



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE EDILE ED
AMBIENTALE**

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

**CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI TERMO-MECCANICI PER
L'ANALISI FEM DELLE DEFORMAZIONI INDOTTE DALLE
VARIAZIONI DELLE TEMPERATURE AMBIENTALI E DEL
LIVELLO IDRICO DI INVASO IN UNA DIGA IN CALCESTRUZZO
A DOPPIO ARCO**

**CALIBRATION OF THERMO-MECHANICAL PARAMETERS FOR A
FEM-BASED ANALYSIS OF THE DEFORMATIONS INDUCED IN A
DOUBLE-ARCHED CONCRETE DAM BY CHANGES IN AMBIENT
TEMPERATURES AND RESERVOIR WATER LEVEL**

Relatore: Dott. Ing. Lorenzo BREZZI

Correlatore: Ing. Francine TCHAMALEU

Laureando

CHIARA MARTONE

Matricola 1241206

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

*A Maria Rosaria,
mia compagna per la vita*

*A Vittoria,
la mia vita.*

Sommario

Introduzione.....	5
1. Le dighe.....	7
2. Le centrali idroelettriche.....	13
3. Caso studio	17
3.1. Generalità, ubicazione e finalità	17
3.2. Caratteristiche della diga.....	19
3.3. Sezione di sbarramento e serbatoio.....	24
3.4. Il calcestruzzo	25
3.5. Portata delle opere di scarico	32
3.6. L'opera di presa e di derivazione	33
3.7. Lavori di impermeabilizzazione	35
3.8. Verifica statica della struttura.....	37
4. Monitoraggio della diga	39
5. Modellazione FEM.....	49
5.1. Creazione della geometria del terreno	51
5.2. Creazione della geometria della diga.....	54
5.3. Creazione della mesh	58
5.4. Condizioni al contorno	60
5.5. Carichi applicati	62
5.5.1. Inserimento della quota d'invaso	62
5.6. Vincoli termici	66
5.6.1. Temperature imposte ai nodi.....	66
5.6.2 Funzioni temperatura alle <i>faces</i>	68
5.7. Stage set del modello.....	72
6. Calibrazione termica del modello.....	77

6.1 Andamento della temperatura nei sensori	78
6.2. Andamento della temperatura nel modello	79
6.3 Modelli analizzati	82
7. Calibrazione meccanica del modello	91
7.1. Roto-traslazione dei sistemi di riferimento.....	92
7.2. Andamento delle deformazioni dei sensori.....	95
7.3 Andamento delle deformazioni del modello.....	96
7.4 Modelli analizzati	98
7.5. Deformata totale del modello	101
8. Inserimento falda a quota 490 m. s.l.m.....	107
8.1. Andamento degli spostamenti con falda a 490 m slm	109
9. Conclusioni.....	113
Riferimenti bibliografici.....	116

Introduzione

Si analizzerà come caso studio la centrale idroelettrica ubicata nella valle del torrente Toscolano in località S. Maria Valvestino (ponte Cola), e se ne studieranno le sue criticità.

L'obiettivo principale è permettere al gestore l'innalzamento della quota di invaso del serbatoio presente a monte della diga in esame. Per far ciò bisogna capire come la variazione della quota di invaso e della temperatura ambientale influiscano sulla deformata e sugli spostamenti che la diga compie nel corso della sua vita utile.

L'innalzamento della quota di invaso porterebbe infatti ad una maggiore produzione di energia elettrica, con conseguente aumento della fruibilità della centrale idroelettrica, ma deve essere tutelata la sicurezza dell'opera e del territorio circostante. A tal proposito, il monitoraggio continuo della diga ha permesso di ottenere misure utili alla calibrazione di un modello numerico, modello in grado di stimare il comportamento della diga anche in condizioni differenti e più gravose rispetto a quelle in cui l'opera si trova attualmente.

Il primo capitolo consiste in una introduzione generale sui sistemi di ritenuta e delle varie tipologie che essi possono assumere.

Il secondo capitolo verte sull'illustrazione del funzionamento generale delle centrali idroelettriche e sulle loro componenti.

Il terzo capitolo tratta la descrizione del caso studio preso in esame. Il primo paragrafo illustra tutte le specifiche della struttura: se ne vedono le generalità, l'ubicazione, le caratteristiche geometriche e di funzionamento, tutte le fasi della costruzione, i materiali e infine la verifica statica della struttura.

Il quarto capitolo vuole essere un'introduzione su quali siano i dati forniti dal gestore per poter condurre lo studio richiesto. Vengono esplicitati i mezzi a disposizione per il monitoraggio.

Il capitolo successivo, il quinto, ripercorre i passaggi che hanno portato alla costruzione del modello agli elementi finiti, partendo dalla modellazione

del terreno, poi del corpo diga, seguendo con le condizioni al contorno, dunque i vincoli statici e quelli termici.

Nella fase finale del quinto capitolo si trovano le linee guida adottate per impostare l'analisi in Midas.

Il sesto capitolo rappresenta il primo corpo principale dello studio: la calibrazione dei parametri termici che governano la risposta del modello. Partendo dai dati forniti dalla letteratura, avendo a disposizione una fitta campagna di raccolta dati e in particolare su come varia la temperatura nella diga grazie a mire topografiche e sensori presenti all'interno del calcestruzzo, si studia la giusta combinazione del valore del calore specifico e della conducibilità termica.

Nel settimo capitolo si affronta invece la calibrazione; il confronto, in questa fase è offerto ancora una volta da mire topografiche presenti sul lato valle della diga, in particolare si guarderà alle mire posizionate sul coronamento.

Si fa notare che i modelli riportati sono solo una parte di quelli realmente analizzati, al solo fine di snellire questo lavoro e di rendere più lineare la lettura. Si precisa in ultimo che, l'onere computazionale di ogni analisi, data la dimensione del modello e data la precisione scelta per rappresentare il terreno e il corpo diga, è notevole: ogni modello ha impiegato all'incirca 3 ore per arrivare a compimento.

Infine si riportano le conclusioni ottenute alla luce di quanto ottenuto dal presente lavoro di tesi, indicando inoltre le prospettive future di sviluppo delle analisi eseguite.

1. Le dighe

Per capire meglio cosa sono le dighe possiamo partire dalla seguente definizione: “opera idraulica di sbarramento costruita a scopo di protezione (per es. di terre basse litoranee o di opere portuali) o per la costituzione di un bacino; d. fissa, d. mobile, a seconda che lo sbarramento risulti permanente o intermittente”. In generale possiamo distinguere le dighe in:

- diga foranea quando essa è utilizzata per proteggere una fascia costiera o un porto [figura 2.1];



Figura 1.1 – *Diga foranea di Genova*

- diga di ritenuta quando funge da sbarramento di un corso d’acqua [figura 2.2].



Figura 1.2 – *Diga di Castreccioni*

Nel dettaglio, le dighe di ritenuta sono degli sbarramenti artificiali che vengono realizzati nella gola di una valle per sbarrare uno o più corsi d’acqua; lo scopo è quello di realizzare a monte di esse un lago artificiale, che prende il nome di bacino di invaso. Il bacino viene utilizzato per immagazzinare acqua, che poi potrà essere utilizzata a diverso regime

idrologico, rispetto quello che si avrebbe avuto dagli afflussi meteorici dei corsi d'acqua.

L'acqua può essere usata per molteplici scopi, i principali sono la riserva idrica per uso idropotabile, industriale, irriguo e per la produzione di energia idroelettrica. In diversi casi le dighe possono essere usate per trattenere le portate dei corsi d'acqua durante i periodi di piena, grazie all'effetto di laminazione del serbatoio; la quantità d'acqua trattenuta può essere quindi restituita durante i periodi di scarsità d'acqua oppure distribuita in modo graduale durante il normale esercizio del corso d'acqua.

Le dighe, inoltre, possono anche essere costruite per innalzare il livello di falda sui terreni limitrofi alla zona del serbatoio, per garantire una piezometrica maggiore alle utenze collegate a valle di essa, o per trattenere i detriti trasportati dai fiumi collegati ad essa.

È evidente quindi che la realizzazione di un bacino viene fatta in diverse occasioni e con diversi scopi, a seconda delle esigenze della zona, che oltretutto posso cambiare nel tempo. In Italia vengono chiamate dighe solamente le opere di sbarramento che superano una determinata altezza o generino un determinato invaso. Se così non fosse, quindi quando l'altezza o l'invaso dell'opera sono inferiori a determinati valori si parla di traverse fluviali. Questo secondo la legge n°584 del 21 ottobre 1994 la quale stabilisce che "per diga si intende uno sbarramento superiore ai 15 metri di altezza o che determini un volume di invaso superiore a 1.000.000 di metri cubi e che la realizzazione di tali opere di sbarramento denominate dighe è soggetta, ai fini della tutela dell'incolumità pubblica, in particolare delle popolazioni e dei territori a valle delle opere stesse, all'approvazione tecnica del progetto da parte del Servizio Nazionale Dighe".

Per la progettazione del bacino di invaso che viene realizzato con la costruzione della diga, sono da tener presenti diversi fattori. In particolare, il volume di invaso del bacino dipende strettamente dalla morfologia del terreno e della diga, della posizione in cui essa è creata e dall'altezza della stessa [figura 2.3]; una volta stabilito quindi il punto di costruzione della diga, in base al volume di invaso che si vuole ottenere, si stabilisce l'altezza della costruzione.



Figura 1.3 – *Diga del Vajont*

Generalmente la diga viene collocata a valle di un tratto pianeggiante della vallata, e preferibilmente dove la vallata assume un solco vallivo, del tipo a V, stretto. È facile intuire che più i due paramenti opposti della montagna sono vicini, minore sarà la lunghezza della diga.

Altri fattori che influenzano la scelta ed il posizionamento della diga sono le caratteristiche dei materiali costituenti, i versanti e le condizioni geologiche di stabilità e tenuta idrica. La costruzione di una diga e la conseguente creazione di un lago artificiale a monte di essa comporta la risoluzione di molteplici problemi geologici, geotecnici e strutturali molto complessi. In base alle caratteristiche morfologiche del sito, alla sezione di imposta, allo schema statico di funzionamento adottato, alla geometria, ai materiali e alle modalità di realizzazione, le dighe si suddividono in:

- dighe a gravità: esse contrastano la spinta dell'acqua tramite il loro peso proprio; si suddividono a loro volta in due tipologie: massicce ed alleggerite [figure 2.4-5].



Figura 1.4 - *Diga della Grande-Dixence*



Figura 1.5 – *Diga di Gioveretto*

Le dighe a gravità massicce hanno prevalentemente uno sviluppo rettilineo o con una leggerissima curvatura, la sezione trasversale è di forma triangolare piena e non varia per tutta la struttura della diga. La struttura è in genere divisa in conci da dei giunti radiali, posti a adeguata distanza, in modo da permettere eventuali fenomeni di dilatazione senza provocare fessurazioni.

Le dighe a gravità alleggerite possiedono la forma tipica dello sbarramento massiccio, alla quale sono stati apportati degli alleggerimenti. Avremo quindi sezioni continue più strette lungo tutto l'asse di sviluppo, e la presenza di rinforzi o contrafforti lungo il paramento di valle o in casi particolari anche lungo il paramento di monte. I contrafforti hanno anch'essi un profilo triangolare, essi vengono messi a contatto con la diga stessa ma restano degli elementi indipendenti da essa.

- a volta: esse contrastano la spinta dell'acqua tramite l'effetto arco, che si ottiene grazie alla forma attribuita all'opera; essa presenta infatti una sensibile curvatura lungo il suo sviluppo. L'arco generato dalla diga permette di scaricare la spinta dell'acqua sulla roccia attraverso la sezione di imposta. Questo tipo di struttura lavora con stati tensionali prevalentemente di compressione. Questa tipo di dighe si suddividono a loro volta in tre tipologie: ad arco [figura 2.6], ad arco gravità [figura 2.7] e ad arco con doppia curvatura [figura 2.8].



Figura 1.6 – *Diga di Lei*



Figura 1.7 – *Diga di Cancan*

- in materiali sciolti: esse sono degli sbarramenti costruiti da materiali di tipo sciolto di varia granulometria, la tenuta viene garantita da un nucleo interno. Il nucleo interno deve avere adeguate caratteristiche di permeabilità; generalmente esso è composto da materiali argillosi [figura 2.9].



Figura 1.8 – *Diga di Mica*

2. Le centrali idroelettriche

Dal punto di vista energetico, si stima che il 19% dell'energia mondiale sia del tipo idroelettrico, quindi derivi da una centrale idroelettrica. Il principio che sta alla base delle centrali idroelettriche è quello di sfruttare la caduta dell'acqua per produrre energia elettrica. In tutto il mondo ci sono infatti ben 45.000 dighe più alte di 15 m, e il loro numero è in continuo aumento a causa della necessità di sempre più energia. Le centrali idroelettriche sono un insieme di opere idrauliche poste in una determinata sequenza, con capacità di immagazzinare l'energia derivante dalla caduta dell'acqua [figura 3.1]. L'energia prodotta da una centrale idroelettrica è una fonte rinnovabile. Esistono centrali idroelettriche di diverse dimensioni, a seconda del diverso salto dell'acqua, alla portata e alla quantità di energia prodotta; secondo queste caratteristiche possiamo diversificare le seguenti tipologie di centrali idroelettriche:

In base alla potenza nominale si distinguono

- micro-impianti: $P < 100 \text{ kW}$
- mini-impianti: $P = 100 \div 1.000 \text{ kW}$
- piccoli impianti: $P = 1.000 \div 10.000 \text{ kW}$
- grandi impianti: $P > 10.000 \text{ kW}$

In base al salto, sia H la caduta:

- bassa caduta: $H < 20 \text{ m}$
- media caduta: $H = 20 \div 100 \text{ m}$
- alta caduta: $H = 100 \div 1.000 \text{ m}$
- altissima caduta: $H > 1.000 \text{ m}$

In base alla portata (Q):

- piccola portata: $Q < 10 \text{ m}^3/\text{s}$
- media portata: $Q = 10 \div 100 \text{ m}^3/\text{s}$
- grande portata: $Q = 100 \div 1.000 \text{ m}^3/\text{s}$
- altissima portata: $Q > 1.000 \text{ m}^3/\text{s}$

Attualmente l'impiego di nuove centrali idroelettriche prevede la costruzione di impianti su piccola scala, come micro e mini-impianti.

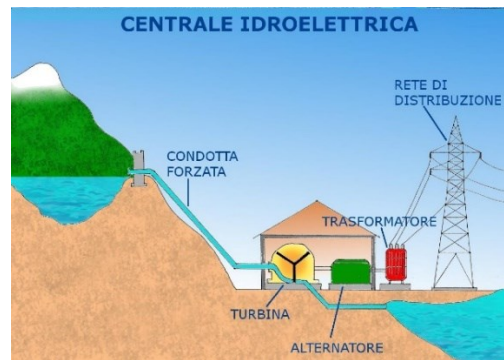


Figura 2.1 – Funzionamento di una centrale idroelettrica

Perché una centrale idroelettrica funzioni c'è bisogno della presenza di un bacino di invaso o di un corso d'acqua da cui generare dell'energia. L'acqua viene prelevata dalla sorgente idrica e convogliata mediante una condotta di adduzione ad una turbina, le portate d'acqua sono regolate a mezzo di paratoie. Una volta azionata la turbina, il flusso d'acqua viene fatto deviare nel corso d'acqua tramite un raccordo. Attraverso il moto rotativo della turbina, azionata dall'acqua, è possibile ricavare energia elettrica trasformando l'energia meccanica del moto in energia elettrica.

Un alternatore, installato direttamente sulla turbina, ha il compito di trasformare la sua energia meccanica in energia elettrica. È abbastanza evidente che maggiore è la portata d'acqua afferente alla turbina, maggiore sarà l'energia elettrica generata da essa. L'energia elettrica generata dall'alternatore, prima di essere trasportata alle utenze collegate, necessita di essere trasformata ulteriormente.

La prima trasformazione ha lo scopo di abbassare l'intensità della corrente e di elevarne la tensione; questo ci consentirà di portare la corrente anche a grandi distanze. La seconda trasformazione che la corrente è costretta a subire è un abbassamento di tensione; questo avviene nella località di arrivo della corrente.

Eseguite quindi le trasformazioni, la corrente è pronta per essere distribuita alle utenze per gli utilizzi commerciali, industriali e domestici.

Si distinguono differenti tipologie di centrali idroelettriche a seconda di dove è collocata la sorgente idrica rispetto la centrale e a come esse vi attingono. Possiamo avere centrali ad acqua fluente, centrali a bacino e centrali ad accumulazione.

Le centrali ad acqua fluente sfruttano la portata e il salto di un corso d'acqua naturale; esse convogliano l'acqua alla turbina attraverso un canale di deviazione e poi la restituiscono. La quantità di corrente prodotta è proporzionale alla velocità dell'acqua presente nel torrente.

Nella centrale a bacino è presente invece un invaso, che viene posto a monte della centrale; questo può essere di due tipi, artificiale o naturale. L'invaso di tipo artificiale si ottiene previa costruzione di una diga di ritenuta. L'acqua presente nell'invaso viene convogliata alle turbine tramite delle condotte, successivamente l'acqua viene convogliata in un bacino di calma posto a valle della centrale.

Questo tipo di centrale sfrutta l'energia potenziale generata dalla caduta dell'acqua, quindi il salto presente fra il bacino di monte e la centrale. A differenza delle centrali ad acqua fluente, le centrali a bacino permettono di avere controllo sui flussi d'acqua e quindi sulla relativa produzione di energia.

Le centrali ad accumulazione sono composte da due serbatoi, uno a monte e uno a valle della centrale. Il serbatoio posto a valle funge da riserva idrica, durante i periodi di minor richiesta energetica, l'acqua viene pompata al serbatoio di monte, così da garantire energia anche nei momenti di maggiore richiesta. In alcuni particolari impianti è possibile usare le stesse turbine che generano energia anche per pompare l'acqua.

3. Caso studio

3.1. Generalità, ubicazione e finalità

Il caso studio preso in esame è una centrale idroelettrica con tutte le sue opere annesse; in particolare si prende in considerazione la diga di sbarramento della vallata che genera il serbatoio di invaso a monte della stessa [figura 4.1.1.1].



Figura 3.1.1 – Diga del Valvestino

I lavori per la costruzione della diga di Ponte Cola iniziarono nel 1959, la diga fu inaugurata il 26 giugno 1962, dopo tre anni di cantiere, mentre l'invaso fu completato nell'inverno del 1963. Nello stesso anno ne fu affidata la gestione ad ENEL.

La centrale idroelettrica è ubicata nella valle del torrente Toscolano in località S. Maria Valvestino (Ponte Cola) a circa 9 km dal suo sbocco nel lago di Garda.

L'opera è stata costruita al fine di immagazzinare l'energia ritraibile dai bacini dei torrenti Toscolano e S. Michele [figura 4.1.1.2]: il serbatoio della diga è una riserva di energia di $45 \cdot 10^6$ kWh.

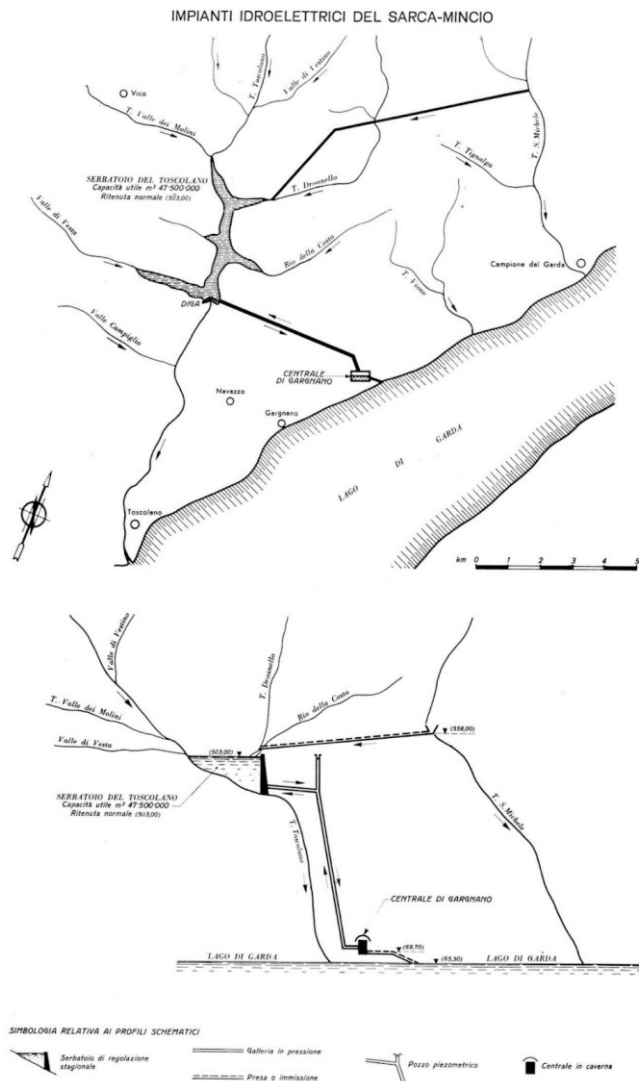


Figura 3.1.2 – Impianti idroelettrici del Sarca-Mincio

Si elencano alcuni dati principali riguardanti la diga e l'invaso:

Livello di ritenuta normale	503,00 m.s.m.
Livello di massimo invaso	504,00 m.s.m.
Livello di massimo svaso normale	438,00 m.s.m.
Capacità di invaso	
Totale	$52,25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Utile	$47,50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Superficie del bacino imbrifero	
Direttamente sotteso	$97,25 \text{ km}^2$
Allacciato (torrente S. Michele)	$24,58 \text{ km}^2$
Totale	$121,83 \text{ km}^2$

3.2. Caratteristiche della diga

La diga è di tipo ad arco, a doppia curvatura, essa presenta una struttura arcuata simmetrica rispetto al piano verticale di mezzeria, coincidente anche con il piano dei centri di curvatura degli archi.

La diga si imposta entro la gola da sbarrare, precisamente lungo la superficie del giunto perimetrale del pulvino sagomato a culla. Il pulvino possiede uno spessore variabile da 6 m nella parte alta della diga a 11,5 m nella parte più bassa della stessa; lungo tutto il pulvino corre un cunicolo perimetrale.

Il pulvino a sua volta è appoggiato attraverso un secondo giunto perimetrale continuo su un tampone di fondazione che si incastra profondamente nella roccia. Il giunto è realizzato separando i getti mediante fogli di carta, atto a ridurre ulteriormente eventuali sforzi torsionali trasmessi al tampone di fondazione dalla sottostante piastra curva.

La diga è suddivisa in 21 colonne da giunti radiali, ognuna di esse presenta uno sviluppo all'estradosso pari a 12 m. I giunti radiali sono stati parzialmente iniettati a ritiro avvenuto, come lo è stato anche il giunto perimetrale. La struttura è stata realizzata in calcestruzzo dosato a 250 kg/m³ di cemento; è presente una leggera armatura nei due paramenti e nel pulvino in modo da assorbire gli sforzi corticali; inoltre è presente anche un'armatura di rinforzo alla base d'appoggio del pulvino.

Seguono alcuni dati geometrici principali.

Altezza del piano di coronamento	505,00 m s.l.m.
sul punto più depresso del tampone	124,00 m
sul piano dell'alveo a valle	115,00 m
Franco rispetto al coronamento	
sul livello di ritenuta normale	2,00 m
sul livello di massimo invaso	1,00 m
Sviluppo del coronamento all'estradosso	282,45 m
Corda in sommità all'estradosso	246,00 m

Raggi di curvatura planimetrica:

dell'arco di cresta a 505,00 m s.l.m. (intradosso)	161,51 m
dell'arco di cresta a 505,00 m s.l.m. (estradosso)	164,91 m
dell'arco a 390,00 m s.l.m. (intradosso)	38,63 m
dell'arco a 390,00 m s.l.m. (estradosso)	62,23 m

Spessori in chiave:

in sommità, a 505,00 m.s.l.m.	3,40 m
alla base, a 390,00 m.s.l.m.	23,64 m

Scavi per imposta diga 106.000 m³

Volumi getti per la diga

(pari a 1 m³ di getto per 198 di invaso utile) 239.000 m³

Ferro per armatura getti diga

(pari a 2,9 kg/getto calcestruzzo) 688.000 kg

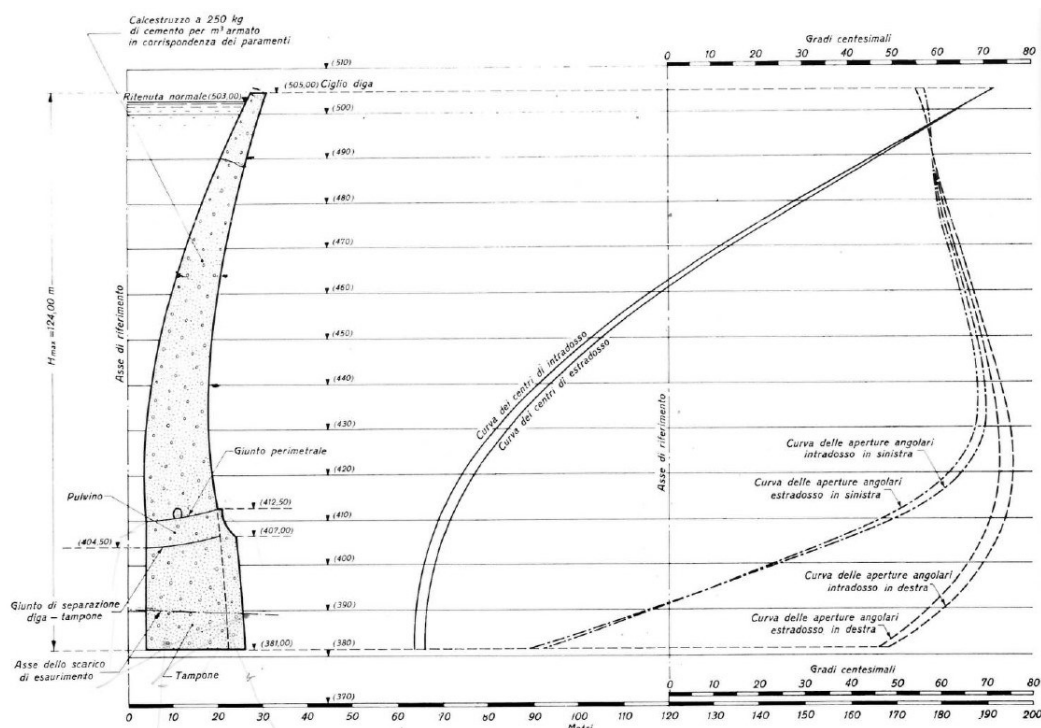
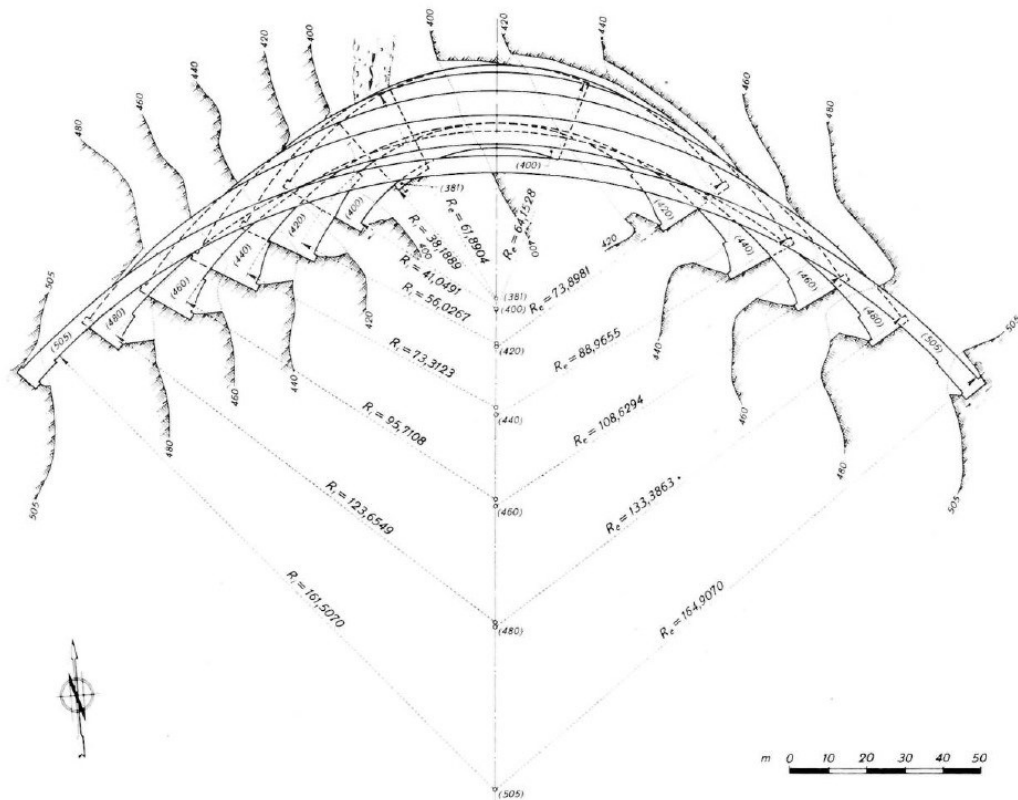


Figura 3.2.1 – Sezione maestra ed elementi geometrici per il tracciamento degli archi



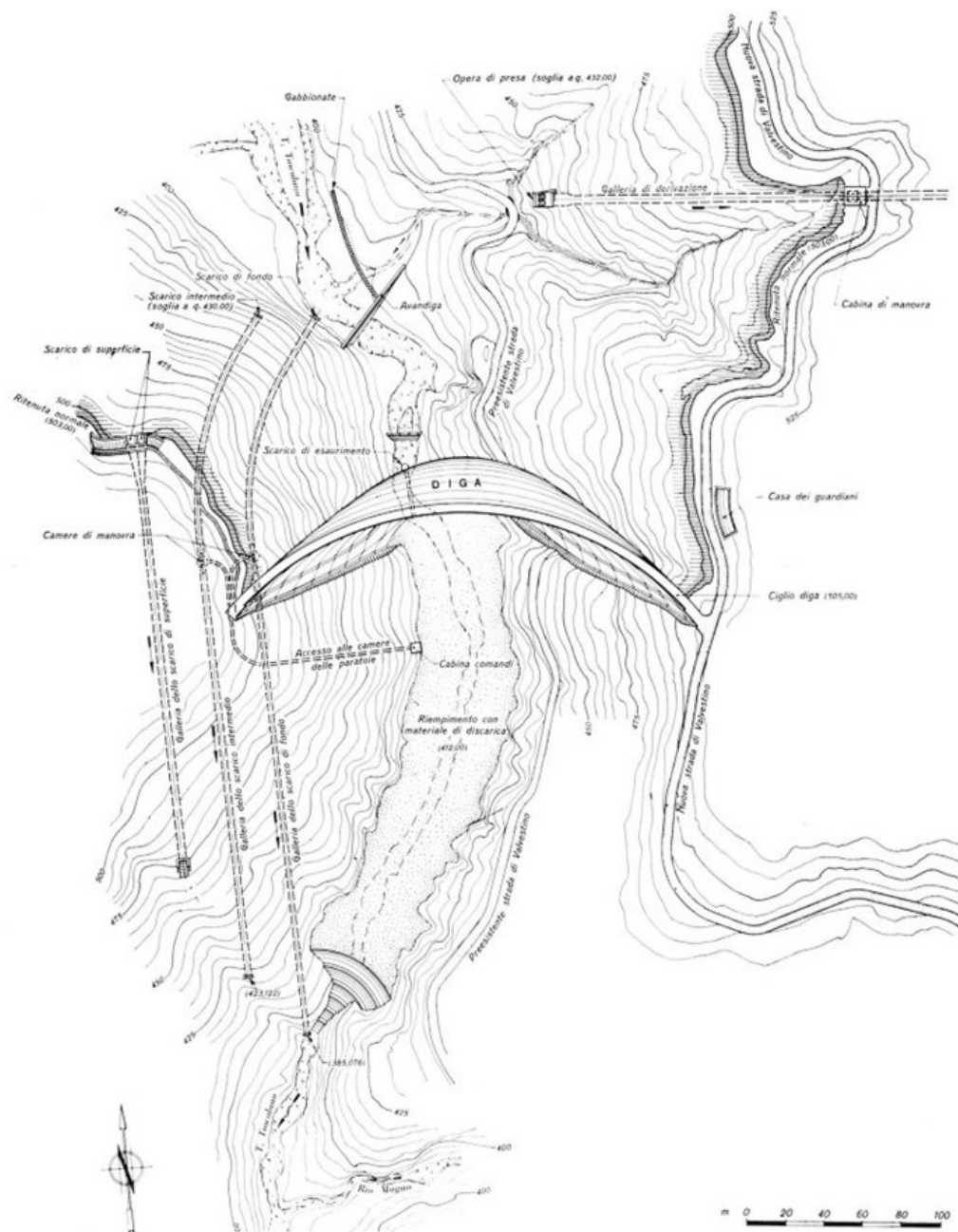


Figura 3.2.4 - Planimetria generale della vallata con curve di livello;
opere costituenti la centrale idroelettrica e loro posizionamento

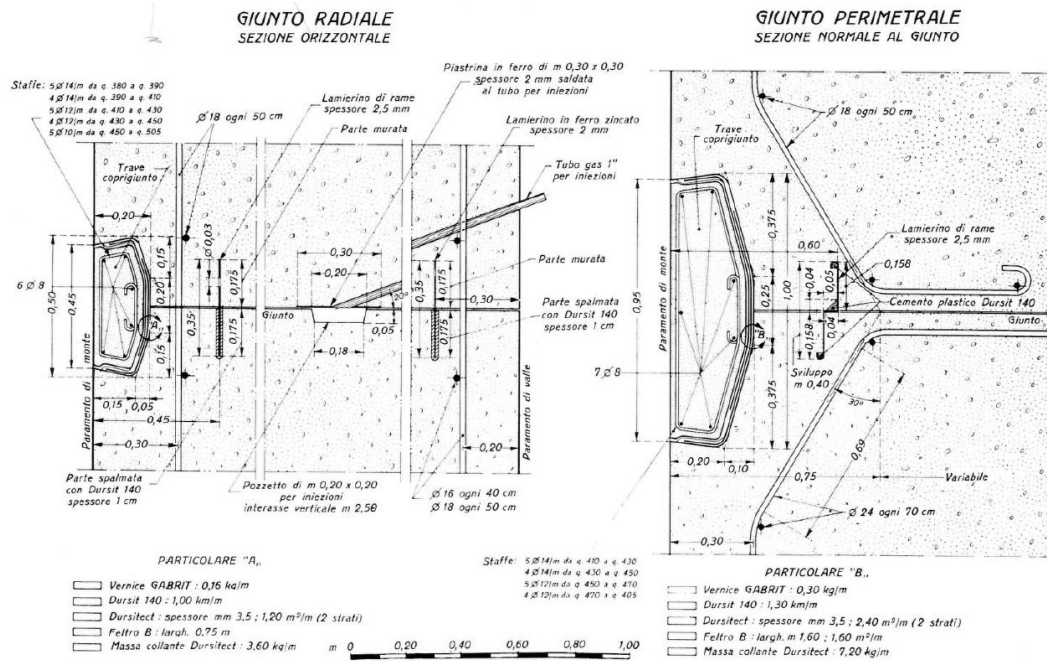


Figura 3.2.5 – Particolare costruttivo del giunto radiale e perimetrale

3.3. Sezione di sbarramento e serbatoio

Il solco vallico, del tipo a V, ha origine esclusivamente erosiva e costituisce una incisione naturale del complesso stratigrafico dolomitico che forma la valle, incisione dovuta all'azione delle acque. La zona di sbarramento presenta una soddisfacente simmetria nella inclinazione e nell'andamento dei fianchi, particolarmente favorevole per l'impostazione di una diga.



Figura 3.3.1 - Sezione d'imposta della diga nella vallata vista da monte;
inizio scavi d'imposta in sponda destra

La valle del Toscolano, tributaria del lago di Garda, è essenzialmente costituita da una larga e potente stratificazione di dolomia del trias superiore, carreggiata per alcuni chilometri. La zona del serbatoio, che ricopre il tronco medio della valle del Toscolano, presenta ottimi requisiti di tenuta conseguenti alle successive cementazioni delle formazioni interessate dal carreggiamento suddetto.

A causa del grandioso fenomeno di dislocazione tettonica di carattere orogenetico queste formazioni sono state spinte da ovest verso est in modo da scorrere e ricoprire le stratificazioni assai più recenti dei calcari giurassici e della scaglia rossa (cretaceo).

La zona di invaso è interessata da quella grande dislocazione tettonica. L'alveo fluviale è ricoperto da uno strato alluvionale che i sondaggi e gli scavi eseguiti hanno mostrato essere di modesta profondità, circa 4 m. Per eseguire delle indagini geognostiche approfondite, furono eseguiti una serie di cunicoli, sondaggi e rilevazioni in maniera estesa, anche nell'area riguardante il serbatoio.

3.4. Il calcestruzzo

La miscela di calcestruzzo usata per la realizzazione della diga era stata creata con degli inerti prelevati da una apposita cava coltivata a gradoni, situata sulla sponda destra del torrente Toscolano, circa distante 4 km a monte della diga, in una grande parete di calcare sano e compatto, dal peso specifico medio di 2850 kg/m^3 , con coefficiente medio di imbibizione pari a 0,34%. Il cemento era di tipo avente resistenza pari a 600 kg/cm^2 su malta normale dighe e presentava un contributo di pozzolana attiva romana compresa tra il 40% e il 50%, con calore di idratazione inferiore a 65 cal/g di cemento (dopo 20 giorni di stagionatura in calorimetro).

Le malte eseguite con esso presentavano un tempo medio di presa compreso tra 2h e 35 min e 5h e 30 min e resistenze media a 7 e a 28 giorni di stagionatura di $502,6 \text{ kg/cm}^2$ e 687 kg/cm^2 a compressione e di $30,8 \text{ kg/cm}^2$ e 39 kg/cm^2 a trazione, rispettivamente determinate attraverso 7800 prove di laboratorio. Le granulometrie erano state assortite secondo la curva cubica, con diametro massimo 75 mm, senza impiego di additivi, con rapporto acqua/cemento pari a 0,5, con dosaggio unico per il cemento di 250 kg/m^3 e durata degli impasti in betoniera di 2h e 30 min. La composizione del calcestruzzo fu progressivamente adattata alle caratteristiche di resa degli impasti, come indicato nella tabella che segue:

Componenti	Dimensioni	Dal 18/5/61 al 30/10/61	Dal 30/10/62 al termine
	[mm]	[kg/m^3]	[kg/m^3]
Cemento	0 ÷ 0,2	250	250
Sabbia	0 ÷ 4	700	682
Pietrischetto	4 ÷ 15	440	546
Pietrisco	15 ÷ 45	590	609
	45 ÷ 75	465	388
Totale parti solide	--	2445	2475
Acqua (A/C = 0,5)	--	125	125
Peso calcestruzzo	--	2570	2600

Tabella 3.4.1 - *Composizione del calcestruzzo*

Per i calcestruzzi adottati per la diga il peso specifico medio risultò essere di 2580 kg/m^3 . La permeabilità K valutata con Darcy è compresa fra 0 e 1 ed il modulo elastico E risulta 300.000 kg/cm^2 con le seguenti caratteristiche medie di resistenza a compressione:

a giorni	7	28	90	180	360
kg/cm ³	215	345	406	429	431

Le prove di controllo, eseguite periodicamente presso i laboratori ufficiali, hanno fornito regolarmente valori leggermente superiori rispetto i valori medi sopracitati. I getti furono eseguiti a conci sfalsati, entro casseforme metalliche, con un massimo giornaliero di 3 strati da 50 cm. Essi vennero accuratamente vibrati con vibratorii di diametro 140 mm, aventi frequenza di 12000 vibrazioni al minuto. Il disarmo delle casseforme avveniva dopo 48 ore il termine dei getti.



Figura 3.4.1 - *Getti a conci sfalsati del tampone e del pulvino*



Figura 3.4.2 - *Getti a conci sfalsati del corpo diga*

Le opere di scarico sono costituite da uno scarico di superficie, due scarichi profondi ubicati a diversa altezza e uno scarico di esaurimento posto sul punto più depresso a monte della diga. Gli scarichi posti ad altezza intermedia sono indipendenti uno dall'altro.



Figura 3.4.3 - Sezione d'impasto della diga vista da valle: a sinistra è possibile vedere lo scarico di superficie, lo scarico intermedio e lo scarico di fondo; a destra le installazioni di cantiere.

Lo scarico di superficie è situato nella sponda destra del serbatoio ed è un manufatto a sé rispetto al corpo diga. Questo è costituito da un imbocco in calcestruzzo armato e da uno scivolo opportunamente sagomato che si raccorda nella sua parte terminale a una galleria a sezione policentrica funzionante a pelo libero con raggio $R=3,90$ m e pendenza del fondo $i=5\%$.

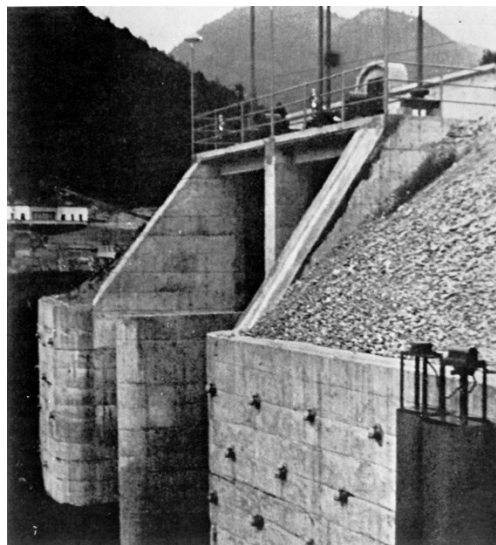


Figura 3.4.4 – Imbocco scarico di superficie

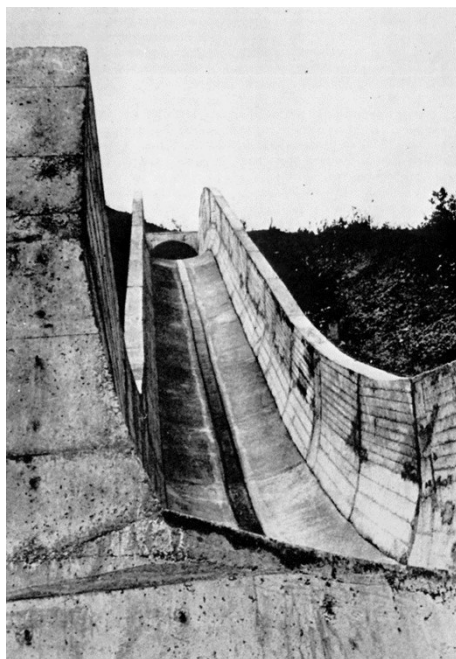


Figura 3.4.5 - Scivolo terminale a salto di sci dello scarico di superficie

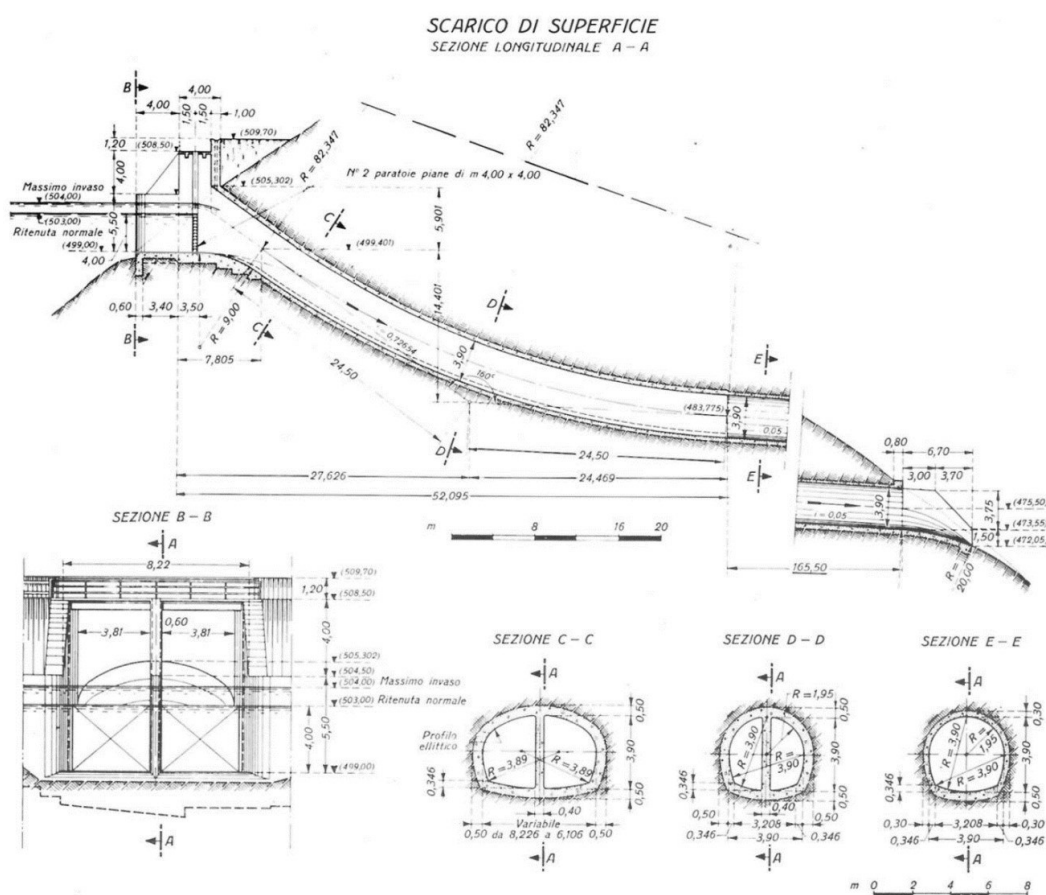


Figura 3.4.6 - Particolare costruttivo dello scarico di superficie

L'imbocco è suddiviso in due luci con soglia d'imbocco a 499,00 m.s.m., esse sono munite di paratoie di chiusura piane delle dimensioni 4,00 x 4,00 m. Le paratoie sono inoltre tracimabili per un'altezza massima di 1,00 m, sono anche manovrabili tramite comando idraulico simultaneo o tramite comando manuale di emergenza. All'uscita della galleria si trova uno scivolo, il quale termina a salto di sci; questa forma gli è stata data in modo tale da non permettere che il terreno venga eroso dall'acqua in uscita dalla galleria.

Lo scarico intermedio, situato anch'esso nella sponda destra del serbatoio, è costituito da una galleria suddivisa in due tronchi da due paratoie. Il primo tronco di galleria a monte delle paratoie è realizzato con una sezione circolare di diametro 2,50 m, possiede una pianta arcuata, si sviluppa per una lunghezza di 130,65 m e la pendenza del fondo è pari al 2%. La soglia d'imbocco del primo tronco è posta a quota 430 m s.m.. Il secondo tronco di galleria, situato a valle delle paratoie divisorie, possiede una sezione circolare di diametro 2,60 m, si sviluppa per una lunghezza di 218,25 m e la pendenza del fondo è del 2%.

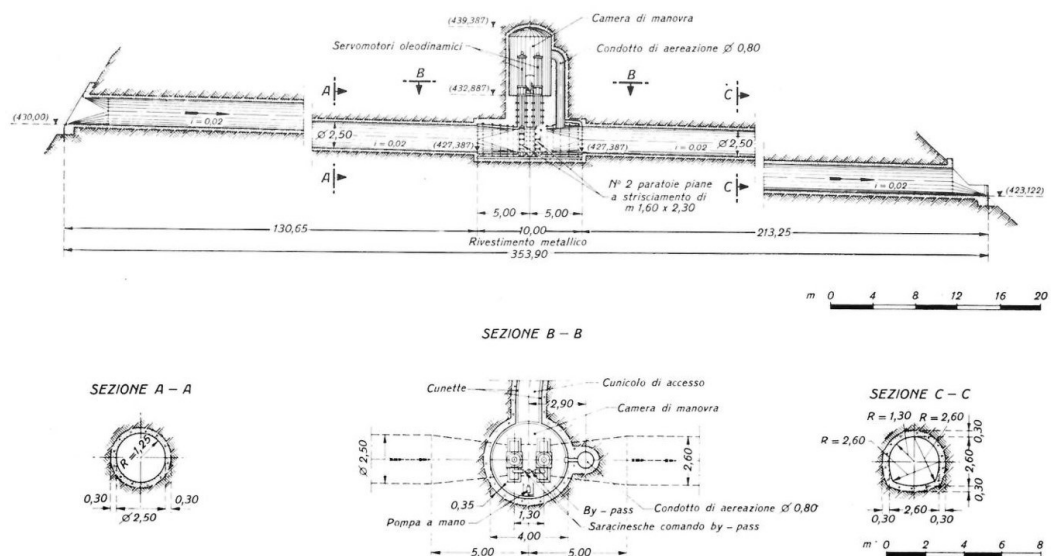


Figura 3.4.7 – Particolare costruttivo dello scarico intermedio

Le paratoie divisorie sono posizionate ad una progressiva di 135,65 m dall'imbocco dello scarico, esse sono del tipo piano a strisciamento e posseggono dimensioni 1,60x2,30 m; queste sono manovrabili anche con carico massimo d'invaso del serbatoio tramite un comando oleodinamico indipendente e da un comando manuale di emergenza.

Lo scarico di fondo è situato anch'esso nella sponda destra del serbatoio ed è costituito da una galleria suddivisa in due tronchi da due paratoie.

Il primo tronco di galleria a monte delle paratoie è realizzato con una sezione circolare di diametro 2,00 m, possiede una pianta arcuata, si sviluppa per una lunghezza di 132,77 m e la pendenza del fondo è pari al 2%. La soglia d'imbocco del primo tronco è posta a quota 392 m s.m.

Il secondo tronco di galleria, situato a valle delle paratoie divisorie, possiede una sezione policentrica a pianta rettilinea del diametro interno di 2,60 m, si sviluppa per una lunghezza di 252,46 m e la pendenza del fondo è del 2%.

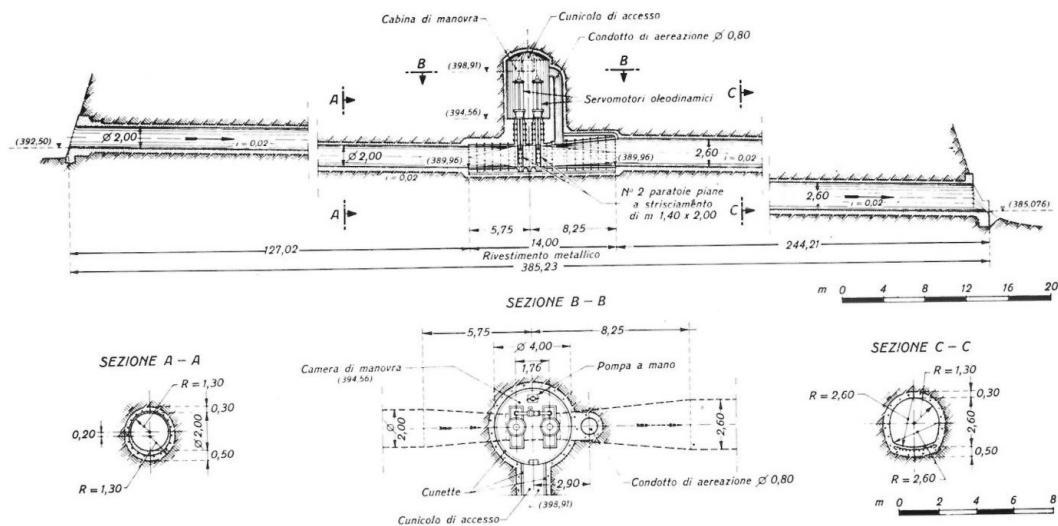


Figura 3.4.8 – Particolare costruttivo dello scarico di fondo

Le paratoie divisorie sono posizionate ad una progressiva di 132,77 m dall'imbocco dello scarico, esse sono del tipo piano a strisciamento e posseggono dimensioni 1,40x2,00 m; queste sono manovrabili anche con carico massimo d'invaso del serbatoio tramite un comando oleodinamico indipendente e da un comando manuale di emergenza. Lo scarico di esaurimento è costituito da due elementi di tubazione metallica del diametro di 0,80 m, il loro asse è posizionato a quota altimetrica 390,30 m s.m. Un tronco è chiuso da una paratoia di tipo a strisciamento piana posizionata a monte di esso; essa è manovrabile da una passerella presente sul paramento di monte della diga. Questo tronco immette al fondo di un pozzetto di manovra e di aerazione, ed è chiuso con un fondello. Il secondo tronco anch'esso chiuso da una paratoia di tipo a strisciamento piana posizionata a monte di esso, manovrabile da un cunicolo presente sul corpo diga a quota 402,50m s.m., scarica nel torrente Toscolano.

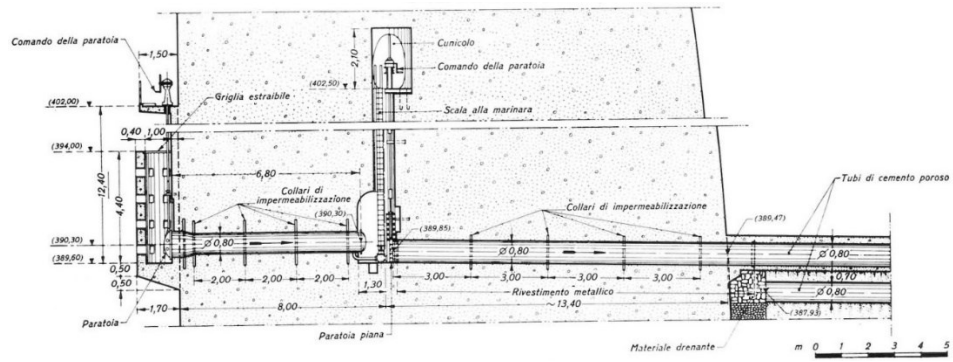


Figura 3.4.9 – Particolare costruttivo dello scarico di esaurimento

3.5. Portata delle opere di scarico

La massima portata di piena eccezionale affluente a serbatoio è stata prevista in 300 m³/s pari 3,14m²/s km². Lo smaltimento di detta portata è realizzabile con un sopralzo eccezionale del livello di invaso di 1 m (504,00 m s.m.), attraverso i soli scarichi di superficie e intermedio, senza tener conto dell'effetto di laminazione del serbatoio, corrispondente a una portata di 50 m³/s, e del funzionamento dello scarico di fondo.

Portata	
scarico di superficie	192 m ³ /s
scarico intermedio	113 m ³ /s
scarico di fondo	106 m ³ /s
totale	411 m ³ /s
Per km ² di bacino direttamente sotteso	4,22 m ³ /s

3.6. L'opera di presa e di derivazione

L'opera di presa è situata nella sponda sinistra del serbatoio ed è un manufatto a sé rispetto al corpo diga. Questa è costituita da un imbocco in calcestruzzo armato e da un raccordo a sezione variabile, che si collega con la sezione circolare di diametro 4,20 m della galleria di derivazione. L'imbocco è posizionato con soglia a 432,00 m.s.m., esso è munito di griglia metallica piana di dimensione 6,20 m x 10,00 m.

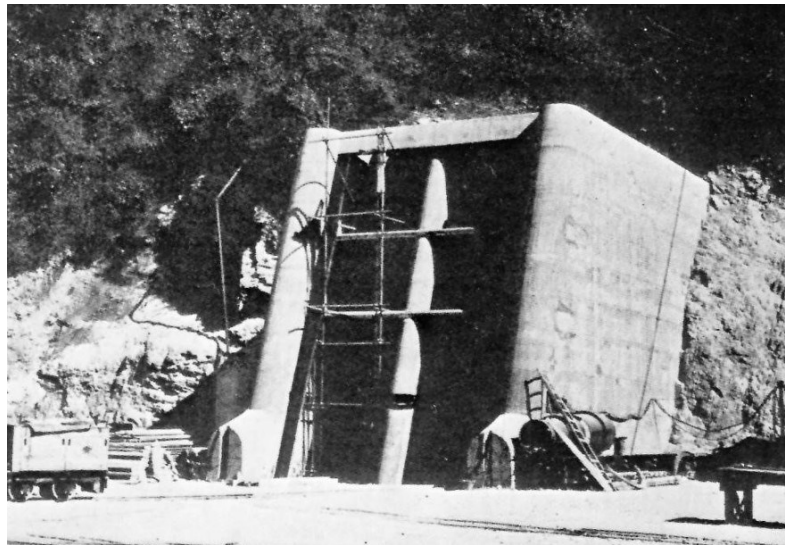


Figura 3.6.1 - Imbocco opera di presa, situata in sponda sinistra

Il raccordo si sviluppa per una lunghezza di 23,87 m. Alla progressiva di 166,72 m dall'imbocco è installata la paratoia di presa, dalla luce netta di 3,00 x 4,20 m, con soglia a quota 431,86 m.s.m.. La paratoia è del tipo a rulli e viene azionata da uno spintore idraulico con comando diretto sul posto, installato nella cabina di manovra con piano a 514,10 m.s.m., nella quale è installata una elettropompa per l'azionamento dello spintore idraulico, e una pompa sussidiaria manovrabile a mano per il servizio di emergenza. La paratoia è munita a monte e a valle di raccordi metallici con sezione di 4,20 m della galleria di derivazione. Il raccordo di valle è munito di una tubazione metallica verticale di aerazione di diametro 0,80 m con sbocco diretto all'esterno, per evitare fenomeni di pulsazione nella vena d'acqua.

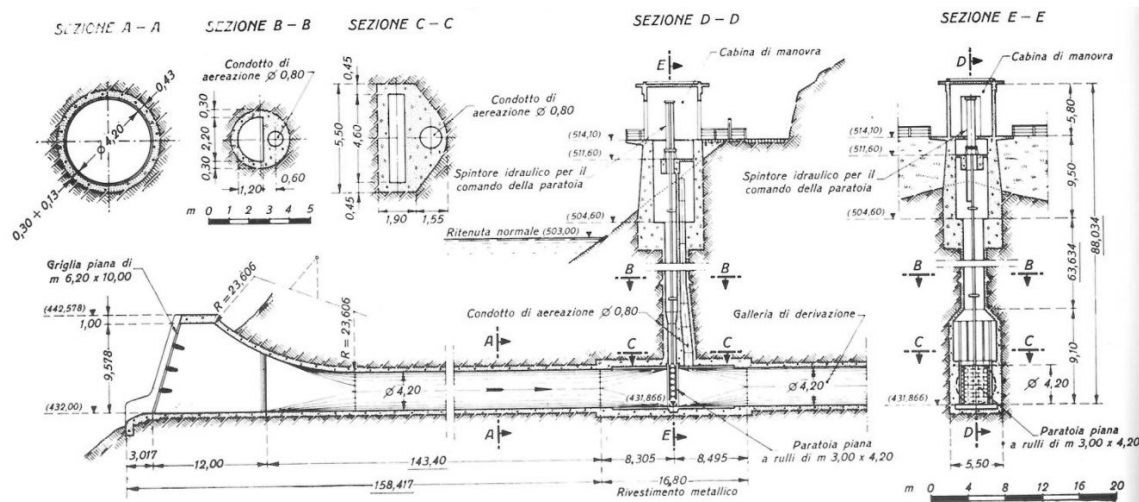


Figura 3.6.2 – Particolare costruttivo dell'opera di presa

Durante il periodo di costruzione della diga, il torrente Toscolano fu sbarrato con una avandiga avente coronamento a quota 397,50 m.s.m., le acque del torrente furono deviate nella galleria dello scarico di fondo. In quelle condizioni la galleria era in grado di smaltire una portata di 20 m³/s, portata più che sufficiente per lo smaltimento delle acque nelle normali condizioni stagionali.

3.7. Lavori di impermeabilizzazione

Concluso il processo di realizzazione della diga iniziò una fase di impermeabilizzazione della stessa. Vennero eseguiti numerosi test di laboratorio sulle miscele da usare nella cementificazione delle opere, per aumentare al massimo la scorrevolezza e la capacità di penetrazione nella roccia di imposta della diga. Questa fase comprendeva essenzialmente la realizzazione dello schema di tenuta e di saldatura.

Lo schermo di tenuta fu realizzato in diverse fasi, dagli opportuni cunicoli di lavoro, con una doppia fila di fori verticali posti inizialmente a interasse 20 m e poi raffittiti a interasse 10 m; nella zona di imposta della diga l'interasse è di 5 m. Tutte le perforazioni furono eseguite a rotazione, con diametro 51 mm per profondità sino a 62 m e con diametro 30 mm per profondità maggiori.

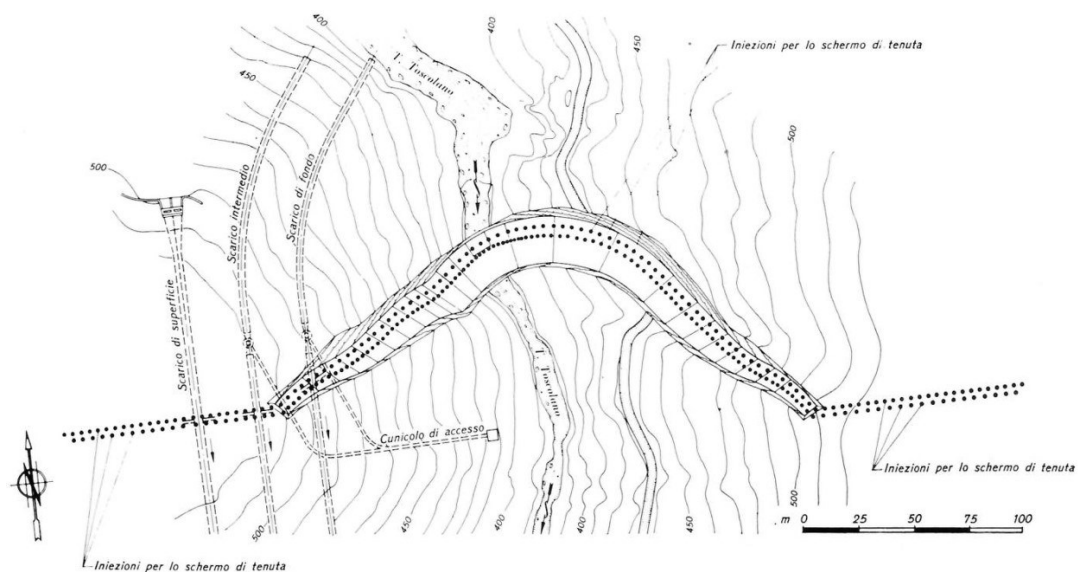
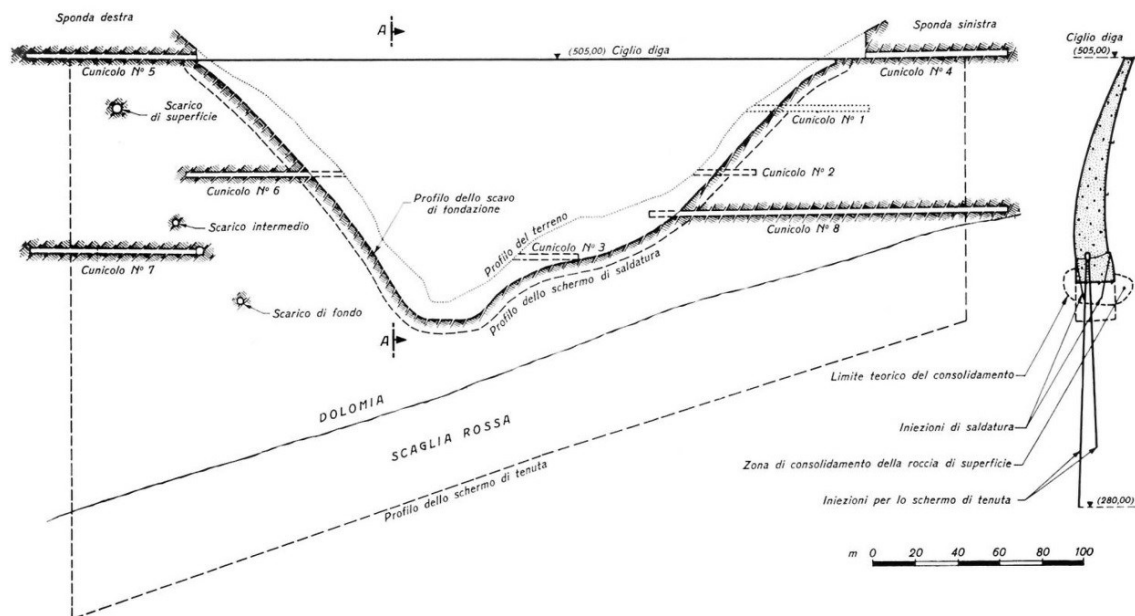


Figura 3.7.1 – Iniezioni per lo schermo di tenuta

La pressione di iniezione veniva adeguata al triplo del carico idrostatico, impiegando come miscela cemento centrifugato super ventilato e acqua, con rapporto acqua/cemento pari a 2/1 e con aggiunta di bentonite nella misura dell'1% in peso del cemento; lo schema fu eseguito per singole tratte discendenti di 20 m, iniettate per sezioni ascendenti di 5 m, previa nuova perforazione delle tratte precedenti dopo 24 ore dall'ultimazione dell'iniezione. Le iniezioni di saldatura furono eseguite mediante due file di fori una all'unghia di monte e una all'unghia di valle con iniezioni in un'unica tratta.



Lavori di impermeabilizzazione	Perforazioni m	Riperforazioni m	Miscela iniettata q. li	Assorbimento medio q. li/m
– Schermo di tenuta	7.900	—	3.361	0,426
	—	1.525	422	0,276
– Consolidamento di una zona a monte della spalla destra tra q. 485 a q. 435	218	—	210	0,963
– Cunicolo n° 8	10	—	215	21,500
– Schermo di saldatura:				
a) cucitura di monte	1.000	—	179	0,179
b) cucitura di valle	502	—	290	0,435
Totali	9.630	1.525	4.677	0,413

Figura 3.7.2 – Profilo ed iniezioni dello schermo di saldature

La profondità era variabile da 8 m a 12 m, con inclinazione convergente verso l'interno della diga e con interasse di 3 m; la pressione variava da 6 atm a 10 atm. Sul piano medio del velo di impermeabilizzazione della diga sono stati successivamente eseguiti 1525 perforazioni per il controllo della tenuta.

3.8. Verifica statica della struttura

La verifica della struttura si è eseguita in base alla teoria dell'elasticità e tenendo conto degli effetti di taglio e della deformabilità della roccia di imposta (Metodo Vogt), per archi elastici indipendenti di altezza unitaria, incastrati elasticamente nella roccia di imposta e soggetti a pressione idrostatica, alle variazioni termiche ($\pm 7^\circ$ a serbatoio pieno e $\pm 10^\circ$ a serbatoio vuoto) e al ritiro del calcestruzzo ($- 3^\circ$), trascurando il peso proprio, le sollecitazioni e il contributo degli elementi verticali (mensole) nel calcolo degli elementi orizzontali (archi).

Gli archi del corpo diga posizionati sotto la quota di 420 m s.l.m. e il tampone di base sono stati verificati come archi rigidi. Le sollecitazioni massime ottenute tramite il calcolo non superano i valori di 62 kg/cm^2 per la compressione e di $2,17 \text{ kg/cm}^2$ per la trazione con serbatoio vuoto. Il comportamento statico della diga è stato studiato anche valutando separatamente gli effetti del peso proprio e del carico idraulico ed effettuando tre cicli di prove, tramite un modello statico tridimensionale della diga in scala 1:120. Le prove eseguite sono precisamente: cicli di prove a carico idraulico normale massimo (tenendo conto anche del peso proprio della struttura), cicli di prove a carico maggiorato (pari a 2 volte il carico normale a pieno invaso) e prove a oltranza (fino a portare il modello a rottura). I risultati delle prove sul modello furono ampiamente soddisfacenti e indicarono sollecitazioni ben inferiori rispetto quelle previste dal calcolo.

In merito al coefficiente di sicurezza, qualora si confrontino i valori massimi locali delle sollecitazioni in regime elastico con i carichi di rottura ottenuti sui provini con il carico di rottura a compressione del calcestruzzo posto pari a 400 kg/cm^2 si otterrebbe un valore di sicurezza di 7,2.

Sottoponendo invece il modello a prove a oltranza, si è avuto il crollo della struttura per cedimento di un tratto a valle del terreno di fondazione, sotto un carico 3,5 volte superiore rispetto al normale carico idrostatico. La prova ha portato ad un ulteriore approfondimento e ampliamento degli scavi di imposta, per ridurre la dissimmetria del tampone di fondazione e per limitare a 37 kg/cm^2 la sollecitazione massima sulla roccia in posto.

4. Monitoraggio della diga

Come tutte le dighe, anche quella di Ponte Cola è stata concepita avendo in dotazione un sistema di monitoraggio in grado di analizzare dati relativi allo stato della struttura e misure dell'ambiente circostante (temperature, deformazioni, flussi d'acqua, pressioni dell'acqua, livello del fiume, spostamenti dei versanti limitrofi, ecc.) al fine di verificare lo stato di salute dell'opera.

Molti di questi strumenti di monitoraggio sono stati realizzati durante la costruzione della diga stessa o subito dopo. Le sonde termometriche in superficie della diga e annegate nel calcestruzzo, ad esempio, mandano in automatico le letture con continuità temporale direttamente ad una centralina posta in un locale della casa del guardiano della diga. Altri tipi di misure, come quelle estensimetriche, venivano e vengono tuttora eseguite manualmente dal personale predisposto alla sorveglianza dell'opera. Le operazioni manuali di monitoraggio risultano pertanto molto onerose in termini di ore uomo e forniscono misure discrete nel tempo e nello spazio.

In generale, gli strumenti di monitoraggio tradizionali presenti nella diga in esame sono di seguito riportati.

- Temperature. Per la misura delle temperature in aria, in acqua e nel calcestruzzo sono installati rispettivamente 10 termometri sul paramento di valle, 4 su quello di monte e 18 annegati nel calcestruzzo, a diverse quote.
- Deformazioni elastiche. Vengono misurate a mezzo di 65 estensimetri removibili, 29 teledilatometri e 124 termoestensimetri di cui 61 a valle e 63 a monte. Tutte queste misure sono eseguite manualmente con cadenza disposta dall'ente.
- Spostamenti globali e rotazioni. Gli spostamenti vengono rilevati anch'essi manualmente da 5 stazioni per collimatore mediante collimazione di 3 mire mobili poste sul coronamento della diga. Le rotazioni sono invece controllate a mezzo clinometri (10 basi clinometriche sul paramento di valle) e 22 basi clinometriche nei cunicoli di accesso; queste ultime sono state installate nel 1966.

Per ovviare ai limiti di un monitoraggio che richiede molto tempo per essere completato e che quindi è fortemente limitato in termini di frequenza temporale, nel 2020 ENEL ha deciso di implementare il sistema di controllo della diga installando una serie di nuovi sensori, in grado di misurare in autonomia con cadenza prefissata le quantità desiderate. In particolare sono stati installati cinque estensimetri a base lunga a partire da una nicchia ricavata nel corpo diga, poco sopra il pulvino. I cinque strumenti, di misura via via crescente, attraversano diverse porzioni della fondazione della diga e i diversi strati di terreno sottostante, allo scopo di valutare gli spostamenti di ciascuno di questi componenti.

Contestualmente, in collaborazione con il dipartimento ICEA dell'Università di Padova, sono stati anche installati alcuni sensori in fibra ottica che potessero aumentare le informazioni acquisibili, migliorando sia la precisione che la velocità di acquisizione dei dati stessi.

Sono state realizzate due installazioni di questi sensori, una in nicchia, dove le fibre sono state disposte parallelamente agli estensimetri, fino ad una profondità massima di circa 90 m; una in coronamento, con una fibra che percorre l'intero corpo diga a quota 503 m slm. Sia in nicchia che presso il coronamento sono state posizionate due tipologie di fibre: una per la misura della deformazione e una per la misura della temperatura.

La necessità di installazione di due tipologie di fibra è dettata dalle caratteristiche tecniche specifiche delle fibre stesse. Il cavo di sensing di temperatura è progettato per essere poco sensibile alle sollecitazioni meccaniche, mentre quello di strain è realizzato per deformarsi coerentemente con le strutture cui è vincolato. La misura della temperatura nelle applicazioni con sensori in fibra ottica è molto importante per studiare il comportamento dell'opera, ma serve anche a valutare gli effetti termo-ottici sul cavo di deformazione, depurando la misura rilevata dalla fibra di strain dalla componente puramente termica di deformazione.

Sempre nel 2020, Enel ha installato un sistema automatico di misura degli spostamenti del paramento di valle della diga mediante una stazione totale automatica. Le misure topografiche si concentrano su 19 mire topografiche disposte sul lato valle come segue: 7 mire sul coronamento, a quota 505 m slm, 4 mire a quota 490 m slm, 4 mire a quota 465 m slm, 3 mire a quota 440 m slm, e un'ultima mira a 410 m slm.

Proprio alcune di queste ultime misure, unitamente alle misure di temperatura, verranno utilizzate nel presente lavoro nella fase di calibrazione del modello numerico. In particolare, si considerano le misure fornite dai 6 sensori che rilevano automaticamente la temperatura (aria, acqua e cls) alle quote di 440 m slm e 490 m slm, e le misure degli spostamenti delle 7 mire topografiche poste sul coronamento di valle.

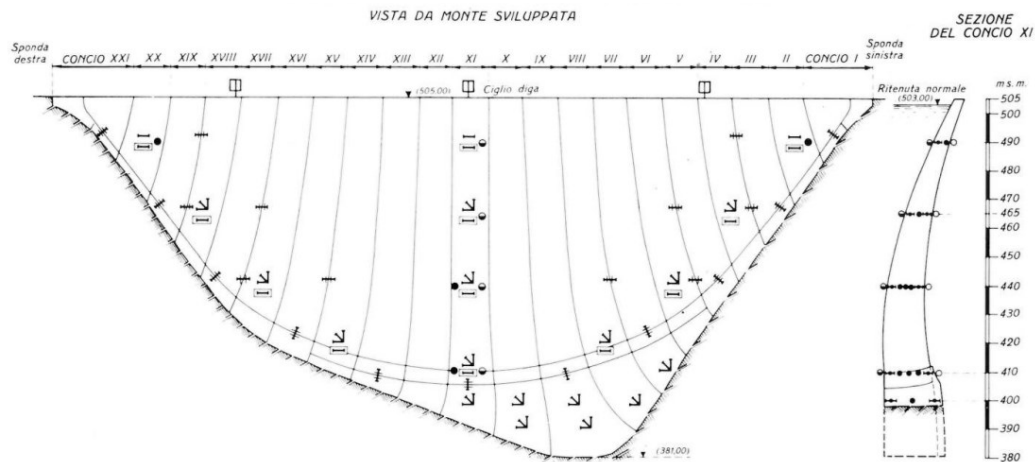


Figura 4.1 - Ubicazione degli strumenti di misura e di controllo - monte

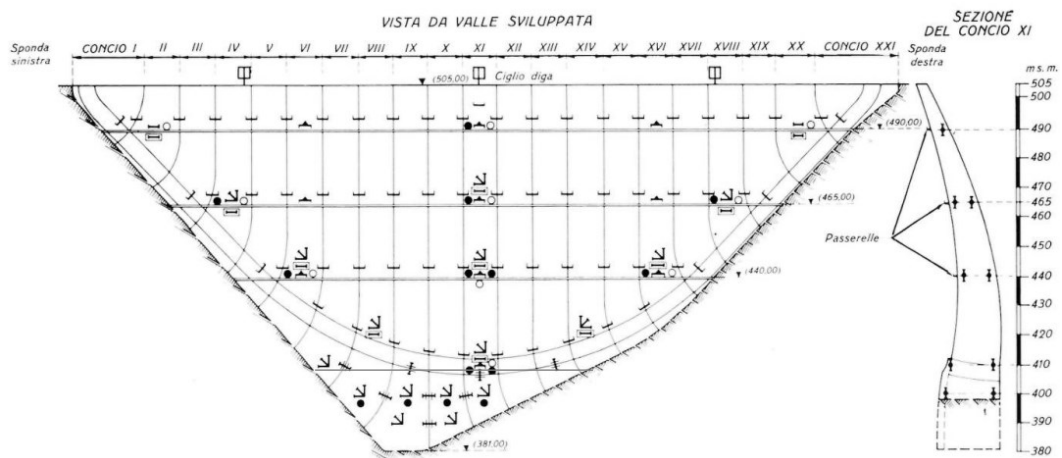


Figura 4.2 - Ubicazione degli strumenti di misura e di controllo – valle

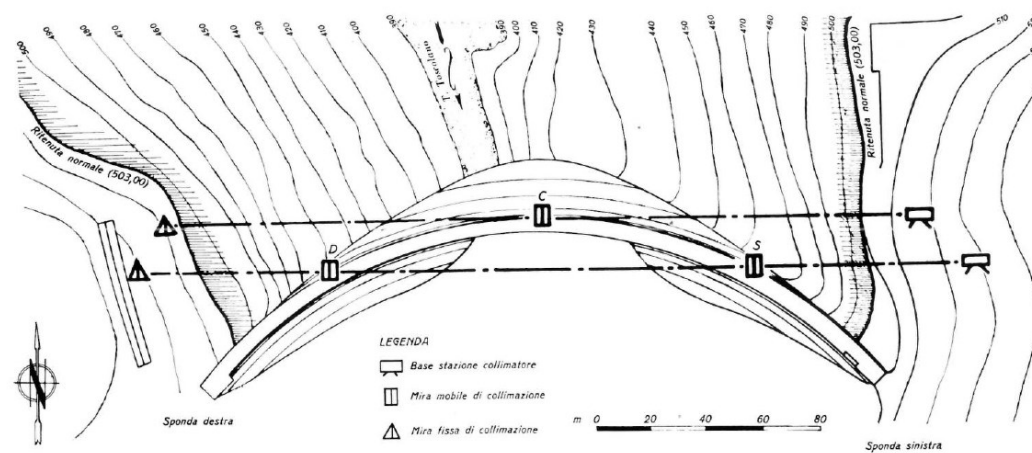
L'analisi dei dati storici, registrati negli anni successivi alla costruzione della diga mediante misure manuali hanno mostrato, come si vede nella tabella riportata in Figura 4.3, che la diga matura spostamenti ciclici di avanzamento, verso monte, nei periodi estivi e di arretramento, verso valle, nei periodi invernali.

Tuttavia tali spostamenti hanno entità maggiore di quelli previsti in fase progettuale, arrivando a circa 40 mm in corrispondenza del punto C, posto

sul coronamento del lato monte; di conseguenza l'Ufficio Dighe impone un vincolo restrittivo sulla quota di invaso, limitando i volumi turbinabili e la possibilità di produrre energia secondo i piani originali.

Da qui l'esigenza di comprendere le cause di tali spostamenti, approfondendo tra l'altro la qualità e l'affidabilità del dato di monitoraggio stesso.

SCHEMA DELLA COLLIMAZIONE



INVASI - TEMPERATURE MEDIE DELL'ARIA - SPOSTAMENTI RILEVATI CON IL COLLIMATORE

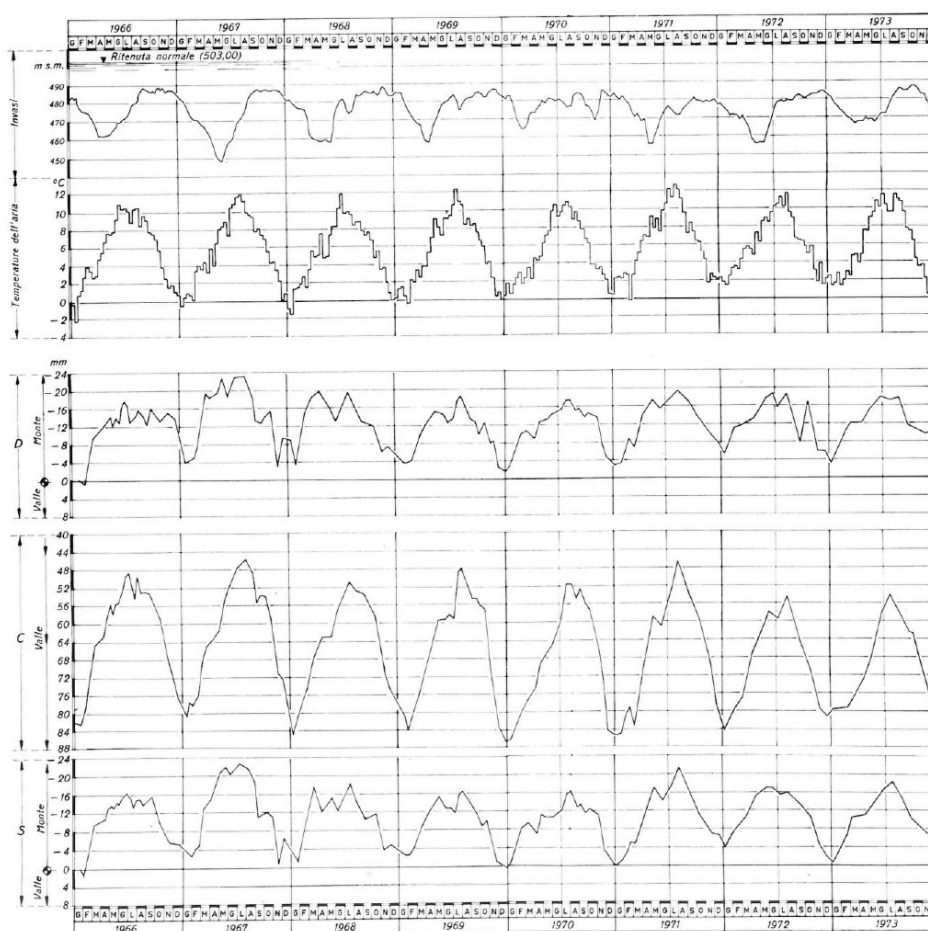


Figura 4.3 – Schema della collimazione

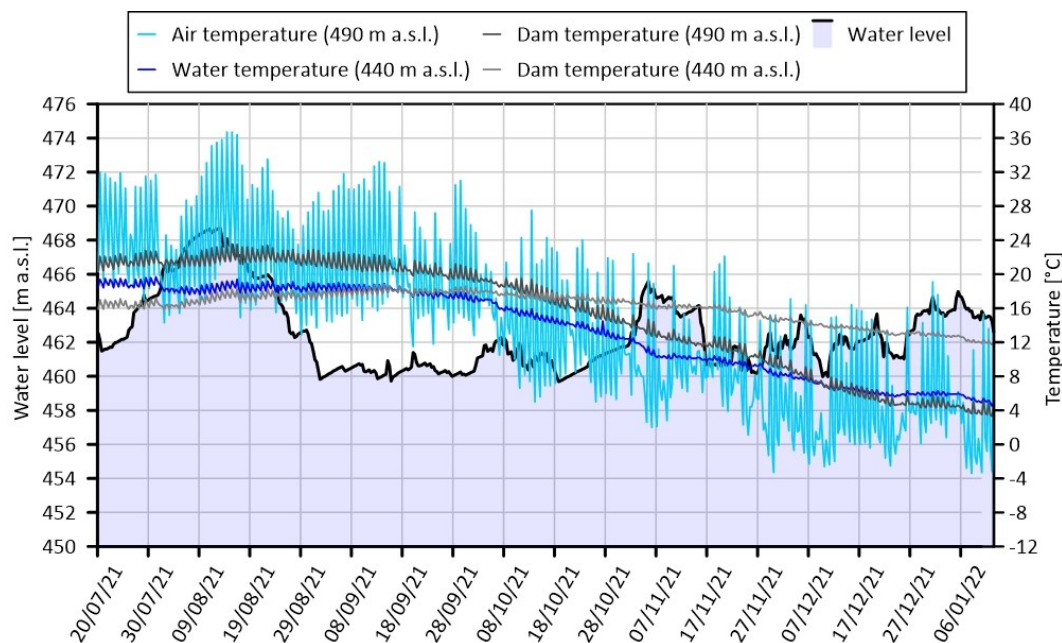


Figura 4.4 – Andamento delle temperature nel periodo luglio 21 – gennaio 22

Le misure di temperatura disponibili arrivano a svariati anni fa. Tuttavia, per il presente studio si è scelto di considerare gli andamenti della temperatura ambientale, della temperatura dell'acqua e delle temperature dei sensori interni alle quote di 440 m slm e 490 m slm nel periodo estate inverno 2022.

Il periodo visualizzato permette di valutare le escursioni termiche estive ambientali e invernali come queste si trasferiscano al corpo diga di calcestruzzo. Osservando poi la curva riportata in nero, che corrisponde al livello di invaso del serbatoio a monte della diga, si nota come attualmente il livello d'invaso oscilli tra le quote di 460 m slm e 470 m slm, valore decisamente più contenuto rispetto a quello che invece compare nella Figura 4.3, che oscillava tra 460 e 490 m slm.

Dalla figura si vede come la temperatura dell'aria (in azzurro) misurata da una sonda in parete di valle a 490 m s.l.m., abbia una elevata variabilità sia nel ciclo notte-giorno ($\Delta T=20^{\circ}\text{C}$) che nel ciclo stagionale ($\Delta T=25^{\circ}\text{C}$).

L'andamento della temperatura dell'acqua (in blu), misurata a monte della diga, a quota 440 m slm, posizione che si trova sempre al di sotto del livello dell'acqua, mostra un andamento coerente con la misura dell'aria; tuttavia, avendo il bacino idrico una notevole inerzia termica, la sua temperatura oscilla molto poco sia nel breve periodo (variazione giorno-notte $\Delta T < 2^{\circ}\text{C}$),

che nel lungo periodo ($\Delta T=15^{\circ}\text{C}$) e risponde alla variazione della temperatura ambiente con un leggero ritardo.

Interessante è valutare l'andamento delle temperature del corpo diga rilevate a 440 m slm (in grigio chiaro) e a 490 m slm (in grigio scuro). La quota più bassa, dove lo spessore della diga supera i 13 m, è caratterizzata da temperature pressoché costanti nel breve periodo, e mostra temperature anch'esse poco variabili ($\Delta T=7^{\circ}\text{C}$) nel ciclo estate-inverno. La temperatura della diga a 490 m s.l.m. invece è più variabile; il minor spessore della diga (circa 6 m) permette infatti al calcestruzzo di risentire maggiormente delle condizioni ambientali. La risposta termica è simile per ampiezza e forma a quella dell'acqua.

Per quanto riguarda gli spostamenti, come si è detto, si prendono in considerazione le 7 mire topografiche disposte sul coronamento lato valle. Di seguito si riportano gli andamenti degli spostamenti dei sensori, definiti come M1-M7, dei mesi di maggio e settembre 2021.

Il livello d'invaso medio in questo periodo è di 465 m slm.

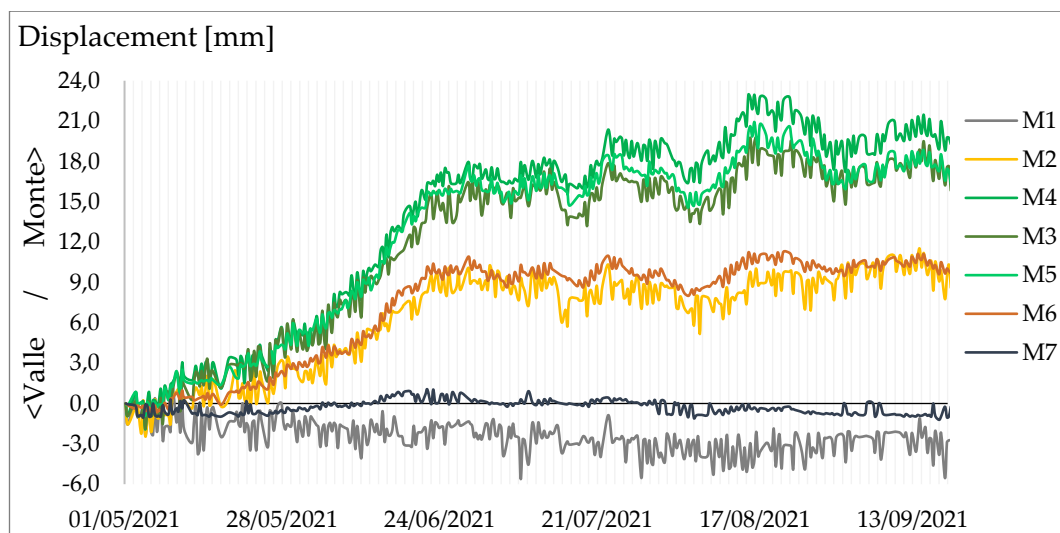


Figura 4.5 - Andamento degli spostamenti in direzione monte

Nella direzione monte si osserva un aumento costante con pendenza accentuata degli spostamenti nel mese di maggio, pendenza che si riduce nel restante periodo. Possiamo dedurre facilmente che i sensori M1 e M7, i

più vicini lateralmente al terreno, sono quelli che compiono gli spostamenti minori, mentre a spostarsi di più sono i sensori centrali M3, M4 e M5.

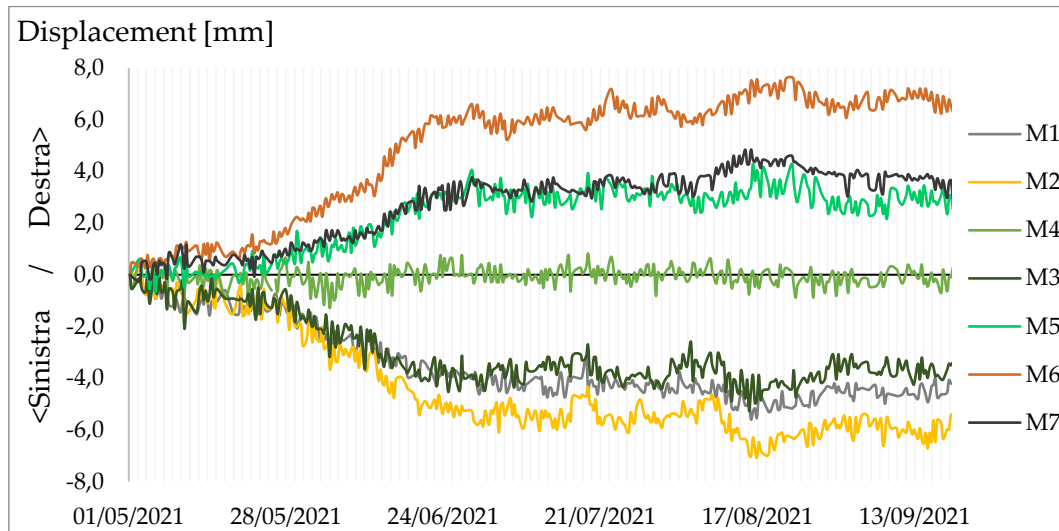


Figura 4.6 - Andamento degli spostamenti in direzione destra

Nella direzione destra si osserva invece che rimane pressoché fermo il sensore centrale M4; i sensori M1 e M7 compiono uno spostamento massimo di 3 mm, con maggiore concentrazione nel periodo che va da inizio maggio a metà giugno per poi giungere a una fase di semi arresto. A spostarsi di più sono, dall'inizio, i sensori M2 e M6, il movimento di espansione, verso monte, come indicato nel grafico precedente, è localizzato maggiormente in questi due sensori, che sviluppano una traslazione nelle due direzioni opposte che arriva a circa 5 mm in soli 50 giorni, per poi compiere i restanti 2 mm per raggiungere il picco di circa 8 mm nei mesi successivi. Il comportamento della diga è, come ci si aspettava, simmetrico in termini di spostamenti sia in direzione monte-valle che trasversalmente.

5. Modellazione FEM

Si è voluta affrontare la realizzazione di un modello FEM (Finite Element Method). Il software utilizzato per la modellazione della struttura è MIDAS, in particolare l'estensione Midas GTS NX.

L'obiettivo della modellazione risiede in una calibrazione del modello stesso: inserendo come input le funzioni di temperatura ambientale e del livello di invaso si vuole giungere ad avere dal modello le stesse risposte che forniscono i sensori impiantati nel calcestruzzo e le mire topografiche presenti sul lato valle del coronamento della.

La strategia adottata prevede di dividere la calibrazione termica da quella meccanica, determinando in principio i parametri termici che permettono al modello di mostrare una risposta termica coerente con le misure fornite dai sensori di temperatura posizionati sulla diga. In seguito, vengono calibrati i parametri termomeccanici che trasformano l'input termico in deformazione, allo scopo di ricreare gli spostamenti misurati mediante le misure topografiche.

La costruzione del modello ha previsto la successione di una serie di operazioni successive. Si è infatti proceduto seguendo l'ordine illustrato di seguito brevemente e poi esplicitato nel dettaglio nei paragrafi successivi:

- Creazione della geometria del terreno;
- Creazione della geometria della diga a partire dalle sezioni 2D disponibili;
- Allineamento delle due geometrie;
- Definizione dei materiali;
- Costruire della mesh della diga;
- Costruire della mesh del terreno;
- Assegnazione delle condizioni al contorno e dei carichi;
- Definizione del tipo di analisi e degli step di calcolo.

A simulazione ultimata, allo scopo di interpretare i risultati del modello e calibrare i parametri sarà necessario:

- nel caso della calibrazione termica, estrarre le temperature dei nodi corrispondenti alle posizioni dei sensori interni alle quote di 440 m

slm e 490 m slm, e contestualmente, alle stesse quote, dei termometri a valle e a monte;

- nel caso della calibrazione meccanica, invece, estrarre gli spostamenti nelle due direzioni monte-valle e destra-sinistra dei nodi posti sul lato valle del coronamento corrispondenti alle 7 mire topografiche.

5.1. Creazione della geometria del terreno

Il modello utilizzato per lo studio è realizzato a partire dal programma QGIS.

Step 1. Allo scopo di ottenere le informazioni tridimensionali relative alla forma del terreno, si è scelto di utilizzare un Digital Terrain Model (DTM) scaricato dal geoportale della Regione Lombardia. Tale prodotto consiste in un elemento di tipo matriciale, nel quale ciascuna cella corrisponde ad una determinata posizione spaziale in coordinate X-Y. La terza coordinata, la quota, è inserita come contenuto all'interno della cella.

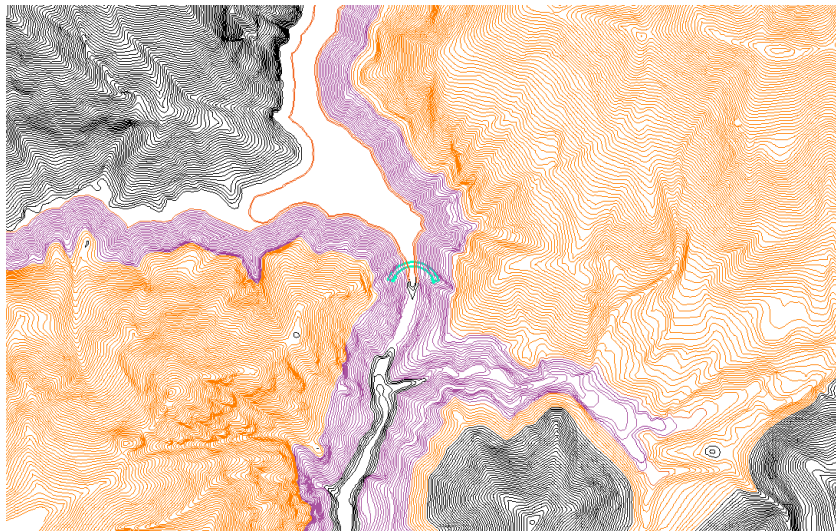


Figura 5.1.1 – Vista dall'alto del file dxf contenente le curve di livello

In questo modo, attraverso l'analisi di un DTM, è possibile estrarre informazioni 3D di tutti i punti presenti nell'area considerata. Ovviamente, maggiore sarà il numero di celle nell'area in esame, maggiore sarà il livello di dettaglio, ma maggiore sarà anche la dimensione del file da dover elaborare. Al contrario, se si lavora con matrici aventi un numero limitato di righe e colonne, la ridotta dimensione del file ne renderà la manipolazione semplice e rapida, a discapito però di un più contenuto livello di dettaglio.

Nel caso in esame, si è scelto di utilizzare un DTM 5x5, in cui le celle hanno forma quadrata ed ogni elemento della matrice corrisponde ad un valore medio di un'area di area 5x5 m². Sebbene questa scelta non garantisca un elevato livello di dettaglio del terreno, si è ritenuto soddisfacente l'utilizzo di questo prodotto per lo scopo del presente lavoro. L'attenzione, infatti,

vuole concentrarsi sul corpo diga, e si vuole limitare il numero di nodi che comporrà la mesh del terreno, così da non rendere il modello complessivo eccessivamente costoso in termini di tempi di analisi.

Step 2. È possibile estrarre da QGIS le curve di livello del terreno selezionando il comando 'Raster', quindi scegliendo 'Estrazione' e avendo cura di spuntare la cartella 'Produci un vettore 3D' in modo da conservare le informazioni sulle quote nel passaggio tra i software [Figura 5.1.1].

Nel fare ciò è importante selezionare come origine il file contenente le quote dei punti, e poi inserire come input all'interno del programma il numero di interpolazioni che esso deve eseguire nel singolo quadrato. Nel caso in esame si è scelto di mantenere un passo tra le curve di livello pari a 5 m, mantenendo quindi la dimensione caratteristica del DTM.

Step 3. Essendo le curve di livello georeferenziate rispetto al sistema di coordinate del file DTM, è fondamentale, nell'esportazione delle stesse in un CAD, traslarle in modo che esse diventino poi sovrapponibile con le curve di livello afferenti alla diga.

Step 4. Il passaggio dalle curve di livello ottenute alla creazione della mesh del terreno passa attraverso la generazione della geometria dello stesso all'interno dell'ambiente Midas. Per far questo è disponibile un apposito tool chiamato "Terrain Geometry Maker" che permette, a partire dalle curve di livello 3D di un'area, di generare una superficie tridimensionale che interpoli tali curve. Essendo la dimensione del DTM disponibile ogni 5 metri, si sceglie di usare la stessa dimensione per definire il passo delle curve di livello.

Il comando permette di definire il livello di risoluzione desiderato per completare questa interpolazione, livello che determina il dettaglio che avrà tale superficie ma anche la dimensione del file in creazione.

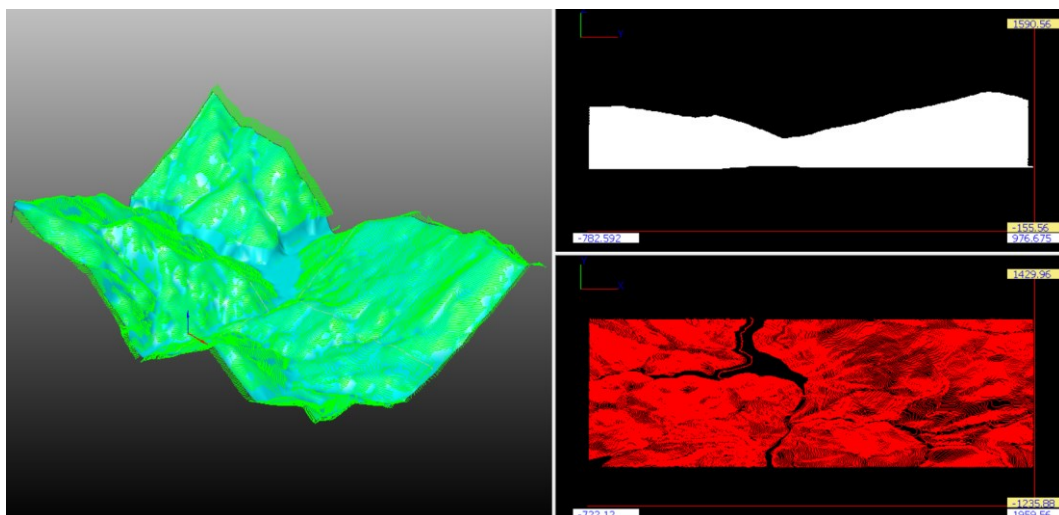


Figura 5.1.2 - Funzionamento del tool *Terrain Geometry Maker*

L'output del tool sopra presentato è una superficie. Dovendo però modellare il terreno con elementi 3D, è necessario creare la geometria di un solido. La strategia consiste pertanto nel creare un parallelepipedo che tagli perimetralmente tutta la superficie creata e che abbia un'altezza maggiore della quota massima del terreno, per non perdere l'informazione su nessun punto, e allo stesso tempo sufficientemente alto per avere un'idea dello spessore di terreno realmente presente al di sotto della vallata.

Con il punto più depresso a valle della diga posto a 390 m slm, si crea un box che abbia, al di sotto di questa quota, un'altezza di 290 m. Tale parallelepipedo viene quindi tagliato utilizzando la superficie, e viene infine eliminata la porzione di box superiore.

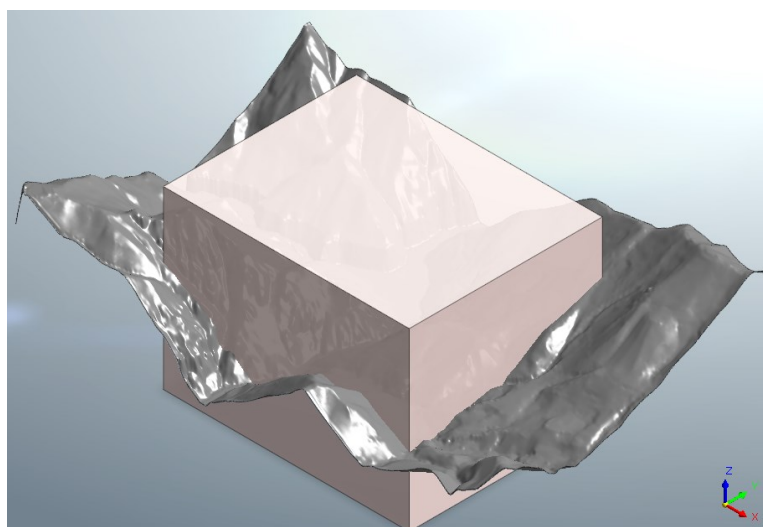


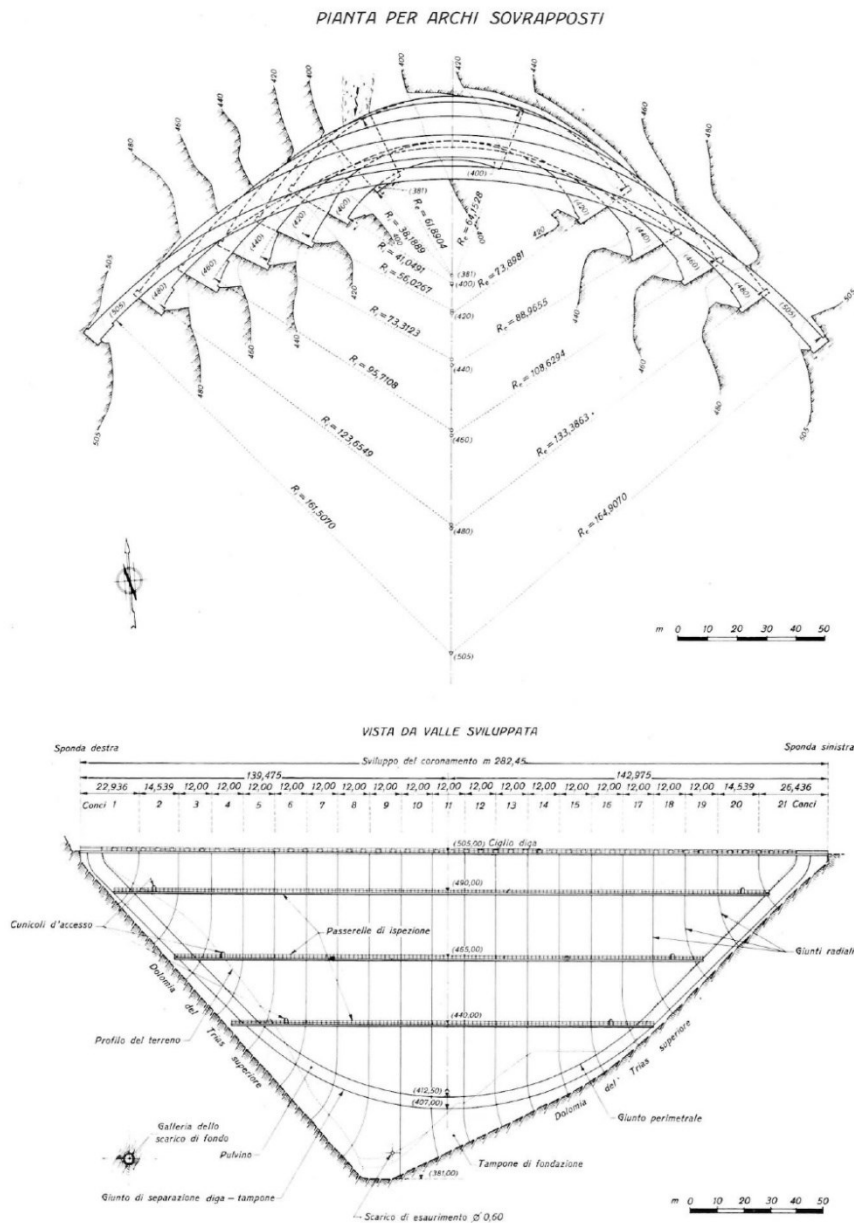
Figura 5.1.3 – Inserimento del box per creare il solido

5.2. Creazione della geometria della diga

Per creare il corpo diga vero e proprio si è proceduto a partire dalla Tav. C sotto riportata.

TAV. C

DIGA DI PONTE COLA

Figura 5.2.1 – *Pianta per archi sovrapposti*

Sono stati ricostruiti, ad uno ad uno, gli archi che caratterizzano la diga ad incrementi di 5 metri: ogni arco (all'intradosso e all'estradosso) aveva un centro e un raggio di curvatura unico rispetto agli altri.

Una volta ricostruite le sezioni presenti nella tavola -e create da capo quelle non presenti-, sono state create le linee di collegamento tra le diverse quote.

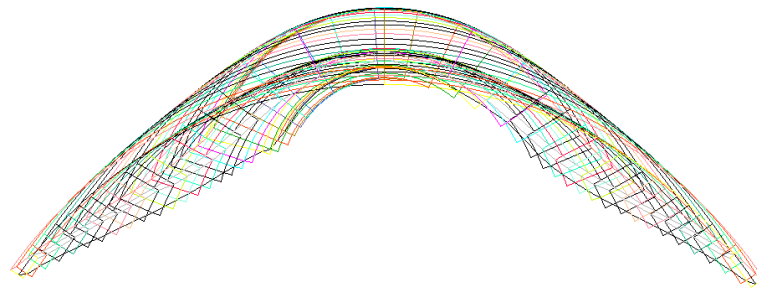


Figura 5.2.2 – DXF della diga

Una volta terminato il DXF, è possibile importarlo in MIDAS e chiudere le superfici che contengono le porzioni di diga.

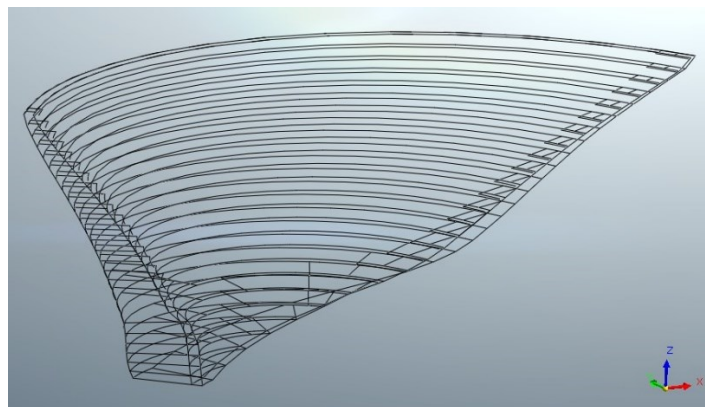


Figura 5.2.3 – Edges della diga

Dalle superfici anche in questo caso è stato necessario passare ad una geometria solida. Tramite il comando 'Loft' sono state selezionate due curve di livello adiacenti per volta per far creare al programma una superficie che fosse comprensiva di entrambe. Il comando 'Sew surface' invece ha permesso di generare un solido unendo gruppi di superfici che racchiudevano un volume definito. I due comandi sono stati utilizzati in alternanza per ottenere un solido completo del corpo diga, privo di cavità o punti di non contatto.

È stato questo un lavoro molto certosino: perché è stato necessario procedere per piccoli step e controllare ogni volta il lavoro di Midas perché

dove il corpo diga è sottile ($z > 480$ m s.l.m.) la superficie rilevata dal programma era quella effettiva; lo stesso non accadeva alle quote inferiori dove sono stati creati nuovi volumi.

L'ultimo step è quello di creare il volume vuoto nei punti in cui la diga entra nel terreno, per farlo si usa il comando 'Boolean' selezionando la voce 'Embed'.

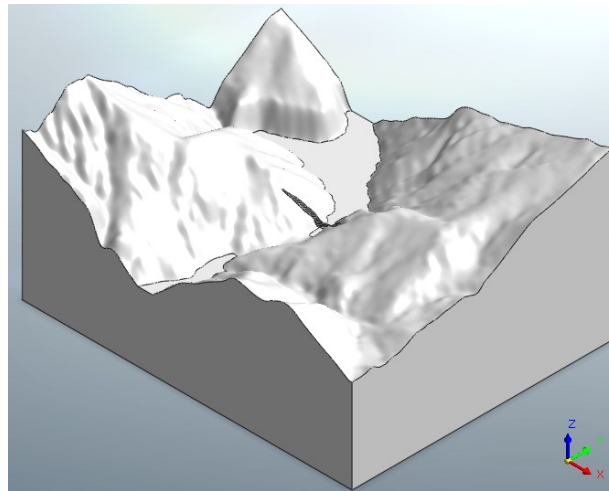


Figura 5.1.4 – *Solido finale del terreno*

La cosa importante è usare due comandi:

- 'Autoconnect' per far sì che le facce a contatto dei due materiali siano effettivamente coincidenti;
- 'Check duplicates' per visualizzare le facce a contatto e verificare che queste coincidano con le pareti verticali della diga dove questa entra nel terreno.

Si mostrano, per completezza, le curve di livello e i solidi del terreno e della diga.

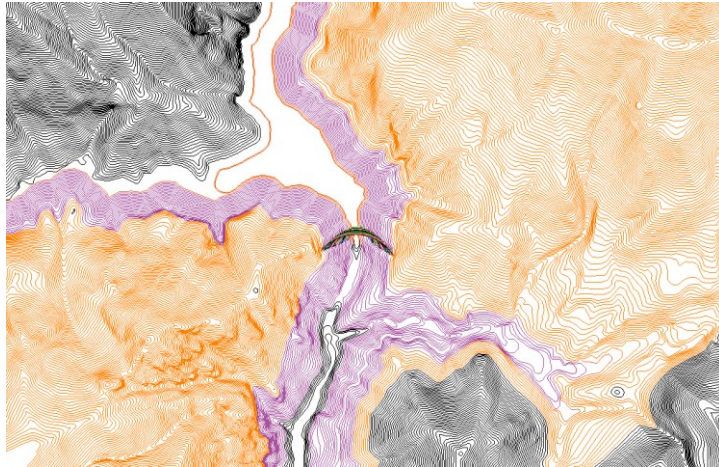


Figura 5.2.4 - Curve di livello del terreno e della diga

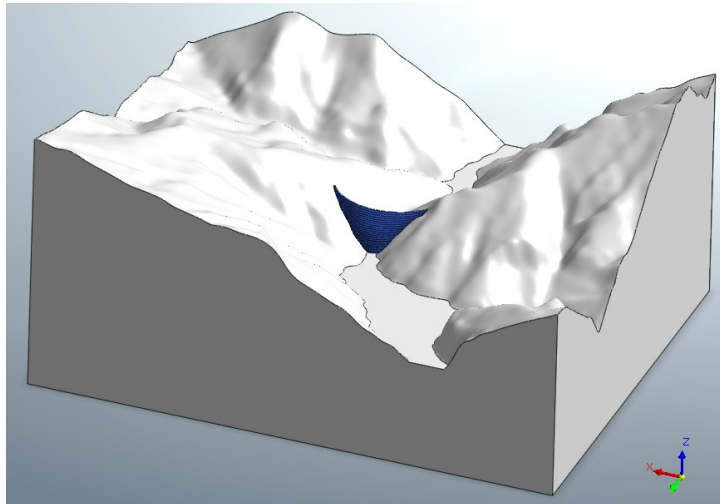


Figura 5.2.5 - Solidi di terreno e diga

5.3. Creazione della mesh

Nel creare la mesh è necessario anzitutto assegnare i materiali.

Calcestruzzo		
[kN/m ²]	Modulo Elastico	3,0E+07
[-]	Modulo di Poisson	0,2
[kN/m ³]	Peso specifico	25,8
[T ⁻¹]	Coefficiente termico	1,1E-05
[J/ m day T]	Conduttività termica	25,056
[J/ ton T]	Calore specifico	50,50

Figura 5.3.1 – Parametri assegnati al calcestruzzo

Terreno		
[kN/m ²]	Modulo Elastico	4,4E+07
[-]	Modulo di Poisson	0,3
[kN/m ³]	Peso specifico	27,6
[T ⁻¹]	Coefficiente termico	1,4E-06
[J/ m day T]	Conduttività termica	1,4E+05
[J/ ton T]	Calore specifico	1,04
[kN/m ²]	Coesione	600
[°]	Angolo di attrito	40

Figura 5.3.2 – Parametri assegnati al terreno

Si mostrano nelle tabelle i valori finali dei parametri termici relativi ai due materiali e meccanici del calcestruzzo..

Lo step successivo è scegliere il tipo di mesh, tetraedrica o ibrida: è stato selezionato il primo tipo.

In ultimo si inserisce la dimensione della mesh: per il corpo diga questa è pari a 2,5 m mentre per il terreno si sceglie una dimensione di 50 m: la differenza tra i due dati è da ricercare ancora una volta nell'intenzione di minimizzare l'onere computazionale chiesto al software: siamo interessati ad un livello di precisione alto solo per il corpo diga.

Per dare un'idea delle dimensioni del modello si riporta di seguito il numero di *entities* di cui è composto:

- × 34394 nodi
- × 175011 elementi
- × 103182 gradi di libertà
- × 100009 equazioni

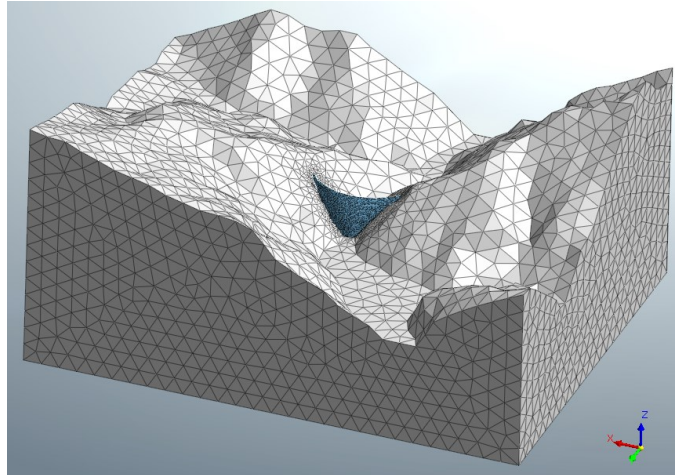


Figura 5.3.3 - Mesh di terreno e diga

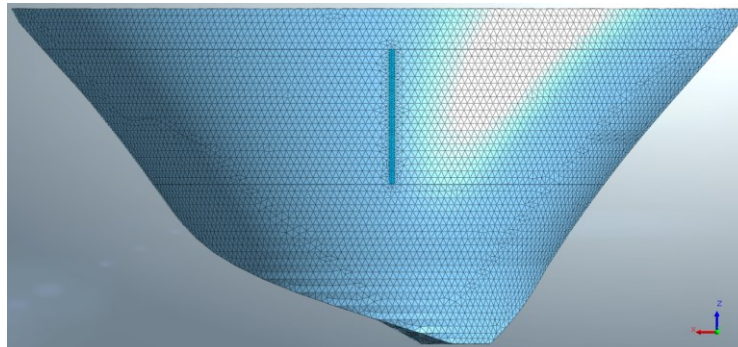


Figura 5.3.4 – Particolare della mesh della diga a monte

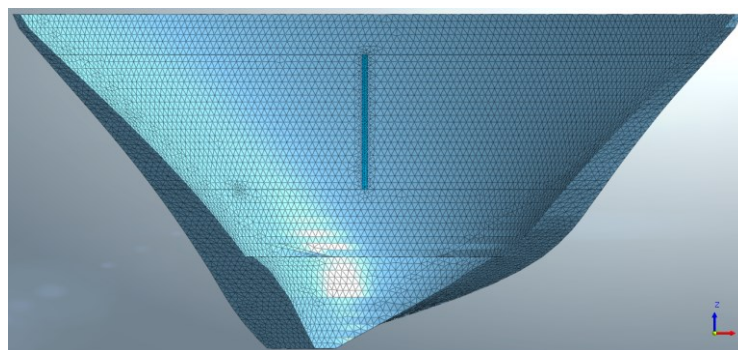


Figura 5.3.5 – Particolare della mesh della diga a valle

5.4. Condizioni al contorno

La mesh creata è stata vincolata quindi tramite vincoli di simmetria.

Sotto il terreno sono bloccate tutte le traslazioni, creando un vincolo a cerniera:

$$T_x = T_y = T_z = 0$$

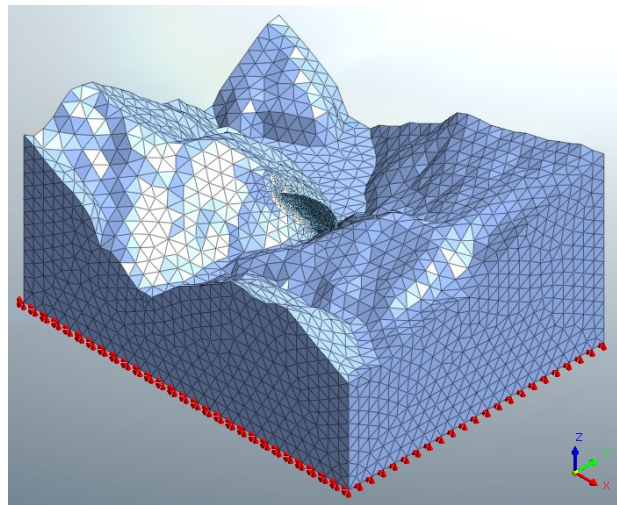


Figura 5.4.1 – *Cerniera*

Nella direzione monte e valle delle pareti di terreno verticali è schematizzato un carrello che blocca le traslazioni in direzione y:

$$T_y = 0$$

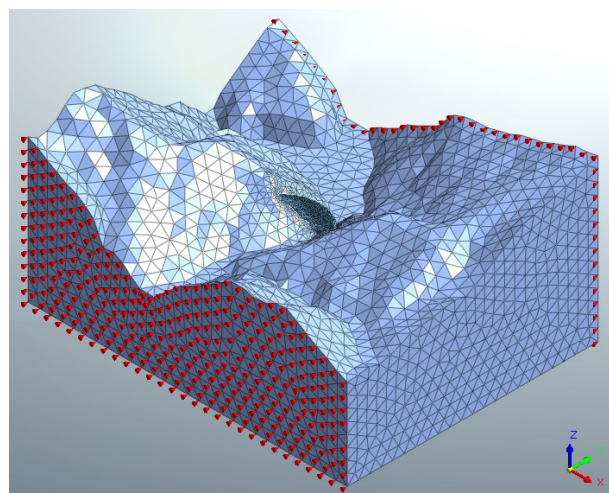


Figura 5.4.2 – *Carrello in direzione x*

Nella direzione destra e sinistra delle pareti di terreno verticali è schematizzato un carrello che blocca le traslazioni in direzione x:

$$T_x = 0$$

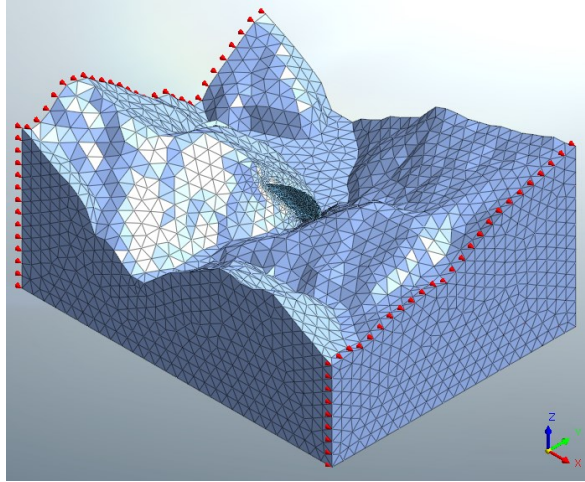


Figura 5.4.3 – *Carrello in direzione y*

5.5. Carichi applicati

Il primo carico inserito è il peso proprio del corpo diga e terreno.

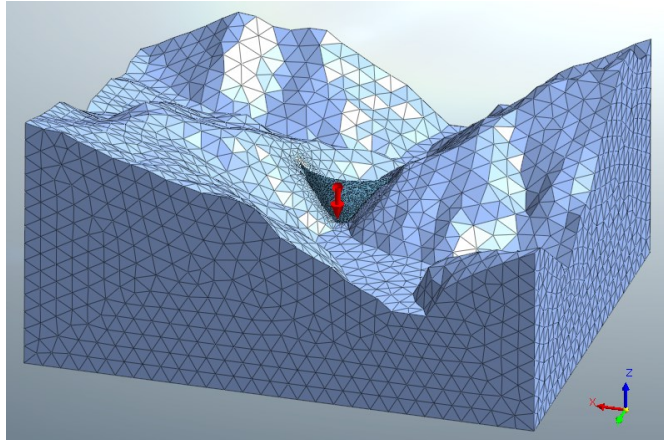


Figura 5.5.1 – *Peso proprio diga e terreno*

5.5.1. Inserimento della quota d'invaso

In un primo momento la presenza della falda è stata considerata grazie al comando 'Water pressure'.

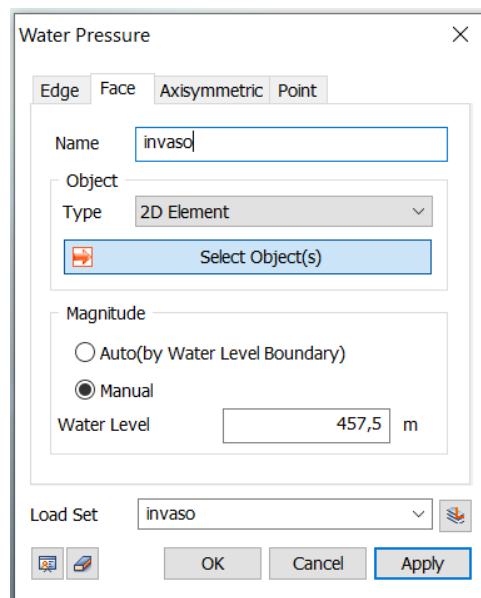


Figura 5.7.1 – *Water pressure*

È stata applicata una Convection sulle facce: è stata inserita la pressione che eserciterà l'acqua sui due elementi: diga e terreno; tramite il selezionamento di tutte le facce che si trovano sul lato monte, si fa sì che una volta inserito il livello d'invaso come dato dell'analisi, queste saranno automaticamente soggette all'azione dell'acqua.

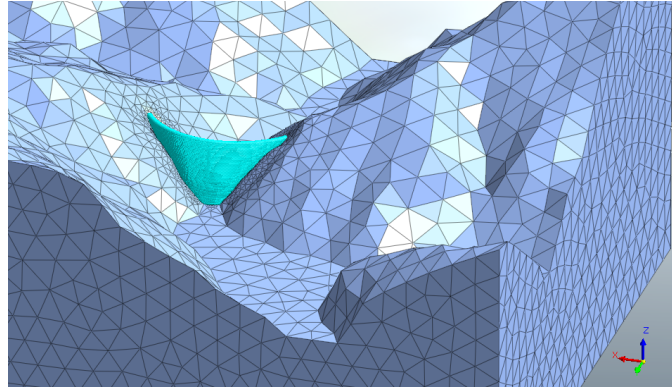


Figura 5.5.1.1 – Water pressure sulla diga – Convection alle faces

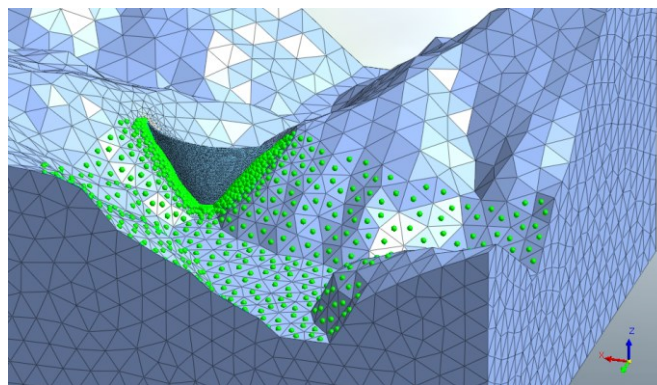


Figura 5.5.1.2 – Water pressure sul terreno – Convection alle faces

Si è notato però che così facendo la pressione dell'acqua non era applicata solo alle *faces* alle quali era stata attribuita la *Convection* precedentemente illustrata, quindi alle facce effettivamente sotto il livello della falda.

La pressione era infatti applicata anche sul lato valle: questo generava problemi di instabilità nel modello perché l'inserimento di una falda applicata a tutta la vallata faceva sì che le tensioni efficaci si riducessero sensibilmente rispetto allo stato iniziale in cui il terreno era considerato scarico.

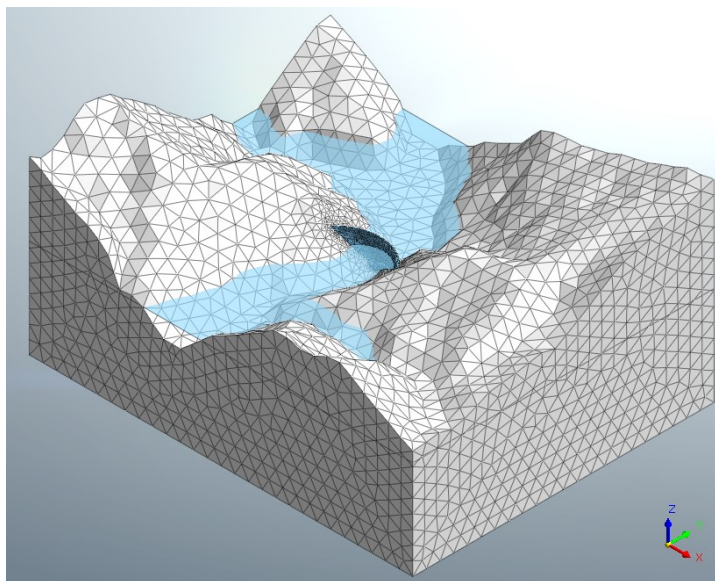


Figura 5.7.2 – Falda inserita con Water Pressure

Per effetto della presenza dell'acqua il peso del terreno si riduce e si assiste ad alte deformazioni nella direzione verticale: il terreno alleggerito tende a sollevarsi e per via del vincolo d'incastro con la diga costringe quest'ultima a fare lo stesso.

Si riporta di seguito le istruzioni secondo il Manuale di MIDAS GTS NX.

“selezionare l'elemento linea o superficie di confine dove la pressione dell'acqua verrà applicata. L'opzione Automatica può essere usata quando il livello dell'acqua è preimpostato, ed è usato per calcolare automaticamente la pressione idrostatica basata sulla differenza di altezza tra il livello dell'acqua e l'elemento linea o superficie di confine. L'opzione Manuale specifica direttamente la pressione applicata sull'elemento linea o superficie di confine”

Per considerare correttamente la presenza dell'acqua si è proceduto allora a creare una superficie per ogni livello di falda considerato, poi trasformando questa superficie in una *Water table*, in modo che l'azione dell'acqua fosse circoscritta al lato monte.

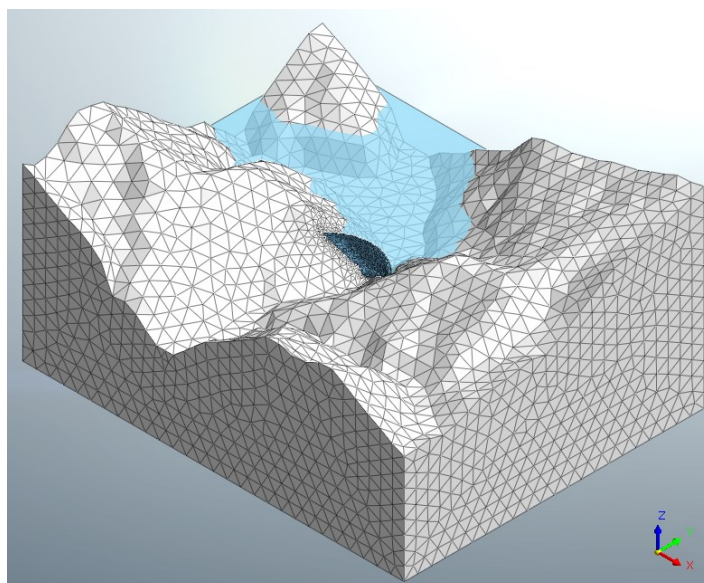


Figura 5.7.3 – *Inserimento corretto falda*

5.6. Vincoli termici

5.6.1. Temperature imposte ai nodi

Si impone, a tutti i nodi esterni del modello, una temperatura iniziale.

La temperatura dei nodi sotto acqua interni e quelli inglobati nel terreno corrisponde alla media annuale del sensore interno posto alla quota di 440 m: 14,08 °C.

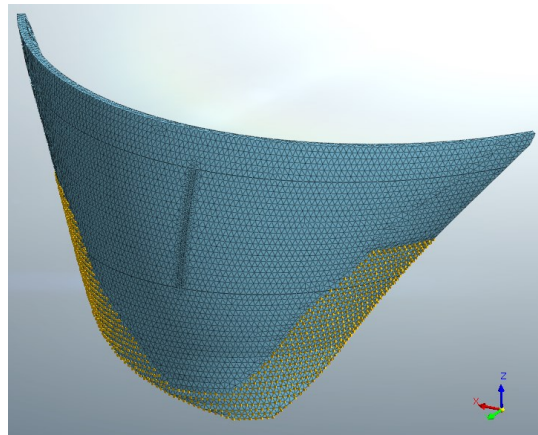


Figura 5.6.2.1 – *Temperature imposte ai nodi nel terreno sottofalda*

Per i nodi fuori acqua e per quelli inglobati nel terreno sopra il livello della falda si fa ancora la media annuale del sensore interno, stavolta però si sceglie quello a 490 m slm ottenendo una temperatura di 12,14 °C.

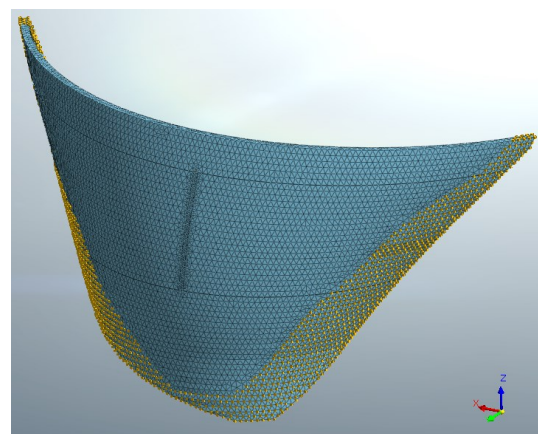


Figura 5.6.2.2 – *Temperature imposte ai nodi nel terreno sopra falda*

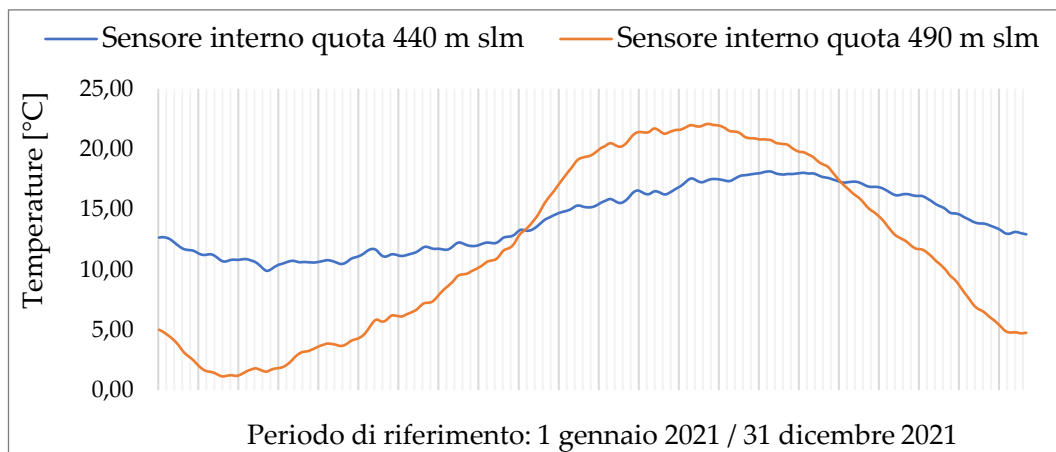


Figura 5.6.2.1 – *Andamento della temperatura dei sensori interni al calcestruzzo: 3 misurazioni al giorno, a distanza di 8 ore*

Per i nodi illustrati di seguito la temperatura scelta è quella al giorno 0, nel caso studio, il 1 maggio 2021. Quindi per il lato monte sotto acqua $T=5,87$ °C.

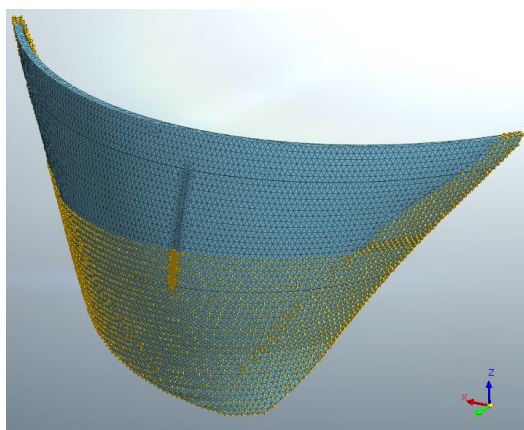


Figura 5.6.2.3 – *Temperature imposte sottofalda*

Per i nodi sopra acqua la temperatura è di $9,56$ °C.

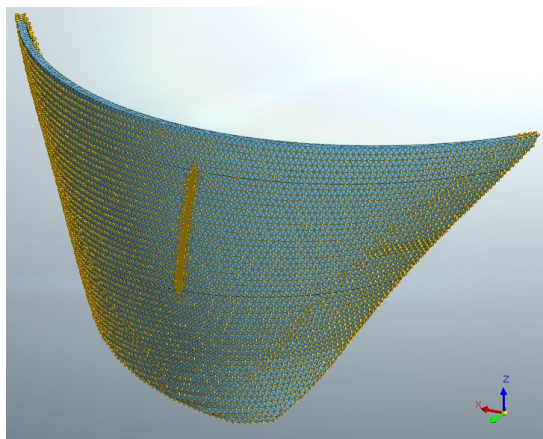


Figura 5.6.2.4 – *Temperature imposte sottofalda*

In ultimo i nodi lato valle e sul coronamento, la cui temperatura è unica e pari a 12,10 °C.

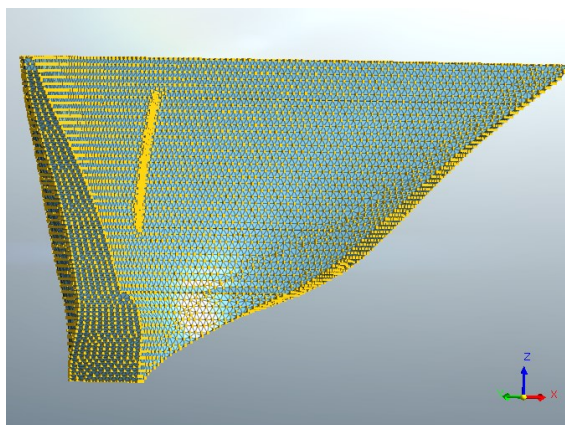


Figura 5.6.2.5 – *Temperature imposte lato valle e coronamento*

5.6.2 Funzioni temperatura alle *faces*

La fitta campagna di raccolta dati messa a disposizione dal gestore contiene l'andamento giornaliero delle temperature sia delle mire presenti sul lato valle della diga che dei sensori annegati nel calcestruzzo alle quote di 440 m slm e 490 m slm.

Per avere un modello che fosse quanto più aderente possibile alla realtà si è deciso di inserire tali funzioni di temperatura come dato di input degli elementi costituenti il modello stesso: terreno e calcestruzzo.

Le funzioni temperatura di cui si sta parlando sono:

- una funzione temperatura dei sensori sul lato valle della diga;
- una funzione temperatura lato monte della diga dei sensori esposti all'aria;
- una funzione temperatura lato monte della diga dei sensori sotto il livello d'invaso.

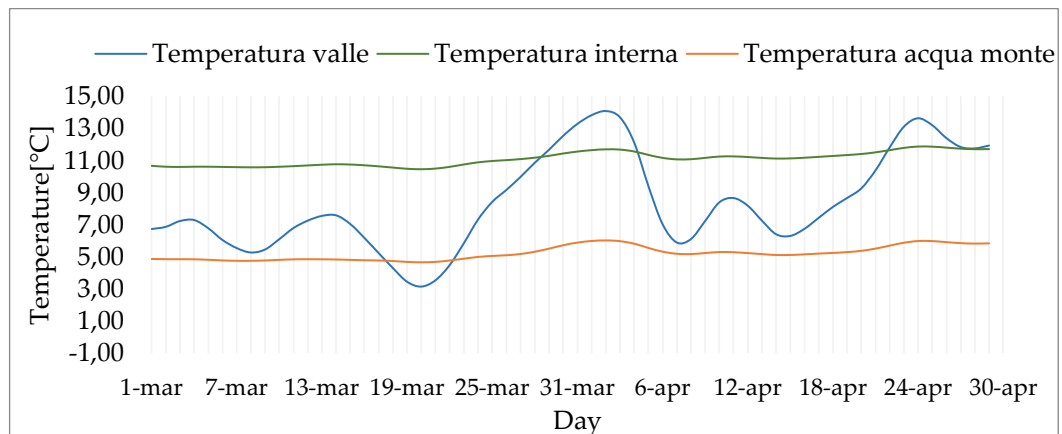


Figura 5.6.1.1 – Andamento della temperatura per i sensori a 440 m slm

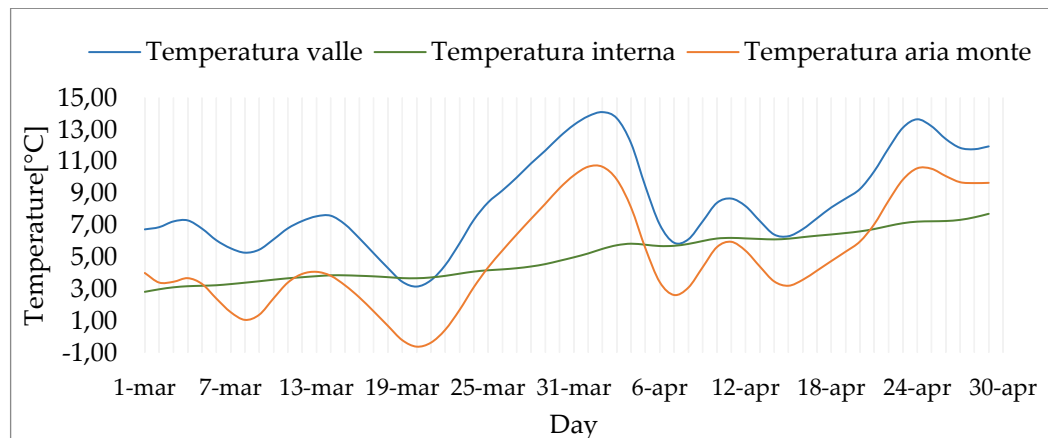


Figura 5.6.1.2 – Andamento della temperatura per i sensori a 490 m slm

La scelta è caduta su queste due quote essendo queste le due quote alle quale sono posizionati i sensori interni.

Il periodo scelto invece doveva essere necessariamente esteso per poter vedere come il modello rispondesse alle variazioni di temperatura, allo stesso modo però variazioni troppo elevate di temperatura come quelle che

avvengono durante il periodo estivo (e parallelamente quello invernale) avrebbero dato vita ad un modello troppo sensibile.

A tutte le facce della superficie libera di terreno e di diga a contatto con l'aria (lato valle) viene attribuita quindi una funzione temperatura ottenuta dalle misurazioni giornaliere a nostra disposizione.

L'ultima attenzione che viene fatta è sull'onere computazionale del modello: per snellirne l'analisi, infatti, è stata fatta la media giornaliera delle 3 misurazioni a disposizione.

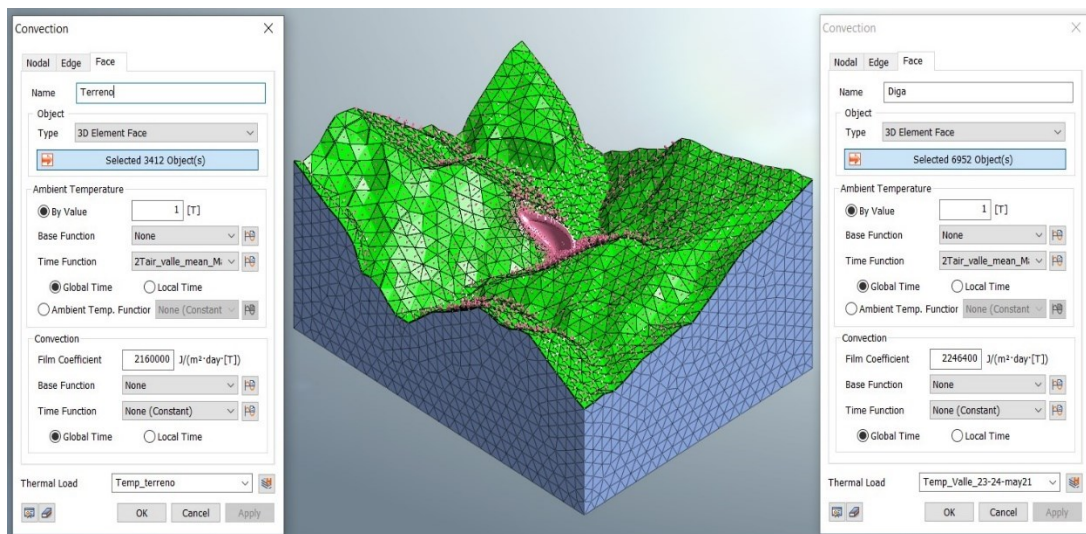


Figura 5.6.1 – *Face attributes lato valle*

Lo stesso vale per il lato monte della diga, ovviamente differenziando tra le facce toccate dall'acqua e quelle che invece rimangono a contatto con l'aria.

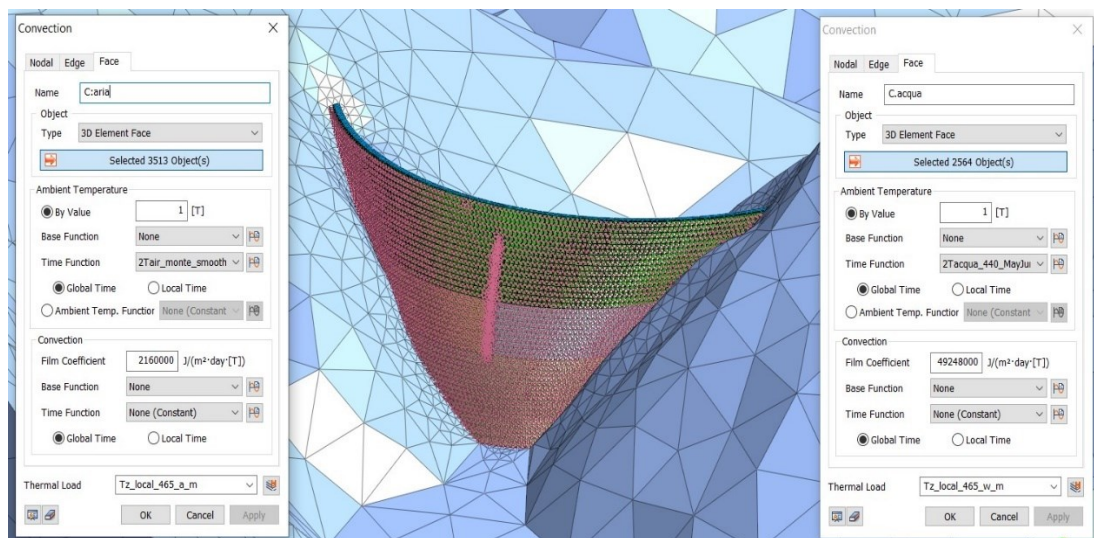


Figura 5.6.2 – Face attributes lato monte

5.7. Stage set del modello

La risoluzione del modello è strutturata in una 'Construction Stage' di due fasi: nella prima viene chiesto di svolgere un'analisi di tipo 'Steady State' e nella seconda un'analisi di tipo 'Transient'.

L'analisi costante ha come 'Activated data':

- la mesh dei due solidi, diga e terreno
- le condizioni al contorno
- i carichi statici
- le temperature iniziali imposte ai nodi

Viene poi inserita la presenza della falda e viene spuntata la casella del 'Clear Displacement', questo permette di separare gli spostamenti che la diga compie in questa fase da quelli che dipendono dai dati di input della seconda fase.

La scelta legata all'inserimento di temperature iniziali imposte a tutti i nodi (facendo distinzione tra quelli a valle, quelli in acqua, quelli in aria e quelli inglobati nel terreno) nasce dal fatto che, avendo dato come input le funzioni di temperatura ambientali, esse hanno un valore iniziale diverso da 0. Si è osservato che senza questa attenzione erano presenti dei salti nei grafici estratti dal programma: dal giorno 0 -coincidente con l'analisi iniziale a cui è stato applicato il 'Clear Displacement'- al giorno 1 -in cui invece vengono applicate le temperature ambientali-, si osservava un delta termico che avrebbe dovuto spalmarsi su tutto il periodo dell'analisi.

Nell'analisi transitoria il livello di falda viene naturalmente conservato e vengono disattivate le temperature imposte ai nodi per attivare, stavolta, le temperature imposte alle facce del lato monte e valle della diga e del terreno.

Questa fase contiene inoltre i 'Time Step': a partire dall'unità di misura selezionata per il tempo, il programma divide il carico in un numero di incrementi. Il nostro caso è strutturato su 60 giorni, quindi 60 incrementi.

È stato scelto un periodo pari a due mesi per entrambe le fasi della calibrazione per avere un dato che fosse variabile nel tempo ma che al contempo non appesantisse troppo il modello, si fa notare ancora una volta

come ognuno dei modelli analizzati richiede ore per essere processato, si è scelto di avere un dato più contenuto in favore di un elevato numero di modelli studiati.

In particolare, per la calibrazione termica, l'inizio dell'analisi coincide con il 1 marzo 2021 perché durante il periodo primaverile si assiste ad un aumento della temperatura ambientale.

Per la calibrazione meccanica invece si è scelto il periodo che coincide con i mesi di maggio e giugno: in questa fase si voleva un modello che fosse più sensibile.

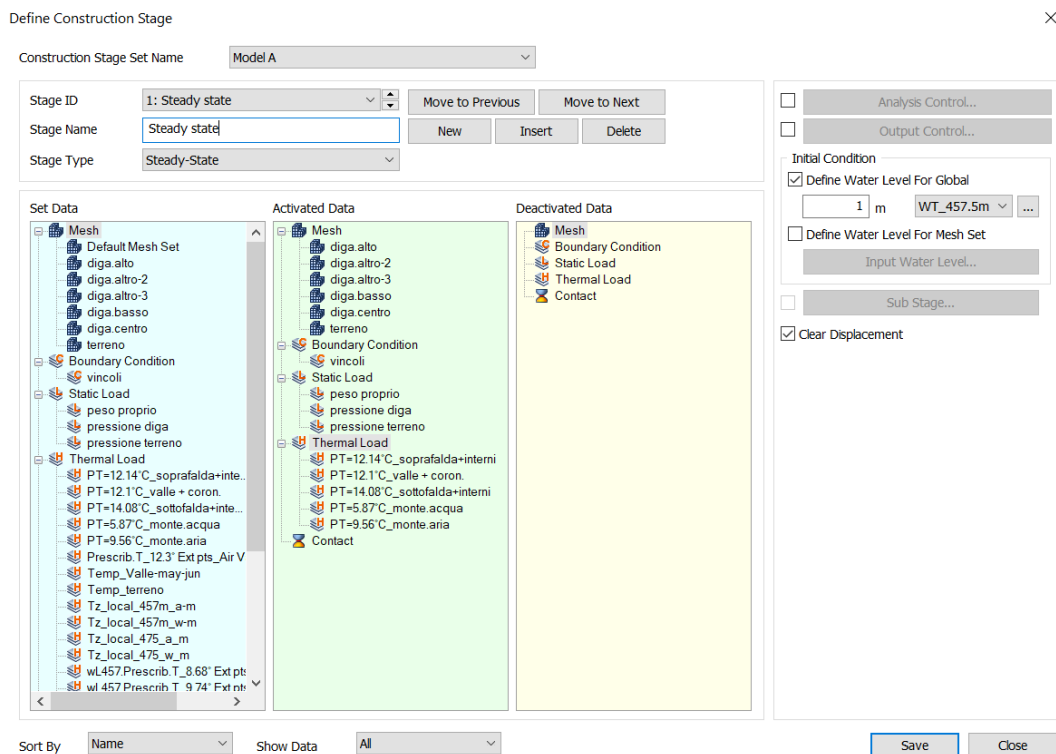


Figura 5.7.1 – Steady state Construction Stage

Define Construction Stage
✕

Construction Stage Set Name
Model A

Stage ID
2: Transient
Move to Previous
Move to Next

Stage Name
Transient
New
Insert
Delete

Stage Type
Transient
Time Step...

Set Data

- Mesh
 - Default Mesh Set
 - diga.alto
 - diga.alto-2
 - diga.alto-3
 - diga.basso
 - diga.centro
 - terreno
- Boundary Condition
 - vincoli
- Static Load
 - peso proprio
 - pressione diga
 - pressione terreno
- Thermal Load
 - PT=12.14°C_soprafalda+inte...
 - PT=12.1°C_valle + coron.
 - PT=14.08°C_sottofalda+inte...
 - PT=5.87°C_monte.acqua
 - PT=9.56°C_monte.aria
 - Prescrib.T_12.3° Ext pts_Air V
 - Temp_Valle-may-jun
 - Temp_terreno
 - Tz_local_457m_a-m
 - Tz_local_457m_w-m
 - Tz_local_475_a_m
 - Tz_local_475_w_m
 - wl457Prescrib.T_8.68° Ext pts
 - wl457Prescrib.T_9.74° Ext pts

Activated Data

- Mesh
- Boundary Condition
- Static Load
- Thermal Load
 - Temp_Valle-may-jun
 - Tz_local_457m_a-m
 - Tz_local_457m_w-m
 - Temp_terreno
- Contact

Deactivated Data

- Mesh
- Boundary Condition
- Static Load
- Thermal Load
 - PT=12.14°C_soprafalda+interni
 - PT=12.1°C_valle + coron.
 - PT=14.08°C_sottofalda+interni
 - PT=5.87°C_monte.acqua
 - PT=9.56°C_monte.aria
- Contact

☐ Analysis Control...

☐ Output Control...

Initial Condition
☒ Define Water Level For Global

1 m
WT_457.5m
...

☐ Define Water Level For Mesh Set

Input Water Level...

☐ Sub Stage...

☐ Clear Displacement

Sort By
Name
Show Data
All

Save
Close

Figure 5.7.1 – Transient Construction Stage

6. Calibrazione termica del modello

La fase successiva, il primo focus dello studio, è la calibrazione termica del modello: cercare la giusta assegnazione dei parametri che permettono al modello agli elementi finiti di essere congruente con le misurazioni delle temperature note a partire dai dati sui sensori posti all'interno della diga e dagli estensimetri satellitari.

Avendo a disposizione l'andamento delle temperature nei sensori alle quote di 440 m slm e 490 m slm è qui che si studia e si adatta l'andamento dei nodi del modello rappresentativi dei sensori al fine di renderli quanto più aderenti possibile ai sensori.

I due parametri che sono oggetto della calibrazione sono il calore specifico e la conducibilità termica.

Il calore specifico è quella quantità di calore che occorre somministrare a 1 grammo-massa di una sostanza per variarne di 1°C la temperatura. La sua unità di misura sarà, secondo la convenzione utilizzata nel modello, che prevedere di considerare la massa in tonnellate e la temperatura in gradi Celsius, $\frac{J}{ton\ C}$.

La conducibilità termica invece misura la capacità dei corpi di trasmettere il calore attraverso il fenomeno di conduzione termica. La sua unità di misura sarà invece $\frac{J}{m\ day\ C}$.

In una tabella si riportano i valori iniziali dei parametri meccanici e si anticipano quali valori si vedranno comparire per i modelli riportati per mostrare gli step che hanno portato alla scelta finale dei valori.

		modello 0	modello 1	modello 2	modello 3
[J/ m day T]	Conducibilità termica	250.560	250.560	1.002,24	25,056
[J/ ton T]	Calore specifico	1,01	10,1	25,25	50,50

6.1 Andamento della temperatura nei sensori

Le temperature rilevate, che, come si è visto, sono quelle attribuite alle facce del modello, vengono riportate nei grafici a seguire, per le due quote.

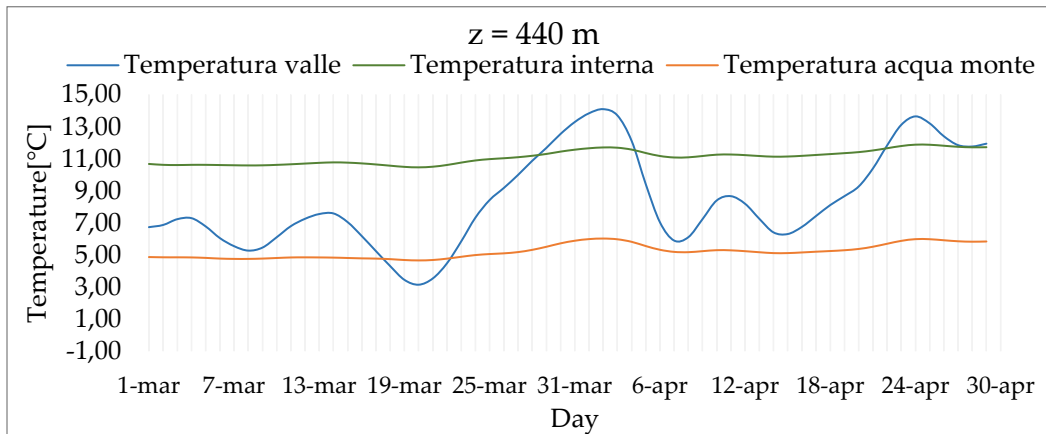


Figura 6.1.1 – Andamento delle temperature dei sensori a 440 m slm

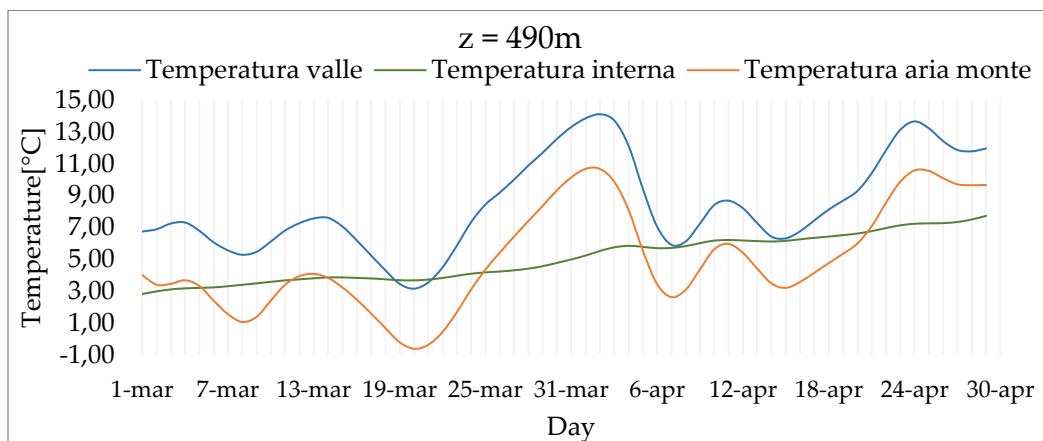


Figura 6.1.2 – Andamento delle temperature dei sensori a 490 m slm

6.2. Andamento della temperatura nel modello

Il dato iniziale dei parametri ("Thermal and structural analysis or RCC double-curvature arch dam" – *Journal of civil engineering and management*, 2014, **vol. 3**, pag 440, Tab. 2) era, per il calore specifico:

$$c_s = 1,01 \frac{J}{\text{ton } ^\circ\text{C}} \quad (6.1.1)$$

Per la conducibilità termica ("Thermal and structural analysis or RCC double-curvature arch dam" – *Journal of civil engineering and management*, 2014, **vol. 3**, pag 440, Tab. 2):

$$\lambda = 250.560 \frac{J}{\text{m day } ^\circ\text{C}} \quad (6.1.2)$$

Sono stati creati numerosi modelli in cui si variavano i valori sopra riportati per avere la migliore aderenza possibile con i dati relativi ai sensori interni alla diga alle quote di riferimento di 440 m e 490 m.

Tenendo presente che il lato monte e il lato valle non rispondono allo stesso modo a queste variazioni nei parametri essendo questi lati soggetti alle funzioni termiche imposte, la differenza si apprezzerà sui nodi all'interno dello spessore della diga.

Si sono quindi scelti dei nodi significativi per le due quote di riferimento: uno lato monte, uno lato valle, e uno al centro.

Per questo modello i nodi corrispondono agli ID riportati in tabella:

ID node		x [m]	y [m]	z [m]
1	81402	575,00	118,85	440,00
2	81419	575,00	125,94	440,00
3	81396	575,00	132,02	440,00
4	82007	575,00	110,71	490,00
5	82010	575,00	113,67	490,00
6	81008	575,00	116,64	490,00

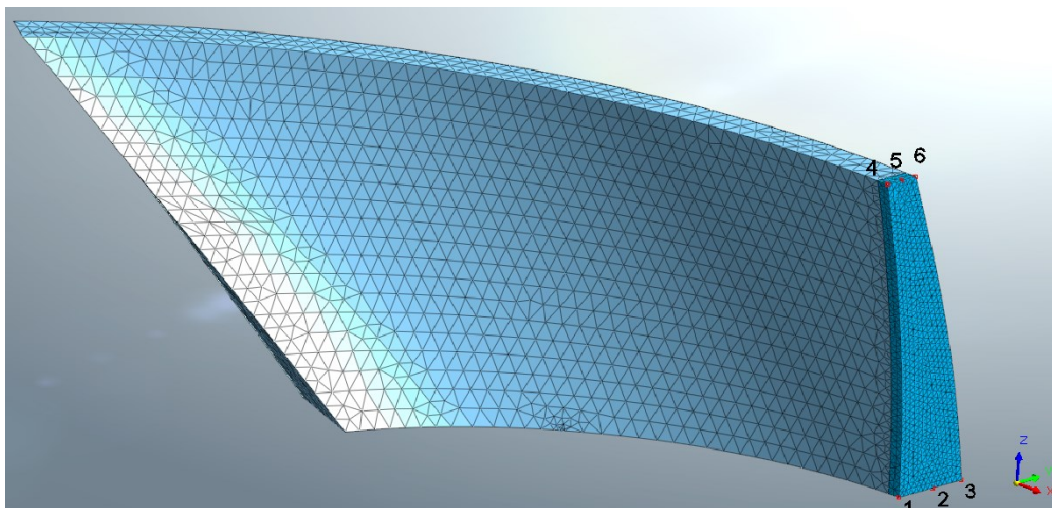


Figura 6.2.1 – Nodi rappresentativi dei sensori alle due quote

Le temperature rilevate nel modello avente i parametri prima esplicitati sono:

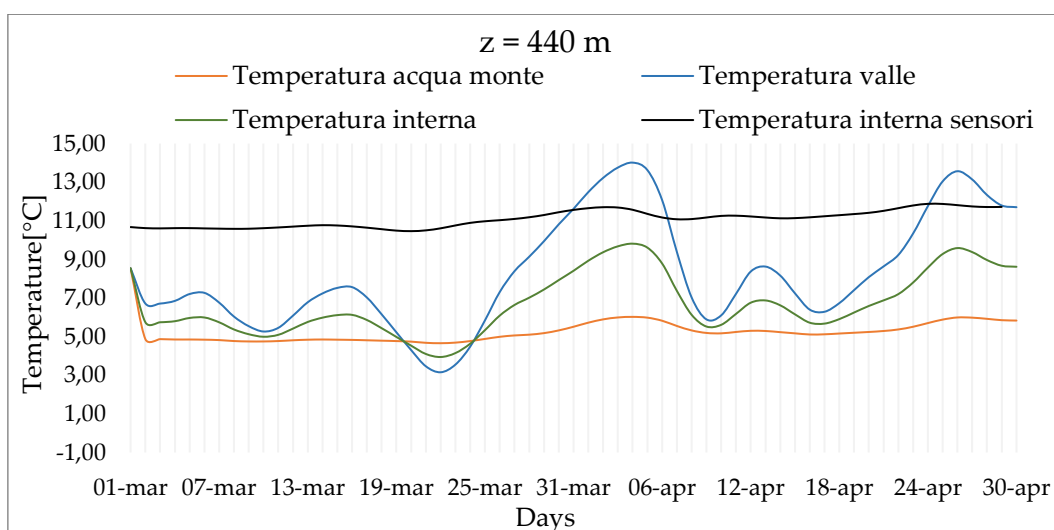


Figura 6.2.2 – Andamento delle temperature dei nodi del modello a 440 m slm

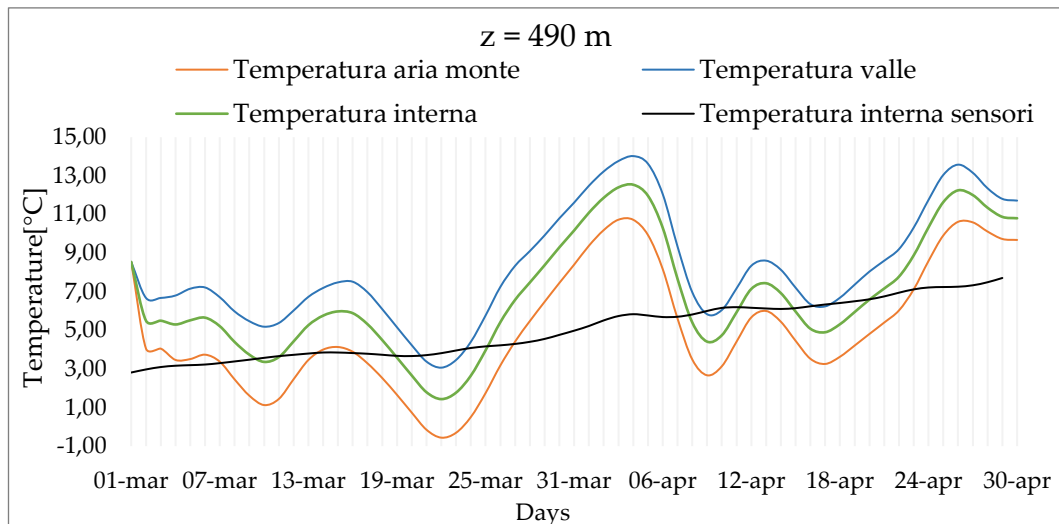


Figura 6.2.3 – Andamento delle temperature dei nodi del modello a 490 m slm

L'aderenza non è buona: l'andamento a 440 m sembra anche seguire quello della funzione che descrive la temperatura interna ma la differenza è ben evidente a 490 m, dove lo spessore ridotto fa sì che il nodo interno sia molto suscettibile alle funzioni imposte agli estremi, non c'è affatto aderenza o somiglianza con la funzione che riporta i dati rilevati. Si continua a far variare i parametri.

Alla luce della modesta somiglianza dei risultati numerici e delle misure fisiche, si è scelto di modificare i parametri termici assegnati al terreno allo scopo di ricreare una più attendibile risposta termica della diga nel modello al cambio delle temperature ambientali.

6.3 Modelli analizzati

- Modello 1

Qui il valore del calore specifico è aumentato di un fattore dieci mentre quello del coefficiente di conduttività è rimasto invariato.

$$c_s = 10,1 \frac{J}{ton \cdot C}$$

$$\lambda = 250.560 \frac{J}{m \cdot day \cdot C}$$

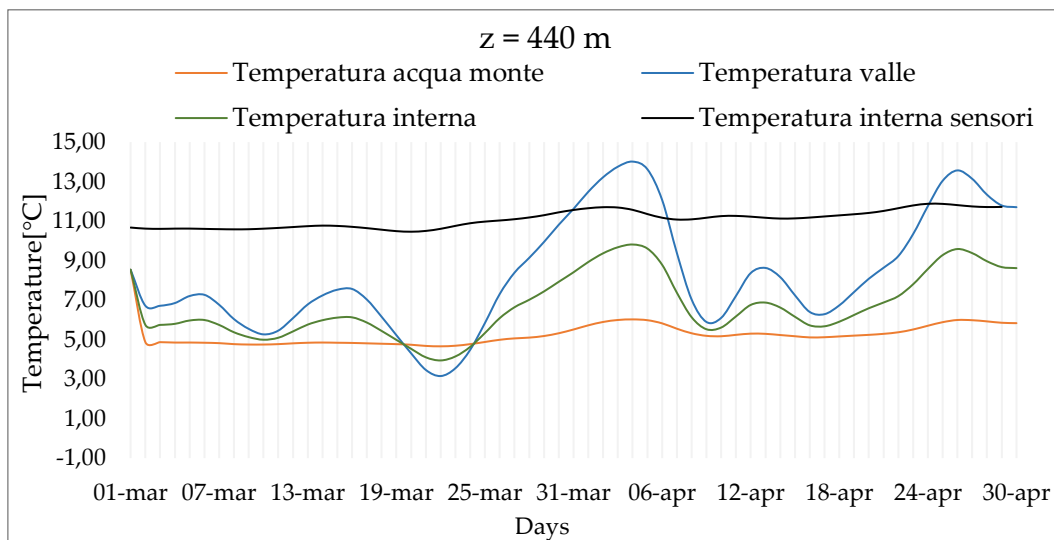


Figura 6.3.1 – Andamento delle temperature dei nodi del modello a 440 m slm

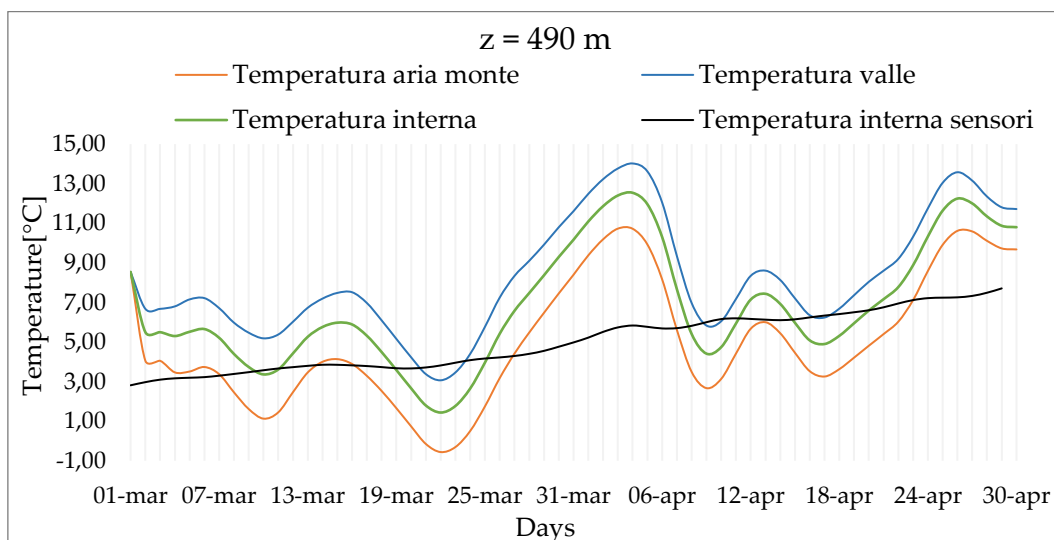


Figura 6.3.2 – Andamento delle temperature dei nodi del modello a 490 m slm

L'andamento è pressoché identico al precedente.

- Modello 2

Con questo modello invece sono stati variati contemporaneamente i parametri per provare a rendere più sensibile il modello.

$$c_s = 25,25 \frac{J}{ton \ C}$$

$$\lambda = 1002,24 \frac{J}{m \ day \ C}$$

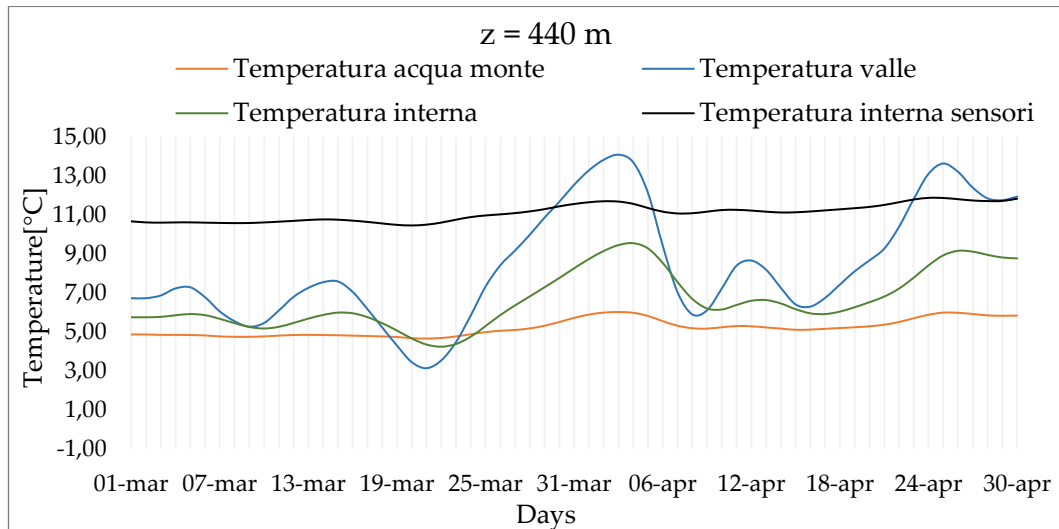


Figura 6.3.3 – Andamento delle temperature dei nodi del modello a 440 m slm

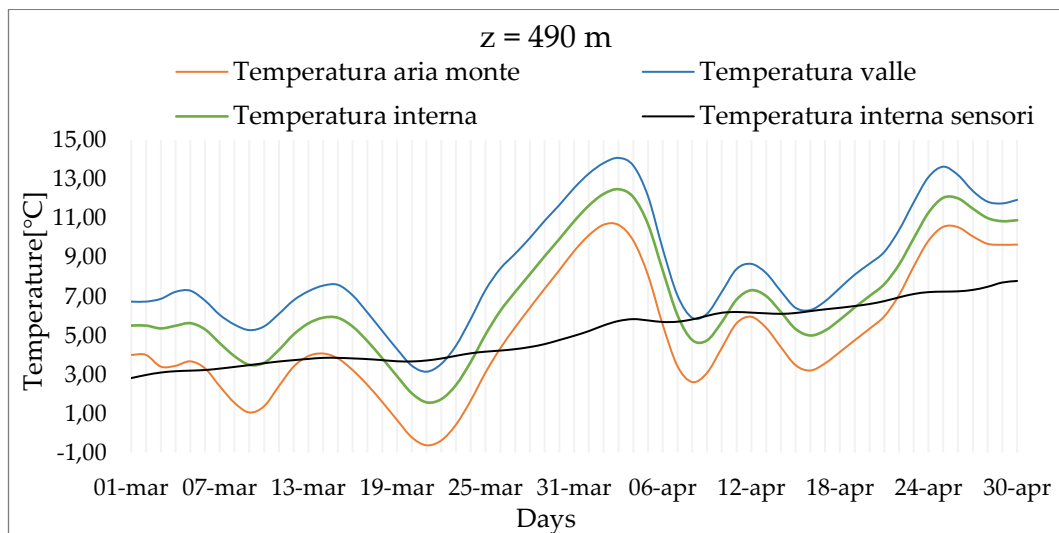


Figura 6.3.4 – Andamento delle temperature dei nodi del modello a 490 m slm

Il risultato ottenuto non è ancora soddisfacente. Si fa qualche altro tentativo.

- Modello 3

Questi invece i parametri dell'ultimo modello.

$$c_s = 50,50 \frac{J}{\text{ton } ^\circ C}$$

$$\lambda = 25,056 \frac{J}{m \text{ day } ^\circ C}$$

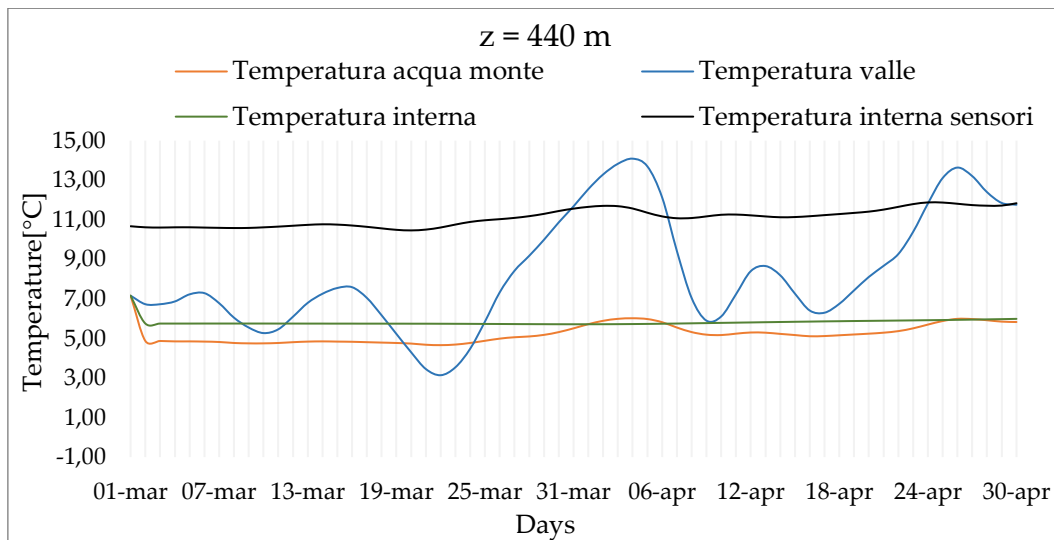


Figura 6.3.5 – Andamento delle temperature dei nodi del modello a 440 m slm

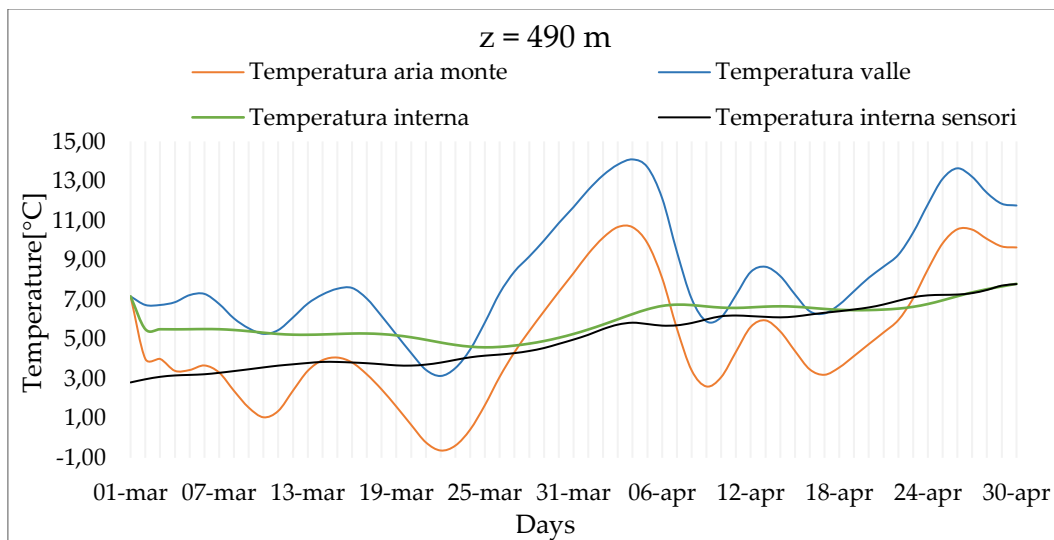


Figura 6.3.6 – Andamento delle temperature dei nodi del modello a 490 m slm

Si stabilisce che è questo il modello definitivo: per la quota di 440 m, infatti, considerando lo spessore notevole del modello (circa 11 metri) si valuta che non può essere possibile avere aderenza migliore di questa: a questa quota ci si accontenta di avere lo stesso andamento anche se traslato di qualche

grado. Per la quota di 490 m, invece, si ottiene una ottima aderenza tra sensori e modello.

Nelle immagini a seguire si mostra l'andamento della temperatura prima sul lato valle e all'interno della diga, poi lato monte.

In corrispondenza delle linee grigie orizzontali si trovano le due quote studiate.

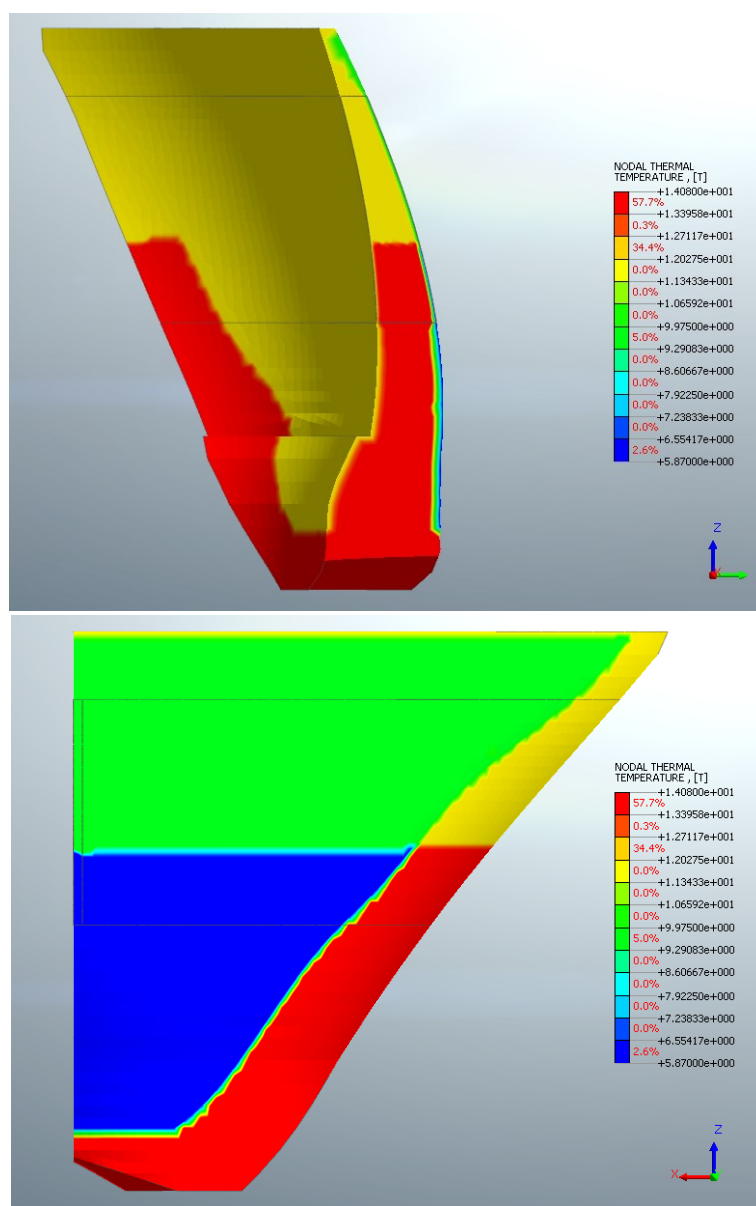


Figura 6.3.7 – Temperature imposte al giorno 0

Dopo 20 giorni si vede che il lato valle segue, in tutti i punti esposti all'aria, la funzione di temperatura. Si nota però come l'aumentare dello spessore renda il gradiente termico sempre più lento.

Sul lato valle, naturalmente, si ha una chiara idea dell'influenza della falda nel salto visibile della temperatura.

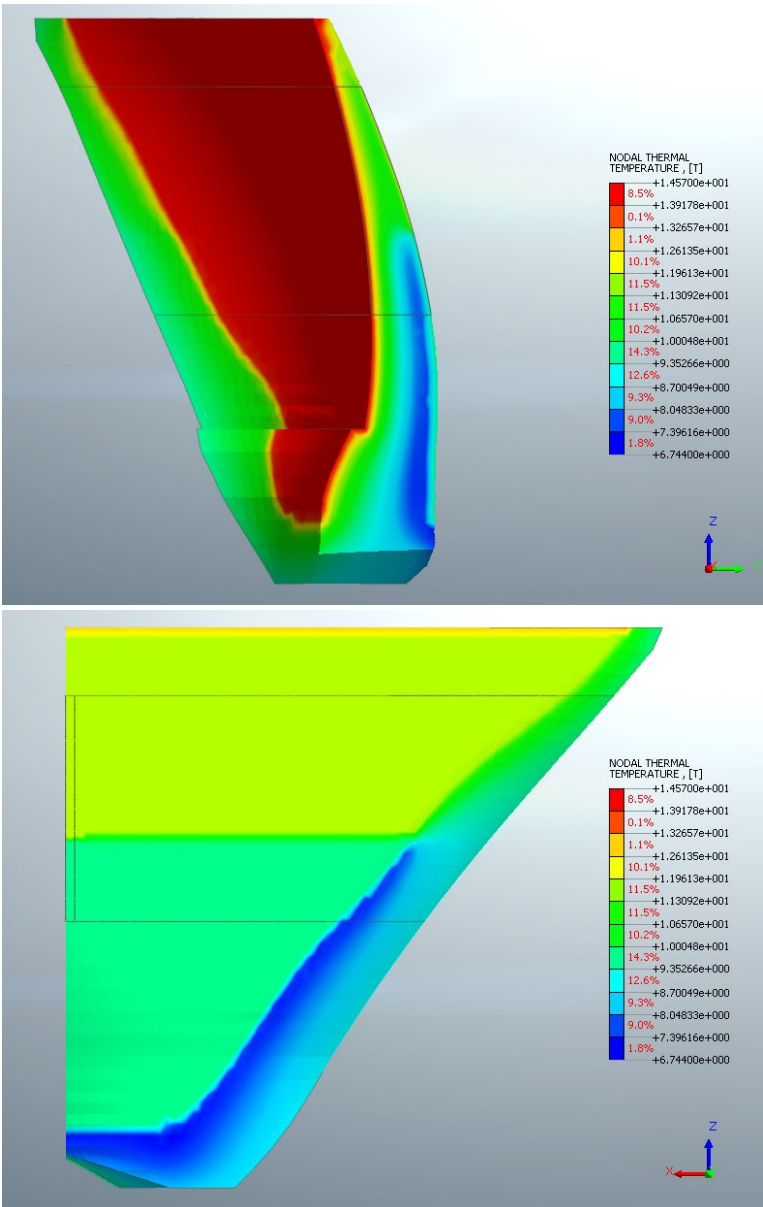


Figura 6.3.8 – Temperature dopo 20 giorni

La falda sta gradualmente raffreddando l'interno della diga: la temperatura letta aumenta di qualche decimo di grado ma la zona interessata è molto più ampia.

Il lato valle, coerentemente con la temperatura ambientale in aumento, si riscalda.

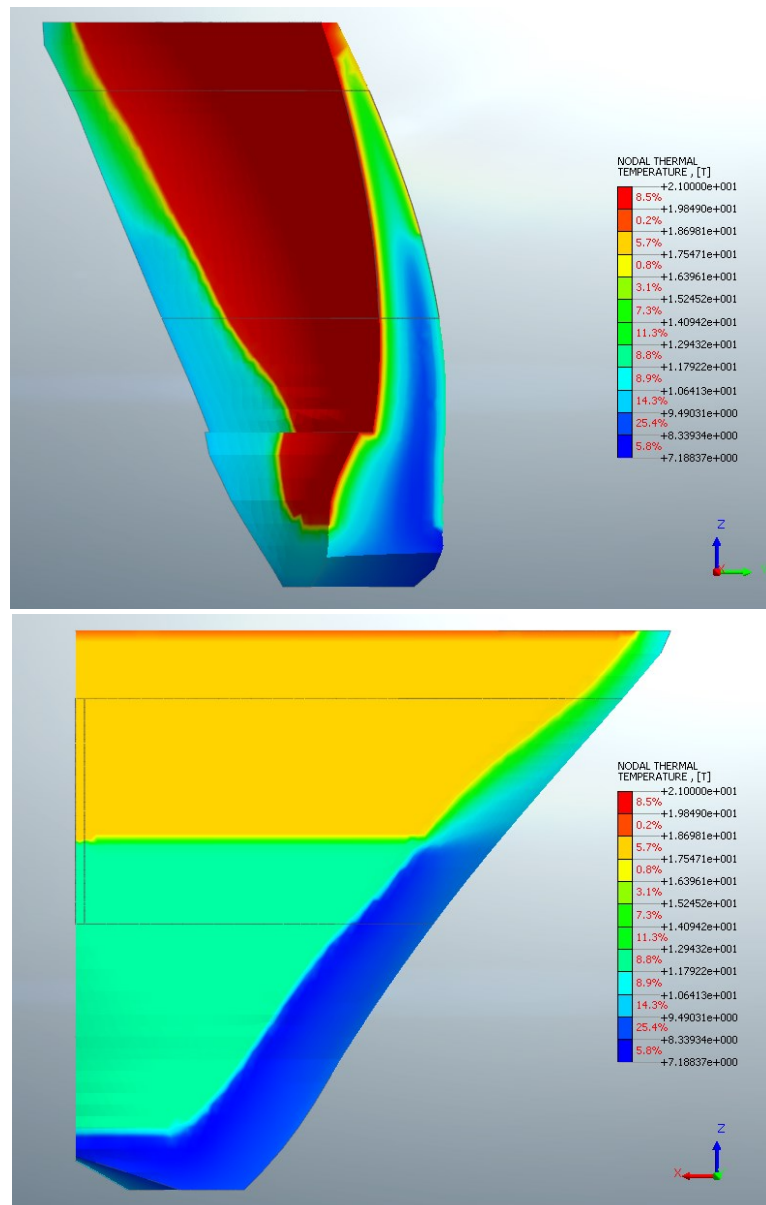


Figura 6.3.9 – Temperature dopo 40 giorni

L'ultimo step riportato conserva il trend descritto per i precedenti.

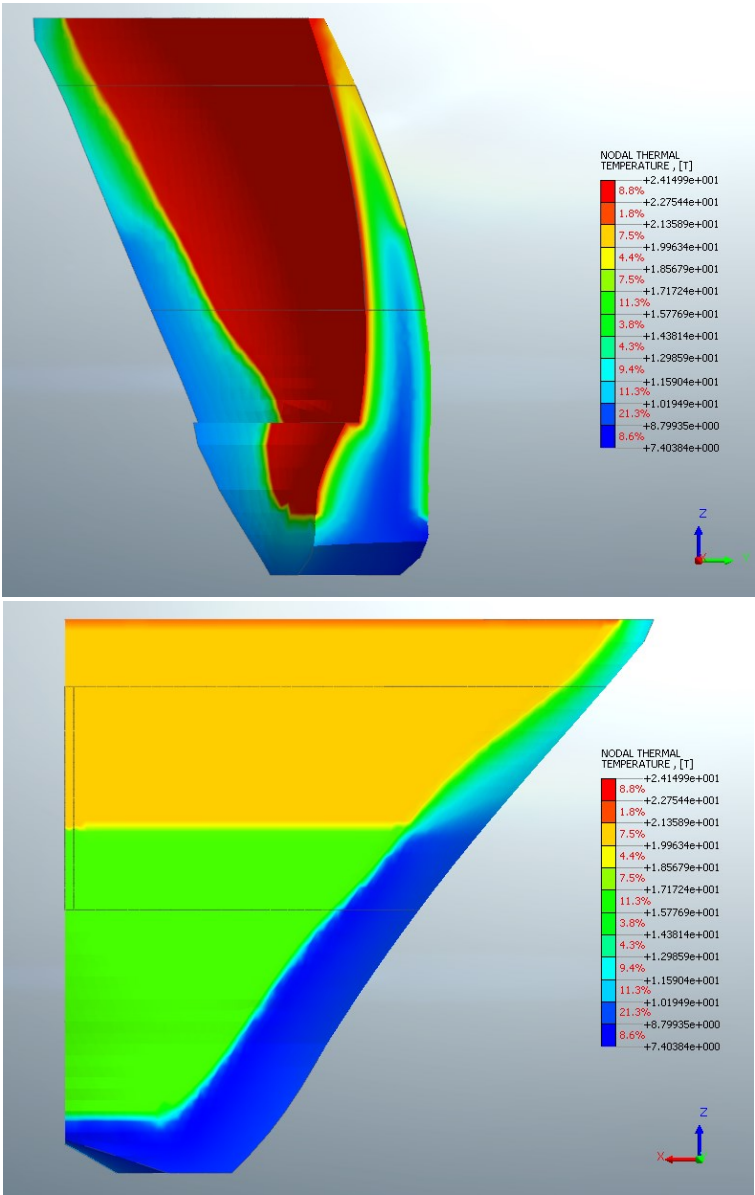


Figure 6.3.10 – Temperature dopo 60 giorni

7. Calibrazione meccanica del modello

L'ultima fase della calibrazione è la parte meccanica: si studieranno gli spostamenti della diga.

Il parametro che si è scelto di far variare per questa fase dell'analisi è il coefficiente termico α lasciando gli altri parametri invariati.

Si fa notare che il coefficiente termico del calcestruzzo è responsabile in maniera più importante degli spostamenti che avvengono verso il centro della diga mentre il coefficiente termico del terreno influenza i sensori più vicini ai bordi.

Osservando poi i livelli medi giornalieri d'invaso si vede il livello di falda a 457,5 m è ben rappresentativo del periodo preso come riferimento, cioè dal 1 maggio 2021 al 30 giugno dello stesso anno.

In una tabella si riportano i valori iniziali dei parametri meccanici e si anticipano quali valori si vedranno comparire per i modelli riportati per mostrare gli step che hanno portato alla scelta finale dei valori.

		modello 0	modello 1	modello 2	modello 3
[1/T]	Coefficiente termico terreno	1,0E-06	1,0E-06	1,0E-06	1,1E-05
[1/T]	Coefficiente termico calcestruzzo	1,2E-05	1,3E-05	1,2E-05	1,4E-05

7.1. Roto-traslazione dei sistemi di riferimento

La parte più importante, in questa fase, è rendere confrontabili i dati uscenti dal software con quelli dei sensori.

I sensori di cui si parla, si ricorda, sono le 7 mire topografiche presenti sul coronamento della diga, sul lato valle. Essendo a nostra disposizione le coordinate di ognuno, se n'è calcolata la distanza reciproca per meglio individuare, sul modello FEM, dei nodi che fossero rappresentativi dei sensori stessi.

Le coordinate dei sensori sono prese rispetto ai rilevatori presenti nella casa del guardiano, mentre il modello Midas è orientato con il verso positivo delle ordinate in direzione del Nord geografico, quindi ruotata rispetto al proprio asse di simmetria.

Per confrontarli in maniera univoca si ruotano gli spostamenti dei sensori e del modello Midas, in modo che entrambi siano allineati ad un terzo sistema, che ha sull'asse delle ascisse la destra convenzionale della diga nel verso positivo dell'asse e sull'asse delle ordinate nel verso positivo la direzione monte.

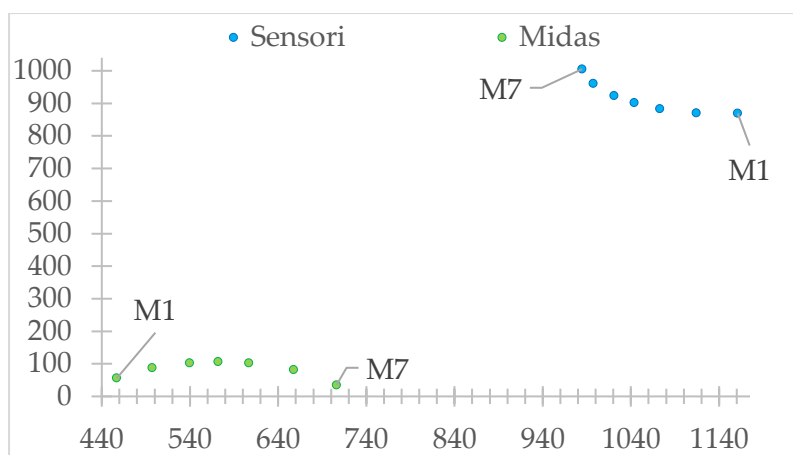


Figura 7.8.1 – Posizioni nel piano dei due modelli

Nel grafico sopra riportato sono state inserite le posizioni dei due modelli. In azzurro compaiono i sensori posti sul coronamento mentre in verde gli stessi sensori con le posizioni inserite nel modello al FEM.

Si individua l'intercetta dei sensori M1 e M7 e si vede che per posizionare i sensori sull'orizzontale occorre ruotare di $\alpha = 4,79^\circ$ gli spostamenti che restituisce Midas e di $\beta = 37,67^\circ$ quelli tabellati relativi ai sensori.

Le formule che si utilizzano per ruotare le deformazioni dei sensori sono le (5.8.1) e (5.8.2) mentre quelle uscenti da Midas le (5.8.3) e (5.8.4):

$$\Delta D = -\Delta x \cos\beta + \Delta y \sin\beta \quad (7.8.1)$$

$$\Delta M = -\Delta x \sin\beta - \Delta y \cos\beta \quad (7.8.2)$$

$$\Delta D = \Delta x \cos\alpha - \Delta y \sin\alpha \quad (7.8.3)$$

$$\Delta M = \Delta x \sin\alpha + \Delta y \cos\alpha \quad (7.8.4)$$

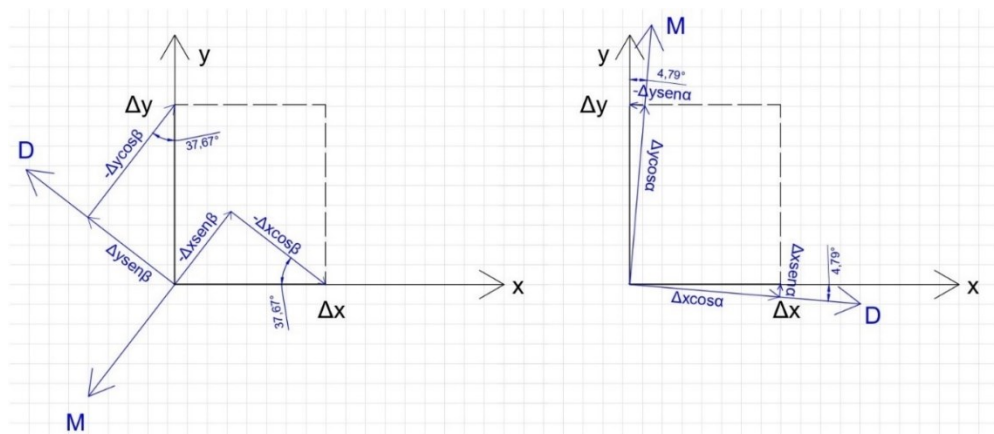


Figura 7.8.2 – Rotazione del sistema di riferimento

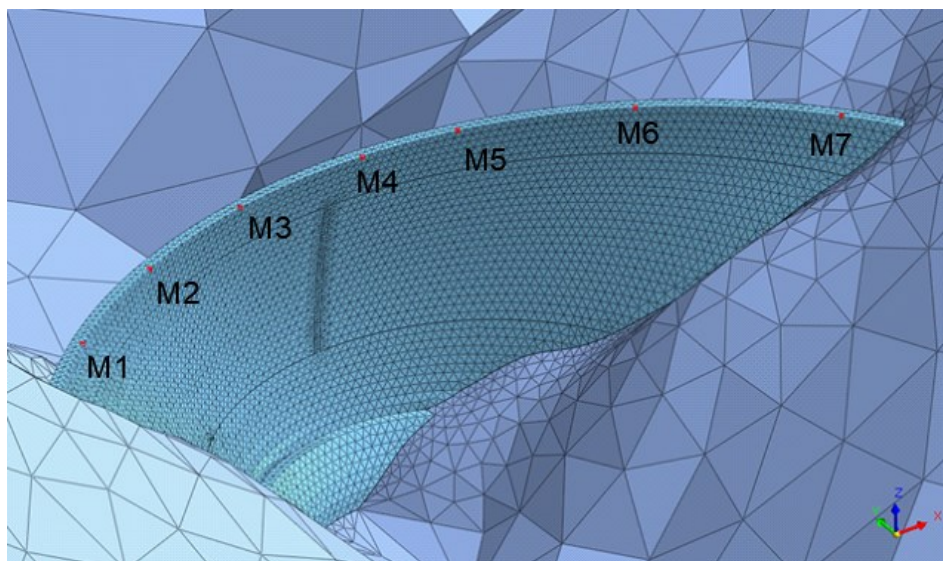


Figura 7.8.3 – Nodi sul modello rappresentativi delle 7 mire

7.2. Andamento delle deformazioni dei sensori

Come era facile immaginare, i sensori che si spostano di meno sono quelli più vicini alle imposte laterali (M1 e M7), leggermente più distanti in termini di deformazioni troviamo i sensori M2 e M6 che subiscono meno il vincolo d'incastro del terreno e infine quelli che più si spostano verso monte sono i sensori posti al centro (M3, M4 ed M5).

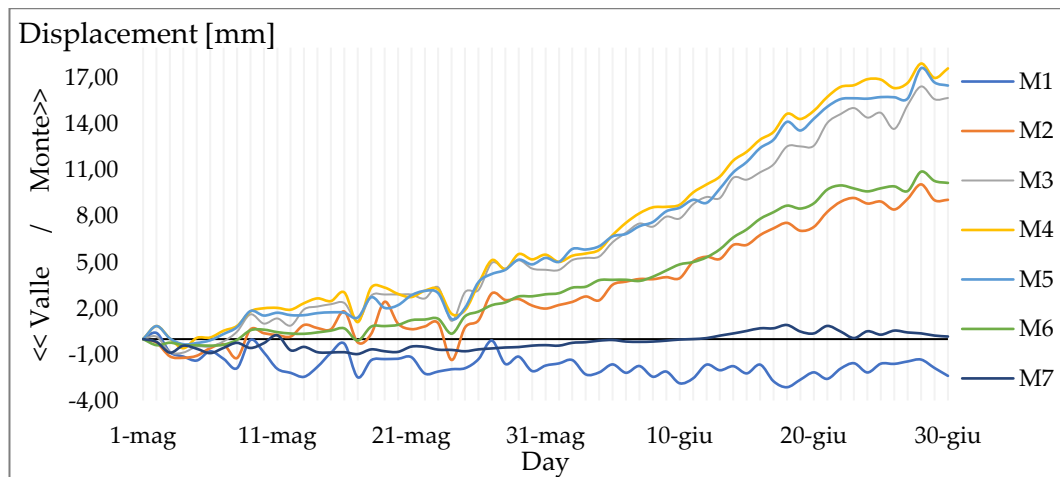


Figura 7.2.1 – Andamento degli spostamenti verso monte

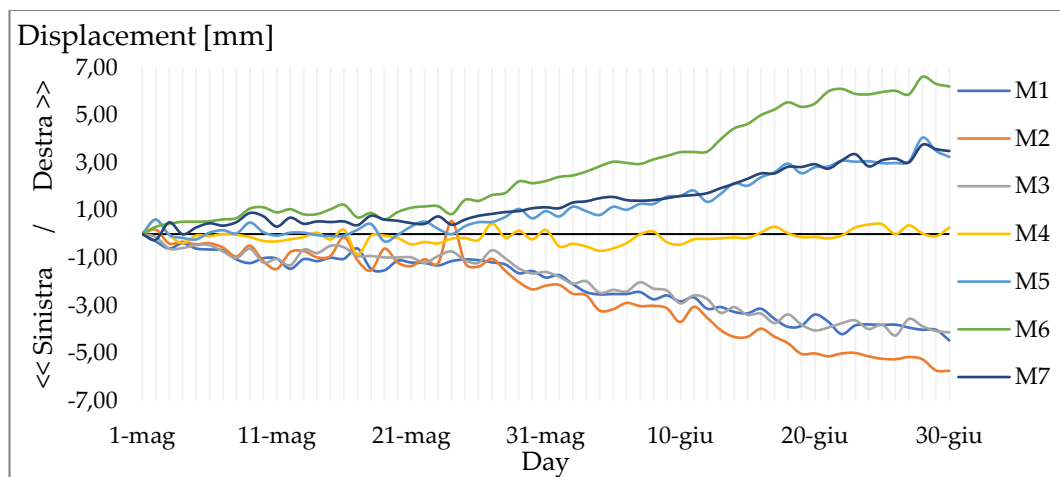


Figura 7.2.2 – Andamento degli spostamenti verso destra

Il contrario avviene invece nella direzione sinistra-destra dove a rimanere pressoché fermo è proprio il sensore centrale M4 e a spostarsi di più in valore assoluto sono i sensori esterni M2 e M6; M7 e M5 e contestualmente M3 e M1 invece si spostano allo stesso modo ma in direzioni diverse, segno che la diga sta dilatando, causa di ciò è la temperatura relativamente alta alla quale il materiale è soggetto essendo i dati riferiti al periodo estivo.

7.3 Andamento delle deformazioni del modello

Il valore iniziale del coefficiente termico del terreno (“Thermal and structural analysis or RCC double-curvature arch dam” – *Journal of civil engineering and management*, 2014, **vol. 3**, pag 440, Tab. 2) era:

$$\alpha_g = 1 * 10^{-6} \frac{1}{T} \quad (7.2.1)$$

Mentre quello del calcestruzzo (“Thermal and structural analysis or RCC double-curvature arch dam” – *Journal of civil engineering and management*, 2014, **vol. 3**, pag 440, Tab. 2):

$$\alpha_{cls} = 1,2 * 10^{-5} \frac{1}{T} \quad (7.2.2)$$

Da qui i grafici a seguire.

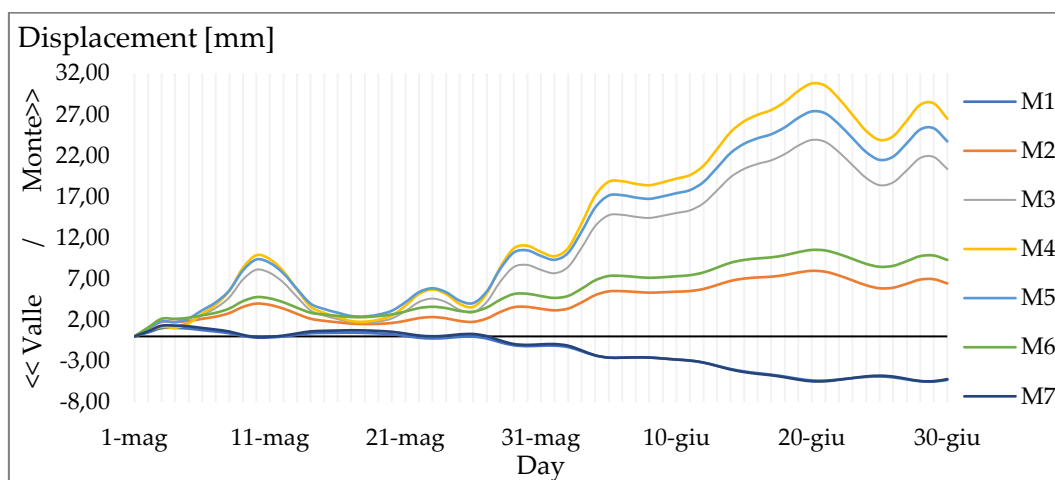


Figura 7.3.1 – Andamento degli spostamenti delle mire verso monte

Nella direzione monte l’andamento segue già bene quello dei sensori ma come si vede dall’asse delle ordinate, i valori minimo e massimo differiscono troppo: il modello deforma più dei sensori.

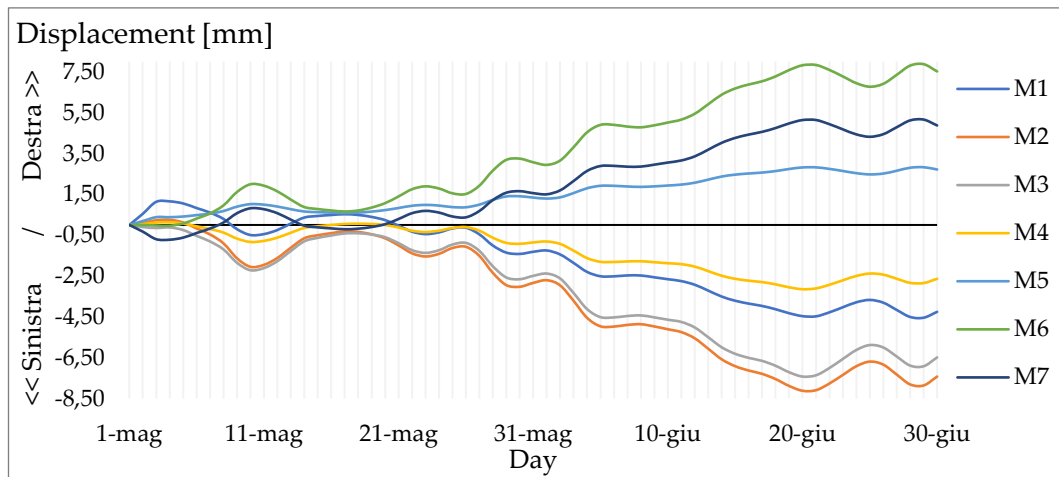


Figura 7.3.2 – Andamento degli spostamenti delle mire verso destra

Anche in questa direzione la distanza dai grafici delle misurazioni dei sensori è evidente: ancora una volta le deformazioni del modello sono maggiori rispetto ai sensori, in secondo luogo si confronta il singolo nodo: non si apprezza, dalle curve, la simmetria della diga.

7.4 Modelli analizzati

- Modello 1

È stato variato prima il valore del coefficiente termico del calcestruzzo per capire in che direzione muoversi: quello che si può dire è che verso monte le deformazioni sono ora troppo elevate e verso valle troppo basse; nella direzione destra sinistra si è persa la poca aderenza che c'era con il valore originale.

$$\alpha_g = 1 * 10^{-6} \frac{1}{T} \qquad \alpha_{cls} = 1,3 * 10^{-5} \frac{1}{T}$$

Si deduce che il valore del coefficiente termico del calcestruzzo va ridotto invece che aumentato.

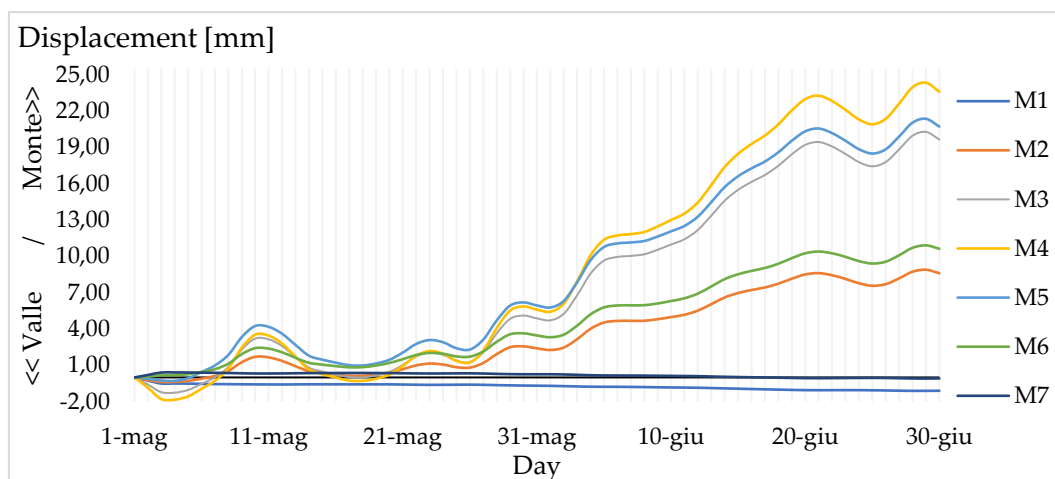


Figura 7.4.1 - Andamento degli spostamenti del modello verso monte

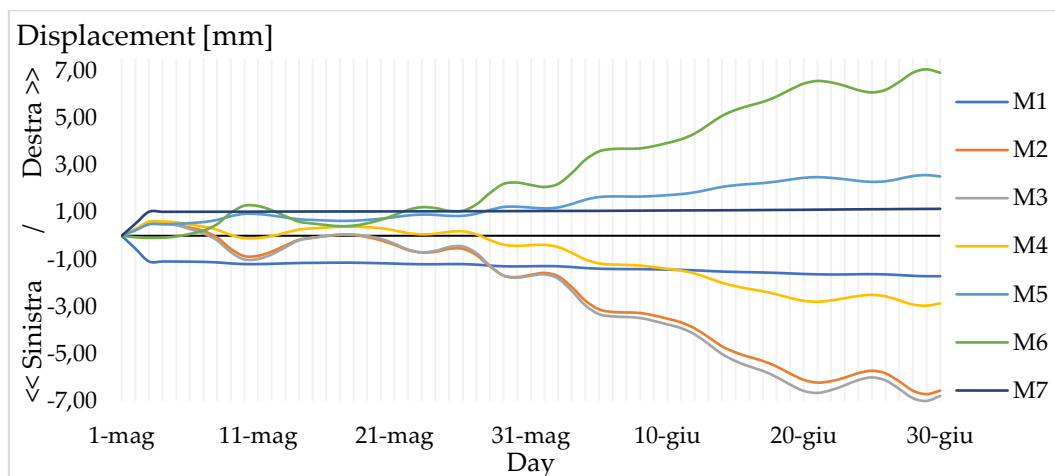


Figura 7.4.2 - Andamento degli spostamenti del modello verso destra

- Modello 2

In ragione di quanto detto prima, in questo modello viene ridotto il coefficiente termico del calcestruzzo.

$$\alpha_g = 1 * 10^{-6} \frac{1}{T}$$

$$\alpha_{cls} = 1,2 * 10^{-5} \frac{1}{T}$$

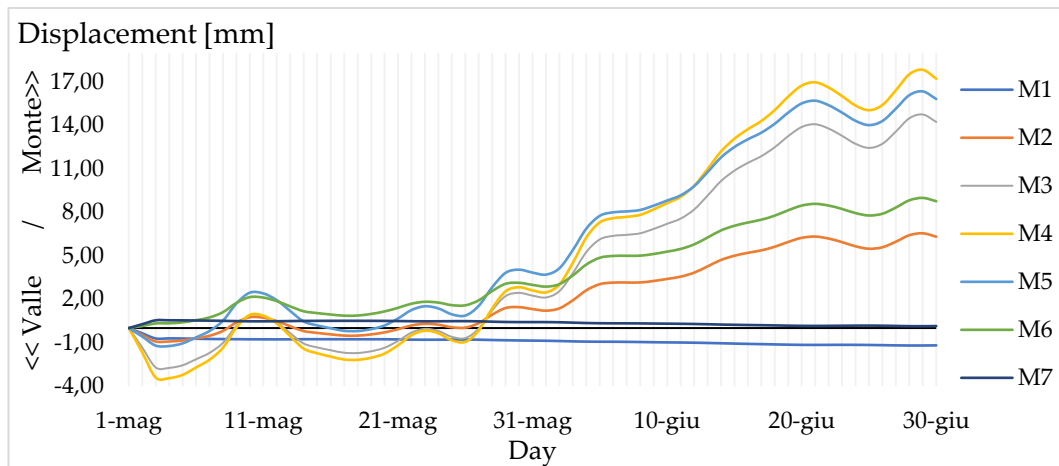


Figura 7.4.2 - Andamento degli spostamenti del modello verso monte

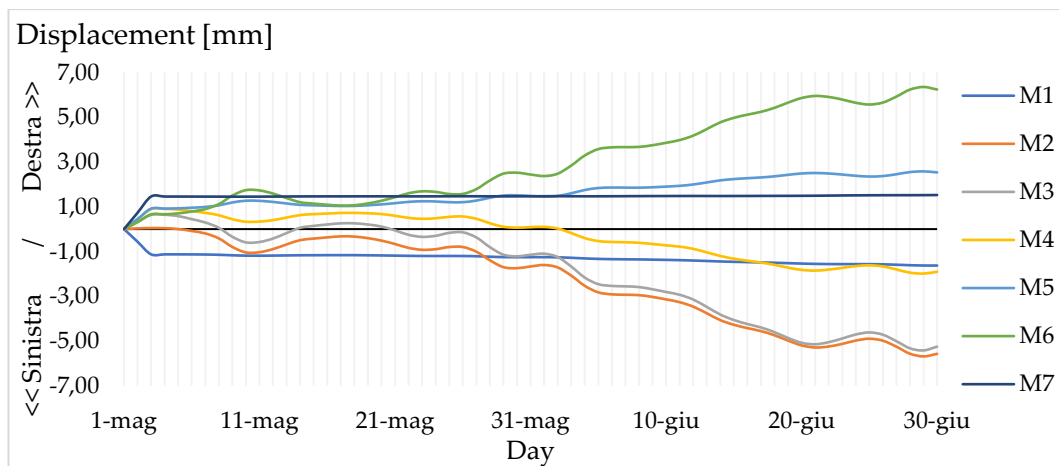


Figura 7.4.4 - Andamento degli spostamenti del modello verso destra

L'andamento generale tutte le curve non è cambiato, però si vede come l'entità delle deformazioni sia abbattuta rispetto al modello precedente in direzione valle-monte.

- Modello 3

In questo modello si fa aumentare il coefficiente termico del terreno e diminuire ancora quello del calcestruzzo:

$$\alpha_g = 1,1 * 10^{-6} \frac{1}{T} \quad \alpha_{cls} = 1,4 * 10^{-5} \frac{1}{T}$$

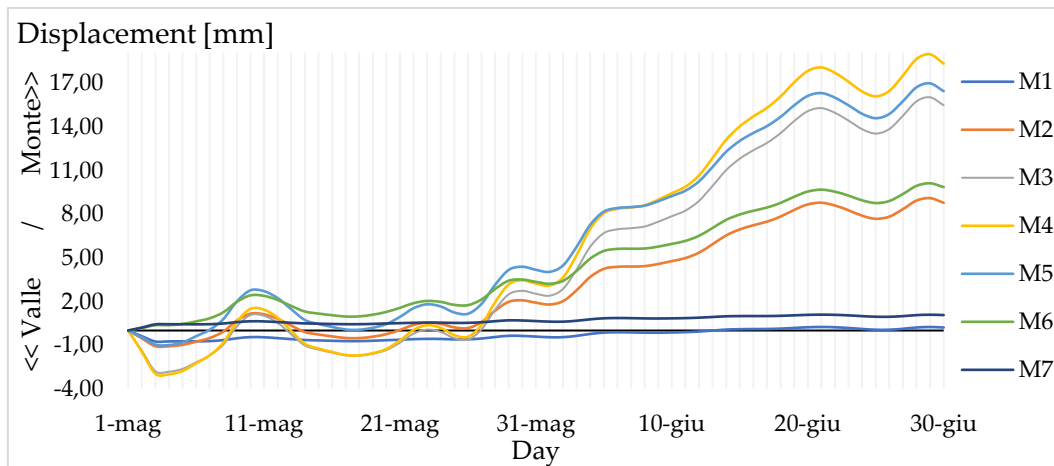


Figura 7.4.5 - Andamento degli spostamenti del modello verso monte

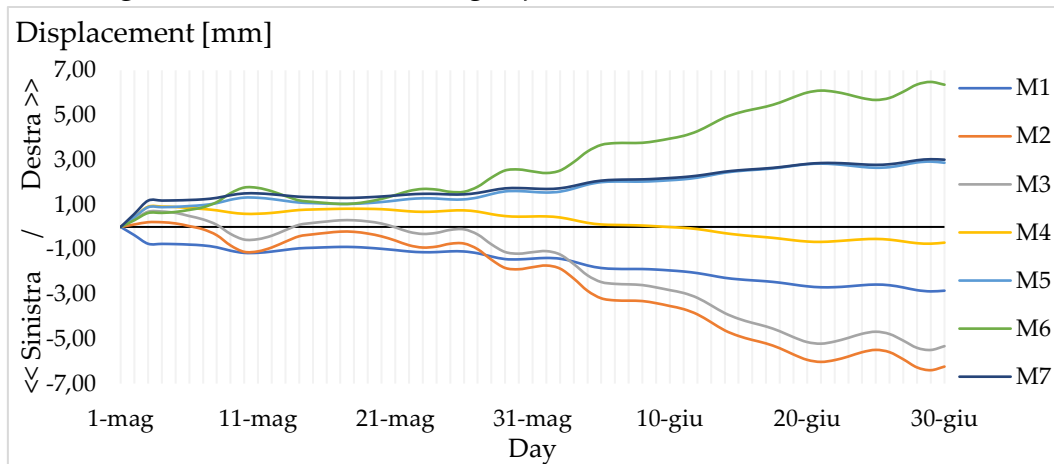


Figura 7.4.6 - Andamento degli spostamenti del modello verso destra

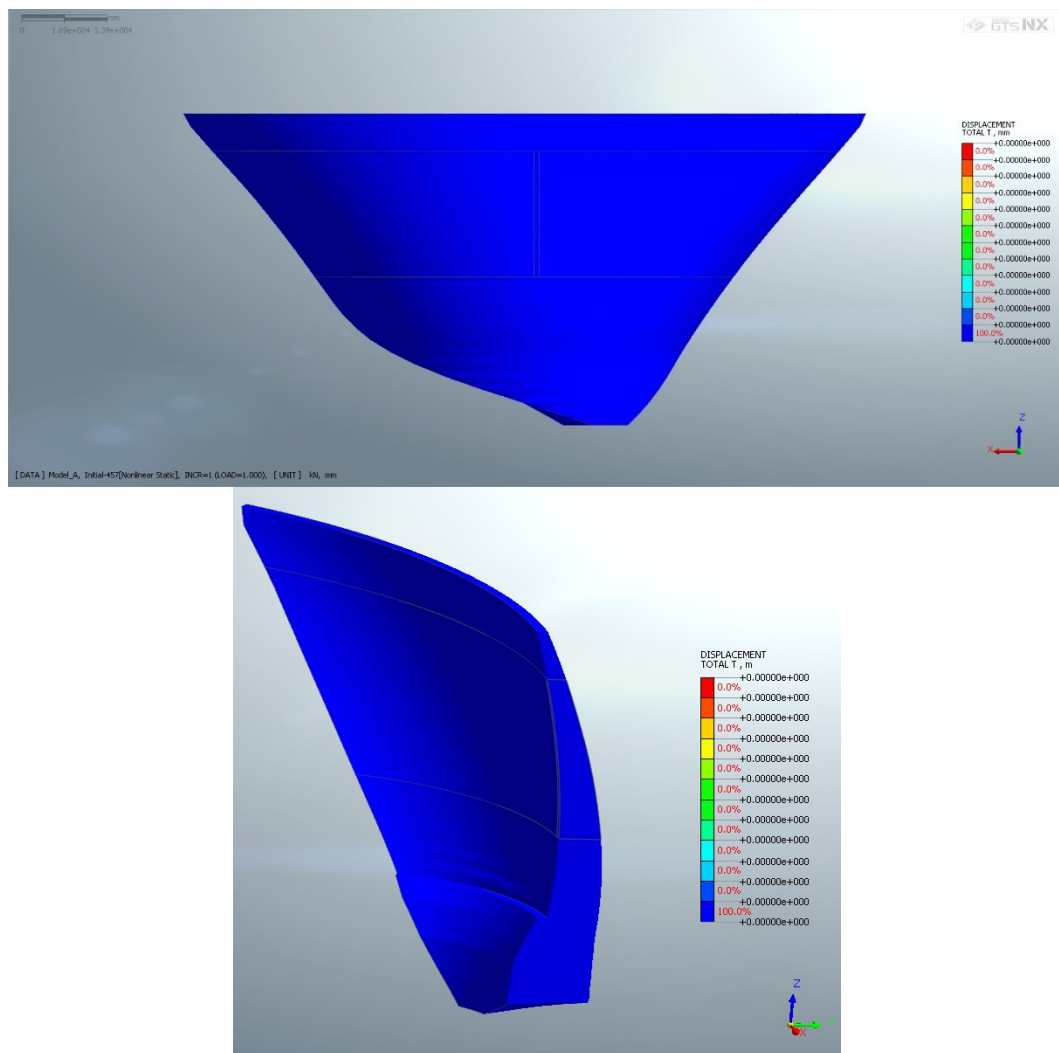
È questo il modello definitivo che offre il miglior confronto con i sensori.

Si apprezza la distanza in termini di deformazione tra i nodi più vicini alle imposte, quelli leggermente più distanti e i tre centrali per quanto riguarda la direzione monte; per la direzione destra invece si ha una chiara idea della simmetria del modello, a meno di un errore che si ritiene accettabile sulle deformazioni del sensore 5, che non è stato possibile, anche cercando altre combinazioni di coefficienti termici, migliorare.

7.5. Deformata totale del modello

Le temperature iniziali sono quelle espresse nel sottoparagrafo 5.6.1 in cui naturalmente gli spostamenti sono pari a 0.

Temperatura aria valle [°C]	Temperatura acqua [°C]	Temperatura aria monte [°C]
12,10	5,87	9,56

Figura 7.5.1 – *Stato iniziale*

Temperatura aria valle [°C]	Temperatura acqua [°C]	Temperatura aria monte [°C]
14,57	9,62	11,98

Dopo 20 giorni si assiste a un aumento di tutte le temperature e si vede come lo spostamento sia di entità maggiore al centro della diga, con un valore di circa 7 mm.

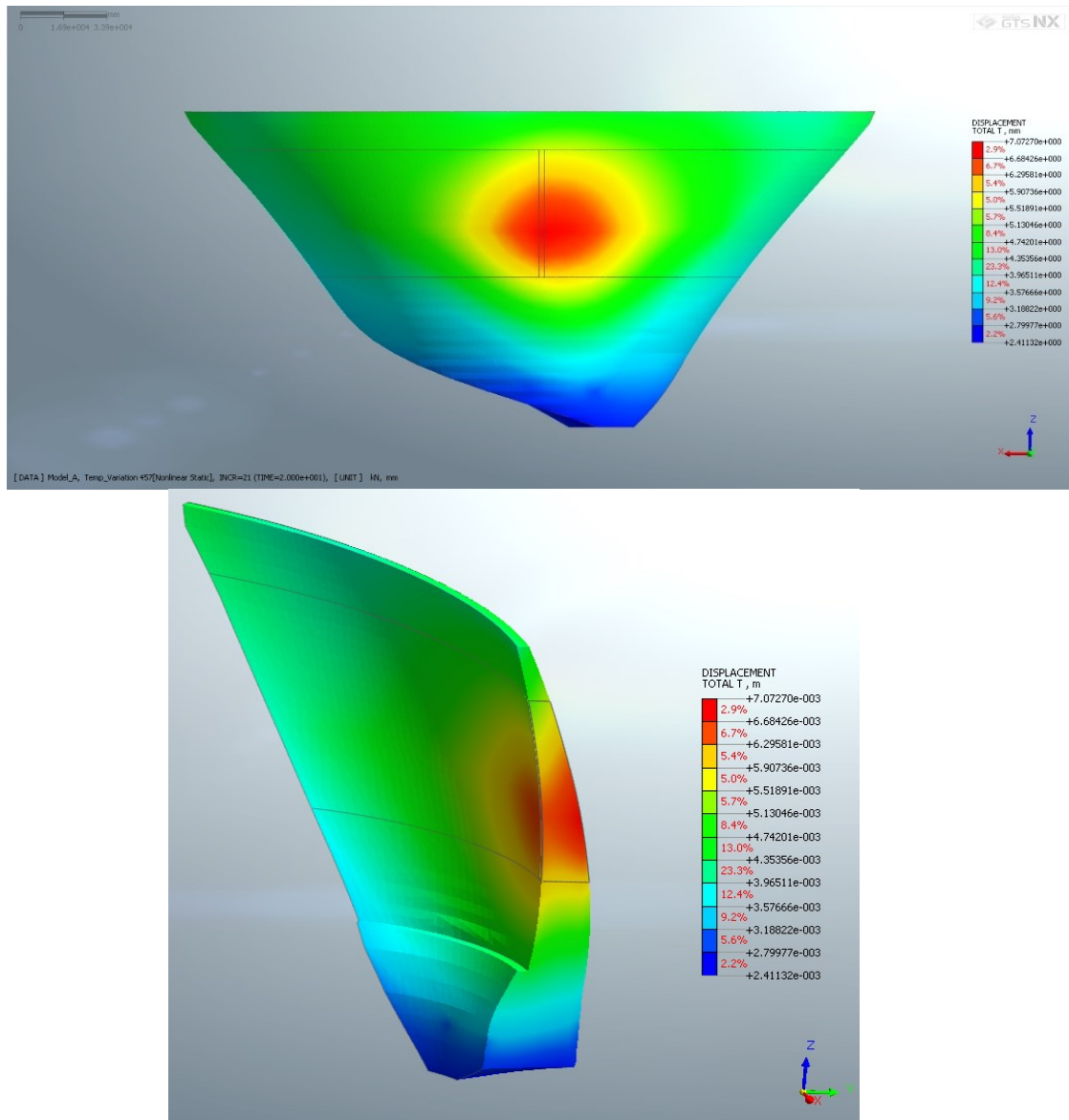


Figura 7.5.2 –Deformata dopo 20 giorni

Temperatura aria valle [°C]	Temperatura acqua [°C]	Temperatura aria monte [°C]
21,00	12,01	18,46

La tendenza delle temperature è ancora in aumento, lo spostamento subisce un forte rallentamento al centro della diga, il suo valore è infatti poco inferiore agli 8 mm, per spostarsi sulla fascia superiore, in particolare sul coronamento, dove si registrano 6 mm di spostamento in più rispetto allo step precedente.

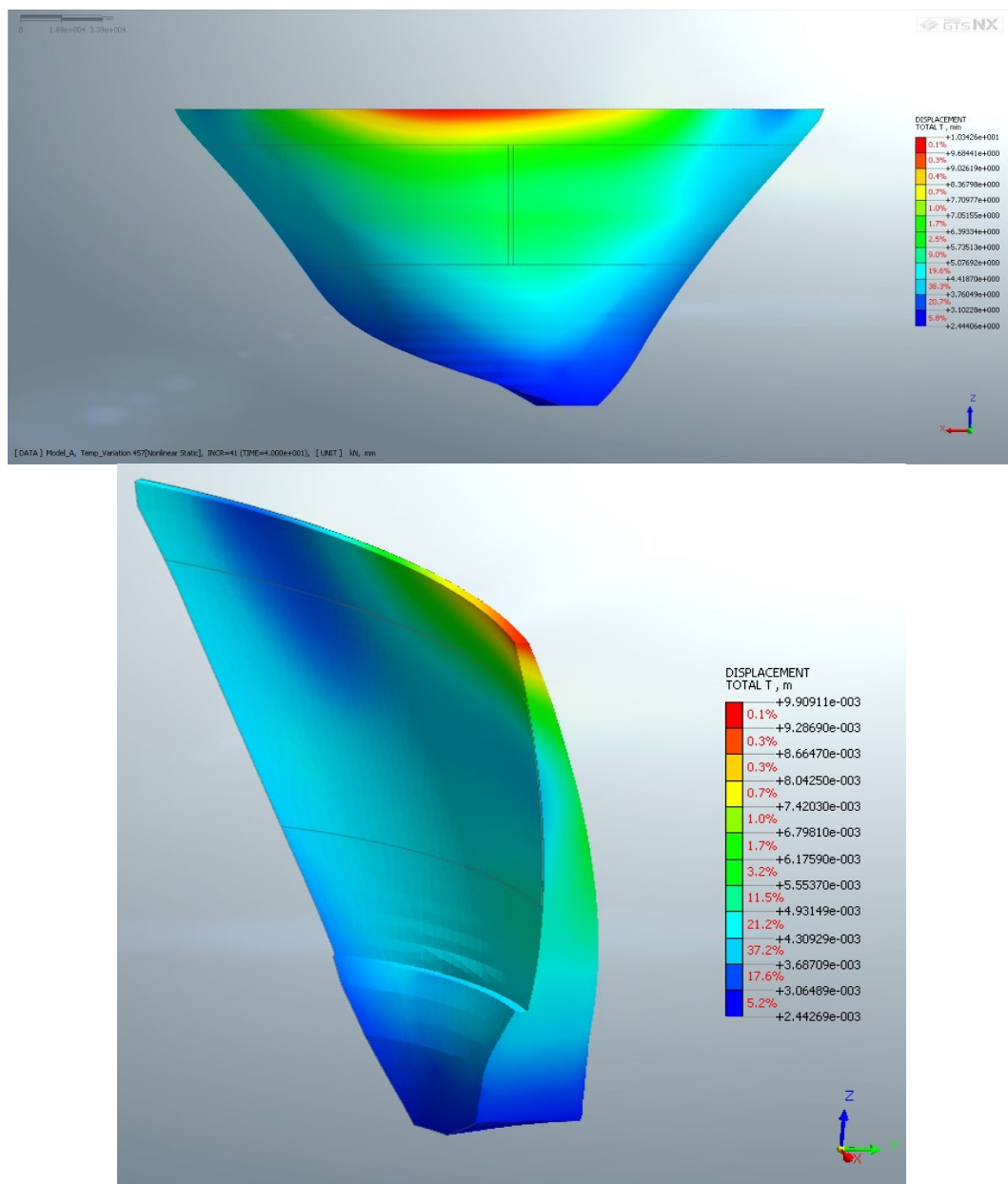


Figura 7.5.3 –Deformata dopo 40 giorni

Temperatura aria valle [°C]	Temperatura acqua [°C]	Temperatura aria monte [°C]
23,90	17,15	21,15

La temperatura è anche a questo step maggiore delle precedenti, tuttavia gli spostamenti avvengono in maniera contestuale sul coronamento e al centro della diga. La concentrazione dello spostamento però si accentra: la parte di diga vincolata dal terreno delle imposte si ferma ad uno spostamento di circa 3 mm.

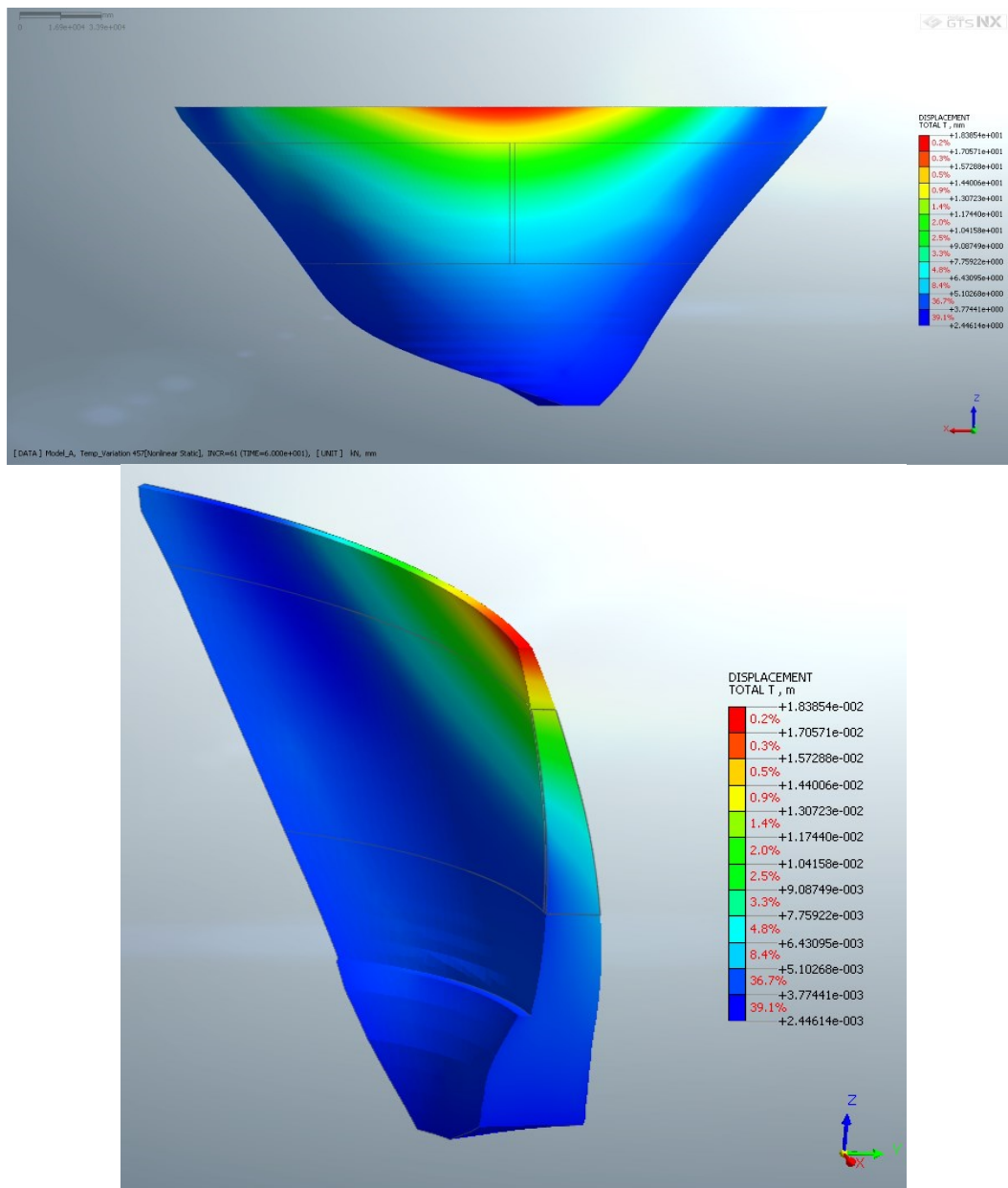


Figura 7.5.4 –Deformata dopo 60 giorni

8. Inserimento falda a quota 490 m. s.l.m.

Il capitolo finale vuole mostrare quale sarebbe l'andamento delle deformazioni con il modello predittivo che si è costruito.

Si inserisce quindi il livello della falda a 490 m slm, ripercorrendo lo stesso iter: si crea una superficie a quella quota, quindi la si taglia nei punti di contatto con il lato monte della diga e con il terreno.

Successivamente si adattano le temperature imposte ai nodi: si selezionano manualmente tutti i nodi della diga.

Quelli inglobati dal terreno (in rosso quelli sopra falda e in giallo quelli sotto il livello della falda) lato monte e lato valle:

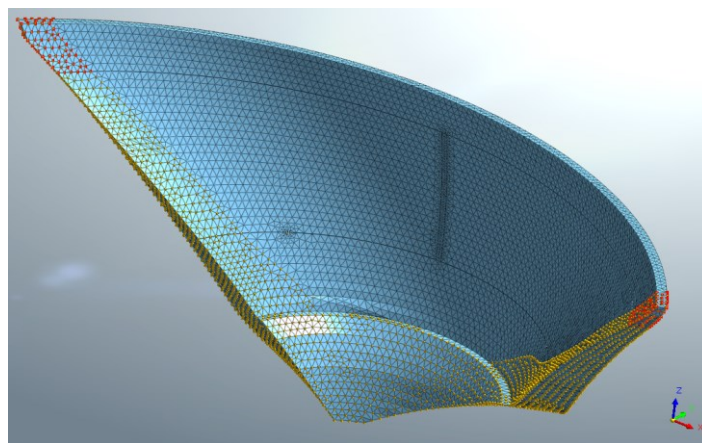


Figura 8.1 – *Prescribed temperature nodi interni (in giallo sottofalda e in rosso soprafalda)*

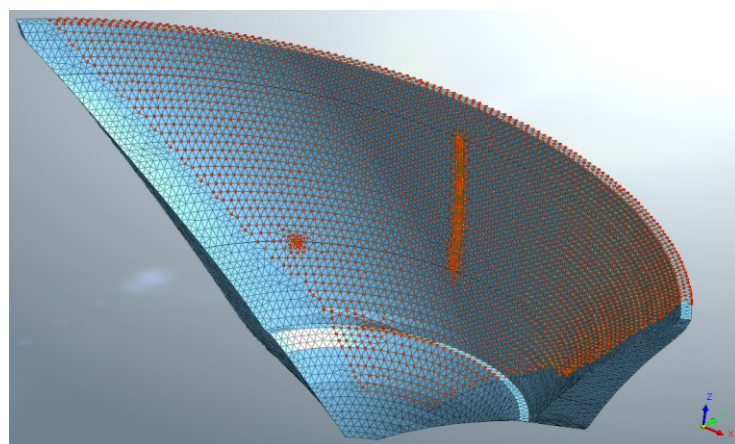


Figura 8.2 – *Prescribed temperature lato valle e coronamento*

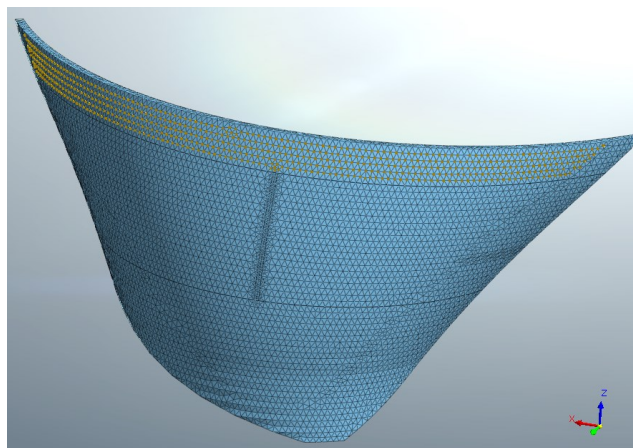


Figura 8.3 – *Prescribed temperature nodi a monte in aria*

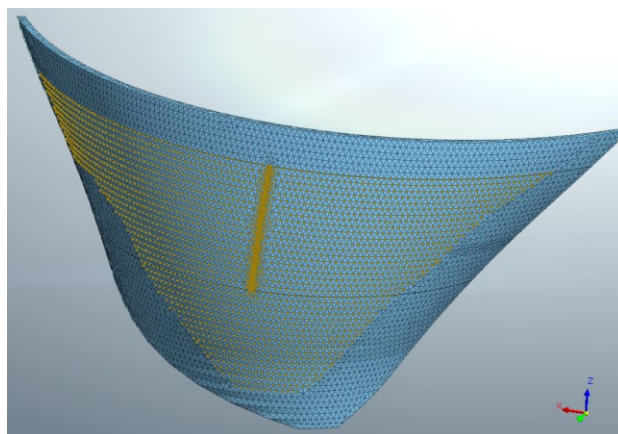
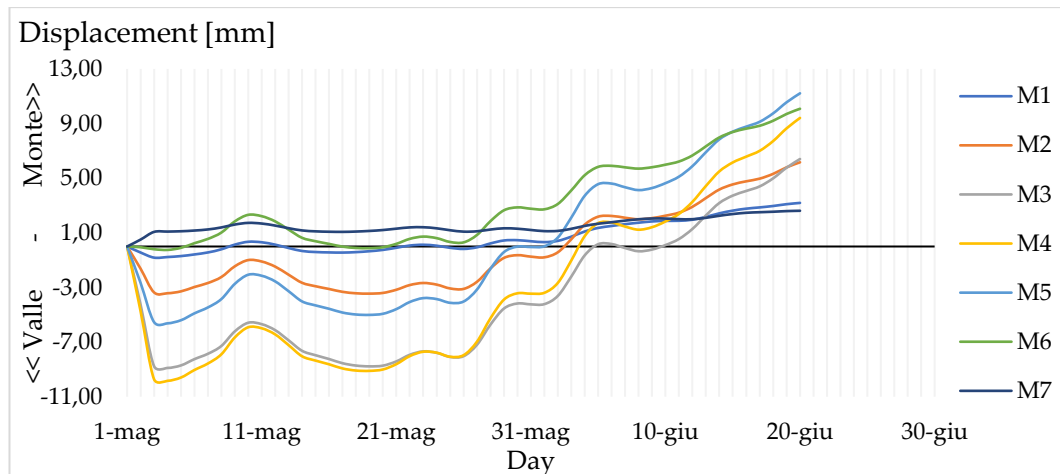


Figura 8.4 – *Prescribed temperature nodi a monte in acqua*

8.1. Andamento degli spostamenti con falda a 490 m slm

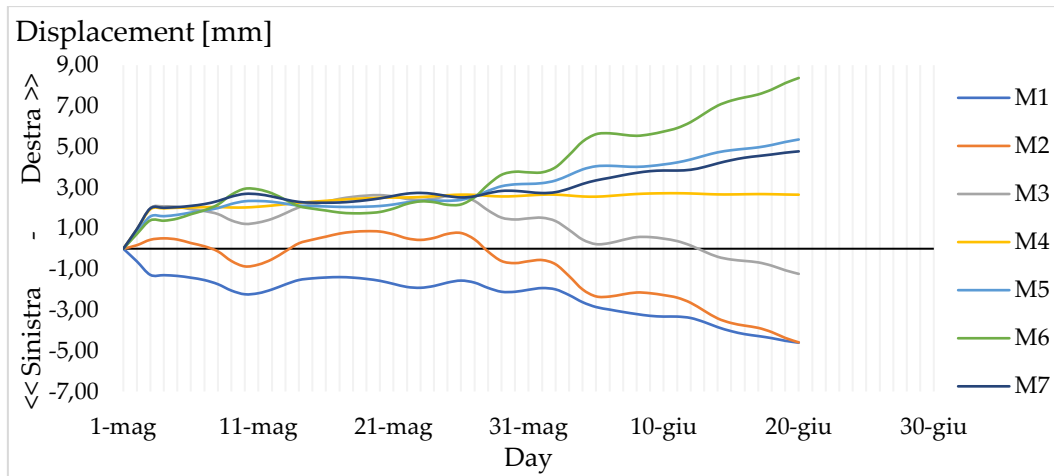
Con il livello d'invaso a questa quota, per gli spostamenti che il programma è riuscito ad estrarre, il risultato è quello mostrato nei grafici.

In direzione valle-monte si può dire che:



- i nodi rappresentativi delle mire più esterne M1 e M7 si spostano di una quantità leggermente superiore di quella che ci si aspetterebbe, ma hanno un andamento che può essere ancora accettabile;
- il nodo rappresentativo della mira M4 sembra seguire le previsioni nei primi giorni, con uno spostamento più accentuato verso valle, visto l'innalzamento dell'invaso, spostamento che non riesce a recuperare in direzione monte, dove la diga dilata sicuramente meno;
- i nodi rappresentativi delle mire M2 e M6 si spostano insieme, coerentemente con quanto osservato negli altri modelli, e dall'andamento delle curve, la previsione è che superino in termini di spostamenti, quelli dei nodi rappresentativi delle mire M3 e M5: gli spostamenti vengono localizzati agli estremi della diga;
- in ultimo i nodi rappresentativi delle mire M3 e M5, coerenti con M2 e M6: spostamento maggiore verso valle che verso monte.

Nella direzione sinistra-destra si perde la simmetria che nei modelli precedenti era più visibile:



- il nodo rappresentativo della mira centrale M4 ha una tendenza più spiccata a spostarsi verso destra;
- il nodo rappresentativo di M1, essendo quello più lontano dall'imposta con il terreno, compie uno spostamento notevole verso sinistra, che supera in modulo quello dei nodi rappresentativi delle mire M2 e M3;
- lo stesso non accade per i nodi rappresentativi delle mire M5, M6 e M7, qui l'andamento rimane sovrapponibile a quello osservato con livello d'invaso pari a 457,5 m.

9. Conclusioni

Si ritiene che il modello cui si è giunti sia ben rappresentativo della realtà osservabile dall'interpretazione dei dati.

La calibrazione termica si è conclusa con particolare successo per i nodi alla quota di 490 m slm: complice qui lo spessore ridotto del calcestruzzo, l'andamento delle curve relative alla temperatura del nodo interno e del sensore interno mostrano una buona somiglianza.

Meno visibile è stata la stessa calibrazione per il nodo interno alla quota di 440 m slm, tuttavia si è ritenuto un ottimo risultato aver ottenuto, a questa quota, un andamento delle curve relative alla temperatura che fosse sovrapponibile, seppur conservando una differenza di temperatura tra nodi del modello e sensori.

Più soddisfacente è stata invece la calibrazione meccanica, si apprezza infatti come l'andamento degli spostamenti di tutte le curve rappresentative di tutte le mire poste sul coronamento sia sovrapponibile a quello delle mire stesse con una buona precisione: si distingue la fase iniziale in cui gli spostamenti sono più o meno costanti, sia in direzione monte che in direzione destra; si ha una chiara idea della simmetria del modello nelle curve degli spostamenti in direzione destra e si apprezza in ultimo il concetto di avanzamento che la diga compie verso monte nel periodo in cui le temperature raggiungono i loro massimi annuali.

Con superficie della falda a 490 m slm invece il modello ha condotto l'analisi non lineare ma non è stato in grado di completarla sui 60 giorni che si avevano come riferimento arrivando ad ottenere risultati fino al 50esimo giorno.

I risultati uscenti però sembrano coerenti con quanto ci si aspetta: l'entità degli spostamenti in direzione monte si riduce, in favore di una deformazione più accentuata verso il lato valle: la pressione che il dislivello di acqua crea sul calcestruzzo grava maggiormente durante la fase iniziale.

Vista l'affidabilità del modello nei periodi esaminati, per provare a raggiungere l'obiettivo annunciato all'inizio del lavoro, però, si può pensare a delle soluzioni che aumentano senz'altro il grado di dettaglio dello studio.

Prospettiva 1. Estendere l'analisi ad un periodo non più di due mesi come si è fatto in questa fase di sola calibrazione ma su un orizzonte temporale di un anno, valutando contestualmente di studiare un maggior numero di livelli di invaso.

Conducendo uno studio di questa complessità si potrebbe arrivare a determinare il livello d'invaso ottimale in funzione della temperatura ambientale e dell'invaso stesso, stabilendo a priori soglie limite per gli spostamenti e margini di sicurezza.

In questo contesto sarebbe utile estendere il confronto con i dati acquisiti non solo alle mire poste sul coronamento e ai sensori presenti alle quote di 440 m slm e 490 m slm scelti per il presente studio. Sono a nostra disposizione, si ricorda, informazioni dalla stazione totale formata dagli estensimetri e dalle fibre ottiche.

Prospettiva 2. Vedere in che modo i parametrici meccanici, in particolare la resistenza del terreno di fondazione, entrano in gioco sugli spostamenti che compie il terreno e in che modo questi influenzano la diga. Eventuale fase di calibrazione degli stessi.

Inserire nel modello anche un approfondimento relativo agli aspetti geologici stratigrafici per capire se la presenza di strati di differente resistenza meccanica possano restituire una differente risposta deformativa della diga; infine, in tale contesto, anche l'introduzione nel modello di possibili fenomeni di filtrazione presenti nel terreno attorno all'opera potrebbe completare l'analisi, rendendola ancor più affidabile.

Riferimenti bibliografici

A. A. Abdulrazeg, J. Noorzaei, M. S. Jaafar, P. Khanehzaei, T. A. Mohamed (2014). Thermal and structural analysis or RCC double curvature arch dam. *Journal of civil engineering and management*, **vol. 3**, Tab. 2 pag 440.

R. Ballarin (2020/21). Tesi dal titolo “Interazione terreno-struttura indotta da sollecitazioni cicliche in una diga a doppio arco”

Fogli Excel “Ponte Cola_Indaco”;

“Ponte Cola_Invaso”;

“Ponte Cola_Temperature”;

“Ponte Cola_Rototraslazione”;

“Ponte Cola_Temperature_Smoothed”;

“Ponte Cola_Confronto_MIDAS-MATLAB”;

“Ponte Cola_Stazione_Totale_Coronamento”;

PDF “Ponte Cola_Anidel”;

“Ponte Cola_Ribacchi_Caratteristiche_Meccaniche”;