

PROPOSTE ED INTERPRETAZIONI
DI TECNICHE SPERIMENTALI PER LA MISURA
DEI PARAMETRI DI DEFORMABILITA'
DI AMMASSI ROCCIOSI ORTOTROPI

Prof. Ing. Luigi Goffi (^)

Dr. Ing. Pier Paolo Rossi (^^)

Dr. Ing. Massimo Borsetto (^^)

(^) Istituto Tecnica delle Costruzioni
Politecnico di Torino

(^^) ISMES

1. - Nel lavoro citato in bibliografia al punto [1] è stato proposto un metodo per individuare, mediante prove in sito, i parametri dell'anisotropia ortotropa di un ammasso roccioso nell'ambito di un'ipotesi di comportamento regolato dalle leggi dell'elasticità lineare.

Il metodo che può prestarsi nel caso di continui rocciosi stratificati compatti, associa i risultati di una prova in camera a pressione con quelli di una prova di deformazione con un carico applicato mediante martinetto su di un semispazio indefinito delimitato da un piano parallelo ai piani di stratificazione.

Orbene, con riferimento alla fig. 1, siano i legami tra gli sforzi e le deformazioni definiti nella forma seguente:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_1} - \frac{\nu_2}{E_2} \sigma_y - \frac{\nu_1}{E_1} \sigma_z$$

$$\varepsilon_y = -\frac{\nu_2}{E_2} \sigma_x + \frac{\sigma_y}{E_2} - \frac{\nu_2}{E_2} \sigma_z$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu_1}{E_1} \sigma_x - \frac{\nu_2}{E_2} \sigma_y + \frac{\sigma_z}{E_1}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{2(1+\nu_1)}{E_1} \tau_{xz}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_2} \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G_2}$$

I parametri dell'anisotropia che vengono individuati secondo la proposta sperimentazione sono i due moduli elastici normali E_1 (nel piano della stratificazione) E_2 (normalmente alla stratificazione) ed il modulo elastico tangenziale G_2 : ai nostri fini consideriamo trascurabile l'influenza sulla deformabilità della roccia dei coefficienti di Poisson ν_1 e ν_2 che pure figurano nelle predette espressioni e che portano a 5 il numero di costanti che caratterizzano una certa anisotropia ortotropa.

L'attuale studio si propone di approfondire l'argomento mediante una più accurata analisi della prova su semispazio indefinito, anche in relazione alle modalità sperimentali adottate dall'ISMES per l'esecuzione della prova di carico su piastra $\begin{bmatrix} 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4 \end{bmatrix}$.

Mediante speciali deformometri montati entro fori da sonda al centro delle aree di carico, è possibile misurare le deformazioni anche all'interno dell'ammasso roccioso a differenti profondità della superficie caricata.

I deformometri sono costituiti da ancoraggi ad espansione meccanica fissati a diverse profondità all'interno del foro e collegati tramite astine rigide a trasduttori di spostamento montati su un supporto solidale con la bocca del foro (fig. 2).

Relativamente al sistema di carico si osserva che l'impiego di martinetti piatti, applicati direttamente sulla superficie rocciosa, permette di realizzare con ottima approssimazione lo schema teorico di carico uniformemente distribuito con considerevole vantaggio dal punto di vista dell'interpretazione dei risultati sperimentali.

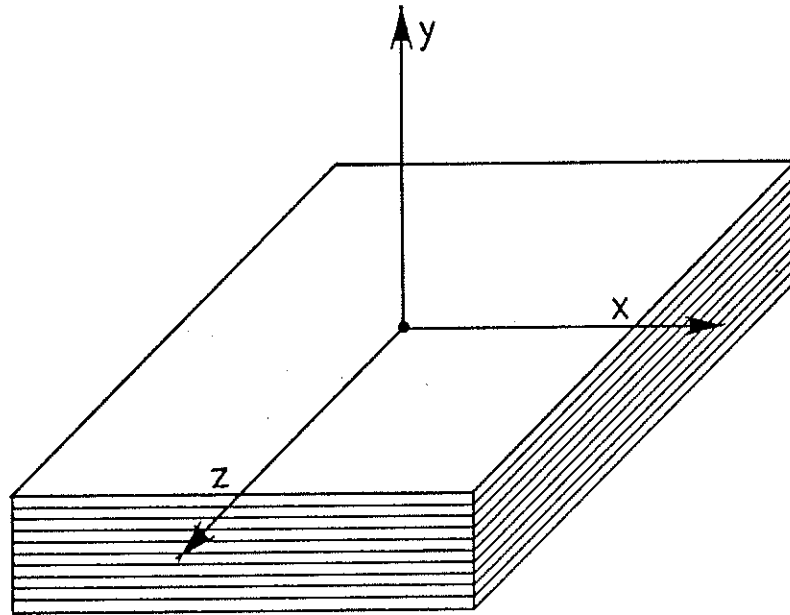


fig.1

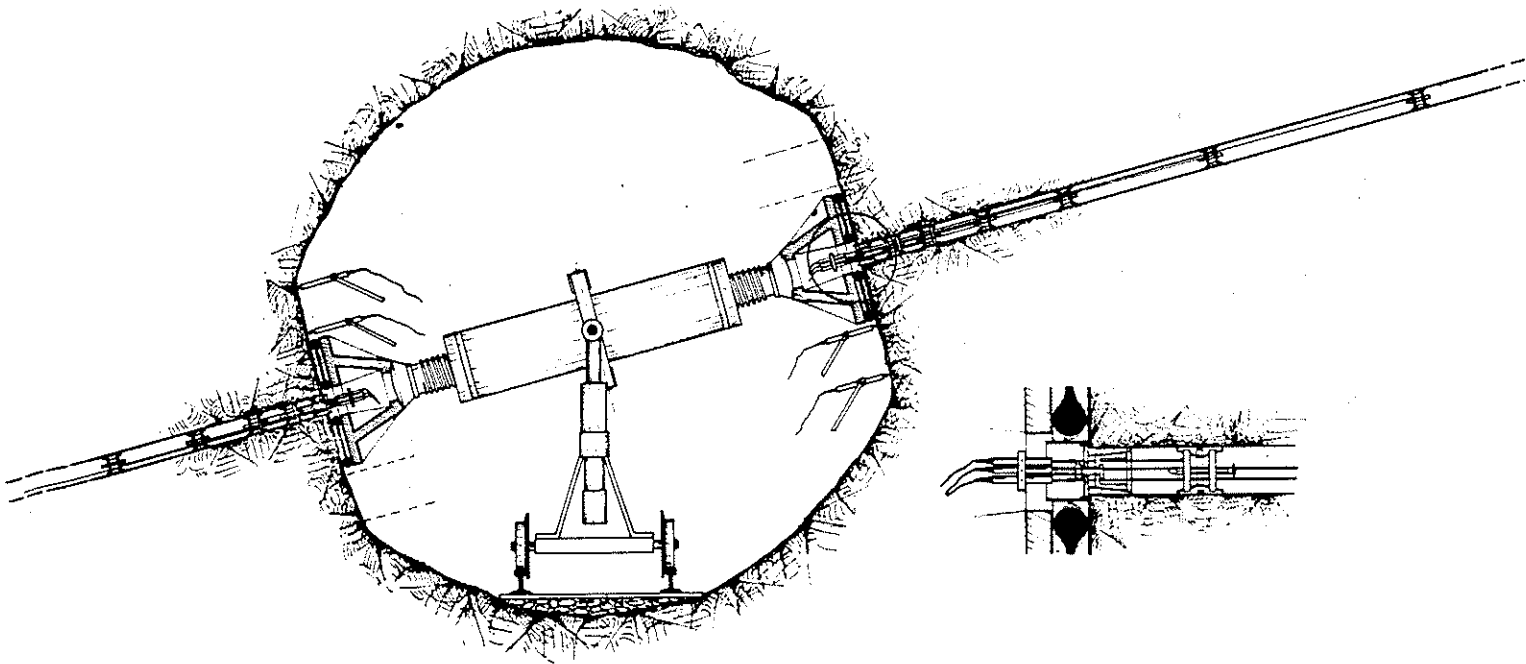


fig.2

2. - In semispazio indefinito, per effetto di un carico P concentrato applicato perpendicolarmente al piano che lo delimita, la componente di tensione verticale in un punto a profondità y e a distanza r dall'asse del carico è individuata (secondo il Lekhnitski [5]) dall'espressione (vedi fig. 3):

$$\sigma_y = \frac{P}{2\pi Vd} \cdot \frac{y}{s_1 - s_2} \cdot \left\{ \frac{1}{(\epsilon^2 + s_1^2 y^2)^{3/2}} - \frac{1}{(\epsilon^2 + s_2^2 y^2)^{3/2}} \right\}$$

ove : $s_1 = \sqrt{\frac{a+c+\sqrt{(a+c)^2-4d}}{2d}}$

$$s_2 = \sqrt{\frac{a+c-\sqrt{(a+c)^2-4d}}{2d}}$$

ove, assunto, come vedremo, per semplificare i calcoli $\nu_2 = 0$, le costanti a , c , d assumono i valori: $a = 0$, $c = 1/m$, $d = (1-\nu_1^2)/n$, essendosi posto $n = E_1/E_2$ $m = G_2/E_2$; donde

$$s_1 = \sqrt{\frac{\frac{n}{m} + \sqrt{\left(\frac{n}{m}\right)^2 - 4n(1-\nu_1^2)}}{2(1-\nu_1^2)}}$$

$$s_2 = \sqrt{\frac{\frac{n}{m} - \sqrt{\left(\frac{n}{m}\right)^2 - 4n(1-\nu_1^2)}}{2(1-\nu_1^2)}}$$

Nel nostro caso consideriamo un carico superficiale uniforme p ripartito su di una superficie circolare e proponiamo di calcolare l'abbassamento di un punto sull'asse del carico a profondità y ; pertanto con riferimento alla fig. 4 calcoleremo lo stato di tensione σ_y indotto da un carico

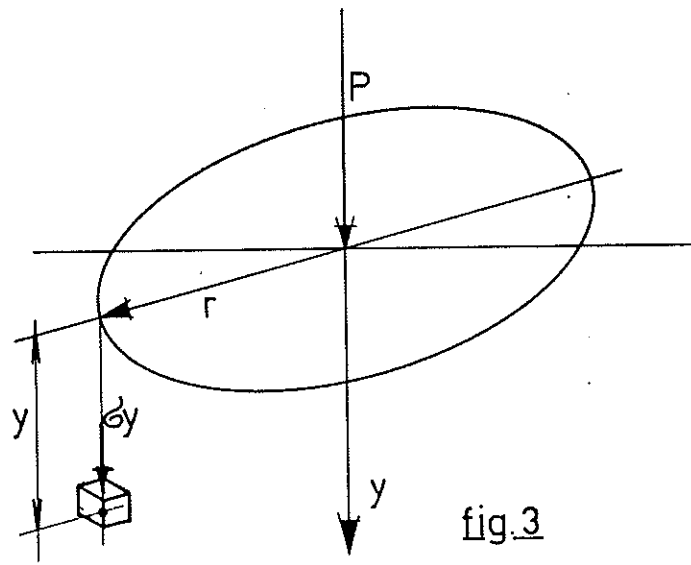


fig.3

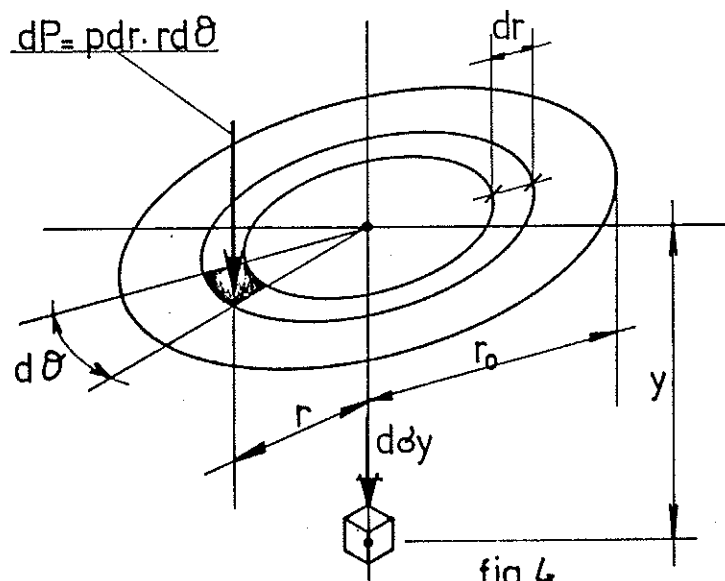


fig.4

$dP = p \cdot dr \cdot r \cdot d\theta$, che risulterà espresso da

$$d\delta_y = \frac{p \, dr \cdot r \, d\theta}{2\pi \sqrt{d}} \cdot \frac{y}{s_1 - s_2} \cdot \left\{ \frac{1}{(\tau^2 + s_1^2 y^2)^{3/2}} - \frac{1}{(\tau^2 + s_2^2 y^2)^{3/2}} \right\}.$$

Donde (trascurando l'effetto Poisson in conseguenza della assunzione $\nu_2 = 0$):

$$d\varepsilon_y = \frac{d\delta_y}{E_2} = \frac{p \, dr \, d\theta}{2\pi \sqrt{d} E_2} \cdot \frac{y}{s_1 - s_2} \cdot \left\{ \frac{1}{(\tau^2 + s_1^2 y^2)^{3/2}} - \frac{1}{(\tau^2 + s_2^2 y^2)^{3/2}} \right\}.$$

Il contributo dell'anello di raggio r e di spessore dr risulterà:

$$d\varepsilon = \frac{p \, dr \, \tau}{\sqrt{d} E_2} \cdot \frac{y}{s_1 - s_2} \cdot \left\{ \frac{1}{(\tau^2 + s_1^2 y^2)^{3/2}} - \frac{1}{(\tau^2 + s_2^2 y^2)^{3/2}} \right\}.$$

Calcoliamo ora il contributo del carico sull'anello di raggio r e di spessore dr sul cedimento verticale alla profondità y_0 :

$$d r_y = \int_0^{y_0} d\varepsilon_y \cdot dy = \frac{p \, dr \, \tau}{\sqrt{d} \cdot E_2 (s_1 - s_2)} \cdot \left\{ \frac{1}{s_1^2 \sqrt{\tau^2 + s_1^2 y_0^2}} - \frac{1}{s_2^2 \sqrt{\tau^2 + s_2^2 y_0^2}} \right\}$$

e per tutta l'area di carico di raggio r_0

$$r_y = \int_0^{r_0} d r_y = \frac{p}{\sqrt{d} E_2 (s_1 - s_2)} \cdot \left\{ \frac{1}{s_1^2} \left[\sqrt{\tau^2 + s_1^2 y_0^2} - s_1 y_0 \right] - \frac{1}{s_2^2} \left[\sqrt{\tau^2 + s_2^2 y_0^2} - s_2 y_0 \right] \right\}$$

In relazione al risultato precedente è possibile calcolare il rapporto dei cedimenti verticali che si possono registrare a due diversi livelli y_1 e y_2 :

$$\frac{v_{y_1}}{v_{y_2}} = \frac{s_2^2 \left[\sqrt{1 + s_1^2 \left(\frac{y_1}{r_0} \right)^2} - s_1 \cdot \frac{y_1}{r_0} \right] - s_1^2 \left[\sqrt{1 + s_2^2 \left(\frac{y_1}{r_0} \right)^2} - s_2 \cdot \frac{y_1}{r_0} \right]}{s_2^2 \left[\sqrt{1 + s_1^2 \left(\frac{y_2}{r_0} \right)^2} - s_1 \cdot \frac{y_2}{r_0} \right] - s_1^2 \left[\sqrt{1 + s_2^2 \left(\frac{y_2}{r_0} \right)^2} - s_2 \cdot \frac{y_2}{r_0} \right]}$$

Per valori assegnati di y_1/r_0 e y_2/r_0 , il rapporto v_{y_1}/v_{y_2} è funzione di s_1 e s_2 e quindi di $n = E_1/E_2$ e di $m = G_2/E_2$.

Tuttavia una verifica dell'influenza di tali parametri, per assegnati valori di n ed m e per differenti valori di y_1 e y_2 , mostra in pratica che v_{y_1}/v_{y_2} è funzione sensibile di m e funzione pressochè insensibile di n .

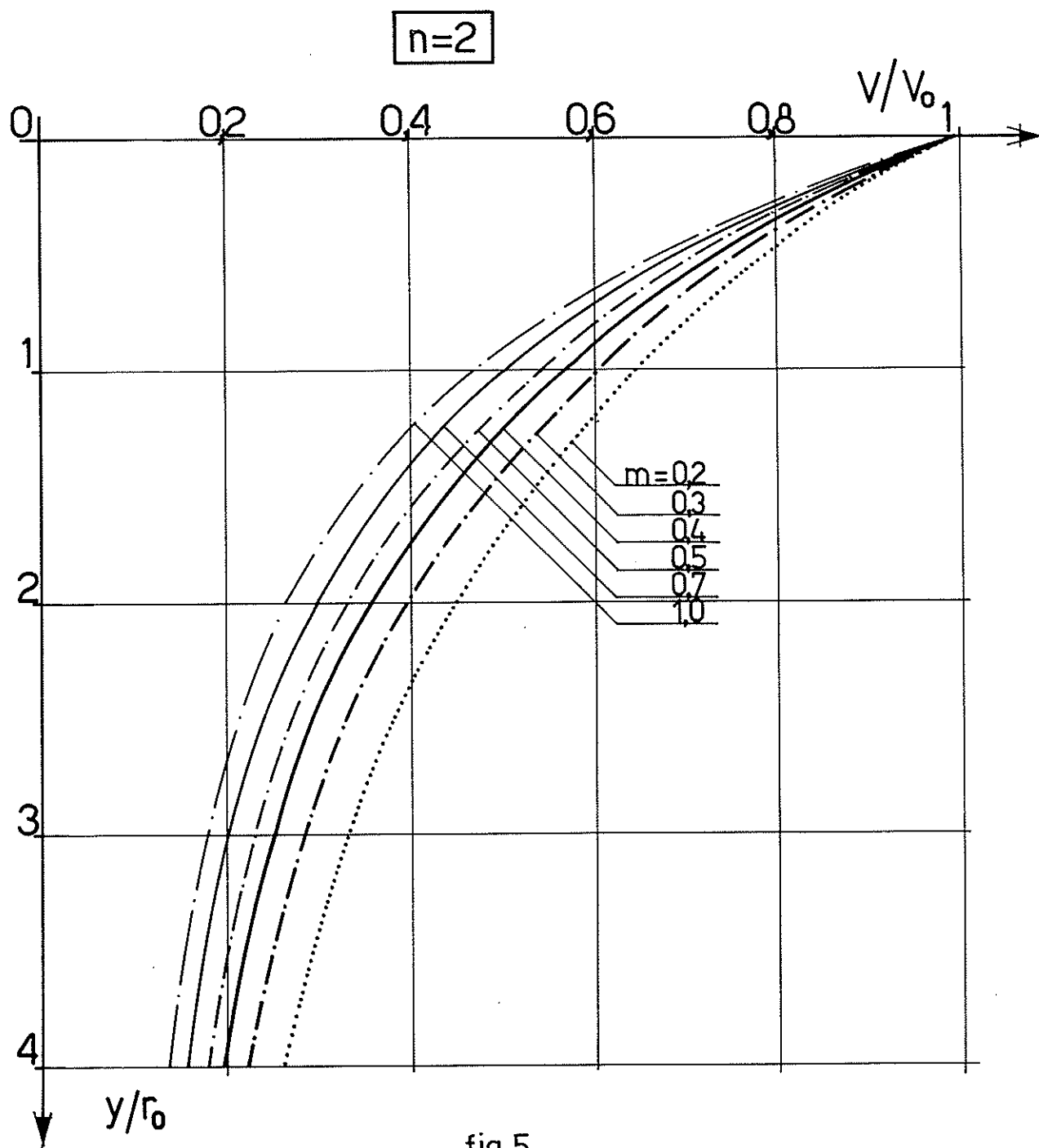
Tale proprietà emerge dalla tabella I, ove per $n = 1 \div 4$ e per $m = 0,2 \div 1$, sono stati calcolati i rapporti v_0/v_1 , v_0/v_2 , v_0/v_3 , v_0/v_4 , essendo v_0 il cedimento per $y = 0$, v_1 il cedimento per $y = r_0$, v_2 il cedimento per $y = 2r_0$, etc.

Nella fig. 5 è diagrammata la legge di variazione del rapporto v_y/v_0 in funzione di y/r_0 , assumendo m come parametro.

Il tracciato di fig. 5 è stato stabilito per $n = 2$, ma in pra

TABELLA I

n	m	v_0/v_1	v_0/v_2	v_0/v_3	v_0/v_4	$\frac{(s_1 + s_2)\sqrt{n}}{(s_1 \cdot s_2)^2}$
1	0.2	1.5106	2.1938	2.9632	3.6777	2.6464
	0.3	1.6232	2.4891	3.4537	4.4615	2.3098
	0.5	1.7828	2.9253	4.1786	5.4556	2.0000
	0.7	1.89486	3.24354	4.70419	6.19785	1.8516
	1.0	2.01124	3.58643	5.27361	6.98483	1.730
2	0.2	1.5245	2.2178	2.9864	3.8044	2.5332
	0.3	1.6498	2.5275	3.5023	4.5207	2.1792
	0.4	1.7522	2.7893	3.9288	5.1099	1.9798
	0.5	1.8389	3.0136	4.2929	5.6115	1.8481
	0.7	1.9793	3.3825	4.8902	6.4320	1.6863
	0.8	2.03739	3.53754	5.14172	6.77851	1.6322
	1.0	2.13598	3.80242	5.56956	7.36456	1.5537
3	0.2	1.5298	2.2198	2.9949	3.8147	2.4816
	0.3	1.6604	2.5424	3.5207	4.5436	2.1492
	0.5	1.8630	3.0494	4.4397	5.6699	1.7765
	0.7	2.0183	3.4430	4.9713	6.5343	1.6073
	0.8	2.08387	3.61104	5.24425	6.94204	1.5507
	1.0	2.19718	3.9023	5.70649	7.53926	1.4678
4	0.2	1.5326	2.2255	2.9993	3.8201	2.4504
	0.3	1.6664	2.5504	3.5311	4.5559	2.0820
	0.5	1.8768	3.0694	4.3658	5.7025	1.7323
	0.7	2.0411	3.4777	5.0177	6.5932	1.5585
	0.8	2.1161	3.6534	5.2977	6.97581	1.5000
	0.9	2.17555	3.8142	5.55314	7.32385	1.4529
	1.0	2.2542	3.9601	5.7850	7.6394	1.4142



tica tali curve valgono, come si è detto, indipendentemente dal valore di n .

Da quanto precede, consegue che la determinazione sperimentale dei valori dei cedimenti verticali a due diverse profondità nell'ammasso roccioso è in grado di fornire, tramite il loro rapporto, il valore presunto di $m = G_2/E_2$ per confronto con i dati del calcolo teorico riportati nella tabella I.

Individuato quindi il valore di m , è possibile acquisire una ulteriore informazione dall'esame di uno dei due valori dei cedimenti misurati; per quanto in precedenza affermato si può scrivere in generale $v_y = v_o \cdot f(m, y/r_o)$ ove per $v_o = (v_y)_{y=0}$ sarà

$$v_o = \frac{p \tau_o}{E_2} \cdot \sqrt{n} \cdot \frac{s_1 + s_2}{(s_1 \cdot s_2)^2}$$

mentre $f(m, y/r_o)$ si deduce dalla tabella I.

Consegue pertanto:

$$E_2 = \frac{p \tau_o}{v_y} \cdot f(m, y/\tau_o) \cdot \sqrt{n} \cdot \frac{s_1 + s_2}{(s_1 s_2)^2},$$

in cui si riscontra ancora, dai dati calcolati nell'ultima colonna della tabella 1, la debole dipendenza del valore del gruppo

$$\sqrt{n} \cdot \frac{s_1 + s_2}{(s_1 \cdot s_2)^2}$$

del rapporto n .

Ne consegue la possibilità di calcolare E_2 dalla semplice conoscenza di m , oltre che ovviamente, dalla conoscenza del dato

sperimentale v_y (registrato alla quota y) e del valore della pressione p applicata uniformemente su di una superficie circolare di raggio r_0 .

Infine, noti m ed E_2 , si ricaverà $G_2 = m E_2$.

In conclusione, nella procedura sperimentale adottata, la lettura dei cedimenti a due diverse profondità consente, per confronto con i dati teorici, la determinazione delle costanti elastiche E_2 e G_2 : risulta peraltro influente il parametro E_1 per rapporto alle deformazioni misurate.

3. - Le espressioni degli spostamenti di cui ci serviamo valgono evidentemente per qualunque valore dei moduli elastici E_1 , E_2 , G_2 e dei loro rapporti n m , poichè è noto che non esistono a priori limitazioni per tali valori e per tali rapporti.

Ove pertanto dovesse risultare

$$\left(\frac{n}{m}\right)^2 < 4n(1-\nu_1^2)$$

le espressioni di s_1 , s_2 risulterebbero immaginarie e come tali complesse e coniugate

$$s_1 = \sqrt{\frac{\frac{n}{m} + i\sqrt{4n(1-\nu_1^2)} - \left(\frac{n}{m}\right)^2}{2(1-\nu_1^2)}}$$

$$s_2 = \sqrt{\frac{\frac{n}{m} - i\sqrt{4n(1-\nu_1^2)} - \left(\frac{n}{m}\right)^2}{2(1-\nu_1^2)}}$$

di conseguenza nelle espressioni delle ϕ_y e v_y interverrebbe ro degli immaginari, tuttavia in forma tale da dar luogo ad espressioni finali reali sia per le tensioni che per gli spostamenti.

Nel caso degli spostamenti, nell'ipotesi predetta, valendosi delle formule delle radici dei numeri immaginari, è agevole verificare che l'espressione v_y risulta in tal caso nella forma:

$$v_y = \frac{p z_0}{\sqrt{d} E_2 f} \cdot \frac{(e^2 - f^2) \left(h - f \cdot \frac{y}{z_0} \right) - 2 e f \left(g - e \frac{y}{z_0} \right)}{(e^2 + f^2)^2}$$

ove i simboli hanno il seguente significato in funzione di n e di m :

$$d = \frac{1 - \nu_1^2}{n}$$

$$\left. \begin{matrix} e \\ f \end{matrix} \right\} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{\frac{n}{1 - \nu_1^2}} \pm \frac{n}{2m(1 - \nu_1^2)}}$$

$$\left. \begin{matrix} g \\ h \end{matrix} \right\} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{y}{z_0}\right)^4 \cdot \frac{n}{1 - \nu_1^2} + \left(\frac{y}{z_0}\right)^2 \frac{n}{m(1 - \nu_1^2)}} \pm \left[1 + \left(\frac{y}{z_0}\right)^2 \frac{n}{2m(1 - \nu_1^2)} \right]}$$

4. - Da quanto precede è possibile in ogni caso, da misure di deformazioni su punti di semispazio indefinito ortotropo, ricavare due dei tre parametri che definiscono le caratteristiche elastiche del continuo.

Questa possibilità può essere verificata utilizzando risultati sperimentali ottenuti a seguito di indagini su rocce stratificate di cui si possa presumere un comportamento di continuo ortotropo.

Di norma i risultati sperimentali a disposizione sono desunti con il dispositivo di fig. 2 in gallerie a sezione all'incirca circolare con asse parallelo alla stratificazione; i carichi vengono realizzati con martinetti orientati in direzione perpendicolare e parallela alla stratificazione stessa.

Il carico dei martinetti, si è detto, si esercita su una superficie circolare ed è sensibilmente uniforme essendo trasmesso mediante una cella di carico in lamiera sottile; le misure degli spostamenti in direzione assiale al carico vengono ricavate, oltre che alla superficie, pure in altri punti all'interno dell'ammasso roccioso, ovviamente sempre sull'asse di applicazione del carico.

Evidentemente le ipotesi riferentesi alla geometria del semispazio ortotropo, che sono alla base del procedimento di calcolo teorico, sono realizzate in forma soltanto approssimata dalla galleria circolare.

E' presumibile che l'ipotesi di semispazio indefinito possa essere tanto più accettabile nel nostro caso quanto più piccolo sia il diametro della piastra di carico per rapporto al diametro della galleria e quanto più prossimi alla superficie

libera siano i punti di misura presi in considerazione all'interno dell'ammasso roccioso.

Peraltro, al fine di ottenere una sufficiente sensibilità per la misura di m , che è il primo parametro che deve essere definito, può essere utile effettuare confronti di cedimenti tra punti superficiali e punti a distanza pari a 2 - 3 volte il raggio della piastra di carico.

Giova notare che la geometria reale del continuo su cui si sperimenta comporta intuitivamente un più rapido smorzamento delle letture al crescere della profondità dei punti esaminati.

Questo smorzamento, con riferimento alla figura 5, può condurre ad una erronea interpretazione nel senso di sopravvalutare il valore del parametro m . In effetti i valori che si ottengono per m in alcuni casi da noi elaborati appaiono chiaramente eccessivi.

Da quanto precede viene fatto di auspicare che la proposta metodologia venga applicata nel caso di situazioni geometriche più rispondenti alle ipotesi che reggono l'interpretazione della metodologia stessa.

5. - In quanto precede si sono effettuate considerazioni che teoricamente permettono di pervenire alla definizione dei parametri E_2 e G_2 rimanendo peraltro incognito il parametro E_1 , il quale non può essere messo in evidenza tramite la proposta sperimentazione in quanto esso è praticamente ininfluenza sui cedimenti in direzione perpendicolare agli strati. Peraltro il valore di E_1 può essere dedotto da indagini sperimentali su campioni di roccia, ciò che è assolutamente impossibile per E_2 e G_2 in quanto evidentemente su E_2 e G_2 interviene in misura determinante l'effetto della stratificazione valutabile unicamente attraverso una prova diretta globale che ne metta in evidenza le influenze sulle deformazioni.

In ogni caso i valori di E_2 e G_2 calcolati con il procedimento indicato in questo lavoro possono essere di fatto confrontati ed associati a quanto emerge da altri tipi di prove e da altre metodologie sperimentali. Ad esempio possono essere associati ai risultati che si ottengono da una prova in galleria in pressione da cui, come è noto, si ottengono 2 relazioni in funzione delle 3 incognite E_1 , E_2 , G_2 .

Conoscendo pertanto a priori E_2 e G_2 si potrebbe ricavare il valore di E_1 e verificare sull'ulteriore equazione la correttezza del procedimento o meglio individuare, con un processo di ottimizzazione, i valori più probabili di E_1 , E_2 , G_2 disponendo di un sistema di 4 equazioni in 3 incognite.

6. - Il problema della valutazione tramite misure sperimentali in sito dei parametri di deformabilità di un ammasso roccioso caratterizzato da anisotropia ortotropa è stato parimenti affrontato per il tramite di un confronto di risultati di calcolo ottenuti mediante un programma di calcolo numerico con il metodo degli elementi finiti.

Si è considerato il caso di una galleria a sezione circolare nell'ammasso indefinito, con asse parallelo al piano di stratificazione, e si sono esaminati i due casi di carico sulla roccia mediante martinetti orientati perpendicolarmente e parallelamente a tale piano (fig. 6).

Il problema è stato considerato per maggior semplicità come problema piano essendo possibile, con la valutazione delle aree delle deformate nel caso di problema tridimensionale, interpretare analiticamente le misure sperimentali attuate nel cunicolo con geometria evidentemente a tre dimensioni (rif. bibliogr. [6]).

7. - Il calcolo è stato eseguito nell'ipotesi di deformazione piana che corrisponde al caso di un cunicolo di lunghezza infinita caricato con carico nastriforme sulle generatrici.

La traccia nel piano di sezione del diagramma di carico è data da un'espressione del tipo

$$q = p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^2}$$

ove con r si indica la distanza del punto generico dall'asse di simmetria del carico e con r_0 la semilarghezza della stri-

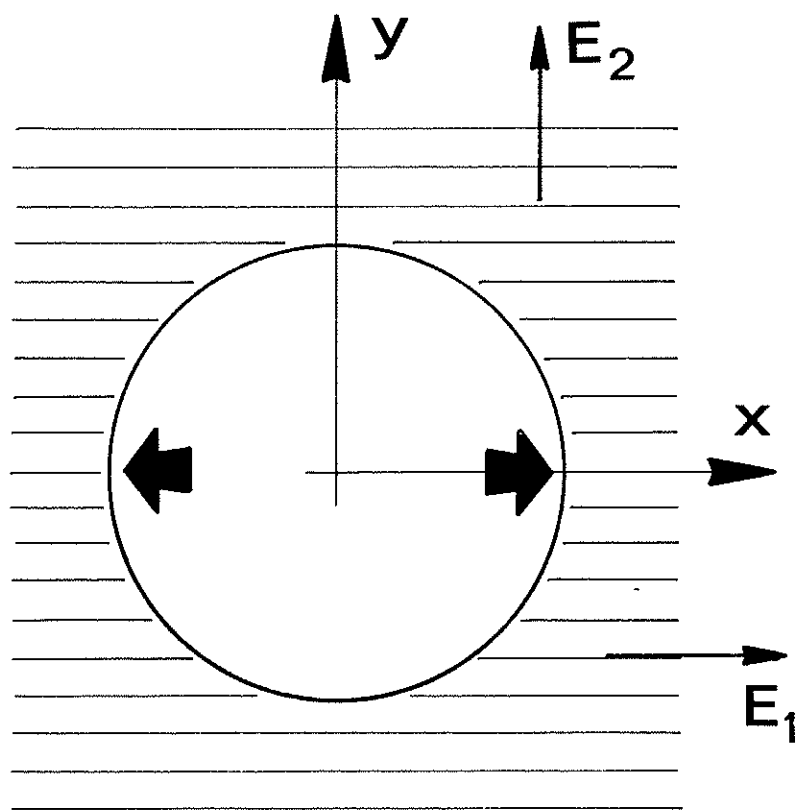
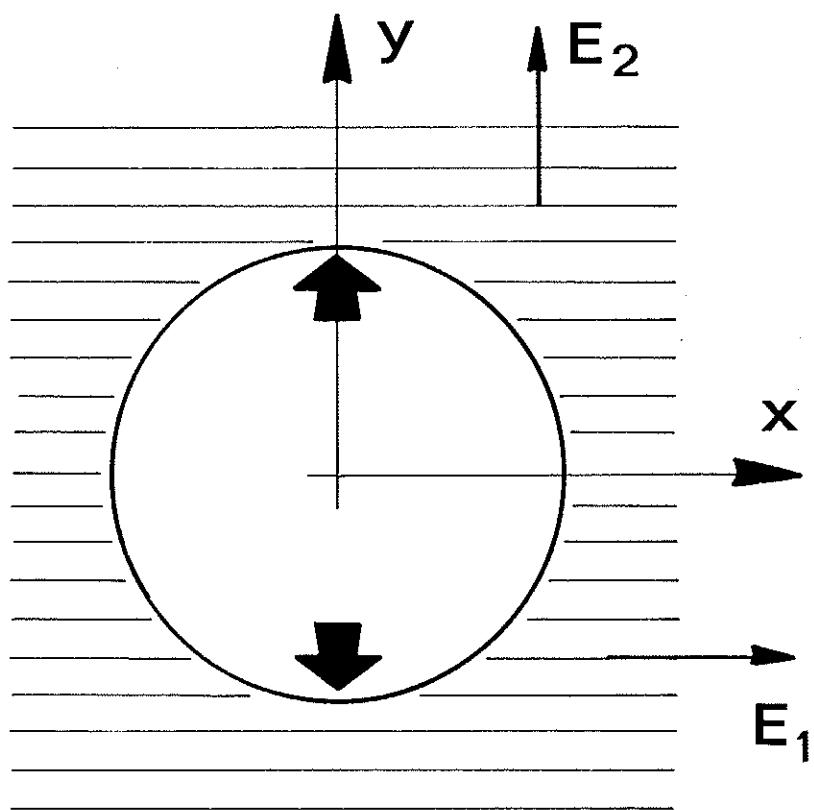


fig. 6

scia del carico nastriforme.

Ciò al fine pratico di simulare l'effetto di una serie di piastre circolari con carico uniformemente distribuito (trascurando la rigidità delle piastre, ipotesi corretta in rapporto alla tecnica sperimentale adottata).

Sono stati analizzati quattro casi di carico, per le due direzioni parallele e perpendicolari agli strati e per due diversi valori delle aperture d'angolo al centro del diagramma di carico, corrispondenti all'adozione di due diversi rapporti larghezza della striscia di carico:diametro del cunicolo.

In considerazione della simmetria geometrica del problema, è stato sufficiente analizzare un solo quadrante del piano.

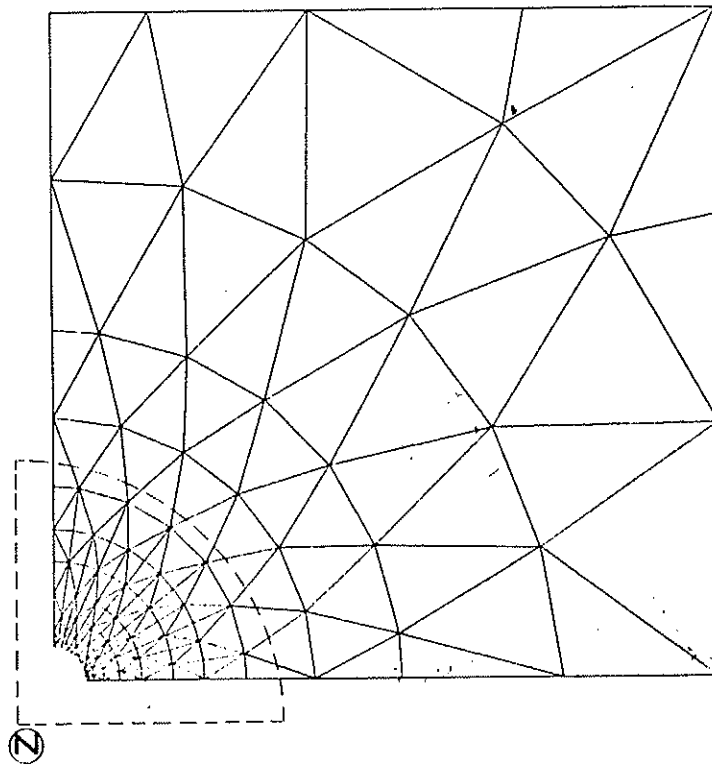
La discretizzazione del continuo è stata operata attraverso 243 elementi isoparametrici del 2° ordine per complessivi 1008 gradi di libertà (fig. 7).

Per ottenere uno studio parametrico sufficientemente esauriente dell'influenza delle caratteristiche di anisotropia, si sono analizzati complessivamente i 48 casi riportati nelle tabelle II e III allegate.

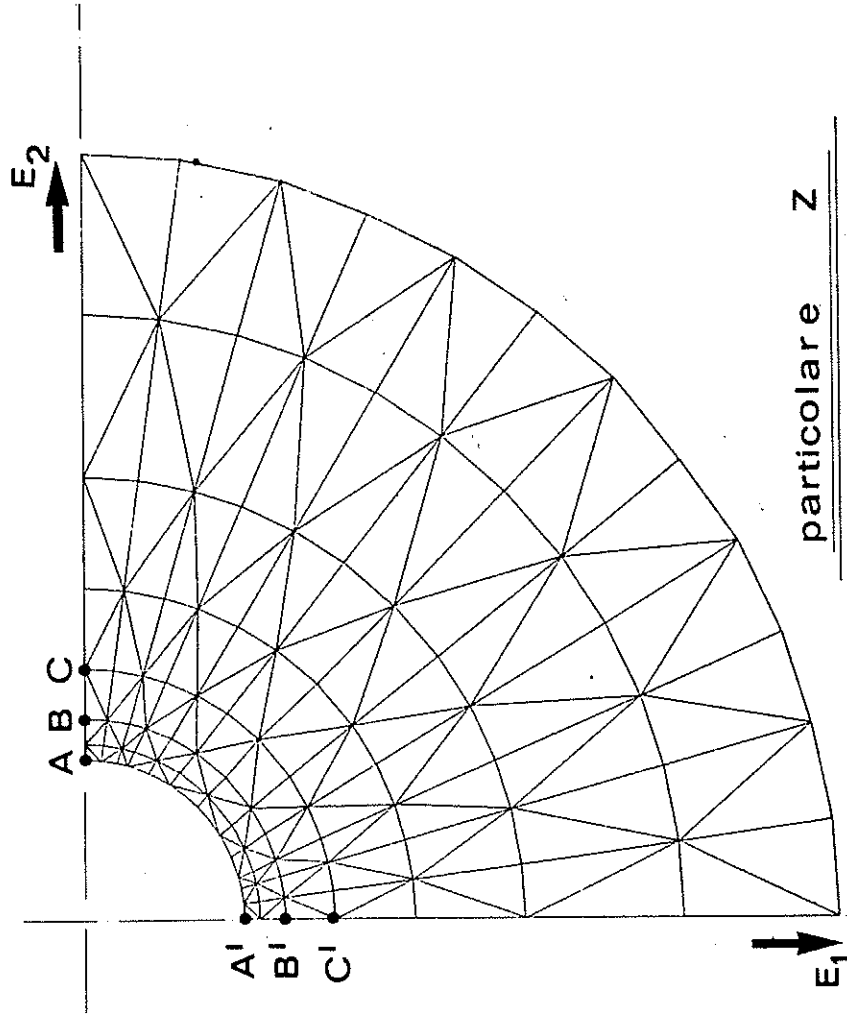
Dovendosi procedere ad un calcolo numerico, si è assunto un diametro di cunicolo $2r_c = 3,00$ m e un'ampiezza dell'arco di carico pari a 0,60 m e 0,80 m nei due casi considerati. Si è assunto inoltre il modulo E_1 pari a 100.000 kg/cm^2 , mentre il valore di p_0 massima ordinata del diagramma di carico nastriforme è stato assunto pari a 100 kg/cm^2 .

Le deformazioni in corrispondenza dell'asse dei carichi sono state espresse in mm, in funzione dei parametri rapportati al valore fissato di E_1 :

$$n = \frac{E_1}{E_2} \qquad m = \frac{G_2}{E_2}$$



0 500 1000 1500 cm

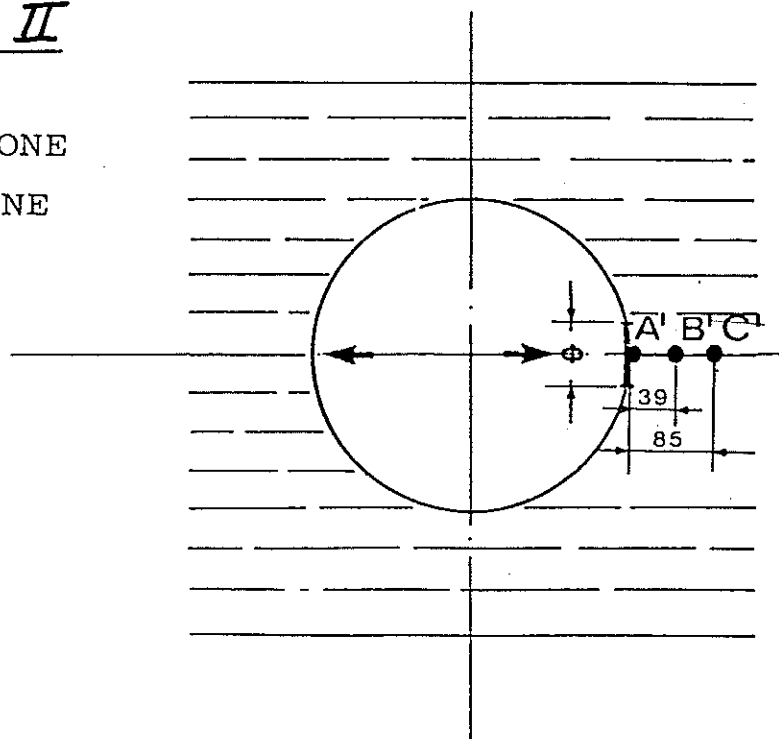


particolare z

fig. 7

TABELLA II

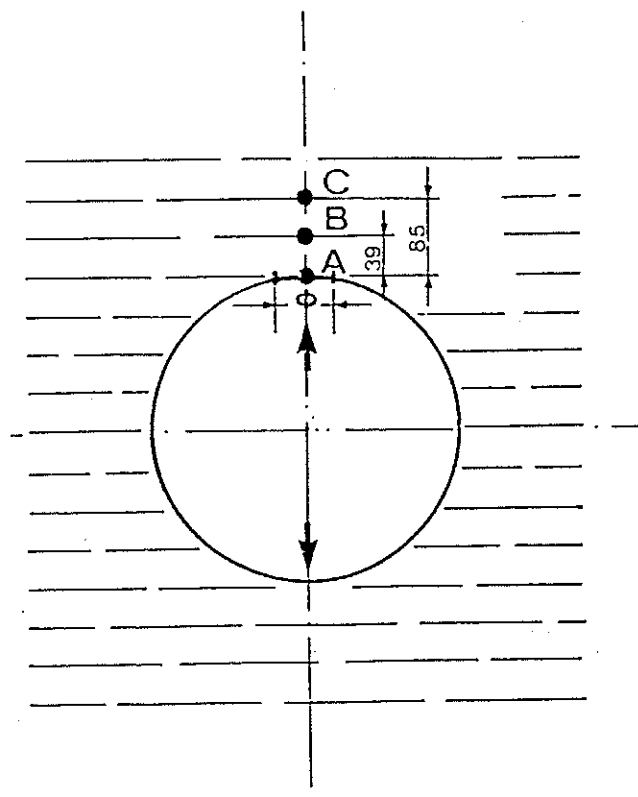
DEFORMAZIONI f_1 (mm) IN DIREZIONE
PARALLELA ALLA STRATIFICAZIONE



m \ n		0,2		0,4		0,6	
		$\phi = 60\text{cm}$	$\phi = 80\text{cm}$	$\phi = 60\text{cm}$	$\phi = 80\text{cm}$	$\phi = 60\text{cm}$	$\phi = 80\text{cm}$
punto A'	1	1,28	1,57	1,00	1,22	-	-
	1,5	1,52	1,87	1,16	1,43	-	-
	2	1,73	2,12	1,30	1,60	1,13	1,38
	3	2,07	2,55	1,53	1,88	1,31	1,60
	4	2,36	2,90	-	-	-	-
	5	2,62	3,22	-	-	-	-
punto B'	1	0,99	1,26	0,72	0,93	-	-
	1,5	1,23	1,56	0,88	1,13	-	-
	2	1,43	1,81	1,02	1,30	0,85	1,09
	3	1,77	2,24	1,25	1,59	1,03	1,32
	4	2,06	2,59	-	-	-	-
	5	2,31	2,91	-	-	-	-
punto C'	1	0,77	1,01	0,54	0,71	-	-
	1,5	0,99	1,29	0,68	0,89	-	-
	2	1,17	1,52	0,80	1,04	0,65	0,85
	3	1,49	1,93	1,01	1,31	0,81	1,06
	4	1,77	2,27	-	-	-	-
	5	2,01	2,58	-	-	-	-

TABELLA III

DEFORMAZIONI f_2 (mm) IN DIREZIONE
NORMALE ALLA STRATIFICAZIONE



	m \ n	0,2		0,4		0,6	
		$\phi = 60\text{cm}$	$\phi = 80\text{cm}$	$\phi = 60\text{cm}$	$\phi = 80\text{cm}$	$\phi = 60\text{cm}$	$\phi = 80\text{cm}$
punto A	1	1,28	1,57	1,00	1,22	-	-
	1,5	1,85	2,27	1,41	1,73	-	-
	2	2,39	2,94	1,80	2,22	1,56	1,92
	3	3,43	4,22	2,54	3,13	2,17	2,67
	4	4,40	5,43	-	-	-	-
	5	5,32	6,56	-	-	-	-
punto B	1	0,99	1,26	0,72	0,93	-	-
	1,5	1,42	1,82	1,01	1,31	-	-
	2	1,85	2,37	1,30	1,67	1,07	1,39
	3	2,66	3,41	1,83	2,37	1,49	1,94
	4	3,43	4,40	-	-	-	-
	5	4,16	5,34	-	-	-	-
punto C	1	0,77	1,01	0,54	0,71	-	-
	1,5	1,11	1,46	0,76	1,00	-	-
	2	1,45	1,90	0,97	1,28	0,78	1,03
	3	2,09	2,74	1,37	1,81	1,08	1,43
	4	2,79	3,55	-	-	-	-
	5	3,29	4,32	-	-	-	-

essendosi assunto per i coefficienti di Poisson ν_1 e ν_2 il valore 0,2 ritenuto ovunque costante, di cui peraltro si ha ragione di ritenere trascurabile l'influenza.

Il procedimento di calcolo fornisce ovviamente le componenti di spostamento di tutti i punti della mesh considerata. Evidentemente l'interesse maggiore si concentra nei punti degli assi dei carichi, agenti come è noto normalmente e parallelamente ai piani di stratificazione.

In particolare nelle tabelle sono stati riportati i cedimenti nei punti indicati nel disegno n° 7 con le lettere A, A', B, B', C, C'. In pratica sono stati scelti i punti della superficie (A e A') e a due diverse profondità: 39 cm (B e B') e 85 cm (C e C').

Evidentemente i calcoli eseguiti possono essere utilizzati non soltanto nelle condizioni geometriche, di carico p_0 e di modulo E_1 assunte: infatti sarà possibile, con agevoli calcolazioni e tramite opportuni criteri di similitudine, calcolare i cedimenti per valori diversi dei predetti parametri assunti a base del presente calcolo numerico.

8. - Proprio per consentire la massima generalità dei risultati dei calcoli, si è cercato di diagrammarli in forma adimensionale, come risulta nelle figure 8 e 9 ove si sono introdotti i valori adimensionali:

$$\varphi_1 = \frac{\delta_1}{z_c} : \frac{p_0}{E_1} \quad e \quad \varphi_2 = \frac{\delta_2}{z_c} : \frac{p_0}{E_1}$$

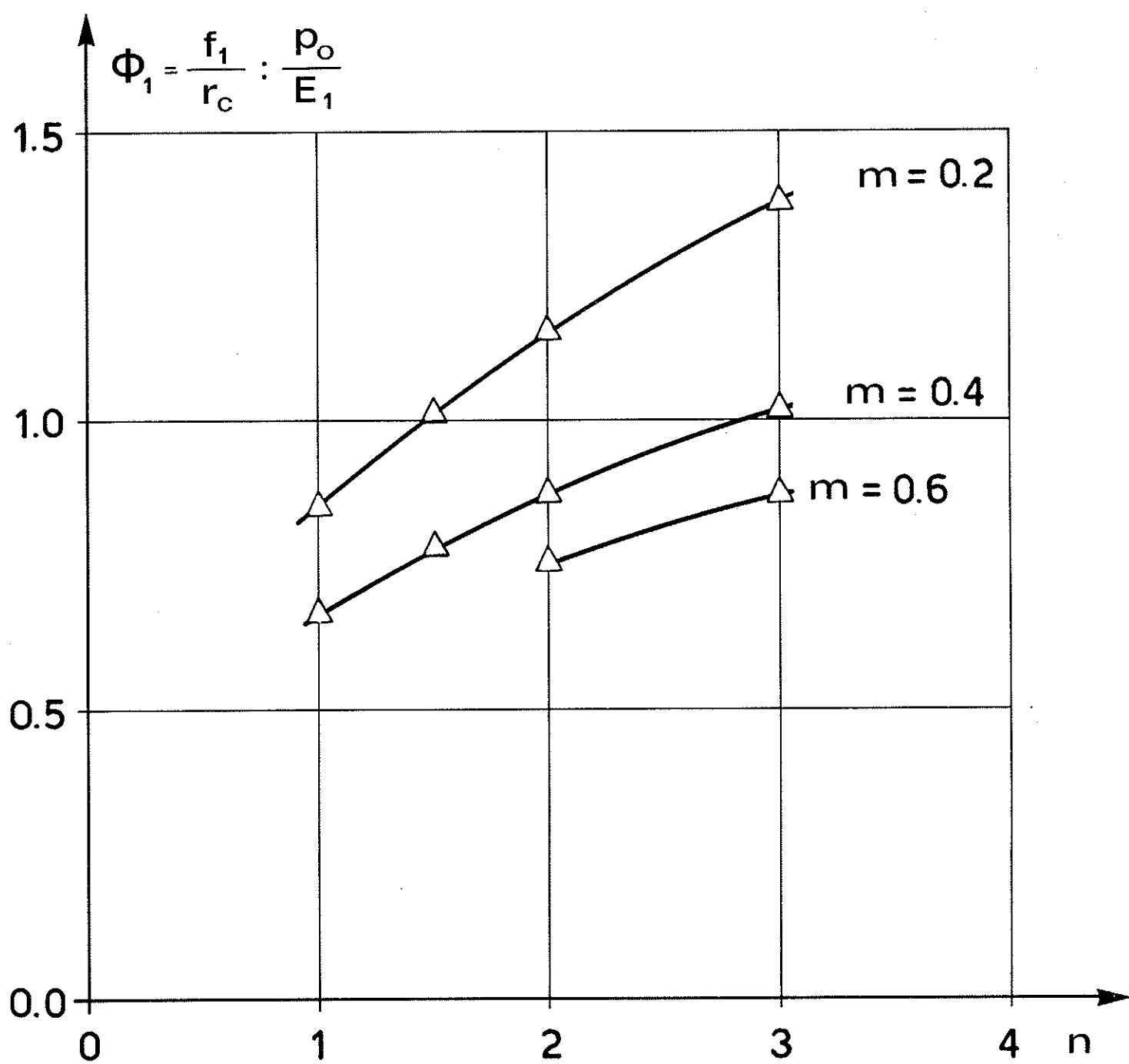


fig.8

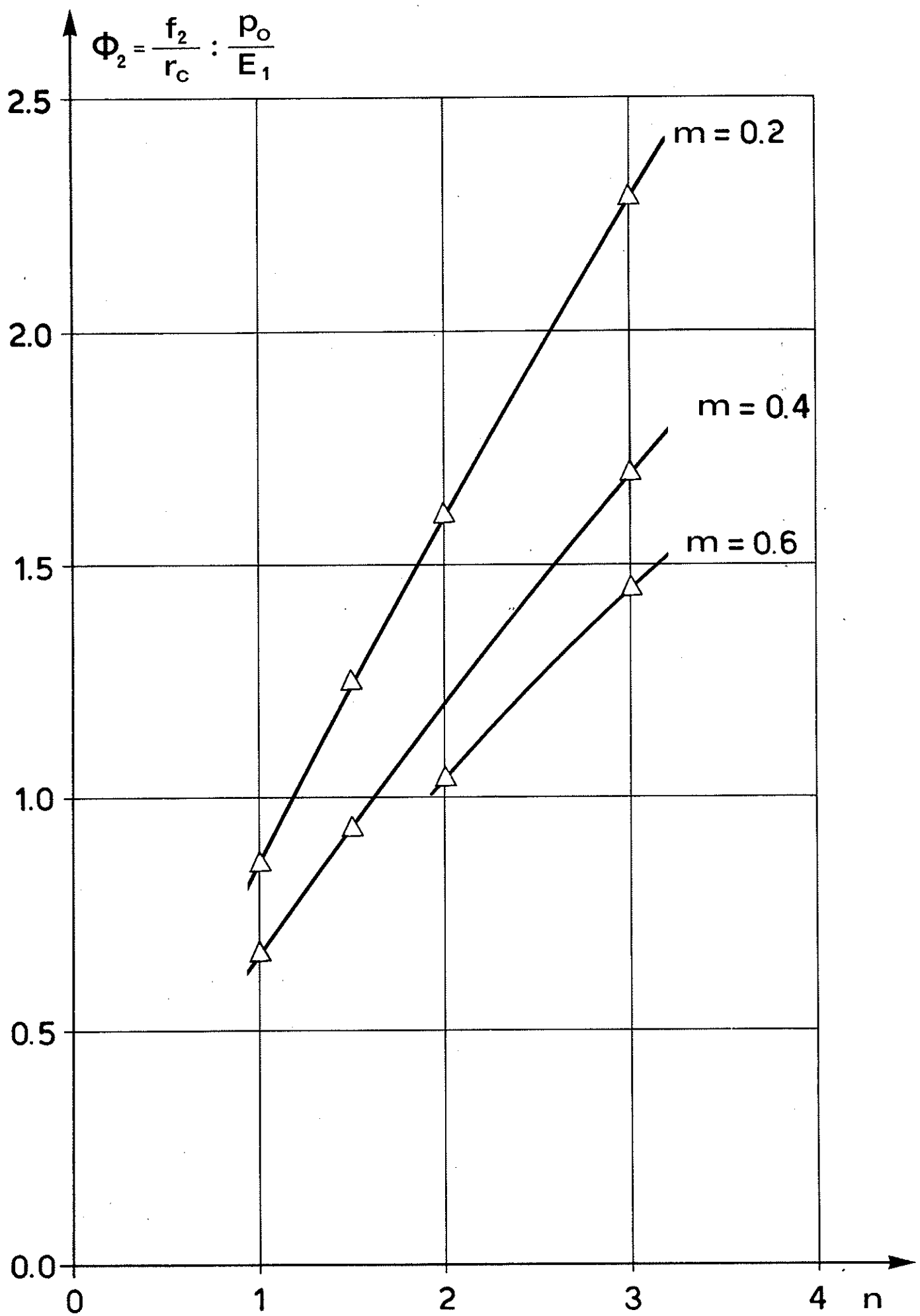


fig.9

in funzione di n e di m .

Dai diagrammi precitati si osserva la più marcata influenza (a parità di E_1) di n su ψ_2 anzichè su ψ_1 .

Ma più interessanti ai fini concreti sono le osservazioni che si ricavano dai diagrammi di fig. 10 e 11 che recano rispettivamente f_1 in funzione di n per E_1 cost (cioè in pratica in funzione di E_2) per due diversi valori di G_2 , e f_2 in funzione di n per E_2 cost (cioè in pratica in funzione di E_1) per tre diversi valori di G_2 .

E' agevole osservare che f_1 è praticamente indipendente da E_2 mentre per f_2 la dipendenza da E_1 risulta assai debole.

In altri termini si riscontra che si può porre $f_1 = f_1(E_1, G_2)$ e $f_2 = f_2(E_2, G_2)$.

I diagrammi di cui sopra sono stati ricavati per una larghezza del carico nastriforme pari a 60 cm: le considerazioni precedenti si applicano sensibilmente anche nel caso di larghezza di 80 cm.

Il risultato forse più interessante dell'indagine numerica intrapresa consegue tuttavia dal diagramma di fig. 12 che riporta l'andamento del rapporto f_2/f_1 in funzione di n . Le frecce sono state misurate in punti superficiali e alle due profondità in precedenza indicate.

Si può agevolmente verificare che f_2/f_1 è praticamente indipendente da m e pertanto solo funzione di n (°).

Ne consegue la possibilità di risalire immediatamente dal rapporto tra le frecce al rapporto tra i moduli E_1 ed E_2 .

(°) l'andamento del diagramma è il medesimo per entrambe le larghezze della striscia di carico (60 e 80 cm) e si può considerare pertanto indipendente da tale parametro.

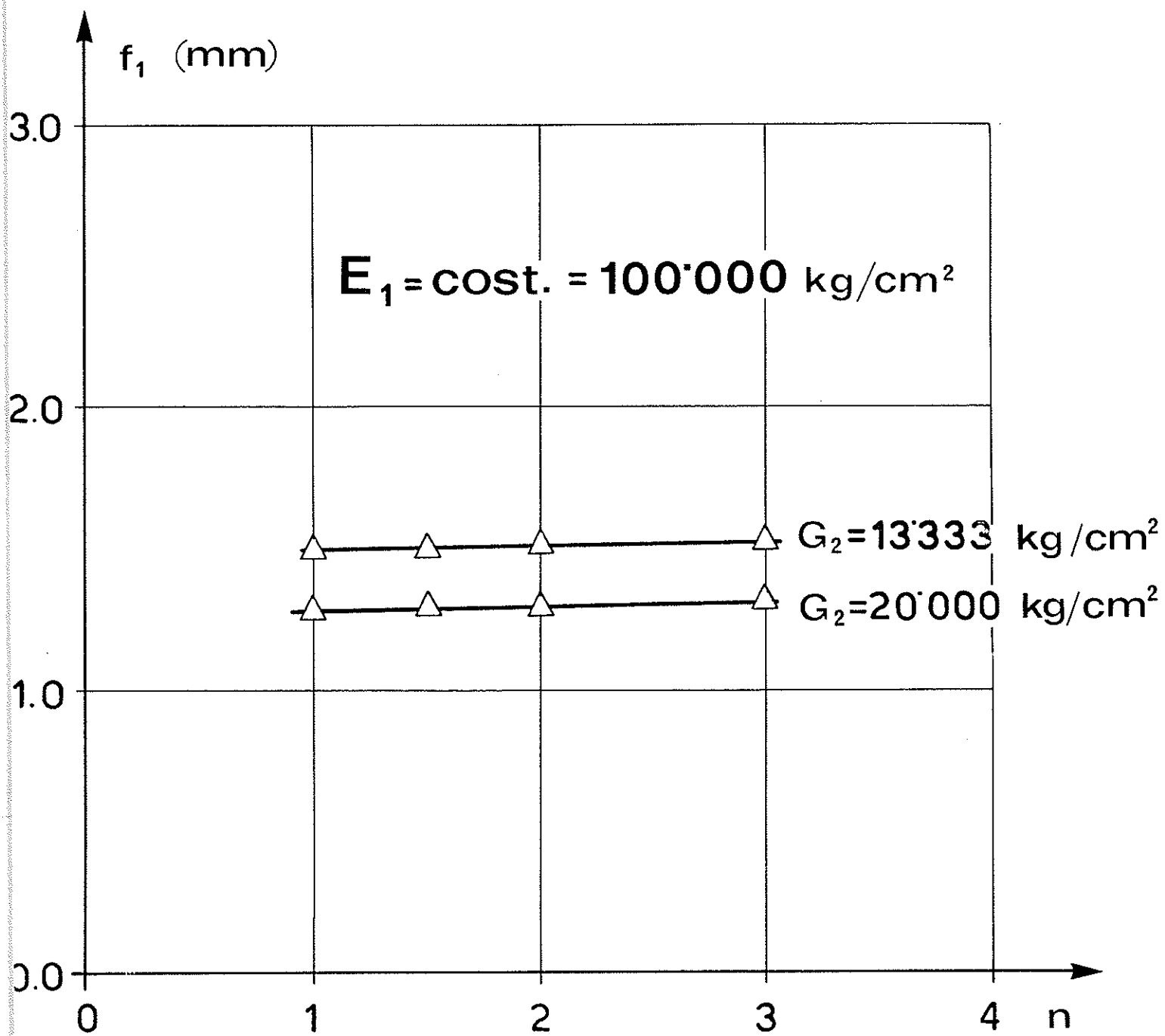


fig.10

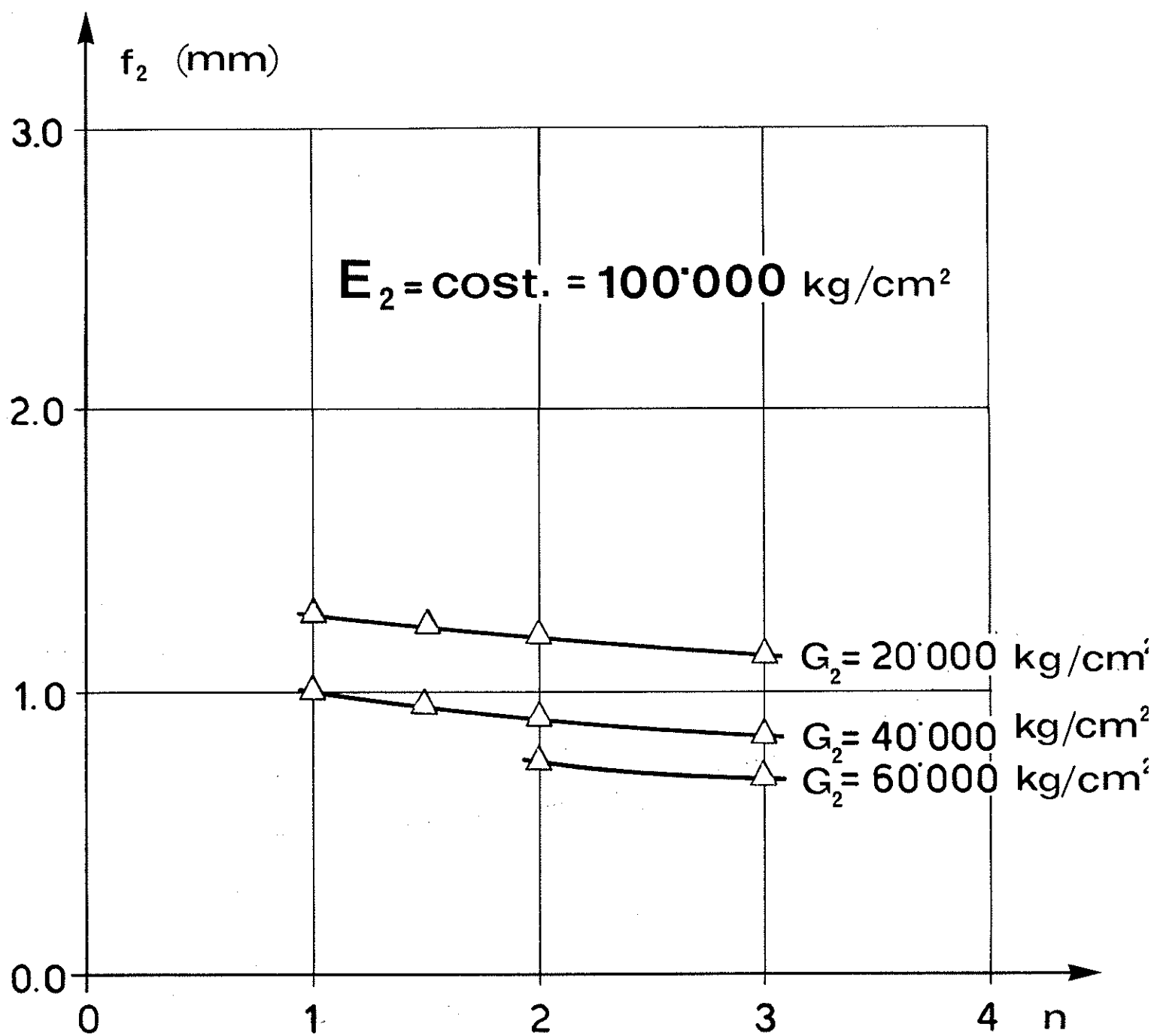


fig.11

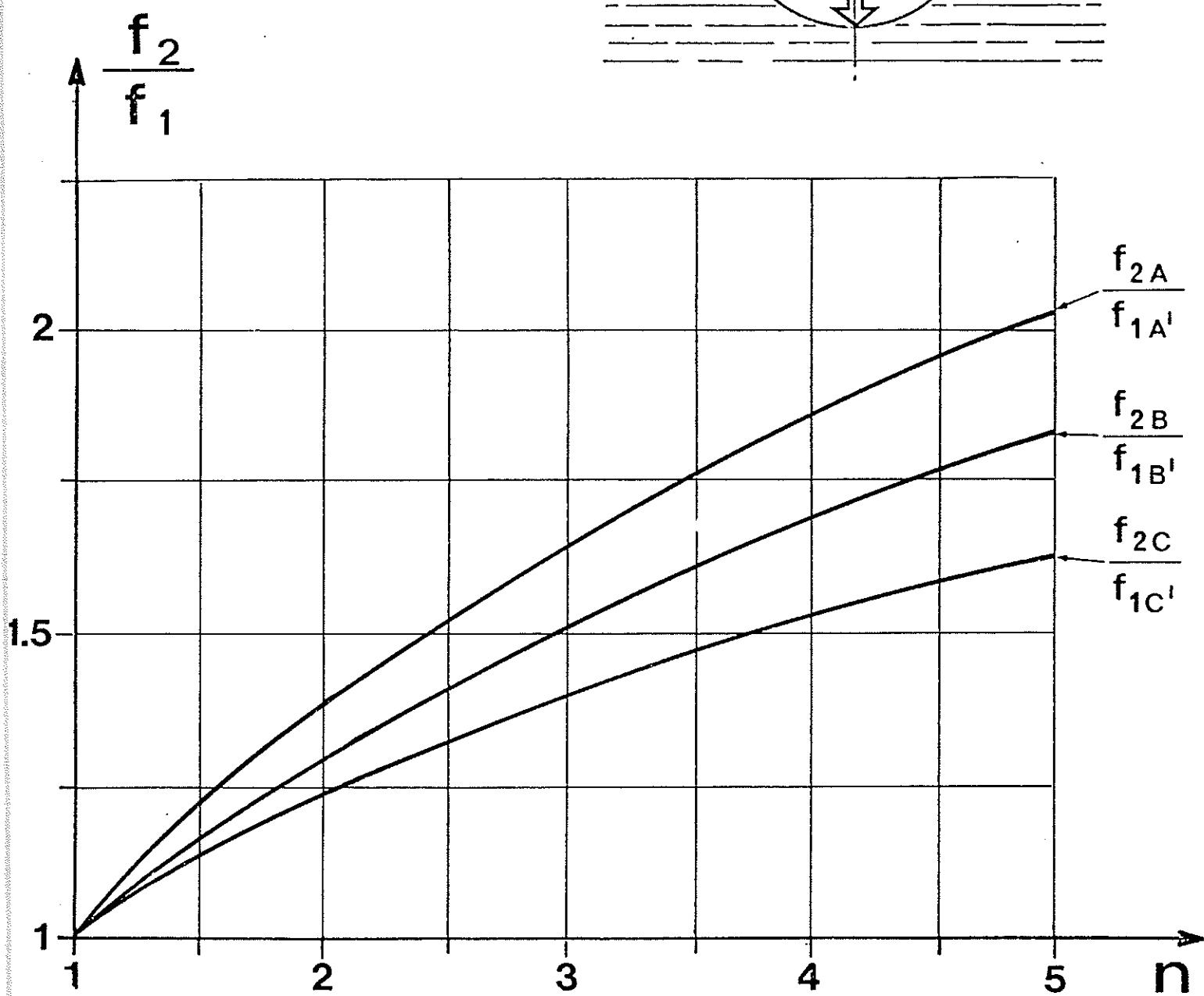
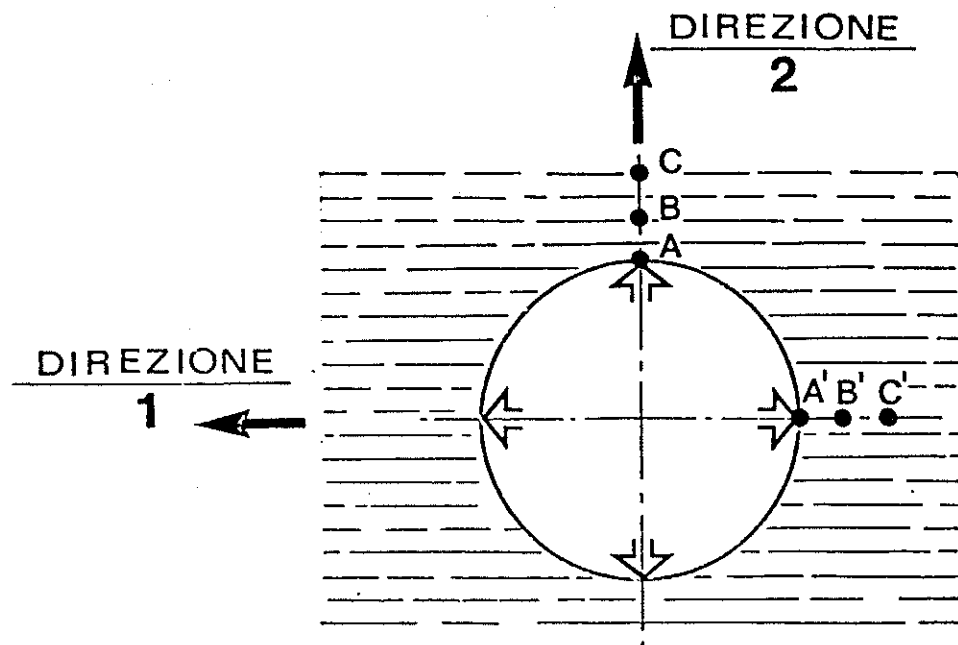


fig. 12

9. - Le considerazioni di cui sopra valgono, come si è detto, nell'ipotesi di problema piano (deformazioni piane) che trova la sua corrispondenza nel caso di una geometria di cunicolo circolare in un ammasso indefinito con un carico lineare nastriforme caratterizzato nel piano della sezione da una legge di tipo quadratico come indicato all'inizio del paragrafo 7.

Nella realtà la sperimentazione procede invece con carichi concentrati mediante martinetti che sono ovviamente lunghi dal realizzare la configurazione di carico uniforme in direzione parallela all'asse della galleria.

Come lo scrivente ha già in altra sede dimostrato, è possibile interpretare misure deformometriche di carico concentrato con risultati teorici riferentisi a carichi nastriformi tramite la misura dell'area della deformata secondo le generatrici del tunnel cilindrico [6].

Più semplicemente, l'ipotesi di carico nastriforme può essere agevolmente realizzata disponendo più martinetti in parallelo per cui si può affermare che al centro della fila dei martinetti le deformazioni (e in particolare le deformazioni alla superficie) siano sensibilmente quelle di una serie indefinita di martinetti paralleli, considerando il rapido smorzamento e quindi la limitata interferenza tra le deformate dovute ai singoli carichi.

In ogni caso, se il metodo che seguiamo è quello illustrato al precedente paragrafo e se si opera al fine di ottenere il rapporto tra i moduli elastici dal rapporto delle frecce, si può ritenere di assumere come frecce quelle direttamente misurate mediante martinetti isolati, supponendo di poter assumere sensibilmente tra di loro in similitudine le deformate delle prove

di carico rispettivamente in direzione perpendicolare e parallela agli strati.

Si potrebbe a questo punto suggerire una interpretazione simultanea delle prove di carico su piastre in cunicolo secondo questo ordine di ragionamento:

- interpretazione delle misure a due differenti profondità (per la prova con carico perpendicolare agli strati) come riferentisi a prove su semispazio indefinito: questa ipotesi potrà verificarsi tanto più credibilmente quanto minore risulterà il rapporto tra i diametri della piastra di carico e del cunicolo e parimenti quanto più ridotto sarà il rapporto tra la profondità dei punti esaminati ed il diametro del cunicolo. Da tale prova si ottengono, come è noto i valori di E_2 e G_2 .
- interpretazione delle misure di freccia nelle due direzioni ortogonali e possibilità di ricavarne il rapporto n tra i moduli come indicato nei paragrafi che precedono, con il che si completano le informazioni relative ai tre parametri E_1 , E_2 e G_2 dell'anisotropia.

10. - A conclusione di quanto precede possiamo affermare che sono state proposte due tecniche operative per valutare i moduli e le caratteristiche dell'anisotropia ortotropa in ammasso roccioso da essa caratterizzato.

Il primo metodo prevede una prova di carico mediante martinetto su di un semispazio indefinito delimitato da un piano parallelo alla stratificazione. Le misure fatte alle diverse profondità consentono la definizione dei parametri E_2 e G_2 .

Il secondo metodo prevede l'applicazione dei martinetti in tunnel circolare in due direzioni ortogonali (normalmente e parallelamente agli strati) e il risultato più saliente che si può ricavare è il rapporto tra i moduli E_1 ed E_2 . Le due prove associate consentono, come è evidente, la determinazione completa dei 3 parametri di anisotropia E_1 E_2 G_2 .

Una osservazione immediata è che le due diverse proposte di prova non presentano una autonomia nel senso che che ciascuna di esse non è in grado di pervenire alla definizione completa dei 3 parametri dell'anisotropia.

Il dover operare con due diversi metodi in corrispondenza di due diverse sezioni o punti dell'ammasso roccioso comporta evidentemente il rischio che si associno misure riferentisi a punti diversi e quindi di diverse caratteristiche, considerata la variabilità delle caratteristiche degli ammassi.

Evidentemente le prove proposte si possono associare ad altre prove già note, in particolare ad es. alle prove in galleria a pressione che, a parte il loro costo elevato, offrono certamente indicazioni più interessanti in quanto coinvolgono aree, carichi e volumi di roccia molto più importanti.

Come è noto la prova in tunnel non è in grado da sola di fornire i tre parametri dell'anisotropia e deve essere associata quindi con una delle prove proposte nel presente rapporto per una opportuna integrazione dell'equazioni disponibili per la definizione delle incognite in gioco.

Per la prova in galleria a pressione potrebbe poi essere suggerita una modalità sperimentale più sofisticata che comporti la misura di spostamenti radiali non soltanto alla superficie del

tunnel ma anche all'interno dell'ammasso roccioso; in tal caso dovrebbe essere possibile disporre di ulteriori equazioni per la completa definizione delle incognite in gioco.

Lo studio di questa possibilità potrà essere oggetto di una ulteriore futura ricerca.

Alla ricerca ha collaborato il geom. Francesco Giacommo
I° aiutante di laboratorio del C.N.R. presso l'Istituto
di Tecnica delle Costruzioni del Politecnico di Torino.

B I B L I O G R A F I A

- [1] - L. Goffi La determinazione delle costanti elastiche di ammassi rocciosi ortotropi mediante prove in sito - n. 10 "L'Energia elettrica" - 1972
- [2] - G. Manfredini,
S. Martinetti,
P.P. Rossi,
A. Sampaolo Observation on the procedures and on the interpretation of the plate bearing test - III Congr. Int. Soc. Rock Mech. - Denver Colorado (USA) - Settembre '74 - vol. IIA, pp. 451-457
- [3] - P.P. Rossi In situ Versuche zur Bestimmung des Verformungsmoduls von Fels - Febbraio 1977, Bollettino Ismes n. 87
- [4] - G. Oberti Experimentelle Untersuchungen über die Charakteristiken der Verformbarkeit der Felsen" - Colloqui IAFG - Salisburgo - Ottobre 1959 - Bollettino Ismes n. 15
- [5] - S.G. Lekhnitskii Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body - Holden Day, 1963
- [6] - L. Goffi La determinazione del modulo elastico di un ammasso roccioso mediante misure di deformazione per carichi concentrati in galleria sperimentale - n. 9 "L'Energia Elettrica" - 1963
- [7] - G. Oberti
L. Goffi
A. Rebaudi Comportement statique des massifs rocheux (calcaires) dans la réalisation de grands ouvrages souterrains - Atti del 2° Congresso Internazionale di Meccanica delle Rocce - Belgrado 1970
- [8] - O. Zienkiewicz The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics - Ed. Mc Graw Hill - Londra 1967