

CARLO BOSI (*), GIANCARLO CAPPELLARI (*) & MARIO OTTAVIANI (**)

STUDIO DELLE DEFORMAZIONI IN UNA COLTRE ARGILLOSA DOVUTE A MOVIMENTI LUNGO FAGLIE NEL SUBSTRATO (***)

ABSTRACT: BOSI C., CAPPELLARI GC. & OTTAVIANI M., *Deformations in clay-cover transferred from basement faulting* (IT ISSN 0084-8948, 1979). The problem of how a vertical movement along a fault in the base-rock is transferred to the surface through clay layers has been studied. The study has been carried out on the basis of a known geological situation using the finite element method. A non-linearly elastic behaviour has been assumed for the clay. Slips of 10 to 100 cm have been considered at the fault.

It has been found out that the entire slip is transferred to the surface as a very gently folding and that there is no failure propagating in the clay layers above the base rock.

RIASSUNTO: BOSI C., CAPPELLARI GC. & OTTAVIANI M., *Studio delle deformazioni in una coltre argillosa dovute a movimenti lungo faglie nel substrato* (IT ISSN 0084-8948, 1979). Sono state studiate le mobilità con le quali movimenti lungo una faglia in un substrato rigido si trasmettono in soprastanti orizzonti argillosi. Lo studio è stato affrontato partendo da una situazione geologica concreta utilizzando il metodo numerico degli elementi finiti in campo non linearmente elastico. È stata considerata una copertura di 1000 m di argille plioceniche e pleistoceniche le cui caratteristiche meccaniche sono sufficientemente note. Sono stati considerati spostamenti verticali nel substrato variabili da 10 a 100 cm.

Si è riscontrato che l'entità della deformazione viene completamente trasferita in superficie sotto forma di blandi piegamenti senza alcuna propagazione della rottura nella coltre argillosa.

TERMINI-CHIAVE: Tettonica superficiale; faglie; proprietà meccaniche.

1. PREMESSA

Lo studio delle modalità con le quali le dislocazioni tettoniche che si producono in profondità si propagano fino in superficie presenta un notevole interesse in campo neotettonico e sismotettonico. Solo conoscendo in maniera soddisfacente queste modalità è possibile, ad esempio, trarre da uno studio geologico di « strutture tettoniche superficiali » indicazioni attendibili sull'assetto e sulle caratteristiche geodinamiche di « strutture tettoniche profonde » ⁽¹⁾, nell'ambito delle quali si colloca la quasi totalità degli ipocentri dei terremoti più importanti.

In particolare, le conoscenze indicate possono presentare una notevole importanza nel quadro di studi specifici, quali, ad esempio, quelli condotti su basi preva-

lentemente, od esclusivamente, geomorfologiche ⁽²⁾ per la identificazione di elementi tettonici recenti o « attivi ». È evidente che questi studi possono raggiungere apprezzabili risultati sono nel caso che sia possibile disporre di modelli interpretativi attendibili sulle corrispondenze fra dislocazioni tettoniche più o meno profonde ed elementi morfologici di superficie.

È da osservare che le conoscenze sulle deformazioni che possono interessare la superficie topografica in conseguenza di dislocazioni profonde possono risultare interessanti anche nel campo strettamente ingegneristico. È evidente, infatti, che la progettazione di importanti opere non può non tener conto delle possibili deformazioni della superficie topografica sulle quali queste opere sono fondate.

Il presente lavoro si propone di fornire un contributo su un aspetto particolare del problema sopra delineato, più precisamente si propone di fornire elementi atti ad approfondire le conoscenze sulle modalità con le quali movimenti lungo una faglia in un « substrato rigido » si propagano in una soprastante « coltre argillosa ».

Un'analisi teorica su un fenomeno analogo a quello ora indicato è stata eseguita da SANFORD (1959). Questa analisi, condotta in campo linearmente elastico, riguarda il comportamento meccanico di uno strato omogeneo ed isotropo, potente alcune migliaia di metri, nel caso che alla sua base venga imposta una deformazione rappresentata da un ripido gradino, simile a quello originato da una faglia.

Nello studio al quale si riferisce questa nota si è invece assunta come condizione di partenza una situazione geologica concreta e si è esaminato l'effetto delle

(*) Centro di Studio per la Geologia Tecnica del CNR, Roma.

(**) Istituto di Geologia Applicata, Università di Roma.

(***) Lavoro eseguito nel quadro dei programmi del Centro di Studio per la Geologia Tecnica del CNR.

(1) Per il significato di questi termini si veda BOSI & CARRARO (1979).

(2) Studi di questo tipo sono, praticamente, gli unici realizzabili in vaste aree, prive di sedimenti recenti attendibilmente datati.

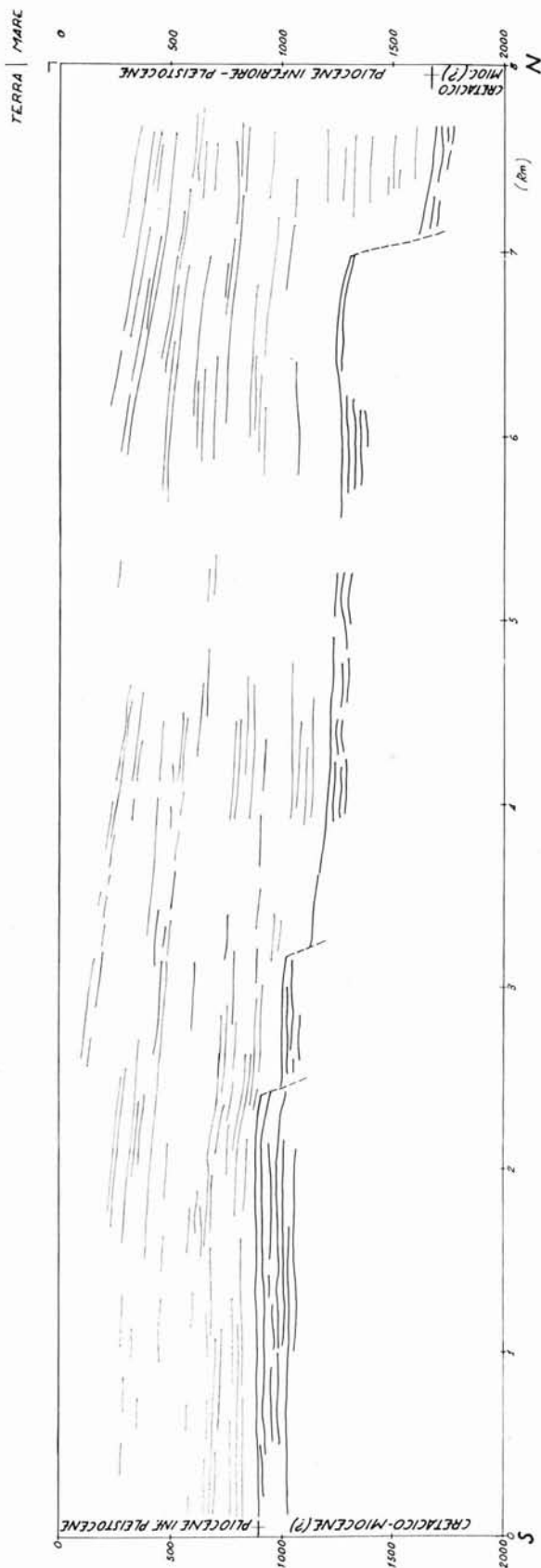


Fig. 1 - Sezione geologica schematica della zona considerata basata sui profili sismici a riflessione.

dislocazioni della copertura argillosa in campo non linearmente elastico.

2. CARATTERISTICHE GEOLOGICHE E MECCANICHE DELLE FORMAZIONI COSTITUENTI L'AREA CONSIDERATA

La situazione geologica alla quale è stata applicata la modellizzazione ed il procedimento di calcolo descritti al paragrafo seguente è quella riconosciuta mediante indagini geologiche, geofisiche e geotecniche nel sottosuolo della fascia costiera molisana.

Sulla base di sondaggi eseguiti per ricerche petrolifere ⁽³⁾ il sottosuolo di quest'area risulta costituito da un substrato essenzialmente calcareo di età cretaceo-miocenica, coperto da una potente successione di strati prevalentemente argillosi. Questi strati sono attribuibili parte al Pliocene inferiore e medio (spessore complessivo 200 ÷ 250 m) e parte al Pliocene superiore-Pleistocene (spessore complessivo fino a 1 500 m circa) ⁽⁴⁾.

L'assetto strutturale della zona è quello delineato nella sezione di fig. 1, ricavata da un profilo sismico a riflessione gentilmente fornito dall'ENEL ed interpretato sulla base dei dati stratigrafici sopra riportati.

Nella parte inferiore della sezione sono chiaramente identificabili alcune faglie che interessano il substrato e che danno origine ad una struttura a « gradinata » discendente verso Nord. Di regola queste faglie non interessano i livelli argillosi soprastanti; nelle linee generali l'assetto strutturale complessivo sembra perciò indicare che gli strati argillosi più prossimi al substrato si sono depositi contemporaneamente, o quasi, alla genesi della « gradinata ». Solo in corrispondenza della faglia più meridionale alcune deformazioni dei livelli argillosi più profondi sembrano testimoniare una certa attività della faglia posteriormente alla sedimentazione degli orizzonti che coprono il labbro ribassato della faglia stessa.

Nella parte medio-superiore della sezione, per uno spessore che raggiunge 1 500 m circa, gli orizzonti argillosi risultano moderatamente inclinati ⁽⁵⁾ verso Nord, senza risentire in alcun modo delle faglie del substrato.

Al di sotto della superficie topografica, fino alla profondità di circa 100 m, le caratteristiche geotecniche degli orizzonti del Pleistocene sono state desunte da prove di laboratorio, su campioni indisturbati, cortesemente forniti dall'ENEL. Tali prove hanno fornito valori della coesione che aumentano con la profondità fino a circa 2 kg/cm². Questi dati sono in accordo con quelli forniti, per orizzonti analoghi del versante adriatico della penisola, da ESU & MARTINETTI (1965). Per la parte più superficiale delle argille plioceniche gli stessi autori forniscono valori della resistenza a compressione che

⁽³⁾ Sondaggi « S. Martino in Pensilis » e « Termoli 3 » eseguiti dall'AGIP.

⁽⁴⁾ Riferimenti cronostatigrafici gentilmente forniti dal prof. N. CIARANFI.

⁽⁵⁾ Questa inclinazione, alquanto esagerata sulla sezione di fig. 1 in conseguenza della diversità fra le scale delle altezze e delle lunghezze, appare ragionevolmente di origine sinsedimentaria.

umentano linearmente con la profondità secondo la relazione:

$$\sigma_l = \sigma_{f0} + 0,25 z$$

dove σ_{f0} può variare da 2 a 7 kg/cm² a seconda della località.

Per quanto riguarda gli orizzonti più profondi, caratteristiche di deformabilità sono state ricavate sulla base di misure della velocità di propagazione delle onde sismiche nelle formazioni interessate. Il modulo elastico (dinamico) così ottenuto varia da circa 20 000 kg/cm² a profondità di 100 m fino a circa 100 000 kg/cm² a profondità di 1 000 m.

3. PROCEDIMENTO DI CALCOLO ED ANALISI DEI RISULTATI

Per lo studio delle modalità con le quali le dislocazioni tettoniche che si producono in profondità si propagano fino in superficie è stato ipotizzato che in corrispondenza del substrato calcareo, a 1 000 m di profondità, si producano movimenti verticali lungo una faglia pari a 10, 20, ... 100 cm (6). Il calcolo è stato effettuato con il metodo degli elementi finiti utilizzando il programma OLOCK (CLOUGH & DUNCAN, 1969) assumendo uno stato piano delle deformazioni.

La sezione piana analizzata, larga 11 km e profonda 1,2 km, è stata suddivisa in 1 000 elementi quadrangolari, con aree variabili e via via più ridotte in prossimità della zona interessata dalla faglia.

La relazione sforzi-deformazioni di tipo non lineare utilizzata è quella suggerita da DUNCAN & CHANG (1970). Tale equazione costitutiva per il terreno è di tipo iperbolico (vedi fig. 2), dove il modulo tangente E_t alla curva sforzo-deformazione è dato da:

$$E_t = E_i (1 - S)^2$$

dove E_i è il modulo tangente iniziale e S è il livello di sforzo, definito come rapporto fra la differenza degli sforzi principali, $\sigma_1 - \sigma_3$, relativi al carico applicato, ed il valore a rottura $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ovvero:

$$S = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}$$

S rappresenta perciò la percentuale di resistenza a rottura che viene mobilitata nel terreno a causa delle condizioni di carico alle quali esso è sottoposto.

Il criterio di rottura utilizzato è quello di MOHR-COULOMB che, per terreni coesivi in condizioni non drenate, quali quelle assunte nel presente studio, è semplicemente:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = 2 C_u$$

dove C_u è la coesione non drenata.

Per le caratteristiche di deformabilità è stata utiliz-

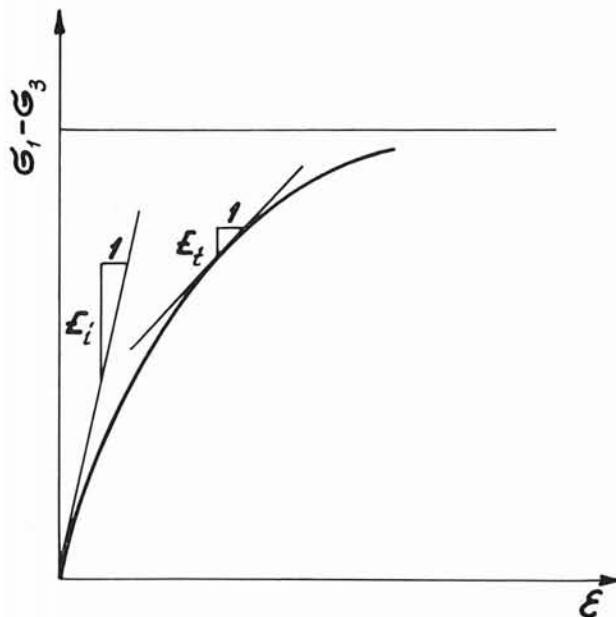


FIG. 2 - Curva sforzi-deformazioni di tipo iperbolico.

zata una relazione empirica che lega direttamente il valore del modulo elastico E_i con la resistenza al taglio non drenata C_u . Tale relazione è:

$$E_i = \beta C_u$$

Il valore del parametro β può variare in un campo abbastanza ampio a seconda della maggiore o minore rigidità del terreno considerato. In tab. 1 sono riportati alcuni valori di β indicati da diversi autori.

Sulla base dei dati geotecnici disponibili e al fine di ampliare il campo di applicazione dello studio, analizzando terreni di diverse caratteristiche, per il parametro β è stato assunto un campo di variabilità con estremi di 300 e 1 200.

TABELLA 1
VALORI DI β INDICATI DA DIVERSI AUTORI.

β	autori
50 ÷ 100	BROMS (1972)
200	O'NEILL & REESE (1972)
450	D'ELIA & GRISOLIA (1974)
1 000	OTTAVIANI & MARCHETTI (1979)
800 ÷ 1 600	DESAI (1977)

Per il modulo elastico E_i e la resistenza al taglio non drenata C_u sono stati impiegati valori crescenti con la profondità e variabili linearmente fra gli estremi riportati nella tab. 2.

TABELLA 2
VALORI DI E_i E C_u A DIVERSE PROFONDITÀ IMPIEGATI NELL'ANALISI.

β	profondità (m)	E_i (kg/cm ²)	C_u (kg/cm ²)
300	0	300	1
	1 000	7 500	25
1 200	0	1 200	1
	1 000	60 000	50

(6) Questa ipotesi ha evidentemente una validità solo fittizia: nella situazione geologica considerata, le faglie esistenti non presentano alcun indizio di « attività » in quanto sigillate da sedimenti non dislocati vecchi di almeno alcuni milioni di anni. La possibilità che le dislocazioni ipotizzate si producano, in un futuro più o meno prossimo, in corrispondenza della struttura geologica considerata, è pertanto da considerarsi praticamente nulla.

Questi valori di E_i e di C_u sono in buon accordo con i dati riportati nel precedente paragrafo per le formazioni considerate.

Per ciascuno dei casi studiati sono stati ricavati i profili degli abbassamenti dovuti a movimenti lungo la faglia del substrato, e le eventuali zone di plasticizzazione del terreno nell'intorno della faglia stessa.

a) CURVE DEI CEDIMENTI

In fig. 3 sono riportati, per $\beta = 300$ e per $\beta = 1200$ e per un valore di 1 m della dislocazione imposta al substrato, gli abbassamenti superficiali e quelli a profondità di 750 m e di 1000 m (subito sopra la faglia).

Come risulta dai grafici della figura, i cedimenti superficiali raggiungono la stessa entità dello spostamento verificatosi tra le due labbra della faglia, ma a distanze diverse dal piano della faglia stessa. Questa distanza aumenta all'aumentare di β ; infatti il valore del cedimento superficiale pari all'80 % dello spostamento lungo la faglia viene raggiunto per $\beta = 300$ a 1000 m e per $\beta = 1200$ a 1500 m dal piano della faglia.

b) CURVE DI EGUALE LIVELLO DI SFORZO

Nelle figg. 4 e 5 sono riportate le curve di uguale livello di sforzo per $\beta = 1200$ e $\beta = 300$ rispettivamente. Il valore dello spostamento lungo la faglia è di 1 m in entrambi i casi considerati.

Il livello di sforzo in ambedue i casi mostra, ovviamente, una distribuzione pressoché simmetrica rispetto alla sezione passante per la faglia stessa e varia con i valori di β considerati.

Per $\beta = 1200$ si osserva al di sopra del substrato, una zona di circa 8 m di altezza e 3 m di larghezza in cui S supera il valore del 90 % raggiungendo così condizioni molto vicine alla rottura. A distanze maggiori dal substrato il valore di S diminuisce abbastanza rapidamente

riducendosi al 50 % a circa 60 m (sulla verticale della faglia). Per i valori delle dislocazioni del substrato che sono stati analizzati, le zone di terreno in condizioni prossime alla plasticizzazione sono, pertanto, di estensione molto limitata.

Per $\beta = 300$ i valori di S risultano, a parità di distanza dal substrato, costantemente minori; i valori massimi sono infatti di poco superiori al 60 %.

In fig. 6 sono riportate le curve relative a $S = 50$ %, per $\beta = 1200$, ottenute con diversi valori dello spostamento lungo la faglia. Variando tali valori da 40 cm a 100 cm si osserva il progressivo estendersi delle zone con $S > 50$ %, soprattutto lungo la verticale passante per la faglia.

In conclusione, i risultati ottenuti con lo studio eseguito indicano che i cedimenti superficiali sono della stessa entità delle dislocazioni del substrato indipendentemente dal tipo di terreno (caratterizzato dal parametro β) e dal valore delle dislocazioni stesse. Questi due parametri influenzano invece, in modo determinante, l'estensione delle zone di plasticizzazione del terreno e l'andamento dei profili dei cedimenti superficiali. Con l'aumento del valore di β aumenta l'estensione delle zone di plasticizzazione e diminuisce la pendenza della curva dei cedimenti superficiali.

L'aumento dello spostamento lungo la faglia provoca un progressivo estendersi delle zone di plasticizzazione mentre non influenza il valore della distanza, dalla sezione della faglia stessa, a cui il cedimento superficiale è pari all'80 % della dislocazione in corrispondenza della faglia.

È importante far notare che in questa analisi non è stato considerato il comportamento reologico della copertura argillosa; le deformazioni determinate, pertanto, sono solo quelle immediate.

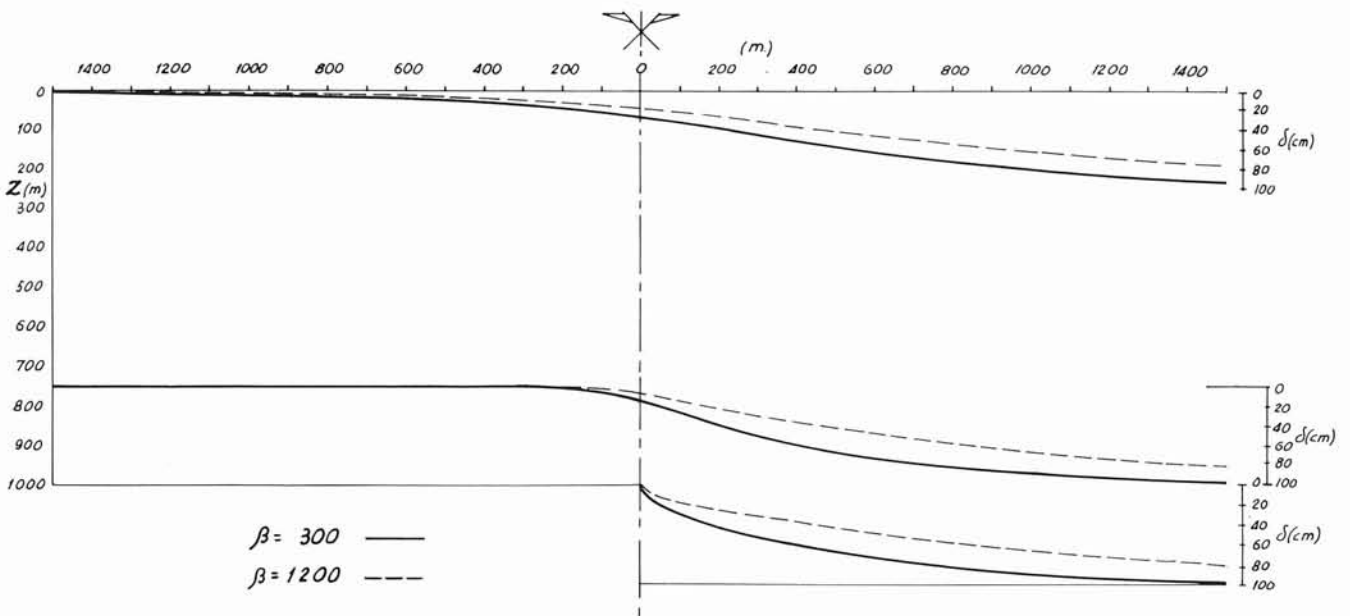


FIG. 3 - Dislocazioni in superficie, a profondità di 750 m ed a profondità di 1000 m ed al letto della formazione di copertura.

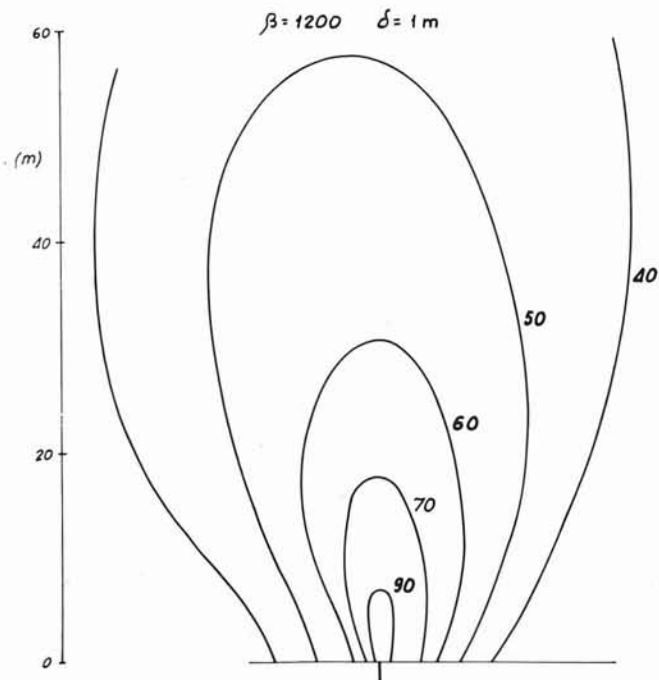


FIG. 4 - Curve di egual livello di sforzo $S\%$ immediatamente al di sopra della faglia per $\beta = 1200$.

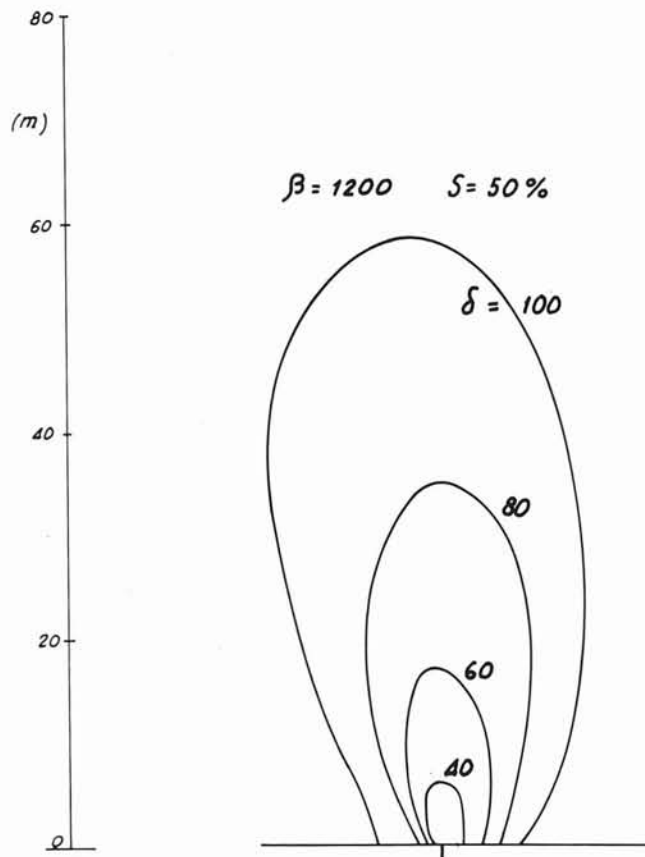


FIG. 6 - Curve di egual livello di sforzo, $S = 50\%$, per diversi valori dello spostamento lungo la faglia ($\delta = 40, 60, 80, 100$ cm) per $\beta = 1200$.

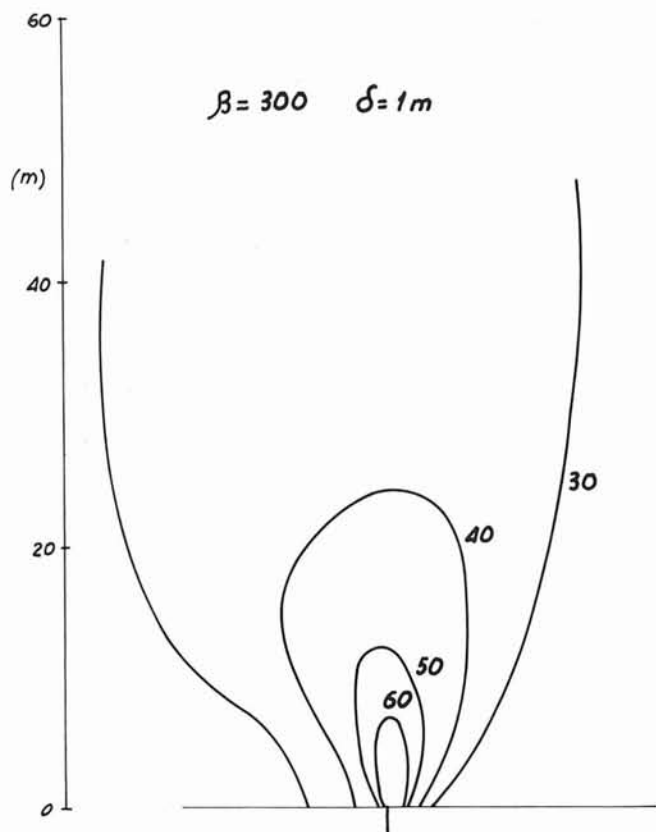


FIG. 5 - Curve di egual livello di sforzo $S\%$ immediatamente al di sopra della faglia per $\beta = 300$.

4. CONSIDERAZIONI APPLICATIVE

I risultati ottenuti con lo studio eseguito si prestano ad alcune considerazioni in relazione ai diversi campi di interesse ai quali si è accennato al paragrafo 1.

Per quanto riguarda in particolare gli scopi sismotettonici, è in primo luogo da osservare che la situazione geologica alla quale si riferiscono i risultati ottenuti può essere considerata tipica per tutte le aree dell'Italia peninsulare che sono costituite da formazioni prevalentemente argillose plio-pleistoceniche ricoprenti un substrato calcareo. I risultati ottenuti possono quindi essere ritenuti validi, pur nei limiti derivanti dalle caratteristiche del procedimento di calcolo seguito, per aree anche molto vaste quali, ad esempio, buona parte della Fossa Bradanica. L'ampiezza di queste aree diviene ancora maggiore se si tiene conto dell'ampiezza dell'intervallo di rigidità considerato ($300 \leq \beta \leq 1200$) e del fatto che le caratteristiche meccaniche del substrato sono praticamente irrilevanti agli effetti del calcolo effettuato. Per quanto riguarda quest'ultima circostanza si può osservare che i risultati ottenuti conservano la loro validità per un substrato di qualunque tipo, purché nettamente più rigido della copertura argillosa; per ogni situazione geologica, cioè, caratterizzata da una netta discontinuità,

sotto il profilo della rigidità, fra copertura argillosa e substrato.

Nell'ambito di aree con caratteristiche geologiche di questo tipo i risultati ottenuti dimostrano che eventuali deformazioni tettoniche che si verificano in un substrato più o meno profondo e che siano rappresentate da movimenti lungo faglie, si trasmettono interamente fino in superficie. Questa circostanza è già, di per sé, di un certo interesse in quanto avvalorata, con elementi quantitativi, alcuni dei presupposti sui quali si basa la utilizzazione dell'analisi morfo-neotettonica in campo neotettonico; il presupposto cioè, che una dislocazione per faglia, sia pure in un substrato più o meno profondo ricoperto da sedimenti argillosi, deve necessariamente dare origine a deformazioni della superficie topografica e che dalla identificazione e dall'analisi di queste deformazioni sia possibile valutare le caratteristiche della dislocazione profonda.

I risultati ottenuti hanno inoltre dimostrato che, nel campo di valori assunti per i diversi parametri considerati (spostamento lungo la faglia, rigidità della copertura e spessore della stessa), le deformazioni che si verificano in superficie sono rappresentate da blandi piegamenti; l'effetto morfologico globale di questi piegamenti può essere assimilato, grosso modo, ad inflessioni della superficie topografica congruenti con il movimento verificatosi in corrispondenza della faglia. L'entità di questa inflessione risulta funzione, non lineare, dei tre parametri sopra indicati.

Questa circostanza può risultare di notevole interesse per l'interpretazione geologica di elementi tratti dall'analisi morfo-neotettonica, in quanto allarga considerevolmente il campo degli elementi geomorfologici riconducibili a dislocazioni recenti per faglia. Oltre agli elementi usualmente considerati ⁽⁷⁾ (scarpate rettilinee, valli troncate, ecc.) possono infatti risultare geneticamente collegati a movimenti lungo faglie del substrato elementi morfologici di altro tipo, quali rotazioni o inflessioni di paleo-superfici che possono manifestarsi, ad esempio, nello sviluppo di terrazzi convergenti o divergenti.

È da osservare, infine, che nella modellizzazione e nel procedimento di calcolo applicato all'area esaminata non si è presa in considerazione la reale possibilità che le dislocazioni ipotizzate nel substrato si producano in un futuro più o meno prossimo; si è, anzi, eviden-

ziato (v. nota 6) che l'evoluzione geologica dell'area esaminata tende a far escludere la possibilità indicata. Questa limitazione non toglie però nulla al valore dei risultati ottenuti dal momento che l'ampiezza delle variazioni parametriche considerate ($300 \leq \beta \leq 1200$, spostamenti) rende possibile una ragionevole applicazione dei risultati ottenuti a zone nelle quali l'evoluzione geologica sia stata anche notevolmente diversa, tale cioè da non far escludere la possibilità che le dislocazioni ipotizzate nel substrato si producano realmente. Questo caso potrebbe ad esempio verificarsi per una copertura argillosa molto più recente di quella considerata (verosimilmente dotata di valori di β prossimi al valore minimo considerato) il cui assetto strutturale indichi che gli ultimi movimenti tettonici in corrispondenza di faglie del substrato si sono verificati decine o forse centinaia di migliaia di anni or sono, anziché qualche milione come nel caso della costiera molisana.

BIBLIOGRAFIA

- BOSI C. & CARRARO F. (1979) - *Considerazioni terminologiche in campo sismotettonico*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 2.
- BROMS B. B. (1972) - *Stability of flexible structures*. Gen. Rep. 5th Europ. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Madrid, 2.
- CLOUGH G. W. & DUNCAN J. M. (1969) - *Finite element analysis of Port Allen and Old River Locks*. Rep. n. 69-3, U.S. Army Engin. Waterw. Exp. Stat.
- D'ELIA B. & GRISOLIA M. (1974) - *On the behaviour of a partially floating foundation on normally consolidated silty clays*. Symp. Brit. Geot. Soc., Cambridge.
- ESU F. & MARTINETTI S. (1965) - *Considerazioni sulle caratteristiche tecniche delle argille plio-pleistoceniche della fascia costiera adriatica tra Rimini e Vasto*. Geotecnica, 4.
- DESAI C. S. (1977) - *Deep foundations*. In: « Numerical methods in geotechnical engineering ». Mc Graw-Hill Co., New York.
- DUNCAN J. M. & CHANG C. Y. (1970) - *Non linear analysis of stress and strain in soils*. Proc. ASCE, Journ. SMFD, 96.
- O'NEILL M. W. & REESE L. (1972) - *Behaviour of bored piles in Beamont Clay*. Proc. ASCE, Journ. SMFD, 98.
- OTTAVIANI M. & MARCHETTI S. (1979) - *Observed and predicted test pile behaviour*. Int. Journ. Num. Anal. Meth. Geomech., 3.
- PANIZZA M., CARTON A., CASTALDINI D., MANTOVANI F. & SPINA S. (1978) - *Esempi di morfoneotettonica nelle Dolomiti occidentali e nell'Appennino modenese*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 1.
- SANFORD A. R. (1959) - *Analytical and experimental study of simple geologic structures*. Geol. Soc. Amer. Bull., 70.

(7) Si veda in proposito PANIZZA & alii (1978).