

5. La diga del Gleno: storia, rilievo, diagnostica e analisi strutturali nel centenario dal disastro

di *Michele Bianchessi, Simone Rapelli, Ruggero Folli, Pietro Azzola, Denny Coffetti, Monica Resmini, Alessio Cardaci e Andrea Belleri*¹

Introduzione storica sulle dighe

Sin dall'antichità si è capito quanto fosse importante per l'uomo riuscire a controllare i corsi d'acqua per soddisfare le proprie necessità idropotabili, agricole ed energetiche. Per conseguire questo obiettivo si è pertanto ricorsi alla costruzione di sbarramenti artificiali, i quali prendono il nome di dighe. La costruzione di queste opere consente la formazione di laghi artificiali, atti a contenere una sufficiente quantità di fluido mediante il quale poter soddisfare il fabbisogno agricolo ed industriale.

Generalmente si tende a dimenticare quanto siano importanti le dighe per un Paese o per una comunità. Infatti, senza di esse sarebbe più difficoltoso programmare e garantire la produzione di energia elettrica durante tutto l'anno, nonché l'alimentazione idrica dei centri urbani e dei campi agricoli fondamentali al sostentamento della popolazione.

Storicamente, è stata proprio l'agricoltura il settore trainante attraverso il quale si incentivò la realizzazione di serbatoi artificiali, infatti grazie ad essi è possibile ottenere evidenti vantaggi in termini di produttività e resa dei terreni. Inoltre, sempre più spesso molti Paesi risultano essere soggetti a lunghi periodi di siccità, ed è proprio in questi frangenti che viene risaltata l'importanza della disponibilità di una riserva idrica con cui programmare una corretta irrigazione dei terreni agricoli durante tutto l'anno. Con il passare dei

¹ Il lavoro è frutto della riflessione condivisa degli autori, ciascuno secondo le proprie competenze disciplinari. Supervisione a cura di Andrea Belleri. Gli autori ringraziano la Comunità Montana di Scalve e il Dott. Davide Tontini per la disponibilità mostrata e per la condivisione del materiale documentale, Enel Green Power Italia S.r.l. per aver consentito lo svolgimento dell'attività sperimentale di acquisizione dei dati necessari all'esecuzione delle analisi, mediante l'accesso ai ruderi, ai ricoveri di proprietà e tramite il trasporto della strumentazione, l'ing. Marco Bosio e il sig. Daniele Di Marco del Laboratorio Prove Strutturali dell'Università degli Studi di Bergamo per il supporto durante l'esecuzione delle prove sui ruderi della diga. Le opinioni espresse nell'articolo sono quelle degli autori e non riflettono necessariamente le opinioni delle varie persone e organismi nominati.

secoli le tecniche ed i materiali impiegati per la costruzione degli sbarramenti acquiferi sono cambiati, così come sono variati gli scopi per il quale si realizzavano queste opere. In particolare, in seguito alla rivoluzione industriale, la crescente necessità di fonti di energia che supportassero le attività produttive, portò a considerare la realizzazione di bacini idrici artificiali che potessero essere utilizzati per la produzione di grosse quantità di energia elettrica².

È possibile dire che l'evoluzione delle dighe nel susseguirsi dei secoli è stata veicolata dalle esigenze che le popolazioni nutrivano, le quali ebbero un'evoluzione nel corso della storia. D'altro canto, anche l'esperienza ha giocato un ruolo fondamentale, portando a prediligere certe tipologie costruttive rispetto ad altre, il tutto in relazione alle condizioni ambientali e sociali, che ne determinarono le risposte progettuali. Nel corso della storia la tecnologia nella costruzione delle dighe ha determinato due macrocategorie principali: le dighe a materiali sciolti, realizzate in terra, pietrame o una combinazione dei due materiali, e le dighe murarie, realizzate in pietrame e legante o, a partire dal secolo scorso, realizzate in calcestruzzo. Per una classificazione più accurata è possibile fare riferimento all'ultimo aggiornamento delle norme tecniche italiane in materia, ovvero il «Decreto Ministeriale del 26 Giugno 2014 – Norme Tecniche Dighe»³, le quali distinguono le dighe da un punto di vista costruttivo morfologico, definendo le seguenti tipologie: dighe in calcestruzzo a gravità (ordinarie o alleggerite), dighe in calcestruzzo a volta (ad arco, ad arco gravità, a cupola), dighe a materiali sciolti, traverse fluviali, dighe di tipo misto e di tipo vario.

La scelta della tipologia di diga da realizzare dipende da innumerevoli fattori e non esistendo una tipologia di diga “migliore” o più sicura di un'altra, è necessario procedere con una valutazione specifica caso per caso. Tra queste valutazioni, troviamo di particolare importanza l'esecuzione di un'accurata indagine geotecnica preliminare, atta all'individuazione della compatibilità tra la conformazione geologica locale e la nuova costruzione. Allo stesso tempo, è fondamentale scegliere correttamente i materiali adottati in fase di costruzione. Infatti, nel caso di dighe a gravità risulta molto importante la stabilità e la compattezza del piano di appoggio dello sbarramento, mentre per le dighe ad arco è necessario prestare particolare attenzione alle pareti laterali della gola da sbarrare, alle quali è richiesto di supportare le spinte generate dall'arco stesso; pertanto, dovranno avere idonee caratteristiche meccaniche di compattezza e stabilità (Mantica, 1992).

² Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Storia delle dighe. 2022 reperibile online.

³ Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. D. Min. II.TT. 26 giugno 2014 - NT Dighe. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 2014.

1. Dighe della Bergamasca al 1923

Nel suo resoconto dedicato alle dighe e ai serbatoi realizzati e in corso di edificazione in Italia a tutto il 1923, Carlo Bonomi (1924) descrive, seppure brevemente, le caratteristiche di 84 manufatti completati e 48 in corso di realizzazione, suddividendo queste opere per provincia di appartenenza. Per ognuno indica il corso d'acqua o lago di afferenza, il nome del serbatoio, la capacità in metri cubi, l'altezza massima in metri lineari, gli aspetti costruttivi, la ditta concessionaria, ed eventuali osservazioni. Le tipologie indicate sono le più varie, ma tra queste emergono per diffusione, tra quelle realizzate, le dighe: a gravità di muratura in calcestruzzo; in terra; a gravità di muratura e malta curve o rettilinee. Quest'ultimo sistema rimane tra i più utilizzati anche per le dighe in fase di edificazione nel 1923, affiancato in termini numerici dal sistema a volte/archi multipli in calcestruzzo armato.

Nella Bergamasca le dighe e serbatoi costruiti entro il 1923 sono cinque: del lago Nero (a gravità di muratura in malta, 1910, 1919-20), del lago Aviasco (di muratura di pietrame a secco con manto impermeabile, ultimata nel 1923), del lago Campelli (a volta di calcestruzzo, finita nel 1920), del lago Sucotto (parte in muratura a secco e parte in calcestruzzo armato a volta, conclusa nel 1923), tutte in Valgoglio, nel bacino del fiume Serio; a queste si aggiunge la diga di Bondione (a gravità di muratura in malta curva, completata nel 1922), sul fiume Serio nel bacino Adda-Po. I primi quattro sbarramenti erano in esercizio all'Azienda Elettrica Crespi & C., mentre l'ultimo alla Soc. An. Alti Forni, Fond. e Acciaierie Franchi-Gregorini.

Sette gli impianti ancora in fase di realizzazione nel 1923: laghi Gemelli e lago Colombo (torrente Borleggia), lago Piano del Becco e lago Marcio, tutti del bacino Brembo-Adda-Po; lago Sardegnana (fiume Brembo), bacino Adda-Po. Al bacino del fiume Serio appartenevano i manufatti del lago Nero e Cernello in Valgoglio. Questi ultimi due erano gestiti dall'Azienda Elettrica Crespi & C., i precedenti dalla Società Forze Idrauliche alto Brembo. Le prime cinque dighe erano a gravità di muratura in malta con planimetria curva o rettilinea, mentre le ultime due (Valgoglio) erano a volte multiple (Bonomi, 1924: pp. 36-37, 56-57). L'elenco non contempla la diga del Gleno perché fuori esercizio a causa del crollo di un settore avvenuto il 1° dicembre 1923⁴.

⁴ La letteratura sul disastro della diga del Gleno è ampia; per un quadro d'insieme (anche se non esaustivo) si rimanda alla *Bibliografia delle dighe italiane. Raccolta dei riferimenti bibliografici di memorie concernenti dighe italiane pubblicate su riviste o in atti di congressi/simposi/seminari*, a cura del Comitato Italiano Dighe, 2019 reperibile online.

2. La diga del Gleno, tra storia ed ingegneria

La diga del Gleno fu un'opera ingegneristica all'avanguardia per l'epoca di costruzione. Il progetto fu realizzato all'inizio del Ventesimo secolo, ed è possibile classificare quest'opera come uno sbarramento ad archi multipli. Il manufatto si pone in prossimità della vallata di pian del Gleno in provincia di Bergamo, e ai piedi dell'omonimo monte. Quest'ultimo svetta all'interno del parco delle Alpi Orobie, nelle vicinanze del passo che separa la Valle di Scalve dalla val Seriana. All'interno di questo contesto, nei pressi dell'abitato di Vilminore di Scalve, scorre il torrente Povo, il quale fu individuato dall'azienda manifatturiera Fratelli Viganò di Ponte Albiate come corso d'acqua da sbarrare per poter realizzare la propria centrale idroelettrica nel 1916, ottenendo così l'indipendenza energetica per i propri stabilimenti cotonieri. Il bacino era posto ad una quota di circa 1500 metri di altitudine, con un pelo libero di massimo invaso previsto a 1548 metri s.l.m.

L'origine dello sbarramento va fatta risalire al 1907 quando venne richiesta la concessione per derivare acqua dai corsi dei torrenti Nembo e Povo sulla scorta di un progetto che contemplava un serbatoio al piano del Gleno a firma dell'ing. A. Tosana incaricato da Giacomo Trümpy. Con la morte di quest'ultimo nell'aprile del 1914 la concessione passò all'ing. Giuseppe Gmür che a sua volta la cedette nel 1916 alla filatura Galeazzo Viganò (Pedersoli, 1973; Barbisan, 2007; Baroni *et. al.*, 1924). Nel 1919 iniziò la costruzione dell'opera secondo le direttive definite dall'ing. Giuseppe Gmür, il quale sviluppò il progetto [presentato al Genio Civile nel maggio 1919 e approvato nel marzo 1921 (Pedersoli, 1973; Barbisan, 2007)] per la realizzazione di una diga a gravità realizzata in blocchi di pietra squadrati congiunti tra loro con malta di calce idraulica, componendo così uno sbarramento in muratura.

Il primo lotto dei lavori fu appaltato alla ditta Paccani-Bonaldi-Marinoni (Pedersoli, 1973). In seguito ad avvenimenti che si manifestarono durante la costruzione dell'opera, la direzione e lo studio del progetto furono affidate all'ing. Giovanni Battista Santangelo, il quale, venuto a conoscenza delle nuove direttive presenti nelle norme redatte da parte del Consiglio Superiore delle Acque in materia di dighe a gravità, propose alla ditta mandataria di cambiare la tipologia di sbarramento da realizzare, virando verso l'innovativa modalità delle dighe ad archi multipli.

Con quest'ultima variazione il progetto prevedeva di mantenere invariata l'idea di chiudere la gola dove si adagiava il letto del torrente con una struttura massiccia in muratura, mentre si prevedeva di limitare l'adozione della tipologia ad archi multipli alla sola fascia superiore dello sbarramento. In particolare, il nuovo progetto prevedeva in planimetria la realizzazione di una parte di manufatto con sviluppo arcuato, la quale si sarebbe raccordata a due pareti rettilinee laterali (fig. 1). Per tutto lo sviluppo dell'opera si

mantenne la stessa sezione per gli elementi, al netto della quota di innesto con il terreno. Infatti, il progetto si basava sulla realizzazione di speroni aventi uno sviluppo in altezza al massimo di 29.5 m, i quali venivano collegati tramite delle volte con spessore variabile tra i 40 cm nella zona posta a quota maggiore, fino ad arrivare ad uno spessore massimo di 80 cm. Questi elementi furono progettati per assorbire i carichi derivanti dalla pressione idrostatica e lavorare in condizioni di compressione o al più in condizioni di pressoflessione.

Nell'ottobre del 1923 l'opera fu completata e si ebbe il primo invaso completo con il raggiungimento della quota di pelo libero dell'acqua pari a 1548 metri s.l.m. Questo avvenimento costituì per gli ingegneri del Genio Civile di Bergamo un valido collaudo dell'opera. Inoltre, il 23 ottobre 1923 il sig. Viganò e l'ing. Santangelo accompagnarono l'ing. Lombardi e l'ing. Sassi a visitare l'impianto, i quali non riscontrarono alcuna anomalia a livello strutturale. Il serbatoio rimase pieno per 46 giorni, fino a quando il 1° dicembre 1923 si verificò il crollo parziale della diga e la conseguente distruzione di interi centri abitati in seguito al riversamento dell'ingente quantitativo di acqua e detriti provenienti dall'invaso. Questo avvenimento rientra nel novero dei disastri nazionali del secolo scorso per la gravità dei danni materiali e immateriali che ne conseguirono (Barbisan, 2007).

In seguito al crollo della diga del Gleno furono istituite due commissioni di periti, una nominata dal Tribunale di Bergamo ed una dalla ditta costruttrice. In entrambi i casi gli ingegneri incaricati avevano il compito di far chiarezza sull'accaduto. Il processo penale, volto a condannare i potenziali colpevoli del disastro, durò circa tre anni e volse al termine senza mai accertare e definire le reali cause scatenanti il crollo. Per formulare un giudizio in merito alle possibili cause, i periti svolsero delle prove di caratterizzazione del materiale, con la finalità di determinarne la bontà e la coerenza con quanto prescritto in fase progettuale. Dunque, dopo aver prelevato dai ruderi della diga quattro provini, furono svolte in primo luogo delle valutazioni volte alla determinazione del peso specifico dei campioni prelevati, ottenendo dei risultati che si attestavano intorno a 2150 kg/m^3 . Questo valore può essere considerato coerente con le prescrizioni fatte dall'ing. Santangelo in fase progettuale. Dopo aver determinato la densità del calcestruzzo, si eseguirono delle prove distruttive tramite le quali si determinò la resistenza a compressione del materiale. Queste analisi evidenziarono dei risultati fortemente variabili a seconda della sezione di provenienza del provino. Infatti, era possibile registrare degli sforzi di rottura pari a 4.5 MPa relativamente al provino prelevato a monte del tampone. Un valore simile fu ottenuto in seguito alla prova del provino prelevato dalla sezione del secondo pilone, il quale raggiunse la rottura del materiale ad uno sforzo pari a 5 MPa. Viceversa, in seguito alle prove eseguite sul provino prelevato dalla soletta in calcestruzzo armato realizzata all'interfaccia tra il tampone in muratura e la

diga ad archi multipli, si registrò uno sforzo di rottura del materiale pari a 10.5 MPa. Parallelamente alle indagini svolte sui materiali, gli ingegneri incaricati esaminarono anche l'aspetto statico della struttura, formulando ipotesi attraverso le quali svilupparono i calcoli per poter determinare le sollecitazioni agenti all'interno delle volte, dei piloni e del tampone (fig. 2). Sia i periti dell'accusa che quelli della difesa valutarono gli effetti generati dall'applicazione del carico gravitazionale e della spinta idrostatica mediante l'adozione di metodi di calcolo semplificati di tipo vettoriale, elaborando delle ipotesi di partenza rilevanti ai fini dell'interpretazione dei risultati ottenuti.

Tramite questa rielaborazione dei calcoli, i periti furono in grado di determinare una sollecitazione di compressione massima alla base del pilone pari a 1.2 MPa, inferiore al carico di rottura determinato tramite le prove svolte sui provini estratti (Baroni *et. al.*, 1924; Ganassini e Danusso, 1924).

3. Gli effetti legati al crollo

Nel corso del secolo scorso il progetto, la costruzione e la rovina della diga del Gleno sono stati spesso materia di discussione da parte degli esperti sia a livello nazionale che internazionale. Tutto questo interesse nei confronti di quest'opera a livello ingegneristico è dettato dal fatto che nei primi decenni del diciannovesimo secolo, le dighe ad archi multipli hanno rappresentato il nuovo riferimento nel campo delle opere di ritenuta, diventando oggetto di interessanti studi e ricevendo molti consensi in tutto il globo. L'esaltazione per gli innumerevoli vantaggi presenti nella realizzazione di questa tipologia di dighe spinse l'ing. Eastwood, convinto fautore delle opere alleggerite, a considerarla come la «diga definitiva», il massimo che la tecnica potesse offrire dal punto di vista ingegneristico ed il punto d'arrivo insuperabile nello sviluppo delle tecnologie per la progettazione e la costruzione delle dighe di ritenuta⁵. In questo clima di forte ottimismo sembrò che, da lì in avanti, tutte le grandi opere di sbarramento sarebbero state costruite seguendo l'illusoria perfezione di questa tecnologia, eliminando ogni nuova traccia di opere realizzate tramite le classiche tecniche legate alle costruzioni a gravità, le quali venivano considerate obsolete. Il crollo della diga del Gleno, avvenuto il 1° dicembre 1923 capovolse completamente la situazione, generando un clima di differenza verso la progettazione e la costruzione di dighe ad archi multipli. Tutto ciò venne confermato dallo stallo che avvenne in seguito all'ultimazione del lavoro della commissione di verifica incaricata dal governo, quando alcune dighe ad archi multipli in costruzione, precedentemente considerate anche fin troppo robuste, vennero modificate diventando dighe a gravità. Questo aspetto si manifestò anche all'estero, dove i

⁵ Si veda, Collegio degli Ingegneri Ferroviari Italiani (1924).

piani di realizzazione delle dighe vennero rivisti, con committenti e progettisti che preferivano sostenere un maggior costo per la realizzazione di dighe massicce, sostenendo di aver maggiori garanzie relativamente a durabilità e sicurezza (Jackson, 2005).⁶

È possibile classificare il disastro legato al crollo della diga del Gleno come uno di quegli eventi avversi che, in seguito al suo avvenimento, fece nascere non poche preoccupazioni nelle menti dei tecnici ed ingegneri, i quali non erano in grado di dare una risposta certa all'opinione pubblica che si domandava se il problema fosse insito nella tipologia della diga o se invece fosse imputabile ad altre cause. In particolare, uno dei più grandi timori risiedeva nel fatto che i possibili errori commessi nella progettazione e realizzazione della diga del Gleno avrebbero screditato l'opinione pubblica nei confronti delle grandi opere di ingegneria civile, portando potenzialmente al blocco di alcune iniziative per diffidenza nei confronti della reale sicurezza offerta dall'opera e minando la credibilità delle tecniche italiane. Furono infatti numerosi i tecnici stranieri che effettuarono sopralluoghi nell'ottica di capire le cause di tale crollo, e che peraltro colsero l'occasione per esprimere un'opinione personale in merito al lavoro dei colleghi italiani. La discussione sul disastro del Gleno e gli studi approfonditi riguardanti le possibili cause del fallimento hanno introdotto aspetti innovativi nel dibattito scientifico, tra i quali la reale padronanza che l'ingegnere ha degli strumenti che gli consentono di progettare un'opera e la correttezza delle ipotesi adottate nella semplificazione dei problemi di calcolo (Oddone, 1924). In merito a questo argomento, sono molto significative le parole espresse da molti esperti dell'epoca secondo cui nelle opere di ingegneria la maggior parte degli incidenti hanno come fattore comune quello dell'imprevisto. In particolare, in una diga difficilmente la rovina può derivare dalla spinta generata dall'acqua presente nell'invaso, dato che questa costituisce il carico più scontato e prevedibile, nonché la più facile da contrastare con una buona progettazione. Per questo motivo, è generalmente possibile attribuire le cause del disastro a fattori o fenomeni non previsti o sottovalutati all'interno dei modelli di calcolo utilizzati nella progettazione.⁷ All'epoca i metodi di calcolo delle sollecitazioni presenti nelle dighe, seppur semplificati, erano già abbastanza accurati, come precise erano le tecniche che si adottavano per controbilanciare eventuali sollecitazioni nocive. Quindi, il problema fondamentale sta nel fatto che il progettista può minuziosamente determinare i carichi e le spinte agenti sull'opera che progetta, ma non è in grado di garantire che nella struttura avvenga l'attuazione delle ipotesi su cui si è basata la fase di calcolo, così come non è in grado di prevenire l'intensità massima di determinate

⁶ Si veda, Direzione generale per le dighe e le infrastrutture idriche, *Le prime dighe e le prime lezioni della storia*, https://dgdighe.mit.gov.it/categoria/_storia_delle_dighe.

⁷ Si veda, Direzione generale per le dighe e le infrastrutture idriche, *Le prime dighe e le prime lezioni della storia*, https://dgdighe.mit.gov.it/categoria/_storia_delle_dighe.

forze naturali che, soprattutto in contesti ambientali come quello alpino, possono arrivare a superare le sollecitazioni ottenute in seguito all'applicazione degli ampi coefficienti di sicurezza adottati in fase progettuale.

Il crollo della diga del Gleno portò ad avere delle ripercussioni sia a livello di opinione pubblica, come appena trattato, sia a livello normativo. Infatti, le vittime ed i danni causati da questo disastro hanno rappresentato un forte avvertimento sia per i progettisti ed i costruttori di dighe, che per le figure pubbliche incaricate a salvaguardare le vite e gli averi della popolazione a cui facevano capo. Esaminando il quadro normativo che regola la costruzione e la gestione delle opere di sbarramento è evidente come il crollo della diga del Gleno segnò una delle prime occasioni in cui si capì l'importanza del controllo governativo sulle grandi opere, comportando di fatto la necessità di istituire delle forme di controllo come il Servizio Dighe. Infatti, in seguito a quell'avvenimento venne presa coscienza sulla primaria importanza relativa al fatto che gli organi statali debbano esprimere un parere in merito alla conformità del progetto delle grandi opere idrauliche e che si assicurino continuamente che questo non venga modificato durante la fase costruttiva, istituendo anche un controllo sui materiali utilizzati e sulle modalità di posa in opera. In particolare, le norme tecniche italiane in materia di dighe hanno subito un processo di evoluzione che è partito già in una fase precedente rispetto al disastro, infatti, il «Regio Decreto numero 1285 del 14 agosto 1920»⁸ definiva gli enti deputati alla verifica del progetto, alla sorveglianza della costruzione ed all'esecuzione del collaudo. Tuttavia, a seguito del crollo della diga del Gleno, il governo, con la primaria necessità di tutelare l'incolumità pubblica, decise di intervenire affidando ad una commissione l'incarico di effettuare un accurato controllo di tutte le opere di sbarramento presenti sul territorio italiano, con la delega di poter indicare gli eventuali provvedimenti necessari alla messa in sicurezza. La commissione incaricata, insieme alla relazione conclusiva dei lavori, presentò alcune possibili ipotesi di modifica del regolamento vigente, introducendo norme specifiche molto restrittive per la costruzione di opere idrauliche, prevedendo anche forti sanzioni per i trasgressori. Inoltre, si incentivarono controlli periodici strumentali relativi a perdite e deformazioni, con la finalità di esaminare l'evoluzione nel tempo dello stato di salute dell'opera in esercizio.⁹

Al giorno d'oggi, le grandi opere idrauliche sono soggette a controlli da parte della Direzione Generale per le Dighe e le Infrastrutture idriche ed elettriche, facente capo al Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. L'autorità prevede la possibilità di realizzare nuovi paramenti solamente a seguito del rilascio di un certificato di approvazione tecnica del progetto, che avviene

⁸ R.D. 14 agosto 1920 n.1285, "Approvazione del regolamento per le derivazioni e utilizzazioni di acque pubbliche."

⁹ CISL funzione pubblica, *Registro italiano dighe: Ricostituzione in ente pubblico*, Roma, 2008.

esclusivamente se l'opera rispetta rigorosamente le indicazioni della normativa in riferimento agli aspetti ambientali ed alla sicurezza idraulica, derivante dalla realizzazione e dalla gestione dell'opera nel suo complesso.

4. Il rilievo fotogrammetrico dei ruderi della diga del Gleno

Le tecnologie moderne di rilievo si basano sul rilievo indiretto, ovvero le misure sono ottenute a partire da strumenti ottici, meccanici o informatici di grande precisione attraverso i quali è possibile ottenere una traduzione grafica degli oggetti rilevati all'interno di un sistema di coordinate spaziali. In particolare, la strumentazione disponibile oggi sul mercato permette di effettuare rilievi ad alta precisione attraverso la definizione di una rete topografica, la quale viene realizzata tramite l'acquisizione delle coordinate Global Navigation Satellite System (GNSS) di punti di controllo a terra noti, anche detti Ground Control Point (GPC). Questa tecnica consente di ottenere un'accuratezza del dato registrato di circa 0.5 mm, a scapito di un basso numero di informazioni presenti nel dato ottenuto. Viceversa, mediante l'ausilio di un sistema aereo a pilotaggio remoto, meglio noto come drone, è possibile documentare il dettaglio dei manufatti acquisendo informazioni con un'accuratezza di circa 5 cm, registrando tuttavia dei dati ad alto contenuto di informazioni.

L'integrazione di queste tecniche indirette di rilievo consente all'operatore di restituire un modello 3D del manufatto rilevato caratterizzato da un alto numero di informazioni legate alla grafica, mantenendo tuttavia un'accuratezza a livello geometrico molto al di sotto dei limiti di tolleranza richiesti, essendo l'elemento vincolato alla rete topografica mediante i punti di controllo a terra.

L'applicazione di tali tecniche al rilievo dei ruderi della diga del Gleno è avvenuta in più fasi. In una prima fase, è stato svolto il rilievo indiretto mediante la determinazione di una rete topografica attraverso il posizionamento di punti di controllo a terra, definiti tramite dei marker, e registrandone le coordinate GNSS. Successivamente, ricorrendo all'uso di un aeromobile a pilotaggio remoto si è proceduto con l'acquisizione dei dati fotogrammetrici, i quali sono stati trattati in un secondo momento tramite l'ausilio di un software di fotogrammetria. L'analisi e l'elaborazione dei dati acquisiti ha fatto sì che fosse possibile realizzare un modello 3D rappresentativo dei ruderi della diga del Gleno, il quale risulta essere caratterizzato da parametri geometrici e grafici ad alta risoluzione, come è possibile osservare nell'ortofoto di fig. 3.

Infine, una volta realizzato il modello 3D fotogrammetrico, si è reso necessario realizzare un modello geometrico 3D in modo tale da poter procedere successivamente con lo studio dei ruderi con analisi strutturali. Nel

dettaglio, la ricostruzione geometrica 3D dei ruderi si è basata sulle tavole di progetto elaborate dall'ingegner Santangelo nel 1923. La sezione realizzata è stata confrontata con quella restituita in fase di rilievo rendendo possibile valutare gli scostamenti tra le due nuvole di punti investigate. I modelli 3D utilizzati per il confronto sono riportati in fig. 4.

In seguito all'allineamento delle due nuvole di punti, è stato possibile eseguire un'analisi degli scostamenti tra i vertici che le costituiscono, utilizzando come riferimento la nuvola del modello fotogrammetrico. Da questo processo ci si aspetta che le due nuvole di punti abbiano una buona corrispondenza, con errori massimi che nell'ordine dei 50 cm. Questo scostamento massimo prende in considerazione sia l'errore legato all'allineamento manuale delle due nuvole di punti, che l'errore di graficismo legato alla scala con cui è stato rappresentato il progetto. Nel caso oggetto di studio, si è fatto riferimento a delle tavole di progetto realizzate in scala 1:200, con un errore riferito all'approssimazione della carta pari a ± 5 cm. Il risultato del confronto (fig. 5) mostra una deviazione media di circa 10 cm, il che rappresenta una buona accuratezza della sezione ricostruita. Sulla base dei risultati ottenuti è possibile dire che il modello geometrico 3D è sufficientemente rappresentativo della realtà, per questo motivo sarà possibile sviluppare delle analisi sperimentali tramite lo studio del modello ad elementi finiti, a partire dal modello ricostruito dal rilievo fotogrammetrico¹⁰.

5. Identificazione dei materiali attraverso prove sperimentali

Partendo dall'analisi dei documenti storici è stato possibile individuare informazioni utili in merito alle proprietà meccaniche e alle modalità di posa in opera del calcestruzzo con cui è avvenuta la costruzione della parte di paramento ad archi multipli. Valutando attentamente la documentazione prodotta in fase processuale dai periti incaricati, si è potuto constatare che le analisi visive e sperimentali svolte si indirizzarono principalmente sullo studio del tampono murario, considerato dagli esperti l'elemento causante il crollo. Furono pronunciati pareri negativi anche in merito al calcestruzzo utilizzato per la costruzione del paramento ad archi multipli, ritenendo il materiale e le modalità di posa adottate di scarsa qualità. In seguito a prove sperimentali eseguite in laboratorio, si riscontrò una forte aleatorietà dei risultati, come riportato nel certificato riportato in fig.6.

A partire dai dati storici, sono state condotte nell'ottobre del 2022 delle analisi visive e delle prove sperimentali mediante le quali si è valutata la qualità della matrice cementizia ad un secolo dalla posa in opera, tenendo quindi in considerazione gli effetti legati all'esposizione del materiale agli

¹⁰ Si veda, R. Folli (2023).

agenti atmosferici. Dall'analisi dei ruderi della diga è stato possibile confermare il giudizio riguardante l'aspetto superficiale del calcestruzzo riportato nella perizia dei Proff. Ganassini e Danusso (1923).

A conferma di quanto indicato nelle testimonianze processuali è stato possibile riscontrare con l'analisi visiva la presenza di un materiale eterogeneo lungo tutto lo sviluppo della diga (fig.7). In seguito a questa fase di studio preliminare, si è proceduto con la valutazione del materiale tramite prove sperimentali non distruttive, quali indagini sclerometriche e ultrasoniche. Queste prove hanno permesso di valutare qualitativamente lo stato di conservazione e le proprietà materiche dello strato superficiale delle aree analizzate.

Osservando i risultati ottenuti dalle prove sclerometriche riportati in fig. 8 è stato possibile osservare che negli strati più corticali delle regioni investigate la matrice cementizia si presenta in condizioni omogenee, con una qualità del materiale che è da ritenersi medio-bassa. Tuttavia, per validare quanto appena illustrato, è stato necessario procedere con l'esecuzione di prove ultrasoniche nelle medesime aree di interesse (fig. 9). Con questa tecnica è possibile analizzare il materiale ad una profondità maggiore.

Sulla base delle informazioni raccolte si è osservato che, sebbene la matrice cementizia sia relativamente omogenea nello strato più corticale, analizzandola più in profondità tramite prove ultrasoniche, si un discreto grado di eterogeneità. Questo aspetto si riscontra anche in fase di analisi del modulo elastico apparente del materiale, dove si è registrato un valore massimo pari a 12.9 GPa. È stato quindi assunto un intervallo di valori di modulo elastico apparente compreso tra i 3 e i 12 GPa.¹¹

6. Identificazione dinamica e caratterizzazione del materiale

Con il termine identificazione dinamica si intendono tutte quelle tecniche che consentono l'individuazione delle proprietà dinamiche di un sistema strutturale quali frequenze proprie, smorzamenti e forme modali a partire da dati registrati in situ, quali ad esempio le accelerazioni dovute a fenomeni ambientali (es. microtremiti) o indotte da sistemi meccanici (es. vibrodine). Al fine di validare le caratteristiche elastiche dei materiali ottenute tramite la campagna diagnostica precedentemente descritta, è stata condotta una campagna di identificazione dinamica sperimentale sui ruderi della diga del Gleno dove, a partire dalle accelerazioni registrate sul coronamento, è possibile risalire all'entità dei parametri caratterizzanti il comportamento dinamico della struttura. L'approccio sperimentale rappresenta uno dei principali campi di studio nell'ambito del monitoraggio delle opere di ingegneria civile ed edile, in quanto è un metodo di analisi non distruttivo, aspetto per cui può

¹¹ Si veda S. Rapelli (2023).

essere applicato per ricavare informazioni fondamentali in merito alle caratteristiche dei materiali e allo stato di salute di strutture esistenti anche in condizioni di degrado.

Nel caso in esame, è stata svolta la campagna di acquisizione dei dati in situ con l'obiettivo di identificare i modi di vibrare del manufatto e le relative frequenze per poi calibrare modelli agli elementi finiti utilizzati per la successiva analisi strutturale. Al riguardo sono stati disposti degli accelerometri monoassiali sul coronamento dei ruderi della diga in modo da ricavare le accelerazioni in direzione perpendicolare rispetto allo sbarramento (fig. 10). Il segnale è stato acquisito mediante il metodo denominato Operational Modal Analysis (OMA), misurando le vibrazioni della struttura associate a eventi naturali quali il vento o micro-vibrazioni del terreno. L'ordine di grandezza di questi input è generalmente di un milionesimo dell'accelerazione di gravità, quindi risulta fondamentale disporre di strumenti con una sensibilità tale da consentire la ricezione del segnale.

Al termine della fase di acquisizione dei dati, si è proceduto con una fase di trattamento delle registrazioni seguita da una fase di applicazione di algoritmi matematici per l'identificazione dinamica. A titolo d'esempio, si riportano in questa sede i risultati ottenuti tramite l'analisi del periodogramma di Welch, un metodo di stima spettrale nel dominio delle frequenze. Restituendo graficamente i risultati dell'analisi dei periodogrammi, sono stati identificati due potenziali allineamenti nell'intorno della frequenza di 10.2 Hz, come rappresentato in fig. 11.

Terminata la fase di elaborazione dei dati acquisiti in situ, si è passati alla ricostruzione del modello geometrico 3D dei ruderi della diga del Gleno per calibrare il modello a elementi finiti da utilizzare nelle successive analisi strutturali. Come introdotto precedentemente, la restituzione del solido è stata ottenuta interpolando le geometrie ricavate dalle tavole di progetto con le sezioni ottenute dal modello 3D fotogrammetrico (fig. 12).

Una volta definito il modello geometrico 3D, il solido ottenuto è stato modellato agli elementi finiti, attribuendo le caratteristiche elastiche del materiale riportate nelle perizie del tribunale, quindi una densità pari a 2150 kg/m^3 e un modulo elastico pari a 20.8 MPa. Le analisi dei modi di vibrare del modello così ottenuto (fig. 13 e fig. 14) hanno consentito di individuare due forme modali aventi una buona corrispondenza con quelle ricavate dalla campagna sperimentale. In particolare, le forme modali identificate fanno riferimento al III e al IX modo di vibrare del modello FEM, che sono riconducibili al I e II modo di vibrare globali della struttura.

Partendo dai risultati ottenuti in seguito all'applicazione del periodogramma di Welch è stato possibile determinare che la frequenza di riferimento per la struttura identificata è di circa 10.20 Hz. Tuttavia, le forme modali riportate in fig. 13 e fig. 14 sono associate ad una frequenza di 14.49 Hz e di 16.65 Hz, valori difforni rispetto a 10.20 Hz. Si può quindi evidenziare

che il calcestruzzo dei ruderi della diga presenta globalmente caratteristiche meccaniche differenti rispetto a quelle determinate dai periti incaricati. Questo può essere dovuto ad un degrado del materiale o ad errori di stima dell'epoca, in particolare alla stima del modulo elastico del calcestruzzo. Sulla base di queste premesse, è stato necessario procedere con la calibrazione del modello agli elementi finiti per individuare delle caratteristiche meccaniche compatibili con i dati sperimentali. In particolare, considerando che il metodo di determinazione della densità non è sostanzialmente cambiato, si assume un valore di 2150 kg/m^3 per la massa volumica, mentre per quanto riguarda il modulo elastico si è proceduto con la ricerca di un nuovo valore all'interno del range di valori ottenuti dall'analisi diagnostica.

Dalle analisi di calibrazione del modello, è stato possibile determinare un intervallo di modulo elastico che portasse a una corrispondenza in termini di frequenza tra quella ricavata da identificazione dinamica e quella ottenuta dal modello agli elementi finiti. In particolare, i valori a cui fare riferimento variano tra 8 GPa e 10.5 GPa, ovvero un intervallo compatibile con quello definito precedentemente, ma con un range ridotto rispetto alle sole prove sui materiali. Al termine delle indagini globali, procedendo con il calcolo dell'errore medio delle frequenze, è stato possibile determinare quale valore di modulo elastico fosse più compatibile con entrambe le forme modali identificate. Tale valore si attesta su 9 GPa (fig. 15)¹². Tale valore è stato utilizzato per le analisi strutturali.

7. Analisi delle sollecitazioni

In seguito al crollo della diga del Gleno il presidente del Senato comunicò che il Ministero dei Lavori Pubblici aveva nominato un ispettore per collaborare all'organizzazione dei soccorsi ed indagare sulle possibili cause del disastro. Inoltre, furono nominate due equipe di tecnici con lo scopo di redigere le perizie, basate sulle indagini della documentazione, i rilievi e sugli studi delle possibili cause che diedero origine al disastro. Gli ingegneri incaricati da tribunale e imputati, iniziarono le loro indagini partendo da una disamina dei documenti progettuali elaborati dall'ing. Santangelo e rifecero i calcoli riguardanti i carichi a cui era sottoposta la struttura, prestando particolare attenzione alla stabilità degli speroni, del tampone e delle fondazioni. A tal fine, basandosi sui concetti ben noti della scienza delle costruzioni, attraverso i quali si enuncia che la verifica di stabilità di una costruzione è soddisfatta nel caso in cui l'insieme delle forze che agiscono sul manufatto risultano essere in equilibrio tra loro. Nel caso specifico si considerarono i carichi derivanti dal peso proprio degli elementi e la pressione idrostatica

¹² Si veda S. Rapelli (2023).

nella condizione di pieno carico del bacino, come avvenne al momento del crollo. Entrambe le equipe di tecnici, all'interno delle relazioni, adottarono dei metodi di calcolo semplificati.

Mediante la raffigurazione di una sezione comune di uno sperone del paramento in calcestruzzo armato, in fig. 16 è possibile osservare il calcolo semplificato delle sollecitazioni. In seguito a questi studi, i tecnici giunsero alla conclusione che la stabilità della costruzione fosse soddisfatta in ogni punto della sezione, infatti, lo sforzo di compressione massimo (1.2 MPa), identificato in prossimità della base del pilone lato valle, era minore della capacità a compressione del calcestruzzo. Oltre ciò, le analisi mostrarono che la risultante degli sforzi sezionali era tale da portare a sole sollecitazioni di compressione nelle varie sezioni. Sulla base di tali calcoli lo sbarramento di pian del Gleno poteva ritenersi appropriato.

Nel corso degli ultimi cento anni sono stati fatti enormi progressi a livello di conoscenze nell'ambito delle costruzioni e dei materiali, accompagnati ed agevolati dal progresso tecnologico. Infatti, al giorno d'oggi, grazie ad algoritmi di calcolo sofisticati, è possibile simulare fenomeni fisici complessi, come per esempio quello legato alla valutazione dello stato di sforzo degli elementi strutturali della diga del Gleno nelle condizioni di massimo carico. Tramite l'analisi agli elementi finiti è possibile ottenere soluzioni approssimate relative a problemi di varia natura. Nello specifico, partendo da un qualsiasi corpo continuo è possibile procedere con la discretizzazione dello stesso attraverso una serie di sottoinsiemi, passando così da un problema con un numero infinito di incognite ad un problema ridotto, di cui è possibile determinare l'approssimazione della soluzione in ambito numerico.

Sulla base degli studi affrontati nei capitoli precedenti, dove è stata illustrata e validata la ricostruzione di un modello 3D rappresentativo della geometria del paramento e sono state validate le caratteristiche meccaniche del materiale, sono state svolte delle analisi statiche in campo elastico lineare per valutare qualitativamente lo stato di sforzo degli elementi strutturali della diga. È bene precisare che i risultati di queste analisi non costituiscono un termine di paragone con quelli ottenuti nelle perizie giudiziarie.

Le analisi qualitative delle sollecitazioni sono state svolte su un modello 3D semplificato, rappresentativo degli elementi compresi entro tre generici piloni posti lungo lo sviluppo rettilineo del paramento. Il modello, posto sotto le condizioni di carico derivanti dall'azione del peso proprio della struttura e della spinta idrostatica generata dall'acqua dell'invaso, ha evidenziato la distribuzione degli sforzi riportata in fig. 17. Da tale distribuzione si osserva all'estradosso della sezione in chiave delle volte nella parte bassa, in una zona a contatto con l'acqua, una concentrazione di sforzi di trazione. Questo aspetto è di particolare interesse in quanto, sia dai calcoli svolti dal progettista che dai periti incaricati, non si ha traccia dell'instaurarsi di questo stato tensionale. La discrepanza dei risultati è dovuta all'ipotesi di uno stato

di sforzo piano nelle analisi condotte all'epoca, viceversa, con il modello tridimensionale analizzato è stato possibile considerare la distribuzione spaziale dello stato di sforzo, mettendo in luce un effetto "piastra" nella zona evidenziata, con valori di compressione dell'ordine dei 3MPa.

Valutando globalmente i risultati ottenuti dalle analisi elastiche lineari svolte sul modello semplificato e confrontandoli con quelli ricavati con modelli piani, si è osservato che le sollecitazioni di compressione determinate risultano compatibili nelle zone investigate dopo il disastro. Infatti, analizzando le sollecitazioni alla base di piloni lato valle è stato possibile determinare uno sforzo di compressione medio pari circa 1.6 MPa, ovvero il 33% in più rispetto a quello determinato nei calcoli post crollo. In tal senso, la discrepanza dei risultati potrebbe essere associata ad alcuni fattori, presumibilmente geometrici, che contribuiscono a generare concentrazioni di sforzo. È opportuno sottolineare che i risultati appena illustrati fanno riferimento ad analisi svolte in campo elastico lineare e sono perciò da intendersi qualitativi seppur mettano in luce importanti aspetti non evidenziati dalla modalità di analisi dell'epoca.¹³

Conclusioni

Il presente lavoro, di carattere divulgativo, ha avuto l'obiettivo di presentare in modo semplice le principali attività di ricerca condotte dai docenti del Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate dell'Università degli Studi di Bergamo nell'ambito del rilievo, della diagnostica, del monitoraggio e dell'analisi strutturale della diga del Gleno nel centenario dal crollo.

Il rilievo geometrico condotto tramite le moderne tecnologie ha permesso di definire un modello tridimensionale dei ruderi della diga del Gleno mostrando una buona corrispondenza tra costruito e progetto e permettendo la creazione di un modello a elementi finiti.

L'indagine diagnostica del calcestruzzo della diga, la registrazione delle accelerazioni ambientali sul coronamento e la successiva identificazione dinamica dei parametri dinamici dei ruderi hanno permesso di calibrare il modello agli elementi finiti e di caratterizzare le proprietà elastiche del calcestruzzo.

Il modello a elementi finiti così calibrato è stato successivamente utilizzato per l'analisi delle sollecitazioni tensionali degli elementi della diga sottoposti al peso proprio e alla spinta idrostatica nelle condizioni di massimo invaso. Le analisi condotte, pur rimanendo in campo elastico, hanno mostrato una zona sulle voltine con sollecitazioni di trazione lato monte non

¹³ Si veda M. Bianchessi (2023).

prevista dalle analisi dell'epoca e la concomitante presenza di sforzi di compressione più alti che nelle restanti zone.