

Traversa di Castel Giubileo: aggiornamento della rete di filtrazione e verifiche a sifonamento

Scopo

La tesi ha come obiettivo il tracciamento della rete di filtrazione della Traversa di Castel Giubileo sul fiume Tevere e la determinazione dei relativi coefficienti di sicurezza rispetto allo stato limite ultimo idraulico di sifonamento.

La teoria di base è illustrata nei capitoli 1, 2, 3. In essi sono descritte le equazioni che governano i moti di filtrazione dell'acqua attraverso mezzi porosi, il fenomeno del sifonamento e i metodi più usati per la determinazione dei coefficienti di sicurezza.

La parte applicativa è illustrata nei capitoli 4, 5, 6, 7, 8. Essa si basa sull'attività di tirocinio curriculare da me sostenuta presso l'unità REI/O&M HYDRO/MTS/Dams&Civil Infrastructures Safety/ROMA TS CIVIL di Enel Green Power S.p.A., concessionario e gestore dell'impianto di Castel Giubileo.



Figura 1 - Traversa di Castel Giubileo, vista da monte

Castel Giubileo, in regolare servizio dal maggio 1951, è un impianto idroelettrico costituito dalla traversa propriamente detta e dalla centrale affiancata. Si trova sul Tevere, subito a monte di Roma, la sua collocazione lo rende dunque una struttura dalla notevole importanza strategica, usata per la laminazione delle onde di piena del fiume a difesa della Città, oltre che per la produzione di energia elettrica.

La caratteristica peculiare dell'impianto è il fatto che quasi tutte le sue strutture sono fondate, tramite cassoni pneumatici, nelle sabbie fini costituenti il piano alluvionale del Tevere. In tali condizioni si instaura al

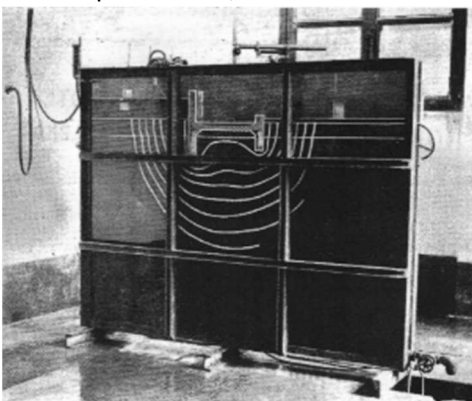


Figura 2 - Modello fisico (1949)

di sotto della struttura un moto di filtrazione che può avere conseguenze disastrose sulla sua stabilità, qualora i gradienti piezometrici sul percorso monte-valle dovessero superare determinati valori critici, condizione che viene definita *sifonamento*.

Per questo motivo, nel 1949 fu sviluppato un modello fisico per studiare i moti di filtrazione al di sotto della traversa e stabilire le profondità a cui intestare i taglioni di monte e di valle per garantire un coefficiente di sicurezza adeguato. Tale coefficiente è definito dal rapporto tra il valore critico del gradiente piezometrico, che dipende solo dal terreno, e il valore effettivo, che può essere calcolato nella zona di efflusso a valle oppure mediato sull'intero percorso di filtrazione. Il modello fisico, basato su una sezione tipo della traversa e su dei profili di fondo alveo costanti, permise di determinare la

rete di filtrazione al di sotto della struttura e di calcolare dunque il coefficiente di sicurezza a sifonamento della traversa, che risultò essere pari a **10.3**, un valore estremamente elevato che permise di mantenere invariate le dimensioni di progetto dell'opera.

Nel corso degli anni '90, tramite dei rilievi batimetrici, fu accertata la presenza in alveo di alcune cavità, profonde qualche metro e localizzate a valle della traversa. La modifica morfologica dell'alveo impose l'aggiornamento delle verifiche a sifonamento per rassicurare sulle condizioni di sicurezza di Castel Giubileo, queste vennero eseguite nel dicembre 2000, sempre basandosi sulla rete di filtrazione del 1949, non considerandone tuttavia l'ultima maglia a valle per tener conto dell'erosione. Il coefficiente di sicurezza determinato fu pari a **8.0**.

Al fine di acquisire informazioni più dettagliate circa i terreni di fondazione di Castel Giubileo, tra il settembre e il dicembre 2002 furono eseguite delle indagini geognostiche consistenti nella esecuzione di sondaggi a carotaggio con prelievo di campioni indisturbati, prove di permeabilità in sito, prove SPT e posa in opera di piezometri al fine di avere una misura diretta della distribuzione di carico piezometrico al di sotto dello sbarramento.

Sulla base delle suddette indagini, nel 2004 venne ricalcolato il coefficiente di sicurezza a sifonamento, che risultò essere pari a **6.7**, ma anche questa volta ci si basò sulla rete di filtrazione del 1949 per determinare il gradiente di efflusso.

Le verifiche a sifonamento di Castel Giubileo hanno restituito nel corso degli anni coefficienti di sicurezza sempre ben superiori ai minimi consigliati. Tuttavia, sono state eseguite attraverso la rete di filtrazione determinata nel 1949, basata su una morfologia dell'alveo profondamente diversa da quella evidenziata dai

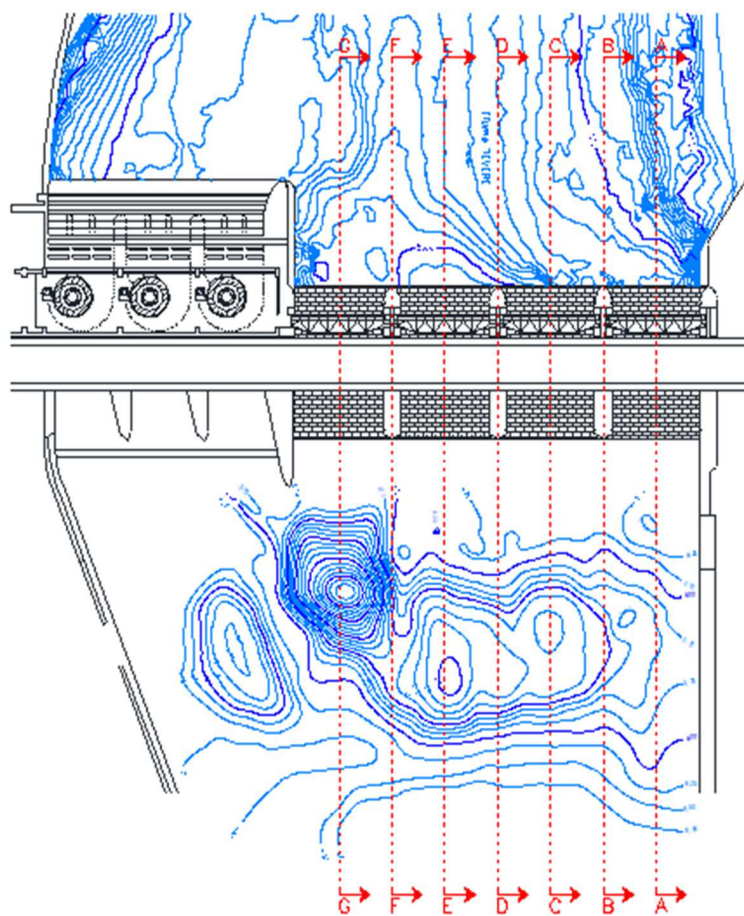


Figura 3 - Planimetria, rilievi batimetrici e sezioni di verifica

più recenti rilievi batimetrici. Essendo i moti di filtrazione strettamente connessi alla morfologia dell'alveo nei pressi dello sbarramento, è dunque opportuno un ricalcolo della rete e dei coefficienti di sicurezza.

Il modello sviluppato per ricalcolare la rete è un modello numerico 2D alle differenze finite basato sull'equazione di Laplace. Il codice di calcolo utilizzato per la sua risoluzione è MODFLOW. A differenza del modello fisico del 1949, basato su un'unica sezione tipo della traversa, il modello numerico si basa su sette sezioni, definite in corrispondenza della mezzzeria di ciascuna luce e delle tre pile centrali. Permette dunque di tener conto della effettiva profondità del piano di imposta delle fondazioni, nonché delle condizioni stratigrafiche ed erosive locali.

È stata inoltre definita un'ottava sezione con le stesse caratteristiche geometriche, geotecniche e condizioni al contorno adottate per la rete del 1949. Ciò ha permesso di valutare, qualitativamente, l'ottima corrispondenza tra i risultati del modello fisico e quelli del modello numerico.

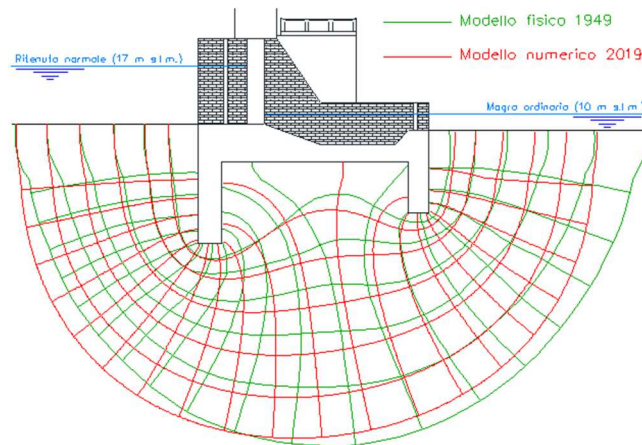


Figura 4 - Confronto tra rete da modello fisico (1949) e rete da modello numerico (2019)

Per poter procedere con la modellazione occorre definire il dominio di calcolo in termini di caratteristiche geometriche e geotecniche, scegliere la dimensione caratteristica della griglia di discretizzazione ed assegnare le condizioni al contorno.

Per le caratteristiche geometriche sono stati tracciati dei profili di fondo alveo in corrispondenza delle sezioni di interesse sulla base dei più recenti rilievi batimetrici, eseguiti nel 2014 e nel 2017, rispettivamente a monte e a valle della traversa. Le sezioni trasversali dello sbarramento tengono conto delle effettive quote di imposta dei cassoni di fondazione, diverse da sezione a sezione.

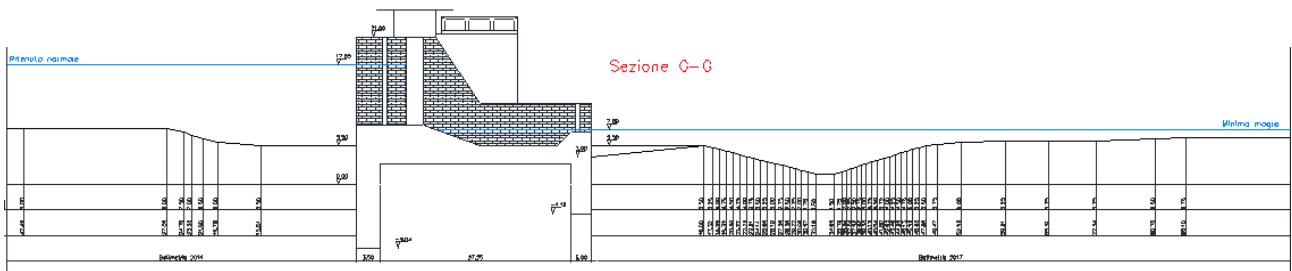


Figura 5 - Profilo batimetrico platea destra

Per le caratteristiche geotecniche è stata ricostruita una sezione stratigrafica longitudinale della traversa, utilizzando le schede di sondaggio della campagna di indagini geognostiche eseguita nel 2002.

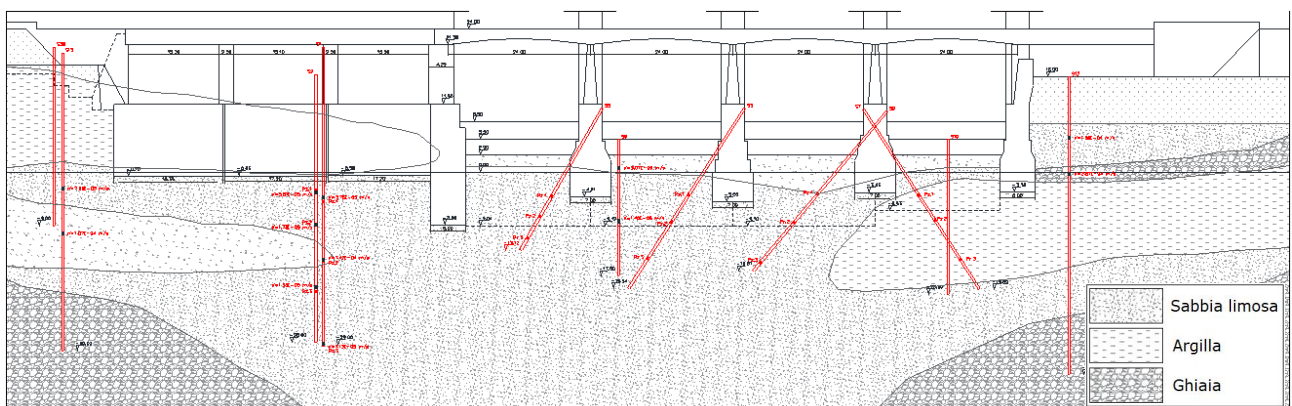


Figura 6 - Sezione stratigrafica longitudinale

Attraverso la sezione longitudinale, sono state poi tracciate le sezioni trasversali di interesse indicando i valori di conducibilità idraulica dei vari livelli di terreno.

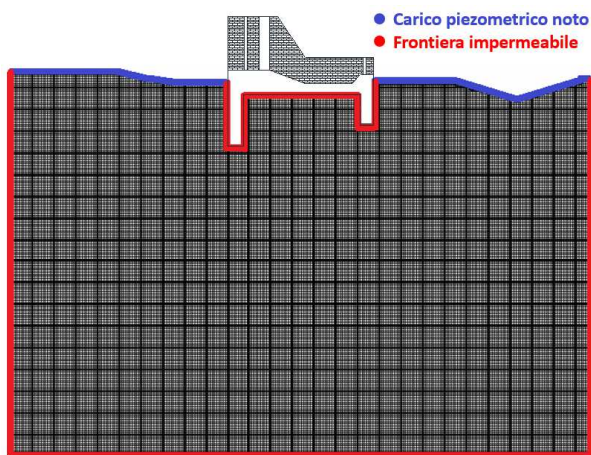


Figura 7 - Griglia di calcolo e condizioni al contorno

delle celle di registrazione di circa 1 m. Tale sovrastima può dipendere da una stratigrafia diversa da quella ipotizzata (i sondaggi del 2002 si sono concentrati al di sotto della traversa, non si hanno dunque informazioni sulla reale stratigrafia a monte e a valle di essa) o da possibili effetti 3D del moto di filtrazione (che è stato modellato in 2D). È stato dunque implementato anche un modello 3D, che ha restituito tuttavia risultati perfettamente confrontabili con quelli del 2D, permettendo così di escludere la seconda possibilità.

È fondamentale osservare come l'uso delle reti di filtrazione da modello 2D per le verifiche a sifonamento sia cautelativo dal punto di vista della sicurezza. I gradienti in efflusso simulati saranno infatti leggermente maggiori di quelli reali, limitati dalla maggiore dissipazione di carico nel tratto iniziale del percorso.

A fronte di tali considerazioni, si è proceduto con la determinazione delle reti di filtrazione per ciascuna sezione considerata, adottando cautelativamente le condizioni al contorno che massimizzano il salto monte-valle compatibilmente con le condizioni di normale esercizio dell'impianto, ovvero quota massima di regolazione a monte (17.00 m s.l.m.) e quota di minima magra a valle (7.80 m s.l.m.).

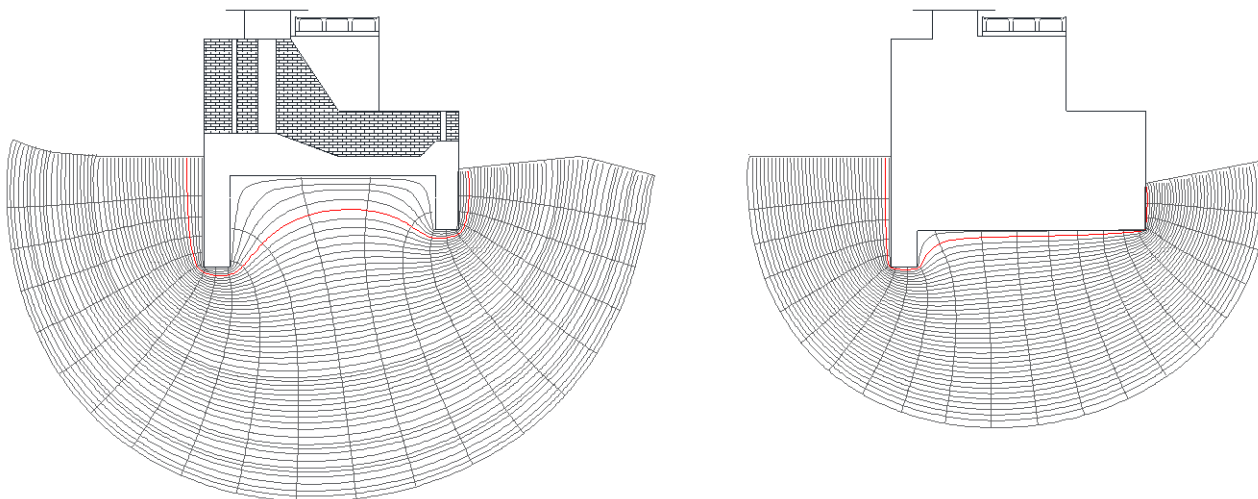


Figura 8 - Reti di filtrazione platea destra e pila destra

In base alle NTC 2018, le verifiche a sifonamento devono essere eseguite sia considerando come effetto delle azioni il gradiente medio (sull'intero percorso monte-valle) sia il gradiente di efflusso (che può essere calcolato sull'ultima maglia della rete).

Nel caso di Castel Giubileo, i coefficienti di sicurezza a sifonamento calcolati sono tutti superiori ai minimi normativi. In particolare, per la sezione più critica (pila destra), si è determinato un coefficiente di sicurezza

a gradiente medio di **5.30** a fronte di un minimo normativo di 3, e un coefficiente di sicurezza a gradiente di efflusso di **3.73** a fronte di un minimo normativo di 2.

La Traversa di Castel Giubileo risulta dunque verificata a sifonamento nonostante la modifica morfologica dell'alveo subita nel corso degli anni.

Indice

Sommario

Introduzione

- 1. L'acqua nel terreno**
- 2. I moti di filtrazione**
 - 2.1. Il carico totale e il carico piezometrico
 - 2.2. La legge di Darcy
 - 2.3. L'equazione generale del flusso in un mezzo poroso
 - 2.4. L'equazione di Laplace
 - 2.5. La rete di filtrazione
- 3. Il sifonamento**
 - 3.1. La pressione di filtrazione e il gradiente critico
 - 3.2. L'erosione interna nelle opere dell'Ingegneria Civile
 - 3.3. Il meccanismo di collasso
 - 3.4. I metodi per la determinazione dei coefficienti di sicurezza
- 4. Caso di studio: la Traversa di Castel Giubileo sul fiume Tevere a Roma**
 - 4.1. Il fiume Tevere
 - 4.2. La Traversa di Castel Giubileo
 - 4.3. Il modello fisico dell'Ing. Canali
 - 4.4. Anni '90 – La modifica morfologica dell'alveo e l'aggiornamento delle verifiche a sifonamento
 - 4.5. 2002 – Le indagini geognostiche e l'installazione di strumentazione piezometrica
 - 4.6. 2004 – Le nuove verifiche a sifonamento
- 5. Modellazione 2D**
 - 5.1. L'aggiornamento della rete di filtrazione
 - 5.2. Il modello numerico
 - 5.3. Caratteristiche geometriche
 - 5.4. Caratteristiche geotecniche
 - 5.5. Discretizzazione del dominio
 - 5.6. Condizioni al contorno
 - 5.7. Confronto tra i carichi idraulici simulati ed osservati
- 6. Modellazione 3D**
- 7. Risultati**
 - 7.1. Le reti di filtrazione
 - 7.2. Verifiche a sifonamento
- 8. Conclusioni**
- 9. Appendice – Il codice di calcolo MODFLOW**

Bibliografia

Programma di sviluppo e durata

- Ricerca bibliografica teoria dei fenomeni indagati e stesura prima parte teorica (1 marzo – 30 giugno 2019);
- Analisi documentazione storica disponibile riguardante la Traversa di Castel Giubileo (1 luglio – 14 luglio 2019);
- Sviluppo modelli numerici (15 luglio – 14 settembre 2019);
- Analisi dei risultati e stesura seconda parte applicativa (15 settembre – 14 ottobre 2019);
- Discussione tesi (22 ottobre 2019).