fig.22 : simulazione in regime transitorio -Configurazione di progetto – 14 giorni

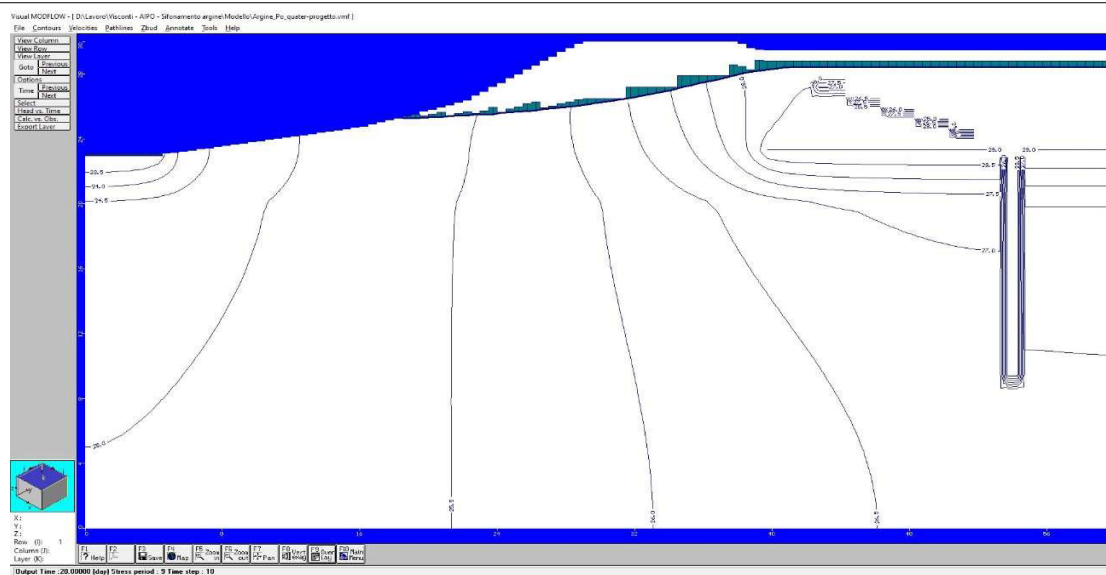


Fig. 23 : simulazione in regime transitorio -Configurazione di progetto – 20 giorni

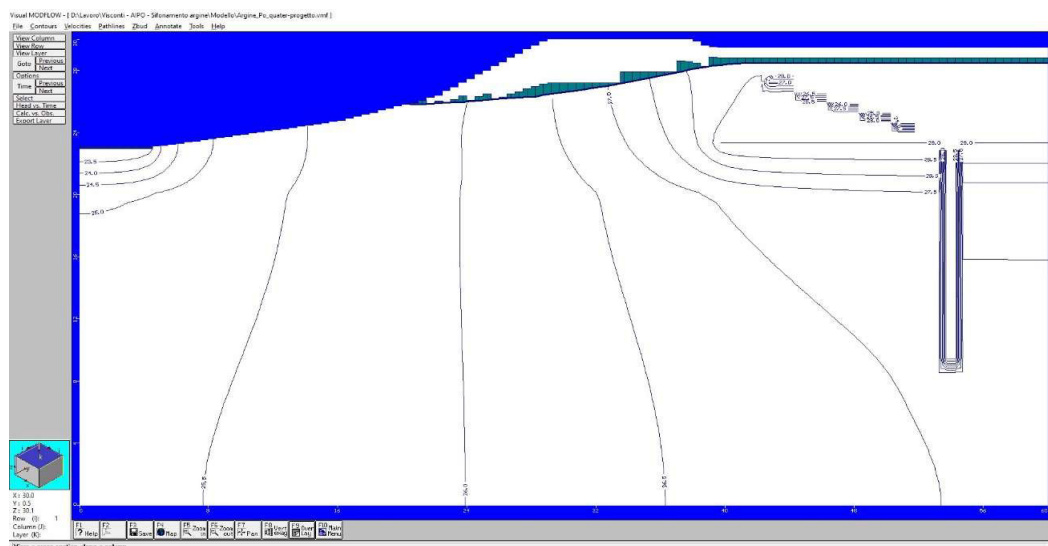


Fig. 24 : simulazione in regime transitorio -Configurazione di progetto – 25 giorni

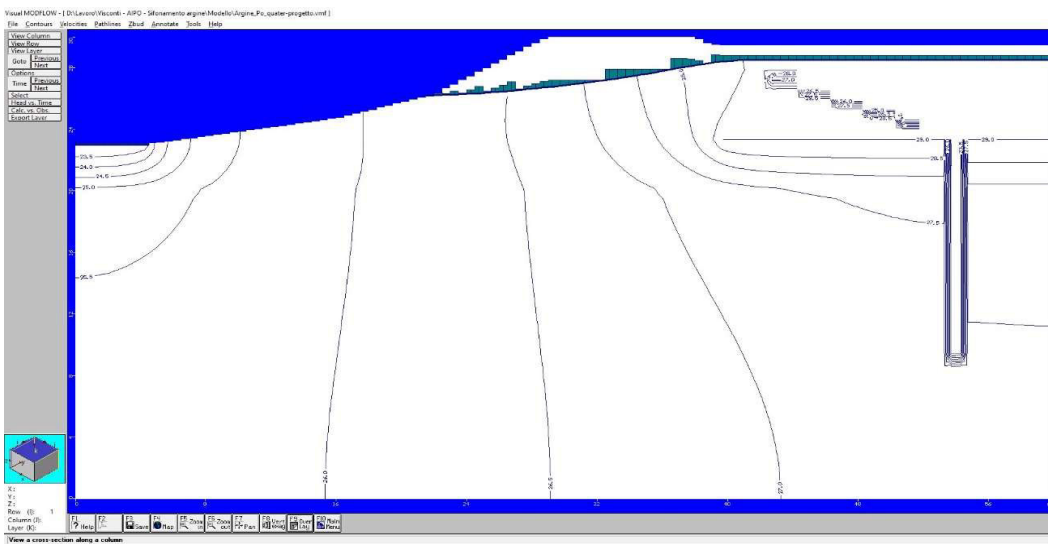


Fig. 25 : simulazione in regime transitorio -Configurazione di progetto – 30 giorni

La soluzione progettuale del diaframma e del rivestimento della scarpata lato golena dell'argine secondo la configurazione adottata comporta un miglioramento considerevole del fattore di sicurezza soddisfacimento del rispetto

della condizione $F_s > 3$ per una durata temporali inferiori ai trenta giorni da inizio evento. Segue la tabella comparativa dello stato attuale vs lo stato di progetto.

<i>Giorno da inizio evento</i>	<i>Stato attuale</i>		<i>Progetto</i>	
	i_m	F_s	i_m	F_s
11	0,2222	3,870	0,0882	9,750
12,5	0,2857	3,010	0,0965	8,912
13	0,3077	2,795	0,0970	8,866
14	0,3333	2,580	0,1048	8,206
20	-	-	0,1727	4,980
25	-	-	0,2017	4,264
30	-	-	0,2873	2,993

Verifica al sifonamento criteri di progetto con metodi cassici e formule empiriche

Per questa verifica si rimanda alla relazione generale elaborato n.1.

CONCLUSIONI FINALI

Al fine di evitare il ripetersi di fenomeni di sifonamento in corrispondenza dell'abitato di Somaglia Guardamiglio (LO), è stato condotto il presente studio che ha portato alla costruzione di un modello numerico per studiare e verificare l'efficacia di un eventuale diaframma impermeabile; di seguito si riportano le conclusioni dello scrivente:

1. il modello numerico mostra inequivocabilmente l'incremento del grado di sicurezza e l'efficacia di un diaframma impermeabile al fine di risolvere i problemi di sifonamento con miglioramento dei parametri della filtrazione;
2. il diaframma dovrà spingersi sino alla profondità media sul piano di campagna alla profondità di circa 15,00 m. dalla quota del piano golenale interno lato fiume;
3. lo sviluppo funzionale dell'intervento risulta di lunghezza pari a ml.400.
4. per non vanificare l'efficacia dell'intervento e per migliorarne le prestazioni nel tempo si dovrà pianificare e predisporre una adeguata impermeabilizzazione del paramento arginale lato fiume fino alla quota di -2,50 dal livello di massima piena duecentennale.

Medesano (PR), 08.01.2024

Dott. Ing. Gian Pietro Armani

