

CONGELAMENTO CON AZOTO LIQUIDO PER IL PRELIEVO DI CAMPIONI IN UN BACINO DI STERILI MINERARI

Andrea Geppetti, Johann Facciorusso, Claudia Madiai

Università degli Studi di Firenze

andrea.geppetti@unifi.it

johann.facciorusso@unifi.it

claudia.madiai@unifi.it

Sommario

Sin dalla prima metà del secolo scorso sono state sviluppate diverse tecniche, in varie parti del mondo, per prelevare campioni indisturbati di materiale non coesivo attraverso il congelamento. Sebbene queste metodologie permettano di ottenere campioni indisturbati di elevata qualità, esse comportano l'utilizzo di ingenti risorse. In questo lavoro è presentata una procedura relativamente semplice e speditiva per prelevare campioni di terreno indisturbati per mezzo di congelamento con azoto liquido in un bacino di decantazione di sterili minerari. Nella prima parte del documento viene sinteticamente inquadrato il problema in questione e vengono descritte le tecniche per il prelievo di campioni indisturbati mediante congelamento sviluppate da vari ricercatori in passato. Quindi viene presentato un inquadramento del sito in esame, ponendo particolare attenzione alle caratteristiche dei materiali che costituiscono l'opera, ricavate dai risultati di alcune campagne di indagine pregresse. Di seguito viene presentata la tecnica sviluppata e la sua applicazione al caso studio.

1. Introduzione

Le tecniche tradizionali di estrazione di campioni indisturbati non si prestano al campionamento di terreni non coesivi in quanto possono compromettere in modo importante l'integrità microstrutturale del terreno. D'altro canto, le procedure di ricostituzione artificiale in laboratorio dei provini non sono in grado di ricreare le caratteristiche originali che aveva il terreno in sito e che sono altresì fondamentali per lo studio del comportamento meccanico in termini di tensioni e deformazioni del materiale (Ghionna et al. 2001). A partire dalla metà del XX secolo sono state sviluppate le prime tecniche di congelamento per l'estrazione di campioni di terreni non coesivi indisturbati. Nella maggior parte dei casi questi procedimenti richiedono un grosso impegno economico, in quanto risultano essere molto onerosi in termini di tempo (2/3 giorni), macchinari e quantità di liquido refrigerante (Figura 1).

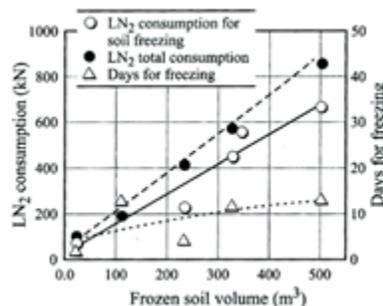


Fig 1. Volume di terreno congelato in funzione del consumo di idrogeno liquido e del tempo necessario al congelamento

(Kokusho and Tanaka, 1994)

Nell'ambito di uno studio di stabilità nei confronti di fenomeni di liquefazione statica e sismica di un bacino di sedimentazione di sterili minerari ("tailings dam"), si è reso necessario il prelievo di campioni indisturbati per la successiva caratterizzazione in laboratorio del comportamento dei materiali presenti all'interno del bacino e negli argini. L'impianto è stato oggetto di alcune campagne di indagini geotecniche e geofisiche tra 2010 e il 2018 che hanno consentito di ricostruire preliminarmente la stratigrafia del sito e di identificarne i principali litotipi. In questo lavoro è descritta una metodologia relativamente semplice e a basso costo per il prelievo, mediante il congelamento con azoto liquido, dei materiali non coesivi presenti nel sito di studio. Dopo una breve descrizione di alcune campagne sperimentali di campionamento basate sulla tecnica del congelamento del terreno condotte negli ultimi 70 anni, viene sinteticamente descritto il sito di studio ponendo l'attenzione sulle caratteristiche dei materiali presenti, ricavate dalle indagini pregresse. Successivamente sono descritte le attrezzature e le fasi operative adottate nell'ambito di questo studio per eseguire il prelievo, il trasporto e la preparazione dei campioni indisturbati.

1.1 Cenni su campagne pregresse di campionamento basate sulla tecnica di congelamento del terreno

La tecnica di congelamento del terreno per prelevare campioni indisturbati venne utilizzata per la prima volta da Hvorslev durante una campagna di indagini che si svolse negli anni 40 del secolo scorso presso la Fort Peck Dam Montana Stati Uniti. La procedura ideata da Hvorslev prevedeva di raffreddare il volume di terreno da prelevare attraverso la circolazione di un liquido refrigerante all'interno di sette tubi disposti ad anello. Terminata la fase di congelamento, i campioni potevano essere prelevati per mezzo di un carotiere di grandi dimensioni (Hvorslev, 1949).

Negli anni 70-90 venne dato un forte impulso nello sviluppo di tecniche di prelievo di volumi di terreno congelati da gruppi di ricerca Giapponesi (Yoshimi et al. 1978, 1984 e 1989). In questo periodo vennero sperimentate tecniche che avevano alcune caratteristiche in comune: l'installazione di un unico tubo in cui far fluire il liquido refrigerante e il prelievo di un grosso volume di terreno, mentre differivano per tipo di liquido refrigerante, profondità di congelamento e tipologia di raccolta del bulbo congelato che poteva essere effettuato mediante estrazione con gru oppure con carotiere. In ogni caso, per effettuare il congelamento erano necessarie ingenti quantità di idrogeno liquido (5000 Kg) e di tempo (40 ore) (Yoshimi et al. 1984). Una metodologia relativamente più economica venne proposta da Konrad nel 1990. L'autore riuscì a campionare un cilindro di sabbia di 26 cm di diametro in 4 ore utilizzando un'asta a sezione rettangolare al cui interno circolava etanolo refrigerato (Konrad 1990).

Lo sviluppo e l'analisi di diverse metodologie, tra cui anche quella per congelamento, per ottenere campioni di terreno di elevata qualità costituiva uno degli obiettivi principali del progetto "Canadian Liquefaction Experiment" (CANLEX) (Sego et al. 2000). La procedura utilizzata dai ricercatori del progetto CANLEX prevedeva di raffreddare il terreno intorno ad un tubo in cui circolava azoto liquido fino a raggiungere un volume di materiale congelato cilindrico di circa 2 m di diametro e con un'altezza che poteva variare tra i 4 e i 10 m, a seconda delle caratteristiche del sito. Una volta terminata la fase di congelamento, i campioni venivano prelevati tramite carotaggi posti a circa 0.6 m dal tubo congelatore. Nell'articolo gli autori riportano i costi relativi a queste tecniche di campionamento che si aggirano attorno 50.000 \$ Canadesi per sondaggio (riferito all'anno 2000) che corrispondono a circa 34.500 € (valuta attuale).

Nei primi anni 2000 sono stati condotti prelievi di terreno congelato in Italia e in particolare a Gioia Tauro in Calabria (Ghionna et al. 2001), dove è stata utilizzata una tecnica simile a quelle proposte dai ricercatori Giapponesi con l'estrazione di un gran volume di terreno congelato da cui sono stati ricavati i campioni da sottoporre a prove di laboratorio, e in alta Toscana, in cui invece è stato sfruttato un procedimento più simile a quello descritto nel progetto CANLEX, congelando l'area di terreno da investigare e prelevando poi campioni a

profondità regolari per mezzo di tre fori di sondaggio disposti a circa 1 m dal foro di congelamento (Lo Presti et al. 2007).

Nel 2018 un gruppo di ricercatori Sud Coreani ha ideato una tecnica di congelamento del terreno per mezzo di due tubi congelatori posti ad una distanza di circa 1.5 m che ha permesso di congelare un'area di terreno di 4 m di diametro (Kim et al. 2018). Il volume di materiale congelato è stato poi valutato tramite tomografia elettrica e non attraverso il prelievo di campioni.

2. Inquadramento del sito

Il prelievo di campioni di terreno indisturbati per mezzo di congelamento con azoto liquido si è reso necessario nell'ambito di uno studio di stabilità nei confronti di fenomeni di liquefazione statica e sismica di un bacino di sedimentazione di sterili minerali ("tailings dam") che si trova nel sud della Toscana. L'impianto è costituito da diversi bacini e sistemi di ritenuta per un'area complessiva che si estende per circa 30 ettari. Questo studio prende in esame la stabilità dell'argine dimensionalmente più importante dell'intera struttura e il relativo bacino. Tra il 2010 e il 2018 sono state condotte diverse campagne di indagine sul sito in esame con il prelievo di campioni con tecniche di campionamento tradizionali, che, considerata la natura prevalentemente incoerente dei materiali prelevati, non si sono potuti ritenere indisturbati e quindi adeguati per una misura affidabile delle proprietà meccaniche di tali materiali (Figura 3).



Fig 3. Ubicazione sondaggi delle campagne investigative del 2010, 2013 e del 2018 e inquadramento degli scavi

Infatti, dalle analisi granulometriche (Figura 4) e dai risultati ottenuti dai limiti di Atterberg (Tabella 1) è stato possibile evincere che sia i materiali che costituiscono il corpo arginale che quelli presenti nel bacino di decantazione sono non coesivi e quindi si è ritenuto necessario ricorrere a tecniche particolari per ottenere campioni indisturbati.

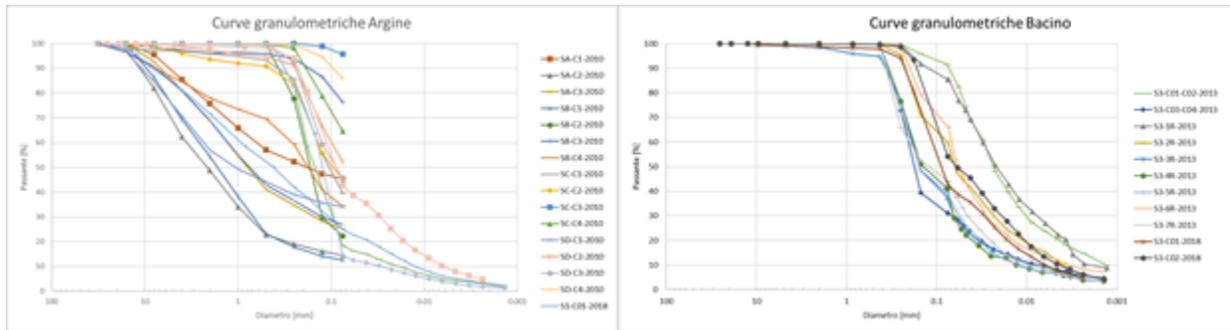


Fig 4. Granulometrie a.) dei materiali che costituiscono l'argine b.) dei materiali che costituiscono il bacino di decantazione

Tab 1. Caratteristiche granulometriche e limiti di Atterberg ottenuti dai campioni delle campagne investigative del 2010, 2013 e 2018

ARGINE										
ANNO	SOND.	CAMPIONE	PROF. [m]	Ghiaia [%]	Sabbia [%]	Lim. [%]	Argilla [%]	wL [%]	wP [%]	IP [%]
2010	SA	C1	4.2-4.5	24	31	45		26	19	7
2010	SA	C2	10.0-10.4	51	35	14				
2010	SA	C3	17.45-17.8	21	44	35				
2010	SB	C1	8.2-8.5	13	41	46				
2010	SB	C2	16.3-16.6		78	22				
2010	SB	C3	22-22.3	4	20	76				
2010	SB	C4	12.2-12.5	22	44	34				
2010	SC	C1	28.2-28.5	4	57	39				
2010	SC	C2	13.5-14	6	49	45				
2010	SC	C3	18.3-18.6	4	96	22	21			1
2010	SC	C4	23.5-24		35	65				
2010	SD	C1	6.2-6.5	43	23	34		38	22	16
2010	SD	C2	11.5-12	3	45	52				
2010	SD	C3	17.7-18.1		54	46				
2010	SD	C4	23.2-23.5		14	86		20	18	2
2010	SD1	C1	11.2-11.5	31	42	27		17	16	1
2018	S1	C01	4.0-5.0	28.4	46.66	21.98	2.96			
2018	S1	C02	11.0-11.5	0.11	81.58	15.8	2.51			
2018	S1	C03	17.5-18.0	1.21	56.12	38.52	4.15			
2018	S1	C04	23.5-24.0	0.22	85.31	12.86	1.61			
BACINO										
ANNO	SOND.	CAMPIONE	PROF. [m]	Ghiaia [%]	Sabbia [%]	Lim. [%]	Argilla [%]	wL [%]	wP [%]	Ip [%]
2013	S3	C01-C02	3.0-4.0	0.1	13.8	67.3	18.8	40.8	23.8	17
2013	S3	C03-C04	6.0-7.0	0.1	70.9	21.5	7.5	28.1	19.2	8.9
2013	S3	1R	2.7-4.3	0	19.9	59.3	20.8	31.8	25.5	6.3
2013	S3	2R	5.7-6.3	0	49.9	40.3	9.8			
2013	S3	3R	9.0-9.5	1.5	69.8	21.9	6.8			
2013	S3	4R	12.0-12.5	0	71.2	22.9	5.9			
2013	S3	5R	15.0-15.5	0	67.1	21.1	11.8			
2013	S3	6R	18.0-18.5	0	71.2	22.9	5.9			
2018	S3	C01	5.0-5.5	0	35.14	57.98	6.88	28	21	7
2018	S3	C02	14.0-14.5	0	45.9	48.69	5.41	23	17	6

3. Metodologia proposta di congelamento e prelievo di campioni indisturbati

Come esposto nei paragrafi precedenti, le tecniche di prelievo di campioni indisturbati di terreno non coesivo per mezzo di congelamento proposte da vari autori negli anni, sebbene permettano di raggiungere profondità relativamente elevate e di ottenere risultati di alta qualità, comportano allo stesso tempo l'utilizzo di risorse ingenti in termini di personale specializzato, materiali e macchinari che spesso mal si conciliano con i mezzi a disposizione e con le difficoltà logistiche e operative che si presentano in siti "speciali" come i bacini minerari. Si è cercato, quindi, di mettere a punto una metodologia relativamente semplice ed economica che permetta di ottenere

campioni indisturbati in terreni non campionabili mediante tecniche tradizionali. La tecnica prende spunto dal procedimento utilizzato da un gruppo di ricerca guidato dal Prof. Torsten Wichtmann per prelevare campioni congelati da cumuli di residui di cava da utilizzare come sistemi di ritenuta per un imponente vaso artificiale in Germania Ovest (Wichtmann et al. 2019). La sperimentazione, che è stata perfezionata con diverse prove sul campo, si è resa necessaria nell'ambito di un progetto più ampio che prevede di studiare il comportamento a liquefazione, statica e sismica, di alcuni materiali che costituiscono un bacino di sedimentazione di sterili minerari. La prima fase di questa tecnica consiste nella realizzazione di uno scavo nell'area di estrazione in modo da raggiungere la profondità di interesse. Lo scavo può essere realizzato sia con mezzi manuali che meccanici (ruspe, escavatori ecc.). Nel caso in esame è stata preferita la prima opzione poiché essendo il materiale relativamente omogeneo non è necessario raggiungere profondità importanti; inoltre lo scavo con mezzi manuali induce un minore disturbo nel terreno. Una volta raggiunta la profondità desiderata vengono inserite a pressione una o più fustelle sul fondo scavo. Queste sono realizzate mediante cilindri cavi di acciaio inossidabile, di due tipi: divisi a metà sulla dimensione longitudinale in modo da permettere una agevole estrazione del campione (fustella split) o fustelle intere, entrambe presentano un diametro di circa 5 cm e un'altezza di 25 cm (Figura 5).

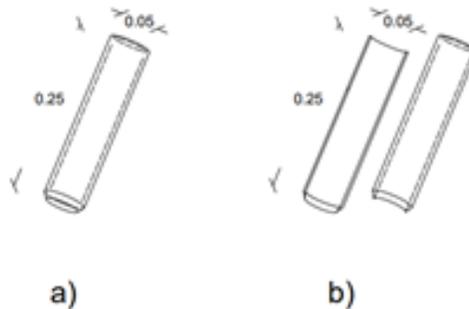


Fig 5. Tipologie di fustelle a.) Fustella intera b.) Fustella split (le misure sono indicate in metri)

Queste dimensioni permettono di ottenere un provino adatto a essere direttamente sottoposto a prove triassiali cicliche. La fase successiva consiste nel versare da un apposito recipiente l'azoto liquido sul volume di interesse ed aspettare che il processo di congelamento sia terminato. Quindi è possibile prelevare le fustelle al cui interno è contenuto il materiale congelato e stocarle in appositi contenitori isolanti al cui interno è presente del ghiaccio secco.

4. Descrizione della campagna di prelievo

La prima fase della campagna di prelievo di campioni di terreno indisturbati per mezzo di congelamento con azoto liquido nel bacino di decantazione di sterili minerari oggetto di studio è consistita nel realizzare 4 scavi (denominati S1, S2, S3 e S4 (Figura 2)): 2 sull'argine e 2 nel bacino, di circa 40 cm di diametro e 60 cm di profondità, alla cui base realizzare i prelievi. Una valutazione visiva del materiale di cui è costituito l'argine ha permesso di concludere che l'elevata presenza di materiale grossolano (di diametro medio di 5 cm) avrebbe reso impossibile l'effettuazione di prove triassiali, quindi, dagli scavi S1 e S2 sono stati prelevati solo campioni disturbati. Il materiale di cui è composto il bacino di decantazione, al contrario, presenta una granulometria ottimale sia per il prelievo con le fustelle sia per la successiva esecuzione di prove triassiali cicliche. Quindi nel fondo di ciascuno degli scavi S3 e S4 sono state posizionate una fustella split e una intera e sono stati sversati circa 17.5 l di azoto liquido. Una volta terminato il processo di congelamento (che ha richiesto circa 15 minuti), le fustelle sono state estratte e sono state

riposte all'interno di un contenitore isolato termicamente e contenente alcuni kg di ghiaccio secco (Figura 6).

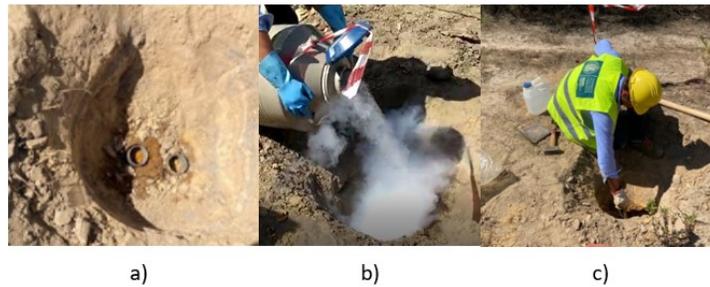


Fig 6. Fasi della procedura a.) Fustella inserite nel fondo scavo b.) Sversamento dell'azoto liquido c.) Estrazione fustelle

Per il trasporto al laboratorio di Geotecnica dell'Università di Firenze sono state impiegate circa 2.5 ore di tempo dopo le quali le fustelle contenenti il materiale, che ad una prima valutazione visiva è risultato ancora perfettamente congelato, sono state trasferite in un apposito freezer dove saranno conservate fino al momento in cui verranno eseguite le prove di laboratorio.

5. Conclusioni

In questa nota viene descritta una tecnica speditiva e relativamente semplice per il prelievo di campioni di terreno indisturbati per mezzo di congelamento con azoto liquido. La metodologia proposta ha consentito di prelevare 2 campioni di terreno indisturbato di elevata qualità con un impegno limitato di lavoro sul campo e un quantitativo di 35 l di azoto liquido. Alcune fasi di lavoro devono essere ancora perfezionate, ma nel complesso la metodologia ha permesso di ottenere i risultati voluti. È auspicabile poter indagare ulteriormente l'area del bacino con nuovi scavi più profondi. I prossimi step per la caratterizzazione dei materiali prelevati prevedono di estrarre i provini ancora congelati dalle fustelle, ridurne opportunamente la lunghezza (v. § 3) e montarli rapidamente in cella triassiale, attendere lo scongelamento ad una pressione di cella pari a quella in sito e infine sottoporli a prove triassiali cicliche.

Bibliografia

- Ghionna, V., Porcino, D. (2001). Undisturbed sampling by ground freezing at Gioia Tauro site for seismic liquefaction analyses.
- Hvorslev, J. M. (1949). Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purposes. Vicksburg: Waterways Experiment Station.
- Yoshimi, Y., Hatanaka, M., Oh-Oka, H. (1978). Undisturbed Sampling of Saturated Sands by Freezing. Soils and Foundation, 59-73.
- Kokusho T., Tanaka Y., (1994). Dynamic properties of gravel layers investigated by in-situ freezing sampling. ASCE GSP n. 44, Ground failures under seismic conditions, pp, 121-140.
- Lo Presti, D., Pallara, O., Froio, F., Rinolfi, A., Jamiolkowski, M. (2007). Stress-strain-strength behaviour of undisturbed and reconstituted gravelly soil samples. Soil stress-strain behavior: measurement, modeling and analysis. Solid Mechanics and Its Applications. 146.
- Wichtmann, T., Steller, K., Triantafyllidis, T., Back, M., Dahmen, D., (2019) An experimental parametric study on the liquefaction resistance of sands in spreader dumps of lignite opencast mines, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 122, 2019, Pages 290-309,