

***INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEI  
TERRENI MEDIANTE CONGELAMENTO PER  
SOTTO-ATTRAVERSAMENTO DELLA STAZIONE  
ESISTENTE SAN GIOVANNI – LINEA "A"***



**Ing. Alessandro Bertero – Progettazione R&D Trevi Group**  
**[abertero@trevispa.com](mailto:abertero@trevispa.com)**

# SOMMARIO

- ❑ TECNOLOGIA DEL CONGELAMENTO ARTIFICIALE DEI TERRENI
- ❑ SISTEMI DI GUIDA/CONTROLLO DELLE PERFORAZIONI
- ❑ SISTEMI DI PERFORAZIONE

# CONGELAMENTO ARTIFICIALE DEI TERRENI

Il metodo di congelamento artificiale dei terreni è una tecnica di **impermeabilizzazione e/o consolidamento temporaneo** per lo scavo sottofalda di terreni sciolti o rocce fratturate.

Tale tecnica consiste nel congelare 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, fino a che la temperatura non scende al di sotto del punto di congelamento dell'acqua di falda.

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.

# VANTAGGI

I principali vantaggi e peculiarità che differenziano la tecnica del congelamento artificiale dei terreni dalle altre tecnologie di consolidamento e impermeabilizzazione del terreno sono:

- ❑ La tecnica del congelamento è un sistema sicuro ed eco-compatibile, in quanto nessun prodotto viene iniettato o disperso nel terreno; l'acqua già naturalmente presente in esso viene fatta congelare, utilizzando fluidi refrigeranti che non vengono mai direttamente a contatto con il terreno o con la stessa acqua di falda; in questo modo si evitano possibili fenomeni di contaminazione o inquinamento delle falde idriche.
- ❑ La tecnica del congelamento del terreno si può applicare a qualsiasi tipo di terreno (da grana grossa a grana fine) e roccia
- ❑ La tecnica del congelamento, attraverso un idoneo monitoraggio, consente il controllo della formazione del muro di ghiaccio; si ha quindi la possibilità di eseguire interventi preventivi in zone sedi di possibili anomalie preventivamente allo scavo.

Si può quindi affermare che il congelamento artificiale del terreno è applicabile, a differenza degli altri metodi di consolidamento, a qualsiasi tipo di terreno sciolto o roccia, indipendentemente dal grado di permeabilità.

### **Quali limitazioni ci sono per la sua applicabilità ?**

- 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

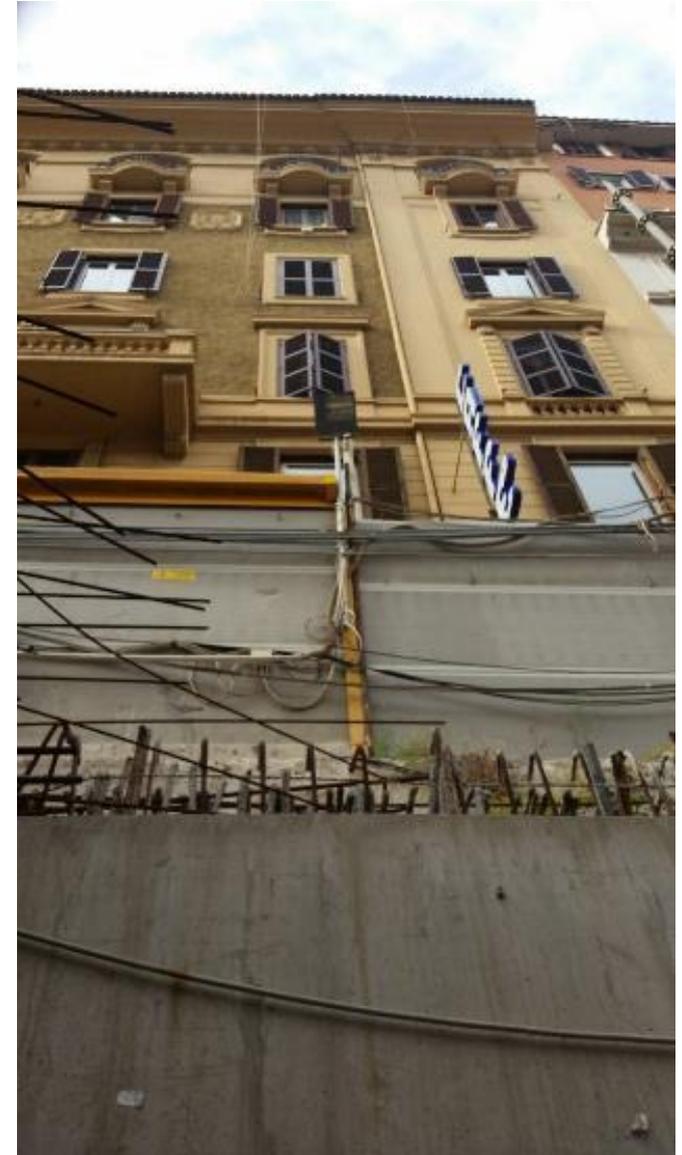


La tecnica del congelamento, se correttamente eseguita e dimensionata, consente di:

- ❑ 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.
- ❑ 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 (superiori a dieci 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 refluenti 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.

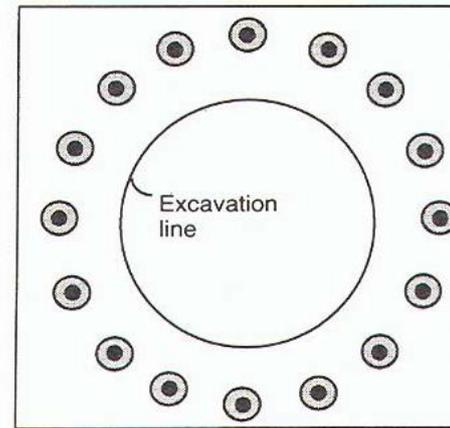


## Fasi temporali di un processo di congelamento

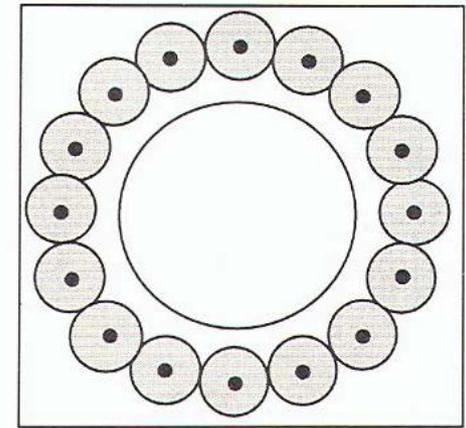
Fase di congelamento vero e proprio, nella quale sono richiesti:

- la chiusura del corpo congelato,
- il raggiungimento dello spessore di progetto del corpo congelato,

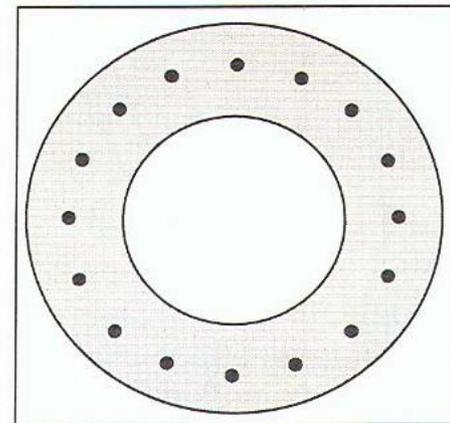
Fase di mantenimento, nella quale e' richiesto di estrarre la quantità di calorie necessaria per evitare il deterioramento delle caratteristiche raggiunte nella fase precedente (lo scongelamento).



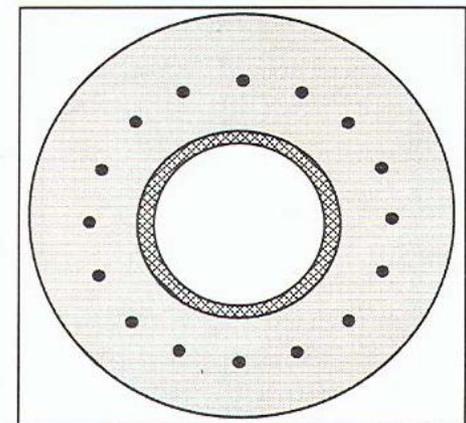
a) Colonne singole di terreno congelato



b) Chiusura del muro (collegamento tra le colonne)



c) Il muro congelato raggiunge la linea dello scavo



d) Scavo eseguito e rivestimento in opera

## Metodi di congelamento

Il congelamento, a seconda del fluido refrigerante utilizzato, viene realizzato mediante le due seguenti metodologie:

- Metodo indiretto o “**a salamoia**”, detto anche a ciclo chiuso; il fluido frigorifero, dopo il suo passaggio nelle sonde congelatrici dove scambiando calore si riscalda, ritorna all’impianto frigorifero, viene nuovamente raffreddato e di qui rinvitato alle sonde
- Metodo diretto o “**ad azoto liquido**”, detto anche a ciclo aperto; il fluido frigorifero circola in circuito aperto e viene disperso in aria dopo il suo passaggio nelle sonde congelatrici



Il sistema di congelamento ad azoto è costituito da:

- **serbatoio** a doppia parete **in pressione** contenente azoto liquido
- **sonde congelatrici** in cui viene fatto 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.



## **METODO DIRETTO O "AD AZOTO LIQUIDO"**

- sistema ad elevata potenza frigorifera,
- tempi di congelamento ridotti,
- impianto di notevole semplicità,
- elevata resistenza del terreno congelato,
- ampia applicabilità in presenza di acqua in movimento ( $V_{\text{acqua}} \leq 8 \text{ m/g}$ )
- utilizzo di materiali adatti alle basse temperature (inox o rame),
- costi elevati su trattamenti di elevate dimensioni e lunga durata,
- problemi di utilizzo in galleria su distanze superiori ai 500-800 m.

Il sistema di congelamento a salamoia è costituito da:

- **impianto frigorifero** (ammoniaca o freon come fluido frigorifero)
- **sonde congelatrici**
- **sistema di distribuzione** che veicola la salamoia (fluido refrigerante) dall'impianto frigorifero alle sonde congelatrici e viceversa.



## METODO INDIRECTO O "A SALAMOIA"

- sistema a minore potenza frigorifera,
- tempi di congelamento lunghi,
- impianto tecnologicamente complesso e correttamente dimensionato nella parte frigorifera,
- minore applicabilità in presenza di acqua in movimento ( $V_{\text{acqua}} \leq 2 \text{ m/g}$ )
- utilizzo di materiali di normale qualità (con qualche precauzione),
- massima efficacia (con costi limitati) su trattamenti di elevate dimensioni e lunga durata.

## METODO MISTO "AZOTO-SALAMOIA"

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

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

Vengono 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.

## **METODO MISTO "AZOTO-SALAMOIA"**

Le principali peculiarità del sistema sono:

- 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.

Il congelamento modifica quindi le proprietà termiche del terreno come quelle di resistenza.

La corretta determinazione delle caratteristiche termiche è fondamentale per una quanto più attendibile previsione del tempo di congelamento, della potenza 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), a governare il processo di congelamento del terreno sono le proprietà termiche del terreno, ossia **la capacità termica e la conducibilità termica.**

## **Analisi di laboratorio per stima dei parametri termici dei terreni**

### Classificazione dei terreni

- Analisi granulometriche
- Contenuto di acqua e valutazione velocità di falda
- Limiti di Atterberg

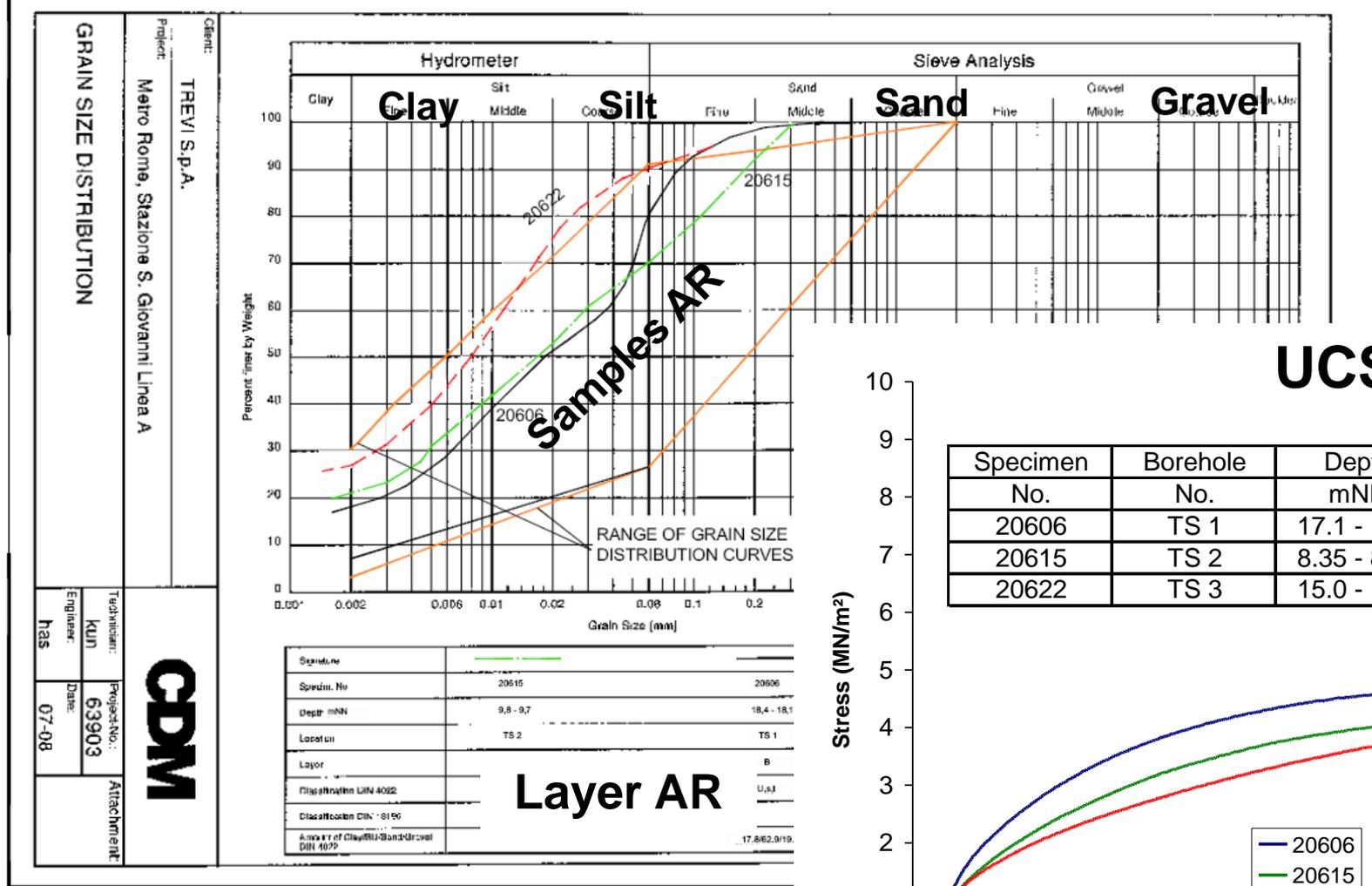
### Comportamento del terreno congelato

- UCS @  $T = -10^{\circ} \text{ C}$  e  $-20^{\circ} \text{ C}$
- TCT @  $T = -10^{\circ} \text{ C}$
- Creep Test, @  $T = -10^{\circ} \text{ C}$
- Frost Heave Tests

### Comportamento terreno scongelato

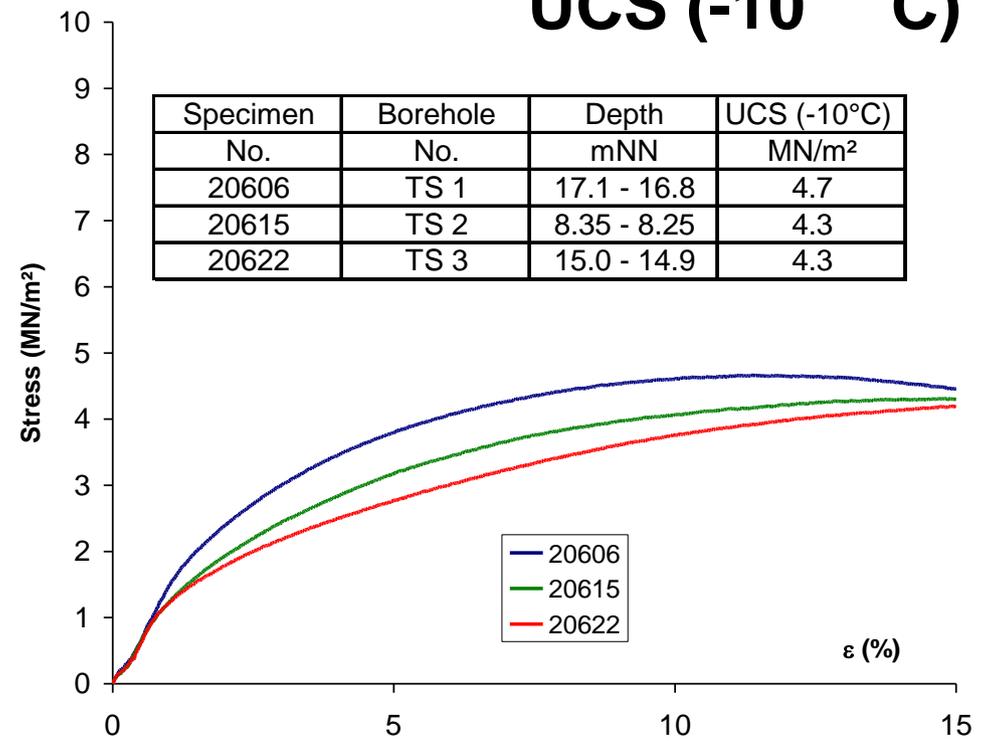
- UCS
- TCT

G:\63500-63999\63903\CAD\63903\_GRAIN\_SIZE\_DISTRIBUTION, k1e 18. Jul. 2008 01:47:45

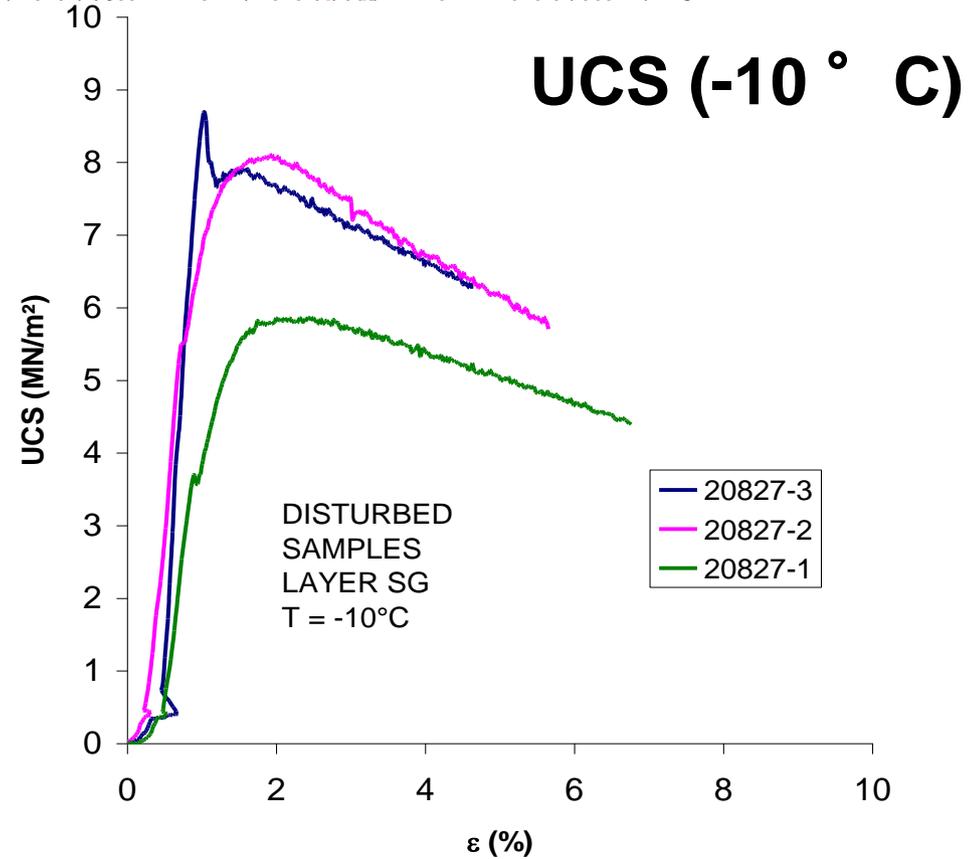
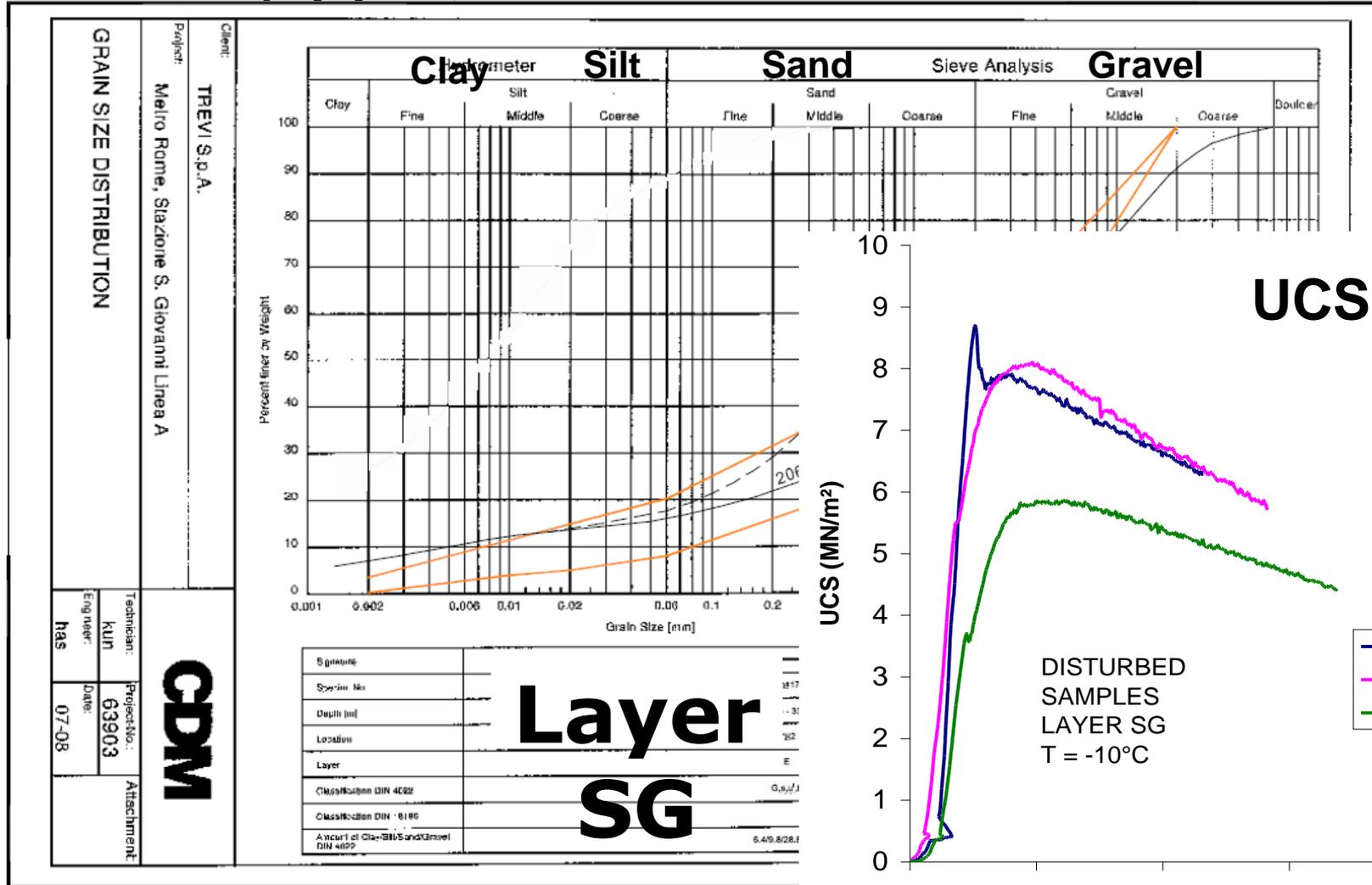


**UCS (-10 ° C)**

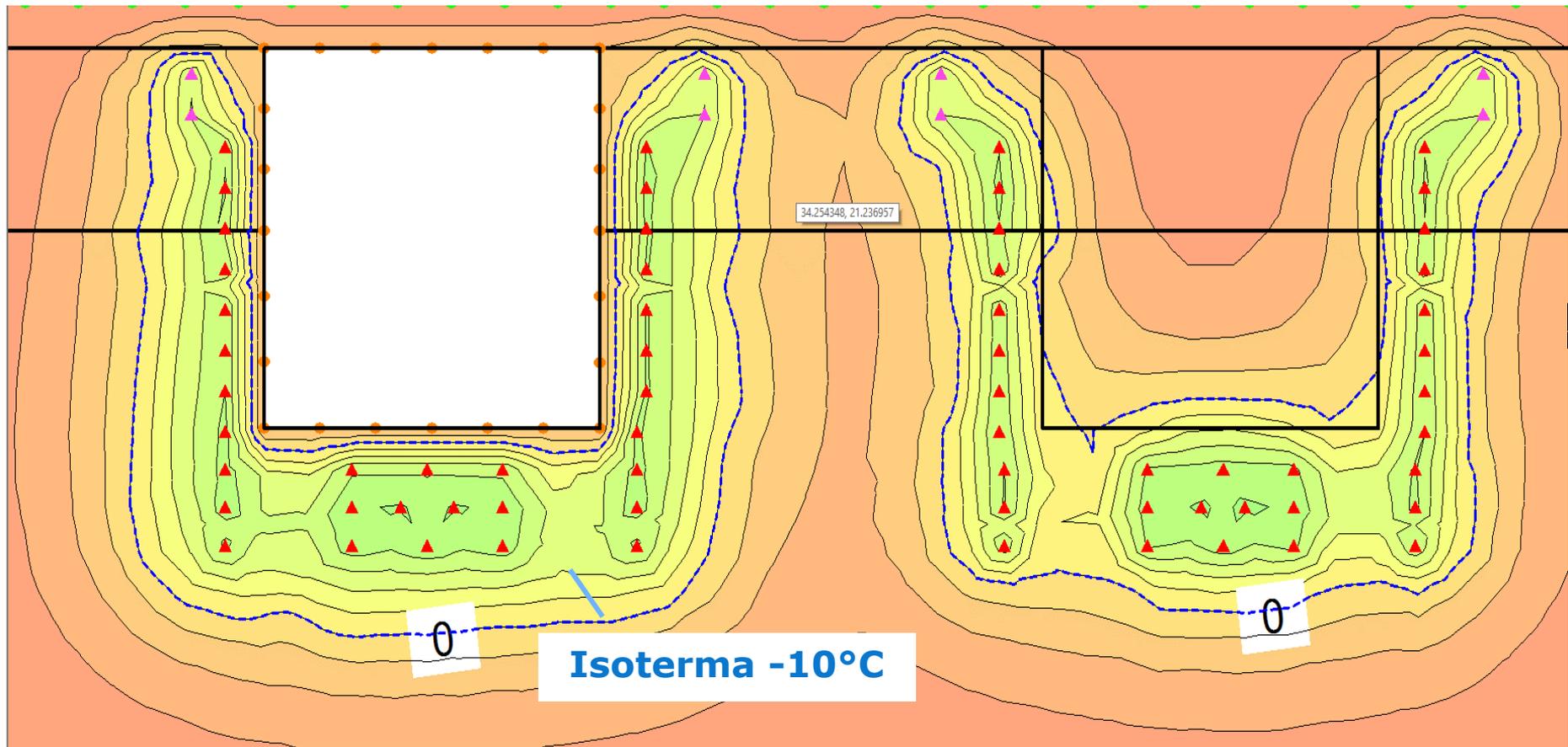
Specimen No.	Borehole No.	Depth mN	UCS (-10°C) MN/m <sup>2</sup>
20606	TS 1	17.1 - 16.8	4.7
20615	TS 2	8.35 - 8.25	4.3
20622	TS 3	15.0 - 14.9	4.3



G:\63500-63999\63903\CAD\63903\_GRAIN\_SIZE\_DISTRIBUTION.kle 18. Jul. 2008 01:47:45



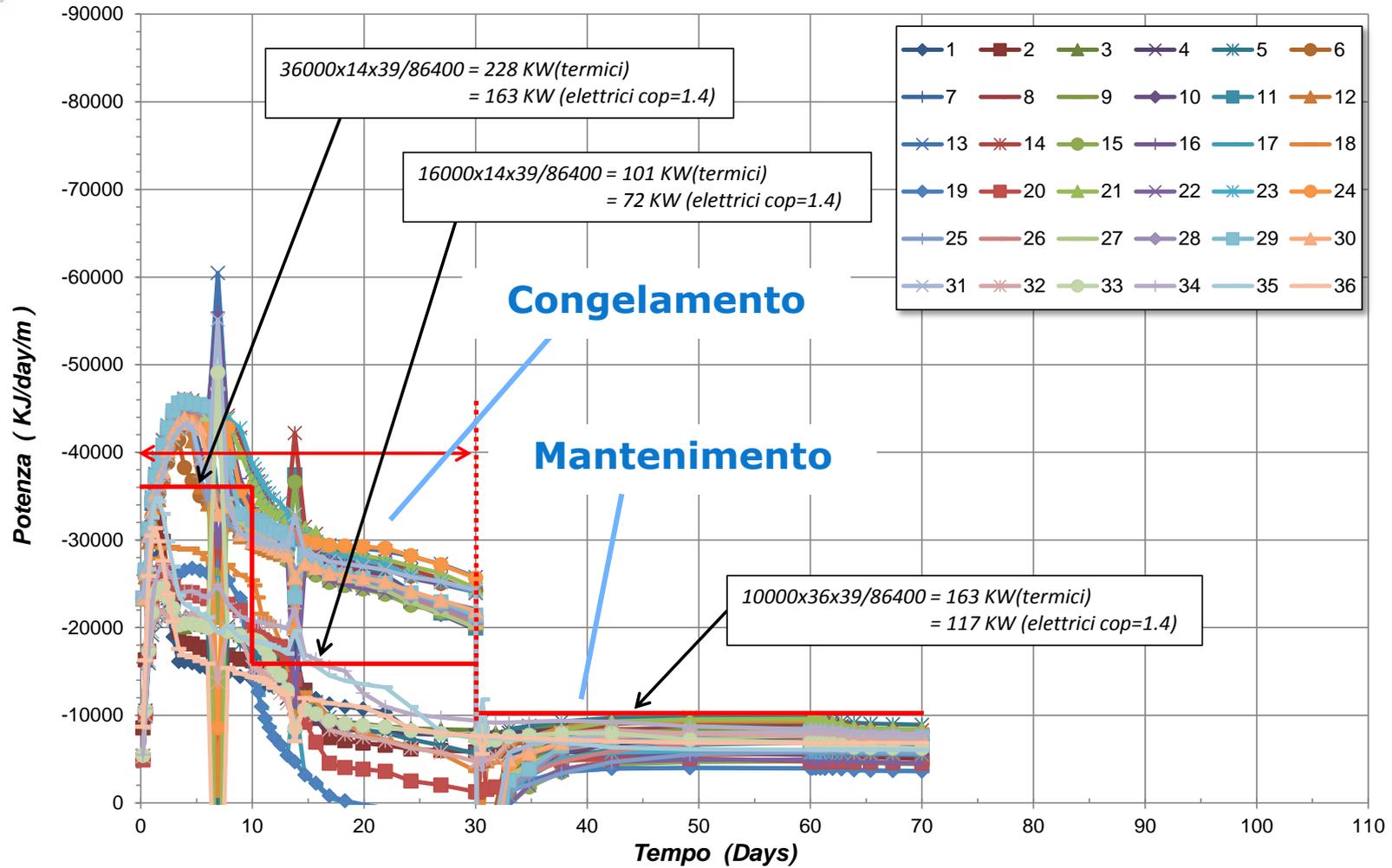
Analisi termiche e dimensionamento del corpo di terreno congelato sono necessarie per stimare le potenze frigorifere ed i tempi necessari all'ottenimento degli spessori e temperature di progetto.



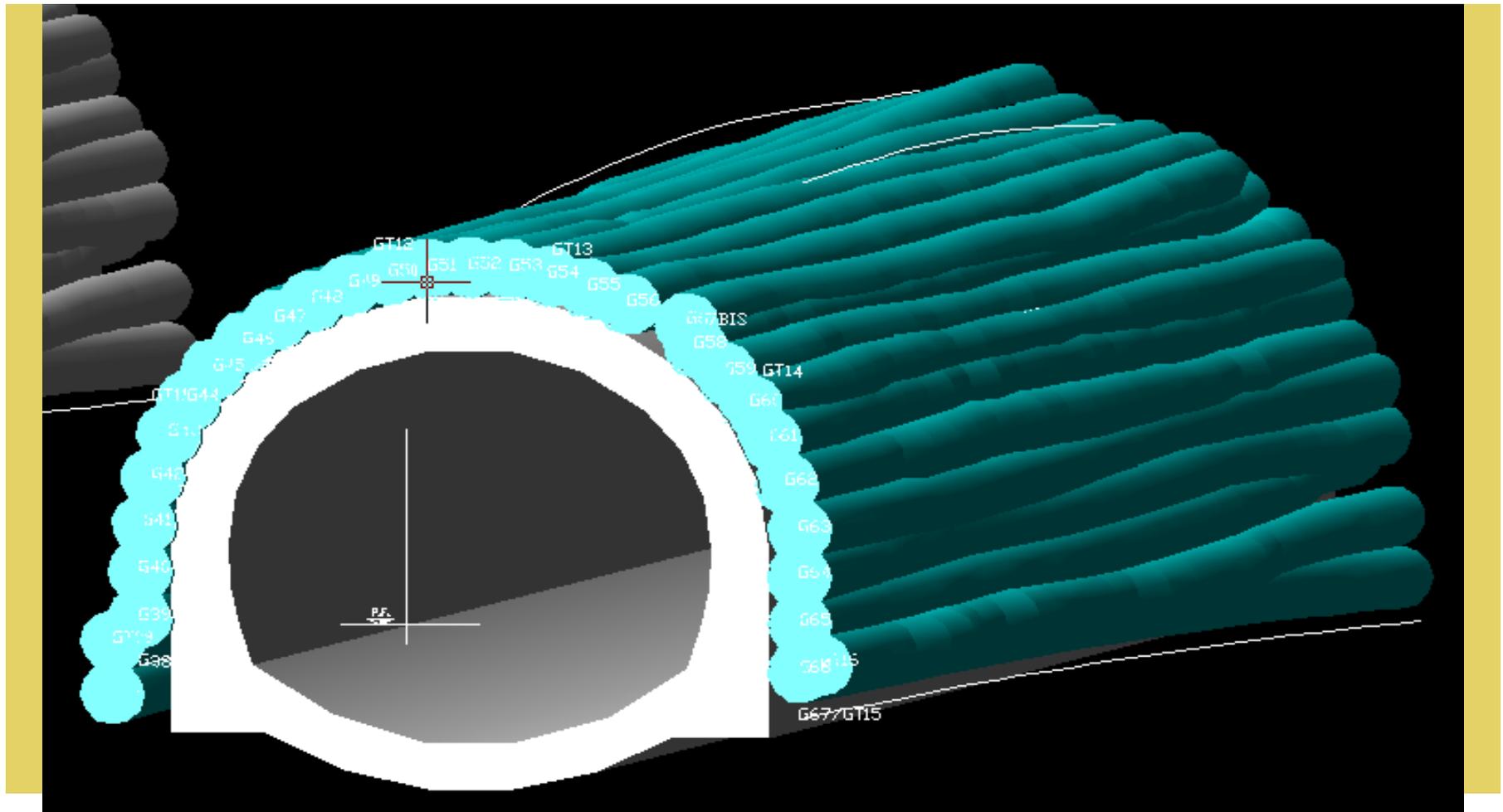
# Potenza frigorifera/consumi funzione dei tempi esecutivi



## POTENZA CANNE CONG. BINARIO PARI



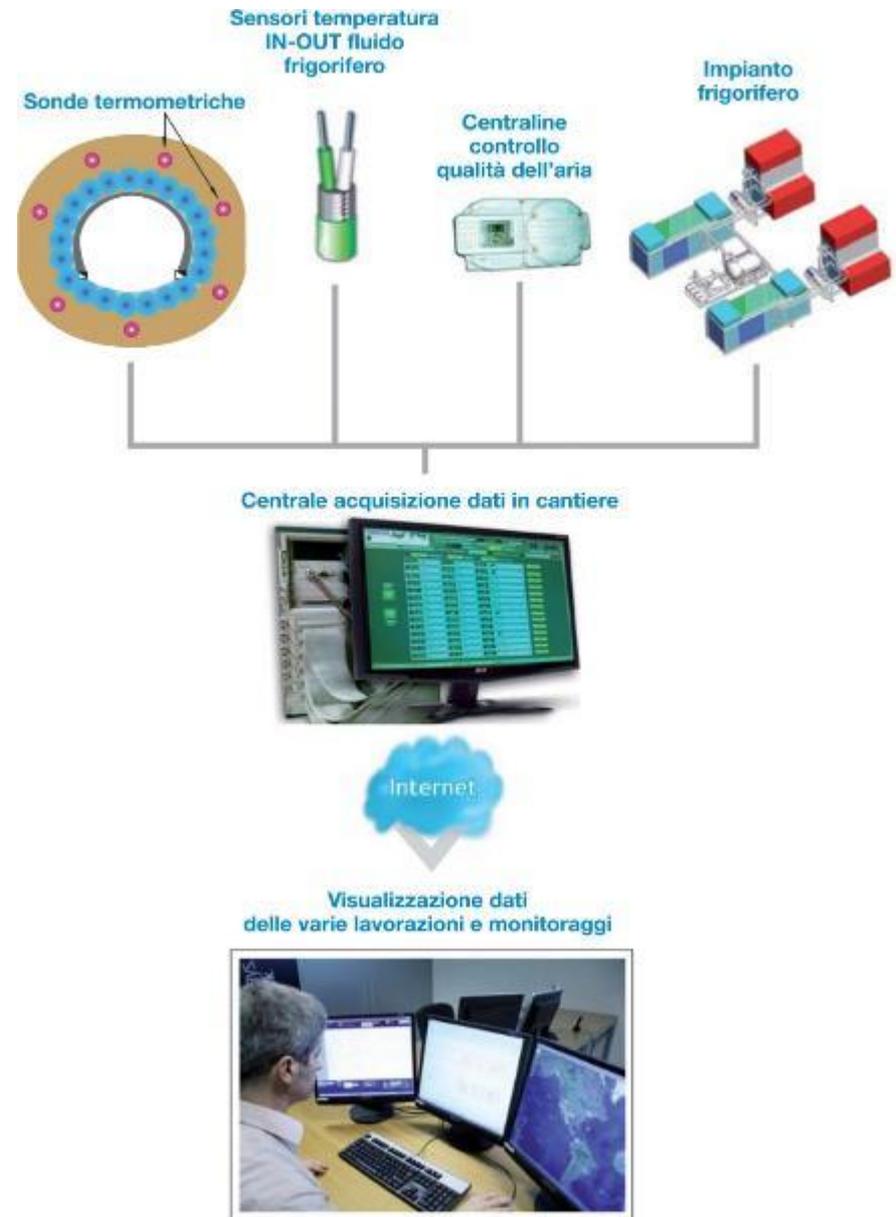
La **restituzione 3D** dell'andamento delle perforazioni consente di interpretare correttamente i dati di temperatura misurati e valutare gli spessori del muro di ghiaccio.



## SISTEMI DI MONITORAGGIO

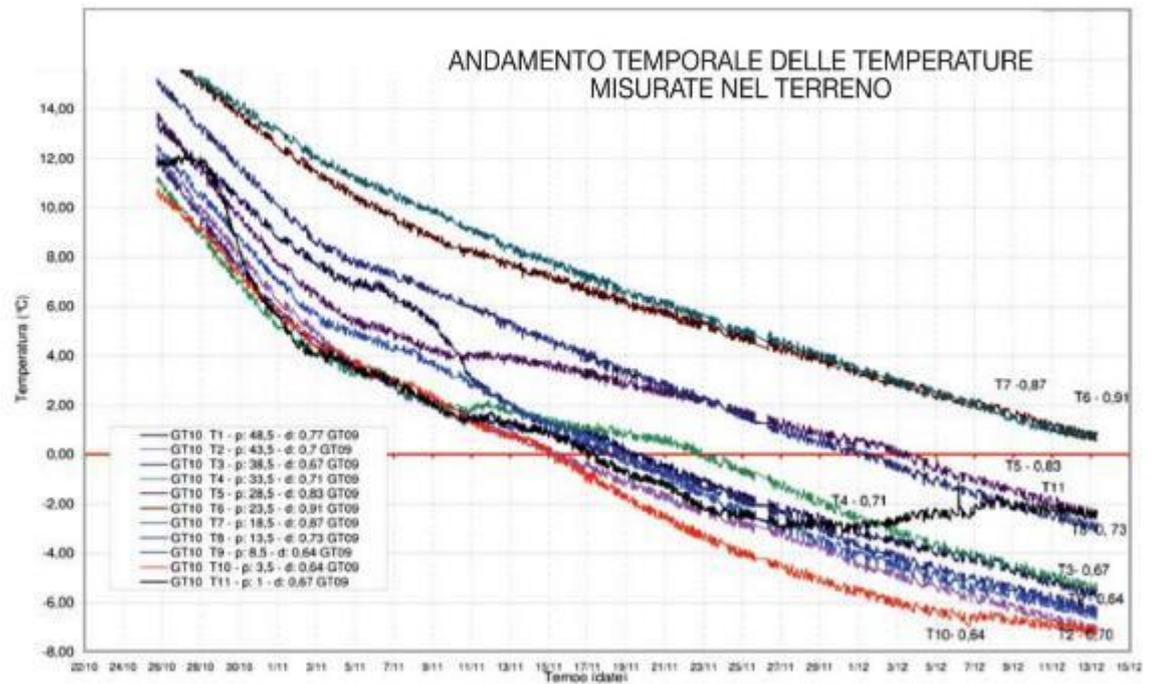
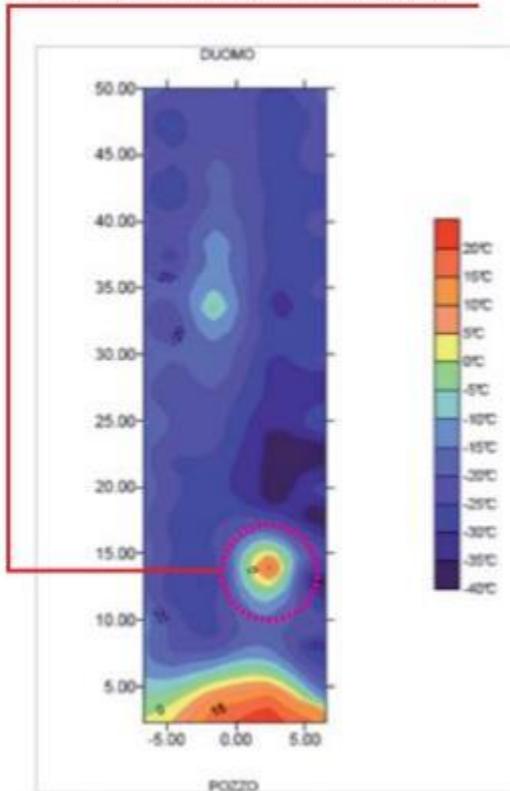
Per il controllo delle fasi di congelamento del terreno e successivo mantenimento è indispensabile monitorare in continuo l'andamento delle temperature del terreno nel tempo.

Il controllo delle temperatura viene eseguito mediante sonde termometriche, costituite da una serie di termometri, installate all'interno di perforazioni lunghe quanto le sonde congelatrici. Le sonde termometriche, in generale uno ogni 3/5 metri, vengono posizionate sul contorno del muro di ghiaccio a distanze note e misurate.

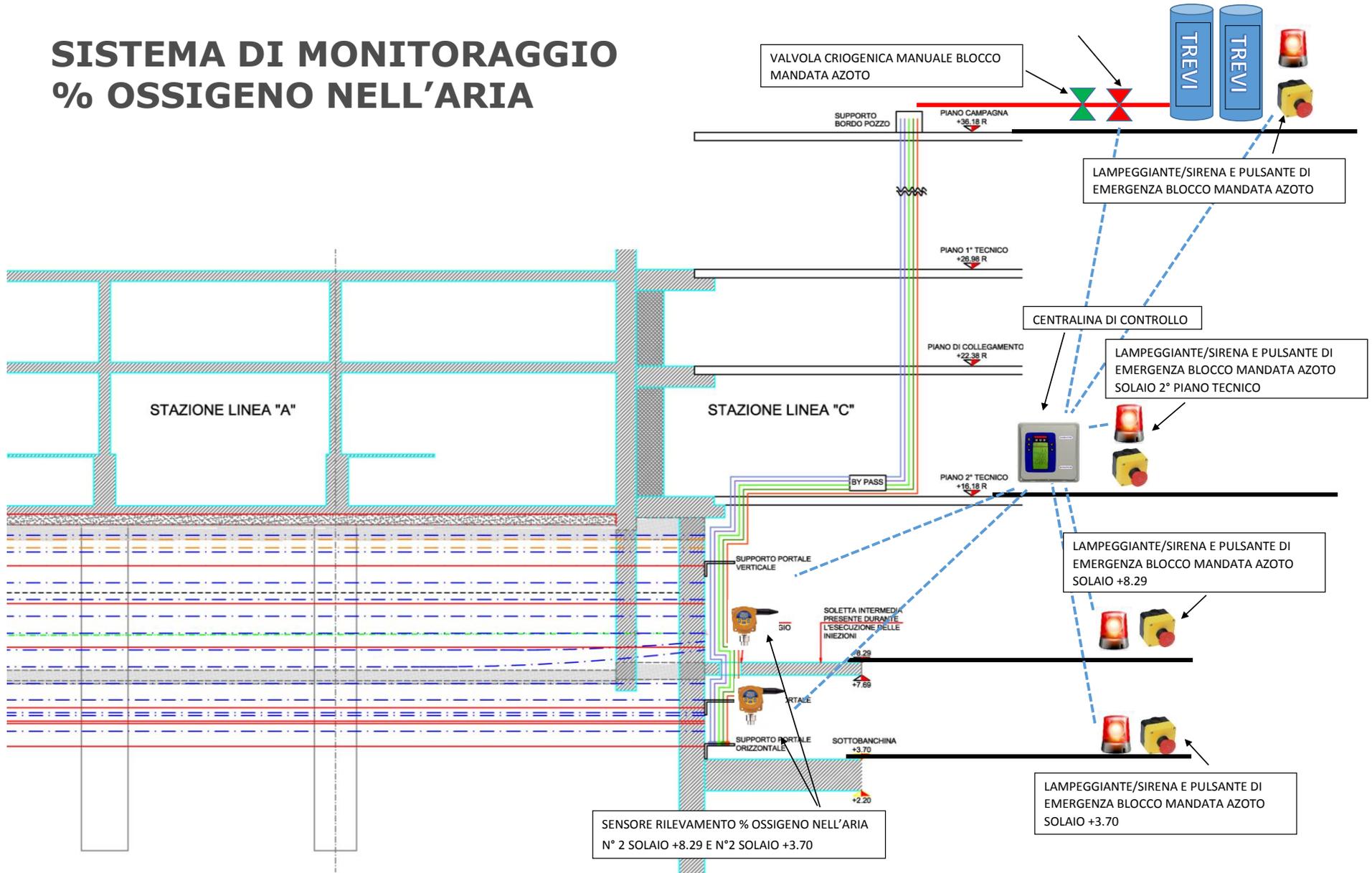


L'interpretazione dell'andamento delle temperature in funzione del tempo ed della distanza a cui si trovano rispetto alle sonde congelatrici consente di poter monitorare la formazione e lo sviluppo del muro di ghiaccio, evidenziando anomalie e zone sede di possibili problemi e quindi la necessità di interventi integrativi prima delle fasi di scavo.

Area non congelata  
su cui eseguire interventi integrativi



# SISTEMA DI MONITORAGGIO % OSSIGENO NELL'ARIA



# **TDDT (TREVI DIRECTIONAL DRILLING TECHNOLOGY)**

## **Sistema di perforazioni direzionate**

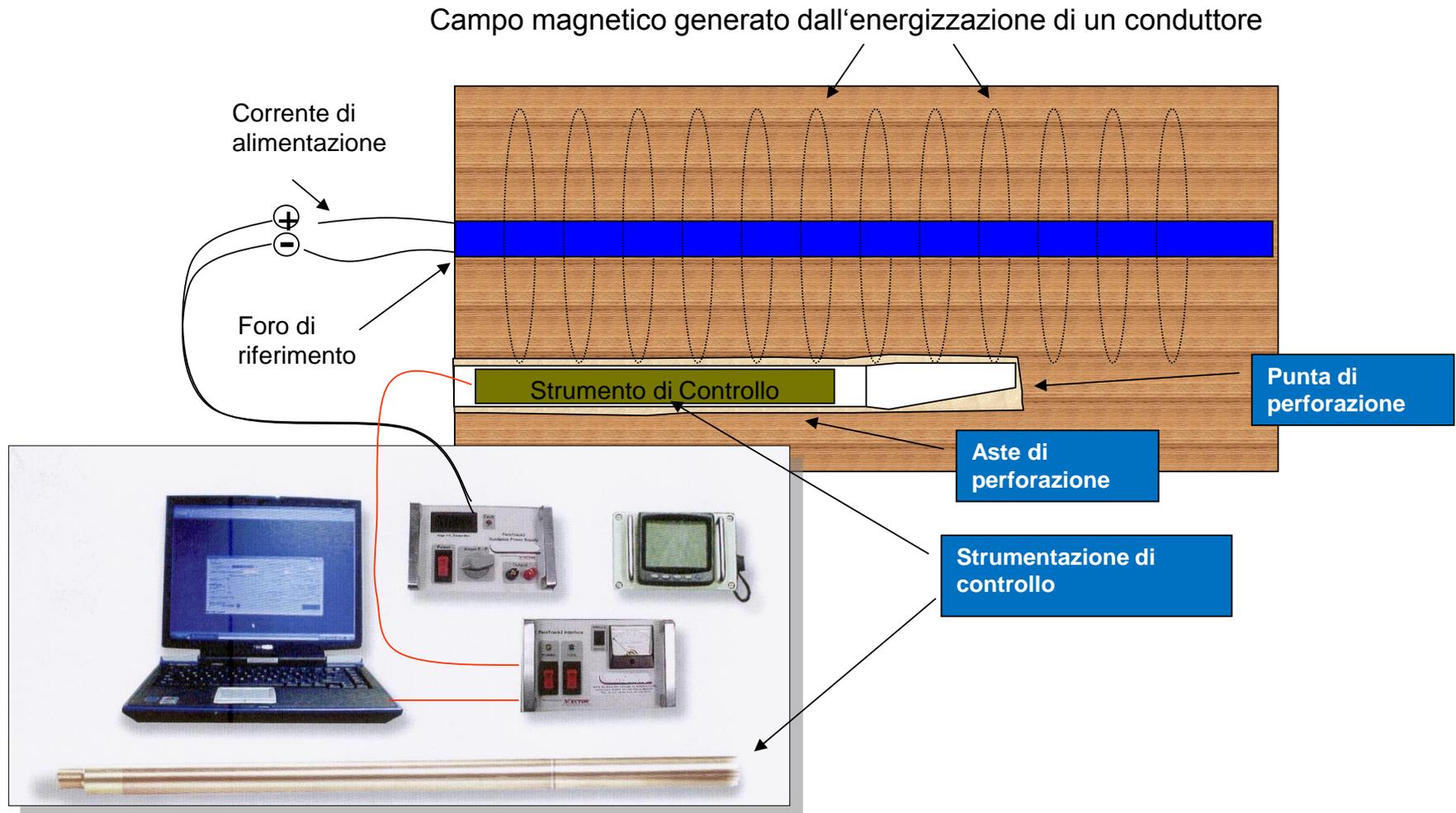
Affinché il congelamento del terreno possa avvenire in maniera omogenea, risulta essenziale che le canne congelatrici vengano posizionate rispettando il più possibile la geometria e gli interassi di progetto.

La tecnica di perforazione TDDT (Trevi Directional Drilling Technology) consente il controllo, in tempo reale, della direzione di perforazione e la restituzione del tracciato, a perforazione avvenuta.

Il metodo prevede la generazione di un sistema di referenziamento basato su un campo magnetico artificiale, indotto mediante passaggio di corrente all'interno di un foro di riferimento di coordinate note, misurate in precedenza.

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.

# TDDT (TREVI DIRECTIONAL DRILLING TECHNOLOGY) Sistema di perforazioni direzionate

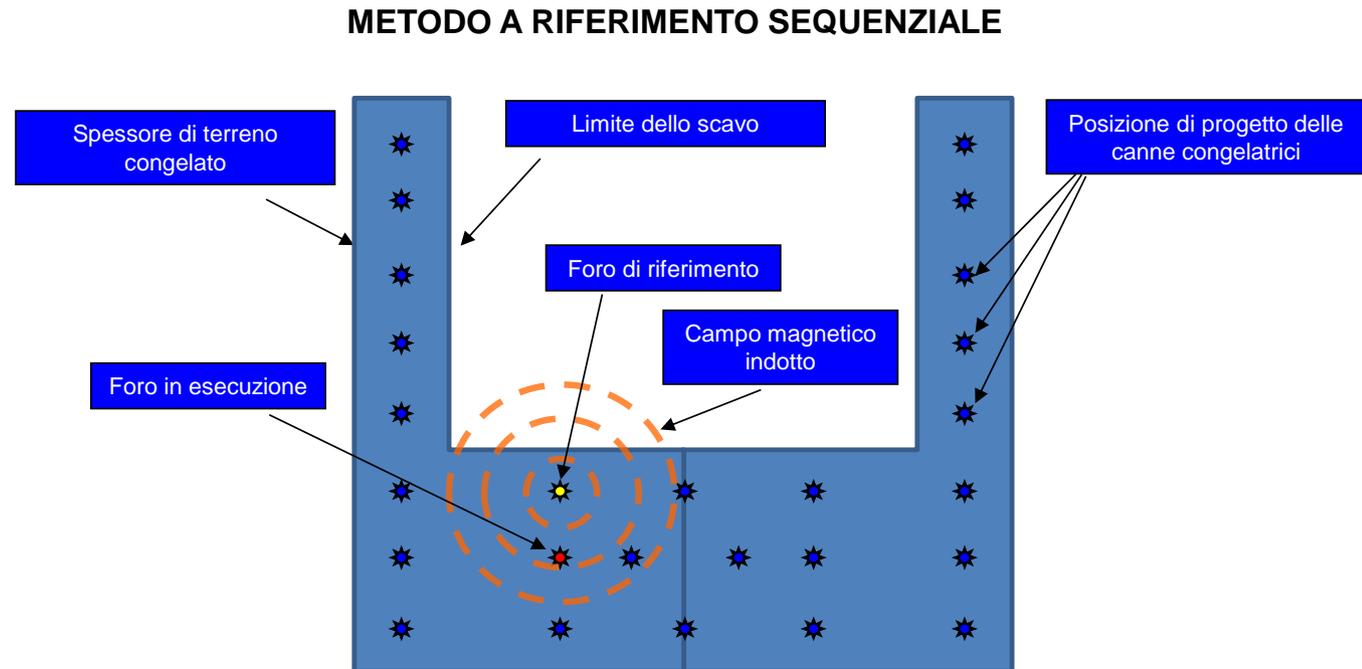


In funzione del rilievo dell'andamento della perforazione e delle tolleranze di errore impostate, vengono effettuate le correzioni mediante speciali utensili asimmetrici.

I metodi per il controllo dell'andamento delle perforazioni possono essere di due tipi:

Riferimento fisso

Riferimento sequenziale



## **Problematiche di cantiere**

Si sono riscontrati disturbi causati dai campi elettrici e magnetici presenti in sito, legati al transito dei convogli della linea Metro "A" durante le ore diurne, ma anche alla presenza dell'elettificazione della stessa linea ed ad altri disturbi presenti anche nelle ore notturne.

Ciò ha reso difficoltosa l'acquisizione dei dati relativi al direzionamento, quindi sono state sperimentate diverse tipologie di campo magnetico, variando il numero ed il diametro dei conduttori e ricorrendo a circuiti chiusi o a stendimenti messi a terra.

Inoltre sono stati impiegati sistemi alternativi di guida, in particolare si è adottata la tecnica di perforazione con sistema di guida ottica, mediante una speciale batteria di perforazione che consente la collimazione di una fonte luminosa contenuta dentro le aste stesse. Ogni 3 m viene controllata la posizione della sorgente luminosa ed, in caso di deviazione, si provvede a correggere la traiettoria del foro grazie alla punta direzionale.

Tutti i fori sono stati quindi rilevati al termine della perforazione con sistemi di controllo e verifica a posteriori, quali "maxibor", inclinometri e rilievi topografici.

## **Problematiche di cantiere**

Si sono riscontrate problematiche di perforazione in termini di direzionabilità dei fori, nei materiali più grossolani, al di sotto del solaio a quota 8,29m.

La presenza di ghiaie in matrice sabbiosa, non ha un riscontro omogeneo nelle perforazioni orizzontali che invece evidenziano una forte eterogeneità dei terreni con spiccate discontinuità laterali sia nella direzione lungo il fronte di perforazione che nell'approfondimento delle lunghezze di perforazione.

Sono presenti lenti di ghiaia grossolana con ciottoli di grosse dimensioni, sciolti a scarsa od addirittura assente matrice sabbiosa, intervallate a lenti di sabbie limose.

Tale elevata eterogeneità litologica dell'ammasso ghiaioso-sabbioso, in orizzontale, legato a repentine eteropie di facies alluvionali, porta ad incontrare una particolare variabilità granulometrica lungo gli assi di perforazione orizzontali, rendendo molto difficoltoso seguire un andamento rettilineo, le manovre di guida e causando forti ed improvvise deviazioni dei fori stessi.

Le difficili condizioni logistiche (lavoro in quota, spazi ristretti e confinati, ecc) hanno inoltre condizionato la scelta e l'utilizzo delle tecnologie ed attrezzature di perforazione.

## METODI DI PERFORAZIONE

Tutte le perforazioni sono state eseguite in presenza del sistema «preventer», per il controllo delle portate e volumi di terreno in ingresso dalla perforazioni stesse.

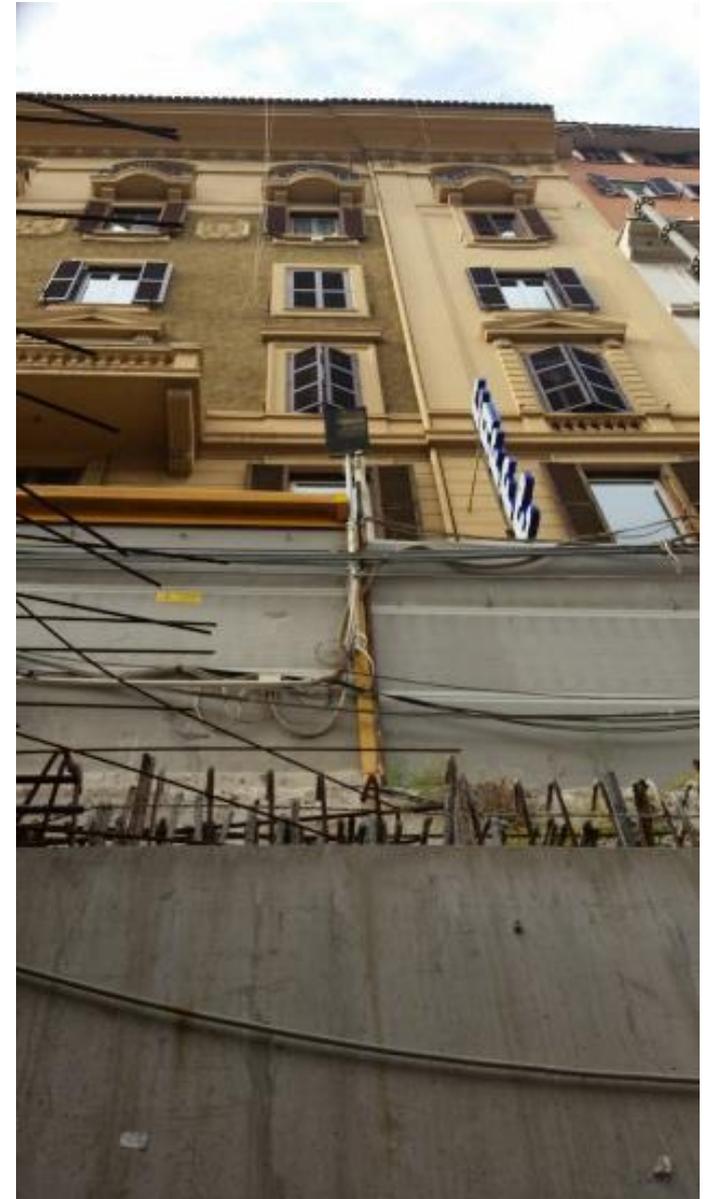
I metodi di perforazione utilizzati sono stati:

- Metodi di perforazione a rotazione con punte asimmetriche
- Metodi di perforazione con utensili di tipo attivo, tipo «mud motor»
- Metodi di perforazione a roto-percussione, con sistema di percussione in testa alla batteria, tipo «top hammer» oppure sistema di percussione con martello a fondo foro, tipo «DTH - down the hole hammer».



**Nelle ultime settimane è stato messo a punto un metodo di perforazione che consente di realizzare i fori più problematici al solaio 3,70.**

## FOTO DAL CANTIERE



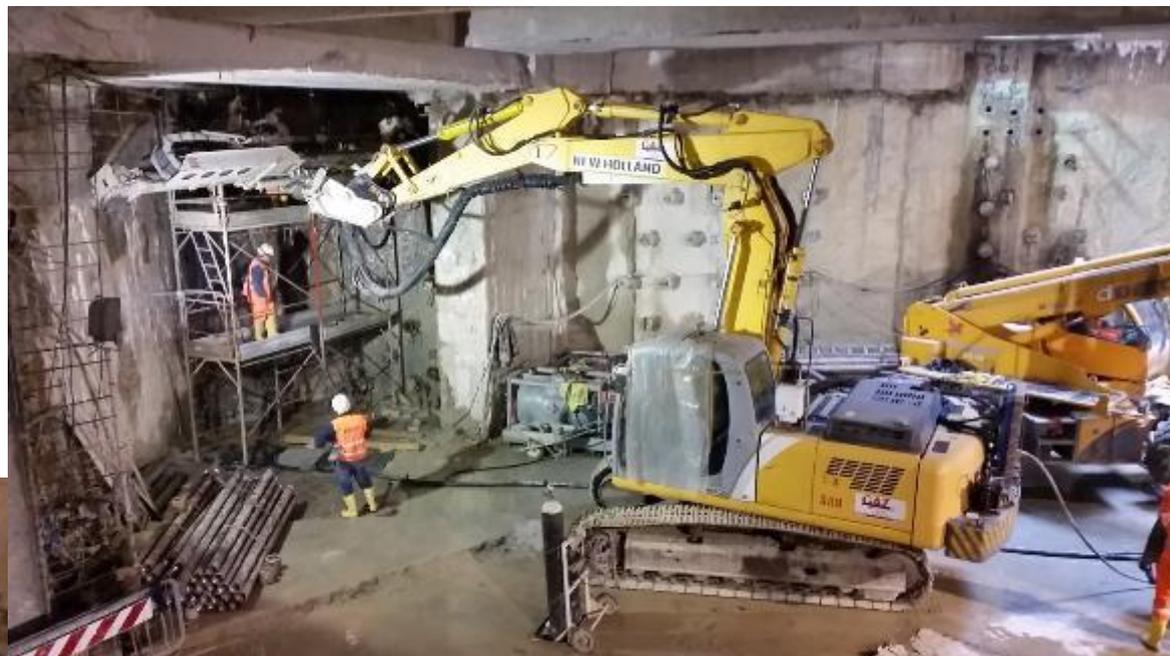
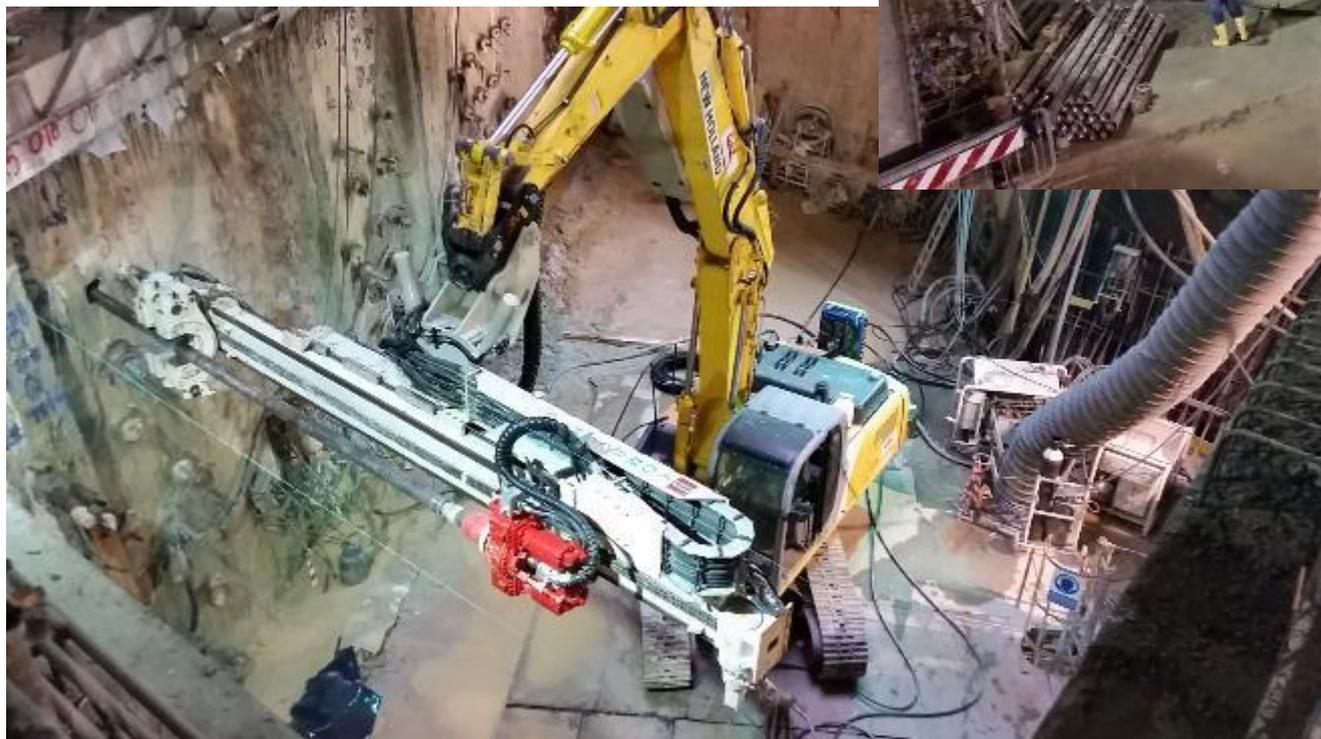
## FOTO DAL CANTIERE

### Perforazioni solaio 8,29



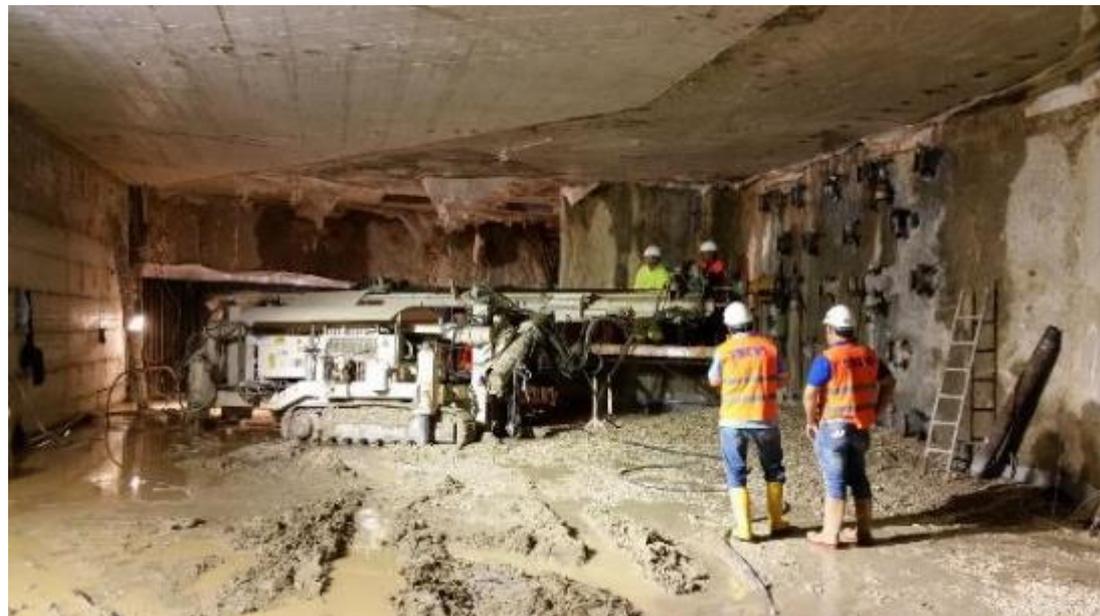
## FOTO DAL CANTIERE

### Perforazioni solaio 8,29



## FOTO DAL CANTIERE

### Perforazioni solaio 3,70



# ***GRAZIE PER LA CORTESE ATTENZIONE***

***Dedichiamo il  
nostro impegno e la nostra passione  
alla costruzione di basi utili  
allo sviluppo socio-economico  
nel rispetto delle culture e dell'ambiente***