




TECNOLOGIA

Congelamento artificiale dei terreni

TREVI
↓



Sistema di consolidamento sicuro ed eco-compatibile, nessun prodotto viene iniettato o disperso nel terreno

Applicabile a qualsiasi tipo di terreno (da grana grossa a grana fine) e roccia

Sistema di consolidamento ed impermeabilizzazione di tipo temporaneo

Perfetta tenuta idraulica, controllata e garantita prima dello scavo

Trattamento omogeneo, elevata resistenza meccanica

- Congelamento con sistema "a salamoia"
50 - 150 kWh/mc
- Congelamento con sistema ad "azoto liquido"
1.000 ÷ 2.000 lt/mc

• La tecnica del congelamento del terreno si può applicare a qualsiasi tipo di terreno (da grana grossa a grana fine) e roccia

• Il congelamento è un sistema di consolidamento ed impermeabilizzazione di tipo temporaneo.

• La tecnica del congelamento, se correttamente eseguita e dimensionata, consente di:

- raggiungere una perfetta tenuta idraulica. Con i sistemi di consolidamento tradizionali si ottengono in generale, in funzione dei terreni e dei materiali iniettati, solo riduzioni della permeabilità naturale del terreno di entità e qualità non controllabili con certezza a priori.

- ottenere un trattamento particolarmente omogeneo, senza punti o piani di debolezza, caratterizzato da una notevole resistenza meccanica.

Nel caso di scavi in terreni sciolti o coesivi sotto falda, in presenza di battenti idraulici importanti (dell'ordine di decine di metri), in particolare quando si opera in ambienti urbani, la tecnica del congelamento rappresenta la scelta più appropriata, se non l'unica, al fine di garantire il maggior livello di sicurezza possibile. In tali situazioni è infatti indispensabile evitare rischi di sifonamento e rifluimenti di materiale e di acqua in pressione all'interno degli scavi, con conseguenti ricadute disastrose per le opere in costruzione, per le maestranze impegnate e per le pre-esistenze in superficie.

Tecnologia

Il gruppo TREVI, grazie anche alla recente acquisizione della società Rodio e del relativo know-how, è in grado di proporre, per ogni progetto di congelamento, un servizio completo, che comprende:

- **Realizzazione analisi ed indagini geotecniche, geostitiche ed idrogeologiche**
- **Analisi e scelta del sistema più idoneo e conveniente** dal punto di vista tecnico ed economico, valutando diverse opzioni e geometrie di intervento
- **Analisi termiche e dimensionamento del corpo di terreno congelato**, in termini di potenza frigorifera e tempi necessari all'ottenimento degli spessori e temperature richieste.
- **Realizzazione dell'intervento**, dalle fasi preliminari di perforazione ed installazione canne congelatrici e termometriche, all'installazione e gestione degli impianti frigoriferi e dei serbatoi di azoto liquido
- **Monitoraggio, analisi e gestione dei dati di temperatura**

I **limiti di applicabilità** sono rappresentati da:

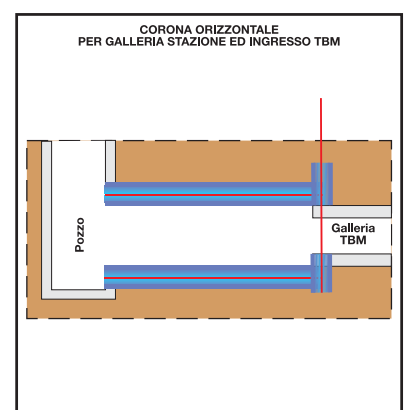
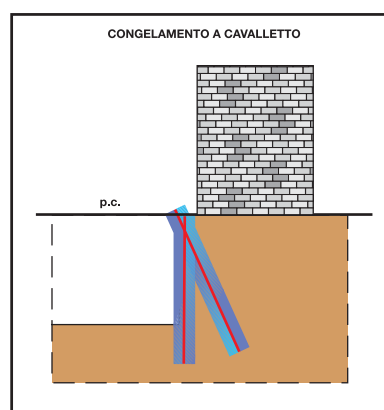
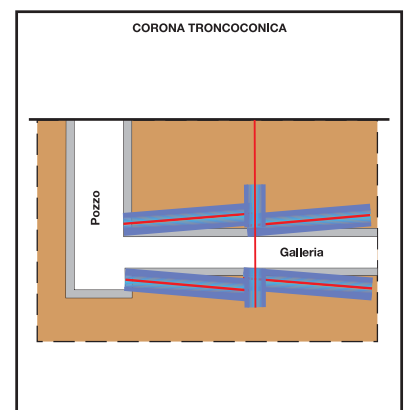
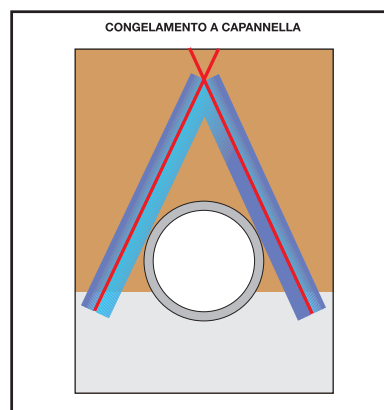
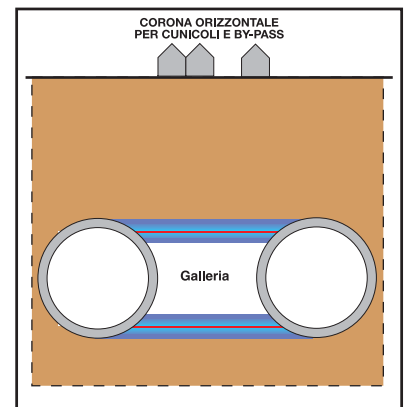
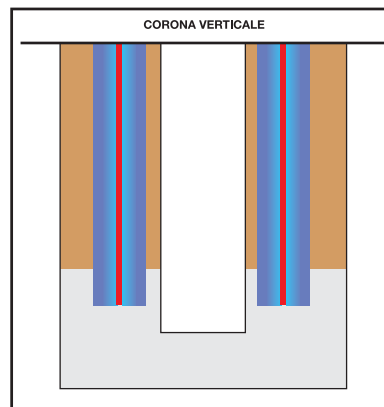
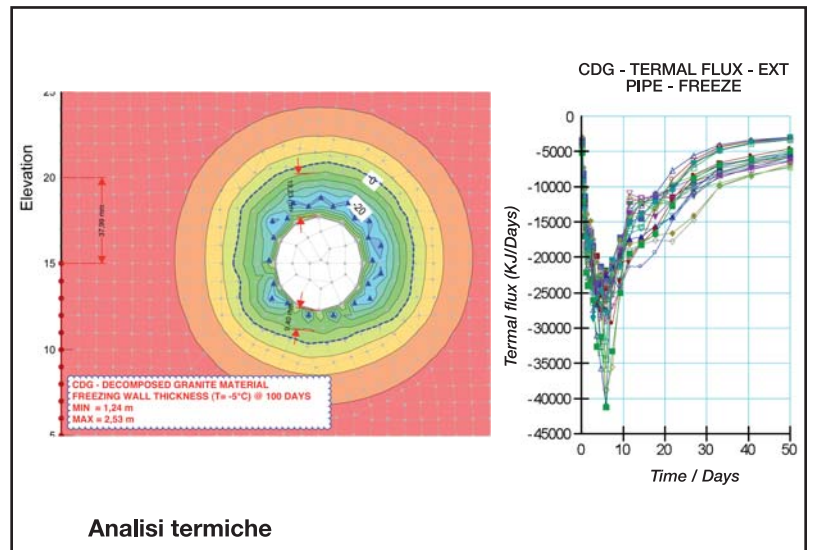
- ciascuno strato che deve essere congelato deve possedere un adeguato grado di umidità
- la velocità dell'acqua all'interno del terreno da trattare deve essere inferiore a determinati limiti.

I **principali campi di applicazione** sono:

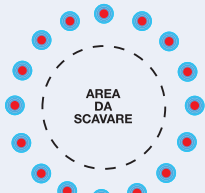
- Scavo di gallerie, pozzi e by-pass
- Interventi di sotto-murazione e protezione degli scavi
- Carotaggi criogenici per il prelievo di campioni indisturbati in materiali incoerenti sciolti

In funzione del posizionamento delle sonde congelatrici, si possono creare svariate forme e strutture di terreno congelato; le geometrie standard di intervento sono:

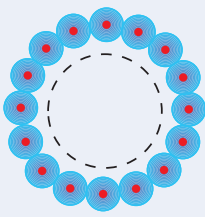
- **coronella cilindrica verticale**; utilizzata per lo scavo di pozzi da piano campagna, immorsati o meno in substrato impermeabile;
- **coronella cilindrica orizzontale**; utilizzata per lo scavo, da pozzo o da trincea, di gallerie o di cunicoli di collegamento;
- **a setto verticale**; utilizzata come tampone di fondo per gallerie a foro cieco;
- **a "capannella"**; utilizzata per la protezione di scavi in orizzontale che necessitano di interventi impermeabilizzazione e di consolidamento nella sola parte alta di calotta e di piedritti (arco rovescio in strato impermeabile);
- **a coronella cilindrica tronco-conica**; utilizzata per realizzare giunzioni "testa-testa" tra due gallerie o per eseguire rilanci del trattamento per interventi molto estesi in lunghezza;
- **a "cavalletto"**; utilizzata per trattamenti di sotto-murazione e per lo scavo in adiacenza a pre-esistenze.



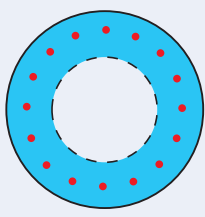
FASI DI CONGELAMENTO



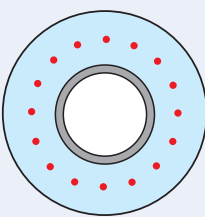
Fase di congelamento in accrescimento



Fase di congelamento. Chiusura del muro di ghiaccio



Completamento fase di congelamento. Raggiungimento spessore e temperatura di progetto

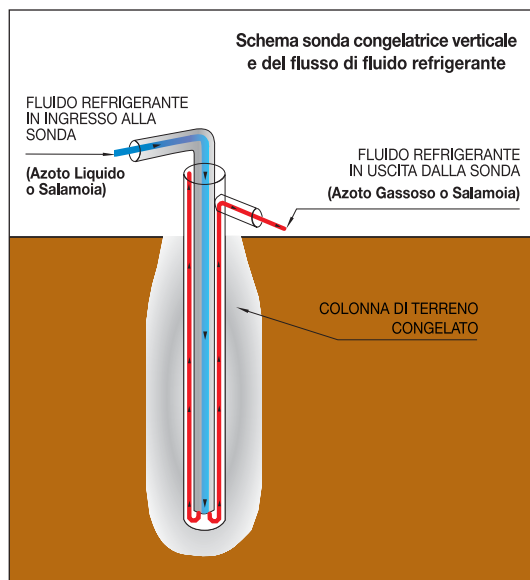
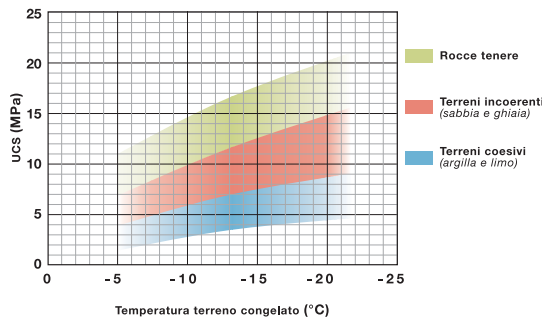


Fase di mantenimento

La tecnica consiste nel congelare, a temperatura predeterminata, l'acqua all'interno di un volume di terreno, secondo una geometria nota, sottraendo calore dal terreno attraverso degli speciali scambiatori di calore detti sonde congelatrici.

Il raffreddamento del terreno viene ottenuto facendo circolare, all'interno del volume da consolidare, un liquido a bassa temperatura, che provvede all'estrazione del calore e alla dissipazione dello stesso all'esterno.

Il congelamento modifica le proprietà idrauliche di un terreno o di una roccia (*rendendoli impermeabili*) e quelle meccaniche. La resistenza a compressione di un terreno congelato varia in funzione del tipo di terreno o roccia e aumenta in funzione della temperatura. I valori generalmente utilizzati variano fra -5 e -20°C , a cui corrispondono valori di resistenza variabili fra 3 e 20 MPa.



La corretta determinazione delle caratteristiche termiche è fondamentale per una quanto più attendibile previsione del tempo di congelamento, delle potenze e della capacità frigorifera necessarie per l'ottenimento dei requisiti progettuali richiesti. Oltre alle note proprietà fisiche di un terreno (*densità, granulometria e composizione mineralogica, contenuto d'acqua, grado di saturazione, salinità*), a governare il processo di congelamento del terreno sono le proprietà termiche del terreno, ossia la capacità termica e la conducibilità termica.

Le fasi temporali di un processo di congelamento sono:

Fase di congelamento durante la quale, sottraendo calore al terreno, si ottiene la chiusura e la formazione del muro di terreno congelato, dello spessore e della temperatura richiesti dal progetto.

Fase di mantenimento, nella quale è richiesto di estrarre la quantità di calorie necessaria al fine di non far progredire ulteriormente lo sviluppo del muro di terreno congelato ed evitare il deterioramento delle caratteristiche raggiunte nella fase precedente (lo scongelamento).

Praticamente si impiegano, a seconda del fluido refrigerante utilizzato, le due seguenti metodologie:

- **congelamento "ad azoto liquido" detto anche "a ciclo aperto" o "diretto"**; il fluido refrigerante (*gas compresso allo stato liquido con temperatura pari a -196°C*) circola in un circuito aperto e, dopo il passaggio all'interno delle sonde congelatrici, viene disperso in atmosfera allo stato gassoso;
- **congelamento "a salamoia" detto anche "a ciclo chiuso" o "indiretto"**; il fluido refrigerante (*soluzione acquosa di cloruro di calcio con punto di congelamento compreso tra -40°C e -50°C*), viene inviato a temperatura di -30°C - -35°C nelle sonde congelatrici, dove scambiando calore si riscalda, ritorna all'impianto frigorifero, viene nuovamente raffreddato e di qui re-inviato alle sonde.

I criteri di scelta tra le diverse metodologie sono legati principalmente a valutazioni di ordine economico ed a esigenze legate alla logistica di cantiere ed alla tempistica necessaria all'ottenimento del volume di terreno congelato.

La potenza frigorifera media (*in termini di consumo di energia elettrica o di quantità di azoto*), necessaria per congelare un metro cubo di terreno, caratterizzato da un tenore d'acqua pari al 30%, può essere stimata in:

Congelamento con sistema "a salamoia"
50 - 150 kWh/mc

Congelamento con sistema ad "azoto liquido"
1.000 ÷ 2.000 lt/mc

Per le fasi di mantenimento le potenze frigorifere ed i volumi di azoto si riducono generalmente del 40-60%.

I valori di potenza frigorifera non tengono in considerazione fattori legati alle peculiarità dei singoli interventi, quali temperature anomale del terreno o dell'acqua di falda, valori elevati di salinità, la lunghezza e la tipologia di coibentazione delle linee di distribuzione dei fluidi frigoriferi e dei tratti di sonde congelatrici non attivi (zone coibentate nei tamponi verticali).

Sistema di congelamento ad azoto

Il sistema di congelamento ad azoto liquido è particolarmente indicato per:

- **interventi caratterizzati da tempi di realizzazione molto ristretti**
- **volumi ridotti** (fino a qualche centinaio di metri cubi di terreno)

L'azoto è un gas non tossico, non infiammabile, presente nell'aria fino al 78%; l'azoto, in forma liquida ad una temperatura di -196°C , viene inviato, attraverso le linee di mandata alle singole sonde congelatrici.

All'uscita dalle sonde congelatrici l'azoto, "riscaldato" per effetto dell'assorbimento di calore dal terreno, attraverso la linea di ritorno, viene disperso allo stato gassoso in atmosfera.

Oltre alla potenza frigorifera legata al passaggio di stato liquido-gas, il sistema sfrutta la potenza frigorifera prodotta dal salto termico tra la temperatura di vaporizzazione del gas e quella di scarico in atmosfera. Il valore di temperatura dell'azoto gassoso allo scarico rappresenta quindi un compromesso tra uno sfruttamento economicamente vantaggioso del gas e una tempistica di realizzazione dell'intervento; l'intervallo è generalmente compreso tra -60°C e -120°C .

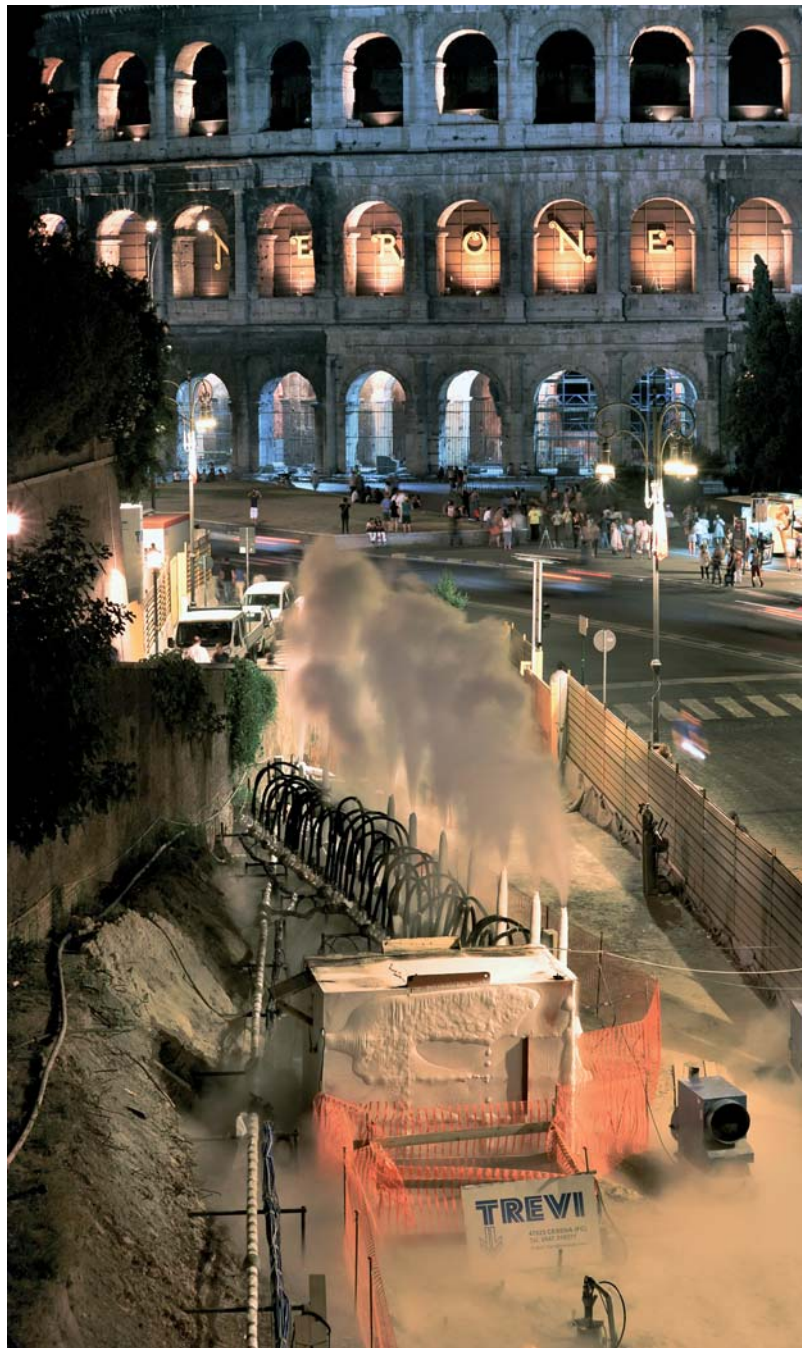
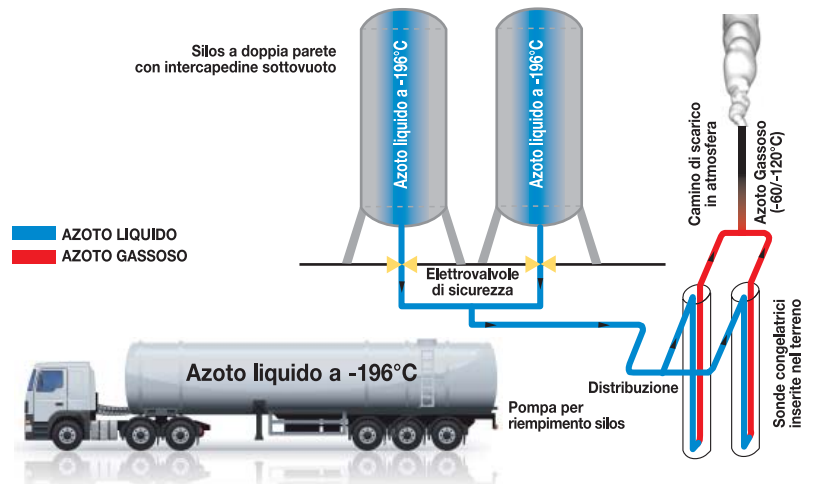
Nel sistema di congelamento ad azoto, al fine ridurre i rischi dovuti a rotture fragili da freddo, vengono impiegati materiali tipicamente utilizzati nell'industria criogenica (*rame e acciaio inox*), caratterizzati da una maggiore resilienza alle basse temperature. Inoltre le linee di mandata dell'azoto e le tubazioni di collegamento tra le linee di mandata e le testine di adduzione delle sonde congelatrici vengono coibentate con idoneo materiale isolante.

Il sistema di congelamento ad azoto è costituito da:

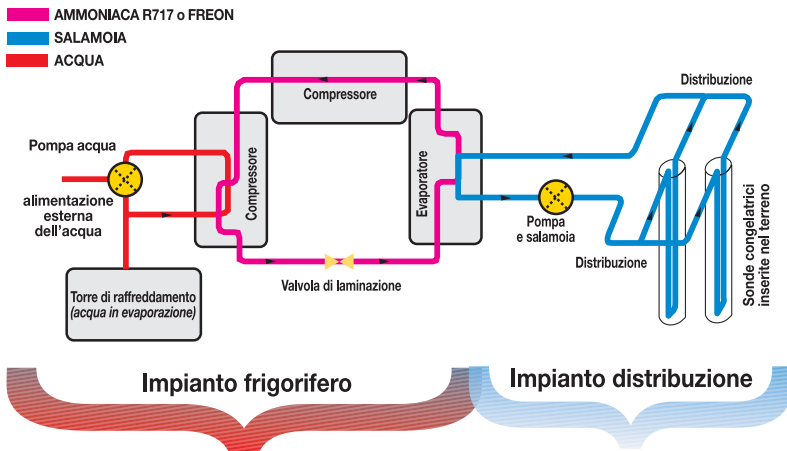
- **uno o più silos di stoccaggio a doppia parete**, dotati di un sistema di vaporizzazione e di messa in pressione dell'azoto liquido, che consente l'alimentazione delle sonde congelatrici senza l'utilizzo di impianti di pompaggio
- **sonde congelatrici** in cui viene fatto circolare ed evaporare l'azoto liquido
- **sistema di distribuzione** che veicola l'azoto liquido dal serbatoio alle sonde congelatrici e dopo la gassificazione all'interno delle sonde, da queste ultime direttamente allo scarico in atmosfera.

Il sistema di congelamento ad "azoto liquido", rispetto a quello a "salamoia", è caratterizzato da:

- **elevata potenza frigorifera**
- **tempi di congelamento ridotti** (generalmente $2\div 7$ gg)
- **impianto di notevole semplicità** e minor costo di installazione
- **utilizzo di materiali più pregiati** tipicamente utilizzati nell'industria criogenica (*acciaio inox o rame*),
- **maggiore facilità per il raggiungimento di basse temperature** medie nel terreno e quindi elevata resistenza
- **ampia applicabilità in presenza di acqua in movimento** (velocità dell'acqua < 8 m/g)
- **maggiore costo** derivante dal consumo continuo di azoto (in particolare su trattamenti di elevate dimensioni e lunga durata)
- **problemi di utilizzo in galleria** su distanze superiori ai 500-800 m



Sistema di congelamento a salamoia



Il sistema di congelamento a salamoia è particolarmente indicato per:

- **interventi di lunga durata** che richiedano un periodo di mantenimento del terreno allo stato congelato superiore al mese
- **volumi significativi di terreno da congelare**, superiori a 500 metri cubi.

La salamoia (*una soluzione acquosa a base di cloruro di calcio*) viene raffreddata a temperature variabili fra $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, scambiando calore con il fluido frigorifero contenuto all'interno dell'impianto frigorifero, generalmente ammoniaca o freon. La salamoia viene quindi inviata, attraverso le linee di mandata alle singole sonde congelatrici. All'uscita dalle sonde congelatrici la salamoia, "riscaldata" per effetto dell'assorbimento di calore dal terreno, ritorna all'impianto frigorifero attraverso la linea di ritorno dove viene nuovamente raffreddata e quindi re-inviata alle sonde per un nuovo ciclo.

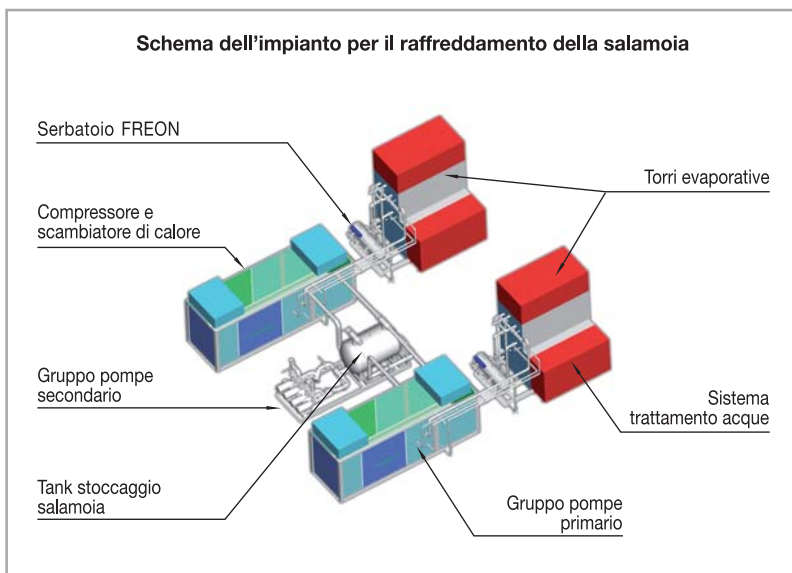
Il sistema sfrutta la potenza frigorifera prodotta dal salto termico tra la temperatura di uscita ed entrata della salamoia nell'impianto frigorifero; l'intervallo è generalmente compreso tra in un intervallo fra 3 e $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Anche nel sistema di congelamento a salamoia, al fine ridurre i rischi dovuti a rotture fragili da freddo, vengono impiegati materiali caratterizzati da una maggiore resilienza alle basse temperature; tipicamente si utilizzano acciai e non materiali più pregiati come rame e acciaio inox. Le linee di mandata/ ritorno della salamoia e le tubazioni di collegamento tra le linee di mandata/ritorno e le testine di adduzione delle sonde congelatrici vengono coibentate con idoneo materiale isolante.

Il sistema di congelamento a salamoia è costituito da:

- **impianto frigorifero di tipo industriale** (*quale fluido frigorifero vengono generalmente impiegati ammoniaca o freon*) ed impianto di pompaggio della salamoia
- **sonde congelatrici** in cui viene fatta circolare la salamoia
- **sistema di distribuzione che veicola la salamoia** (*fluido refrigerante*) dall'impianto frigorifero alle sonde congelatrici e viceversa.

Il sistema di congelamento a salamoia, *rispetto a quello ad azoto*, è caratterizzato da:

- **minori costi di gestione** su trattamenti di elevate dimensioni e lunga durata
- **maggiore costo iniziale** dell'impianto frigorifero
- **elevata complessità** in termini di installazione, funzionamento, gestione e manutenzione degli impianti frigoriferi
- **minore potenza frigorifera e quindi maggiori tempi di congelamento** (*generalmente $20 \div 60$ gg*)
- **minore applicabilità in presenza di acqua in movimento** (*Velocità dell'acqua < 2 m/g*)



Sistema di congelamento misto azoto-salamoia.

Il sistema misto di congelamento azoto- salamoia, sintetizza i vantaggi di entrambi i sistemi precedentemente descritti.

Mediante opportuni accorgimenti e sostituzioni di componentistica, le stesse sonde congelatrici possono essere alimentate prima con azoto e successivamente con salamoia o viceversa.

Queste speciali sonde non devono subire rotture per infragilimento da freddo, in quanto durante il loro utilizzo con sistema a salamoia la perdita di salamoia stessa dalle sonde causa la contaminazione del terreno e ne ostacola il congelamento.

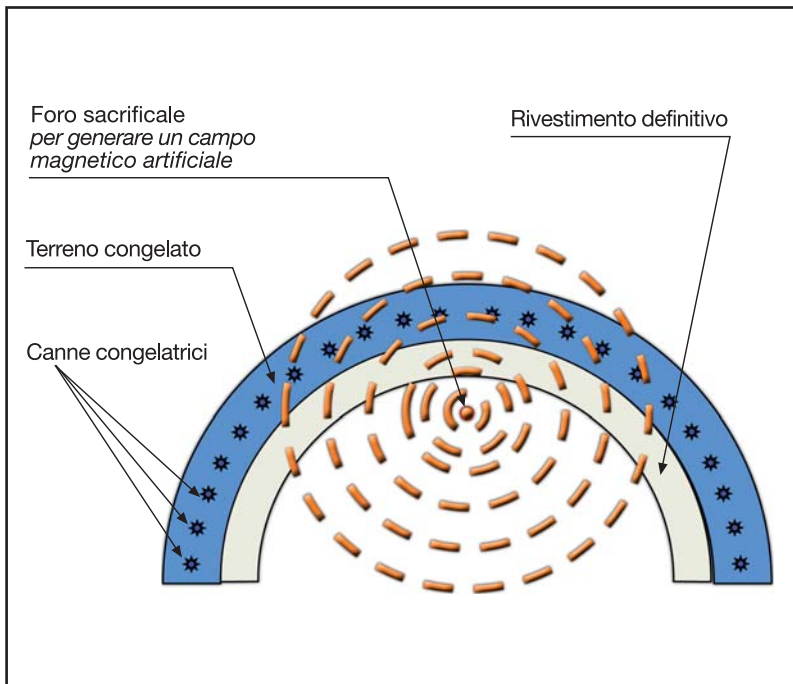
Vengono quindi utilizzati materiali per uso criogenico, adatti a tale scopo, caratterizzati da alta resilienza. Anche le geometrie ed i rapporti tra le sezioni dei tubi costituenti le sonde, sono stati appositamente studiati e messi a punto al fine di trovare il giusto compromesso per ottimizzare gli scambi termici.

Le principali peculiarità del sistema sono:

- **Possibilità di impiegare l'azoto per il congelamento e la salamoia per il mantenimento**, ottimizzando così pregi e difetti dei due metodi.
- **Flessibilità di impiego**, legata alla possibilità di scelta in qualsiasi momento di utilizzare un sistema piuttosto che l'altro, con brevi tempi di conversione.
- **Maggiore sicurezza**, legata alla possibilità di poter disporre del sistema ad azoto in grado di risolvere eventuali problemi di:
 - geometria e/o errori nel posizionamento delle sonde congelatrici
 - disomogeneità del terreno
 - inaspettate velocità e flussi di acqua
 - rotture di sonde congelatrici.



Sistema di perforazione guidata



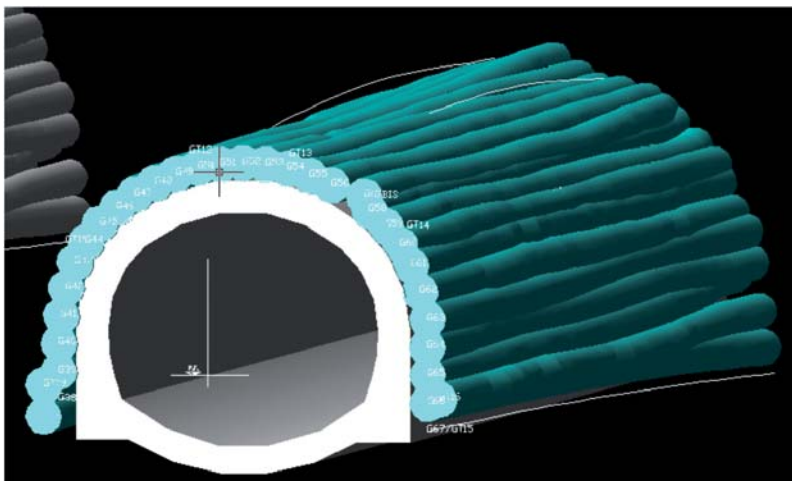
Affinché il congelamento del terreno possa avvenire in maniera omogenea, risulta essenziale che le canne congelatrici vengano posizionate rispettando la geometria e gli interassi per tutta la loro lunghezza, ovvero che le stesse non divergano oltre le tolleranze imposte dal progetto.

Per risolvere situazioni la cui fattibilità con le tecniche di perforazione convenzionali risulta aleatoria o pressoché impossibile, il gruppo Trevi ha sviluppato e messo a punto, basandosi sulla già nota tecnica dell'**HDD (Horizontal Directional Drilling)**, un innovativo sistema di perforazioni direzionate denominato **TDDT (Trevi Directional Drilling Technology)**.

Sono stati studiati vari sistemi di controllo e guida "dedicati", in grado di garantire una elevata precisione di rilevamento in tempi contenuti, per non rallentare eccessivamente le attività di perforazione. Il metodo prevede la generazione di un sistema di referenziamento basato su un campo magnetico artificiale di coordinate note. Nella batteria di perforazione viene alloggiato un dispositivo di rilevamento in grado di misurare e calcolare le coordinate della batteria rispetto al campo magnetico artificiale. In funzione del rilievo dell'andamento della perforazione e delle tolleranze di errore impostate, vengono effettuate le correzioni mediante speciali utensili asimmetrici.

Il sistema è stato sperimentato ed applicato con successo nei lavori di realizzazione delle stazioni della **Metropolitana di Napoli**; per consentire lo scavo delle gallerie di stazione il progetto prevedeva l'utilizzo della tecnologia del congelamento del terreno.

Le perforazioni per l'installazione delle sonde congelatrici di lunghezza circa 55 metri sono state realizzate con la tecnologia TDDT con deviazioni massime inferiori allo 0,4%.



Monitoraggi e controlli

Per il controllo delle fasi di congelamento del terreno e successivo mantenimento è indispensabile monitorare in continuo l'andamento delle temperature del terreno nel tempo.

Il controllo delle temperatura viene eseguito mediante sonde termometriche, installate all'interno di perforazioni lunghe quanto le sonde congelatrici.

Le sonde termometriche, costituite da una serie di termometri in generale uno ogni 3/5 metri, vengono posizionate sul contorno del muro di ghiaccio in posizioni note e misurate.

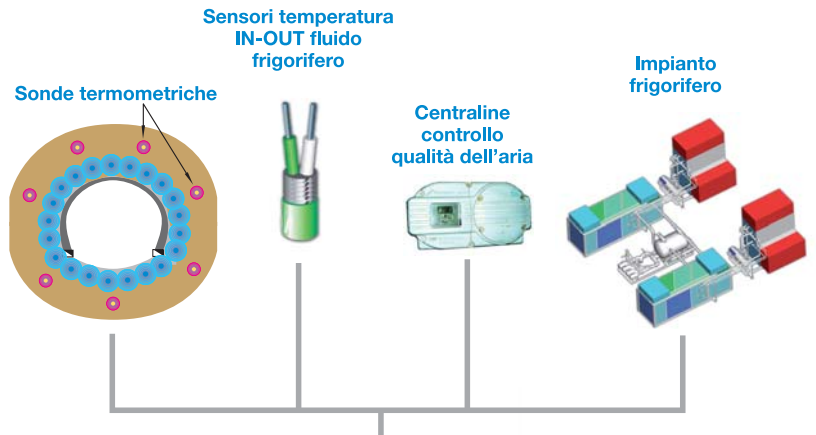
TREVI ha sviluppato un sistema per l'acquisizione, la visualizzazione e la gestione dei dati di temperatura.

I dati di monitoraggio e le eventuali anomalie vengono trasmessi via internet al personale operativo e tecnico; ciò consente il controllo e la gestione in "real time" del processo di congelamento del terreno.

L'interpretazione dell'andamento delle temperature in funzione del tempo ed della distanza a cui si trovano rispetto alle sonde congelatrici consente di poter monitorare la formazione e lo sviluppo del muro di ghiaccio e di stabilire con certezza il completamento del processo.

E' possibile evidenziare eventuali anomalie e zone sede di possibili problemi e quindi procedere in anticipo allo scavo. Ciò consente di poter agire con interventi integrativi, contrariamente ad ogni altra tipologia di intervento di consolidamento ove è molto difficile capire l'efficacia dell'intervento prima delle fasi di scavo.

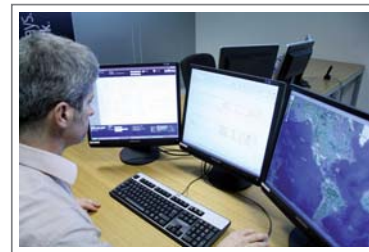
Al centro della sezione da congelare vengono generalmente realizzati fori di osservazione, attrezzati con un tubo fessurato; il controllo delle pressioni di acqua fornisce indicazione sulla chiusura e formazione del muro di ghiaccio; i fori vengono utilizzati anche quale sfogo delle sovra-pressioni di acqua.



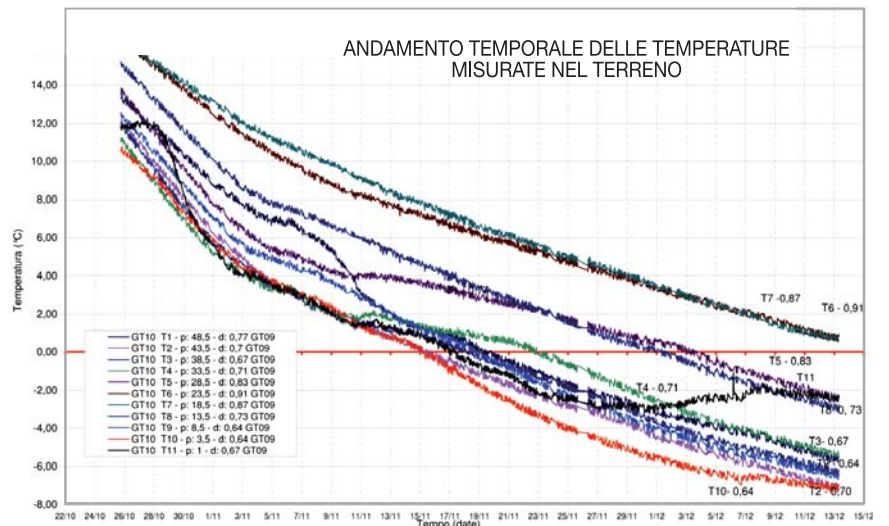
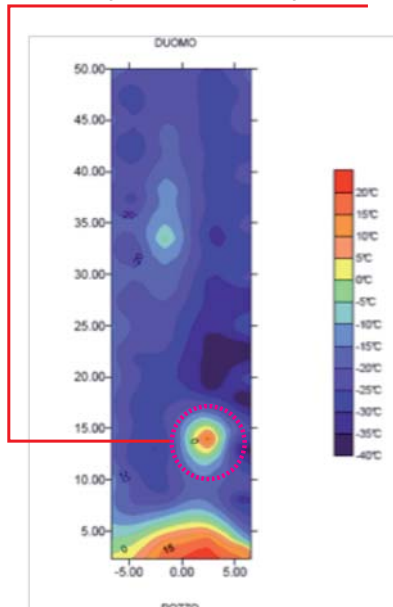
Centrale acquisizione dati in cantiere



Visualizzazioni dati delle varie lavorazioni e monitoraggi



Area non congelata su cui eseguire interventi integrativi



Case History



Il gruppo Trevi, anche grazie all'acquisizione della Rodio, ha eseguito numerosi progetti complessi in cui la tecnica del congelamento artificiale del terreno è risultata vincente. Negli ultimi anni alcuni dei principali progetti realizzati sono stati:

2002-2003

SOPHIA SPOORTUNNEL (Olanda)

Il progetto prevedeva la realizzazione di N° 14 cunicoli (*cross passages*) di collegamento fra le due gallerie della linea ferroviaria Betuweroute, di diametro 8,65 m, lunghezza 4240 m, scavate con TBM. I cunicoli sono stati scavati, partendo da 7 pozzi di servizio posti a 520 metri di distanza l'uno dall'altro, realizzando un muro di terreno congelato con funzioni idrauliche e strutturali, quale supporto temporaneo delle pareti di scavo fino al completamento del rivestimento interno in calcestruzzo. I terreni interessati dall'intervento erano costituiti essenzialmente da sabbie sciolte e argille sotto falda. **Circa 4.400 metri cubi di terreno sono stati congelati, utilizzando sia il sistema ad "azoto liquido" che il sistema a "salamoia".**

1999-2000

CERN LHC project (Francia)

Il progetto prevedeva la realizzazione di N° 2 pozzi di accesso alle caverne sotterranee del CERN; i pozzi, di diametro pari a 25 e 15 metri e profondi 70 metri, sono stati scavati realizzando un muro di terreno congelato dello spessore di 3-4 metri con funzioni idrauliche e strutturali, quale supporto temporaneo delle pareti di scavo fino al completamento del rivestimento interno in calcestruzzo. I terreni interessati dall'intervento erano costituiti essenzialmente da depositi glaciali sovrastanti ad un substrato roccioso "molassa", costituito da marne ed arenarie. **Circa 25.000 metri cubi di terreno sono stati congelati mediante il sistema a "salamoia".**



2004-2009

METROPOLITANA DI NAPOLI

Stazioni Piazza Garibaldi, Università e Toledo (Italia)

Il progetto prevedeva la realizzazione di pozzi rettangolari di grandi dimensioni (*50 x 25 metri circa*), profondi fino a 45 metri. Dai pozzi sono state scavate le gallerie di stazione e le gallerie di accesso ai treni (*discenderie*), lunghe fino a 50 metri, in presenza di un muro di terreno congelato dello spessore di 2-4 metri, con finalità, in funzione delle diverse situazioni geologiche, impermeabilizzanti e/o strutturali nei confronti dei terreni interessati dallo scavo. I terreni interessati dall'intervento erano costituiti dalla formazione di base del tufo giallo napoletano a variabile livello di fatturazione, sopra il quale si trovava una zona di transizione o cappellaccio; queste formazioni erano ricoperte da un deposito costituito da sabbie pozzolaniche. La falda si trovava a partire da circa 10 metri sotto il piano campagna ed interessava anche il tufo attraverso un complesso sistema di fratture subverticali ("*scarpine*"). Per risolvere situazioni la cui fattibilità con le tecniche di perforazione convenzionali sarebbe risultata aleatoria o pressoché impossibile, le perforazioni per l'installazione delle sonde congelatrici di lunghezza circa 55 metri, sono state realizzate per oltre 40.000 ml con un innovativo sistema di perforazioni guidate denominato TDDT (*TREVI DIRECTIONAL DRILLING TECHNOLOGY*), ottenendo deviazioni massime inferiori allo 0,4 %. La complessa situazione superficiale in corrispondenza della stazione Toledo, ha imposto la realizzazione del pozzo di accesso in posizione disassata rispetto alle gallerie di stazione; è stata quindi realizzata un'ulteriore galleria (*galleria di "scavalco"*), da cui poi sono state scavate le gallerie di linea e le gallerie di accesso ai binari. **In totale circa 60.000 metri cubi di terreno sono stati congelati, utilizzando prevalentemente il sistema misto (azoto liquido per congelamento e salamoia per il mantenimento).**





Protagonista mondiale nel settore dell'ingegneria nel sottosuolo, Trevi ha consolidato, in oltre 50 anni di attività in ogni angolo del mondo, la propria capacità di risolvere qualsiasi problema d'ingegneria nel sottosuolo.

Trevi opera nel settore della fondazioni speciali, nel consolidamento di terreni, nel ripristino delle dighe, nella costruzione e consolidamento delle gallerie, nei lavori marittimi, nella messa in sicurezza dei siti inquinati, nella costruzione di parcheggi interrati e automatizzati.

Trevi è votata all'innovazione continua e alla costante ricerca di soluzioni per le complesse problematiche che l'ingegneria civile deve affrontare in tutto il mondo. Sperimentazione della tecnologia più avanzata, tradizione imprenditoriale e volontà di investire in ricerca e nelle risorse umane sono i punti di forza di una realtà radicata in oltre 30 paesi.



www.trevispa.com