

Sottoattraversamento Isarco

# Tutti i particolari del congelamento

Alessandro Marottoli  
Vittorio Manassero  
Roberta Marrazzo  
BBT SE  
Galleria di Base del Brennero  
Brennerbasistunnel

Armando Vanin  
Pini Swiss Engineers

OTTOBRE 2020, SI SCAVA SOTTO L'ISARCO. OVVERO NEL CUORE DI UNO DEI CANTIERI PIÙ INTERESSANTI D'EUROPA, QUELLO DEL "SOTTOATTRAVERSAMENTO", OPERA NELL'OPERA DELLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO. UN CONTRIBUTO DECISIVO AL MOMENTO CLOU È ARRIVATO DALL'ADOZIONE DEL CONGELAMENTO DEL TERRENO CON AZOTO E SALAMOIA. TUTTI I DETTAGLI TECNICI IN QUESTO ARTICOLO ESCLUSIVO FIRMATO DAGLI SPECIALISTI DEL COMMITTENTE BBT E DELLA DIREZIONI LAVORI.

**I**l trattamento dei terreni, ai fini di migliorarne le caratteristiche di resistenza e rigidità e ridurre la permeabilità, può essere realizzato con una grande varietà di tecniche. In questo articolo viene trattato il caso di scavo del lotto di costruzione "Sottoattraversamento del fiume Isarco" della Galleria di Base del Brennero, ponendo particolare attenzione all'adozione della tecnologia del congelamento artificiale del terreno come tecnica di consolidamento.

## Il progetto

Il lotto "Sottoattraversamento del fiume Isarco" costituisce la parte estrema meridionale della Galleria di Base del Brennero prima dell'accesso nella stazione di Fortezza, ed è ubicato ca. 1 km a nord dell'abitato di Fortezza, in località Prà di Sopra, Provincia di Bolzano, a una quota di circa 770 m slm. Le opere progettate, pertanto, costituiscono un "lotto costruttivo non funzionale" facente parte del progetto complessivo della Galleria di Base del Brennero. L'area di progetto (fig. 1), ricade nello stretto fondovalle (larghezza di ca. 300 m), racchiuso da ripide pareti rocciose; in mezzo si snoda il fiume Isarco con un andamento sinuoso. Il fondovalle, pianeggiante e con una pendenza media longitudinale di ca. 1,3°, mostra un'impronta antropica con importanti infrastrutture su ambo i lati del fiume: in sinistra idrografica si trovano l'autostrada A22 del Brennero e la strada statale SS 12, in destra la linea ferroviaria storica del Brennero su rilevato di alcuni metri, oppure incisa nel conoide. Gli scavi in sotterraneo sono realizzati interamente con tecnica tradizionale,



### 1. Vista generale del lotto "Sottoattraversamento Isarco"

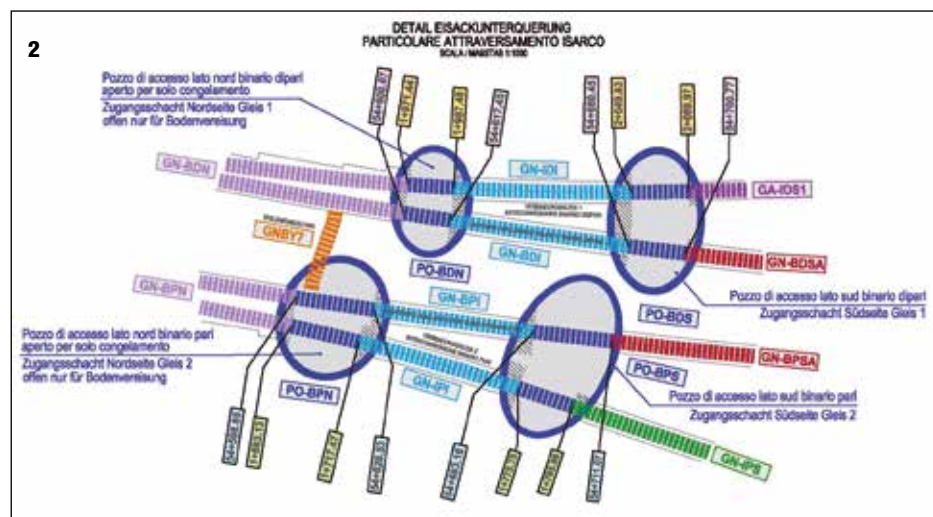
### 2. Particolare della planimetria del sottoattraversamento Isarco

### 3. Vista dei pozzi PO-BPN e PO-BDN

con diverse metodologie di avanzamento; fulcro dell'intervento è sicuramente il sottoattraversamento del fiume, tramite 4 gallerie naturali realizzate con scavo a piena sezione, previa esecuzione di interventi di consolidamento eseguiti in avanzamento in abbinamento all'adozione della tecnologia di congelamento dei terreni, atta a garantire la tenuta idraulica del cavo in fase di scavo, evitando pertanto lo spostamento temporaneo del fiume Isarco.

## Congelare per consolidare

Il metodo costruttivo del congelamento artificiale dei terreni è una tecnica contemporanea di impermeabilizzazione e/o consolidamento per lo scavo sottofalda di terreni sciolti o rocce fratturate. Consiste nel congelare l'acqua contenuta all'interno di un volume di terreno, facendo circolare attraverso di esso un fluido a bassa temperatura, che provvede all'estrazione del calore e alla dissipazione dello stesso all'esterno. Si tratta di una tecnica sicura ed eco-compatibile, in quanto nessun tipo di prodotto viene iniettato o disperso nel terreno: l'acqua già presente nel terreno, infatti, viene fatta congelare utilizzando fluidi refrigeranti che non vengono mai in contatto con il terreno stesso o con l'acqua, escludendo pertanto possibili fenomeni di contaminazione o di inquinamento delle falde idriche, e alla fine della fase di congelamento il terreno riacquista le sue caratteristiche chimico-fisiche originali.



3



## La tecnologia

Il raffreddamento del terreno, ottenuto facendo circolare all'interno di esso un fluido a bassissima temperatura, avviene attraverso speciali scambiatori di calore (sonde congelatrici). Il congelamento modifica sia le caratteristiche idrauliche del terreno, rendendolo impermeabile, sia le sue caratteristiche meccaniche, migliorandole significativamente. Infatti, le resistenze a compressione di un terreno congelato aumentano in funzione dell'abbassamento della temperatura e delle sue caratteristiche granulometriche naturali. I valori di temperatura del terreno generalmente utilizzati in fase di progettazione variano da  $-5^{\circ}\text{C}$  a  $-20^{\circ}\text{C}$ , cui corrispondono valori di resistenza variabili da 3 a 20 MPa, fortemente influenzati, oltretutto dalla temperatura di congelamento, dal tipo di terreno da congelare (la resistenza del terreno congelato cresce proporzionalmente con l'aumentare della dimensione dei grani). Un progetto di congelamento del terreno prevede due fasi distinte:

1. Fase di congelamento, durante la quale, sottraendo calore al terreno, si ottiene la formazione di una porzione di terreno congelato, con caratteristiche geometriche e temperature previste dal progetto;

2. Fase di mantenimento, durante la quale si estrae dal terreno una quantità di calorie sufficienti a mantenere le dimensioni geometriche del terreno congelato nella fase precedente, senza aumentarne le dimensioni, ma mantenendo inalterate le caratteristiche raggiunte durante la fase di congelamento. In riferimento alla tipologia del fluido refrigerante impiegato per il congelamento dei terreni, si identificano due metodologie esecutive, a volte utilizzate in modo combinato:

- *Congelamento ad azoto liquido* (denominato anche a ciclo aperto o diretto)

L'azoto liquido compresso (e ad una temperatura di  $-196^{\circ}\text{C}$ ), quale fluido frigorifero, viene fatto circolare all'interno delle sonde congelatrici e disperso direttamente in atmosfera allo stato gassoso;

- *Congelamento a salamoia* (denominato anche a ciclo chiuso o indiretto)

Una soluzione acquosa di cloruro di calcio con punto di congelamento compreso tra  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $-50^{\circ}\text{C}$ , viene fatta circolare, mediante pompe di invio, da un impianto frigorifero industriale all'interno delle sonde congelatrici ad una temperatura normalmente compresa tra  $-30^{\circ}\text{C}$  e  $-35^{\circ}\text{C}$ ; in questo modo la salamoia sottrae calore al terreno riscaldandosi, ritorna all'impianto frigorifero dove viene raffreddata ed ancora una volta inviata alle sonde congelatrici (ciclo frigorifero a doppio scambio).

I criteri di scelta tra le due metodologie di congelamento sono legati a variabili di natura tecnica ed economica e soprattutto a una valutazione dei tempi realizzativi dell'opera; per tale motivo, molto spesso le due tecniche vengono utilizzate in modo combinato, distinguendo una fase di rapido congelamento ad azoto liquido da una fase più lunga di mantenimento a salamoia; si parla in questo caso di sistema di congelamento di tipo misto. Tale sistema può garantire inoltre una maggiore sicurezza in caso di eventuali problematiche in fase di esecuzione.

## La tecnica sotto l'Isarco

Il Progetto Esecutivo per il sottoattraversamento del fiume Isarco prevede il consolidamento dei terreni all'intorno delle quattro gallerie che collegano quattro pozzi posti ai lati del fiume (figg. 2 e 3), con la tecnica del congelamento e, precisamente, adottando il "metodo misto". La scelta si è resa necessaria per un'ottimizzazione dei tempi esecutivi, minimizzando i tempi di congelamento con l'utilizzo del ciclo diretto ad azoto, ed eseguendo una successiva fase di mantenimento delle temperature, con l'utilizzo di un impianto a salamoia, durante tutte le fasi di scavo, impermeabilizzazione e rivestimento definitivo delle gallerie. Questa scelta ha comportato quindi la necessità di prevedere due impianti di cantiere, distinti e adiacenti, evidentemente complementari, per la gestione delle due fasi distinte del congelamento dei terreni. Il passaggio dalla fase di congelamento alla fase di mantenimento è effettuato, una volta raggiunte le temperature target, sostituendo solamente una porzione delle "testine" di adduzione di ogni sonda frigorifera e consentendo quindi la possibilità di passare dal sistema a ciclo aperto ad un sistema a ciclo chiuso.

### Impianto frigorifero ad azoto

L'impianto frigorifero di stoccaggio dell'azoto liquido è costituito da n. 4 serbatoi a doppia parete, con capacità di stoccaggio di 50.000 litri/cadauno, collegati in serie, quindi con una capacità di stoccaggio complessiva di 200.000 litri. I 4 serbatoi sono stati installati poco lontano dai pozzi da cui si dipartono gli interventi di congelamento propedeutici allo scavo dei 4 tunnel e sono visibili in fig. 4. Durante la fase di congelamento si è resa necessaria una fornitura giornaliera dell'ordine di 400.000 litri di azoto liquido, con forniture a mezzo di autoarticolati con cadenza media di 1 ogni ora e mezza. La fase di congelamento, per ogni galleria, è condotta operando contemporaneamente dai due fronti contrapposti, con sovrapposizione al centro, realizzando un consolidamento impermeabilizzante per tutta la lunghezza della galleria. La fig. 5 è relativa al Pozzo Binario Pari lato Nord (PO-BPN), in corrispondenza dell'imbocco della Galleria Naturale Interconnessione Pari (GN-IPI). Sono visibili i tre camini di sfiumo, che raccolgono gli scarichi delle sonde congelatrici, per la restituzione in atmosfera dell'azoto gassificato.

### Impianto frigorifero a salamoia

L'impianto a salamoia, visibile in fig. 6, è costituito da tre gruppi frigoriferi che hanno una potenza installata di 240 kW cadauno, per una potenza totale disponibile di 720 kW. Durante la fase di mantenimento del congelamento sono utilizzati solo due dei tre gruppi frigoriferi installati, per consentire la manutenzione a rotazione delle tre attrezzature.

### Requisiti progettuali

Per il congelamento di tutte e quattro le gallerie di sottoattraversamento del fiume Isarco, il Progetto Esecutivo prevede il raggiungimento dei seguenti requisiti:

- *Spessore del guscio di ghiaccio*: è richiesto che lo spessore del guscio congelato sia pari a 1.00 m a temperature inferiori a  $-10^{\circ}\text{C}$  (ovvero tra le due isoterme  $-10^{\circ}\text{C}$ );
- *Impermeabilità*: prima di procedere allo scavo è prevista



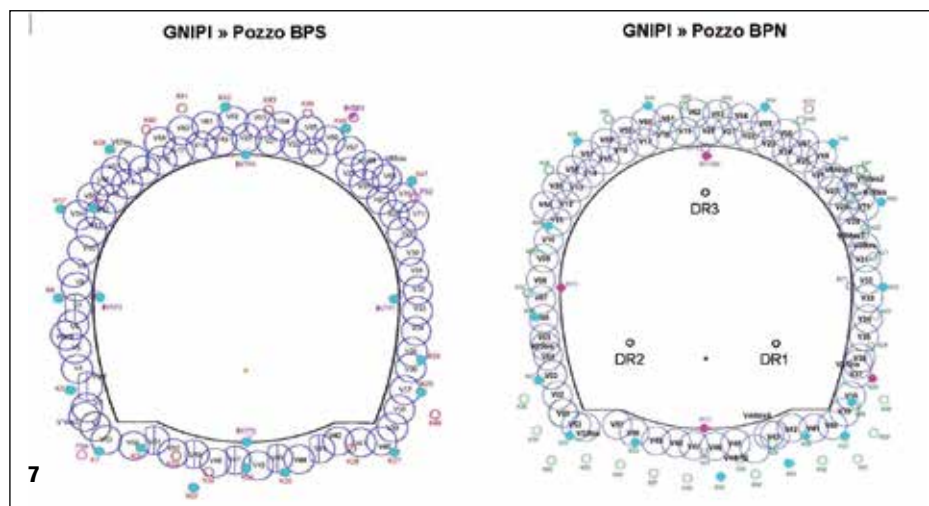
4. Impianto frigorifero di stoccaggio dell'azoto liquido



5. Vista della GN-IPI da Pozzo PO-BPN durante il congelamento ad azoto

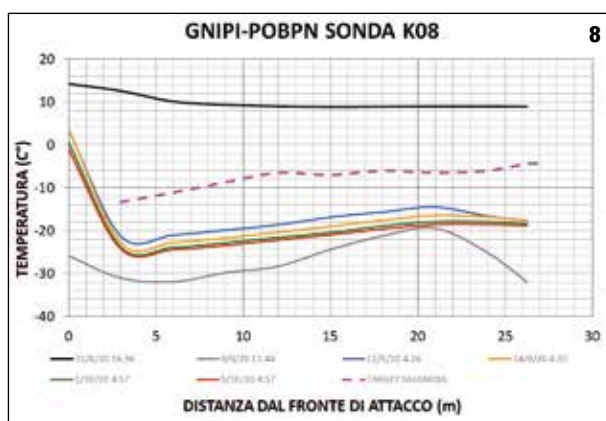


6. Impianto a frigorifero a salamoia

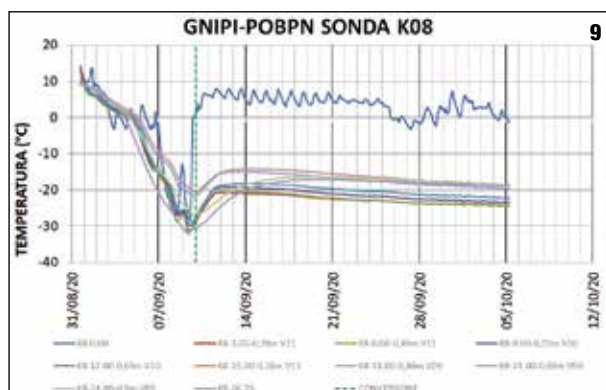


**7. Sezioni trasversali della GN-IPI in corrispondenza dell'attacco dai due pozzi BPS e BPN**

**8. Esempio di grafico delle temperature in funzione della distanza dal fronte di attacco nel pozzo PO-BPN: sonda termometrica K08**



**9. Esempio di grafico delle temperature in funzione del tempo: sonda termometrica K08 da PO-BPN**



l'apertura dei dreni realizzati all'interno del nucleo di scavo per consentire lo svuotamento del nucleo stesso e verificare l'efficacia dell'intervento di congelamento, riscontrando l'esaurimento delle venute d'acqua.

Per il primo requisito sono state definite le temperature target per ciascun sensore di temperatura in funzione della distanza reale dalle sonde congelatrici. Per il secondo sono state eseguite tre prove di portata dai tre dreni realizzati sul fronte della galleria.

## GN-IPI: galleria naturale di interconnessione pari

Il Progetto Esecutivo prevede la realizzazione di perforazioni per gli interventi di pre-consolidamento (e di riduzione del-

le permeabilità naturali) preventivo al congelamento, per la posa di sonde congelatrici e per la posa delle sonde termometriche necessarie al controllo dell'efficacia del congelamento, disposte attraverso lo spessore del terreno congelato ed in estradosso dello stesso. Durante l'esecuzione delle sonde congelatrici e termometriche sono state misurate le deviazioni dei fori; sulla base di tali risultati, oltre ad aver definito alcune sonde congelatrici integrative, sono state definite le posizioni delle catene termometriche che sono state ritenute più opportune. In fig. 7 si riportano due sezioni trasversali, una per ciascun portale, in cui sono riportate le posizioni reali delle sonde congelatrici (V) e quelle delle sonde termometriche (K) utilizzate.

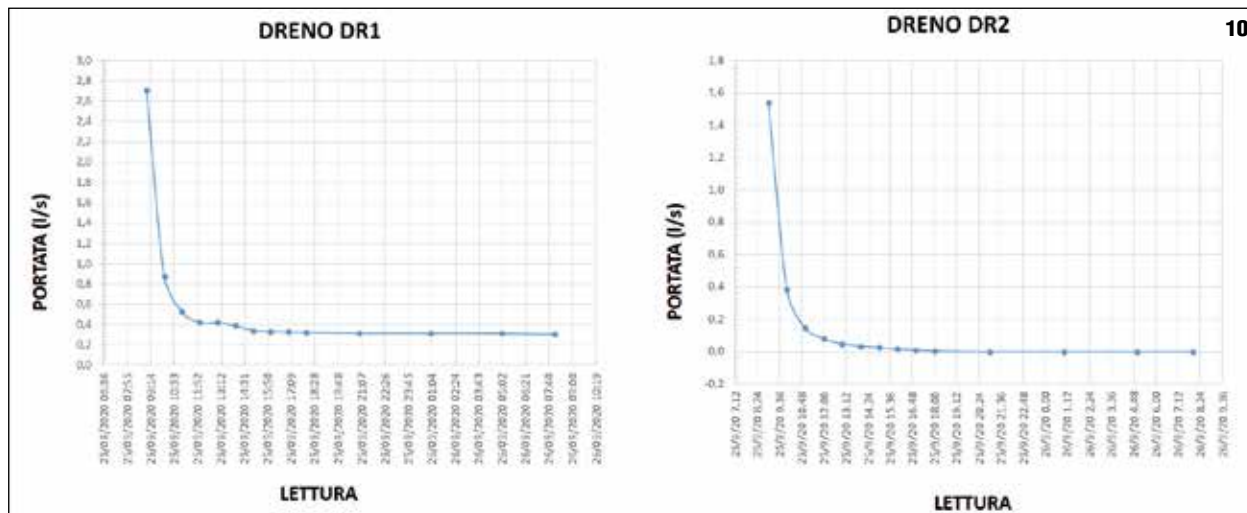
In dettaglio, sono state attivate per ciascun portale 17 catene termometriche esterne e 3/4 interne. Le catene termometriche esterne sono state realizzate con la tecnologia a fibra ottica che consente un elevato numero di punti di misura, teoricamente con misure in continuo. Per semplificare la gestione dei dati, le temperature vengono definite ogni 0,25 m. Le catene termometriche interne, invece, sono state attrezzate con le tradizionali termocoppie disposte ogni 3.00 m.

## Fase di congelamento con azoto liquido

Il giorno 1/9/2020 è stata avviata la fase di congelamento del terreno con l'attivazione della circolazione dell'azoto all'interno dei circuiti di distribuzione e in tutte le sonde frigorifere degli imbocchi della galleria GN-IPI di Pozzo PO-BPN e di Pozzo PO-BPS. La fase di congelamento con azoto è stata mantenuta fino al giorno 8/9/2020 per l'imbocco Sud e fino al giorno 9/9/2020 per l'imbocco Nord. Durante tale fase, sono state osservate e registrate le temperature di tutte le 41 catene termometriche installate, confrontando puntualmente i valori misurati con i valori target previsti dal Progettista.

## Fase di completamento del congelamento con salamoia

Dopo circa 24 ore dalla sospensione della circolazione di azoto, servite per effettuare le necessarie conversioni idrauliche in corrispondenza dei distributori di alimentazione delle sonde frigorifere e per consentire un innalzamento delle temperature all'interno delle stesse sonde, è stata attivata la circolazione della salamoia all'interno dei circuiti di raffreddamento. Non essendo state raggiunte le temperature target su tutti i sensori durante la fase di congelamento ad azoto, il raggiungimento dei requisiti di progetto è stato perseguito per il tramite di una fase di completamento del congelamento mediante salamoia. La fase di completamento del congelamento a salamoia è iniziata il giorno 9/9/2020 per l'imbocco di pozzo Sud e il giorno 10/9/2020 per l'imbocco di pozzo Nord. Come previsto, le temperature rilevate dalle sonde termometriche hanno evidenziato il passaggio dalla fase di circolazione di azoto alla fase di circolazione della salamoia, con un innalzamento delle temperature rilevate all'interno del guscio di terreno congelato ed una successiva stabilizzazione su livelli di temperature compatibili con la circolazione della salamoia.



10. Verifica della portata residua dai dreni DR1 e DR2 al 25/9/2020

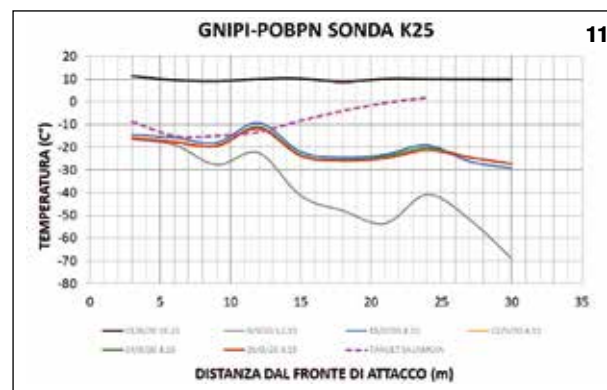
11. Grafico delle temperature in funzione della distanza dal fronte di attacco nel pozzo PO-BPN a seguito della verifica di portata dei dreni del 25/09/2020: sonda termometrica K25

### Analisi delle temperature

Sono riportati in figg. 8 e 9 (pag. precedente), a titolo di esempio, due grafici che si riferiscono alla sonda termometrica K08 dal portale Nord. Il grafico in fig. 8 rappresenta l'andamento delle temperature rilevate ogni 25 cm lungo l'intero sviluppo della sonda termometrica, in funzione della profondità della sonda rispetto al fronte di attacco nel pozzo. In particolare, è riportato l'andamento delle temperature prima dell'avvio del congelamento (31/8/2020), al termine della fase di congelamento ad azoto (9/9/2020), al termine della fase di completamento a salamoia (5/10/2020) e a tre scadenze intermedie della fase di completamento, in modo da apprezzarne l'evoluzione nel tempo; è inoltre rappresentata la curva delle temperature target relative alla fase a salamoia definite dal Progettista. Il grafico in fig. 9, invece, rappresenta l'andamento delle temperature, rilevate dalla stessa sonda termometrica, in funzione del tempo, dall'inizio della fase di congelamento ad azoto liquido fino al termine della fase di completamento del congelamento a salamoia. In questo grafico sono rappresentate, per maggiore chiarezza, solo le curve relative ai sensori disposti alle progressive multiple di 3 m (mentre, come già evidenziato, le temperature sono state rilevate ogni 25 cm lungo l'intero sviluppo della sonda termometrica); nel grafico è evidenziata anche la data di conversione da azoto a salamoia. Si può riscontrare come tale sonda termometrica evidenzi il raggiungimento della temperatura target definita per il raggiungimento del requisito progettuale di spessore del guscio congelato.

### Osservazioni sul completamento del congelamento

In considerazione di un quadro globale di temperature rilevate soddisfacente, si è deciso, in accordo con il Progetto Esecutivo, di eseguire la verifica delle portate residue all'interno del guscio congelato, avvalendosi dei dreni DR1, DR2 e DR3 presenti sul fronte Nord della GN-IPI (cfr. fig. 7), mantenuti chiusi durante tutte le fasi di congelamento. La verifica delle portate residue contenute nel volume di terreno all'interno del guscio di ghiaccio è una prova dirimente per la valutazione dell'efficacia della fase di congelamento. Infatti, nei casi come quello in esame, l'osservazione di una portata residua

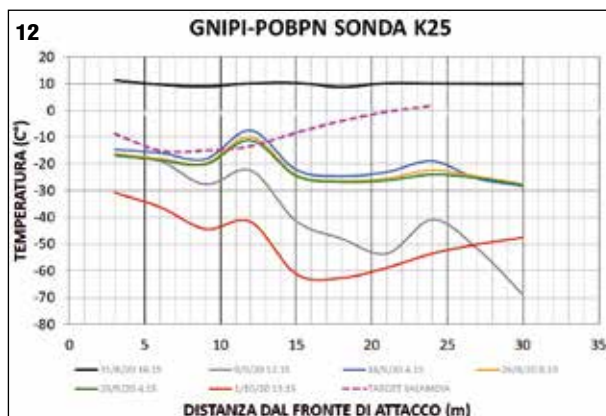


nulla o pressoché nulla dimostra l'ottenimento di un guscio di ghiaccio continuo, quindi impermeabile, caratteristica d'elezione di questa tipologia di consolidamento temporaneo.

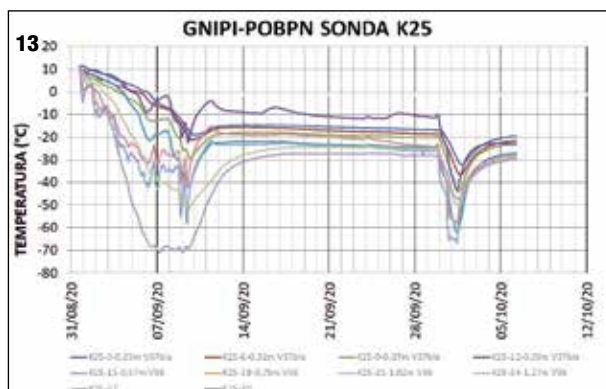
### Verifica portata dreni

Il giorno 15/9/2020 è stata condotta una verifica di portata dei dreni posizionati sul fronte Nord della GN-IPI, aprendo le saracinesche degli stessi e rilevando le portate con letture orarie durante le prime 12 ore e con letture ogni due ore nelle successive 12 ore. Le portate residue si sono stabilizzate dopo circa 10/14 ore e sono risultate essere le seguenti: Dreno DR1: 0,71 l/s; Dreno DR2: 0,08 l/s Dreno DR3: portata nulla. La prova, in relazione ai vincoli di capitolato tecnico (portata residua nulla) ed all'osservazione di effetti di "riscaldamento" di alcune sonde termometriche, è stata quindi classificata come non soddisfacente. Si è proseguito, pertanto, con la fase di completamento del congelamento, programmando una seconda prova di drenaggio nel corso della settimana successiva. Il giorno 25/9/2020, dopo ulteriori nove giorni di completamento del congelamento con circolazione di salamoia, durante i quali è stata osservata la stabilizzazione delle temperature dei termometri su valori compatibili con i valori di target previsti, è stata effettuata una seconda verifica della portata residua. La rappresentazione grafica della prova è contenuta nei grafici di fig. 10, dove risulta evidente l'andamento asintotico della curva di portata verso i valori finali rilevati. Le portate residue registrate non sono state comunque classificate come soddisfacenti, anche in relazio-

**12. Grafico delle temperature in funzione della distanza dal fronte di attacco nel pozzo PO-BPN a seguito della conversione temporanea ad azoto: sonda termometrica K25**



**13. Grafico delle temperature in funzione del tempo a seguito della riconversione a salamoia delle tre sonde frigorifere: sonda termometrica K25 da PO-BPN**



ne all'osservazione, effettuata durante la prova, di fenomeni di "riscaldamento" della sonda termometrica K25 Nord, sintomo di perturbazione idraulica in adiacenza ai punti di rilevamento della temperatura. Il fenomeno registrato è ben visibile nel grafico di fig. 11, dove si osserva la formazione di un "ginocchio" della curva, proprio in corrispondenza della profondità di 12 m. Per i motivi descritti, nella giornata del 26/9/2020 è stata disposta la chiusura dei dreni per stabilizzare la circolazione idraulica e favorire il "raffreddamento" della zona interessata dall'innalzamento delle temperature.

#### Conversione temporanea ad azoto delle sonde congelatrici V36, V37, V37 bis

Il giorno 29/9/2020, per accelerare la fase di raffreddamento generato dall'innalzamento delle temperature, si

è deciso di effettuare la conversione ad azoto delle sonde congelatrici in adiacenza a K25, precisamente V36, V37 e V37 bis (cfr. fig. 7). La circolazione di azoto è stata mantenuta fino alle ore 10.30 di giovedì 1 ottobre e gli effetti di tale operazione straordinaria sono stati prontamente rilevati dal sistema di monitoraggio delle temperature. Nel grafico di fig. 12 sono chiaramente osservabili gli effetti della conversione, la quale ha indotto una rapida caduta delle temperature rilevate da K25 lungo tutta la sua lunghezza, con un sicuro beneficio sul guscio di terreno congelato.

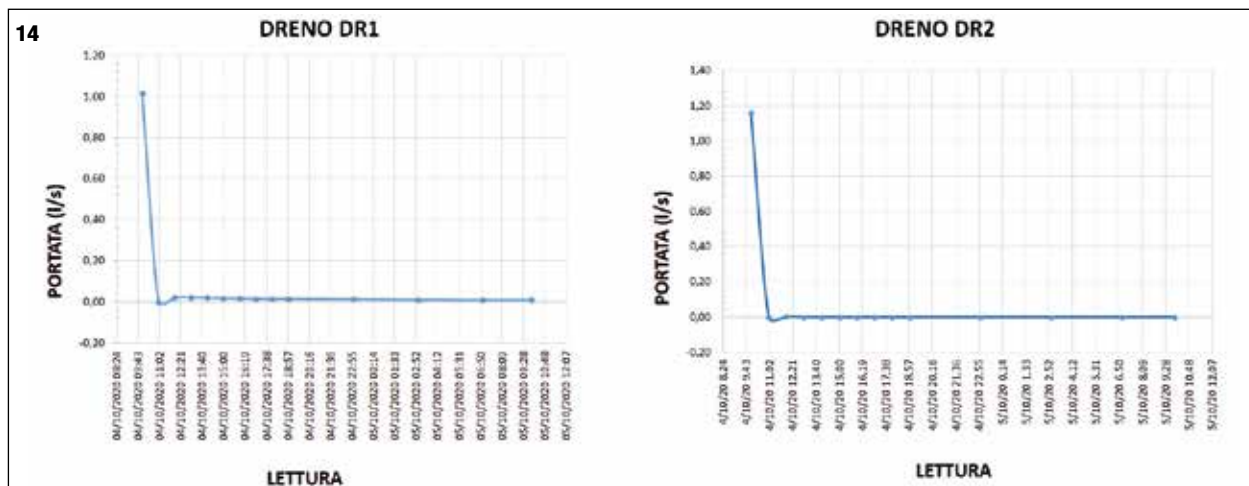
Verificata quindi l'efficacia dell'intervento straordinario, si è proceduto nelle ore successive alla riconversione delle sonde V36, V37 e V37 bis con circolazione a salamoia, in attesa di una successiva stabilizzazione delle temperature. La fase di riconversione a salamoia delle tre sonde frigorifere è apprezzabile nel grafico aggiornato al 6/10/2020 (fig. 13), relativo all'evoluzione nel tempo delle temperature registrate lungo la sonda termometrica K25.

#### Ulteriore verifica portata dreni

Il giorno 4/10/2020, alla luce dei confortanti parametri termometrici rilevati dopo l'intervento straordinario con azoto in corrispondenza delle tre sonde congelatrici, è stata eseguita una terza prova di verifica sui drenaggi DR1 e DR2, per valutare le portate residue all'interno del guscio di terreno congelato che avvolge la sezione di scavo della galleria GN-IP1. I risultati della prova, condotta in 24 ore, sono riportati graficamente nei grafici di fig. 14. Dopo 24 ore di prova, il dreno DR1 si è stabilizzato su una portata di 0,1 lt/sec, mentre il dreno DR2, già dopo 3 ore, manifestava una portata nulla.

Durante la prova sono state monitorate in continuo le temperature del termometro K25, ma non si sono osservati fenomeni di riscaldamento di alcun sensore termometrico, deducendo quindi l'assenza di una circolazione idraulica. Le temperature, infatti, sono risultate stabili durante tutta la durata della prova (cfr. fig. 13). I risultati della prova, quindi, sono stati considerati soddisfacenti ed in linea con i valori progettuali attesi, propedeutici alla successiva fase di scavo della galleria.

**14. Verifica della portata residua dai dreni DR1 e DR2 al 4/10/2020**





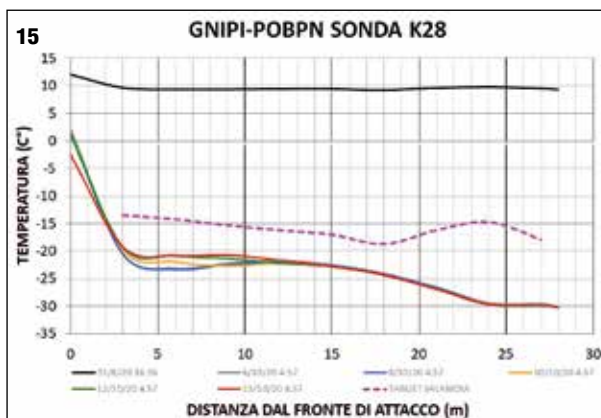
17

## Si inizia a scavare sotto l'Isarco

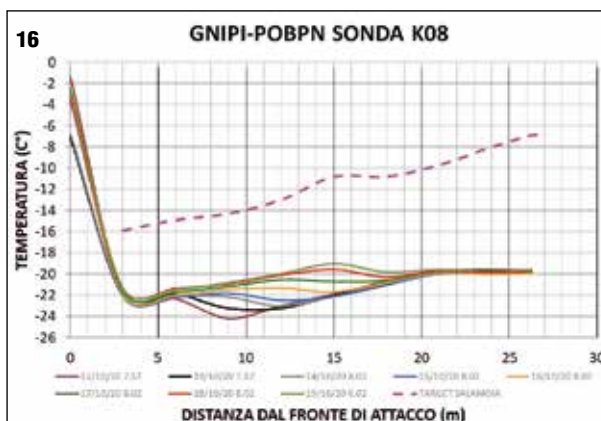
Il giorno 5/10/2020 è iniziata la demolizione della dima di regolarizzazione e della struttura del pozzo all'imbocco Nord della galleria GN-IPI. Dopo i primi giorni in cui lo scavo ha interessato la demolizione della dima, della parete del pozzo Nord e il tratto di terreno consolidato intorno al pozzo, si è entrati nella zona di terreno sotto il fiume Isarco. Le operazioni di scavo della galleria hanno influenzato, alzandole, le temperature su alcune catene termometriche nei primi metri, anche se disposte all'esterno del guscio congelato. Si veda ad esempio K28 nel grafico T-Z riportato in fig. 15. Tale aspetto è maggiormente evidente dalla seguente analisi: sul lato Nord, per diverse sonde termometriche, dal grafico T-Z si legge l'avanzamento dello scavo, con un aumento delle temperature che interessa sensori sempre più avanti come progressiva. Il passaggio dello scavo, con la realizzazione di un vuoto interno che disperde energia termica, provoca un innalzamento delle temperature di qualche grado anche nei sensori esterni. A titolo di esempio, si riporta il grafico relativo alla K8 (fig. 16) in cui si evince l'avanzamento dello scavo. Si riporta, inoltre, una foto del fronte di scavo al giorno 27/10/2020 (fig. 17); il congelamento al contorno del cavo è evidente, e occupa anche una buona parte del fronte di scavo, grazie al quale quest'ultimo risulta stabile e asciutto. È doveroso rimarcare che l'eccessivo, quanto indesiderato spessore di terreno congelato all'interno del profilo di scavo (che ha rallentato in modo significativo l'avanzamento dello scavo stesso) è dovuto all'inusuale durata della fase di completamento del congelamento a salamoia, che si è protratta per ulteriori 26 giorni dopo la conversione da azoto a salamoia.

## Conclusioni

Da quanto sopra illustrato, e con i dati fino ad oggi osservati, si può confermare che la tecnica del congelamento dei terreni rappresenta una soluzione di elezione per il superamento delle problematiche connesse con la realizzazione dell'opera, certamente la migliore alternativa ad altre tecniche di consolidamento normalmente utilizzate per la protezione di scavi in presenza di acqua, che avrebbero inoltre comportato interventi più invasivi e ad alto impatto ambientale, come lo spostamento temporaneo del fiume e il successivo riposizionamento nella sua sede naturale. L'ultima notizia sull'intervento risale al 6/11/2020 giorno in cui è stato completato lo scavo della galleria di interconnessione sotto il fiume Isarco (fig. 18). ■



15. Grafico delle temperature in funzione della distanza dal fronte di attacco nel pozzo PO-BPN aggiornato ai primi giorni di scavo: sonda termometrica K28



16. Grafico delle temperature in funzione della distanza dal fronte di attacco nel pozzo PO-BPN aggiornato al 19.10.2020: sonda termometrica K28

17. Fronte di scavo al 27/10/2020

18. Completamento scavo gallerie di sottoattraversamento dell'Isarco: 6/11/2020



18