

Autostrada Udine-Tarvisio
TRATTAMENTI SPECIALI
PER FONDAZIONI
E DIFESE FLUVIALI

SPECIAL SOIL TREATMENTS FOR FOUNDATIONS
FREEZING -JET GROUTING- COLUMNS PREVENTING EROSION

Autostrada Udine-Tarvisio TRATTAMENTI SPECIALI PER FONDAZIONI E DIFESE FLUVIALI

*SPECIAL SOIL TREATMENTS FOR FOUNDATIONS.
FREEZING - JET GROUTING - COLUMNS
PREVENTING EROSION*

dott. ing. Achille Balossi Restelli, Consulente
Progettista per Impresa Rodio
dott. ing. Mario Profeta, Vicepresidente e
Amministratore Delegato della Impresa S.I.I.

1. GENERALITÀ

Il lotto n. 5 affidato alla S.I.I. - Società Imprese Industriali S.p.A. di Roma - della lunghezza di km 1+706,85 prevedeva la realizzazione di:

- viadotto Cadramazzo costituito da 15 campate da 40 m di luce;
- semiviadotto Passerella costituito da 2 campate da 45 m e 2 campate da 60 m di luce;
- galleria artificiale della lunghezza di 120 m, per la sola via destra;
- varie opere minori;
- rilevati autostradali per cui erano previsti 800 m circa di diaframma anti-scalzamento.

Il lotto in oggetto è localizzato nel Comune di Chiusaforte, nella zona in cui l'autostrada affronta il tratto montano nel punto più stretto della valle.

La presenza della strada statale e della ferrovia, le sponde rocciose a picco nella prima parte del lotto, la grossa frana della sponda sinistra incombente su una lunga porzione del lotto ed infine l'andamento piuttosto impetuoso del fiume Fella, hanno provocato varianti ad alcune delle opere previste ed originato una serie di problemi molto delicati per l'impostazione di tutte le opere e la loro salvaguardia nel lungo tempo.

Riteniamo valga la pena di portare a conoscenza dei tecnici interessati alcune delle difficoltà incontrate e descrivere la metodologia applicata per il loro superamento.

2. LE FONDAZIONI DEL VIADOTTO «PASSERELLA»

Come è mostrato sulla figura 1, nella soluzione definitiva ambedue le carreggiate dell'autostrada si riuniscono in un'unica struttura a viadotto fondata su 7 monopile e due spalle che si affondano per parecchi metri nel detrito di falda di sponda sinistra del Fella (profondità 14-19 m tali da prevenire qualsiasi scalzamento).

Si è arrivati a questa soluzione dopo avere studiato a fondo una prima alternativa che prevedeva le due corsie dell'autostrada separate:

- quella direzione Tarvisio si appoggiava direttamente sul terreno e comportava costose opere di sostegno della trincea;

- quella di valle direzione Carnia correva su un viadotto a pile multiple, simile a quello realizzato.

La realizzazione delle opere di fondazione (vedere figura 2) secondo questa prima soluzione (doppie «berlinesi» tirantate e pozzi congelati per almeno due pile) avrebbe comportato costi molto alti e tempi lunghi.

Si è preferito allora riunire le due carreggiate su un'unica opera e concentrare tutti i problemi in fondazioni più importanti, ma ridotte come numero.

Dopo ulteriori studi è nata la 2ª soluzione, mostrata schematicamente in figura 3 e sulla planimetria.

È stata eseguita la progettazione del viadotto «Passerella» e rilevati annessi.

A questo punto per semplicità espositiva dividiamo le fondazioni in due categorie che si distinguono per le differenti operazioni specialistiche applicate per eseguire gli scavi a pozzo.

Per le pile nn. 2-3-4-5, più direttamente investite dalla corrente del Fella, è stata adottata la tecnica del congelamento; per le pile nn. 1-6-7 e la spalla di monte n. 8 gli scavi a pozzo hanno potuto essere realizzati previa protezione laterale con *jet grouting*.

2.1. I pozzi «congelati»

Le quattro pile in questione, per ragioni di scalzamento e possibili effetti sismici, dovevano essere impostate su fondazioni monolitiche in c.a. gettate in pozzi ellittici di 19 m circa di profondità rispetto al piano campagna (15 m come minimo al di sotto del livello di falda).

Gli assi maggiore e minore degli

ellissi erano rispettivamente di 12 m ed 8 m.

A seguito degli studi effettuati, tenuto conto delle difficoltà particolari presentate dalla zona (detrito di falda misto a frana, vicinanza del fiume), si è scelta la soluzione «congelamento», quale mezzo più sicuro per consentire l'esecuzione degli scavi dei pozzi.

Tale decisione è risultata quanto mai opportuna alla luce di quanto si è poi verificato: infatti a fronte di condizioni idrogeologiche così avverse e severe il muro di ghiaccio ha reagito molto bene dal punto di vista statico ed ha impedito il verificarsi di sifonamenti o cedimenti, garantendo quindi la conservazione dello scavo.

Lo schema, molto semplice, è riportato sulla figura 4.

Le sonde congelatrici sono state poste ad interasse di 0.68 m, il fondello iniettato aveva uno spessore di 5 m tale da potere contrastare le sottospinte idrauliche; in più sono stati previsti per precauzione alcuni fori d'iniezione, equipaggiati con tubi a valvole, disposti su un ellisse esterno a quello relativo alle sonde di congelamento.

Attraverso questi tubi sono state immerse nel terreno miscele cementizie adeguate per aiutare la formazione del muro di ghiaccio quando si è riscontrata la presenza di grossi vuoti (acqua libera).

Il sistema di congelamento (ciclo chiuso-doppio scambio) con salamoia ha funzionato generalmente molto bene consentendo agli scavi di scendere con buona sicurezza fino alla profondità di progetto senza infiltrazioni d'acqua.

Fa decisamente eccezione lo scavo della pila n. 5 che ha invece incontrato grosse difficoltà: riteniamo più utile soffermarci un poco su questa situazione anomala e mettere in risalto le cause che hanno messo in crisi il congelamento, piuttosto che descrivere le operazioni che sono andate bene e che del resto non rappresentano ormai più novità essendo entrate nell'uso corrente.

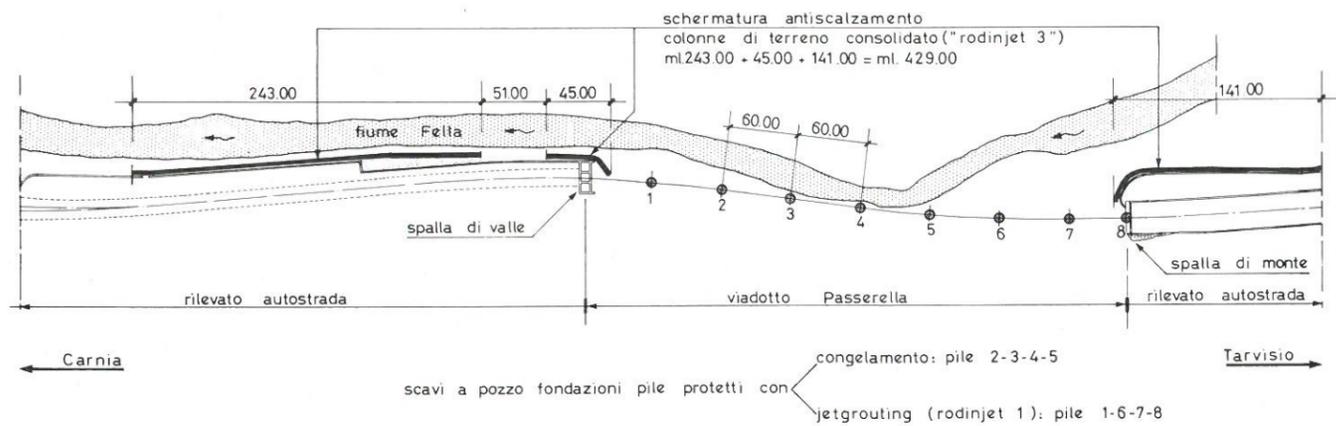


Fig. 1 - Planimetria generale della zona interessata dai trattamenti Rodio / General plan of the area under Rodio treatments

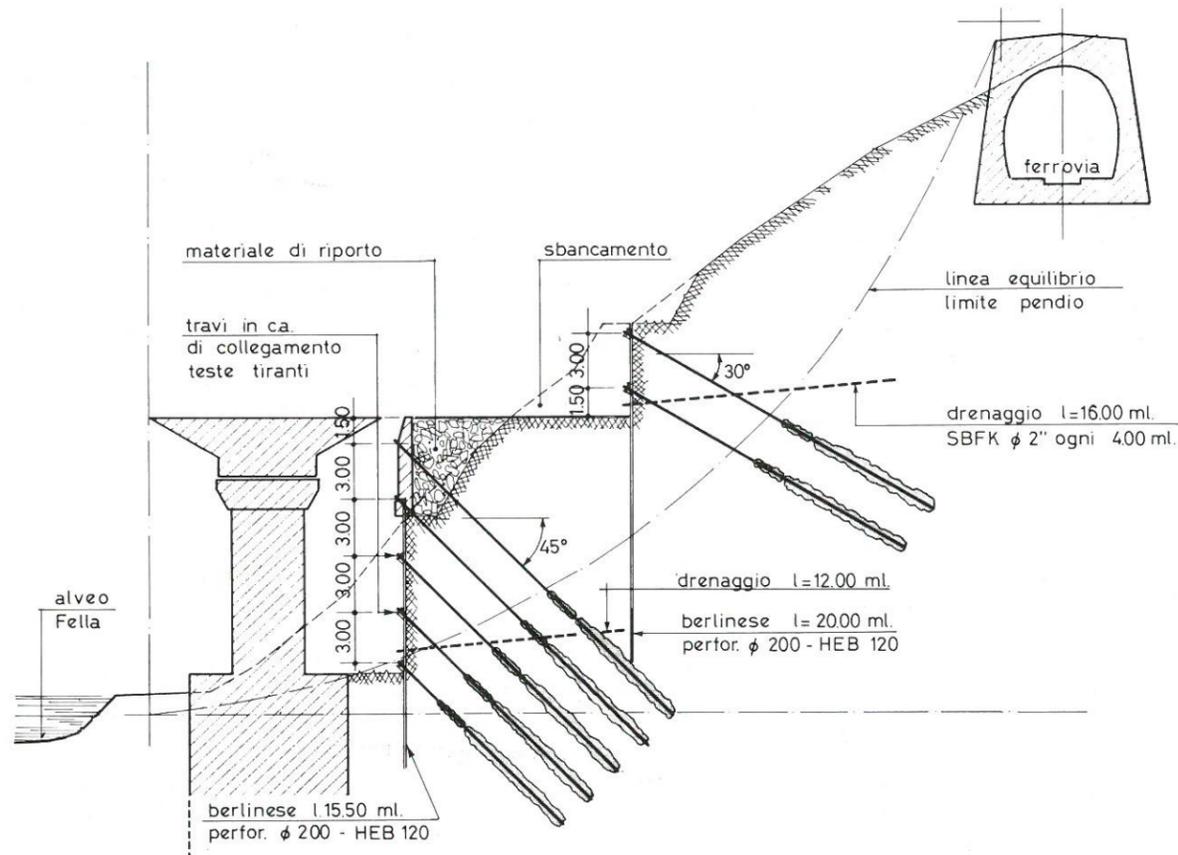


Fig. 2 - Prima soluzione studiata (non realizzata) / First design solution (not adopted)

Infatti quanto successo alla pila n. 5 potrebbe ripetersi altre volte e l'esperienza qui acquisita dovrà essere utilizzata al fine di prevenire disfunzioni e di conseguenza sarà anche utile per ridurre i costi dell'intervento.

2.1.1. La disfunzione del congelamento alla pila n. 5

Dopo aver installato le sonde congelatrici tutt'attorno al pozzo della pila n. 5 ed eseguite le iniezioni del «fondello», oltre che avere inviato nel terreno attraverso i tubi a valvole laterali un certo quantitativo di miscela cementizia, l'operazione di congelamento

aveva inizio il giorno 15 agosto 1982.

Dalle misure della temperatura del terreno eseguite appena prima di fare circolare la salamoia, ci si rendeva subito conto di una certa anomalia di comportamento della falda acquifera: infatti i diagrammi iniziali degli 11 tubi termometrici installati facevano registrare mediamente la situazione riportata dallo schema grafico di figura 5.

Nasceva subito il primo sospetto che la falda del Fella (temperatura 12°C circa) fosse stata messa in comunicazione tramite le perforazioni verticali con una falda artesianica alimentata dalla grande massa del detrito di frana e falda del lato sinistro della valle (tem-

peratura media 5°C).

Alcune misure eseguite in risorgenze rinvenute all'altezza della ferrovia davano appunto questo valore della temperatura dell'acqua.

Il congelamento procedeva poi normalmente dal punto di vista della cessione di frigoriferie al terreno e circuitazione della salamoia: non venivano riscontrate perdite del liquido frigorifero ed il salto termico tra entrata ed uscita dal gruppo si manteneva costante attorno ai 4°C.

Dopo circa un mese si leggevano le seguenti temperature della salamoia in uscita dal gruppo -27 --28°C in rientro -23 --24°C Valori questi ultimi del tutto nor-

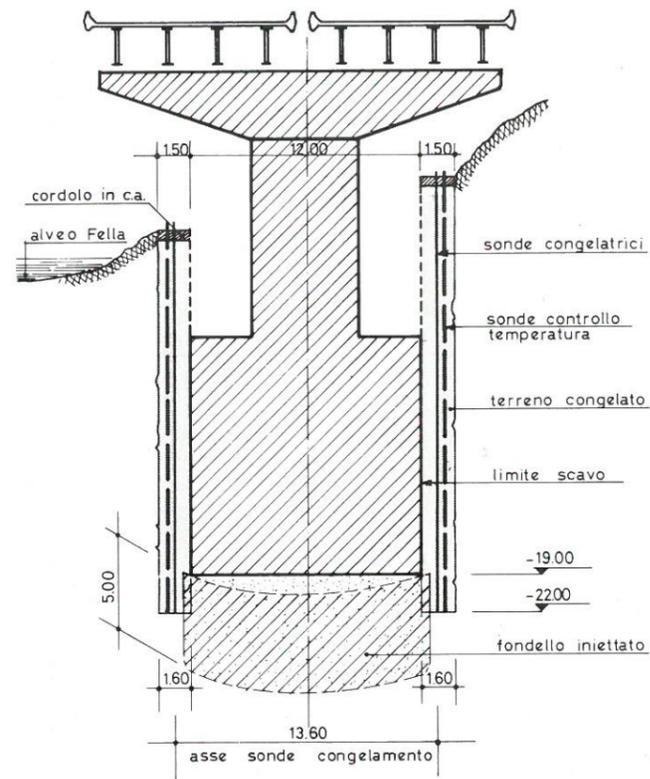


Fig. 3 - Seconda soluzione studiata (progetto realizzato). Le monopiers del viadotto «Passerella» / The adopted solution. The monopiers of the «Passerella» viaduct

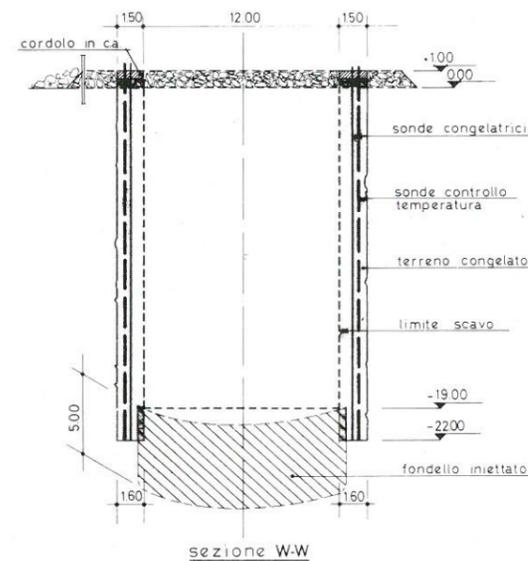


Fig. 4 - Schema del trattamento di congelamento / Scheme of the freezing treatment

mali ed indicativi sul buon funzionamento del circuito e sulla resa dello scambio termico.

Purtroppo invece i diagrammi della temperatura del terreno nell'ambito del muro di ghiaccio in via di costituzione, costruiti giornalmente con misurazioni in tutti gli appositi tubi termometrici, denunciavano chiaramente delle gravi anomalie nella formazione del muro, concentrate principalmente in due zone, l'una a profondità di 10 m circa e l'altra attorno ai 14 m.

Si confermavano mano mano sempre di più i sospetti di movimenti di grandi portate d'acqua attraverso strati molto permeabili.

Lo schema riportato in figura 6 rappresenta l'evoluzione della media delle temperature del terreno attorno al pozzo che si è riscontrata nel periodo intercorrente tra la fine di settembre 1982 (data di presunto completamento del muro di ghiaccio) e la fine di ottobre 1982 (dopo alcuni interventi di iniezioni integrative).

Appariva evidente la mancata formazione del muro di ghiaccio attorno ai 10 m di profondità e la difficoltosa formazione del muro stesso tra i 14 ed i 16 m di profondità, mentre nelle altre zone il congelamento appariva più che soddisfacente.

Si rendevano allora necessari alcuni provvedimenti per tentare di arrestare il flusso dell'acqua subalvea.

Sono state eseguite iniezioni addizionali (miscela cementizie accelerate con silicati) nel tentativo di riempire i presunti grandi vuoti alle profondità più critiche.

La figura 7 mostra l'anello di distribuzione della salamoia e la sonda impiegata per le perforazioni integrative.

I diagrammi di figura 8 riportano i miglioramenti conseguiti al termine di questo primo massiccio intervento addizionale.

Come si può notare una lama d'acqua attraversava ancora il muro di ghiaccio a 10 m di profondità ed a 14-15 m la struttura congelata appariva ancora piuttosto esile.

Ciononostante il giorno 19/9/1982 lo scavo veniva iniziato ugualmente perchè si sperava nella «uniformizzazione del muro» come generalmente avviene (frigoriferie che si spostano verso i punti più deboli).

Lo scavo rivestito (ad anelli successivi in c.a. di altezza 2 m) procedeva con regolarità fino a 6 m di profondità: a questo punto si era costretti ad asportare con pompaggio un quantitativo d'acqua di circa 0,7 l/sec per tenere asciutto il fondo del pozzo.

Si trattava di una portata modesta, ma i diagrammi di temperatura denunciavano chiaramente che il richiamo d'acqua, prodotto appunto dal pompaggio, aveva prodotto la formazione

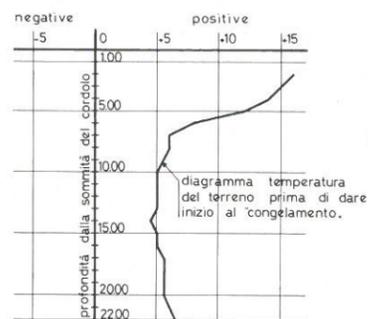


Fig. 5 - Pila n. 5 / Pier n. 5. Temperature of the soil before the freezing treatment

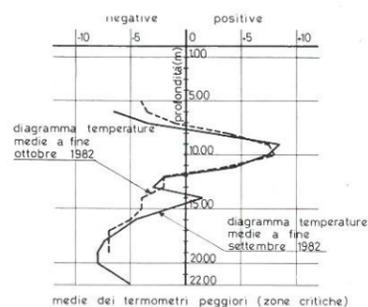


Fig. 6 - Pila n. 5 / Pier n. 5. Average temperature of the critical zones at the end of Sept. 1982 and at the end of Oct. 1982

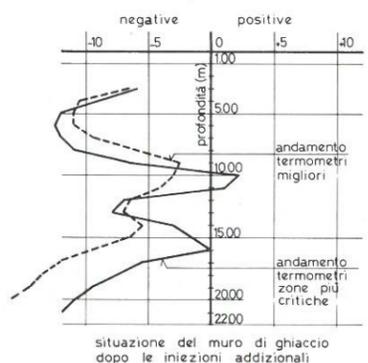


Fig. 8 - Situazione del muro di ghiaccio dopo le iniezioni aggiuntive / Situation of the ice wall after the additional injections. Course of satisfactory temperatures. Course of the temperatures in the most critical zones

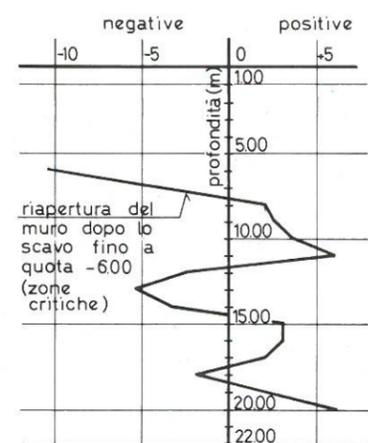


Fig. 9 - Riapertura del muro dopo lo scavo fino a quota -6.00 (zone critiche) / Reopening of leakages through the wall after excavation down to 6 m (critical zones)

di ampie «aperture» in alcune zone del muro di ghiaccio a 10 m circa di profondità ed un risentimento anche a profondità maggiori, come dimostra il diagramma riportato in figura 9.

Si decideva allora di sospendere lo scavo, di riempire d'acqua il pozzo e di attuare un intervento con azoto liquido.

Il livello d'acqua all'interno del pozzo si sovralzava di 1 m circa rispetto al livello del Fella mettendo in evidenza un certo grado di artesianismo.

Da quel momento il fenomeno veniva tenuto sotto attento controllo.

L'anomala situazione idrologica del subalveo si manifestava allora in tutta la sua complessità: alle notevoli velocità d'acqua orizzontali, attraverso strati molto permeabili, si sommarono velocità d'acqua artesiane con andamento dal basso verso l'alto.

Portate dunque che dagli strati più

dal circuito, ripulite dalla salamoia e collegate a due a due: l'azoto immesso liquido nella sonda primaria usciva dalla secondaria sotto forma di gas.

Naturalmente venivano attentamente seguite le variazioni delle temperatura del terreno e di conseguenza staccate e «rimesse a salamoia» le sonde dove risultati determinanti venivano mano mano conseguiti.

L'immissione di azoto per la zona di monte si concludeva il giorno 7 ottobre.

Nella parte a valle è stato necessario «dare un colpo» con azoto ad 8 sonde (dalla n. 12 alla n. 19); quest'ultima operazione si svolgeva tra i giorni 8 e 10 ottobre 1982.

I risultati sono evidenziati dai diagrammi di figura 10.

La potenzialità frigorifica dell'azoto si risentiva nel giro di poche ore: il terreno nell'ambito del muro di ghiaccio



Fig. 7 - Vista dell'anello di congelamento della pila n. 5. Sonda al lavoro per le iniezioni integrative / Sight of the freezing apparatus for pier n. 5. Drilling works for the additional grouting holes

profondi avevano modo di riversarsi negli strati più alti e più permeabili seguendo le vie di comunicazione preferenziali costituite per la maggior parte dai vari fori di perforazione e dalle sonde stesse di congelamento.

Riscontrati tutti questi fenomeni veniva deciso e subito intrapreso l'intervento con azoto liquido: sembrava logico tentare di fornire alle sonde congelatrici una portata di frigorifici di ordine decisamente superiore a quanto non potesse produrre la salamoia; portata che nei punti di maggior scorrimento d'acqua fosse in grado di superare il livello criogenico critico per la formazione del ghiaccio.

Il giorno 4 ottobre iniziava il pompaggio di azoto in tutto il settore di monte del pozzo: con una certa gradualità le 26 sonde congelatrici interessate dall'operazione (dalla n. 30 alla n. 54, la n. 1 e la n. 2) sono state staccate

reagiva in modo molto positivo in certi punti, con minore intensità in altri.

La dispersione dei risultati è compresa tra le due curve limite indicate nella figura.

Ad ogni modo al termine del pompaggio d'azoto tutte le temperature registrate erano, per la prima volta, passate al di sotto dello 0 °C.

Rimaneva tuttavia l'impressione che l'azoto avesse apportato un notevole miglioramento a tutto il masso congelato, senza tuttavia favorire in modo particolare le zone di passaggio d'acqua (spessore muro qui sempre esile).

L'alta velocità dell'acqua di percolazione aveva ancora ostacolato il congelamento (nei punti più critici forte asportazione di frigorifici), tenuto anche conto del fatto che gran parte del muro era già stato formato dalla salamoia.

Lo scavo non poteva essere ripreso subito in quanto l'acqua artesiane non



Fig. 11 - Pila n. 5. Scavo a 12 m di profondità. Lato del muro congelato perfettamente impermeabile / Pier n. 5. Excavation 12 m deep shows the side of the wall perfectly frozen

potendo avere sfogo verso l'alto (all'interno dei tubi ormai tutti congelati) si è aperta una via in profondità a 20-22 m dal piano cordolo per cui dovevano essere eseguite nuove iniezioni aggiuntive a quella quota soprattutto lato fiume.

Inoltre sono state messe in opera altre sonde congelatrici (in totale 9) per rinforzare il muro fino a 15 m di profondità in una zona dove «l'effetto azoto» si era andato più velocemente smorzando.

Finalmente lo scavo riprendeva il giorno 3 novembre 1982 ed il 24 dello stesso mese si portava a 12 m di profondità.

Il paramento risultava nel complesso asciutto (vedere figura 11); qualche venuta d'acqua localizzata poteva essere tenuta sotto controllo e raccolta in tubi (vedere figura 12).

Intanto alcuni termometri attorno alle venute segnavano un rialzo puntuale, pronunciato, della temperatura, come mostra ad esempio la figura 13.

La figura 14 fornisce una visione generale dello scavo a 12 m di profondità.

A questo punto sembrava proprio che, superate le difficoltà già previste tra i 12 ed i 14 m, si potesse poi completare lo scavo: le temperature in profondità denunciavano la presenza di un muro di ghiaccio massiccio.

Purtroppo invece, proprio attorno ai 14 m, le operazioni di scavo hanno dovuto nuovamente essere sospese a causa di una forte venuta d'acqua attraverso un varco sottile, ma abbastanza esteso formatosi in corrispondenza dei termometri B-A-M.

La figura 15 mostra la situazione attorno al termometro A (zona più critica).

Per superare questa ulteriore diffi-

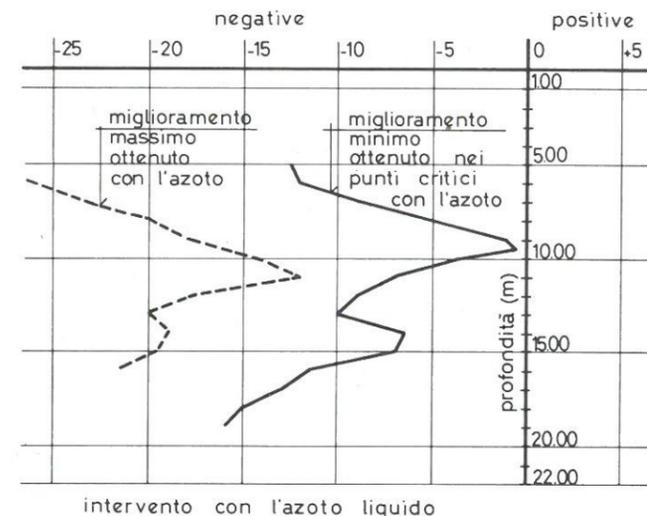


Fig. 10 - Intervento con l'azoto liquido / Results with liquid nitrogen. Lowest temperatures obtained. Highest temperatures obtained, at the critical points



Fig. 12 - Pila n. 5. Scavo a 12 m di profondità. Lato del muro con perdite di acqua convogliata in tubi / Pier n. 5. Excavation 12 m deep showing the side of the wall with water leakages

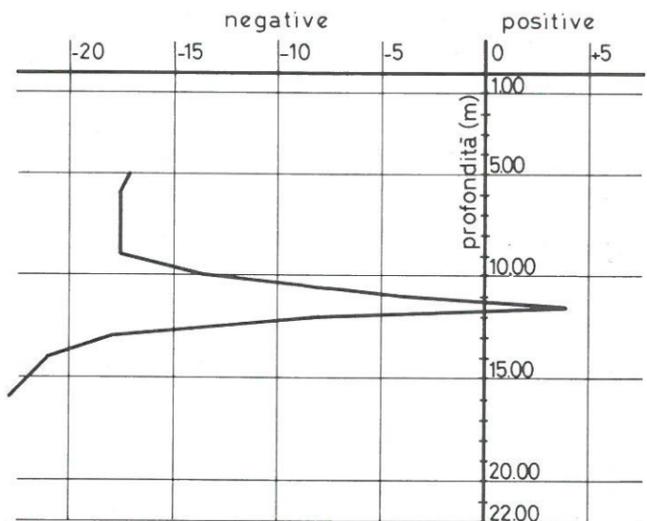


Fig. 13 - Situazione del muro di ghiaccio in corrispondenza del termometro «C» il giorno 8-11-82 quando lo scavo era a 12 m di profondità / Temperatures at 12 m depth taken by thermometer C on Nov. 8th 1982



Fig. 14 - Vista generale dello scavo / General view of the excavation



Fig. 17 - Pila n. 5. Scavo perfettamente impermeabile a 14 m di profondità / Pier-n. 5. Perfectly water-proofed excavation at 14 m depth



Fig. 18 - La superficie dello scavo congelato a 14 m di profondità. Si può notare la larga fessura riempita di miscela espansa attraverso la quale scorreva l'acqua del subalveo / The frozen excavation at 14 m depth. Note the large crack filled with expanse mixture, through which the water was flowing fast

coltà sono state attuate, e concluse entro le ferie natalizie, le seguenti opere:

- installazione di n. 4 nuove sonde congelatrici di 18.50 m di lunghezza, a cavallo del termometro A;
- esecuzione lungo una corona all'esterno del muro di ghiaccio (verso la frana) di 14 fori equipaggiati con tubi a valvole, di profondità 20 m ed interspati di 1,50 m, posti a quinconce con due differenti inclinazioni verso monte;
- iniezioni successive di miscela «espansa» (a base di cemento additivato con polvere di alluminio) e di miscela normale di cemento con immissioni saltuarie di silicato di sodio.

Riportiamo qui di seguito i diagrammi (figura 16) dei termometri B-A-M alle due date: del 2-12-1982 (prima del trattamento addizionale) e del 4-1-1983 (ultimato il trattamento, appena prima della ripresa dello scavo).

Si può notare il decisivo miglioramento ottenuto mediante i provvedimenti realizzati in una zona tanto precaria.

Il giorno 4 gennaio il pozzo veniva svuotato e risultava *perfettamente stagno* (nessuna infiltrazione d'acqua — vedere figura 17).

Il giorno 10 gennaio l'anello tra 12 e 14 m poteva essere gettato: le temperature dei termometri critici si abbassavano ulteriormente portandosi tutte al di sotto dei - 10°C.

Lo scavo veniva ultimato in pochi giorni senza più problemi.

La tormentata operazione del pozzo n. 5 era così terminata.

2.1.2. Le prove con micromulinello

Abbiamo cercato di riferire per sommi capi la complessa vicenda del pozzo della pila n. 5.

Certamente non abbiamo potuto scendere nei dettagli: le curve delle temperature ed i rapporti di cantiere stanno a testimoniare quanto «sofferito» sia stato questo intervento e quanto difficili e faticose operazioni si siano dovute, in un certo senso, «improvvisare» per fare fronte ad una situazione del tutto anomala ed imprevedibile.

Allo scopo di avere confermate, una volta per sempre e con chiarezza, le intuizioni avute sui movimenti delle falde, sulle forti velocità dell'acqua di subalveo, sul grado di artesianismo, sono state eseguite delle prove con micromulinello in due fori attrezzati con speciali tubi finestrati, profondi 24 m ed ubicati in prossimità della pila n. 5 e della pila n. 4.

I risultati hanno confermato la complicata situazione idrologica e la presenza di elevatissime velocità d'acqua sia verticali che orizzontali che hanno

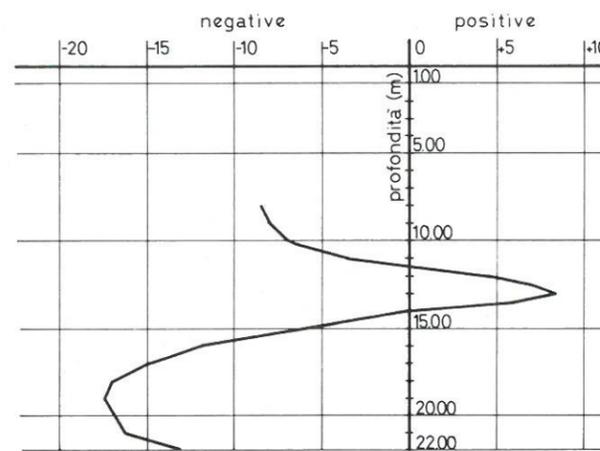


Fig. 15 - Situazione del muro di ghiaccio in corrispondenza del termometro «A» il giorno 2-11-82 — scavo a quota 13,50-14,00 m / Situation of the ice wall as recorded by thermometer A on 2-11-1982 - excavation at level 13.50-14.00 m

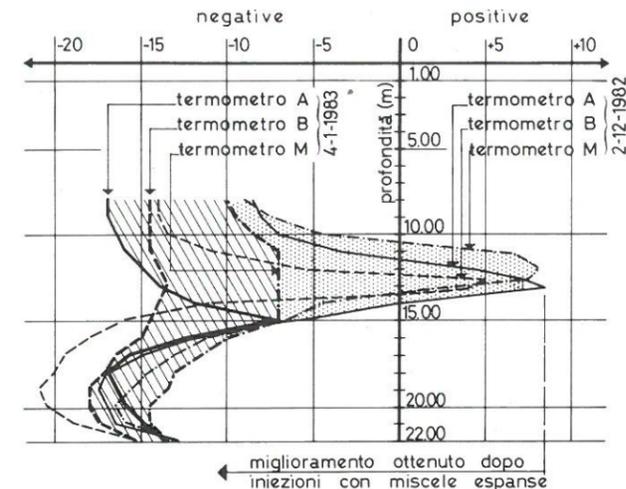


Fig. 16 - Miglioramento ottenuto dopo iniezioni con miscele espansive / Improvement after injections with expanse mixtures

causato la difettosa formazione del muro di ghiaccio.

In particolare si sono riscontrate delle velocità naturali ascensionali con incremento dal basso fino a superare i 70 cm/s fra 11 e 14 m di profondità.

I valori della velocità si riducevano poi verso l'alto annullandosi a 6 m circa dal piano campagna.

Veniva dunque confermata l'esistenza di una *falda artesianiana* attorno ai 20 m di profondità. Dall'esame delle velocità ottenute con immissione d'acqua si è potuto inoltre verificare la contemporanea presenza di *forti correnti orizzontali* naturali particolarmente concentrate a 14 m dalla superficie.

In base alle variazioni della velocità risultante si sono potuti infatti individuare strati con un coefficiente di permeabilità dell'ordine di 10^{-1} cm/s sommersi sotto strati di materiale fino di bassa permeabilità (10^{-4} - 10^{-5} cm/s).

La figura 18 mostra appunto una grande fenditura orizzontale che è stata completamente otturata con la speciale miscela espansiva.

2.1.3. Considerazioni conclusive sulle operazioni di congelamento

Le complicate vicissitudini della pila n. 5 ed il regolare andamento del congelamento di tutte le altre pile (nn. 4-3-2) possono offrire, a nostro parere, ai progettisti ed agli operatori del settore alcune considerazioni e suggerimenti nello spirito di migliorare l'applicazione di questa particolare tecnologia.

- Riteniamo innanzitutto che il *congelamento* rimanga sempre la *metodologia più sicura* per affrontare grandi scavi a pozzo in falda in condizioni difficili.

- Tuttavia quando la morfologia del

sito è tale da fare supporre qualche anomalia nell'ambito della situazione idrologica locale (strette gole vallive, presenza di fiumi con importanti correnti, alternanza di stratificazioni di deposito fluviale e di detrito di falda o di frana) è consigliabile *verificare* previamente l'andamento dei *movimenti delle falde* là dove dovrà formarsi il muro di ghiaccio. Possono essere di grande aiuto prove con micromulinello.

- Una volta accertata la presenza di acque in movimento con forti velocità (sia verticali che orizzontali) la metodologia del congelamento rimane sempre validissima, ma la regolare formazione della parete protettiva congelata deve essere garantita tramite trattamenti particolari, tipo quelli indicati sullo schema qui riportato in figura 19.

Questi *trattamenti*, basati soprattutto su iniezioni di *miscele particolari*, se programmati anticipatamente, costituiscono un *onere addizionale di lieve entità* che in gran parte si recupera perché il congelamento avviene con maggiore celerità e la dispersione di frigoriferi in zone esterne al muro si riduce in modo sensibile.

2.2. I pozzi protetti con jet grouting (Rodinjet® 1)

Le pile n. 1-6-7 e la spalla di monte n. 8 sono localizzate in zone più lontane dall'alveo del Fella; anche in relazione alla situazione morfologica più favorevole sono meno esposte all'erosione del subalveo ed a pericoli di scalzamento (vedere la planimetria n. 1).

Gli scavi, meno profondi, sono stati di conseguenza affrontati applicando una tecnologia più spedita che ha fornito una buona garanzia alla stabilità

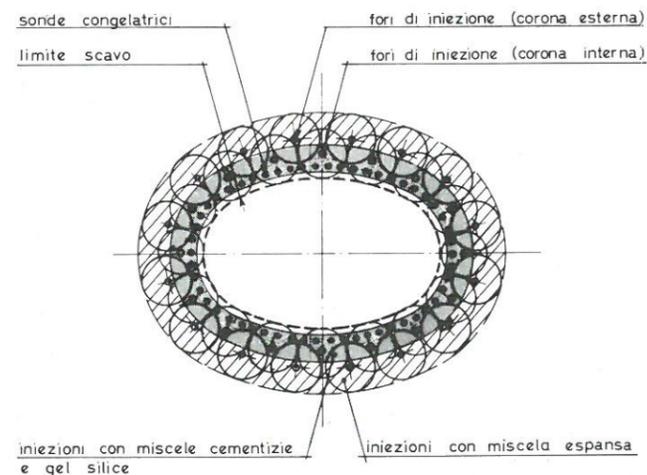


Fig. 19 - Operazioni aggiuntive necessarie per la regolare formazione del congelamento in presenza di importanti movimenti d'acqua nel subalveo / Necessary additional treatments for the regular formation of the frozen wall where important water currents were found. - injection with cement mixtures, Silicagel and expanse mixtures

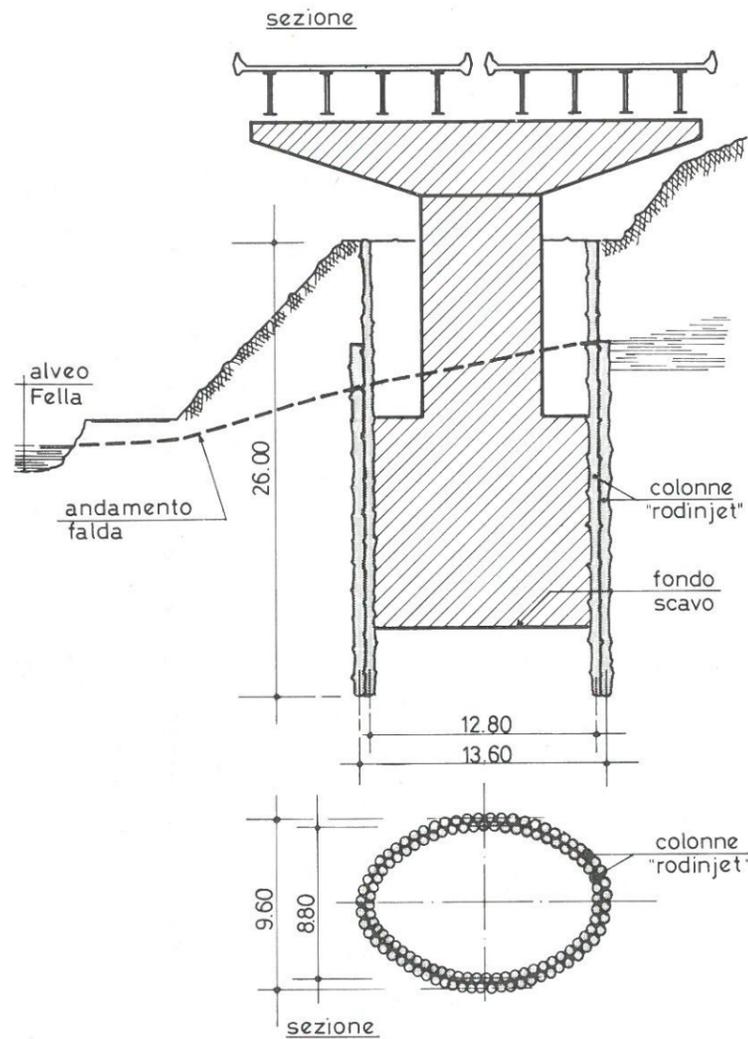


Fig. 20 - Pile di fondazione. Terreno consolidato con «Rodinjet 1» / Scheme of jet grouting treatment (Rodinjet 1)

delle pareti laterali in corso d'opera; sono stati tuttavia necessari interventi di aggotamento nel corso dello scavo.

Il sistema del jet grouting è ormai divenuto tecnica abituale d'intervento anche in Italia: apparentemente semplice come principio, esige tuttavia cura particolare nell'applicazione sia dal punto di vista dei macchinari e materiali impiegati, sia per quanto concerne la metodologia di messa in opera.

Su questo cantiere, grazie al personale altamente specializzato nel campo delle iniezioni, si sono superate alcune difficoltà e quindi la tecnologia specifica ha avuto modo di fare un ulteriore passo avanti.

2.2.1. La geometria dell'intervento e lo scavo

Come si può notare sul disegno 20 gli scavi per le fondazioni delle pile in questione sono stati protetti in falda da

una doppia fila di colonne «Rodinjet 1» interassate di 50 cm quelle esterne, di 45 cm quelle più all'interno (poste a quinconce nei confronti delle prime).

Le colonne più interne erano disposte a cavallo della linea di scavo.

Al di sopra della falda il trattamento è stato limitato ad una sola fila di colonne.

Riportiamo qui di seguito le caratteristiche principali dell'intervento:

- profondità totale delle colonne 23-27,50 m;
- altezza delle colonne sotto l'alveo del Fella circa 14 m;
- raggio d'azione medio ottenuto:
 - in terreno misto circa 20 cm;
 - in terreno sabbioso 30 cm;
- pressione d'iniezione 400-600 atm;
- tipo di miscela c/a = 1 (aggiunta di silicato di sodio 6% sul cemento);
- quantitativo di cemento per metro lineare di colonna 1,5-2 q/ml;
- intensità del trattamento (metri di

colonna Rodinjet per m² di superficie laterale del pozzo) 4,44 ml/m²;

- profondità raggiunte dal trattamento:

pila 1	23 m
pila 6	26,9 m
pila 7	27,5 m
pila 8	24,0 m

Lo scavo è stato eseguito per tratte successive di 2 m di altezza.

Al termine dell'asportazione del materiale di ciascuna tratta, veniva immediatamente eseguito il getto del guscio ellittico in c.a. di spessore 50 cm circa (vedere figura 21). Il sistema di scavo protetto da sottomurazioni laterali successive è stato necessario per i seguenti due motivi:

- le colonne di Rodinjet pur conferendo al terreno un buon grado di coesione non hanno né l'omogeneità né l'inerzia necessarie per resistere a grandi spinte.

Le colonne sono chiamate a lavorare come travi appoggiate superiormente al getto ed al terreno ancora in posto al lembo inferiore dello scavo: la luce libera non può superare senza rischio il valore medio di 2 m (in questo caso) per contenere al massimo gli sforzi di trazione in corrispondenza della superficie dello scavo;

- il trattamento Rodinjet non risulta perfettamente stagno a causa degli effetti «d'ombra» originati dagli elementi più grossolani del terreno, per cui le filtrazioni d'acqua devono essere mano mano asportate con pompaggio.

Ovvia è la conseguenza di dovere limitare la superficie libera dello scavo.

2.2.2. Tecnologia e modalità esecutive dell'intervento

Sono stati usati due escavatori Link-Belt con perforatrici SK/10 da 14 m, con testa di rotazione SR/52 con martello Klemm (vedere figura 22).

Il procedimento è consistito nell'inserimento, con perforazione a distruzione di nucleo, di una batteria di aste Ø 76 mm, sino alla profondità richiesta dal progetto per il trattamento.

Al termine di questa operazione venivano occluse le luci d'efflusso dell'acqua dalla testa di perforazione, mediante l'inserimento di una sfera di acciaio da 3/4".

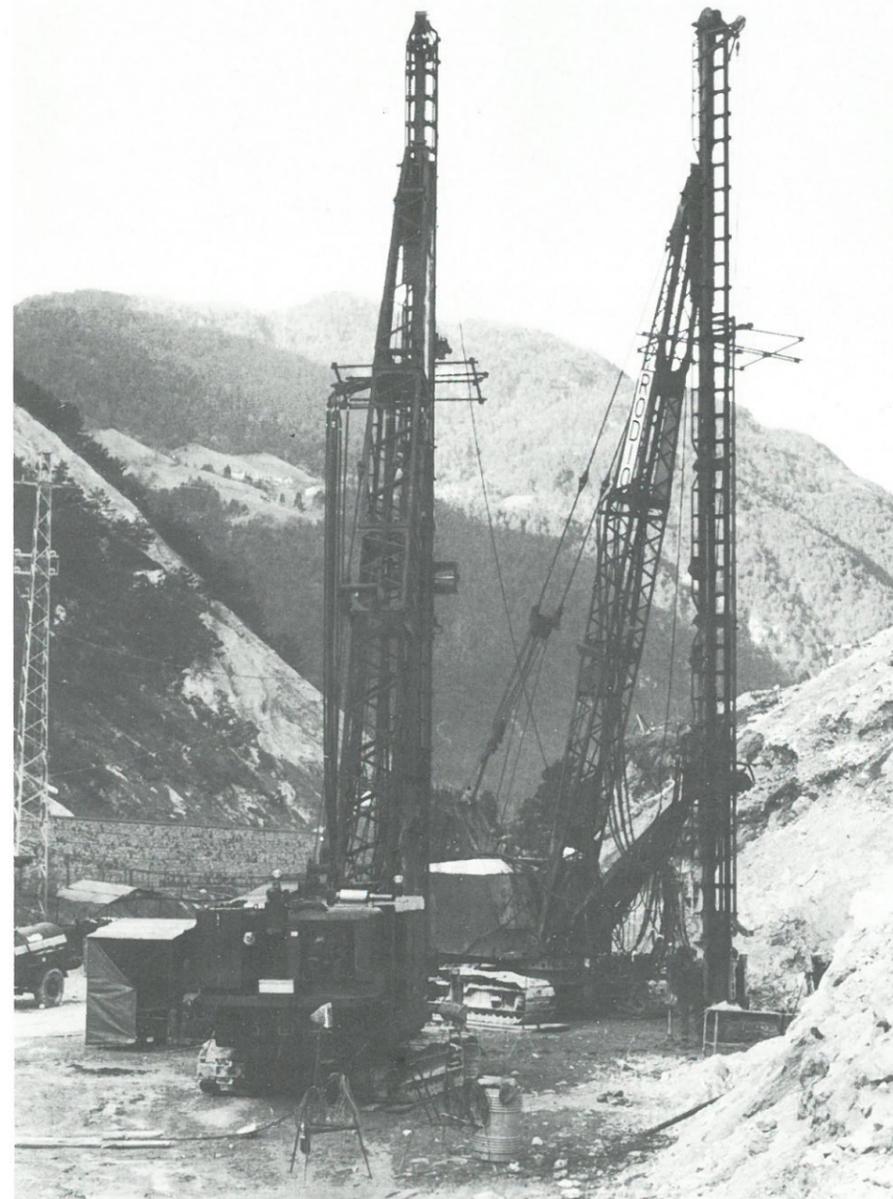
Iniziava poi la fase di estrazione e contemporanea iniezione della miscela acqua-cemento ad alta pressione.

La miscela, a rapporto acqua-cemento 1/1, è stata pompata all'interno delle aste tramite una pompa ad alta prevalenza a pressione di 400-600 atmosfere; essa fuoriusciva da due ugelli contrapposti di diametro 1,8 mm, provocando la rottura del terreno ed il suo rimescolamento con la miscela stessa.

Fig. 21 - Scavo della pila n. 6 protetto da doppia fila di colonne Rodinjet 1. La successione degli anelli in c.a. di rivestimento / Excavation of pier 6, protected by a double line of Rodinjet 1 columns. Reinforced concrete lining rings



Fig. 22 - Attrezzature al lavoro per l'esecuzione delle colonne Rodinjet 1 attorno alla pila n. 6 / Drilling equipment at work for the execution of Rodinjet columns around pier n.6



Ruotando le aste e contemporaneamente sollevando a gradini di 4 cm, si sono ottenute delle colonne di terreno rimescolato con la miscela di cemento.

2.2.3. I risultati conseguiti

Ne è risultato un trattamento piuttosto omogeneo che ha conferito un buon grado di consolidamento al terreno, come si può notare osservando la figura 23.

Sono quasi sempre stati necessari aggotamenti in falda: le portate d'acqua estratte, qualche volta di entità notevole, non hanno mai dato luogo a fenomeni di sifonamento.

A questo proposito si è dimostrata indispensabile la presenza della seconda fila di colonne iniettate.

Il contenimento della deviazione dei fori entro i limiti modesti diviene fattore determinante per la riuscita del trattamento: è necessario operare con batterie abbastanza rigide e condurre le perforazioni con le cautele del caso.

Con questi accorgimenti lo scavo può essere eseguito con buona celerità in clima di sicurezza.

3. LA SCHERMATURA ANTISCALZAMENTO

Come si può notare sulla planimetria del luogo (figura 1) e sulla fotografia panoramica del cantiere (figura 24) il fiume Fella scorre proprio alla base del conoide di falda ai piedi del quale sono impostate sia le pile del viadotto Passerella, sia i muri di sostegno dei rilevati dell'autostrada (a monte ed a valle del viadotto stesso).

Com'è noto il fiume è soggetto a piene molto frequenti; inoltre la situazione geometrica attuale dell'alveo è tale per cui la corrente, spesso impetuosa, viene ad investire direttamente le fondazioni delle opere sopra descritte. Per questo motivo si è dovuto ricorrere da una parte, come si è già detto, ad immergere in profondità, tramite i pozzi, le fondazioni delle pile del viadotto, dall'altra ad eseguire trattamenti speciali antiscalzamento per garantire la stabilità nel tempo del rilevato autostradale.

3.1. Colonne di terreno consolidato (sistema Rodinjet® 3)

Il trattamento di protezione al piede dei rilevati è stato realizzato con la costituzione di colonne verticali di terreno consolidato, così come mostra la figura 25.

Il sistema applicativo prende il nome «Rodinjet 3» e si differenzia dal «Rodinjet 1» (Jet grouting) per il fatto che

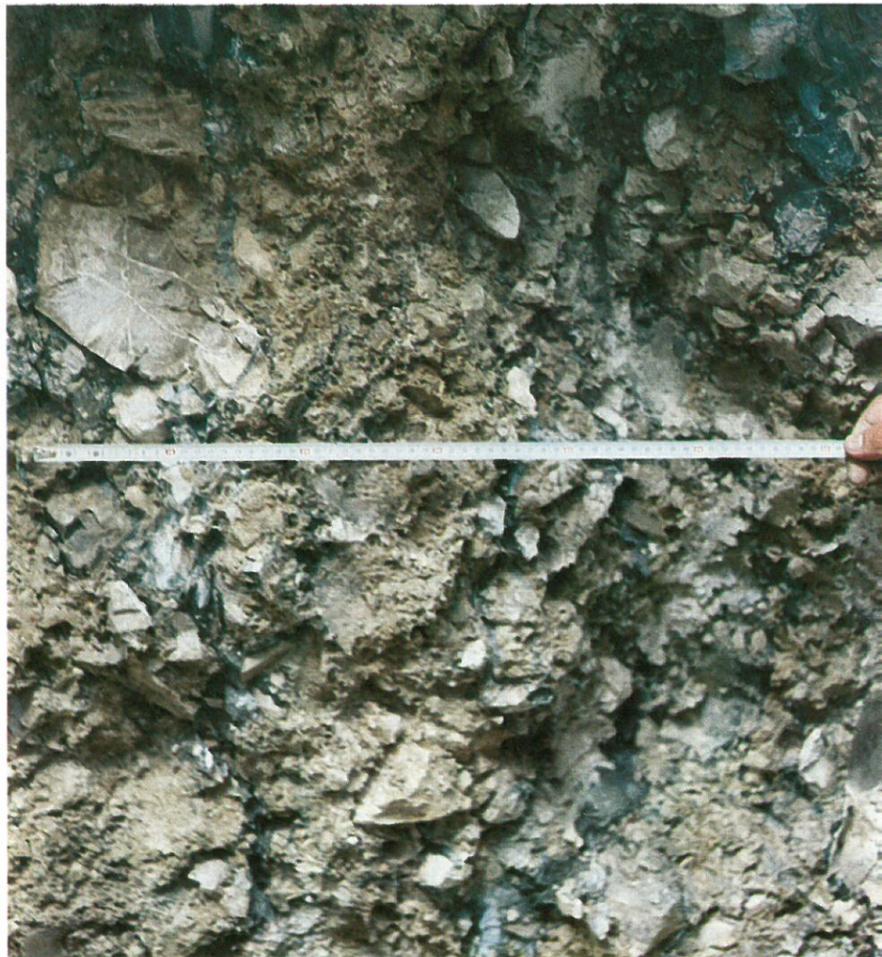


Fig. 23 - Terreno consolidato mediante Rodinjet 1. Si possono notare due vene di cemento corrispondenti alla zona centrale di due colonne contigue / Consolidated soil as a result of Rodinjet 1. Note two veins of cement corresponding to the central area of two nearby columns

questo metodo comporta l'asportazione preliminare mediante lavaggi con acqua ad alta pressione (500 atmosfere circa) delle frazioni fini del terreno e la sostituzione in immediata successione con miscela cementizia.

Come si sa con il Rodinjet 1 invece non si asporta terreno, ma lo si «rimescola» con cemento iniettato ad alta pressione.

Con alcune limitazioni di applicabilità (alle situazioni in cui le decompressioni temporanee del terreno all'intorno del foro dovute al lavaggio non inducono effetti dannosi per la stabilità) il Rodinjet 3 comporta un notevole aumento del raggio d'azione della miscela cementizia (iniettata a pressioni più basse 50-60 atmosfere) e di conseguenza un interasse maggiore tra i fori.

Durante la fase di lavaggio viene utilizzata anche aria in pressione (8 atmosfere circa).

Nel caso qui riferito le tre colonne di

Fig. 24 - Panoramica del cantiere. Si notano: sulla destra la pila n. 5 in congelamento, sulla sinistra le attrezzature Rodinjet 1 sulle pile nn. 6 e 7 / General view of the site. On the right note pier n. 5 under process of freezing and on the left Rodinjet 1 equipment for piers 6 and 7

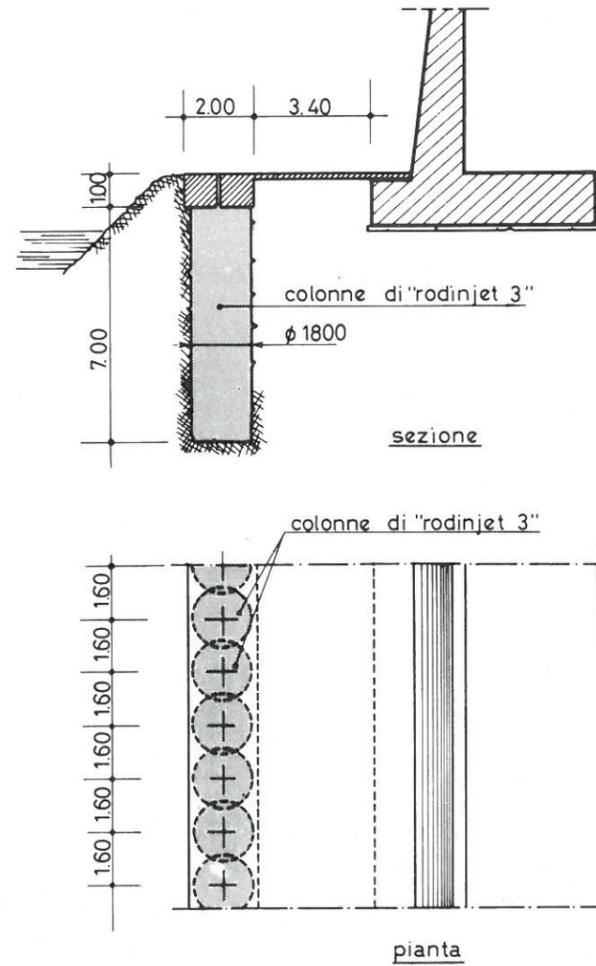


Fig. 25 - Terreno consolidato con «Rodinjet 3» / Scheme of barrier against erosion (Rodinjet 3)

prova eseguite ai bordi del Fella hanno evidenziato l'efficacia del trattamento proposto ed indicato come diametro utile della colonna iniettata 1,80 m.

Per cui la schermatura antiscaivamento è stata realizzata mediante l'esecuzione di colonne secanti aventi interasse di 1,60 m.

La profondità dello schermo è stata fatta variare da 7,00 m a 8,50 m a seconda della maggiore o minore distanza dalla corrente del fiume.

La figura 26 mostra le macchine in fase di lavorazione e la figura 27 evidenzia una porzione di terreno consolidato con questa metodologia.

3.2. I risultati ottenuti

I carotaggi eseguiti al termine del lavoro attraverso il corpo stesso del terreno trattato hanno confermato i buoni risultati ottenuti.

Questi fori di controllo sono stati generalmente localizzati in modo da indagare la zona di contatto fra successive colonne: sono stati tutti eseguiti con doppio carotiere $\varnothing 100$ mm e corone a diamanti per assicurare il minimo disturbo al campione.



Fig.26 - Attrezzatura in lavorazione per la costituzione della barriera antiscaivamento col sistema Rodinjet 3 / Equipment working on the construction of the anti-erosion barrier with Rodinjet 3



Fig. 27 - Terreno consolidato mediante Rodinjet 3. Le tre colonne di prova dopo lo scavo / Soil consolidated with Rodinjet 3. The three test columns after the excavation

Così si è potuto verificare:
 - che il trattamento risulta omogeneo lungo tutta la schermatura;
 - che con la metodologia impiegata ed i quantitativi di cemento utilizzati (10 q circa al metro lineare di colonna) in questo tipo di terreno il grado di consolidamento ottenuto è tale da garantire nei tempi lunghi la stabilità delle opere.

1. INTRODUCTION

Lot n. 5, awarded to S.I.I. Società Imprese Industriali S.p.A. of Rome, of a length of km 1+706.85 consisted of:

- Viaduct Cadramazzo built on 15 bays, each 40 m long;
- Semiviaduct Passerella built on two bays of 45 m and two of 60 m long;
- an artificial tunnel 120 m long for the right lane;
- several minor works;
- motorway embankments involving a preventing erosion diaphragm of 800 m.

This lot is situated near Chiusaforte, where the motorway runs through the mountains in the narrowest part of the valley.

Factors such as the State road and the railway, the steep rocky banks in the first part, the major landslide on the lefthand side and finally the rushing waters of the river Fella brought about several changes in the works and a number of delicate problems.

We believe it will be interesting for technicians to know how we solved these problems and which methods we applied to guarantee a safe foundation of the piers supporting the Passerella viaduct.

2. THE FOUNDATIONS OF THE «PASSERELLA» VIADUCT

As shown in figure 1, the final solution was to build one structure for both lanes supported by seven piers and two abutments sunk into soil to a depth of 14-19 m to prevent any possible water erosion.

An earlier alternative considered the two carriage-ways running separate as shown in figure 2. This alternative was rejected due to expense and time required. The adopted solution, the «Passerella» viaduct, is shown in figure 3 and on the plan.

For simplicity we are going to examine the two types of foundations separately, according to the different methods adopted for excavating the pier shafts.

For piers 2.3.4.5., directly flooded

by the river Fella stream, we resorted to the soil freezing technique.

For piers 1.6.7. and the upstream abutment n. 8 the excavations of the shafts could be undertaken by means of a jet grouting reinforcement.

2.1. The «frozen» wells

The former four piers, to prevent possible water erosion and seismic damages, had to have monolithic reinforced concrete foundations in elliptical wells with axes of 12 m and 8 m, and 19 m deep (a minimum of 15 m under the bottom of the river stream).

In the light of what happened later, considering the kind of such soil, the soil freezing technique proved to be most suitable: in fact the frozen wall proved resistant to any possible ground collapse and piping.

The scheme can be seen in figure 4. The freezing pipes were inserted around the well 0.68 m apart and the bottom injected was 5 m thick in order to overcome the hydraulic pressure.

In addition some grouting holes containing sleeved pipes have been located in a further ellipse.

Into these pipes cement grout was injected to help in the formation of the frozen wall.

The freezing technique by means of brine worked very well, except for pier n. 5, which posed several problems; rather than describe the successful cases, we will concentrate on how we overcame the difficulties with the fifth pier.

This may prevent a similar costly occurrence in the future.

2.1.1. The «freezing» troubles of pier n. 5

After setting up the «freezing» apparatus as explained above, the process itself was started on August 15th, 1982.

The preliminary temperature readings of the ground already showed an anomalous pattern related to the water table: in fact the diagram of the eleven temperature pipe devices reported an average situation as shown in figure 5. We immediately suspected that the Fella water table (around 12 °C) had been connected with another deeper artesian table (at 5 °C) owing to the vertical drillings.

Then, while the freezing apparatus worked in a normal way and the temperature of the brine dropped as expected, the temperature of the ground, as read daily, showed anomalies in two areas of the ice wall: at a depth of 10 m and 14 m respectively.

We were aware that at about these depths water was flowing through some

excessively permeable strata of ground.

This prevented ice forming at 10 m and only with difficulty between 14 m and 16 m (see Fig. 6): so we had to find ways of stemming the flow of the underground water.

Additional groutings of cement accelerated with silica were made to try to fill the apparent voids at the critical depths.

Figure 7 shows the brine distribution ring and the drill making the additional grouting holes.

The diagrams in figure 8 show the improvements obtained through this first action.

As it is shown, a sheet of water continued to pass through the wall of ice at a depth of 10 m and at 14-15 m the wall was still fragile.

Nevertheless on Sept. 19th, 1982, we began to excavate, hoping that, as generally happens, the wall would become uniform (freezing units shifting toward the weakest points).

The excavated shaft was lined with reinforced concrete rings (2 m high) and proceeded down to a depth of 6 m: at this point we had to pump out water at a rate of approximately 0.7 l/sec in order to keep the well dry.

The temperature readings showed that some area of the ice wall around 10 m deep were not frozen and also at greater depths the ice was not completely formed (see Fig. 9).

So we decided to stop the excavation, to fill the well with water and to undertake an additional freezing treatment with liquid nitrogen. The water level inside the well was 1 m above the level of the river Fella: thus indicating that, as well as the fast-moving horizontal streams of water, there must have been artesian springs from below, which took advantage of the holes we drilled.

By using liquid nitrogen we were able to lower the freezing point below that previously obtained with brine, which caused the running water itself to freeze.

On the 4th of October, we began to pump nitrogen into the mountain side of the well; gradually 26 freezing pipes were disconnected, cleaned of brine and joined in pairs in order that nitrogen would enter one in liquid form and escape from the other as gas.

As soon as the temperature of the soil thus treated reached a satisfactory low, we reverted to using brine.

We had completed the mountain side by the 7th of October.

On the valley side we only had to use nitrogen in eight pipes (from the 12th to the 19th): this last operation was completed between the 8th and the 10th of October.

The results are shown in figure 10.

Within a few hours the freezing potential of liquid nitrogen had caused

the ice wall to consolidate in most parts, as shown between the two curves of figure 10.

For the first time all the temperatures recorded were below 0 °C.

Nevertheless we were aware that the liquid nitrogen had little effect on the area of the water flow, since the ice here was still very fragile.

Evidently the artesian water now unable to flow upwards around the freezing pipes, proceeded downwards to a depth of 20-22 m.

This required further groutings and nine additional freezing pipes to treat the areas at the depth of 15 m little affected by liquid nitrogen.

At last the excavation went ahead on Nov. 3rd 1982 and by the 24th it had reached a depth of 12 m.

The face of the excavation was on the whole dry (see Fig. 11) with the exception of localized areas where the water had to be collected in tubes (Fig. 12) and the temperature was above freezing point (Fig. 13).

Figure 14 shows a general view of the excavation at 12 m.

While everything went according to plan from 12 m to 14 m, we were then forced to stop temporarily due to water flowing through a thin crack around thermometers B-A-M. Figure 15 shows the situation recorded by thermometer A (the most critical area).

In order to overcome this problem, we put into operation the following:

- installation of 4 further freezing pipes, 18.50 m deep, in the vicinity of thermometer A;
- addition of a circle of 14 sleeved pipes 20 m deep and at a distance of 1.50 m apart (landslide side);
- further groutings of «expanse mixture» and of normal mixture of cement with occasional additions of sodium silicate.

The curves in figure 16 show the temperatures recorded by thermometers B-A-M at two dates: 2-12-1982 (before this treatment) and 4-1-1983 (after the treatment before restarting the excavations).

These measures showed positive results and on Jan. 4th the well was pumped dry with no water leakages (see Fig. 17).

On Jan. 10th the concrete ring at 12 and 14 m was built: the temperatures of the critical thermometers had dropped to -10 °C. The excavation finished in a few days with no further problems.

2.1.2. Tests with micro-current-meter

We felt it necessary to research into the causes of the considerable problems faced with pier n. 5, which compelled us at times to use ingenuity and make

rapid decisions.

We wanted to back our intuitions on the underground water movements: consequently we lowered a micro-current-meter in two holes equipped with special slotted pipes, located around piers n. 5 and n. 4 at a depth of 24 m.

The results have confirmed the complicated hydraulic situation caused by fast upward and horizontally moving water which impeded the regular formation of the ice wall.

In particular we recorded some upward flows of water with a speed of 70 cm/sec, between depths of 11 and 14 m, but whose speed dropped considerably as it neared the surface, and had completely stopped by 6 m below ground level. Therefore we were able to ascertain the presence of an artesian water table at a depth of approximately 20 m. By experimenting with influxes of water, we recorded that strong horizontal water currents were present, 14 m below ground level.

As we examined the variations in the water speed, we were able to localize strata with a permeability coefficient of 10⁻¹ cm/sec lying under a strata of thin material with a low permeability (10⁻⁴ - 10⁻⁵ cm/sec).

Figure 18 shows a large horizontal crack, which has been completely filled with the special «expanse» mixture (14 m depth).

2.1.3. Concluding thoughts on the freezing operations

We believe that the ways in which we solved the serious problems which we encountered will prove a useful model for technicians and designers, enabling them to improve their knowledge in this particular field of ground engineering.

- Freezing is the surest method of excavating foundations under the water table in difficult conditions.

- Yet when the morphology of the ground reveals an abnormal hydrological situation (narrow valleys, rivers with strong currents, stratification of river deposits alternating with landslide debris), we suggest first controlling water movements preferably by means of micro-current-meter tests.

- Having ascertained the presence of strong horizontal and vertical water currents, the freezing procedure remains valid, but the regular formation of the ice wall must be guaranteed by special treatments, as shown in figure 19.

Such treatments, mainly injections of special mixtures, if programmed in advance, will mean little additional cost, soon recouped because freezing is achieved much faster and the coldness retained in the immediate area.

2.2. The shafts treated with jet grouting (Rodinjet® I)

Piers n. 1-6-7 and the upstream abutment n. 8 of the viaduct (see Fig. 1), being situated further away from the river Fella, were in a better morphological situation: therefore their excavation could be carried out in a more straightforward way, being able to guarantee good stability to the lateral walls. Nevertheless some pumping operations were necessary during the excavation.

Jet grouting is now often applied in Italy: though apparently simple, its application requires particular care both in the machines and materials employed and in the installation methods.

In this site, we overcame the difficulties and thereby perfected the techniques required.

2.2.1. The geometry of the work and the excavation

As shown in figure 20, the excavations for the piers' foundations have been protected, across the water table, by a double ring of Rodinjet I columns (the outer ones were 50 cm apart, the inner ones 45 cm).

We show below the main dimensions of the work:

- total depth of the columns 23-27.50 m;
- column height under the bed of the Fella river approx. 14 m
- average penetration distance of the mixture:

 - in mixed soil approx. 20 cm
 - in sandy soil 30 cm
 - grouting pressure 400-600 atm
 - type of mixture c/w = 1 (6% sodium silicate added to cement)

- quantity of cement per each metre of column 1.5-2 q/m
- intensity of the treatment (metres of Rodinjet column per m² of the well's lateral surface) 4.44 ml/m²

- depths reached by the treatment

 - pier 1 23.0 m
 - pier 6 26.9 m
 - pier 7 27.5 m
 - pier 8 24.0 m

The excavation was executed in successive stages, 2 m high each.

After removing the material from each section, an elliptical concrete shell 50 cm thick was immediately poured (see Fig. 21).

Protecting the excavation with lateral lining walls was necessary for two reasons:

- the Rodinjet columns, though able to give the soil good cohesion, have neither the homogeneity nor the inertia necessary to resist strong stresses;
- the Rodinjet system is not com-

pletely impermeable, because the presence of bigger soil boulders makes it necessary to pump off water filtering through.

2.2.2. Techniques and methods of the work

Two excavators Link-Belt were used, with drills SK/10 14 m high, with a rotation head SR/52 with hammer Klemm (see Fig. 22).

After inserting a battery of rods \varnothing 76 mm down to the depth required, the water flow openings of the perforation bit were blocked up, by inserting a 3/4" steel sphere.

Then we started to simultaneously uplift and inject a water-cement mixture at high pressure.

This mixture (water-cement 1/1) was pumped inside the rods by a special high head pump at a pressure of 400-600 atmospheres: it flowed out through two opposite nozzles of 1.8 mm diameter, causing the soil to break and to mix again with the cement/water itself.

By rotating the rods and simultaneously raising them by 4 cm steps, we obtained columns of soil mixed with the cement mixture.

2.2.3. Results obtained

Such homogeneous treatment gave the soil a good degree of consolidation as shown in figure 23. We frequently had to pump out water from the bottom of the excavation, but it never caused a piping phenomenon, owing to the second line of injected columns, which proved to be most useful.

It is necessary to control the deviation of the holes: therefore rather rigid batteries of rods must be used.

If the drillings are executed with the utmost care, the excavation can be achieved rapidly and safely.

3. THE BARRIER AGAINST EROSION

Looking back at the general plan in figure 1 and the panoramic view in figure 24, we can see that the river Fella runs along the base of the landslide where both the piers of the Passarella viaduct and the walls supporting the motorway embankment are built.

As it is known, the Fella river undergoes frequent floods: therefore, in order to prevent damage to the piers due to the current, we had to execute the deep foundation shafts above described and carry out a special treatment against long-term erosion along the base of the embankments.

3.1. Consolidated columns (Rodinjet® 3 system)

The protection at the base of the road embankments was achieved through vertical columns of consolidated soil, as shown in figure 25.

This system, called «Rodinjet 3», differs from Rodinjet 1 (Jet grouting) because this method involves the preliminary removal by means of high pressurized water (about 500 atmospheres) of the thin soil particles and its immediate replacing with cement mixture.

On the contrary with Rodinjet 1 the soil is not removed, but re-mixed with cement grouted at high pressure.

Except for occasions when the temporary soil decompressions around the hole, due to washing, have dangerous effects on stability, Rodinjet 3 allows the cement mixture to spread considerably (grouted at lower pressures of 50-60 atm) and consequently the holes can be further apart. During the washing phase, pressurized air (about 8 atm) is also used.

In the above mentioned case, the three columns executed as tests on the

sides of the Fella showed that this method gives good results and indicated that the normal diameter for the grouted column is 1.80 m.

That is why the anti-erosion barrier was achieved by means of interconnected columns with axes 1.60 m apart.

The depth of the barrier varied from 7.00 m to 8.50 m, according to the distance from the river.

Figure 26 shows machines at work and figure 27 a portion of soil consolidated through this method.

3.2. Results obtained

The core drills executed through the consolidated soil at the end of the work, showed good results.

These drills, made in the zone of contact of two columns, were carried out with a double core barrel with a diameter of 100 mm and a diamond bit in order not to damage the sample.

The results showed that:

- the treatment was homogeneous along the whole barrier;

- with these methods and the quantity of cement used in this kind of soil (10 q/m), we are able to guarantee stable foundations in all such works for a long time in the future.

Ente appaltante: Autostrade S.p.A. - Roma
Progettazione Generale e Direzione Lavori: S.P.E.A. S.p.A. - Milano
Impresa Generale: Società Imprese Industriali S.p.A. - Roma
Impresa Opere Specializzate: Rodio

S.p.A. - Casalmajocco (Milano)
Direttore dei Lavori: Dott. Ing. Maurizio Neri
Responsabile Cantiere Impresa S.I.I.:
Geom. Alfio Rogo
Responsabile Cantiere Impresa Rodio:
Geom. Giovanni Zadra