

La modellazione dei processi di rigonfiamento-contrazione dei terreni argillosi attivi

M. POPESCU *

SOMMARIO: Il comportamento di un'argilla attiva nei riguardi del rigonfiamento e del ritiro è stato studiato con un modello in piccola scala in stato di deformazione piana e con diverse condizioni al contorno. I risultati ottenuti mettono in evidenza alcuni aspetti particolari di immediato interesse per la previsione del comportamento in sito delle argille espansive.

1. Introduzione

Gli studi e le ricerche intrapresi in questi ultimi tempi mettono in evidenza, in modo sempre più accentuato, che lo studio delle argille ad alto potenziale di rigonfiamento e contrazione si fonda sempre più completamente e strettamente sulle leggi della Meccanica dei Terreni. Spesso si avverte tuttavia una separazione, e qualche volta addirittura una contraddizione, tra i risultati degli studi e delle ricerche in laboratorio e quelli delle osservazioni in sito, il che introduce un serio ostacolo sulla via dell'approfondimento del problema in modo unitario [POPESCU, 1978]. Questo stato di cose può spiegarsi se si tiene conto della complessità e della interdipendenza dei fattori che influenzano i processi di rigonfiamento e di contrazione dei terreni. La natura e le caratteristiche del terreno, la profondità e la posizione degli strati espansivi nel profilo geologico generale, i caratteri climatici, il livello ed il regime delle acque sotterranee, le sorgenti locali di umidificazione e di essiccamento, sono alcuni di questi fattori [POPESCU, 1979].

In questa situazione la modellazione in laboratorio, per la possibilità di controllo e di riproduzione delle condizioni nelle quali si realizza la ricerca, costituisce un mezzo efficace per lo studio del meccanismo generale del processo e per la stima del comportamento di ammassi di più grandi dimensioni. Rispetto alle indagini in sito a scala naturale, le prove di laboratorio su modelli a piccola scala offrono una serie di vantaggi:

- 1) necessitano di dispositivi meno costosi e facili da manipolare e le varie operazioni e misure sono molto meno complicate;
- 2) permettono la realizzazione di un gran numero di esperienze in poco tempo;
- 3) il programma sperimentale è indipendente dalle condizioni naturali;
- 4) si può agire direttamente su ciascun singolo parametro sperimentale, considerando ed eventualmente eliminando nel seguito differenti parametri per l'analisi dell'influenza che essi hanno sul fenomeno [STANCULESCU, POPESCU, 1975].

Il modello di stato piano di deformazione considerato in questo lavoro è stato utilizzato per lo studio dei seguenti problemi:

- 1) il meccanismo di rigonfiamento di un ammasso omogeneo non caricato, a seguito della sommersione della superficie;
- 2) l'influenza sul meccanismo di rigonfiamento e di contrazione dell'applicazione di una fondazione rigida, con diversi valori della pressione di contatto nella zona centrale;
- 3) l'influenza di uno strato di materiale inerte tra fondazione ed ammasso di terreno espansivo.

Il modello tiene conto delle condizioni di similitudine relative alla pressione di contatto e di rigonfiamento ed allo spessore dello strato di materiale inerte; esso può essere considerato, da questo punto di vista, come un modello in scala reale.

2. Descrizione del modello

Allo scopo di ottenere un deposito di terreno con struttura ad aggregati aperta, simile a quel-

* Dr. Mihai POPESCU, Lettore presso la Cattedra di *Geotecnica e Fondazioni* dell'Istituto di Costruzioni-Bucarest-Romania.

La traduzione del testo dall'originale francese è stata eseguita da L. Picarelli.

la osservata negli orizzonti alluvionali della superficie terrestre, una certa quantità di materiale argilloso attivo, prelevato da un banco omogeneo, è stata trasformata per essiccamento all'aria a temperatura ambiente in elementi di forma poliedrica, di dimensioni dell'ordine dei centimetri, attraversata da una rete di microfessure.

Questi elementi sono stati macinati con cura, per disturbare il meno possibile l'assetto delle singole particelle. Il materiale così ottenuto è stato separato per setacciatura in tre frazioni di dimensioni: $< 0,5$ mm, $0,5 \div 1,0$ mm, $1,0 \div 2,0$ mm. Ciascuna frazione è costituita da aggregati a struttura naturale di forma poliedrica pressoché sferica, caratterizzati da una superficie esterna rugosa per la separazione degli elementi secondo le superfici di microfessurazione. Si è utilizzato il 20% in peso della frazione $< 0,5$ mm, il 30% della frazione $0,5 \div 1,0$

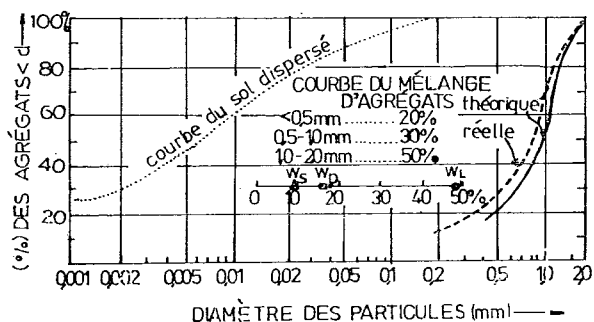


Fig. 1

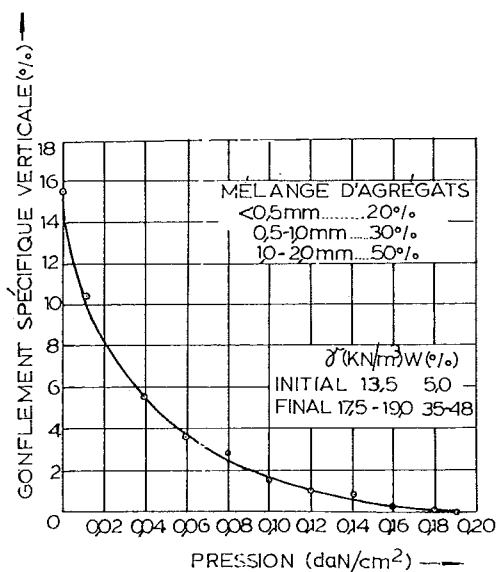


Fig. 2

mm e il 50% della frazione $1,0 \div 2,0$ mm; il miscuglio così ottenuto è stato inserito nel modello in strati successivi di spessore 4 cm, che sono stati costipati ad un peso dell'unità di volume di $13,5 \pm 0,5$ KN/m³ e ad un contenuto d'acqua del $5,0 \pm 0,5\%$ in modo da ottenere un ammasso a struttura più uniforme possibile.

Nella figura 1 sono riportate: la curva granulometrica del terreno originario ottenuta per sedimentazione, la curva granulometrica teorica del miscuglio di aggregati e la curva reale ottenuta per setacciatura, dopo il costipamento del materiale. Nella figura 2 è riportata poi la curva del potenziale di rigonfiamento a deformazione laterale impedita per il materiale così ottenuto completamente sommerso.

Le prove su modello sono state effettuate in una vasca rettangolare con pareti laterali in vetro spesso, in modo da assicurare la condizione di stato piano di deformazione. Lo spazio riservato alla massa di terra ha dimensioni $40 \times 20 \times 10$ cm (fig. 3). Allo scopo di misurare gli spostamenti e le rotazioni di vari punti, nel modello sono stati inseriti da 20 a 30 riferimenti a forma di croce, di lunghezza 9 cm. Per la registrazione della pressione laterale di rigonfiamento nella vasca, sono state introdotte due celle di pressione collegate al relativo dispositivo di registrazione [STANCULESCU, POPESCU, 1975]. Le celle laterali C_1 e C_2 sono due scatole metalliche chiuse, la cui faccia di contatto col terreno è costituita da una membrana flessibile. Esse sono collegate tramite i rubinetti R_1 e R_2 al dispositivo di registrazione della pressione di rigonfiamento, che comprende: un manometro differenziale M_1 , un manometro per la misura della pressione M_2 ed una pompa con pistone P , provvista dei rubinetti R_3 per il collegamento tra questi due manometri, ed R_4 per il riempimento della pompa di liquido. Gli altri rubinetti sono chiusi. In condizioni assolutamente omogenee di materiale e di messa in opera, sono stati realizzati quattro modelli (fig. 3):

Modello I: il terreno, non caricato, viene sommerso nella sua parte superiore; lo strato di acqua viene mantenuto ad un'altezza costante (2 cm) fino a che il fronte di umidificazione non ha percorso completamente tutta la massa. Dunque, la zona attiva del modello, definita come quella zona nella quale si verificano variazioni di umidità, è uguale allo spessore totale del modello (20 cm). Dopo lo smorzamento completo del processo di rigonfiamento, la mas-

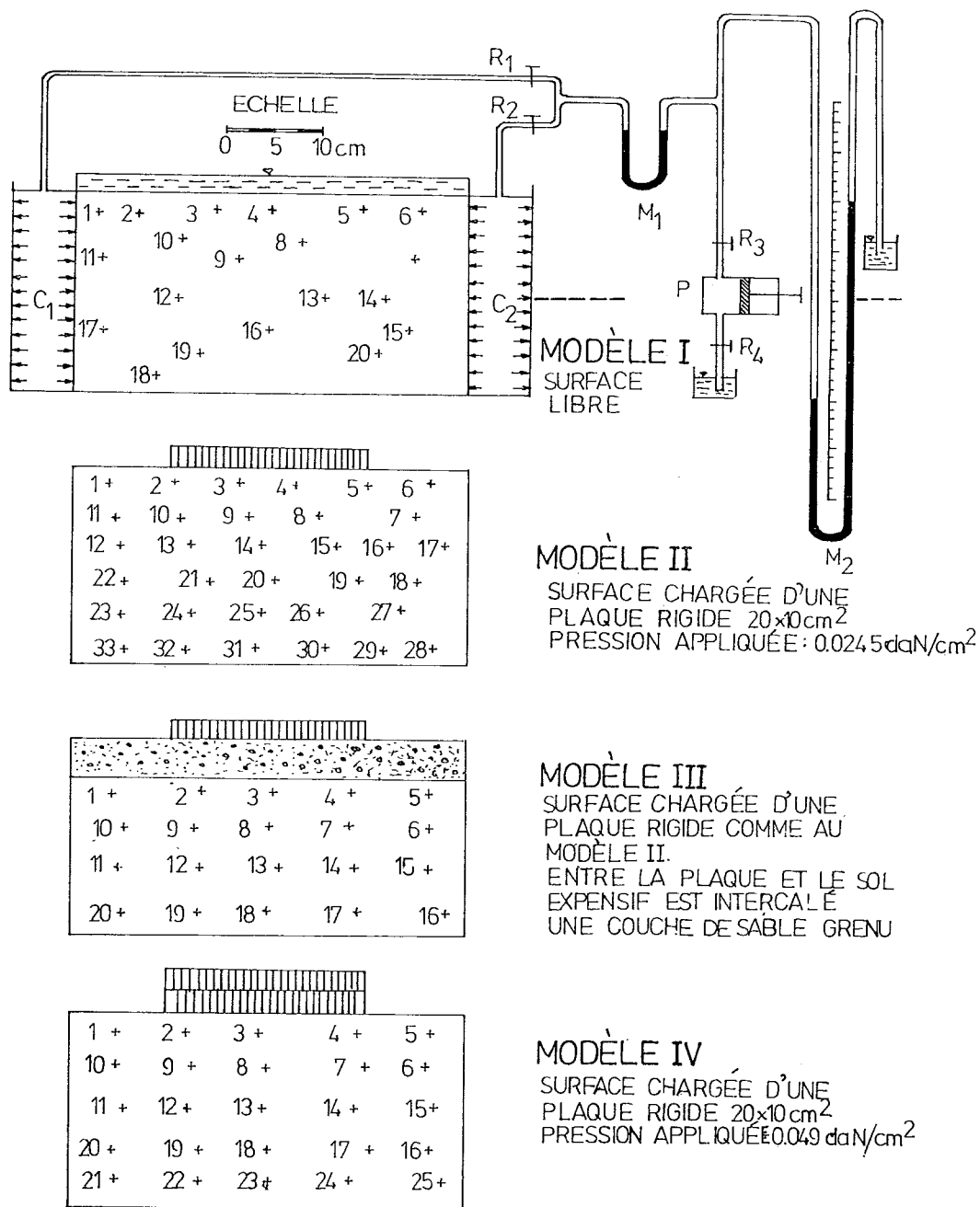


Fig. 3

sa di terra è sottoposta a 4 cicli di contrazione-rigonfiamento. Gli stadi di contrazione sono stati ottenuti, in prima fase, mediante essicca-mento forzato per mezzo di un riscaldatore ad aria calda, successivamente tramite essiccamen-to libero a temperatura ambiente, fino allo smorzamento completo del processo di contra-zione.

Modello II: il terreno è caricato nella zona centrale mediante una piastra metallica rigida,

di area $20 \times 10 \text{ cm}^2$, che trasmette una pres-sione di rigonfiamento è di $0,19 \text{ daN/cm}^2$, il modello II simula una costruzione leggera, rea-lizzata su di un terreno fortemente espansivo, che trasmette una pressione di contatto uguale ad $1/8$ della pressione di rigonfiamento dei ter-reni di fondazione. Il modello II, così come i modelli III e IV, è stato sottoposto ad un pri-mo stadio di rigonfiamento dopo sommersione ed a 4 cicli di contrazione e rigonfiamento, co-me il modello I.

Modello III: il materiale con proprietà espansive è sostituito per un'altezza pari al 20% (4 cm) dello spessore della zona attiva da uno strato di materiale inerte, costituito da sabbia asciutta, addensato fino a 15 KN/m³. La superficie esterna è caricata mediante una piastra metallica rigida che trasmette al terreno la stessa pressione di contatto adottata nel modello II.

Modello IV: il terreno è caricato nella zona centrale mediante una piastra metallica rigida (modello II) che trasmette una pressione di 0,049 daN/cm². Dunque, il rapporto tra la pressione di contatto e la pressione di rigonfiamento è pari ad 1/4; il modello IV simula pertanto una costruzione di peso medio realizzata su di un terreno molto espansivo.

Per tutti e quattro i modelli sono state eseguite nella loro evoluzione, le seguenti misure: 1) profondità del fronte di umidificazione; 2) spostamenti della superficie dell'ammasso (mediante un microcomparatore); 3) spostamenti di punti localizzati su diverse verticali ed a diverse profondità (mediante fotografie successive dei riferimenti inseriti nel modello); 4) pressione laterale di rigonfiamento (mediante celle di pressione).

3. Rigonfiamento della superficie del modello e pressione laterale di rigonfiamento

Nella figura 4 le curve che rappresentano lo spostamento verticale del centro della superficie dell'ammasso e la pressione laterale di rigonfiamento sono riportate in funzione del logaritmo del tempo; dette curve presentano un caratteristico andamento ad S, simile a quello tipico dei cedimenti nel corso di un fenomeno di consolidazione. Nella stessa figura sono stati indicati i tempi in corrispondenza dei quali il fronte di umidificazione ha percorso tutto lo spessore dell'ammasso. Un'osservazione valida per tutti e quattro i modelli è che l'esaurimento del fenomeno si verifica in un tempo pari circa a 100 volte quello nel quale il fronte di umidificazione ha percorso tutto lo spessore del modello. Si può osservare che fino al momento in cui il fronte di umidificazione non ha raggiunto il fondo del modello, il potenziale di rigonfiamento si estrinseca secondo una crescita rapida; successivamente l'incremento è molto ridotto. Quest'osservazione appare in accordo con l'ipotesi secondo la quale il fenomeno

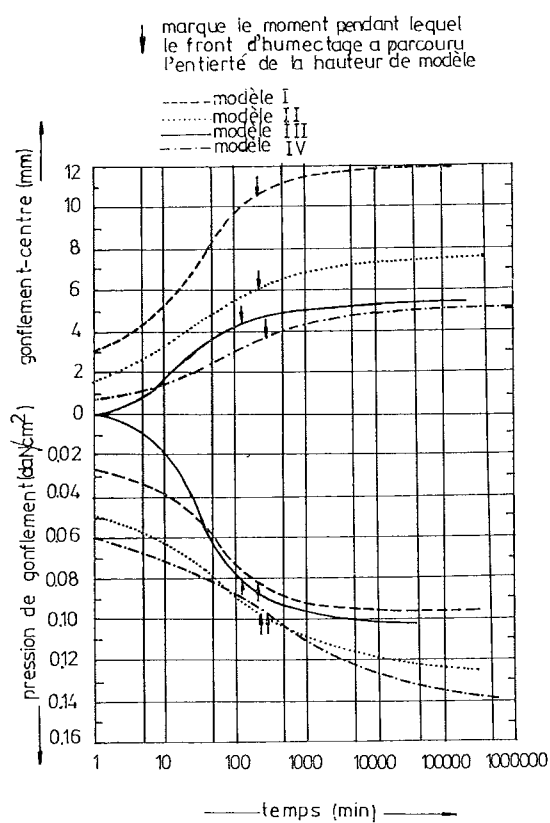


Fig. 4

in studio si sviluppa in due tappe: rigonfiamento osmotico o normale, con un carattere molto più lento, nella seconda [LAL *et al.*, 1970]. Si osserva ancora che la pressione di rigonfiamento presenta, in rapporto alle deformazioni, un incremento più lento nel tempo, il che appare giustificato se si considera che la sua evoluzione avviene in condizioni di rigonfiamento parzialmente impedito, necessitando di un tempo più grande per lo smorzamento. Per lo stesso motivo il tempo di smorzamento del fenomeno è più elevato nei modelli II e IV che nel modello I, essendo più lento il rigonfiamento degli aggregati sotto un carico applicato. Nel modello III il tempo di smorzamento è più ridotto a causa del minore spessore dello strato di materiale espansivo.

Paragonando i valori finali del rigonfiamento per i modelli II, III e IV, si osserva che la sostituzione del materiale espansivo per uno spessore di appena il 20% della zona attiva, ha come effetto una riduzione del rigonfiamento al centro equivalente a quella causata dal raddoppio del carico esterno, da 1/8 ad 1/4 del valore della pressione di rigonfiamento.

La pressione laterale misurata rappresenta solo una percentuale di quella che si potrebbe

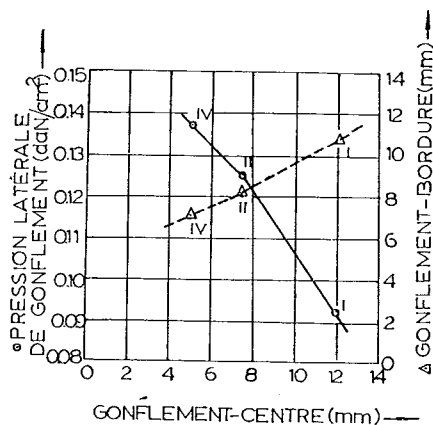


Fig. 5

rilevare nella condizione di deformazioni nulle durante tutto il processo [POPESCU, 1978]. Questo valore è il 48% della pressione assoluta di rigonfiamento per il modello I (superficie dell'ammasso libera) ed 1/4 per il modello IV. Questa osservazione attira l'attenzione sul fatto che le pressioni laterali possono raggiungere valori di circa il 50% di quelle assolute anche nelle condizioni di superficie libera dell'ammasso. Esse si aggiungono a quelle fornite dalla spinta attiva, portando ad una sollecitazione supplementare su di un eventuale elemento di sostegno [POPESCU, 1979]. La riduzione dello strato espansivo con materiale inerte per il 20% del suo spessore (modello III), conduce, come previsto, ad una riduzione del 20% della pressione laterale. L'influenza del rigonfiamento verticale nel centro dell'ammasso sulla pressione laterale e sullo spostamento verticale al bordo è illustrata nella figura 5.

4. Influenza della profondità sul rigonfiamento

Utilizzando la curva del potenziale di rigonfiamento (fig. 2) a deformazione laterale impedita ottenuta tramite prove di laboratorio e tenendo conto del valore della pressione verticale in diversi punti, si può calcolare l'andamento del rigonfiamento verticale finale con la profondità; questo viene presentato graficamente nella figura 6 per la verticale passante per il centro dei modelli I e II. Nella stessa figura è stato riportato l'andamento a diversi tempi determinato sulla base delle misure fotografiche, per le verticali passanti per il centro ed il bordo del modello.

Si può osservare la riduzione del rigonfiamen-

to con la profondità essendo comunque i valori finali calcolati sempre più grandi di quelli misurati. Sebbene questi quattro modelli rappresentino quattro differenti problemi, il rapporto tra i valori calcolati e quelli misurati si mantiene nei limiti del campo compreso tra 0,65 e 0,75. Per una stima preliminare i valori calcolati possono essere pertanto ridotti tramite un coefficiente di circa 0,7.

Le differenze segnalate tra i rigonfiamenti calcolati e quelli misurati possono essere attribuite alle seguenti cause:

1) il potenziale di rigonfiamento nei differenti punti non si manifesta soltanto in direzione verticale, come capita nelle prove a deformazione laterale impedita, ma una certa percentuale viene spesa come deformazione in direzione orizzontale;

2) nell'ammasso esistono altri sforzi, al di là di quelli legati ai carichi e ai sovraccarichi, che si oppongono al rigonfiamento.

I valori misurati degli spostamenti orizzontali sono d'altra parte risultati al massimo del 5% di quelli verticali, il che dimostra che la seconda causa è responsabile delle differenze menzionate.

In accordo con questa ipotesi viene l'osservazione che il rigonfiamento, decrescente con la quota, risulta nullo ad una profondità di 17 cm per il modello I, e 25 cm per il modello IV. I ridotti valori del carico litostatico nel modello I e del carico litostatico più il sovraccarico nel modello IV non possono spiegare il totale annullamento del rigonfiamento a tali profondità. Appare dunque evidente che ad una certa quota un aggregato di particelle, in aggiunta al peso della colonna di terreno sovrastante ed all'eventuale sovraccarico, trova un limite nella sua deformazione nella resistenza al taglio che si sviluppa per effetto del rigonfiamento degli aggregati vicini. Gli aggregati della zona superficiale della massa non caricata possono rigonfiare senza peraltro risentire di resistenze di qualche rilievo. I dati ottenuti hanno condotto all'elaborazione di un modello schematico di comportamento dei terreni argillosi attivi nel corso del processo di rigonfiamento [POPESCU, 1978].

Nella composizione di questi terreni predominano minerali argillosi dotati di una struttura cristallina estensibile di tipo montmorillonitico, nei quali il rigonfiamento è massimo nella direzione normale al piano della particella

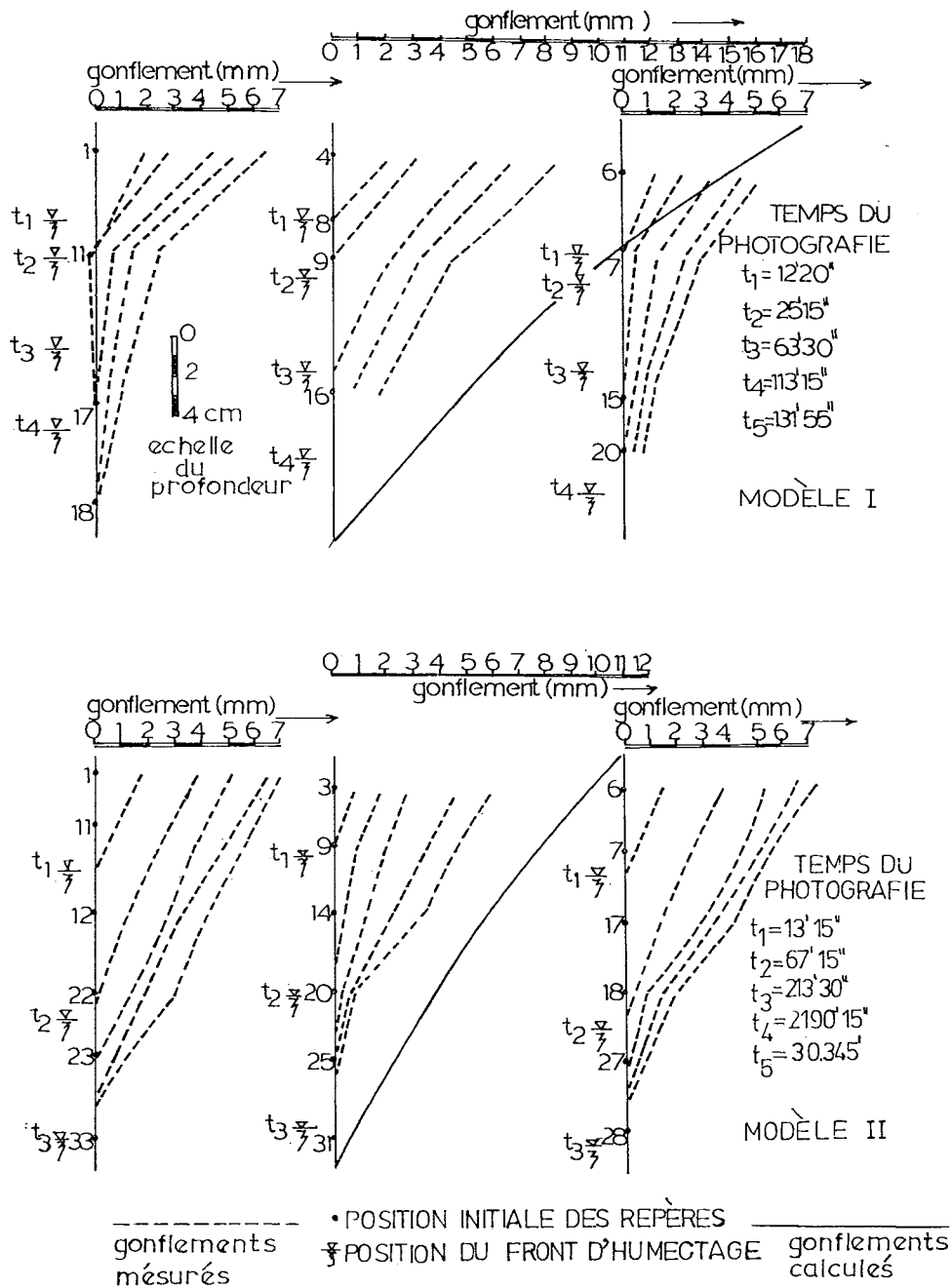


Fig. 6

(fig. 7a). In un ammasso omogeneo ed isotropo le particelle argillose attive hanno una distribuzione uniforme ed includono un numero di particelle inerti dal punto di vista delle variazioni di volume, come ad esempio limo e sabbia. In queste condizioni la pressione di rigonfiamento è uguale in tutte le direzioni ed è indicata con « p_u ». Ad una certa profondità h essa è par-

zialmente o totalmente bilanciata dal carico litostatico γh , più il sovraccarico q , e dalle forze laterali di attrito legate alla spinta orizzontale $k_0 \gamma h$ ed alla pressione laterale di rigonfiamento.

Indicando con c_m e con γ_m i parametri di resistenza al taglio, mobilitati, l'equilibrio di un elemento espansivo del modello presentato nella fig. 7b si scrive:

$$p_u dx dy = (q + \gamma h) dx dy + \alpha (k_0 \gamma h + p_u) \operatorname{tg} \gamma_m (dy dz + dx dz) + \alpha c_m (dy dz + dx dz)$$

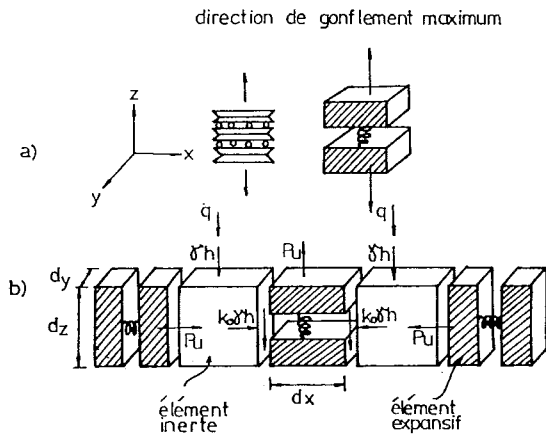


Fig. 7

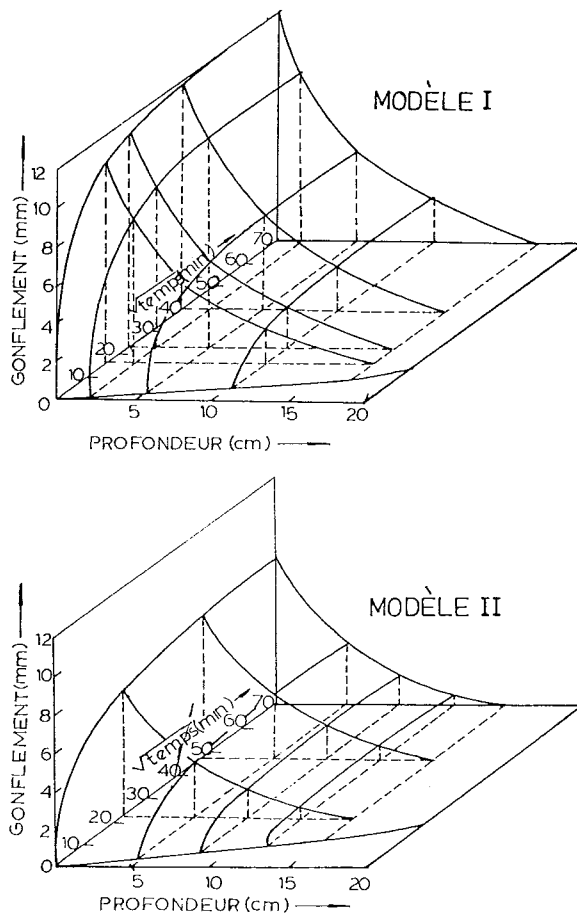


Fig. 8

Considerando in prima approssimazione $dx = dy = dz$, $k_0 = 1$ e $\gamma_m = 0$, dall'equazione precedente si ricava che per impedire il rigonfiamento ad una profondità di 15 cm, come è stato osservato nel modello IV, è necessaria una coesione $c_m = 0.028 \text{ daN/cm}^2$. Inversamente per $c_m = 0$ risulta $\gamma_m = 7^\circ 41'$.

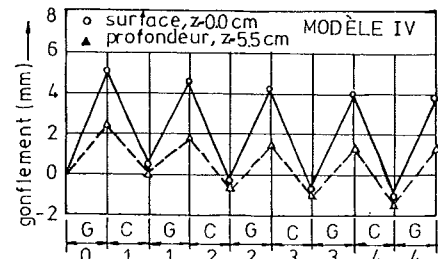
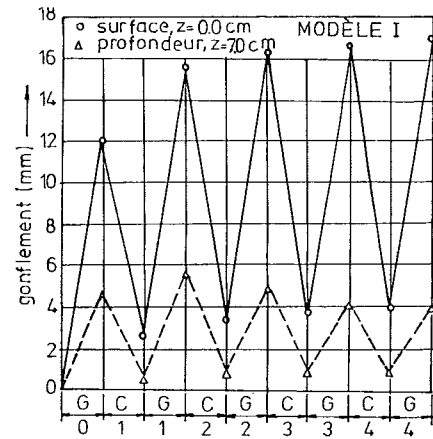


Fig. 9

I risultati delle prove effettuate possono essere introdotti in un grafico tridimensionale, del tipo di quelli riportati nella fig. 8: ciascun modello corrisponde ad una superficie curva. Un punto di questa superficie fornisce il valore del rigonfiamento ad una certa profondità dalla superficie sommersa per un dato valore del tempo. Esso comincia a manifestarsi ad una certa quota nel momento in cui il fronte di umidificazione ha raggiunto quella quota.

5. Cicli di contrazione-rigonfiamento

In un clima caratterizzato da alternanze di periodi umidi e secchi, i terreni argillosi sono sottoposti a variazioni di volume per rigonfiamento e contrazione.

Per analizzare il meccanismo di questi fenomeni in regime libero e limitato, i campioni studiati sono stati sottoposti, come è stato mostrato, ad una successione di 4 cicli di contrazione e rigonfiamento dopo la completa evoluzione del primo stadio di rigonfiamento. Nella fig. 9 sono riportati gli spostamenti, in superficie e ad una quota situata all'interno del terzo superiore dell'ammasso (modelli I e IV), al termine di ciascun ciclo.

Il rigonfiamento della superficie dell'ammasso non caricato (modello I) manifesta una chiara tendenza ad un progressivo incremento dopo ciascun ciclo. Il rigonfiamento dopo il primo ciclo è del 30% più grande di quello iniziale, mentre il contributo relativo al passaggio dal 3° ciclo al 4° è appena dell'1.8%. A seguito dell'essiccamento, la superficie dell'ammasso non ritorna nella sua posizione iniziale. Ad una profondità di 7 cm si osserva dapprima un incremento del rigonfiamento (dopo il primo ciclo), successivamente una riduzione in rapporto al valore iniziale. Nel modello IV i vari cicli hanno un effetto opposto a quello osservato nel modello I e portano ad una riduzione graduale del rigonfiamento residuo e all'apparizione, ad un certo momento, di cedimenti progressivamente crescenti. Dal momento che il contenuto d'acqua iniziale è al di sotto del limite di ritiro, la contrazione per essiccamento successiva a ciascuno stadio di sommersione non può portare la superficie del modello al di sotto del livello iniziale. Ne risulta che i cedimenti registrati nel modello IV non sono dovuti solamente al ritiro (che, come si è visto nel caso del modello I, non può riportare la superficie dell'ammasso al suo livello iniziale), ma sono il risultato di superamenti locali della resistenza al contatto tra gli aggregati, sotto l'effetto combinato dei carichi applicati e dei cicli ripetuti di imbibizione-essiccamento.

Le prove su modello hanno anche messo in evidenza il differente effetto che i cicli di imbibizione-essiccamento hanno sul rigonfiamento ed il ritiro dei terreni argillosi in funzione delle condizioni nelle quali essi si manifestano. I cicli di contrazione- rigonfiamento in regime libero di deformazione conducono, per effetto dei fenomeni di disgregazione fisica e di alterazione chimica, ad un incremento del potenziale di rigonfiamento ed alla conservazione di una certa quota di deformazione al termine di ciascuno stadio di ritiro. Inversamente i cicli di contrazione-rigonfiamento in regime restrittivo di deformazione hanno come effetto la progressiva riduzione del rigonfiamento e l'apparizione di cedimenti per superamento della resistenza al contatto tra le particelle.

6. Conclusioni

I dati forniti da questi quattro modelli in stato di deformazione piana, finalizzati allo stu-

dio dei meccanismi alla base dei processi di rigonfiamento-contrazione nei terreni argillosi attivi con struttura ad aggregati, hanno messo in evidenza aspetti importanti concernenti:

- 1) l'influenza del carico applicato alla superficie dell'ammasso sull'evoluzione nel tempo e sul valore finale del rigonfiamento e della pressione laterale;
- 2) l'influenza dell'intercalazione tra fondazione e terreno espansivo di uno strato di materiale inerte;
- 3) l'annullamento del rigonfiamento con la profondità per effetto dell'azione combinata del carico litostatico, del sovraccarico e della resistenza al taglio del terreno intorno ai singoli aggregati di particelle;
- 4) il differente effetto dei cicli di imbibizione-essiccamento sul rigonfiamento e sul ritiro dei terreni argillosi in regime libero ed in regime di deformazione.

BIBLIOGRAFIA

- LAL et al. (1970) - *The effect of column diameter on the infiltration behaviour of a swelling soil*. Austr. Journ. Soil Res., n. 8.
- POPESCU M. (1978) - *Contribution à l'étude des effets de contraction et de gonflement des argiles sur les constructions et sur la stabilité des versants et des talus*. Thèse de doctorat, Institut de Constructions, Bucarest.
- POPESCU M. (1979) - *Engineering problems associated with expansive clays from Romania*. Engineering Geology, Amsterdam, n. 4.
- STANCULESCU I., POPESCU M. (1975) - *Etude du processus de gonflement sur un modèle de Laboratoire*. Travaux de la Troisième Conférence Nationale de Géotechnique et de Fondations, Timisoara, vol. 1.
- STANCULESCU I., POPESCU M. (1977) - *Swelling prediction in unsaturated active clays*. Proc. 5th Danube European Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Bratislava, vol. 1.

SUMMARY

An experimental investigation swelling and shrinkage of active clays

A laboratory plain-strain model study was performed in order to investigate swelling-shrinking behaviour of an active clay mass under stress-free condition, as well as under partially confined conditions. The model test results have put into evidence some particular aspects of an immediate interest for prediction of expansive clay in-situ behaviour.