



Sede Legale:
Via Lamarmora 230, 25124 Brescia
Sede direzionale e amministrativa:
Corso di Porta Vittoria 4, 20122 Milano
A2A/DGE/BGT/IMI/SII/OIC

Pratica: 10320	Intervento di miglioramento sismico della diga di Trepidò
Documento:	10320-C-OR-DTR-C-RT-217-1
Note:	Rif. M_inf.digheidrel.registro ufficiale.u.0009203.11-04-2019

**IMPIANTO IDROELETTRICO DI:
ORICHELLA**

**DIGA DI:
TREPIDO'**

**OGGETTO: Progetto Definitivo per l'intervento di miglioramento sismico della Diga di Trepidò
RELAZIONE METODOLOGICA SUI CONSOLIDAMENTI**

CONSULENTE:



Il progettista:
Dott. Ing. Marco Braghini

CONCESSIONARIO:



Visto
L'ingegnere Responsabile:
Dott. Ing. Paolo Valgoi

Visto
Il Legale Rappresentante:
Roberto Scottoni

TIPO DOCUMENTO:

RELAZIONE TECNICA

			LOMBARDI			A2A		
REV.	DATA	DESCRIZIONE DELLA REVISIONE	REDAZIONE	VERIFICA	APPROVAZIONE	REDAZIONE	VERIFICA	APPROVAZIONE
2								
1	27/10/2023	Prima emissione	C. Rossini	C. Crémer	M. Braghini	-	P. Valgoi	R. Castellano
0	04/10/2023	Emissione per commenti	C. Rossini	C. Crémer	M. Braghini	-	P. Valgoi	R. Castellano

IMPIANTI IDROELETTRICI DELLA SILA DIGA DI TREPIDÒ

PROGETTO DEFINITIVO INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO SISMICO



RELAZIONE METODOLOGICA SUI CONSOLIDAMENTI

1	27.10.2023	Ros	Cr
0	04.10.2023	Ros	Cr
Versione	Data	Redatto	Verificato

Lombardi SA Ingegneri Consulenti
Via del Tiglio 2, C.P. 934, CH-6512 Bellinzona-Giubiasco
Telefono +41(0)91 735 31 00
www.lombardi.group, info@lombardi.group

INDICE

1.	INTRODUZIONE	1
1.1	Struttura della relazione	2
2.	DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO	3
2.1	Generalità	3
2.2	Sbarramento principale e secondario - iniezioni	4
2.2.1	Iniezioni dal coronamento dello sbarramento principale	4
2.2.2	Iniezioni dal coronamento dello sbarramento secondario	5
2.2.3	Iniezioni dal paramento di valle dello sbarramento principale	6
2.3	Barre di cucitura in cresta	6
2.4	Ripristino superficiale del paramento di monte	7
3.	SPECIFICHE TECNICHE PER LE INIEZIONI	9
3.1	Generalità	9
3.2	Composizione della miscela d'iniezione	9
3.3	Metodologia di iniezione	9
3.3.1	Fondazione e contatto fondazione - roccia	9
3.3.2	Corpo diga	10
3.4	Modalità operative per l'esecuzione delle iniezioni	11
3.4.1	Prescrizione di carattere generale	11
3.4.2	Fasistica	12
3.5	Prove di controllo	13
3.5.1	Pre-intervento	13
3.5.2	Post-intervento	13
4.	CAMPO PROVA PER LE INIEZIONI	15
4.1	Generalità	15
4.2	Sbarramento principale	16
4.2.1	Ubicazione e schema geometrico	16
4.2.2	Accessibilità alle aree di valle	19
4.3	Sbarramento secondario	19
4.4	Procedura operativa	20

4.4.1	Fasistica e tempistiche	22
5.	INDAGINI PER IL RIPRISTINO DEL PARAMENTO DI MONTE	23

1. INTRODUZIONE

La diga di Trepidò (n. di archivio 85 – RID 39) si trova sul confine dei comuni di San Giovanni in Fiore (CS) e Cotronei (KR), ed è uno sbarramento a gravità in muratura di pietrame con fondazioni in calcestruzzo, di altezza massima di circa 32.50 m, formato da un corpo principale ad asse leggermente arcuato, collegato ad uno sbarramento secondario in calcestruzzo mediante un pilone di forma poligonale presente in sponda sinistra. Lo sbarramento genera il serbatoio dell'Ampollino nell'Altopiano della Sila ed è alla testa di un importante schema di impianti idroelettrici in cascata, di cui A2A è proprietaria e gestore. La diga è stata realizzata negli anni 1923-1927 quando ancora non esisteva una normativa nazionale specifica nel campo delle dighe ed il sito non era considerato zona sismica.

Nel dicembre 2015 la società CESI ha valutato, per conto di A2A, la vulnerabilità sismica della diga, ai sensi delle Norme Tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (DM 26/06/2014). Nell'aprile 2019 la DG DIGHE ha evidenziato la necessità di prevedere interventi principalmente finalizzati al miglioramento sismico dello sbarramento.

Nel settembre 2020 A2A trasmetteva alla DG DIGHE il progetto con l'analisi della fattibilità tecnica degli interventi di miglioramento sismico, redatto dalla società Lombardi, ed approvato dalla DG DIGHE stessa nel febbraio 2021. Il progetto prevedeva sia una serie d'interventi di rinforzo del corpo diga esistente, che la realizzazione di un rilevato in terra in adiacenza al paramento di valle dello sbarramento principale in muratura. Il progetto prevedeva anche una serie di attività propedeutiche al successivo livello di progettazione, finalizzate ad approfondire la conoscenza sia della diga che della roccia di fondazione, oltre alla conferma della geometria riportata negli elaborati progettuali storici. Tali approfondimenti si sono poi concretizzati in una campagna indagine in sito (agosto – novembre 2021) e successive prove di laboratorio sui campioni di materiale prelevato.

Nel presente documento, che è parte integrante del Progetto Definitivo degli interventi di miglioramento sismico della diga di Trepidò, si descrivono i principali interventi di consolidamento previsti in progetto: iniezioni di consolidamento, inserimento di barre di cucitura in acciaio, ripristino del manto superficiale del paramento di monte della diga. Con riferimento alle iniezioni di consolidamento, in questa relazione sono riportate anche le specifiche tecniche di esecuzione, che saranno approfondite in sede di Progetto Esecutivo a valle della realizzazione di un campo prove. Per il ripristino del paramento di monte sono invece previste delle indagini conoscitive, sempre in fase di Progetto Esecutivo, finalizzate a determinare lo stato di consistenza e gli spessori del rivestimento attuale in modo da definirne le modalità di rimozione, ma anche lo stato di consistenza del calcestruzzo della diga che farà da supporto al nuovo rivestimento, così da ottimizzare la composizione dei materiali del rivestimento stesso.

Le quote altimetriche indicate in progetto, ove non specificatamente indicato, sono quelle rilevate dal Politecnico di Milano nel 2019 che risultano essere traslate verso l'alto di 10,17 m rispetto a quelle

riportate nella documentazione storica della diga ed usualmente utilizzate; tale differenza di quota sussiste per l'intera asta idroelettrica.

1.1 Struttura della relazione

La relazione è articolata nei seguenti capitoli:

- **Capitolo 2 – Interventi di consolidamento**
Descrive lo schema e i principali obiettivi degli interventi di consolidamento previsti in progetto.
- **Capitolo 3 – Specifiche tecniche per le iniezioni**
Descrive le principali specifiche tecniche previste per l'esecuzione delle iniezioni.
- **Capitolo 4 – Campo prova per le iniezioni**
Definisce lo schema e le modalità operative per l'esecuzione di un campo prova per le iniezioni, utile al fine di tarare i parametri esecutivi delle stesse e verificarne l'efficacia.

2. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO

2.1 Generalità

Gli interventi di consolidamento della diga previsti nel presente progetto definitivo sono sintetizzati nella **Tabella 1** e descritti in dettaglio nei seguenti paragrafi.

INTERVENTO	OBIETTIVO
Sbarramento principale - Iniezioni Esecuzioni di iniezioni cementizie nel corpo diga, al contatto diga-fondazione e nei primi metri della roccia di fondazione dello sbarramento principale.	Consolidamento e riduzione della permeabilità del corpo diga, del contatto diga - fondazione e dei primi metri della roccia di fondazione
Sbarramento secondario - Iniezioni Esecuzioni di iniezioni cementizie nel corpo diga dello sbarramento secondario.	Consolidamento e riduzione della permeabilità della parte superiore del corpo diga
Barre di cucitura in cresta Installazione di barre passive in acciaio nella porzione superiore degli sbarramenti principale e secondario.	Consolidamento strutturale della parte sommitale della diga al fine di garantirne la stabilità nel caso di evento sismico.
Ripristino del manto superficiale del paramento di monte Demolizione parziale del rivestimento del paramento di monte e ricostruzione dello stesso con malta strutturale.	Miglioramento delle caratteristiche meccaniche e di tenuta del paramento di monte.

Tabella 1: Interventi di consolidamento previsti in progetto

Per agevolare la localizzazione dei diversi elementi interessati dagli interventi elencati in Tabella 1, nell'immagine sotto riportata viene fornita una rappresentazione schematica della diga di Trepidò.

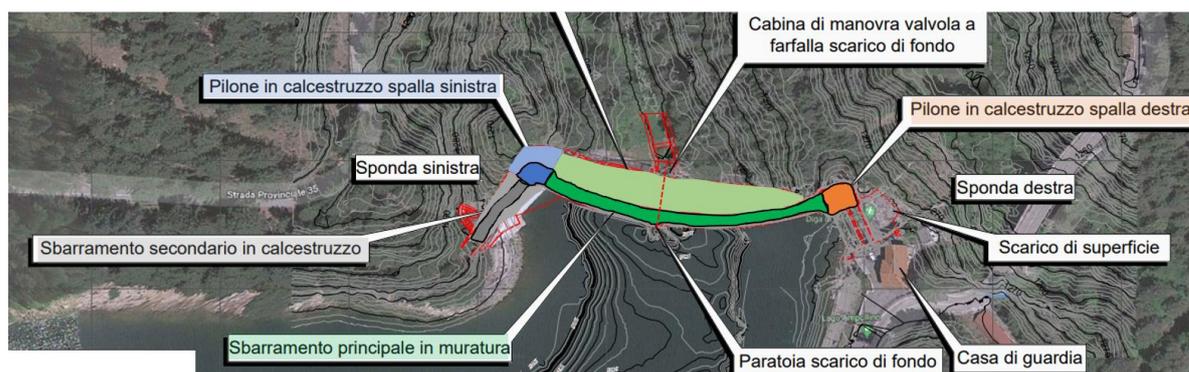


Figura 1 – Rappresentazione schematica della Diga di Trepidò

2.2 Sbarramento principale e secondario - iniezioni

2.2.1 Iniezioni dal coronamento dello sbarramento principale

Per l'intera estensione del coronamento dello sbarramento principale è prevista l'esecuzione di due file di iniezioni (indicate con "fila di monte" e "fila di valle") eseguite approssimativamente a una distanza di un metro dai paramenti di monte e di valle (Figura 2 e Figura 3).

Le iniezioni previste hanno le seguenti finalità:

- consolidare e rendere meno permeabile la porzione superiore dello sbarramento (cresta diga), migliorando le caratteristiche meccaniche globali del tessuto murario;
- consolidare e rendere meno permeabile la porzione di monte dello sbarramento per l'intera altezza della diga e della porzione più superficiale della roccia di fondazione, al fine di creare uno schermo di tenuta idraulica.

Si prevede di realizzare per entrambe le file almeno una serie di iniezioni con interasse 2,4 m.

La fila di valle sarà estesa dal coronamento fino a circa 1.5 m al di sotto della quota inferiore di installazione delle barre di cucitura in cresta (lunghezza approssimativa di 22 m). La fila di monte, che ha anche la funzionalità di schermo di tenuta, sarà estesa fino a circa 8 m al di sotto del contatto diga-fondazione (lunghezze variabili tra 30 e 45 m). Le iniezioni interesseranno anche il pilone in calcestruzzo in spalla sinistra.

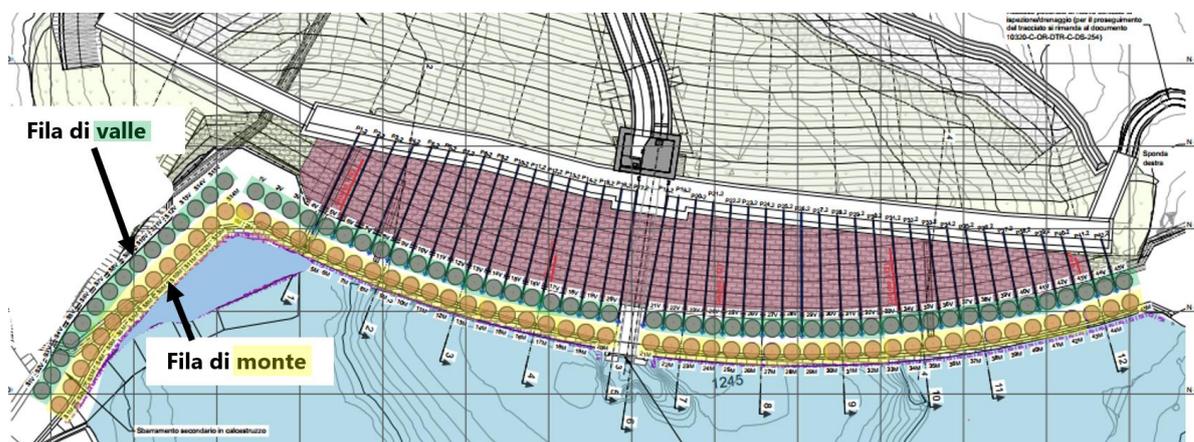


Figura 2 – Stralcio planimetrico con indicazione dell'ubicazione delle iniezioni eseguite dal coronamento dello sbarramento principale e dello sbarramento secondario

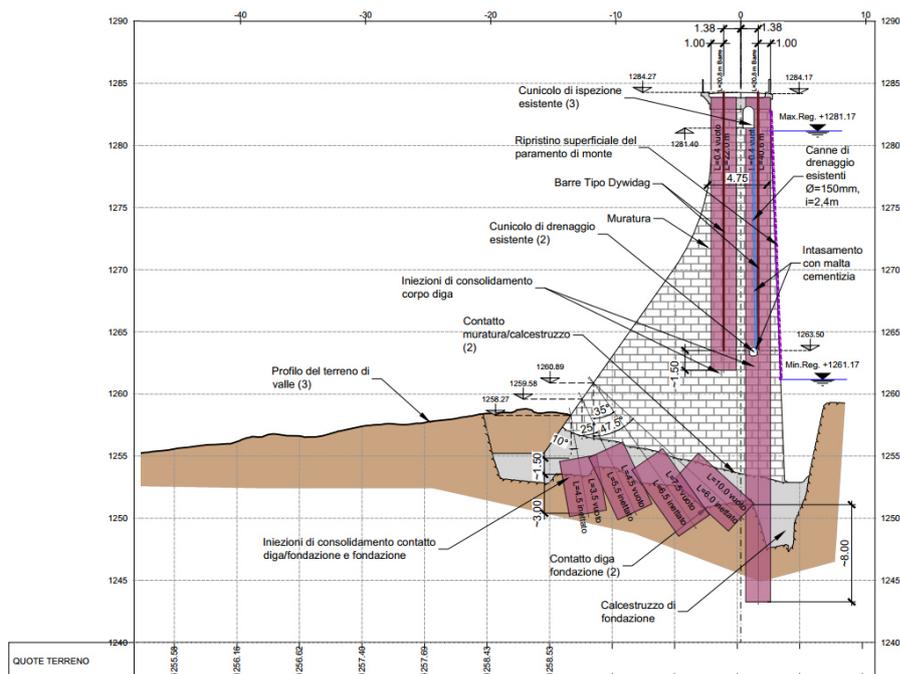


Figura 3 – Iniezioni dal coronamento e dal paramento di valle dello sbarramento principale, sezioni tipo

2.2.2 Iniezioni dal coronamento dello sbarramento secondario

Per consolidare la porzione superiore dello sbarramento secondario si prevede l'esecuzione dal coronamento di due file di iniezioni approssimativamente a una distanza di un metro dai paramenti di monte e di valle (Figura 2, Figura 4 e Figura 5).

Nella porzione di maggior altezza dello sbarramento secondario le iniezioni saranno approfondite fino a circa 5 m al di sotto del cunicolo di alleggerimento inferiore (quota 1271,00 m s.l.m.). Nella porzione di minor altezza di tale sbarramento le iniezioni saranno spinte fino a circa 1 m all'interno del calcestruzzo di fondazione. Si prevede di realizzare almeno una serie di iniezioni con interasse 2,4 m, in analogia con quanto previsto per lo sbarramento principale.

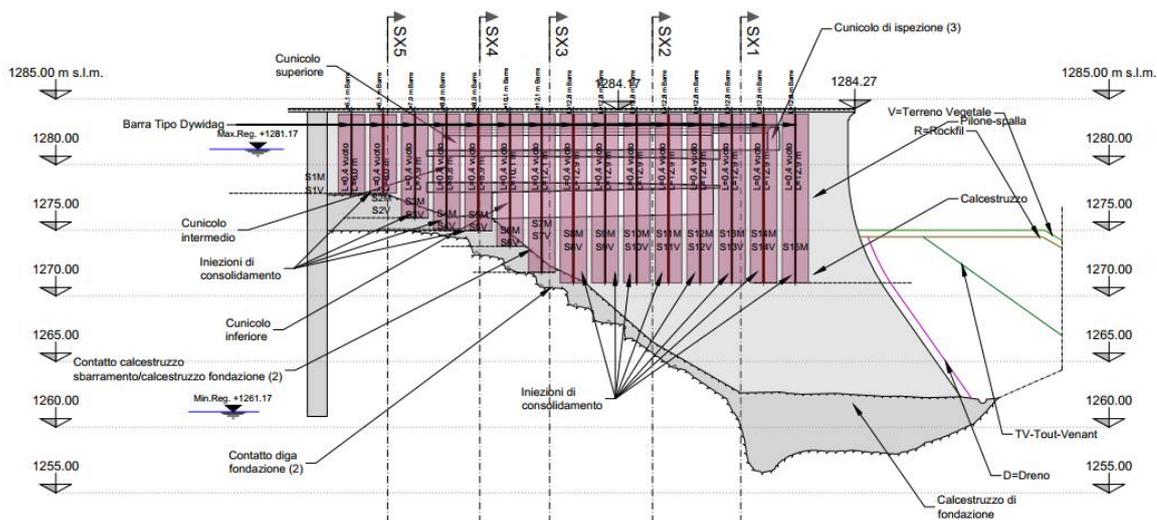


Figura 4 – Iniezioni dal coronamento dello sbarramento secondario, sezione longitudinale

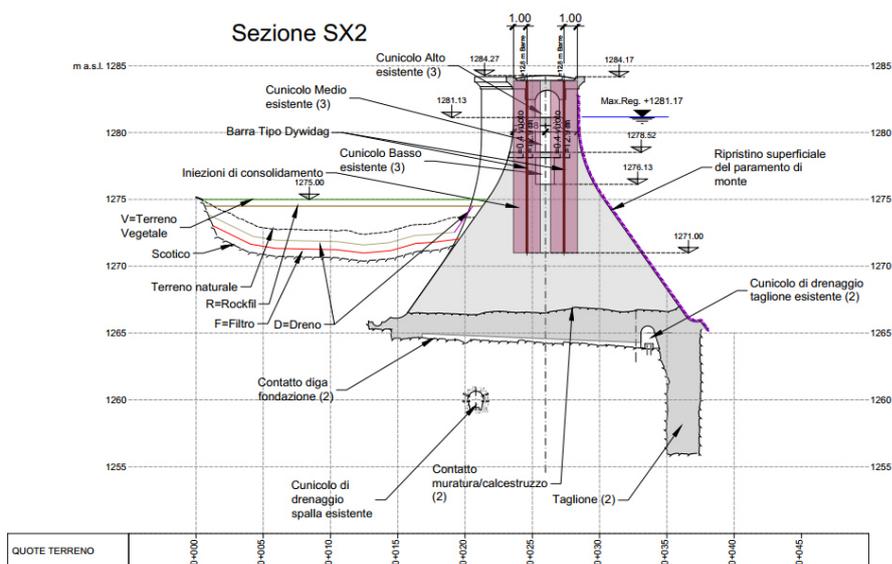


Figura 5 – Iniezioni dal coronamento dello sbarramento secondario, sezione trasversale

2.2.3 Iniezioni dal paramento di valle dello sbarramento principale

Per consolidare il contatto diga-fondazione e l'ammasso roccioso sotto la fondazione dello sbarramento principale, si prevede un intervento di cucitura da realizzarsi mediante iniezioni cementizie.

Come illustrato nella Figura 3, le iniezioni saranno spinte da circa 1,5 m al di sopra del contatto diga-fondazione fino a una profondità di 3 m sotto il piano di fondazione della diga e saranno eseguite dal paramento di valle. Si prevede di realizzare almeno una serie di iniezioni con interasse 2,4 m in accoppiamento con la posizione dei consolidamenti eseguiti dal coronamento.

Per ogni postazione si prevede di eseguire delle raggieri costituite da 4 o 5 file di iniezioni con inclinazioni diverse al fine di interessare l'intero volume di ammasso roccioso sotto la fondazione, entro la profondità di intervento suddetta. Le singole file avranno lunghezza variabile tra circa 5 e circa 15 m e saranno eseguite ad un'altezza di qualche metro dal piede di valle della diga esistente.

2.3 Barre di cucitura in cresta

La parte sommitale dello sbarramento principale è particolarmente snella, con inclinazione quasi verticale sia a monte che a valle e spessore minimo di 4,75 m. Le analisi numeriche in condizioni di sisma SLC evidenziano delle accelerazioni e conseguentemente delle sollecitazioni significativamente non sopportabili dalla struttura nelle condizioni attuali. Considerazioni analoghe possono essere condotte per lo sbarramento secondario in calcestruzzo che, anche se di minore altezza, possiede una porzione sommitale strutturalmente indebolita dalla presenza dei tre cunicoli di alleggerimento.

Per i motivi sovra esposti è stato previsto, tra gli interventi progettuali, l'installazione di barre passive di cucitura in acciaio, eseguite dal coronamento per l'intero sviluppo degli sbarramenti principale e secondario.

L'intervento ha lo scopo di collegare la parte superiore molto snella e vulnerabile degli sbarramenti a quella inferiore più massiccia, trasmettendo i carichi in caso di sisma estremo

Si prevede in particolare di installare le barre con le seguenti caratteristiche:

- Tipologia di barre: DYWIDAG GEWI PLUS S670/800
- Diametro barra: 75 mm
- Diametro perforazione: min. 120 mm
- Inghisaggio barre: Boiaccia cementizia antiritiro ($R_{ck} \geq 30$ MPa)
- Spaziatura: 2,4 m
- Lunghezza:
 - Sbarramento principale: ca. 12 ÷ 20 m
 - Sbarramento secondario: ca. 6 ÷ 13 m

Come illustrato nelle figure riportate precedentemente le barre saranno installate in corrispondenza delle perforazioni effettuate per le iniezioni di consolidamento dal coronamento, ri-perforando i fori già eseguiti per le iniezioni, prima che il materiale iniettato faccia presa. Le barre avendo la stessa spaziatura delle nuove canne di drenaggio verticali saranno equispaziate e intervallate alle canne del nuovo sistema di drenaggio.

2.4 Ripristino superficiale del paramento di monte

Il paramento di monte dello sbarramento principale fu intonacato originariamente con uno strato di gunita di spessore minimo 3 cm rivestito da uno strato di Inertol. Un intervento di ripristino del paramento è stato effettuato nel 1987 utilizzando gunita e prodotti elastomerici. Attualmente non si hanno informazioni di dettaglio sullo stato di consistenza del rivestimento del paramento di monte ma si ritiene che dopo oltre 30 anni dall'ultimo intervento sia necessario eseguire un intervento di manutenzione straordinaria dello stesso.

In particolare, si prevede il ripristino del paramento di monte degli sbarramenti principale e secondario attraverso l'utilizzo di una malta strutturale.

Il ripristino è previsto su tutta la superficie del paramento compresa fra la quota di minima regolazione dell'invaso (1261,17 m s.m) ed il coronamento della diga. La scelta di eseguire l'intervento in tale fascia è dettata dalle seguenti motivazioni:

- evitare di svuotare completamente l'invaso per motivi sia ambientali che di esercizio e gestione degli afflussi al serbatoio;

- per quote inferiori alla minima regolazione il paramento di monte è sempre sommerso e appare ragionevole ritenere che l'impermeabilizzazione sia ancora in buono stato di conservazione in quanto, generalmente, il deterioramento avviene nelle zone dove c'è alternanza di cicli di asciutto e bagnato.

Tra le diverse alternative studiate per il paramento di monte sono state considerate anche quelle di impermeabilizzarlo attraverso l'applicazione di un manto in PVC o di una membrana a spruzzo. Si è scelto di applicare una malta strutturale, con bassa permeabilità ma comunque non completamente stagna, sulla base delle seguenti considerazioni:

- le perdite attualmente misurate in diga sono relativamente modeste (circa 3 l/s);
- in progetto sono già previsti interventi di consolidamento e impermeabilizzazione del corpo diga che ridurranno la permeabilità dell'opera;
- in progetto è previsto un nuovo sistema di drenaggio per l'intercettazione ed il convogliamento delle perdite e delle filtrazioni;
- l'intervento di ripristino è localizzato nell'area del paramento dove sono previste oscillazioni della quota dell'invaso con conseguente rischio di pressioni negative.

Si prevede di eseguire l'intervento di ripristino strutturale attraverso le seguenti fasi di realizzazione:

- valutazione dello stato di consistenza del paramento di monte e dell'impermeabilizzazione dei giunti di dilatazione dello sbarramento principale attraverso l'esame visivo del paramento e l'esecuzione di sondaggi e prove di laboratorio;
- asportazione meccanica parziale o totale di tutte le porzioni di intonaco ammalorato o in fase di distacco fino a ottenere un supporto sano, coeso, meccanicamente resistente e ruvido;
- pulizia meccanica delle superfici;
- applicazione della malta cementizia fibrorinforzata idonea per ripristino di calcestruzzi;
- impermeabilizzazione dei giunti di movimento della diga tramite sigillante a basso modulo applicato in uno scasso appositamente predisposto.

Con la stessa metodologia di intervento sarà ripristinata anche la soglia sfiorante dello scarico di superficie.

3. SPECIFICHE TECNICHE PER LE INIEZIONI

3.1 Generalità

Questa sezione descrive le principali specifiche tecniche previste per l'esecuzione delle iniezioni, in particolare:

- composizione della miscela d'iniezione da adottare;
- metodologia di iniezione;
- modalità operative per l'esecuzione delle iniezioni;
- prove di controllo.

Le indicazioni fornite nei seguenti paragrafi sono da considerarsi indicative, da validare e ottimizzare nel corso dei campi prova previsti sia nello sbarramento principale sia nello sbarramento secondario (vedere capitolo successivo).

3.2 Composizione della miscela d'iniezione

Per le iniezioni di consolidamento e impermeabilizzazione si prevede di utilizzare miscele di tipo cementizio (acqua, cemento, additivi). La composizione della miscela sarà definita sulla base delle risultanze dei campi prova previsti (vedere capitolo successivo).

3.3 Metodologia di iniezione

3.3.1 Fondazione e contatto fondazione - roccia

Le operazioni d'iniezione nella fondazione e al contatto con la roccia seguiranno la procedura nota come metodo GIN (*"Grouting Intensity Number"*, G. Lombardi), il cui obiettivo è di terminare l'iniezione di un determinato tratto di foro al raggiungimento di un prefissato valore del numero GIN, che è definito come prodotto tra la pressione applicata p e il volume iniettato V (v. curva 1 della seguente figura).

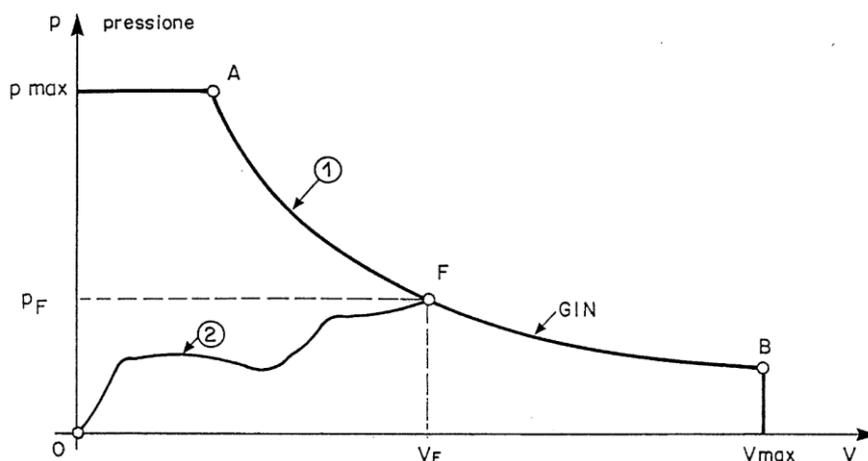


Figura 6 – Curva GIN (1) e percorso di iniezione (2)

Considerando l'altezza e la geometria della diga e conseguentemente il confinamento atteso in corrispondenza del piano di fondazione si prevede di limitare la massima pressione di iniezione a **10 bar** (100 m di colonna d'acqua, pari a circa 3 volte il carico idrostatico in condizioni di esercizio alla quota di massima regolazione).

Il massimo volume iniettabile nel singolo tratto è stato stimato in via preliminare, da ottimizzare nel corso del campo prova, pari a **250 l/m** (corrispondente a circa il 5% del volume teorico da trattare). Per quanto riguarda il parametro GIN è stata assunta una curva a medio-bassa intensità (**1'000 bar-l/m**).

La curva limite pressione-volume progettuale di primo tentativo, da testare e tarare nel corso del campo prova, è illustrata nella Figura 7.

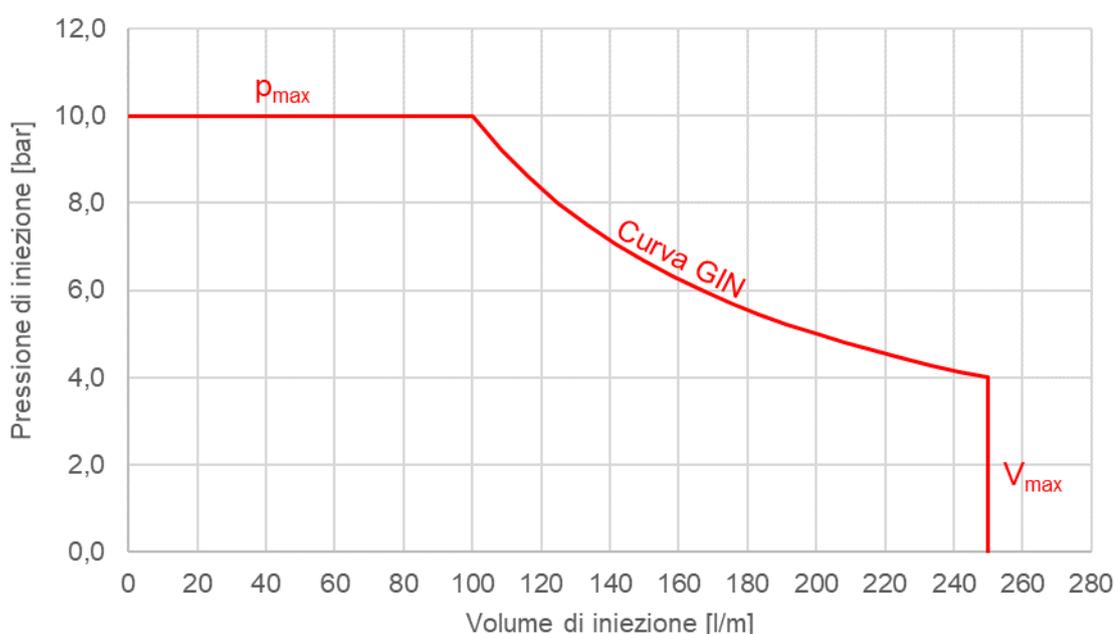


Figura 7 – Iniezione della fondazione e del contatto diga-fondazione, curva Gin di partenza

Le iniezioni in fondazione eseguite dal paramento di valle e nella fila di valle del coronamento saranno eseguite in un unico tratto. In particolare, la base inferiore del packer dovrà essere posta sopra la fondazione in calcestruzzo per un'altezza approssimativa di 1,0-1,5 m.

Le iniezioni in fondazione eseguite nella fila di monte del coronamento saranno eseguite in due tratti di lunghezza approssimativa di 4 m. Anche in questo caso il tratto superiore che include il contatto tra fondazione e roccia dovrà essere eseguito posizionando la base inferiore del packer sopra la base del contatto stesso per un'altezza approssimativa di 1,0-1,5 m.

3.3.2 Corpo diga

Le operazioni d'iniezione nel corpo diga saranno effettuate aumentando gradualmente la pressione della miscela fino al raggiungimento delle pressioni limite riportate nella Tabella 2.

Quota [m s.l.m.]	P _{max} [bar]
> 1275,00	2
1260,00 ÷ 1275,00	5
< 1260,00	10

Tabella 2: Iniezioni nel corpo diga, pressioni limite

Nel caso in cui dovesse risultare impossibile raggiungere la pressione limite specificata, il processo d'iniezione può essere interrotto ad un volume iniettato pari a **250 l/m** (corrispondente a circa il 5% del volume teorico da trattare).

Le iniezioni nel corpo diga dovranno essere eseguite suddividendo il foro di perforazione in tratti di lunghezza massima di 5 m.

3.4 Modalità operative per l'esecuzione delle iniezioni

3.4.1 Prescrizione di carattere generale

In linea generale, si definiscono di seguito le seguenti modalità operative valide per l'esecuzione di tutte le iniezioni, che dovranno essere testate e messe a punto durante l'esecuzione del campo prova (vedere capitolo successivo):

- Le perforazioni dovranno essere eseguite con sonde a rotazione a carotaggio continuo o a distruzione di nucleo. Le geometrie dovranno rispettare i disegni di progetto. I diametri minimi di perforazione previsti sono:
 - Iniezioni eseguite dal coronamento: 120 mm
 - Iniezioni eseguite dal paramento di valle: 55 mm
- I fori dovranno essere iniettati al termine della perforazione mediante packer in risalita dal fondo foro.
- Ogni tratto di foro oggetto d'iniezione dovrà essere preventivamente lavato, iniettando acqua con una pressione di 2 bar per una durata di non meno di 15 minuti.
- La portata istantanea iniettabile non dovrà essere superiore a 7 l/min per iniettore.
- Potranno essere effettuate contemporaneamente iniezioni su più fori garantendo un'adeguata distanza tra i fori stessi.
- Le perforazioni e le iniezioni in fori già perforati potranno essere effettuate in contemporanea garantendo un'adeguata distanza tra le lavorazioni.
- Le operazioni di iniezione in corrispondenza dei giunti di contrazione della diga dovranno essere effettuate con estrema cautela evitando di intasare i giunti di stessi. Il lavaggio dei giunti potrà essere previsto durante l'esecuzione delle iniezioni.
- Nel caso il campo prova previsto per l'esecuzione delle nuove canne di drenaggio (vedere documento dedicato 10320-C-OR-DTR-C-ST-210-1) sia effettuato prima dell'esecuzione degli interventi di consolidamento, le iniezioni in tale area dovranno essere effettuate con

estrema cautela evitando di intasare i drenaggi stessi. Dovrà essere previsto un sistema di lavaggio dei dreni durante l'esecuzione delle iniezioni.

3.4.2 Fasistica

Per quanto riguarda le iniezioni dal coronamento dello sbarramento principale e dallo sbarramento secondario saranno eseguite prima le iniezioni della fila di monte e successivamente quelle della fila di valle.

Per quanto riguarda le iniezioni dal paramento di valle dello sbarramento principale saranno eseguite prima le iniezioni di monte e di valle e successivamente le file centrali.

L'operazione di iniezione dei singoli tratti di foro avverrà in maniera continuativa, senza brusche variazioni nelle portate della pompa e senza interruzioni. L'iniezione dei singoli tratti sarà effettuata aumentando gradualmente la pressione, terminando l'operazione in uno di questi casi:

- Fondazione e contatto (metodo GIN)
 - raggiungimento della massima pressione prevista (p_{max});
 - raggiungimento della curva GIN nel grafico p-V;
 - raggiungimento del massimo volume iniettabile previsto (V_{max}).
- Corpo diga
 - raggiungimento della massima pressione prevista (p_{max});
 - raggiungimento del massimo volume iniettabile previsto (V_{max}).

Nel primo caso (raggiungimento della massima pressione) l'iniezione potrà considerarsi terminata e si potrà procedere all'iniezione del tratto successivo spostando il packer verso l'alto.

Negli altri due casi, dove la pressione finale è inferiore alla massima prevista, si potrà procedere in linea generale con una delle seguenti alternative da selezionare nel corso del campo prova:

- reiniezione dello stesso tratto, dopo almeno 24 ore, utilizzando la stessa miscela;
- reiniezione dello stesso tratto, dopo almeno 24 ore, utilizzando una miscela più pesante (rapporto c/a maggiore).
- perforazione e iniezioni di fori secondari con interasse pari a 1,2 m.

Considerando la vicinanza al paramento di monte delle file di iniezioni eseguite dal coronamento degli sbarramenti principale e secondario, si evidenzia il potenziale rischio di fuoriuscite di miscela cementizia dal paramento di monte durante l'esecuzione delle lavorazioni che potrebbero riversarsi all'interno dell'invaso. Per tale motivo durante l'esecuzione delle iniezioni dovranno essere previsti tutti gli accorgimenti necessari a prevenire sversamenti accidentali nell'invaso così come verificato nell'ambito del campo prove di cui al capitolo 4.

Durante l'esecuzione delle iniezioni dovrà eseguirsi un controllo in continuo tramite registrazioni automatiche dei parametri di iniezioni, in particolare dei volumi iniettati, in modo da poter sospendere l'iniezione appena le misure registrano un assorbimento anomalo.

Nel caso di fuoriuscita della miscela dal paramento di monte si dovrà interrompere immediatamente il processo di iniezione per consentire la chiusura del punto di fuoriuscita, anche mediante l'impiego di sommozzatori qualora le quote di vaso lo richiedano.

3.5 Prove di controllo

3.5.1 Pre-intervento

Prima dell'esecuzione delle iniezioni, si prevede di eseguire delle prove d'acqua tipo Lugeon al fine di valutare la condizioni attuali del corpo diga e della fondazione. Inoltre, le prove saranno anche utili per tarare ed eventualmente integrare l'intervento di ripristino dello schermo di tenuta, in termini sia geometrici, sia di parametri esecutivi.

Le prove di controllo andranno eseguite almeno in un foro ogni n. 5 allineamenti di iniezione (circa 12 m), in particolare all'interno di:

- uno dei fori di monte per le iniezioni dal coronamento degli sbarramenti principale e secondario (vedere schema di Figura 9 e Figura 12);
- uno dei fori nella zona centrale dello sbarramento in direzione monte-valle per le iniezioni eseguite dal paramento di valle (secondo foro da monte nel caso di raggiera con n. 4 iniezioni, terzo foro da monte nel caso di raggiera con n. 5 iniezioni, vedere schema di Figura 10).

Le prove di permeabilità saranno condotte in avanzamento su tratti di 5 m di lunghezza, in successione ininterrotta fino alla massima profondità raggiunta dal foro.

3.5.2 Post-intervento

Al fine di controllare l'efficacia degli interventi, al termine delle iniezioni di consolidamento primarie, saranno eseguiti dei fori di controllo a carotaggio continuo con esecuzione di prove d'acqua tipo Lugeon. Si prevede di realizzare n. 1 foro ogni n. 5 allineamenti di iniezione (circa 12 m). Le perforazioni dovranno essere ubicate in corrispondenza della mezzeria dei fori di iniezione primari (potenziale ubicazione del foro secondario di iniezione), in particolare:

- allineamento di monte per le iniezioni dal coronamento degli sbarramenti principale e secondario (vedere schema di Figura 9 e Figura 12);
- zona centrale dello sbarramento in direzione monte-valle valle per le iniezioni eseguite dal paramento di valle dello sbarramento principale (secondo allineamento da monte nel caso di raggiera con n. 4 iniezioni, terzo allineamento da monte nel caso di raggiera con n. 5 iniezioni, vedere schema di Figura 10)

Per quanto riguarda la fila di monte eseguita dal coronamento dello sbarramento principale, il trattamento si riterrà idoneo se le prove di permeabilità eseguite nella fondazione avranno restituito un valore massimo pari a 2 U.L. (Unità Lugeon).

Per quanto riguarda le altre iniezioni, l'idoneità del trattamento sarà valutata di volta in volta, in accordo con la D.L., sulla base delle seguenti risultanze:

- esame visivo della penetrazione delle miscele all'interno dei vuoti e delle fessure;
- prove Lugeon sia in termini di U.L. sia di tipo di comportamento;
- riduzione del valore di permeabilità tra le prove pre e post intervento.

Nelle aree dove sarà necessario eseguire le iniezioni secondarie, l'ubicazione del foro di controllo post-intervento dovrà essere definita sulla base della risultante del processo di iniezione. In linea generale sarà in una posizione intermedia tra i fori primari e i fori secondari (vedere schemi di Figura 9, Figura 10 e Figura 12).

A seguito di un'accurata analisi dei risultati delle prove di controllo, ove manchi la certezza del raggiungimento del risultato voluto, la D.L. potrà decidere ed ordinare all'Impresa l'esecuzione di ulteriori fori ed iniezioni.

4. CAMPO PROVA PER LE INIEZIONI

4.1 Generalità

Considerando la natura degli interventi di iniezione e la già citata possibilità, seppur remota, di sversamento accidentale di miscela cementizia all'interno dell'invaso durante l'esecuzione delle iniezioni stesse, si ritiene necessaria la realizzazione, per ognuna delle lavorazioni previste, di un campo prova.

I campi prova consentiranno di definire le modalità esecutive più idonee alla realizzazione dell'intervento in termini di:

- composizione della miscela di iniezione;
- maglia di intervento;
- parametri di iniezione;
- accorgimenti preventivi utili a evitare o limitare al minimo potenziali sversamenti all'interno dell'invaso;
- contromisure di mitigazione da applicare nel caso di sversamento accidentale di miscela all'interno del lago;
- ottimizzazione delle modalità esecutive delle perforazioni dal paramento di valle, in modo da concentrare la posizione di rampe, e postazioni di lavoro e ridurre i relativi movimenti terra. .

Per quanto riguarda le iniezioni nello sbarramento principale si prevede si eseguire il campo prova nel corso della redazione della progettazione esecutiva. L'esperienza maturata durante il campo consentirà di redigere delle specifiche tecniche esecutive dettagliate da applicare durante la realizzazione dell'intervento.

In questo campo prova saranno anche installate una o più barre metalliche previste per il consolidamento della parte sommitale dello sbarramento, in modo da effettuare le prove di sfilamento per la conferma delle ipotesi progettuali.

Le informazioni acquisite durante il campo prova nello sbarramento principale saranno utili anche alla progettazione esecutiva degli interventi previsti sullo sbarramento secondario soprattutto in termini di definizione degli accorgimenti preventivi a evitare sversamenti accidentali all'interno dell'invaso. Considerando la diversa natura dei materiali costituenti gli sbarramenti principale e secondario si prevede comunque di eseguire un campo prova nello sbarramento secondario nella fase iniziale di esecuzione dei lavori al fine di tarare gli accorgimenti esecutivi relativi alla composizione della miscela, alla maglia di intervento e ai parametri di iniezione.

4.2 Sbarramento principale

4.2.1 Ubicazione e schema geometrico

Per quanto riguarda lo sbarramento principale, il campo prova sarà ubicato nella parte sinistra in corrispondenza del primo concio (tra 1° e 2° giunto), nella stessa porzione di sbarramento dove è previsto il campo prova propedeutico alla realizzazione del nuovo sistema di drenaggio.

Per i dettagli relativi al campo prova propedeutico alla realizzazione del nuovo sistema di drenaggio si rimanda al documento 10320-C-OR-DTR-C-ST-210-1.

I campi prova per le iniezioni dal coronamento e dal paramento di valle dello sbarramento principale saranno costituiti da minimo n. 3 aree di prova poste l'una a fianco dell'altra. Ogni area di prova comprenderà n. 2 allineamenti, per un numero totale di fori primari di perforazione pari a:

- n. 12 (n. 6 di monte e n. 6 di valle) dal coronamento
- n. 28 (n. 6 raggiere costituite da 4 o 5 file inclinate) dal paramento di valle

La Figura 8 illustra il profilo dello sbarramento con l'ubicazione degli allineamenti previsti per i campi prova propedeutici alla realizzazione delle iniezioni di consolidamento (n. 6 allineamenti, in rosso) e del nuovo sistema di drenaggio (n. 3 allineamenti, in blu)

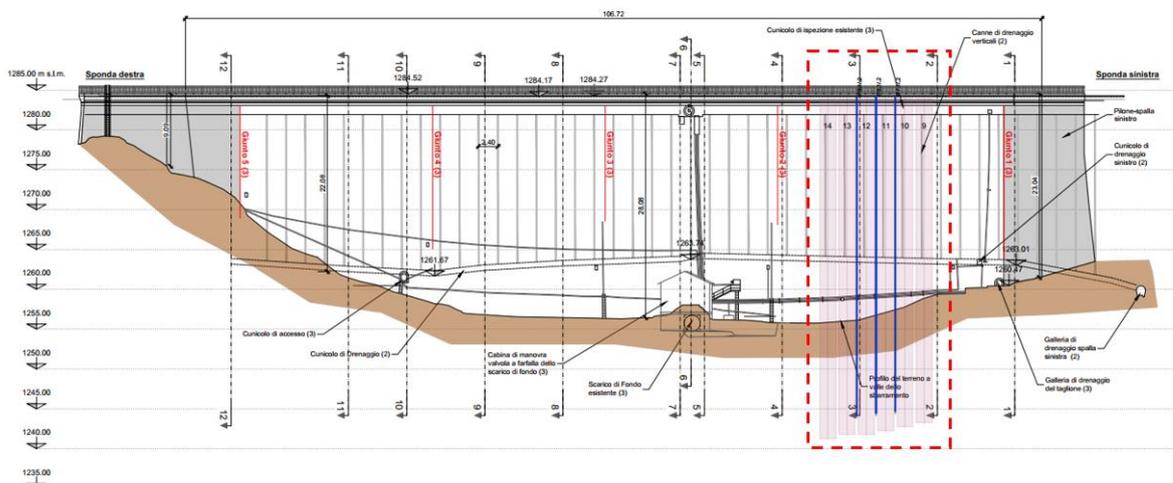


Figura 8 – Profilo (visto da valle) con ubicazione dei campi prova propedeutici alla realizzazione delle iniezioni di consolidamento e del nuovo sistema di drenaggio.

La posizione precisa delle perforazioni sarà valutata in sito, prima dell'installazione del cantiere del campo prove, sulla base dell'esatta posizione dei drenaggi già esistenti e della posizione dei cunicoli esistenti.

Durante l'esecuzione delle iniezioni si dovrà prevedere un lavaggio in continuo con acqua del sistema di drenaggio esistente, nel tratto interessato dalle lavorazioni, al fine di evitarne l'intasamento.

Le acque di risulta saranno opportunamente raccolte e trattate in specifico impianto di depurazione e, infine, restituite in alveo.

Lo schema geometrico semplificato di ogni area di prova è illustrato nella **Figura 9** (iniezioni dal coronamento) e nella **Figura 10** (iniezioni dal paramento di valle). Come illustrato nelle figure, in ogni area di prova è prevista la realizzazione di n. 2 prove di controllo:

- n. 1 pre-intervento: prove d'acqua tipo Lugeon all'interno di uno dei fori di perforazione prima dell'esecuzione delle iniezioni, in particolare:
 - uno dei fori di monte per le iniezioni dal coronamento;
 - uno dei fori nella zona centrale dello sbarramento in direzione monte-valle (secondo foro da monte nel caso di raggiera con n. 4 iniezioni, terzo foro da monte nel caso di raggiera con n. 5 iniezioni)

- n. 1 post-intervento: esecuzione di un foro a carotaggio continuo ed esecuzione di prove d'acqua tipo Lugeon in corrispondenza della mezzeria dei due allineamenti previsti per ogni area di prova (coincidente con l'ubicazione del potenziale foro secondario di iniezione), in particolare:
 - allineamento di monte per le iniezioni dal coronamento;
 - zona centrale dello sbarramento in direzione monte-valle (secondo allineamento da monte nel caso di raggiera con n. 4 iniezioni, terzo allineamento da monte nel caso di raggiera con n. 5 iniezioni)

Per l'allineamento di monte delle iniezioni eseguite dal coronamento, la posizione del foro per il controllo post-intervento coincide con l'asse del nuovo dreno verticale che sarà realizzato. Questa scelta è finalizzata a ridurre il numero delle perforazioni; pertanto, per la realizzazione del foro si dovranno attuare tutti gli accorgimenti previsti per garantirne la verticalità, come specificato nel documento 10320-C-OR-DTR-C-ST-210-1; tale indicazione potrà essere confermata o perfezionata dopo l'esecuzione dei due campi prova.

Nelle aree di prova dove saranno eseguite le iniezioni secondarie, il foro di controllo post-intervento dovrà essere ubicato, come indicato nella Figura 9 e nella Figura 10, in una posizione intermedia tra i fori primari e i fori secondari.

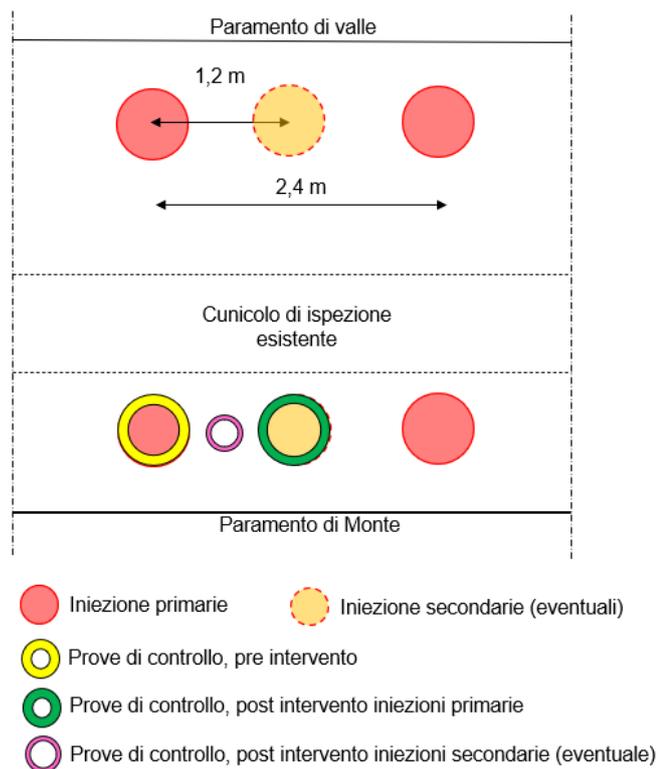


Figura 9 – Iniezioni dal coronamento dello sbarramento principale, schema geometrico

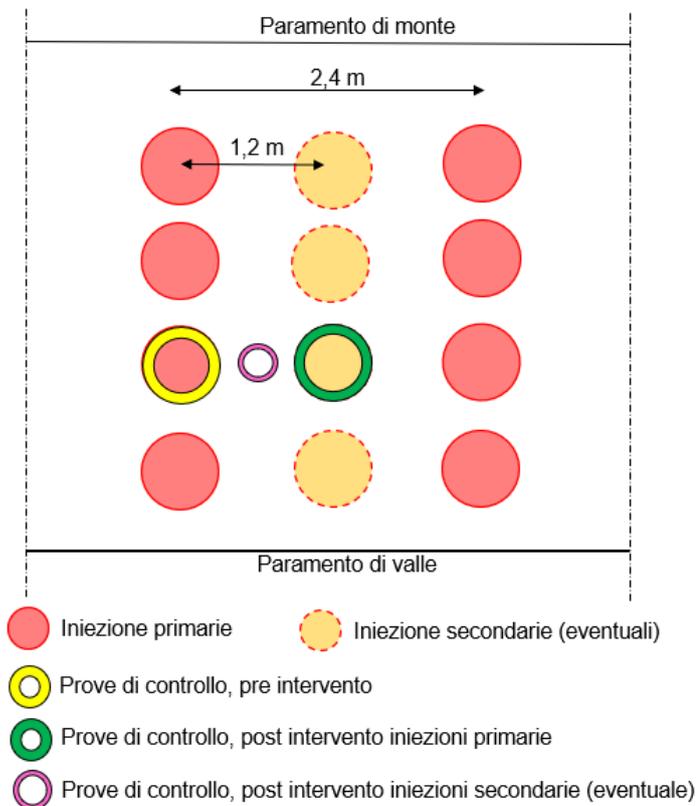


Figura 10 – Iniezioni dal paramento di valle dello sbarramento principale, schema geometrico

4.2.2 Accessibilità alle aree di valle

L'accesso pedonale alla zona di realizzazione delle perforazioni sub-orizzontali al piede diga è garantito dalla presenza di una scalinata che costeggia il paramento di valle dello sbarramento secondario in sinistra (**Figura 11** a dx). Le sonde di perforazione potranno invece essere calate dal coronamento della diga in corrispondenza del pilone in calcestruzzo spalla sinistra (zona evidenziata in rosso nella **Figura 11** a sx).



Figura 11 – A sx: Vista dall'alto della diga; A dx: Foto del pilone in calcestruzzo spalla sinistra con la scalinata di accesso pedonale

Per l'esecuzione del campo prove delle iniezioni di consolidamento si prevede un'area operativa che si sviluppa al piede di valle dello sbarramento principale, lato sinistro, per una larghezza indicativa di 10-20 m. In quest'area saranno realizzate delle piazzole e delle rampe temporanee per l'esecuzione delle lavorazioni alle quote previste in progetto.

4.3 Sbarramento secondario

Come anticipato, per lo sbarramento secondario si prevede di eseguire il campo prova direttamente durante la realizzazione dei lavori e per tale motivo esso sarà effettuato in corrispondenza delle prime iniezioni eseguite. Il campo prova dovrà essere costituito da 2 o più aree di prova, all'interno delle quali saranno testati diverse miscele e/o diverse procedure operative.

Il campo prova eseguito sul coronamento dello sbarramento secondario prevede delle aree di prova costituite da n. 4 fori di iniezione (n. 2 di monte e n. 2 di valle). Le prove d'acque pre-intervento (n. 1 foro) potranno essere eseguite in corrispondenza di un foro di monte previsto per le iniezioni. Il foro di controllo post-intervento sarà eseguito in mezzeria dei fori effettuati per l'esecuzione delle iniezioni di monte (coincidente con l'ubicazione del potenziale foro secondario di iniezione).

Nelle aree di prova dove saranno eseguite le iniezioni secondarie, il foro di controllo post-intervento dovrà essere ubicato, come indicato nella Figura 12, in una posizione intermedia tra i fori primari e i fori secondari.

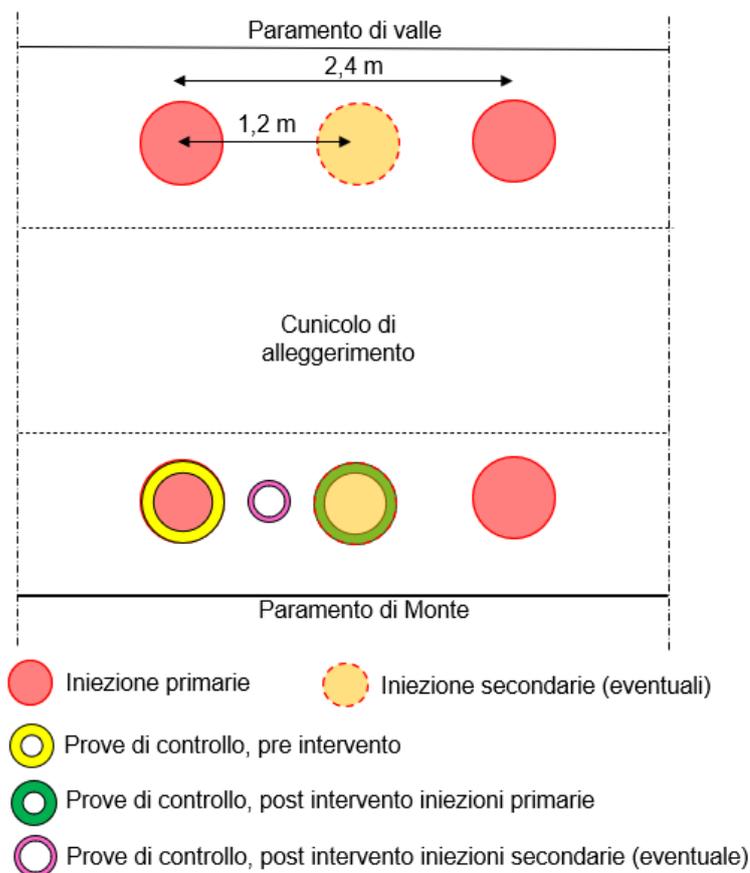


Figura 12 – Iniezioni dal coronamento dello sbarramento secondario, schema geometrico

4.4 Procedura operativa

Per ogni campo prova si prevede di seguire la seguente procedura operativa:

1. Individuazione della prima area di prova

2. Esecuzione del foro di controllo pre-intervento e delle relative prove d'acqua

Esecuzione del primo foro di iniezione ed esecuzione delle prove di permeabilità di tipo Lugeon. Le prove d'acqua andranno eseguite in avanzamento su tratti di 5 m di lunghezza, in successione ininterrotta fino alla massima profondità raggiunta dal foro.

3. Esecuzione delle perforazioni e delle iniezioni

Nella prima area di prova sarà testata la miscela di primo tentativo definita a tavolino in collaborazione con il fornitore dei materiali e con l'impresa esecutrice. In prima approssimazione si prevede di utilizzare una miscela cementizia costituita da cemento fine (5000) e rapporto cemento-acqua compreso tra 1,0 e 1,5 (Tabella 3).

Componente	Quantità	Note
Cemento fine tipo I 52,5 R Portland	100÷150 kg	superficie specifica Blaine > 5'000 cm ² /g (UNI EN 196/6)
Acqua	100 kg	Rapporto c/a = 1,0÷1,5
Additivo fluidificante	1÷2 %	del contenuto di cemento in peso

Tabella 3: Miscela di primo tentativo, composizione indicativa

Le perforazioni e le iniezioni saranno eseguite in accordo alle indicazioni riportate nel capitolo precedente (par. 3.3, par. 3.4.1 e 3.4.2).

Nella prima area di prova, nel caso di non raggiungimento della massima pressione di progetto, si procederà con la riperforazione e la reiniezione dello stesso tratto, dopo almeno 24 ore, utilizzando la stessa miscela cementizia;

4. Esecuzione del foro di controllo post-intervento e delle relative prove d'acqua

Il foro di controllo post-intervento dovrà essere eseguito a carotaggio continuo. In analogia con il foro pre-intervento, all'interno del foro saranno condotte le prove di permeabilità di tipo Lugeon in avanzamento su tratti di 5 m di lunghezza.

5. Analisi dei risultati

Al termine delle lavorazioni sopra descritte saranno valutati con attenzione i seguenti aspetti:

- curve pressione-volume registrate nei singoli tratti;
- esame visivo della penetrazione delle miscele all'interno dei vuoti e delle fessure;
- risultati delle prove Lugeon sia in termini di U.L. sia di tipo di comportamento;
- riduzione del valore di permeabilità tra le prove pre e post-intervento.

6. Definizione della seconda area di prova

Se i risultati ottenuti nella prima area di prova saranno ritenuti già soddisfacenti si procederà con la seconda e terza area di prova dove saranno affinate le modalità di iniezione e/o le caratteristiche della miscela.

Nel caso i risultati siano ritenuti non soddisfacenti si procederà all'esecuzione di una seconda area di prova modificando possibilmente uno solo dei parametri fondamentali di iniezione. Sulla base dei risultati, si prevede in linea generale di poter procedere con una delle seguenti alternative:

- modifica della composizione della miscela (utilizzo di cemento microfina 8000, modifica del rapporto cemento-acqua, quantitativo di additivo, ecc.) lasciando invariata la maglia di iniezione;
- modifica dei parametri di iniezione (pressione massima, volume massimo, curva GIN, ecc.);

- utilizzo di una miscela diversa solo per la fase di reiniezione dei singoli tratti nel caso di non raggiungimento del criterio di pressione massima (ad esempio utilizzo di una miscela con rapporto cemento-acqua maggiore);
- esecuzione dei fori secondari in aggiunta ai fori primari.

Si procederà con aree successive di prova fino al raggiungimento di risultati soddisfacenti.

4.4.1 Fasistica e tempistiche

Il campo prova per le iniezioni dovrà essere iniziato e completato prima dell'inizio del campo prova propedeutico alla realizzazione del nuovo sistema di drenaggio.

Il tempo stimato per l'esecuzione del campo prova è di circa 4 settimane lavorative.

5. INDAGINI PER IL RIPRISTINO DEL PARAMENTO DI MONTE

Nello sviluppo del Progetto Esecutivo è prevista l'esecuzione di indagini conoscitive finalizzate a determinare lo stato di consistenza e gli spessori del rivestimento attuale del paramento di monte in modo da definirne le modalità di rimozione, ma anche lo stato di consistenza del calcestruzzo della diga che farà da supporto al nuovo rivestimento, così da ottimizzare la composizione dei materiali del rivestimento stesso.

Si prevede di eseguire in particolare n. 6 carotaggi nello sbarramento principale e n. 2 nello sbarramento secondario. I carotaggi saranno a carotaggio continuo di lunghezza minima di 1 m.

L'ubicazione dei carotaggi dovrà essere definita in fase esecutiva. Le lavorazioni dovranno essere eseguite, compatibilmente con l'ordinaria gestione del serbatoio, con invaso tale da poter investigare ampie zone del paramento.

Dalle carote estratte dai carotaggi si prevede di selezionare dei campioni per l'esecuzione di prove di laboratorio: resistenza a compressione e resistenza a trazione indiretta.

Inoltre, si prevede di eseguire delle prove di pull-out per valutare la forza di adesione tra il manto superficiale del paramento e il calcestruzzo di supporto costituente il corpo dello sbarramento.

In Tabella 4 si riporta una sintesi delle indagini necessarie.

Concio	n° sondaggi	Quota	Prove di compressione uniassiale	Prova di trazione indiretta	Prove di pull-out
1	1	1275 m s.l.m.	1	1	-
2	2	1270 m s.l.m. 1275 m s.l.m.	1	1	1
3	2	1270 m s.l.m. 1275 m s.l.m.	1	1	1
4	1	1275 m s.l.m.	1	1	-
Sbarramento secondario	2	1270 m s.l.m. 1275 m s.l.m.	1	1	1

Tabella 4 – Sondaggi e prove di laboratorio per la caratterizzazione del paramento di monte.