



**Verifica idraulica della
filtrazione al di sotto
dell'argine maestro del
fiume Po**

Raffineria di Cremona

Preparato per:
TAMOIL Raffinazione S.p.A.


Marzo 2008

URS Italia S.p.A.
Il Direttore Tecnico
Ing. **SERGIO CONTORBIA**



Titolo Progetto: Barriera Idraulica Raffineria di Cremona
Sito: Raffineria di Cremona
N° Progetto: 43986047
Rif. Rapporto: Verifica idraulica della filtrazione al di sotto dell'argine maestro del fiume Po
Stato:
Nome del Contatto presso il Cliente: Ing. E. Gilberti / Sig. Nicola Paglione
Nome della Società Cliente: TAMOIL Raffinazione S.p.A.
Emesso Da: URS Italia SpA
Via Watt, 27
20143 Milano

Percorso di Creazione / Approvazione del Documento

Versione:	Nome	Firma	Data	Ruolo
Preparato da	Ing. M. Lagorio		28/03/2008	Project Manager
Controllato da	Ing. S. Contorbia		28/03/2008	Project Manager
Approvato da	Dott. P. Alesina		28/03/2008	Service Line Manager

Percorso di Revisione del Documento

Versione	Data	Dettagli delle Revisioni
-	28/03/08	Versione Originale

COPYRIGHT

© Il presente Rapporto è di proprietà di URS Italia S.p.A. e URS Corporation Limited. Qualsiasi riproduzione non autorizzata o utilizzo da parte di qualsiasi soggetto, al di fuori del suo destinatario, è strettamente proibito.

INDICE

Sezione	N° di Pag.
INTRODUZIONE.....	1
1. DATI UTILIZZATI	3
1.1. Topografia	3
1.2. Geologia	3
1.3. Idrologia.....	4
2. MODELLO DI CALCOLO	6
3. SIMULAZIONI E RISULTATI.....	8
3.1. Simulazioni.....	8
3.2. Risultati delle simulazioni.....	9
3.3. Analisi dei risultati.....	12
4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	14

Allegati

Allegato 1 – Rilievo topografico

Allegato 2 – Sezioni geologiche

Allegato 3 – Indagini geofisiche

Allegato 4 –Velocità di filtrazione massime

Allegato 5 – Risultati grafici delle simulazioni

INTRODUZIONE

La presente relazione illustra la metodologia di calcolo e i risultati delle simulazioni eseguite per la valutazione dei moti di filtrazione al di sotto dell'argine maestro del fiume Po presso lo stabilimento TAMOIL di Cremona in relazione alla condizione di messa in funzione del sistema di pompaggio (barriera idraulica) per la depressione locale della prima falda.

In dettaglio le simulazioni sono state effettuate a seguito della prescrizione tecnica data dall'AIPO, sede di Cremona (nota AIPO, prot. N. 2693 del 1 agosto 2007) in merito alla verifica dell'effetto della barriera idraulica, progettata per garantire il contenimento della falda acquifera lungo il confine di valle idrogeologico dello stabilimento Tamoil di Cremona, sulle condizioni di flusso al di sotto del rilevato arginale.

Si è, allo scopo, confrontata la condizione idrodinamica della falda nell'intorno dell'argine nella situazione ante funzionamento della barriera idraulica e nella situazione post funzionamento della barriera idraulica stessa.

Le caratteristiche tipologiche e funzionali di dettaglio della barriera idraulica sono presentate nella documentazione di progetto; nel presente studio sono stati utilizzati i dati caratteristici delle varie indagini eseguite nell'ambito delle diverse fasi del progetto: topografiche, stratigrafiche, granulometriche, geofisiche e idrologiche. Delle varie informazioni raccolte si è fatto, quindi, uso per definire nel migliore dei modi le condizioni geometriche superficiali, le caratteristiche degli strati con riferimento alla permeabilità e idrologiche, quali i livelli del Po in occasione di piene sinteticamente definite.

Le simulazioni del movimento di filtrazione al di sotto dell'argine sono state eseguite in due sezioni trasversali rappresentative, geologicamente caratterizzate e ubicate nell'area d'interesse a una distanza di circa 220 m l'una dall'altra. Le due sezioni sono indicate semplicemente come SEZIONE 1 e SEZIONE 2.

I livelli di calcolo posti come condizione al contorno lato fiume (monte) sono stati desunti, attraverso l'uso della scala delle portate relativa alla sezione del Po a Cremona (fornita dalla Regione Lombardia), dai valori delle portate di piena sintetiche ricavate nello studio predisposto dal Politecnico di Milano su incarico dell'Autorità di Bacino del F. Po (*Caratterizzazione idrologica dell'asta principale del fiume Po nel tratto che va dalla confluenza della Dora Baltea all'incile del Po di Goro* – responsabile scientifico Prof. Ing. Maria Giovanna Tanda - ottobre 2001). Le simulazioni sono state eseguite a partire dal

livello del Po pari allo zero idrometrico fino al valore di 7.3 m sopra allo zero idrometrico, relativo alla piena calcolata con il tempo di ritorno uguale a 200 anni.

La caratterizzazioni geologiche delle due sezioni di calcolo sono state il risultato di numerose indagini mirate (sondaggi, pozzi, ecc.), tra cui anche indagini a rifrazione sismica per la verifica locale della profondità del taglione, realizzato negli anni cinquanta per impedire il sifonamento dell'argine. Le indagini confermano le indicazioni in merito avute dall'AIPO, sede di Cremona circa la presenza del taglione e la sua profondità.

1. DATI UTILIZZATI

1.1. Topografia

L'andamento nelle due sezioni del terreno (SEZIONE 1 e SEZIONE 2) è stato rilevato con strumentazione a terra. Le due sezioni sono poste in corrispondenza dell'area d'interesse e attraversano i terreni della Canottieri Bissolati, del CRAIL Tamoil e della Raffineria. Il rilievo comprende ovviamente le sezioni del rilevato arginale. Nell'**Allegato 1** è riportato il rilievo topografico planimetrico con la traccia delle due sezioni trasversali utilizzate per le simulazioni e le sezioni trasversali stesse.

Le quote delle sezioni trasversali sono riferite allo zero idrometrico della sezione di misura dei livelli posta sul ponte ferroviario. Lo zero idrometrico si trova a una quota di **34.34 m s.l.m.**

Nella SEZIONE 1 la quota in sommità dell'argine è pari a **7.8 m** sullo zero idrometrico e nella SEZIONE 2 la sommità dell'argine è a quota **7.65 m** sullo zero idrometrico.

Nella SEZIONE 1, il piano campagna pochi metri a monte dell'argine è mediamente uguale a 4.85 m. In questo lato l'argine presenta una piccola banchina la cui quota in sommità è circa 5 m sopra allo zero idrometrico. A valle, nell'area TAMOIL, il piano campagna, anche in questo caso a pochi metri dall'argine, è posto a circa 4.70 m dallo zero idrometrico.

Nella SEZIONE 2, il piano campagna pochi metri a monte dell'argine è mediamente uguale a 4.70 m. A valle, nell'area TAMOIL, il piano campagna, anche in questo caso a pochi metri dall'argine, è posto a circa 4.11 m dallo zero idrometrico.

1.2. Geologia

La caratterizzazione degli strati filtranti nelle sezioni utilizzate nel calcolo ha individuato due tipologie di suolo poco differenti.

Infatti, i risultati delle indagini puntuali hanno rilevato che nei primi 20 metri di profondità dal p.c. è individuabile un primo acquifero (superficiale) di natura prevalentemente sabbiosa. La soggiacenza della superficie freatica è stata rinvenuta dai 2,0 m da p.c. nel

settore nord-occidentale ai 6,5 m da p.c. nel settore sud-orientale dello stabilimento, con andamento delle linee isofreatiche circa est-ovest e un deflusso delle acque di falda in direzione sud.

L'interpretazione geologica dei risultati delle misure in situ ha condotto alla rappresentazione delle sezioni geologiche dell'**Allegato 2**.

L'esecuzione delle prove idrauliche ha consentito di rappresentare l'acquifero superficiale come un unico orizzonte permeabile, con valori di conducibilità idraulica (calcolati sulla base dell'interpretazione delle prove di lunga durata) variabili da $1,1 \times 10^{-3}$ a $7,6 \times 10^{-4}$ m/s e valori di trasmissività da $1,5 \times 10^{-2}$ a $9,9 \times 10^{-3}$ m²/s.

Vista la ridotta variabilità della conducibilità idraulica, nelle simulazioni del flusso sotterraneo si è utilizzato l'estremo superiore del range. L'uso del valore più grande della conducibilità idraulica porta a risultati in favore di sicurezza, dal momento che risulteranno più elevate le velocità di filtrazione.

Le caratterizzazioni geologiche hanno compreso anche indagini a rifrazione sismica per la verifica locale della profondità del taglione, realizzato negli anni cinquanta per impedire il sifonamento dell'argine. Le indagini confermano le indicazioni in merito avute dall'AIPO, sede di Cremona, in merito all'esistenza, alla tipologia di materiale utilizzato per la sua costruzione e la profondità del taglione

I risultati delle indagini geotecniche che hanno caratterizzato la falda superficiale sono riportati nel documento rif. 3707 e nell'**Allegato 3** è riportato il risultato delle indagini geofisiche per la valutazione della geometria del taglione per la protezione dell'argine nei riguardi dei fenomeni di sifonamento.

1.3. Idrologia

Ai sensi della prescrizione tecnica dell'AIPO, le simulazioni dei flussi sotterranei per la verifica di dettaglio delle condizioni di moto al di sotto dell'argine del Po sono state condotte imponendo la condizione al contorno di monte (lato fiume) data dai livelli corrispondenti alle piene sintetiche per tempi di ritorno differenti a partire dalla piena duecentennale.

La portata massima duecentennale nella sezione del ponte sul Po è stata ricavata dai risultati dei calcoli idrologici eseguiti per conto dell'Autorità di Bacino del F. Po dal

Politecnico di Milano (*Caratterizzazione idrologica dell'asta principale del fiume Po nel tratto che va dalla confluenza della Dora Baltea all'incile del Po di Goro* – responsabile scientifico Prof. Ing. Maria Giovanna Tanda - ottobre 2001). Tale valore è risultato pari a **13456 m³/s**.

La disponibilità della scala delle portate relativa alla sezione ha consentito di calcolare il livello corrispondente alla portata di piena duecentennale¹; tale livello è uguale a **7.3 m** sopra allo zero idrometrico. Riportandolo in quota assoluta il livello di piena è uguale a 41.64 m slm.

Le simulazioni sono state effettuate in regime stazionario, analizzando condizioni di deflusso con pelo libero compreso tra lo zero idrometrico e il livello massimo di piena (a intervalli di 1 m).

Nella seguente figura 1 è riportato il grafico della scala delle portate estrapolata fino alla portata massima calcolata per il tempo di ritorno 200 anni.

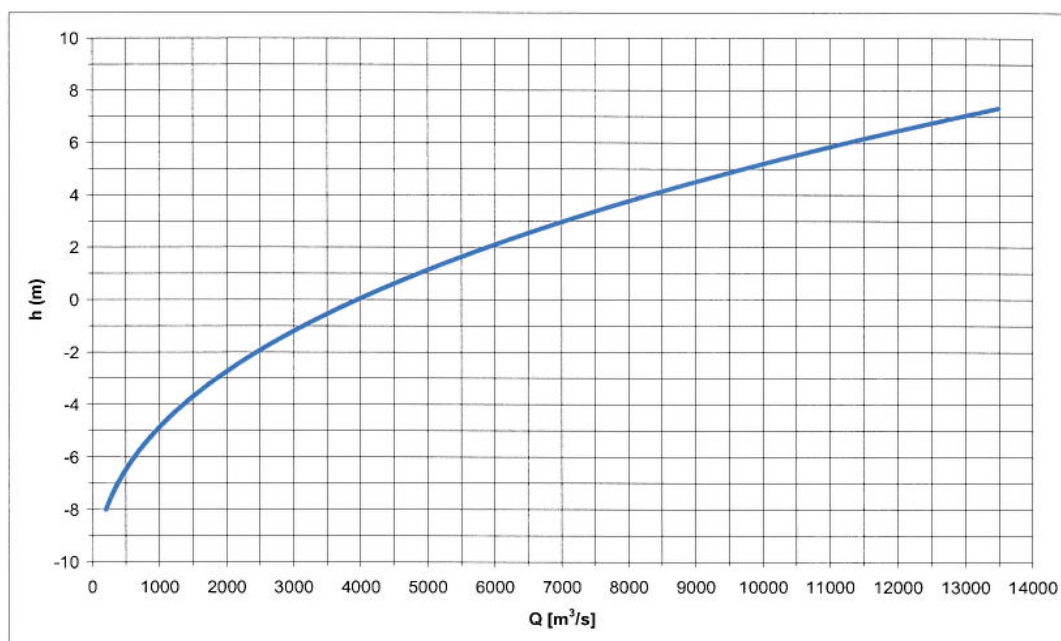


Fig. 1 – scala delle portate della sezione di misura di Cremona

¹ Il livello corrispondente alla portata duecentennale è il risultato dell'estrapolazione della scala delle portate che è stata ricavata per una portata massima di circa 11250 m³/s.

2. MODELLO DI CALCOLO

Il modello per la simulazione del movimento di filtrazione deve risolvere numericamente le equazioni differenziali rappresentative del fenomeno.

Il problema del moto di filtrazione in condizione stazionaria è di tipo ellittico. Nell'ipotesi di terreno omogeneo e isotropo, l'equazione generale in due dimensioni ha la seguente forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

con: k coefficiente di permeabilità (m/s) e h carico idraulico (m). Il prodotto rappresenta la velocità di filtrazione nelle due coordinate.

Se k è costante, l'equazione 1 diventa:

$$k \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) \right) = 0 \Rightarrow \nabla^2 h = 0 \quad (2)$$

Il movimento di filtrazione in un mezzo poroso sarà analizzato nel dominio spaziale in due dimensioni definite dalla coordinata longitudinale x e dalla profondità y . Il dominio è rappresentato dal piano verticale il cui contorno Γ è rappresentato:

- alla base dallo strato impermeabile (se noto) o comunque una superficie posta a una profondità sufficiente per potere imporre la condizione al contorno di flusso normale nullo;
- in sommità dalla sezione topografica rilevata;
- dalle due sezioni (in genere verticali) poste all'estremità di monte e di valle.

La soluzione dell'equazione 1 (o dell'eq. 2) richiede, oltre alla definizione del campo di moto, la definizione delle condizioni al contorno che sono di due tipi:

- la condizione di Dirichlet se è fissato il valore di $h = h^*$ per ogni x, y appartenenti alla porzione Γ_1 del contorno Γ ; con h^* valore noto del carico idraulico sul contorno;
- la condizione di Neumann se è fissato il valore di $\frac{\partial h}{\partial n} = 0$ per ogni x, y appartenenti alla porzione Γ_2 del contorno Γ ; n è la normale al contorno Γ_2 .

L'equazione 2 sarà integrata nel dominio spaziale utilizzando il metodo numerico degli elementi finiti.

La soluzione dell'equazione 2 sarà quindi trovata con i seguenti passi:

1. Descrizione della geometria del dominio d'integrazione e delle condizioni al contorno.
2. Costruzione della mesh triangolare nel dominio d'integrazione.
3. Discretizzazione dell'equazione e delle condizioni al contorno e integrazione numerica.

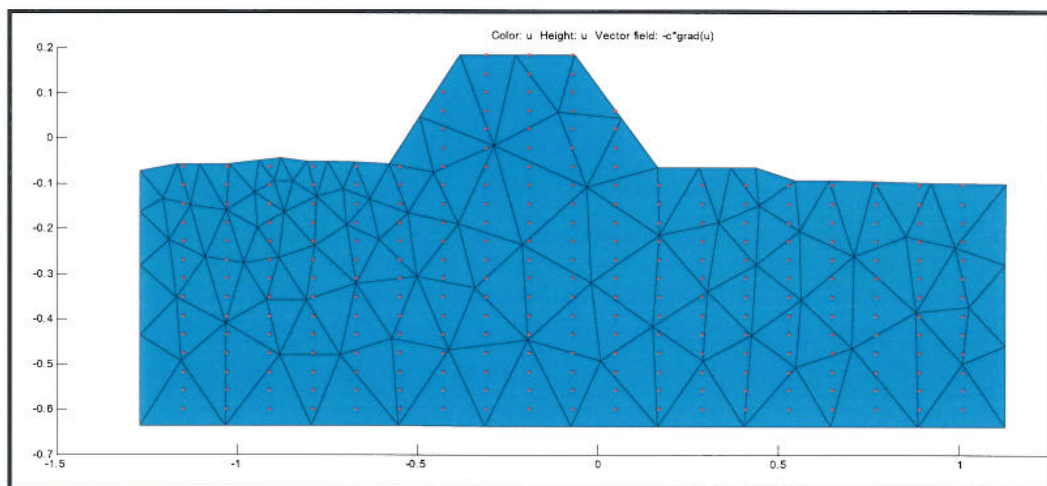


Fig. 2 – esempio di mesh di calcolo

Per tenere conto della variazione delle caratteristiche idrogeologiche del dominio di calcolo, nell'equazione 2 saranno utilizzati i coefficienti di permeabilità k_i relativi a ciascuno strato omogeneo i del dominio di calcolo.

3. SIMULAZIONI E RISULTATI

3.1. Simulazioni

Le simulazioni dei moti di filtrazione sono state eseguite considerando le seguenti condizioni:

Geometria del dominio di calcolo:

Sezioni trasversali. Le sezioni trasversali sono state schematizzate in modo tale da rendere più semplice la simulazione, mantenendo tuttavia le caratteristiche geometriche principali (quote medie, distanze) inalterate; tutte le quote (piano campagna, base dello strato interessato dalla simulazione, quote dell'argine) sono riferite allo zero idrometrico. L'argine è stato anch'esso semplificato come forma mantenendo altezza, pendenza delle sponde e larghezza esattamente uguali al rilievo.

Condizioni al contorno:

Lato fiume:

- Condizione di Neumann nel bordo laterale verticale di monte (lato fiume) della sezione.
- Condizioni di Dirichlet con carico relativo alla quota del pelo libero calcolato in funzione della piena sintetica di riferimento duecentennale. Il livello è riferito allo zero idrometrico. La condizione al contorno varia in relazione all'innalzamento del livello idrico del fiume Po. Per ciascuno scenario di simulazione si ha, come visto in precedenza, disposto un innalzamento di 1 metro a partire dalla quota dello zero idrometrico fino a raggiungere la condizione di livello della piena duecentennale. Pertanto, dal momento che da 0 m si arriva a 7.3 m, sono state eseguite 8 simulazioni per ciascuna delle due sezioni e per ciascuna delle due condizioni rappresentative della stato attuale e dello stato di progetto.

Lato campagna:

- Condizione di Neumann nel bordo laterale verticale di valle (lato campagna) della sezione.

- Condizioni di Dirichlet con carico relativo alla quota della superficie freatica. Il livello è riferito, anche in questo caso, allo zero idrometrico. La quota della superficie freatica è stata posta uguale a **-1.7 m** nella situazione attuale e uguale a **-2.3 m** nella situazione di progetto.

Superficie di fondo del dominio:

Condizione di Neumann nel bordo di fondo orizzontale del dominio di calcolo.

La differenza di livello tra monte e valle è tale che il carico idraulico sarà uguale a **9 m** nella situazione attuale e a **9.6 m** nella situazione di progetto nella quale si ha il funzionamento della barriera idraulica.

Conducibilità idraulica

La conducibilità idraulica k è stata definita attraverso le numerose prove idrauliche che hanno consentito di rappresentare l'acquifero superficiale come un unico orizzonte permeabile, con valori di conducibilità idraulica (calcolati sulla base dell'interpretazione delle prove di lunga durata) variabili da $1,1 \times 10^{-3}$ a $7,6 \times 10^{-4}$ m/s e valori di trasmissività da $1,5 \times 10^{-2}$ a $9,9 \times 10^{-3}$ m²/s.

Per semplicità e dal momento che le caratteristiche geo-pedologiche del sottosuolo (nell'ambito del dominio di calcolo) non sono variabili, si è scelto un unico valore della conducibilità idraulica pari a **$1,1 \times 10^{-3}$ m/s**.

Per l'argine e per il taglione, la conducibilità idraulica è stata assunta pari a **10^{-8} m/s**, in pratica si considerano impermeabili le due strutture.

Riassumendo:

- **acquifero superficiale: $k = 1.1 \times 10^{-3}$ m/s;**
- **argine e taglione in argilla: $k = 10^{-8}$ m/s;**

3.2. Risultati delle simulazioni

I risultati delle simulazioni idrauliche del flusso sono stati riportati nelle figure seguenti. Nella figura 3, relativa alla SEZIONE 1, sono rappresentate le linee equipotenziali e i vettori velocità riferite alle simulazione nella condizione di massima piena (livello uguale a

+7.3 m sullo zero idrometrico) e nella situazione attuale della superficie freatica (livello pari a -1.7 m sullo zero idrometrico); nella figura 4, sempre relativa alla SEZIONE 1, sono rappresentate le linee equipotenziali e i vettori velocità riferite alle simulazione nella condizione di massima piena (livello uguale a +7.3 m sullo zero idrometrico) e nella situazione di progetto della superficie freatica (livello pari a -2.3 m sullo zero idrometrico) che risulta depressa per il funzionamento della barriera idraulica.

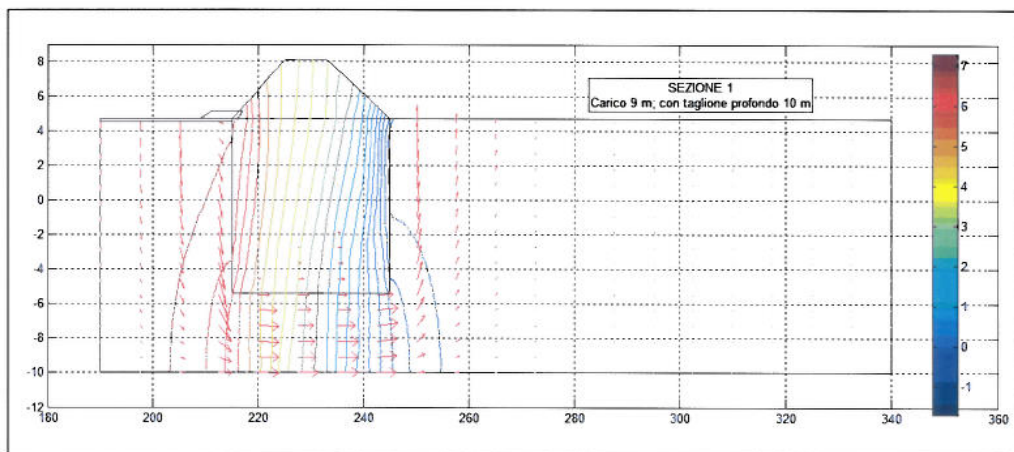


Fig. 3 – SEZIONE 1: calcolo della filtrazione nella situazione attuale e livello idrico relativo alla piena del Po con 200 anni di tempo di ritorno.

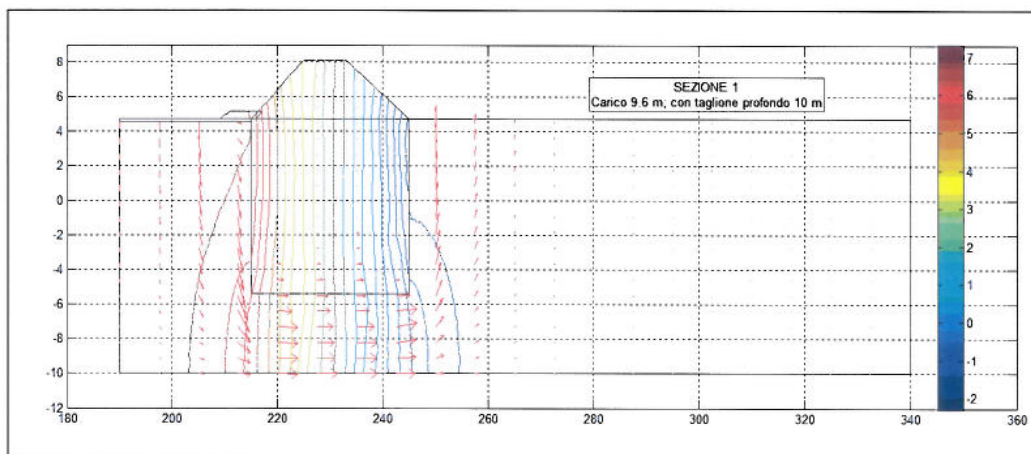


Fig. 4 – SEZIONE 1: calcolo della filtrazione nella situazione di progetto e livello idrico relativo alla piena del Po con 200 anni di tempo di ritorno.

Nelle figure 5 e 6 seguenti sono riportati gli stessi risultati sono delle figure precedenti per la SEZIONE 2.

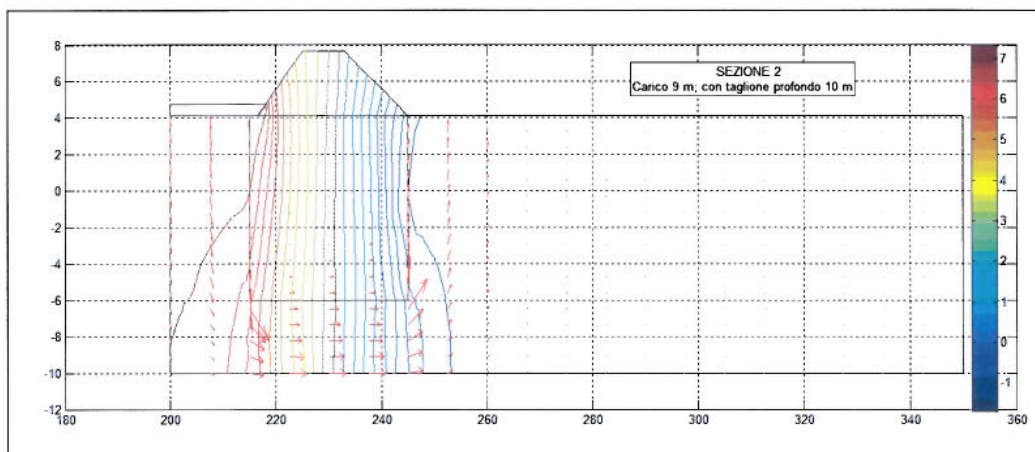


Fig. 5 – SEZIONE 2: calcolo della filtrazione nella situazione attuale e livello idrico relativo alla piena del Po con 200 anni di tempo di ritorno.

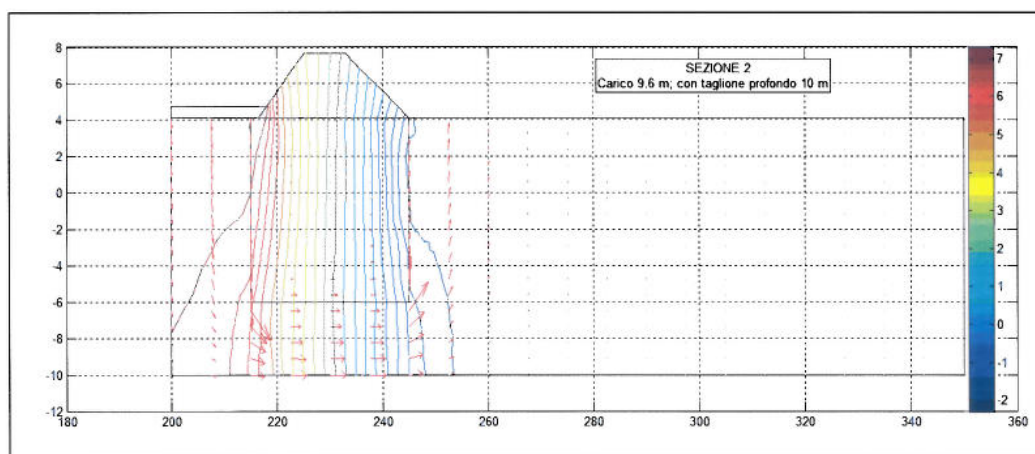


Fig. 6 – SEZIONE 2: calcolo della filtrazione nella situazione di progetto e livello idrico relativo alla piena del Po con 200 anni di tempo di ritorno.

Nell'Allegato 4 sono riportati i valori massime della velocità orizzontale u in m/s (nella zona al di sotto del taglione dove queste sono più elevate) e della velocità verticale v in m/s (nella zona prossima al terreno lato campagna, dove interessa valutare la possibile formazione di fontanazzi).

Nell'Allegato 5 sono riportati i grafici relativi a tutte le simulazioni eseguite.

3.3. Analisi dei risultati

I risultati ottenuti dalle simulazioni mostrano:

1. La sostanziale uguaglianza tra i campi di moto della situazione attuale e della situazione di progetto per ambedue le sezioni considerate;
2. Il campo di moto di filtrazione è tale da escludere fenomeni di sifonamento per entrambe le situazioni ed entrambe le sezioni; le velocità al piede dell'argine sono dell'ordine di 10^{-5} m/s.

Nella figura 7 è riportato, a titolo di esempio, il risultato grafico della simulazione relativa alla SEZIONE 2 nella situazione attuale (carico uguale a 9 m) in assenza del taglione. Nella figura 8 per la stessa sezione è riportato il risultato, sempre in assenza del taglione, per la condizione di progetto (carico uguale a 9.6 m).

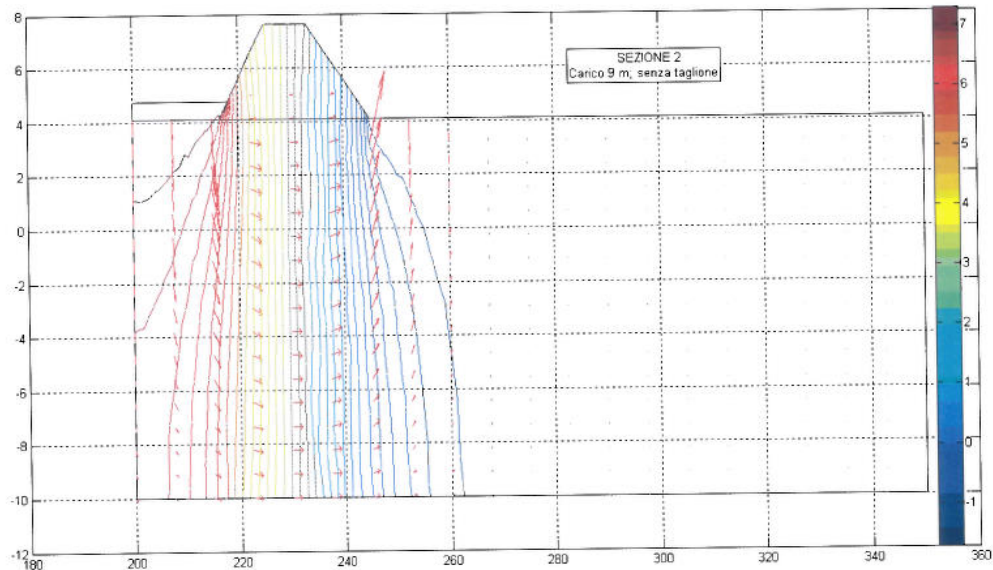


Fig. 7 – SEZIONE 2: calcolo della filtrazione nella situazione attuale e livello idrico relativo alla piena del Po con 200 anni di tempo di ritorno, senza il taglione.

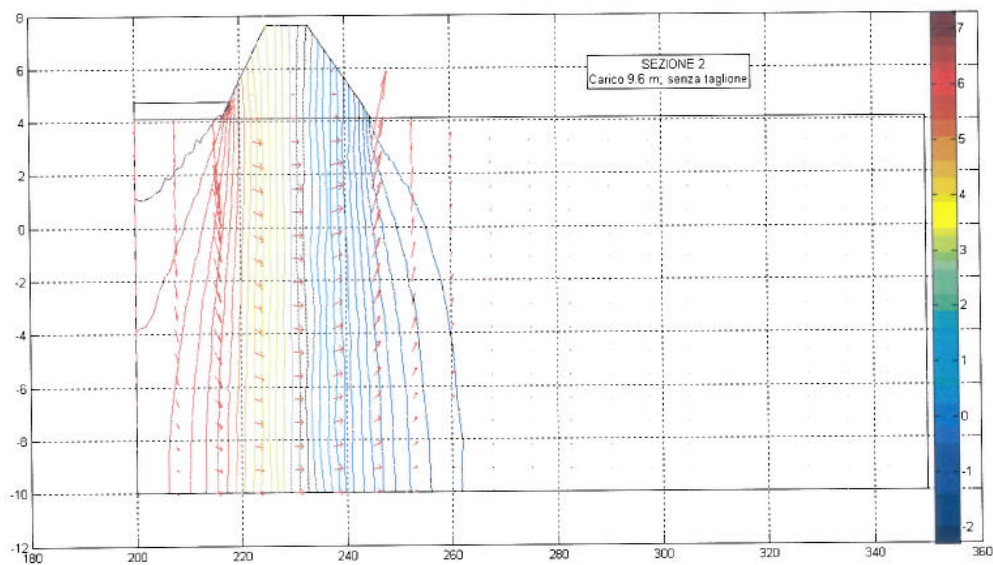


Fig. 8 – SEZIONE 2: calcolo della filtrazione nella situazione di progetto e livello idrico relativo alla piena del Po con 200 anni di tempo di ritorno, senza il taglione.

In entrambe le condizioni esaminate in assenza del taglione (senza e con funzionamento della barriera idraulica) le velocità al piede esterno dell'argine sono decisamente più elevate, dell'ordine 10^{-3} m/s ad indicare una sicura formazione di "fontanazzi" e l'erosione del materiale incoerente su cui poggia la fondazione dell'argine. La differenza di velocità di filtrazione tra la condizione con taglione e senza taglione è di circa due ordini di grandezza.

4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Le simulazioni condotte hanno mostrato la sostanziale uguaglianza del campo di moto di filtrazione nella falda freatica superficiale nell'intorno dell'argine maestro del fiume Po nelle due condizioni esaminate, la situazione attuale e la situazione di progetto (funzionamento della barriera idraulica e conseguente abbassamento della superficie freatica dal lato campagna di circa 0.6 m).

Questo uguale comportamento del flusso sotterraneo è stato riscontrato nelle simulazioni in tutte le condizioni del livello del fiume Po esaminate: dallo zero idrometrico al livello di 7.3 m sullo zero idrometrico relativo alla piena calcolata con 200 anni di tempo di ritorno.

Allegato 1

Rilievo topografico