

VERIFICA DELLA STABILITÀ DI RILEVATI DI TERRA CON USO DI CALCOLATORE ELETTRONICO

F. BIGALLI - G. MADONI (*)

SOMMARIO: Puntualizzata l'esigenza, sempre più sentita da parte dei progettisti di opere di terra, di disporre per la verifica di stabilità di un insieme complesso fondazione-rilevato di procedimenti rapidi ed economici, vengono esposti i criteri con i quali si è messa a punto un'analisi statica fondata sul metodo svedese dei cerchi di scorrimento, mediante l'impiego del calcolatore elettronico.

Si precisano i tipi di dati necessari al funzionamento della macchina e si riporta uno schema operativo della stessa.

Infine, allo scopo di restringere il campo di ricerca della più probabile linea di frattura, vengono riportate alcune considerazioni desunte dalle applicazioni pratiche intraprese.

1 - Premesse

La progettazione delle opere d'ingegneria nel campo meccanico-industriale si è da tempo indirizzata con profitto verso la standardizzazione di materiali e di forme; recentemente questo indirizzo si è esteso anche al campo civile, portando evidenti vantaggi economici sia nell'ambito della realizzazione complessiva dell'opera, che in quello della progettazione stessa.

Nelle grandi opere questo indirizzo resta evidentemente compresso dall'importanza dei vincoli posti dalle fondazioni, che sono generalmente incogniti a priori ed estremamente variabili da caso a caso.

Tuttavia se si considerano opere in ferro o in c.a., nonostante i precisi limiti derivanti dai vincoli esterni, si può ancora utilizzare convenientemente una certa standardizzazione proprio in base all'estesa conoscenza delle proprietà meccaniche dei materiali impiegati, per i quali si è in grado di prevedere a priori e con sufficiente esattezza il comportamento elastico e il punto di rottura.

Sotto questo aspetto si può dire che le opere di terra, specie quelle di grandi dimensioni, comportano particolari problemi in quanto anche i materiali impiegati nella costruzione si presentano come elementi incogniti di caratteristiche fisiche e meccaniche da studiare caso per caso.

Ciò si presenta con particolare evidenza nel nostro paese che è costituito da regioni geologiche molto disuniformi, la cui conoscenza è sufficientemente estesa dal punto di vista generale, ma tuttora scarsa e troppo limitata nei dettagli riguardanti le proprietà geotecniche.

Da ciò deriva la difficoltà di utilizzare i risultati di opere geometricamente simili anche solo per un dimensionamento di massima di qualche affidamento e quindi la necessità di applicare i metodi di analisi di stabilità fin dall'inizio della progettazione.

Dal punto di vista progettistico, questa particolare situazione porta ad un ampliamento delle indagini di calcolo che può risultare particolarmente notevole.

Se si pensa d'altronde che i metodi d'indagine della stabilità di rilevati di terra sono già di per sé laboriosi, si comprende come, nel complesso della progettazione, l'onere delle analisi di calcolo possa diventare preponderante.

Da questi motivi nasce l'esigenza, sempre più impellente per i progettisti, di disporre di mezzi di calcolo più rapidi e precisi di quelli tradizionali.

Ciò d'altronde corrisponde anche all'esigenza di utilizzare tempestivamente tutti i dati geotecnici, che possono essere forniti al progettista in misura sempre maggiore grazie al progredire delle tecniche di prelievo e di laboratorio e che portano spesso, nelle situazioni di difficile ambiente geologico che vengono affrontate sempre più frequentemente, a precisazioni molto localizzate e richiedenti, per un opportuno affinamento dell'opera, onerose estensioni di calcolo.

Il nostro Studio, da tempo impegnato in questo campo per la progettazione e consulenza nella realizzazione di notevoli opere in diverse regioni italiane ⁽¹⁾, ha risposto a questa esigenza approntando, come fatto da tempo in altri paesi, un metodo di calcolo con impiego di calcolatore elettronico; impiego

(*) Dott. Ing. Franco BIGALLI e Dott. Ing. Giancarlo MADONI, Società Italiana Progettazioni e Lavori, SIPEL, Milano.

(1) Diga di Selva (Lazio), Diga di Castel S. Vincenzo (Abruzzo), Diga Trinità (Sicilia), Diga di Butera (Sicilia), Diga Fastaia (Sicilia), Diga Lucia sul Mela (Sicilia), Diga S. Lucia sul Sa' Teula (Sardegna), Diga sul Singerna (Toscana), Diga sull'Olivo (Sicilia), Diga Jato (Sicilia).

divenuto ormai accessibile per usi privati anche in Italia.

L'esposizione di questo metodo e alcune considerazioni di ordine generale che si sono dedotte dalle prime applicazioni, costituiscono appunto l'argomento del presente articolo.

2 - Principi generali

Il metodo di verifica considerato è quello classico svedese [8] basato sull'analisi di superfici virtuali di scorrimento a direttrici circolari.

Questo metodo, generalmente accettato per l'analisi della stabilità dei pendii, viene per lo più risolto con procedimento grafico, che assicura una precisazione di calcolo sufficiente, ma dal punto di vista operativo richiede un tempo di elaborazione notevolmente gravoso.

Secondo tale metodo infatti la soluzione del problema di stabilità, cioè in definitiva la valutazione del valore del coefficiente di sicurezza da attribuire alla situazione esaminata, corrisponde alla ricerca di un minimo « per tentativi » attraverso l'esame di diverse fratture possibili. L'attendibilità del risultato è perciò commisurata in parte al criterio con cui vengono scelte le linee di frattura, in funzione dell'esperienza acquisita in situazioni analoghe, ma principalmente al numero dei tentativi eseguiti.

Un risultato accettabile richiede quindi un numero notevole di tentativi con conseguente aggravio della indagine di calcolo.

Il procedimento ora approntato non presenta innovazioni di sorta rispetto a quello classico, ma offre i vantaggi derivanti dall'utilizzo del calcolatore elettronico, cioè una elevata rapidità ed esattezza di esecuzione e un notevole risparmio economico.

Questi vantaggi si traducono praticamente nella possibilità di un notevole ampliamento dell'indagine e quindi in una maggior attendibilità del risultato ottenuto.

Un'idea della convenienza economica può essere desunta dalla successiva tabella in cui sono riportati alcuni dati, acquisiti da diversi autori, relativi alla sola operazione di calcolo.

Autore	Costo per sing. verifica		Rapporto a/b
	(a) con metodo grafico	(b) con metodo elettronico	
LITTLE e PRICE (Inghilterra [14])	7.000 L.	175 L.	40
JOHN (USA) [11]	14.000 »	700 »	20
Nostro Studio	12.500 »	950 »	13

Il costo da noi valutato è relativo alle prove fin'ora eseguite.

Considerando che le elaborazioni future potranno essere eseguite con un calcolatore più rapido, che consentirà una riduzione di costo del 50%, si può fin d'ora ritenere il rapporto a/b pari a circa 25.

I valori sopra riportati sono confrontabili solo in modo molto grossolano, per la differenza delle tariffe di personale e di macchina vigenti nelle varie nazioni. Appare tuttavia evidente che, a parità di costo, con il metodo elettronico si potrebbe analizzare un numero di fratture circa venticinque volte superiore a quello realizzabile con metodo grafico.

In pratica non sarà necessario giungere a un rapporto così elevato e si potrà così attuare anche una economia nell'insieme complessivo dei calcoli.

Apparentemente l'unico vantaggio del procedimento sembrerebbe quello economico, ma è da sottolineare che questo induce una sensibile modificazione nel carattere stesso della verifica.

Infatti il procedimento grafico, per il grave onere operativo che impone, costringe a una notevole limitazione del campo d'indagine, che viene determinata dal tecnico in base alla sua esperienza e sensibilità.

Ciò consente come già detto di raggiungere risultati normalmente precisi, ma sempre affetti da un certo grado di incertezza e da una caratterizzazione soggettiva in funzione appunto degli elementi personali del tecnico esecutore.

Il procedimento elettronico al contrario offre la possibilità di una notevole estensione dell'analisi statica, portando così a un risultato più attendibile e più obiettivo.

È da osservare, per inciso, che permane la necessità per il progettista di una notevole esperienza e sensibilità nell'uso del metodo grafico; infatti i due metodi devono integrarsi anche per ragioni economiche, sia nel predisporre al calcolatore un campo di indagine di più sostanziale interesse per la ricerca del fattore di sicurezza critico, sia per intervenire « visivamente » ogni qual volta occorra procedere, rispetto ad un rilevato esaminato, a modifiche di forma o di struttura.

Dalle considerazioni fatte appare di estremo interesse effettuare un sistematico confronto fra i risultati ottenuti con i due metodi — grafico ed elettronico — così da evidenziare le relative qualità specifiche e le eventuali deficienze. A tale scopo è intenzione degli scriventi riesaminare, con il metodo elettronico, un certo numero di opere già eseguite e a suo tempo studiate integralmente con il metodo grafico. Questo argomento esorbita però dai limiti del presente articolo ed eventualmente sarà trattato in una successiva nota.

3 - Formula risolutiva adottata

Il problema considerato si riduce, come già accennato, alla valutazione del valore critico del coefficiente di sicurezza inteso quale valore corrispondente alla situazione riscontrata come più sfavorevole alla stabilità.

È da rilevare che la letteratura tecnica anche recente non è ancora giunta a un criterio univoco per la definizione del coefficiente di sicurezza dei rilevati in terra [1] e [18].

Nella presente trattazione si è adottato, come già detto, il procedimento svedese proposto da FELLENIUS [8], modificato però secondo le ipotesi semplificative di MAY e BRAHTZ [15] che comportano l'eli-

minazione delle forze, sia normali che tangenziali, che si generano internamente alla massa franosa per il mutuo scorrimento dei fronti verticali contigui.

Il coefficiente di sicurezza resta così definito come rapporto fra il totale delle resistenze sviluppabili lungo il cerchio di scorrimento e il totale delle azioni tangenziali lungo il cerchio stesso.

La semplificazione adottata comporta nel risultato un'errore sempre di carattere cautelativo [7], ma di entità variabile in relazione all'ampiezza del cerchio considerato [6], apprezzabile solo per cerchi di scorrimento a grande ampiezza angolare, quali possono verificarsi in presenza di pendii molto ripidi e in situazioni che consentono rotture molto profonde rispetto alla sommità del rilevato (2).

Diversi autori (3) ammettono questa semplificazione la quale viene comunemente applicata nel procedimento grafico (v. POST e LOND [17], JUMIKIS [12], Bureau of Reclamation [4], MALLET e PACQUANT [16]). Pertanto il procedimento è stato impiegato anche nell'applicazione da noi eseguita, in accordo con le esigenze da cui lo stesso si è originato.

Naturalmente non vi è nessuna limitazione nell'impiego del calcolatore, che potrebbe essere adottato con gli stessi vantaggi anche per il procedimento esatto, specialmente se si considera per questo l'espressione analitica datagli dal BISHOP [2] e già utilizzata al riguardo [14].

Secondo le ipotesi assunte nella presente trattazione, il coefficiente di sicurezza può essere indicato schematicamente con l'espressione:

$$F = \frac{R_a + R_c}{T} \quad \text{ove}$$

- R_a = forze resistenti dovute all'attrito
- R_c = forze resistenti dovute alla coesione
- T = forze attive lungo la linea di scorrimento

Indicando le caratteristiche geotecniche come di consueto rispettivamente con γ (peso dell'unità di volume), ϕ (angolo d'attrito) e c (coesione), si può scrivere:

$$F = \frac{N \cdot \text{tg } \phi + L \cdot c}{T} \quad (1)$$

ove N e T rappresentano globalmente le forze rispettivamente normali e tangenziali lungo la linea di scivolamento e L lo sviluppo di tale linea.

Nell'applicazione con il calcolatore si fa riferimento a una sezione tipo di rilevato a larghezza unitaria e tale che risulti definita sia esternamente che internamente (zone di materiali di diverso tipo) da linee comunque inclinate, ma rette.

Per la valutazione delle forze in gioco, la sezione viene suddivisa in un certo numero di strisce verticali di larghezza costante.

(2) Valori molto elevati di questo errore sono stati riscontrati da ESCARIO [7] in relazione a un rilevato con scarpa 1/1 e per cerchi di scorrimento con ampiezza angolare superiore ai 180°.

(3) TERZAGHI [20], KREY [13], MAY [15]; cfr. CAQUOT [6] pag. 506.

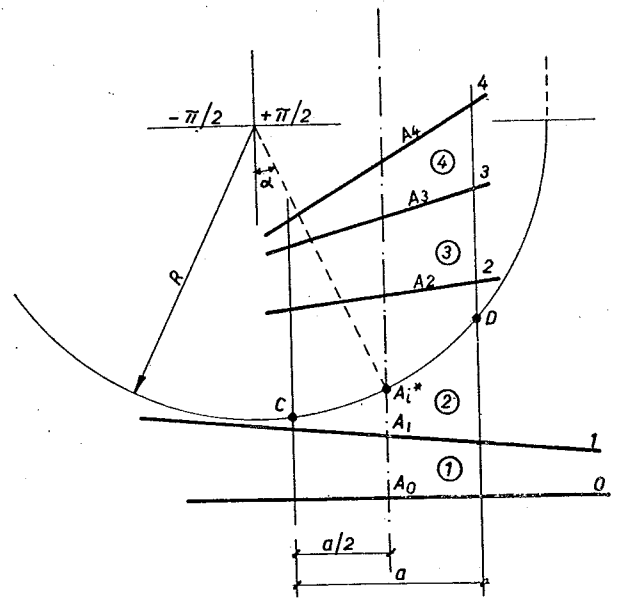


Figura 1

Sia con riferimento alla fig. 1:

- a = larghezza della striscia
- n = indice della striscia considerata
- i = indice delle zone a differenti caratteristiche e delle linee di discontinuità; tale che $0 \leq i \leq I$, ove I indica il numero totale delle linee di discontinuità
- i^* = indice della zona attraversata dal cerchio di scorrimento
- O = centro del cerchio di scorrimento
- R = raggio del cerchio
- A_i^* = punto d'intersezione del cerchio con l'asse della striscia
- α = angolo formato dal raggio per A_i^* con la verticale
- S = sviluppo dell'arco di cerchio (C-D) interno alla striscia.

Se l'ampiezza dell'intervallo « a » è abbastanza piccola si può approssimare la linea di scorrimento con una retta per cui, chiamato P il peso complessivo del materiale, si ha:

$$N_n = P_n \cos \alpha_n; \quad T_n = P_n \sin \alpha_n; \quad S = a / \cos \alpha_n$$

Indicati con Δy_i gli intervalli fra A_{i-1} e A_i , il peso P_n è espresso da:

$$P_n = \sum_{i^*}^I i (\Delta y_i \cdot \gamma_i)$$

per cui l'espressione (1) diventa:

$$F = \frac{\sum_n \left[\sum_{i^*}^I i (\Delta y_i \cdot \gamma_i) \cdot \cos \alpha_n \cdot \text{tg } \phi_i^* + c_i^* \cdot a / \cos \alpha_n \right]}{\sum_n \left[\sum_{i^*}^I i (\Delta y_i \cdot \gamma_i) \cdot \sin \alpha_n \right]}$$

4 - Programmazione per il calcolatore

Per il calcolo ci si è serviti dell'elaboratore elettronico IBM 1620 [10].

Il funzionamento della macchina è condizionato da una sequenza di istruzioni fissata a priori che costituisce il *Programma*.

Tale programma è stato da noi approntato con il sistema *Fortran*, mediante il quale il problema viene dapprima codificato con linguaggio sintetico mediante istruzioni di tipo aritmetico e di tipo logico e successivamente tradotto automaticamente dalla macchina stessa nella forma definitiva.

Per il funzionamento la macchina deve essere rifornita del programma così ottenuto e dei dati variabili per ogni applicazione. Il rifornimento viene attuato mediante schede perforate.

I dati necessari consistono in:

- a) dati di limitazione del problema, i quali servono a definire il numero di ripetizioni di determinati cicli operativi, in relazione sia alle caratteristiche geometriche del rilevato da analizzare, sia alle ipotesi che si intendono assumere;
- b) dati geometrici che specificano la conformazione del rilevato con riferimento a un sistema cartesiano e indicano il tipo di materiale costituente;
- c) dati geotecnici, che caratterizzano i diversi tipi di materiali costituenti;
- d) dati di posizionamento dei cerchi di scorrimento, che permettono di individuare successivamente le coordinate del centro e il raggio del cerchio che deve essere analizzato.

A titolo indicativo si riporta in fig. 2 un riassuntivo schema a blocchi della sequenza d'istruzioni costituenti il programma.

In esso si possono individuare sezioni operative distinguibili come segue:

a) Operazioni preliminari - Mediante queste operazioni il calcolatore predispone i campi di memorie necessarie all'immagazzinamento delle variabili nel numero massimo previsto - « *Dimension* » - e prepara gli schemi secondo cui deve ricevere i dati in lettura e restituire i risultati in stampa - « *Format* ».

b) Operazioni di lettura e di stampa. Come già detto i dati in lettura vengono forniti mediante schede perforate.

I risultati, che comprendono il valore del coefficiente di sicurezza e i parametri del cerchio relativo (coordinate del centro e raggio) vengono invece direttamente stampati.

c) Elaborazioni dei dati geometrici.

d) Operazioni per la scelta del cerchio da esaminare e per la valutazione dei parametri che lo identificano.

Riguardo ai punti *c*, *d*, *e*, sopra riportati occorre osservare quanto segue.

L'elaborazione dei dati geometrici è condizionata dal valore dell'intervallo « *a* » costante e prefissato

per ogni singola applicazione. Naturalmente l'approssimazione del risultato sarà tanto più spinta quanto più è piccolo tale intervallo. Ridurre l'intervallo significa evidentemente aumentare il numero delle operazioni da eseguire e pertanto implica un più oneroso impiego del calcolatore. D'altronde la scelta di un intervallo molto piccolo può essere superflua in relazione a una figura da esaminare geometricamente semplice, mentre può divenire indispensabile per seguire la geometria di una figura più complessa, per la presenza di numerose e variamente intrecciate linee di discontinuità.

La scelta dell'ampiezza dell'intervallo è perciò strettamente legata al tipo di rilevato da analizzare e resta un fatto da definire caso per caso.

La valutazione della situazione critica richiede la analisi di numerosi cerchi di scorrimento. La scelta dei cerchi da esaminare è prevista a schema preordinato, intendendo con ciò che i vari cerchi sono fissati a priori e indicati al calcolatore mediante lettura di dati che rappresentano appunto i loro parametri.

Ciò permette di analizzare la successione di cerchi più opportuna in relazione alle necessità della progettazione e agli interrogativi per cui viene posta l'analisi stessa.

Una scelta automatica basata esclusivamente sulla ricerca di un minimo locale sarebbe concettualmente preferibile e più semplice dal lato applicativo, ma è stata per ora scartata in quanto sembra poter risultare troppo condizionata da un carattere di limitatezza e non fornire un quadro generale della situazione dell'opera in esame, fatto questo già osservato anche da altri autori (*).

Il numero dei cerchi esaminabili è indefinito. A rigore, per la soluzione del problema di stabilità, sarebbe sufficiente conservare il coefficiente di sicurezza del cerchio critico; il programma è stato però allestito in modo da poter memorizzare e poi stampare un certo numero dei coefficienti di sicurezza più bassi. In tal modo viene offerta una documentazione che permette non solo di conoscere il valore critico assoluto del coefficiente di sicurezza, ma anche di avere un quadro complessivo della stabilità e di apprezzare l'estensione della situazione critica.

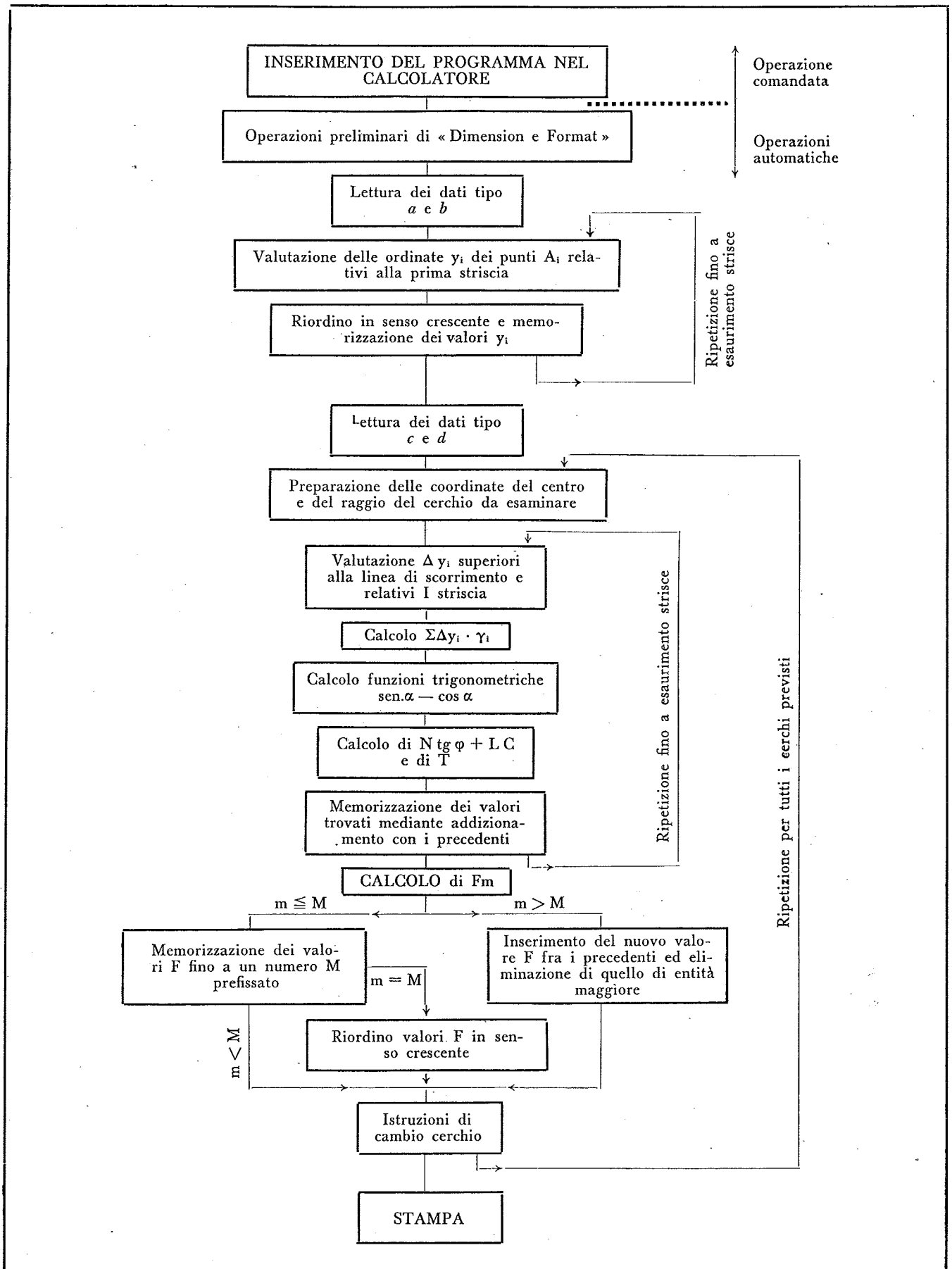
Per sveltire le operazioni di compilazione dei dati è tuttavia prevista la possibilità di esaminare una serie di cerchi con centri su un reticolo a passo costante, fissando semplicemente origine, ampiezza e passo di tale reticolo. In questo caso tutti i cerchi esaminati hanno raggio tale per cui risultano tangenti a un piano orizzontale comunque fissato.

Nello stesso calcolo è però possibile, variare più volte la posizione del fronte di tangenza, come pure abbinare la ricerca mediante reticolo con quella di cerchi isolati comunque fissati.

Infine si osserva, per quanto riguarda la valuta-

(*) L'intento del sistema è infatti di ricercare il minimo assoluto del coefficiente di sicurezza, mentre i dati acquisiti indicano generalmente anche l'esistenza di minimi locali, con valore maggiore di quello assoluto, che possono condizionare sfavorevolmente una ricerca completamente automatica, cfr. [11] [14].

Figura 2



zione della formula risolutiva, che il calcolo si svolge in modo tale da prendere in considerazione solo la parte inferiore del cerchio di scorrimento (semicerchio inferiore per α compreso fra $-\pi/2$ e $+\pi/2$, v. fig. 1), che risulta così raccordato ai suoi estremi con linee verticali. Il fatto che il cerchio di scorri-

A titolo esemplificativo si riportano in fig. 3 gli elementi essenziali di un caso recentemente studiato.

In figura è data la sezione schematica del rilevato e nelle tabelle I, II, III e IV i dati necessari alla soluzione del problema; in tabella V infine sono riportati i risultati.

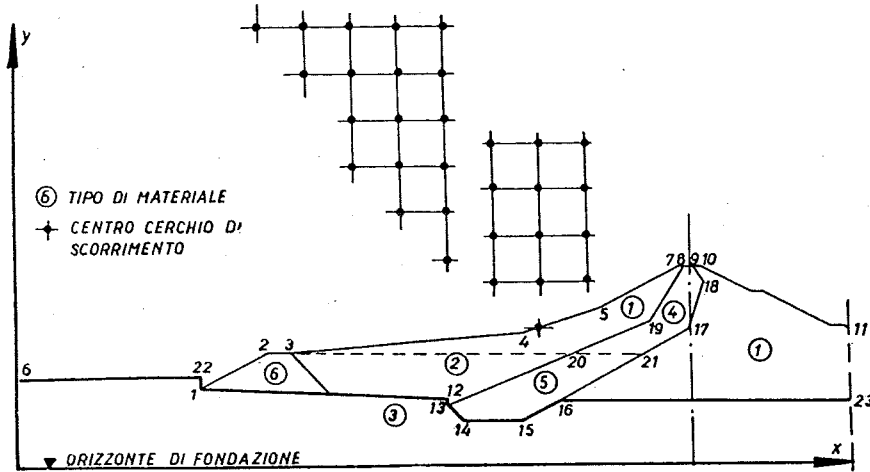


Figura 3

mento critico interessi un pendio anche in zone superiori all'orizzontale per il suo centro ($\alpha > \pi/2$) è di interesse non rilevante in relazione all'inclinazione dei pendii usualmente oggetto di analisi.

Tuttavia, nel caso esso si verificasse e in ragione della limitatezza della zona interessata, la modalità di calcolo evidenziata è la più rispondente al comportamento reale dei terreni dotati di coesione per i quali ha particolare interesse il metodo di verifica qui considerato [20] [5].

TABELLA I: Coordinate punti-dati tipo « b »

N°	X	Y
1	71,00	31,00
2	98,00	44,50
3	105,01	44,50
4	195,00	50,50
5	225,00	60,50
6	0,0	34,00
7	255,00	75,50
8	258,00	75,50
9	262,00	75,50
10	265,00	75,50
11	416,00	0,0
12	167,00	25,50
13	167,00	24,00
14	174,30	17,50
15	194,30	17,50
16	206,30	23,50
17	258,30	49,50
18	265,30	70,50
19	244,00	54,50
20	219,01	44,50
21	247,50	44,50
22	71,00	34,00
23	374,00	21,00
24	121,50	28,00

TABELLA II: Specifica linee e materiali dati tipo « b »

N°	s	d	m
1	6	22	3
2	1	2	6
3	2	3	6
4	3	4	1
5	4	5	1
6	5	7	1
7	7	8	1
8	8	9	4
9	9	10	1
10	10	11	1
11	3	20	2
12	1	12	3
13	13	20	5
14	20	19	4
15	19	8	4
16	13	14	3
17	14	15	3
18	15	16	3
19	16	17	1
20	17	18	1
21	9	18	4
22	20	21	5
23	16	23	3
24	3	24	6

TABELLA III: Dati geotecnici - tipo « c »

N°	γ_N	γ_T	tg. ϕ	c
1	2,03	2,12	0,781	2,0
2	1,12	1,12	0,781	2,0
3	1,02	1,02	0,176	7,5
4	1,20	2,20	0,268	3,0
5	1,20	1,20	0,268	3,0
6	1,00	1,00	0,577	0,0

TABELLA IV: Dati posizionamento cerchi - tipo « d »

N°	r	o	v	x	y
1	1	0	3	95,00	170,00
2	1	0	3	113,00	152,00
3	1	0	5	131,00	116,00
4	1	0	5	149,00	98,00
5	1	0	5	167,00	80,00
6	1	0	4	185,00	71,00
7	1	0	4	203,00	53,00
8	1	0	3	221,00	71,00

TABELLA V: Risultati

N°	F	X	Y	R
1	1,3034	203,0000	71,0000	71,0000
2	1,3938	203,0000	53,0000	53,0000
3	1,4133	185,0000	89,0000	89,0000
4	1,4644	203,0000	89,0000	89,0000
5	1,4898	185,0000	107,0000	107,0000
6	1,4931	221,0000	71,0000	71,0000
7	1,5585	185,0000	71,0000	71,0000
8	1,5614	167,0000	116,0000	116,0000
9	1,5952	167,0000	134,0000	134,0000
10	1,6134	185,0000	125,0000	125,0000
11	1,6255	203,0000	107,0000	107,0000
12	1,6324	167,0000	98,0000	98,0000
13	1,6537	167,0000	152,0000	152,0000
14	1,6820	149,0000	134,0000	134,0000
15	1,7028	149,0000	152,0000	152,0000
16	1,7086	221,0000	89,0000	89,0000
17	1,7262	185,0000	143,0000	143,0000
18	1,7407	149,0000	170,0000	170,0000
19	1,7464	167,0000	170,0000	170,0000

L'indagine è stata condotta esaminando cerchi di scorrimento tutti tangenti ad un orizzonte di fondazione prefissato. Ne consegue che ogni punto dello spazio può essere centro di un unico cerchio e perciò associato ad un solo valore del coefficiente di sicurezza; si può così comporre con significato univoco un diagramma collinare collegando i punti caratterizzati da uguale coefficiente di sicurezza.

Questo diagramma è riportato, nel caso esemplificato, nella figura 4.

5 - Limitazione del campo d'indagine

La rapidità di funzionamento del calcolatore elettronico consente di attuare, in limiti accettabili di tempo e di costo, una ricerca della situazione critica di scorrimento di ampiezza tale da coprire tutto il possibile campo d'indagine.

È però evidente che la possibilità di ridurre questo campo delimitando a priori la zona in cui dovrebbe situarsi il cerchio di scorrimento critico, si traduce praticamente in un vantaggio economico ben notevole.

I metodi teorici generali di individuazione del cerchio critico, da quello di FELLENIUS (1927) [8] a quello proposto da FISSENKO (156) [9] sulla base delle teorie del SOKOLOWSKIY [19], considerando rilevati di materie omogenee e con scarpa uniforme, non possono evidentemente essere di apprezzabile aiuto nel caso più generale di rilevati zonati e con parametri mistilinei.

Questa constatazione non deve tuttavia far scartare a priori la possibilità di individuare, se non la

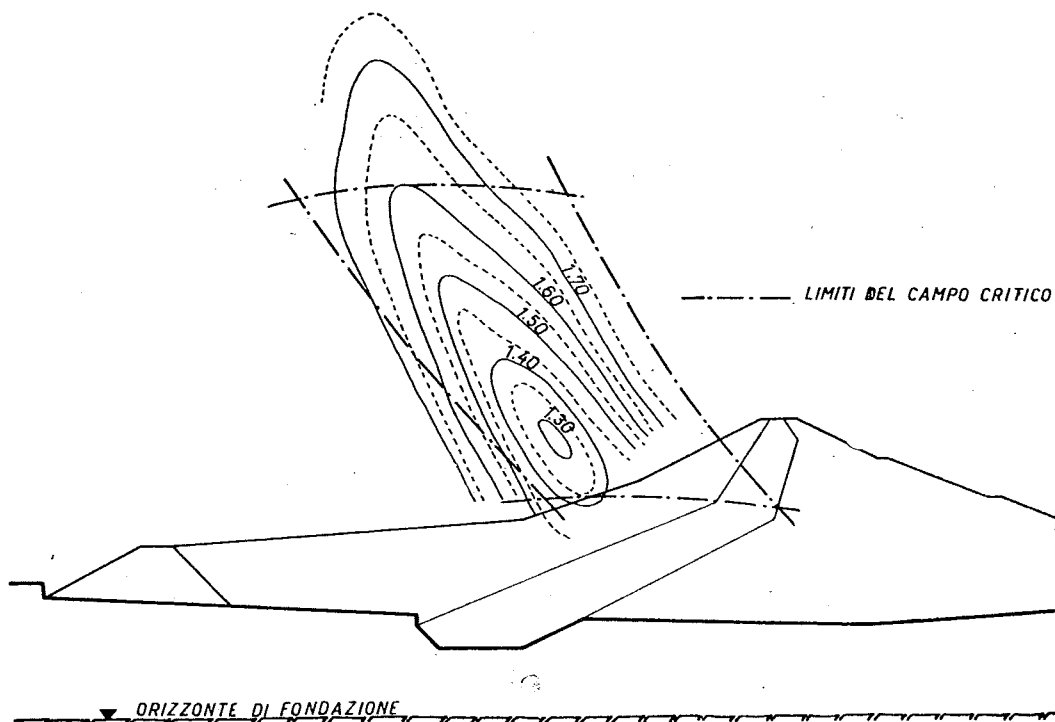


Figura 4

esatta posizione del cerchio di scorrimento critico, almeno una zona limitata in cui tale cerchio debba sicuramente trovarsi.

In effetti ci sembra di poter correttamente delineare una pratica applicativa sulla base delle seguenti osservazioni.

È opportuno precisare preliminarmente che il problema qui preso in considerazione è solo quello della stabilità generale del complesso rilevato — fondazione, nella situazione in cui questa sia limitata inferiormente da una formazione più resistente, con esclusione del caso più particolare della stabilità di singole porzioni del rilevato.

Con questa visuale si può attendibilmente ritenere, sulla base dell'esperienza acquisita, che il cerchio critico risulti tangente alla formazione di base e passi nelle vicinanze del punto A (fig. 5) e comunque mai al di sotto di esso.

curve che delimitano compiutamente la zona in cui si trova il centro del cerchio critico, che deve inoltre mantenersi tangente al fronte di base.

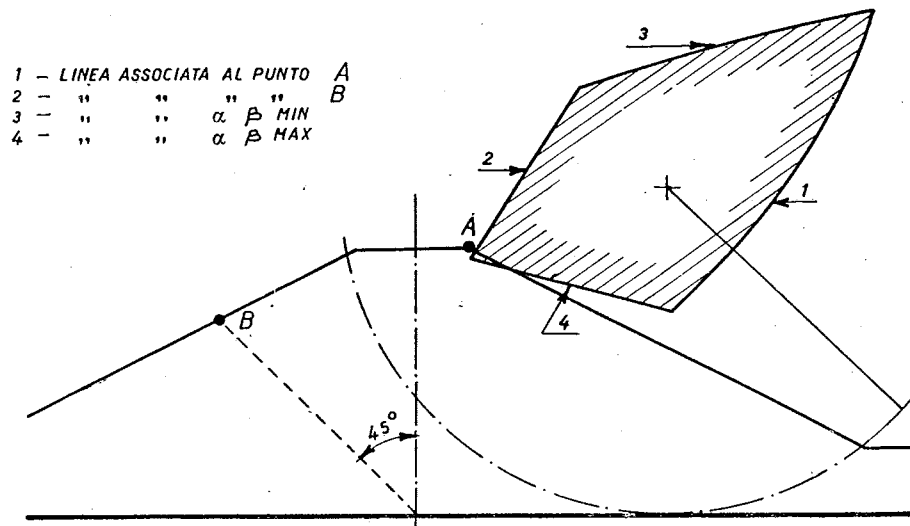
Il metodo appare giustificato nell'impostazione, ma il risultato resta dipendente dalla scelta delle ipotesi di partenza, cioè: posizione dei punti A e B e apertura angolare β_{min} e β_{max} . Tali parametri possono essere fissati solo in base all'esperienza acquisita e pertanto il metodo resta di carattere completamente empirico e da confermare sperimentalmente.

Nei casi da noi esaminati, si è riscontrata una buona attendibilità fissando i punti A e B come illustrato in fig. 5 e ponendo $\beta_{min} = 100^\circ$, $\beta_{max} = 180^\circ$.

Per il caso precedentemente riportato come esempio in fig. 3 lo spazio così definito è indicato in fig. 4.

Tuttavia la limitazione dei casi esaminati non permette per ora indicazioni di carattere generale.

Occorre infine osservare che non solo le ipotesi di



- 1 - LINEA ASSOCIATA AL PUNTO A
- 2 - " " " " B
- 3 - " " " " $\alpha \beta$ MIN
- 4 - " " " " $\alpha \beta$ MAX

Figura 5

Pertanto, tracciata la linea luogo dei centri passanti per A e tangenti alla formazione compatta, si può ritenere che il centro del cerchio critico risulti sempre al di sopra di essa. Questa linea, già evidenziata in una memoria del 1960 di BISHOP e MORGENTERN [3], costituisce così un confine della zona di indagine.

Analogamente si può considerare un punto abbastanza arretrato rispetto al culmine A della scarpata, in modo che i cerchi che lo oltrepassano siano tali da avere scarso significato per la stabilità, e associare a tale punto una seconda linea con metodo analogo al precedente.

Un altro elemento di limitazione si può trarre dalla constatazione che l'apertura angolare dei cerchi critici ha un valore non eccessivamente variabile e perciò individuabile entro due valori estremi β_{min} e β_{max} . In funzione di questi limiti si possono tracciare altre due linee luogo dei centri dei cerchi di tale apertura e tangenti alla formazione di base.

In questo modo si possono determinare quattro

partenza sono da precisare mediante l'esperienza acquisita, ma anche che l'impostazione stessa trova giustificato riscontro unicamente nella specifica situazione qui considerata.

6 - Conclusioni

Si può dire in definitiva che il metodo esposto, pur condizionato dalle stesse ipotesi semplificative correntemente adottate nel metodo grafico, è risultato corrispondente agli scopi che ci si erano proposti, cioè: rapidità e precisione di calcolo.

Inoltre anche l'individuazione del cerchio critico risulta notevolmente più precisa e obiettiva che nel metodo manuale, senza che per questo si debba ricorrere a un eccessivo ampliamento dell'indagine, in quanto si possono con facilità e chiarezza fissare a detta indagine opportuni limiti abbastanza ristretti.

È però da ribadire che l'individuazione dei limiti

è di carattere puramente empirico e da attuare caso per caso, almeno finché non si sarà acquisito un numero di dati sufficienti per precisare ed estendere a un campo generale le considerazioni fatte.

Bibliografia

- [1] DE BEER E. E. et LOUSBERG E., « *Définition des coefficients de sécurité au glissement de talus à partir des sollicitations provoquant la rupture* », V Congresso di meccanica della terra, Parigi 1961.
- [2] BISHOP A. W., « *The use of the slip circle in the stability analysis of slopes* », Geotechnique 1955.
- [3] BISHOP A. W. and MORGENSTERN N., « *Stability Coefficients for Earth Slopes* », Geotechnique 1960.
- [4] BUREAU OF RECLAMATION, « *Treatise on Dams* », Chapter 8, Earth Dams.
- [5] CHRISTOW C. K., « *Das graphisch-analytische Verfahren von G. L. Fissenko zur standsicherheitsbeurteilung und berechnung von Böschungen* », Die Bautechnik 1963.
- [6] CAQUOT A. et KERISEL J., « *Mécanique des Sols* », Parigi 1956.
- [7] ESCARIO V., « *Errors Arising from the Simplified Method of Slices* », V Congresso di meccanica delle terre, Parigi 1961.
- [8] FELLENIUS W., « *Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion und unter Annahme Kreiszyklindrischer Gleitflächen* », Berlino 1927.
- [9] FISSENKO G. L., « *Standicherheit von Böschungen der Braunkohlentagebaue* », Mosca 1956.
- [10] I. B. M., « *Sistema Elettronico 1620* », Dispensa 23-0098.
- [11] JOHN K., « *Über die Verwendung von Elektronenrechenmaschinen beim Entwurf von Erddämmen* », Die Bautechnik 1961.
- [12] JUMIKIS A. R., « *Soil Mechanics* », New York 1962.
- [13] KREY H., « *Erddruck, Erdwiderstand und Tragfähigkeit des Baugrundes* », Berlino 1926.
- [14] LITTLE A. L. and PRICE V. E., « *The use of an electronic computer for slope stability analysis* », Geotechnique 1958.
- [15] MAY D. R. and BRAHTZ J. H., « *Proposed methods of calculating the stability of earth dams* », II Congresso Grandi Dighe 1936.
- [16] MALLET G. et PACQUANT J., « *Les Barages en terre* », Eyrolles, Parigi 1951.
- [17] POST G. et LONDE P., « *Les barrages en terre compactée* », Gauthier, Parigi 1953.
- [18] SINISCALCHI C., « *Lo sviluppo dei metodi per la verifica di stabilità dei rilevati* », VI Congresso di Geotecnica, Pisa 1963.
- [19] SOKOLOWSKI W. W., « *Statika syputschey sredi* », Mosca 1942, Londra 1960.
- [20] TERZAGHI K. and PECK R. B., « *Mécanique des sols appliquée* », Dunod-Parigi 1961.

ANALYSE DE STABILITÉ DES TALUS PAR L'EMPLOI D'UNE CALCULATRICE ÉLECTRONIQUE

Sommaire: Remarqué l'exigence de plus en plus sentie pour les projeteurs des ouvrage en terre, de compter pour l'analyse de stabilité d'un ensemble fondation-remblais, sur des méthodes rapides et économiques, on montre les critères pour la préparation d'une analyse statique fondée sur la méthode suédoise des cercles de glissement, par l'emploi d'une calculatrice électronique.

On décrit les données nécessaires pour la mise en oeuvre de la machine et son schéma opératif.

Pour borner le champ de recherche de la surface de rupture critique, on expose quelques considérations déduies par des applications pratiques.

SLOPE STABILITY ANALISYS WITH APPLICATION OF AN ELECTRONIC COMPUTER

Summary: The exigence more and more urgent for designing engineers of earth works to have rapid and economics methods for slope stability analysis is remarked, and criteria used to make ready a static analysis based on Swedish method of slices circles with application of an electronic computer are exposed.

Necessary data to the function of electronic computer are described and its scheme of work is shown here.

To limit the research of critical rupture surface some considerations deduced by practical applications are reported.