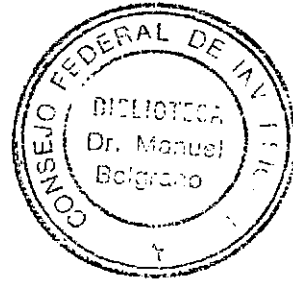


0
X12
V15
I

38127

INFORME PARCIAL N°1

INDICE TEMATICO



I) Selección de los sitios de estudio.

II) Trabajos a realizar en la estructura de Vertedero, Compuertas y muro de Contrafuertes de la Presa Cruz de Eje (Cba).

II-1) Síntesis de la composición del dique y sus anexos.

- a) Muro Central
- b) Conductos de Toma
- c) Descargadores de Fondo
- d) Vertedero y Anexos
- e) Dique de Tierra
- f) Dique de Escollera

II-2) Trabajos a realizar en la fundación de la estructura del Vertedero y zonas de Compuertas.

II-3) Estudios previstos con Ensayos no Destructivos en sectores del Muro de Contrafuertes.

II-4) Análisis de Estabilidad de Taludes en el Estribo de Margen Derecha y Acceso Carretero al Dique San Roque (Cba)

III) Anexo - Reducciones de planos (plantas y cortes) ilustrativas de la composición estructural del Dique Cruz del Eje.

- a) Planta general
- b) Vertederos, plantas y cortes
- c) Vista lateral de la unidad de máxima altura del Muro Central
- d) Perfil longitudinal

IV) Documentación Fotográfica, zona de Vertederos y Muro principal (Contrafuertes Noetzli).

a) Macizo rocoso de emplazamiento, margen y apoyo izquierdo (con punto de vista hacia aguas abajo) del Vertedero.

b) Contacto del Vertedero con la estructura de compuertas automáticas.

c) Muro de Ala separador del Vertedero y Compuertas, Macizo rocoso de Estudio.

d) Muro de Ala derecho, límite de compuertas automáticas, Macizo rocoso del Canal de Fuga.

e) Macizo rocoso fracturado y descomprimido, borde izquierdo del canal de fuga.

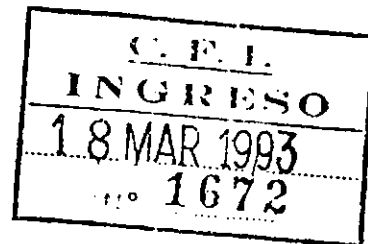
f) Contacto de Contrafuertes con zona de vertedero.

g) Macizo Rocosos de margen izquierdo del Canal de Fuga (zona de relevamientos con escan lines)

h) Canal de Fuga.

i-j) Muro principal de Contrafuertes..

0/X-12
V15
I

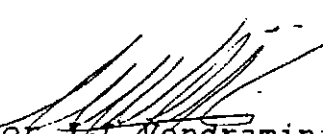


Córdoba 16 de Marzo de 1983

CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES
San Martín 871
1004-Buenos Aires

Con la presente se adjunta el informe parcial N°1 correspondiente al Contrato de Obra, expediente Nro. 2433, "Uso de Ensayos No Destructivos y Modelización Geomecánica aplicados a obras estratégicas".

Saludo Atentamente



Néstor J. L. Vendramini
Geólogo Experto
M.P. 453

NOTA :

Se adjunta el recibo del pago correspondiente a la entrega de dicho informe. contrato expediente N° 24333.

k-1) Fisuramiento de Cabezas de Contrafuertes (vista de arriba). Zona de Interés de evaluación con Ultrasonido y Esclerometría.

V) Planillas de Cálculo Planialtimétrico y plano en elaboración


VI) Anexo - Metodologías de desarrollo original que se aplicarán en los estudios

1) Modelo probabilístico para el tratamiento de datos estructurales (discontinuidades).

2) Tratamiento integral de datos de orientación y espaciamiento, determinación de frecuencias Principales, máximas y mínimas.

3) Modelo para el Cálculo de Estabilidad de Taludes, Análisis Estocástico.

4) Modelización de datos de Resistencia al Corte, por el Criterio de Barton.



Geólogo Néstor.J.L. Vendramini

CONTRATO DE OBRA
EXPEDIENTE N° : 2433
PROVINCIA : CORDOBA
TITULO : " USO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y MODELIZACION
GEOMECANICA".
EXPERTO: GEOLOGO NESTOR JOSE LUIS VENDRAMINI

INFORME PARCIAL I.

I) SELECCION DE LOS SITIOS DE ESTUDIO : De acuerdo con las unidades temáticas de investigación propuestas en el plan de trabajos, se han determinado los siguientes:

1.- Relevamiento geológico - geotécnico del macizo rocoso de fundación del Vertedero y Estructura de Compuertas de la Presa Cruz del Eje (Córdoba), incluyendo su Clasificación Geomecánica y Parametrización.

2.- Evaluación del fisuramiento y las condiciones estructurales del Hormigón de las Cabezas de los Contrafuertes (tipo Noetzli - Muro Central Presa Cruz del Eje) se elegirán Contrafuertes testigos de un total de 86 existentes, en el sector de presa de Hormigón Aligerado (contrafuertes).

3.- Determinación de las condiciones de estabilidad, definiendo factores de seguridad, con un modelo estadístico-probabilístico del Macizo Rcoso que conforma el Talud del acceso y Estribo de margen derecha, del Dique San Roque (Córdoba).

Estos estudios con carácter preliminar tienen como finalidad principal desarrollar, ajustar y aplicar metodologías específicas para evaluaciones de seguridad de obras de envergadura, tales como Obras Hidro - Energéticas, Vías de Comunicación, Centrales Nucleares etc.

En este primer informe se realiza una presentación metodológica, de modelos para la evaluación geomecánica de macizos rocosos, de propio desarrollo, las que han sido ajustadas, para aplicaciones específicas en los sitios de estudios propuestos, ya mencionados, incluyendo la puesta a punto de los softwares de cálculo.

II) TRABAJOS A REALIZAR EN LA ESTRUCTURA DE VERTEDERO, COMPUERTAS Y MURO DE CONTRAFUERTE DE LA PRESA CRUZ DEL EJE.

II-1) SINTESIS DE LA COMPOSICION DEL DIQUE Y SUS ANEXOS

El dique se emplaza en el sitio donde capta íntegramente las afluencias del río Cruz del Eje y donde, los estudios realizados en su época (anterior a 1940) evidenciaron que con el mínimo se masa de fundaciones y elevación, para cerrar la garganta, arrojaba el reservorio de capacidad máxima.

Su longitud total de 3080 metros, esta integrada por siete tramos rectos con ángulos muy abiertos, ligados por curvas suaves, formando así la alineación que resulto de coste mínimo.

Se compone de los siguientes órganos solidarios entre sí, según se muestra en planta y perfil:

a) Muro Central - Con 860 m. de longitud y alturas entre 17 m. y 40 m. de Hormigón a contrafuertes de cabeza redonda, tipo Noetzli, con 86 unidades distanciadas entre sí 10 m. o sea el ancho de cada cabeza contra el agua. La cresta, con su parapeto al agua y su baranda de hierro sirve de andén en los 860 m. con ancho mínimo de 2 m. (criteriosamente se evaluará el fisuramiento de algunas de estas estructuras).

b) Dos conductos de toma - Unidos de reja y casilla común con válvulas de descarga tipo aguja, y sistema preparado para conectar con los 2 caños de presión \varnothing 1.10 m.

c) Dos descargadores de fondo - Construidos de caños de fundición \varnothing 0.60 m. Tienen boca común de entrada con sendas compuertas de emergencia seguida con válvulas esclusa de salida vertiendo al río.

d) Vertedero y anexos - Con 59 m. de longitud, en muro de hormigón, unido de dos escotaduras de 27 m. * 8 m. c/u. que sierran por sendas compuertas automáticas a el sector flotante de Hormigón armado que cuando se Hundes en sus respectivas fosas permiten evacuar 2000 m³ / s, vertiendo en una pileta de amortiguamiento, seguida de un canal de salida al río de 60 m de ancho por 200 m de largo (sector de evaluación geomecánica del presente trabajo).

e) Dique auxiliar de tierra - con longitud de 2000 m. y altura máxima de 20 m. ligado al muro principal con un cabecero dentado de hormigón que lleva consigo media cabeza redonda, el terraplén está hecho con tierras prolijamente compactadas y su

cara de agua, lleva diente ,pantalla y parapeto de hormigón armado, la de aguas abajo va protegida por una cáscara de delgada de hormigón pobre, formando mosaico, su cresta forma calzada de doble vía hasta el contacto con el muro principal, donde hay un Rond-point, seguido de otra calzada descendente hasta llegar al terreno natural. Varios dispositivos drenantes e interceptores completan el dique de tierra.

f) dique auxiliar de escollera - Con longitud de 140.40 m. y altura máxima de 10 m - es un pedraplén granítico tipo Dix River que va adosado al vertedero y lleva diente, pantalla y parapeto de hormigón armado sobre su cara de aguas arriba, mientras que su talud de aguas abajo es de bloques acomodados a mano.

II-2) Trabajos a realizar en la fundacion de la estructura del vertedero y zona de compuertas.

A partir de los afloramientos de roca, existentes en el macizo de fundación de toda "la estructura de hormigón compuertas / vertederos" y por ser esta una parte vital en el comportamiento de servicio de la obra, se considero la evaluación, clasificación y parametrización de este macizo (mecánica de rocas), incluyendo:

.- Relevamiento planialtimétrico del afloramiento (base topográfica), escala 1 : 250 en el cual se a avanzado un 70%, presentándose en este informe el plano preliminar y el cálculo taquimétrico realizado con un computador portable Hewlet Pakcard los que serán tratados y formateados luego con hoja de cálculo en PC.

.- Evaluación litológica y estructural, apoyada sobre la base anterior, (mapa geológico).

.- Relevamiento del fracturamiento (diaclasas) con criterio de medición general por zonas de muestreo y según escanlines. Tratamiento con un modelo estadístico - probabilístico (MEP) a los datos de orientación, definiendo el número de familias, sus coordenadas representativas y parámetros estadísticos (elipses de dispersión), se anexan los aspectos principales de este modelo.

.- Los datos de espaciamiento de fracturas, obtenidos luego de realizada una zonificación del afloramiento, se procesarán con el modelo que se adjunta, obteniéndose estadísticamente los valores característicos como así también la función de distribución. Con estos valores se calcularán los RQD (Rock Cuality Designation) parámetro importante para las clasificaciones geomecánicas a realizar posteriormente.

.- Obtenidos los datos de entrada, el macizo o las zonas de macizo determinadas se clasificarán utilizando La Clasificación Geotécnica de Beniaowski (CSIR) definiéndose los rating correspondientes.

.- La parametrización que se defina con la secuencia de estudios explicitada será mejorada con la realización de ensayos de mecánica de rocas en muestras de pequeña sección, corte directo y point load (métodos en los que el subscripto ha trabajado extensamente - ver curriculum vitae).

.- Finalmente se obtendría un documento actualizado de la roca de emplazamiento de esta importante estructura, esto a partir de investigaciones de superficie, pudiendo de acuerdo a los resultados que se obtengan, sugerirse una investigación de subsuelo. Además se realiza una presentación metodológica de evaluación que es de interés del subscripto y colaboradores aplicar en otros sitios de interés (ver documentación fotográfica).

II-3) ESTUDIOS CON ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DE SECTORES DEL MURO DE CONTRAFUERTE

De acuerdo a la experiencia reunida actualmente, através de competentes trabajos de aplicación práctica y líneas de investigación es consistente suponer que la aplicación de los ensayos no destructivos (END) para predecir y/o evaluar condiciones fisico-mecánicas de estructuras de hormigón u hormigón armado, constituye una técnica eficiente y expeditiva.

Se prevee realizar evaluaciones (con carácter preliminar) de Ultrasonido y eventualmente Esclerometría en sectores donde las estructuras (contrafuertes) están visiblemente afectadas por fisuramiento (mas de 40 años de servicio) y zonas donde el hormigón no se encuentra en principio degradado.

De acuerdo con las inspecciones in - situ realizadas es de interés realizar mediciones del fisuramiento en la parte superior de algunos contrafuertes (cabezas) testigos, lo que incluiría ; Materialización de algunas líneas de muestreo (scan lines), a fin de evaluar y documentar las característica físicas de las fisuras como su, espesor, persistencia, relleno y espaciamiento. A su vez la mismas zonas realizar ultrasonado y si es posible esclerometría lo que permitiría deducir parámetros resistentes y algún dato de profundidad en las fisuras mayores (ver documentación fotográfica).

El problema de este plan de trabajo (para el cual se están realizando gestiones y evaluaciones a fin de comenzar lo próximo) es el riesgoso acceso a la parte superior de los contrafuertes a fin de realizar las mediciones. En efecto se debe trabajar "colgado" pisando el paramento inclinado y muy próximo a cables de tensión (en este sentido se gestionará el corte de energía en los lapsos de estudio).

II-4) Estudios de Estabilidad de Taludes en el Estribo de Margen Derecha y Acceso Carretero al Dique San Roque

Este trabajo cuya documentación fotográfica, se anexará en el próximo informe, incluirá la aplicación integral de las herramientas geomecánicas computacionales presentadas, a un importante y estratégico macizo rocoso, tal lo constituye, la parte superior del estribo de margen derecha de la presa San Roque (Cba) y Talud principal de la carretera inmediata de acceso.

La zona elegida a tenido frecuentes deslizamientos de bloques de volúmenes importantes (ya que se han generado taludes de alto ángulo). Años atrás uno de estos, inutilizó por varios días uno de los puentes carreteros incluido dentro de la zona de trabajo. Los estudios a realizar incluirán las siguientes tareas geológico - geotécnicas:

- Relevamientos topo / geológico-estructurales según perfiles transversales a la ruta, en progresivas consideradas de mayor interés de evaluación en cuanto a su estabilidad.

- Clasificación geomecánica (Beniawski - ISRM) de los macizos que conforman los taludes.

- Tratamiento de las discontinuidades con el modelo estructural probabilístico (MEP).

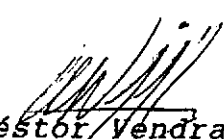
- Análisis preliminares de estabilidad (Test de Marcland).

- Análisis numéricos determinando factores de seguridad por Equilibrio Límite considerando máxima carga de variables, y evaluación Estocástica (Simulación de Montecarlo).

Córdoba 16 de Marzo de 1983

CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES
San Martín 871
1004-Buenos Aires

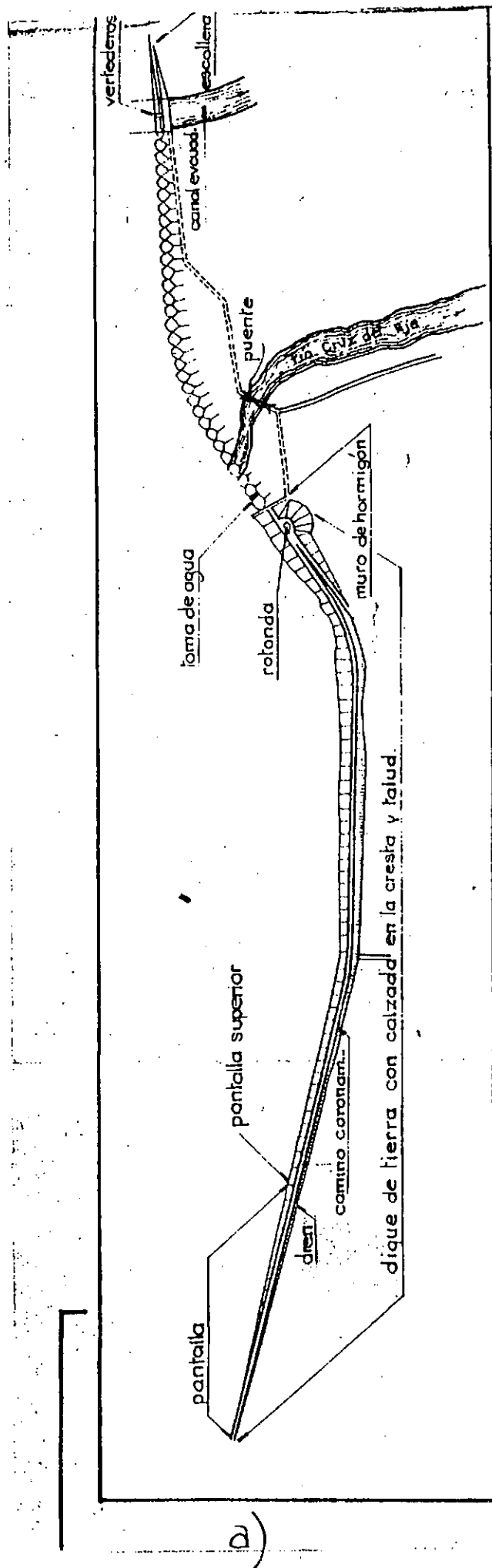
Con la presente se adjunta el informe parcial N°1
correspondiente al Contrato de Obra, expediente Nro. 2433,
"Uso de Ensayos No Destructivos y Modelización Geomecánica".
Saludo atentamente



Néstor Vendramini
Geólogo Experto
M.P. 453

ANEXO REDUCCIONES DE PLANOS

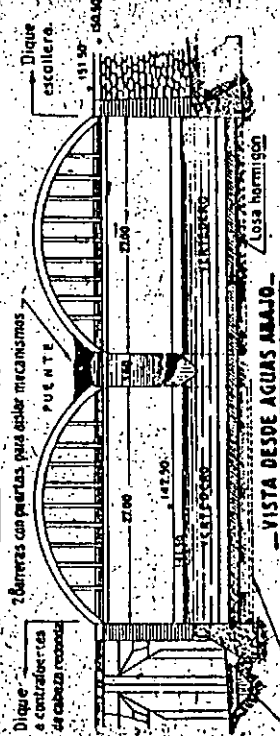
COMPOSICION ESTRUCTURAL DEL DIQUE



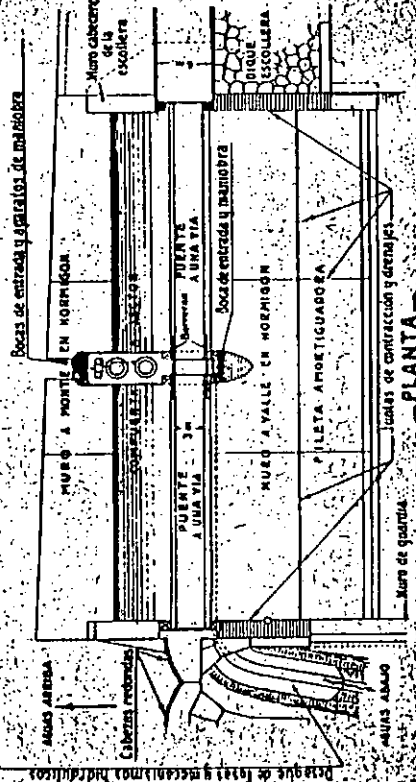
PRESA DE EMBALSE CRUZ DEL EJE

VERTEDEROS

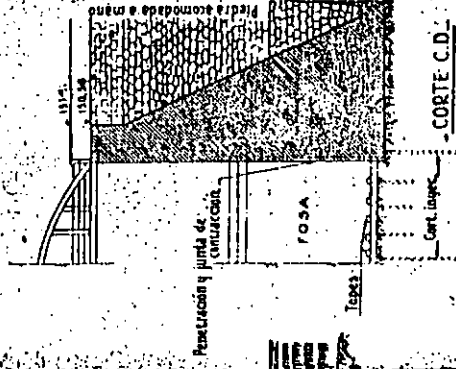
Escala 0 5 10 15 20 metros



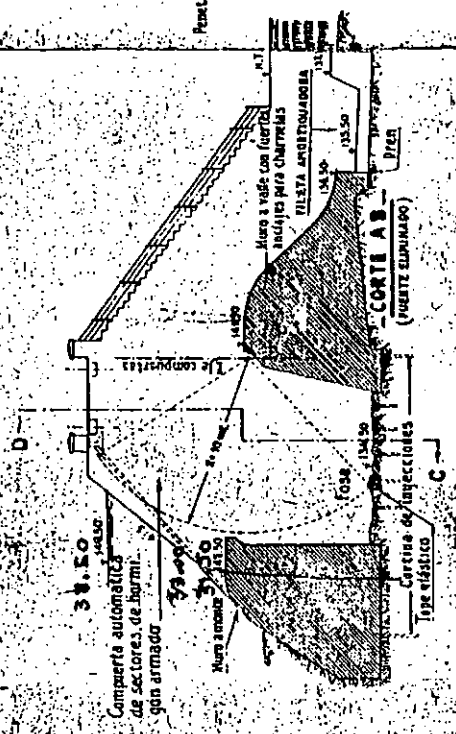
VISTA DESDE AGUAS AMALIO



PLANTA

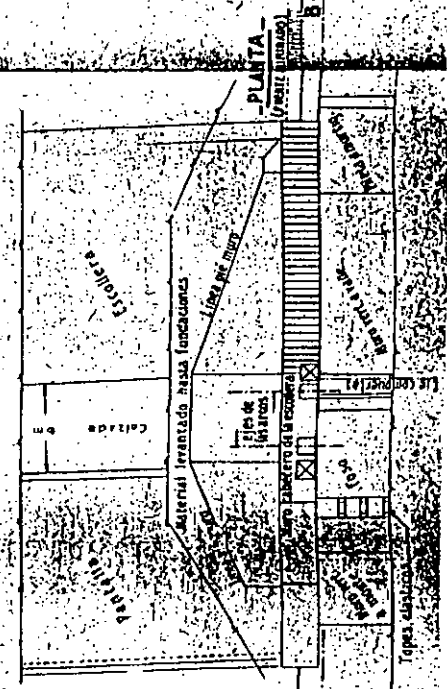


CORTE C.D.



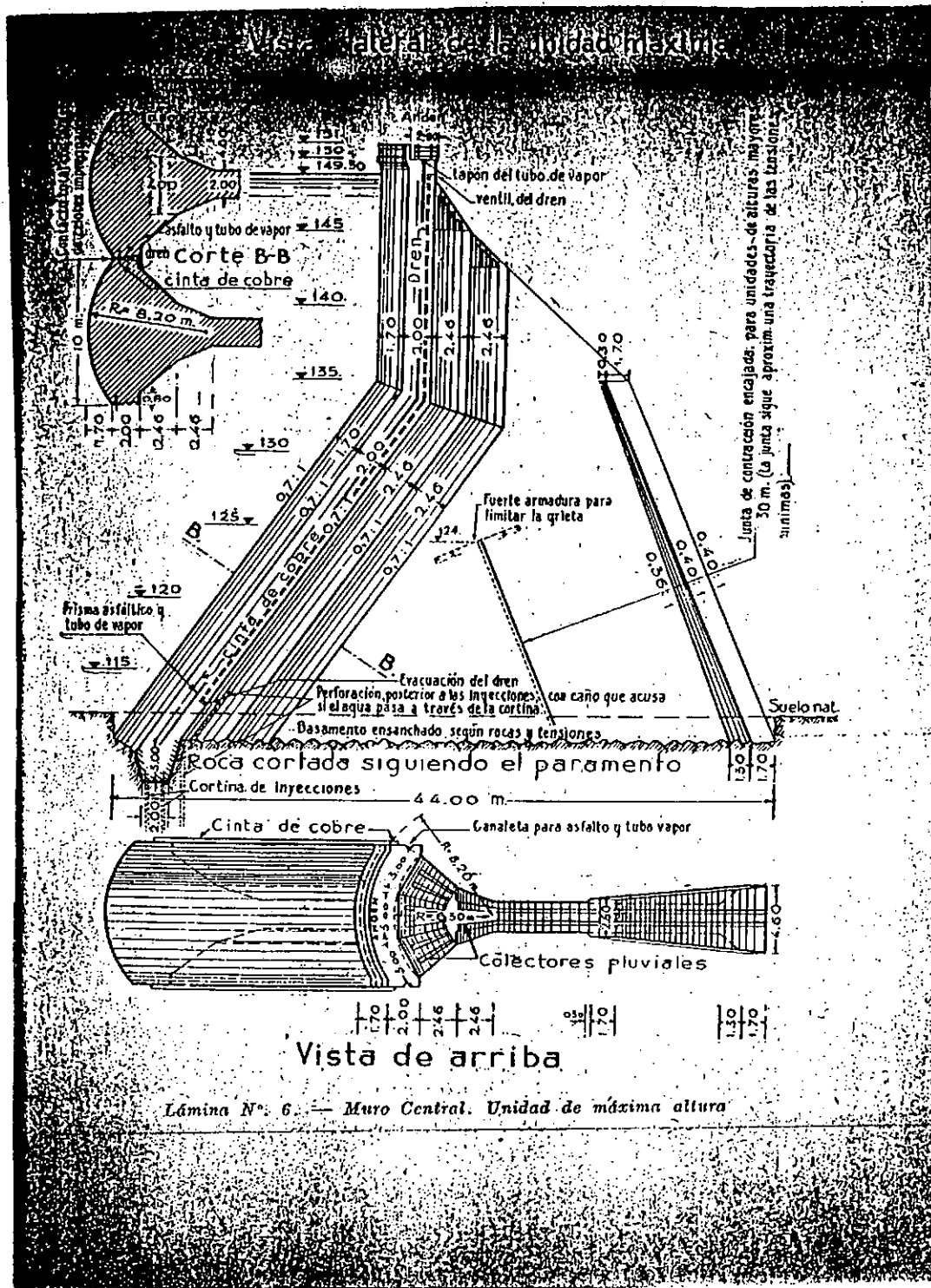
CORTE A.B.
(PUENTE ELIMINADO)

UNION DIQUE ESCOLLERA CON VERTEDERO



PLANTA

Vista lateral de la unidad máxima



Vista de arriba

Lámina N° 6. — Muro Central. Unidad de máxima altura

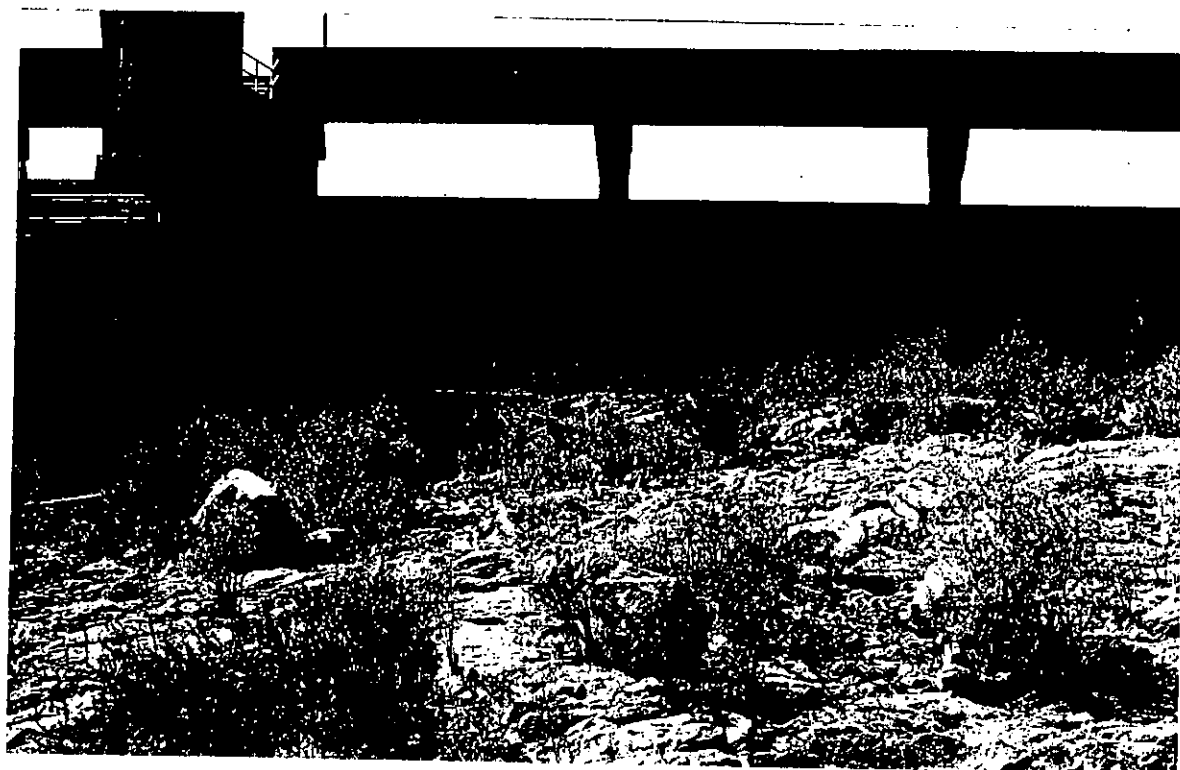
c)

ANEXO DOCUMENTACION FOTOGRAFICA

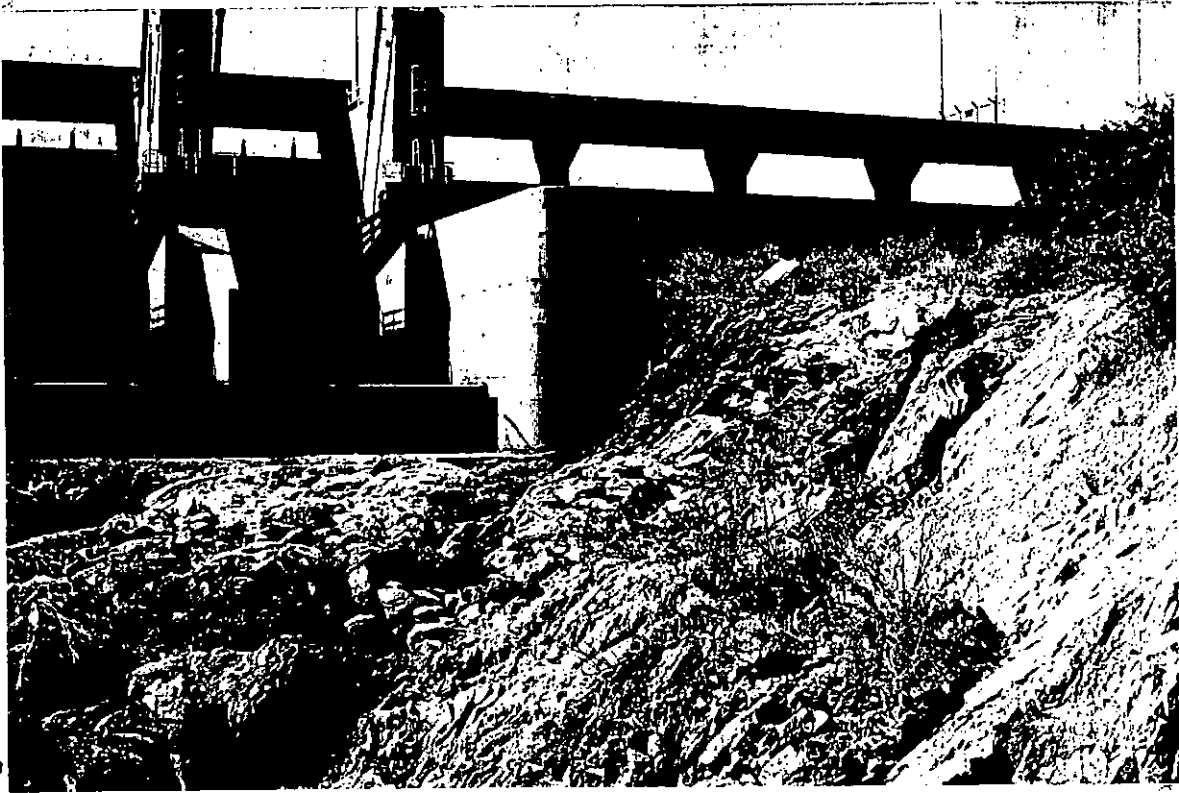
REFERENCIAS (ver índice)



a)



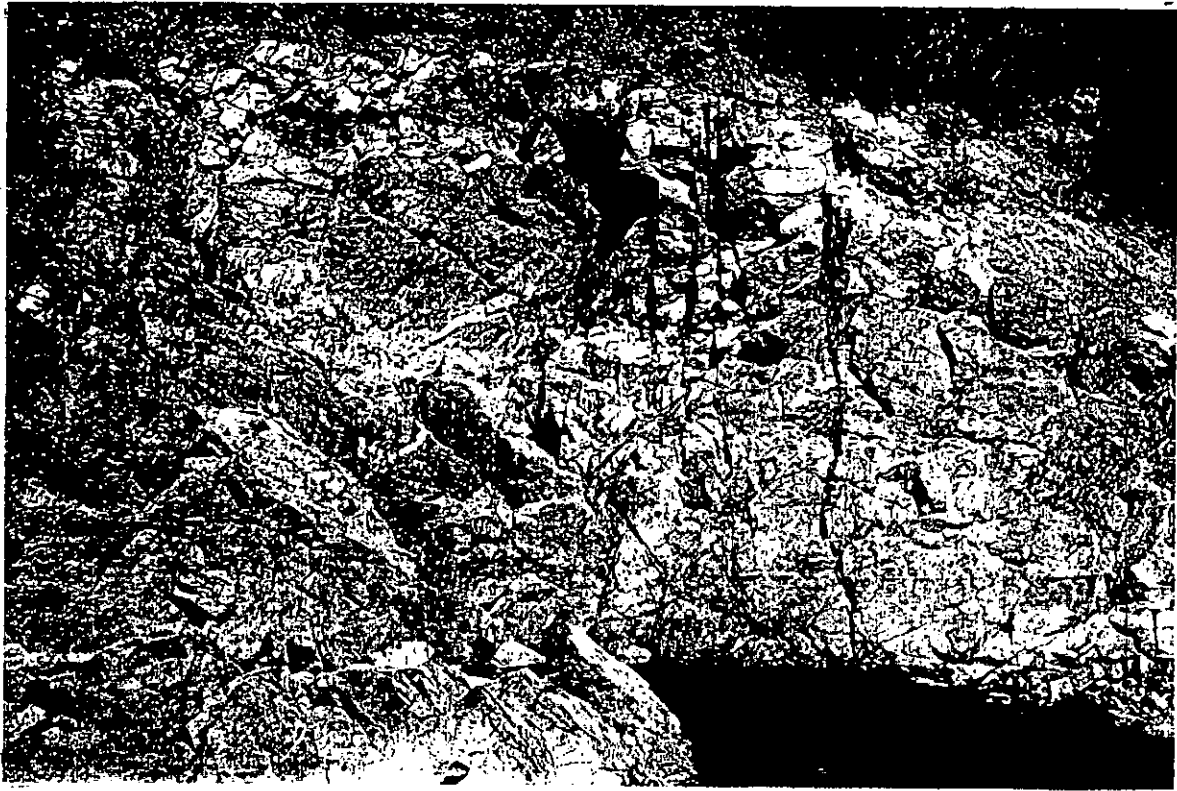
b)



c)



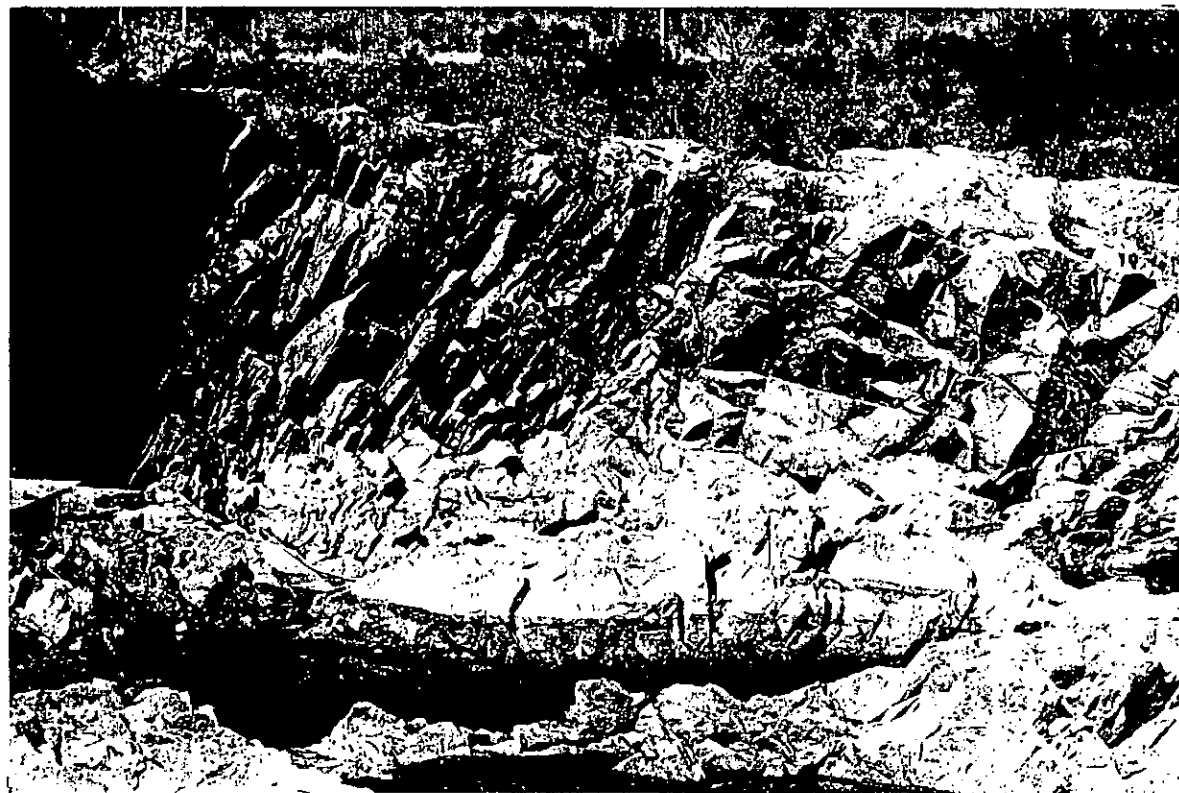
d)



e)



f)



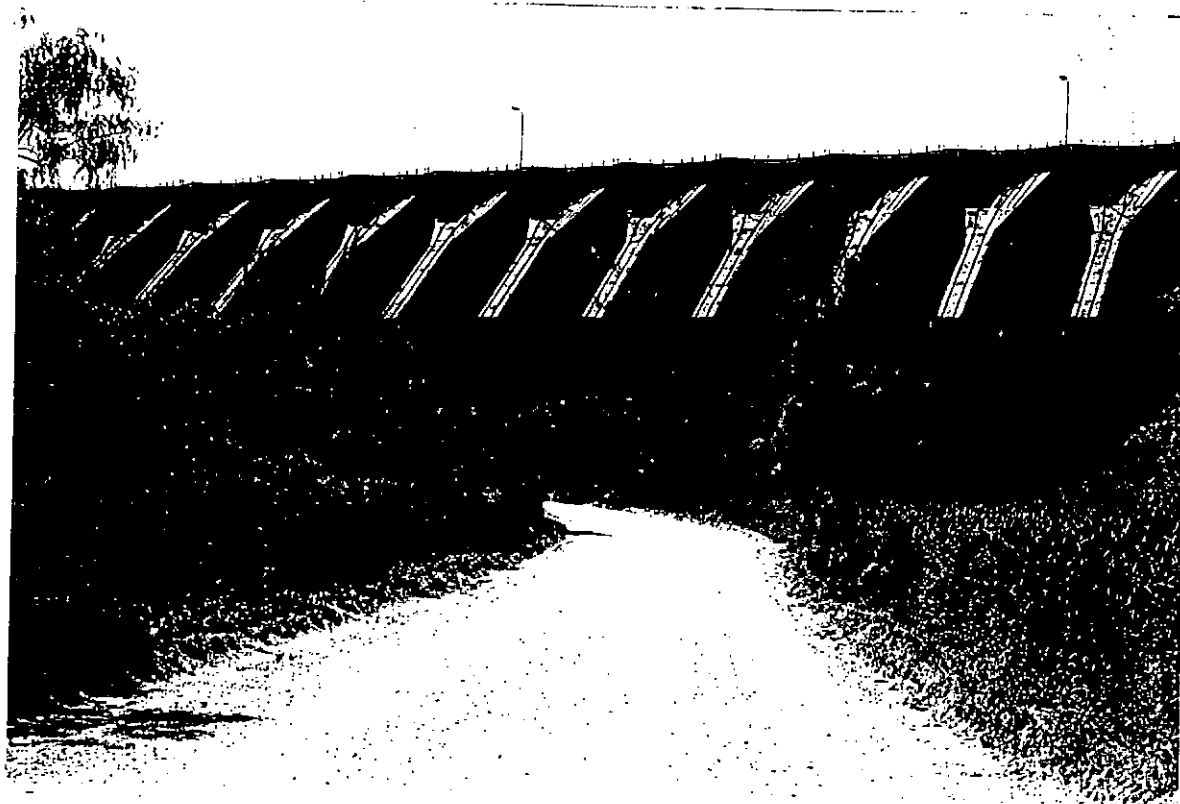
9)



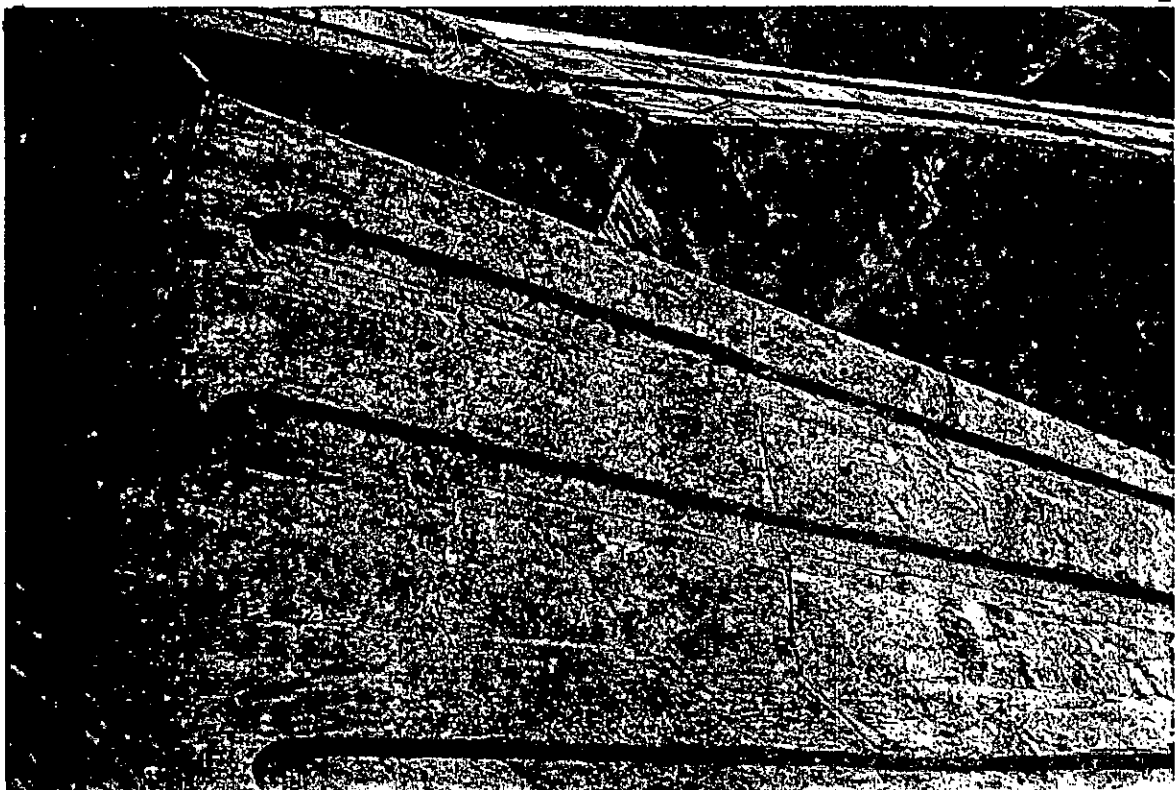
h)



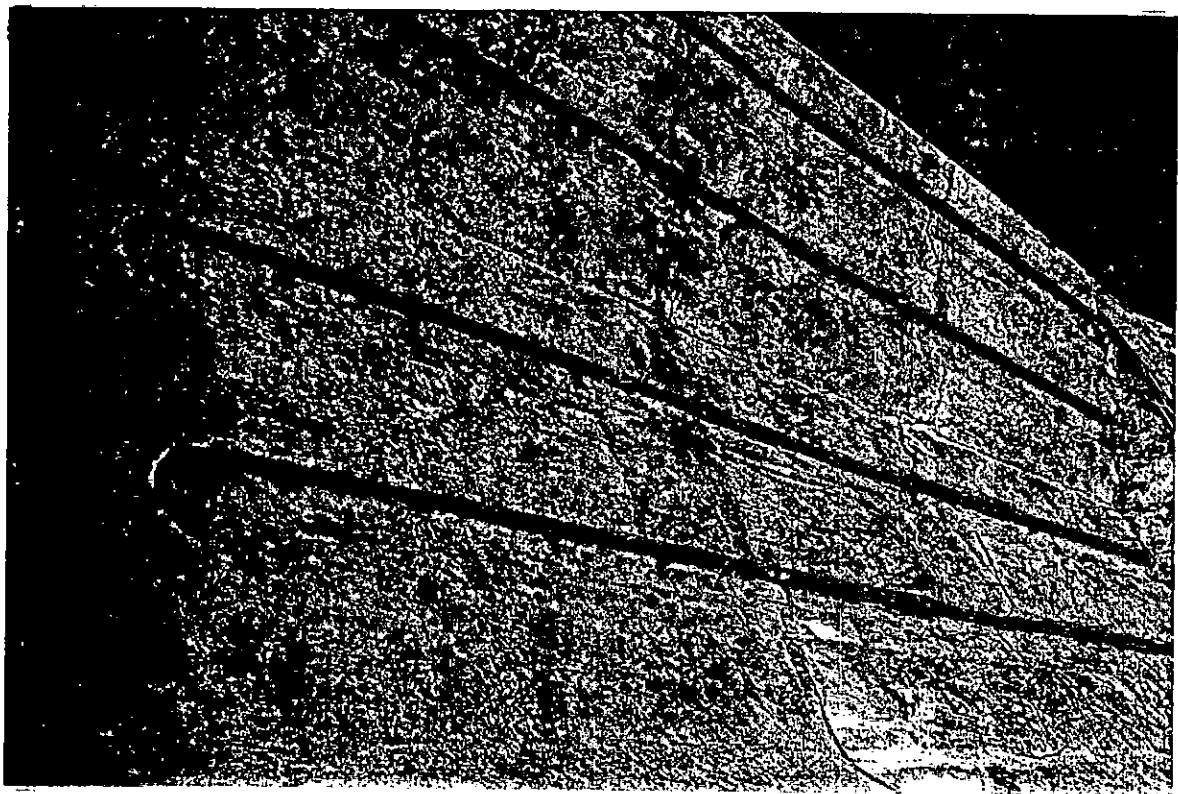
i)



j)



k)



1)

LAVANTAMIENTO PLANIALTIMETRICO

ZONA DE VERTEDEROS Y COMPUERTAS

Estación A

Punto	Orte de Hira	Angulo Vertical α°	Distancia L [m]	Desnivel ΔH [m]	Observaciones
1	0,555	6°21'00"	54,82	6,10	
2	0,50	7°03'00"	49,44	6,11	
3	0,46	6°35'18"	45,39	5,24	
4	0,345	8°23'00"	33,77	4,98	
5	0,270	9°46'00"	26,22	4,31	
6	0,192	12°41'18"	18,37	4,14	
7	0,178	9°49'00"	17,28	2,99	
8	0,127	7°04'00"	12,51	1,55	
9	0,216	2°57'48"	21,54	1,12	
10	0,340	3°54'48"	33,84	2,32	
11	0,186	2°37'18"	18,56	0,85	
12	0,326	4°12'00"	32,43	2,38	
13	0,452	5°27'24"	44,79	4,28	
14	0,446	4°50'00"	44,28	3,74	
15	0,116	3°56'06"	11,55	0,77	
16	0,140	4°17'00"	13,92	1,04	
17	0,156	1°54'18"	15,58	0,52	
18	0,200	5°29'18"	19,82	1,70	
19	0,120	- 1°57'00"	11,99	- 0,47	
20	0,100	- 4°45'00"	9,93	- 0,83	
21	0,136	- 6°48'42"	13,41	- 1,60	
22	0,09	- 8°04'42"	8,82	- 1,25	
23	0,512	- 6°14'30"	50,59	- 5,53	
24	0,556	- 5°28'42"	55,09	- 5,28	
25	0,540	- 5°22'06"	53,53	- 5,03	
26	0,396	- 7°58'24"	38,84	- 5,44	
27	0,316	- 9°59'09"	30,65	- 5,40	
28	0,277	- 12°39'09"	26,32	- 5,91	
29	0,250	- 11°08'00"	24,07	- 4,74	

Curva	Corte de Mira	Angulo Vertical α°	Distancia L [m]	Desnivel ΔH [m]	Observaciones
30	0,540	- 5°33'12"	49,53	- 4,82	
31	0,620	- 4°28'48"	61,62	- 4,83	
32	0,690	- 4°06'18"	68,65	- 4,93	
33	0,660	- 4°42'18"	65,56	- 5,40	
34	0,640	- 4°30'48"	63,60	- 5,02	
35	0,710	- 1°00'36"	70,98	- 1,25	
36	0,626	- 2°38'00"	68,46	- 3,15	
37	0,700	- 3°05'18"	69,80	- 3,77	
38	0,808	- 3°11'00"	80,55	- 4,48	
39	0,730	- 4°46'30"	72,49	- 6,06	
40	0,740	- 5°50'00"	73,24	- 7,48	
41	0,760	- 5°24'30"	75,19	- 7,78	
42	0,720	- 5°09'00"	71,42	- 6,44	
43	0,620	- 5°04'00"	61,52	- 5,45	
44	0,552	- 5°20'30"	54,72	- 5,12	
45	0,680	- 5°08'42"	67,45	- 6,07	
46	0,756	- 6°10'00"	74,73	- 8,07	
47	0,670	- 5°34'00"	66,37	- 6,47	
48	0,581	- 6°15'00"	57,41	- 6,29	
49	0,510	- 6°02'30"	50,44	- 5,34	
50	0,400	- 7°34'00"	39,31	- 5,22	
51	0,460	- 5°57'42"	45,50	- 4,75	
52	0,520	- 5°07'09"	51,59	- 4,62	

Estación E

Perfil	Corte de Piedra	Angulo Vertical α°	Distancia L [m]	Desnivel ΔH [m]	Observaciones
1	0,166	- 0°35'00"	16,60	- 0,27	
2	0,196	2°29'09"	19,56	0,85	
3	0,196	4°05'30"	19,60	1,39	
4	0,306	4°30'12"	30,41	2,40	
5	0,440	2°04'18"	43,94	1,59	
6	0,450	- 1°38'51"	44,96	- 1,29	
7	0,368	- 2°27'51"	36,73	- 1,58	
8	0,276	- 2°00'48"	27,57	- 0,97	
9	0,224	- 2°03'24"	22,37	- 0,80	
10	0,200	- 0°31'42"	20,00	- 0,18	
11	0,186	1°39'00"	18,58	0,54	
12	0,130	- 0°21'01"	13,00	- 0,08	
13	0,360	- 2°46'43"	35,92	- 1,74	
14	0,416	- 1°47'30"	41,56	- 1,30	
15	0,380	- 4°32'00"	37,76	- 2,99	
16	0,420	- 4°41'30"	41,72	- 3,42	
17	0,520	- 3°39'54"	51,79	- 3,32	
18	0,604	- 2°16'12"	60,31	- 2,39	
19	0,546	- 2°31'30"	54,49	- 2,40	
20	0,520	- 2°35'00"	51,89	- 2,34	
21	0,424	- 2°32'00"	42,32	- 1,87	
22	0,356	- 2°11'21"	35,55	- 1,36	

Estación "A"

Punto	Angulo y rumbo	Lado	X	Y	Observ.
1	0°00'	54,82	- 54,3405	7,2345	
2	S 7°35'00" E	49,44	- 49,4394	0,2402	
3	S 0°16'42" W	45,39	- 44,9331	6,4243	
4	S 15°43'12" W	33,77	- 32,3301	9,7559	
5	S 16°47'30" W	26,22	- 23,4740	11,6816	
6	S 34°02'24" W	18,37	- 12,3050	13,6398	
7	S 55°31'42" W	17,28	3,6060	16,8996	
8	S 47°56'42" W	12,51	9,6882	7,9137	
9	N 109°37'42" W	21,54	20,1599	7,5863	
10	N 77°57'18" W	33,84	- 11,2218	31,9252	
11	N 148°20'30" W	18,56	1,4363	18,5043	
12	N 39°14'20" W	32,43	- 32,4182	0,8744	
13	N 166°57'42" W	44,79	- 42,3764	14,5046	
14	N 20°37'18" W	44,28	- 43,4322	8,6159	
15	N 296°57'00" E	11,55	- 11,1899	2,8616	
16	S 70°38'00" E	13,92	- 12,0062	7,0440	
17	S 273°08'12" E	15,58	- 4,2325	14,9941	
18	N 25°33'42" E	19,82	- 13,7909	14,2353	
19	S 7°07'42" W	11,99	4,5990	11,0729	
20	S 1°32'42" W	9,93	7,7433	6,2165	
21	S 26°28'42" W	13,41	12,9942	3,3134	
22	S 18°53'42" W	8,82	7,3457	4,8820	
23	S 18°48'12" W	50,59	50,4486	3,7800	
24	S 11°13'12" W	55,07	55,0318	2,5311	
25	S 21°55'42" W	53,53	52,7040	9,3675	
26	S 14°20'42" W	38,84	38,4578	5,4357	
27	S 33°20'11" W	30,65	29,9317	6,5964	
28	S 30°24'00" E	26,32	26,3042	0,9132	
29	S 29°32'48" E	24,07	21,4156	10,9880	
30	N 67°02'42" E				
31	N 226°20'30" E				
32	N 38°45'30" E				
33	N 173°16'42" W				
34	N 14°18'18" W				
35	N 153°52'30" W				
36	N 33°36'30" W				
37	N 183°17'54" W				
38	N 4°17'06" W				
39	N 190°13'00" W				
40	N 2°38'00" E				
41	N 197°37'42" E				
42	N 10°04'42" E				
43	N 195°37'42" E				
44	N 8°02'42" E				
45	N 200°00'42" E				
46	N 12°25'42" E				
47	N 185°35'42" E				
48	N 1°59'18" W				
49	N 214°44'42" E				
50	N 27°07'42" E				

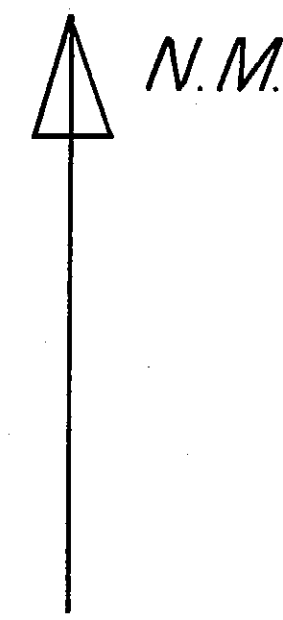
Inte	Angulo y Rumbo	Lado	X	Y	
30	233°17'12" N 45°42'12" E	47,53	34,5904	35,4503	
31	234°47'42" N 47°12'42" E	61,62	41,8580	45,2210	
32	231°19'30" N 45°44'30" E	68,65	49,5972	47,4652	
33	219°56'30" N 32°21'30" E	65,56	55,3797	35,0885	
34	205°47'00" N 18°12'00" E	63,60	60,4182	19,8645	
35	230°31'42" N 42°56'42" E	70,98	51,9579	48,3584	
36	215°08'06" N 27°03'06" E	68,46	60,6962	31,6661	
37	207°32'42" N 19°57'42" E	67,80	65,6065	23,8291	
38	200°26'42" N 12°51'42" E	80,55	78,5290	17,9303	
39	199°22'42" N 11°47'42" E	72,49	70,9594	14,8177	
40	191°58'42" N 4°23'42" E	73,24	73,0246	5,6125	
41	183°24'42" N 0°47'42" E	75,19	75,1821	1,0870	
42	182°31'06" N 5°03'54" W	71,42	71,1411	- 6,3054	
43	183°46'57" N 3°48'03" W	61,52	61,3847	- 4,0781	
44-B	185°09'00" N 2°26'00" W	54,72	54,6707	- 2,3232	
45	182°18'42" N 5°16'18" W	67,45	67,1647	- 6,1972	
46	179°35'30" N 7°59'30" W	74,73	74,0042	- 10,3896	
47	178°20'34" N 9°14'06" W	66,37	65,5097	- 10,6513	
48	178°53'42" N 8°39'18" W	57,41	56,7562	- 8,6393	
49	184°00'30" N 3°34'30" W	50,44	50,3418	- 3,1452	
50	207°25'42" N 19°50'42" E	39,31	36,9756	13,3448	
51	219°42'00" N 32°07'00" E	45,50	38,5370	24,1898	
52	222°54'42" N 35°19'42" E	51,59	42,0898	29,8325	

Estación "B"

Punto	Angulo y Rumbo	Lado	X	Y
1	30°26'00"	16,60	40,0138	- 10,1164
2	S 28°00'00" W	19,56	46,7440	- 20,2051
3	S 66°05'36" W	19,50	55,0723	- 21,8191
4	N 88°49'12" W	30,41	68,3689	- 29,4733
5	N 63°13'39" W	43,94	80,5083	- 37,8639
6	N 53°57'12" W	44,96	84,9563	- 32,5171
7	N 42°12'42" W	36,73	81,2990	- 27,6220
8	N 138°54'00" W	27,57	73,6405	- 22,3295
9	N 46°31'24" W	22,37	68,8064	- 19,6610
10	N 50°48'33" W	20,00	63,4832	- 20,2761
11	N 118°35'00" W	18,58	58,2743	- 20,5504
12	N 63°51'00" W	13,00	50,2063	- 14,5326
13	N 103°37'00" W	35,92	84,2081	- 22,7631
14	N 78°49'00" W	41,56	84,1093	- 31,6592
15	S 72°20'54" W	37,76	88,4585	- 19,1815
16	S 69°54'54" W	41,72	94,7487	- 13,9126
17	N 147°45'00" W	51,79	102,8862	- 21,2300
18	N 34°41'00" W	60,31	112,5752	- 19,1862
19	N 137°32'00" W	54,49	108,0423	- 13,3063
20	N 44°54' W	51,87	105,9183	- 10,4629
21	N 155°55' W	42,32	96,6470	- 7,7055
22	N 26°31' W	35,55	90,1590	- 0,2293
	N 166°18'18" W			
	N 16°07'42" W			
	N 161°01'18" W			
	N 21°24'42" W			
	N 166°11'48" W			
	N 16°14'12" W			
	N 170°48'18" W			
	N 11°37'42" W			
	N 173°24'30" W			
	N 9°01'30" W			
	N 175°07'36" W			
	N 7°18'24" W			
	N 185°48'36" W			
	N 3°22'36" E			

Punto	Cota Arbitraria [m]	Punto	Cota Arbitraria [m]	Desde Estación A A = 93,90 m.
1	100,00	32	88,97	
2	100,00	33	88,50	
3	99,14	34	88,88	
4	98,88	35	92,65	
5	98,41	36	90,45	
6	98,04	37	90,13	
7	96,89	38	89,42	
8	95,45	39	87,84	
9	95,02	40	86,42	
10	94,22	41	86,12	
11	94,75	42	87,46	
12	96,28	43	88,45	
13	98,18	44-B	88,78	
14	97,64	45	87,83	
15	94,69	46	85,83	
16	94,94	47	87,43	
17	94,42	48	87,61	
18	95,80	49	88,56	
19	93,49	50	88,68	
20	93,07	51	89,15	
21	92,30	52	89,28	
22	92,65			
23	88,37			
24	88,62			
25	88,87			
26	88,46			
27	88,50			
28	87,99			
29	87,16			
30	87,08			
31	87,07			

Punto	Cota Arbitraria	Desde Estación "P"
1	88,51	
2	89,63	
3	90,17	
4	91,18	
5	90,37	
6	87,49	
7	87,20	
8	87,81	
9	87,98	
10	88,60	
11	89,32	
12	88,70	
13	87,04	
14	87,48	
15	85,79	
16	85,36	
17	85,46	
18	86,39	
19	86,38	
20	86,44	
21	86,91	
22	87,42	



ESCALA 1:250

LIMITE DE LEVANTAMIENTO

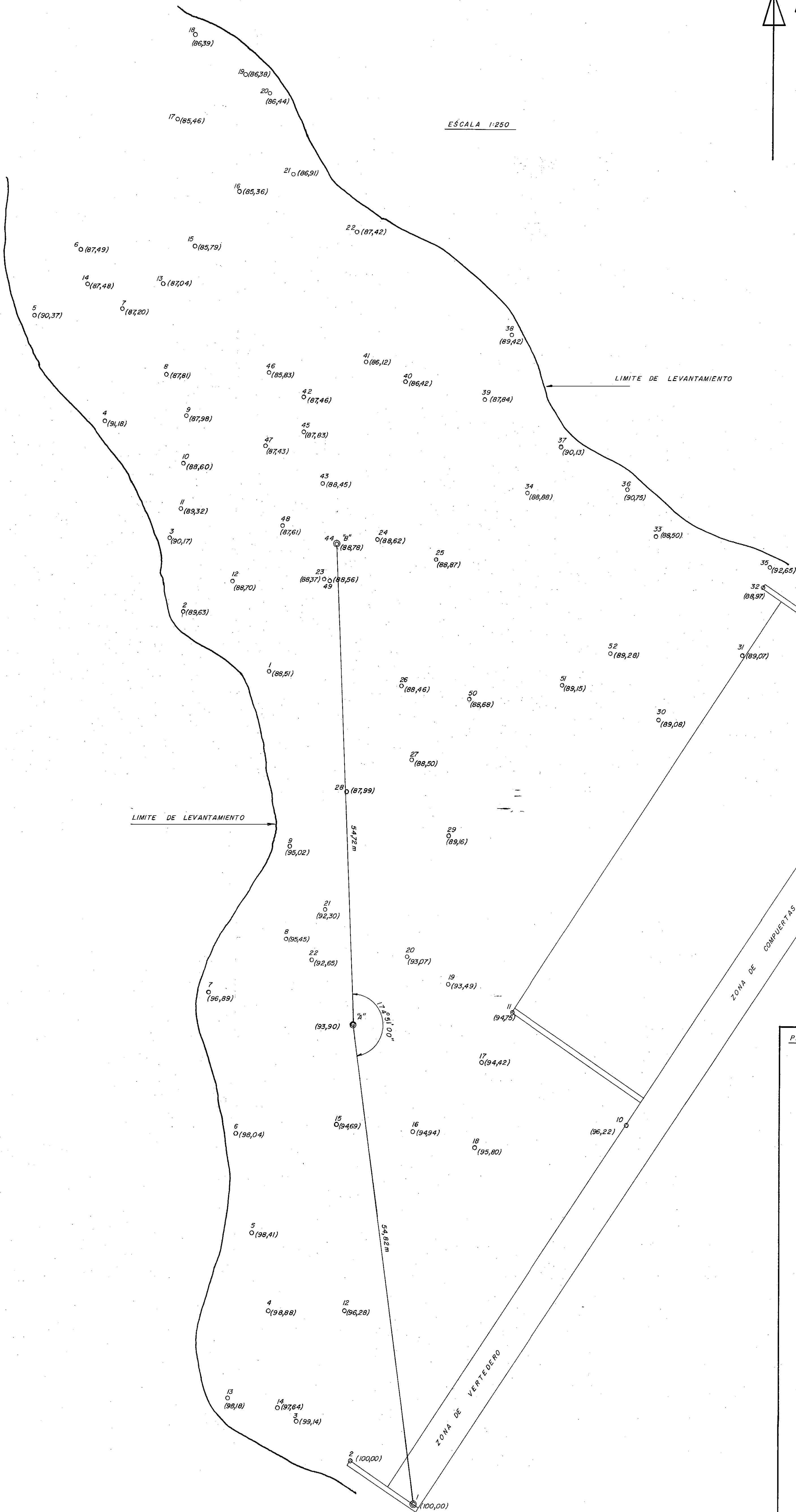
LIMITE DE LEVANTAMIENTO

ZONA DE COMPUERTAS

PLANO DE :

Levantamiento Taquimetrico

ZONA DE VERTEDERO



ANEXO - METODOLOGIAS

REPRESENTACION DE PLANOS DE DISCONTINUIDADES GEOLOGICAS EN PROYECCION EQUIAREAL

El presente trabajo ha tenido por objeto facilitar el tratamiento matemático, estadístico y gráfico de los datos referentes a orientación de planos de discontinuidades de macizos rocosos, elaborando para ello un programa de computación ejecutable en computadoras personales.

A continuación se describe en forma sintética el tratamiento matemático del problema y la operación del programa. Las opciones que éste incluye son fácilmente accesibles en todo momento mediante un menú.

PROYECCION EQUIAREAL: FORMULACION MATEMATICA

Los datos provenientes de las observaciones se presentan en la forma de un conjunto de pares de valores:

$$\{ \text{DirBuza}(i), \text{IntBuza}(i) \}$$

para $i=1, \dots, N_{\text{pol}}$, donde N_{pol} representa la cantidad de observaciones. Para cada plano observado, DirBuza (dirección de buzamiento) es el azimut de su dirección de máxima inclinación en sentido descendente, mientras que IntBuza (intensidad de buzamiento) es la magnitud de dicha inclinación máxima.

Cada uno de estos planos puede representarse gráficamente por un círculo máximo de la esfera unidad, o mejor aún por uno de sus polos. Los polos son los puntos de intersección de la esfera

unidad con la normal al plano trazada por el centro de la esfera. Para concretar, seleccionaremos siempre el polo situado en el hemisferio inferior. Entonces a cada polo le corresponde el siguiente par de coordenadas esféricas:

$$\text{azimut } \lambda = \text{DirBuza} \pm 180^\circ$$

$$\text{latitud } \varphi = 90^\circ - \text{IntBuza}$$

El azimut λ se mide desde el norte, en sentido horario: toma valores entre 0° y 360° . La latitud φ se mide desde 0° para un polo situado en el horizonte, correspondiente a un plano vertical, hasta 90° para un polo situado verticalmente hacia abajo, que corresponde a un plano horizontal.

Para definir el método de proyección necesitamos establecer un sistema auxiliar (tridimensional) de coordenadas cartesianas ortogonales. Tomaremos como origen el centro de la esfera unidad. El eje x estará orientado hacia el Norte, el eje y hacia el Este, y el eje z hacia abajo. Puesto que los puntos que nos interesa representar son los que están situados en la superficie de la semiesfera inferior, la coordenada z tomará siempre valores comprendidos entre 0 y 1. Nótese que la terna de ejes así definida resulta dextrógira.

Para un punto cualquiera de la superficie esférica, sea ρ su distancia (horizontal) al eje vertical de la esfera (eje z). Entonces valen las siguientes relaciones:

$$x = \rho \cos \lambda$$

$$y = \rho \sin \lambda$$

$$z = \sin \varphi$$

siendo

$$\rho = \cos \varphi = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{1 - z^2}$$

Sea ahora V el punto de coordenadas esféricas $\varphi = 90^\circ$, $\lambda =$ arbitrario; o, equivalentemente, de coordenadas espaciales $x = 0$, $y = 0$, $z = 1$. Este punto puede llamarse el "polo inferior" de la esfera (sería incorrecto llamarlo "polo sur"). Es el punto de intersección de la semiesfera inferior con su eje vertical. Nos interesa determinar la distancia entre el punto V y un punto cualquiera de la semiesfera inferior: sea R esta distancia. Se cumplen las siguientes relaciones:

$$R = \sqrt{\rho^2 + (1 - \sin \varphi)^2} = \sqrt{x^2 + y^2 + (1 - z)^2}$$

de donde también resulta, simplemente,

$$R = \sqrt{2(1 - z)}$$

y además

$$\frac{\rho}{R} = \sqrt{\frac{1+z}{2}}$$

La proyección equiareal de la superficie semiesférica sobre el plano se obtiene definiendo

$$\begin{aligned} X &= R \sin \lambda \\ Y &= R \cos \lambda \end{aligned}$$

Nótese que con estas definiciones los ejes X e Y tienen orientación Este y Norte, respectivamente.

Comprobaremos ahora la propiedad equiareal de la proyección así definida.

La simetría axial permite comparar el elemento de área en la esfera, definido por $\rho d\lambda d\phi$, con el elemento de área en el plano, definido por $R d\lambda dR$. Cancelando el factor común, el problema se limita a comparar $\rho d\phi$ con $R dR$.

De las relaciones anteriores resulta

$$R^2 = 2(1 - \sin \phi)$$

y por lo tanto

$$\begin{aligned} 2 R dR &= -2 \cos \phi d\phi \\ R dR &= -\rho d\phi \\ |R dR| &= |\rho d\phi| \end{aligned}$$

La igualdad de los valores absolutos demuestra que las áreas se mantienen. Naturalmente, la diferencia de signos proviene de que R y ϕ crecen en sentidos opuestos. Conviene tener presente que los puntos situados en el horizonte ($z = 0$) se proyectan en el plano sobre un círculo de radio $\sqrt{2}$ con centro en el origen.

SISTEMAS DE COORDENADAS LOCALES

Para el tratamiento matemático posterior se necesita asociar a cada polo un sistema local de coordenadas cartesianas ortogonales (ξ, η, ζ). El origen de este sistema será el mismo polo, situado en la superficie de la esfera. El eje ξ será tangente al círculo meridiano, apuntando hacia arriba. El eje η será tangente al círculo paralelo, en el sentido del azimut creciente (sentido horario, visto desde arriba). El eje ζ será el radio de la esfera en sentido saliente (así cada sistema será también dextrógiro). Se calcula y se conserva para cada polo la siguiente matriz de cosenos directores, que después se utiliza repetidas veces para realizar transformaciones de coordenadas:

	x	y	z
ξ	$\cos \lambda \quad \sin \varphi$	$\sin \lambda \quad \sin \varphi$	$-\cos \varphi$
η	$-\sin \lambda$	$\cos \lambda$	0
ζ	$\cos \lambda \quad \cos \varphi$	$\sin \lambda \quad \cos \varphi$	$\sin \varphi$

DETERMINACION DE AGRUPAMIENTOS

Para distribuir los polos en grupos se adopta el criterio de proximidad propuesto por Grossman (1978). Definimos

$$C_{\min} = 1 - 1.67834699 / N_{\text{pol}}$$

$$\alpha = \arccos(C_{\min})$$

Se acepta como condición suficiente para que dos polos pertenezcan a un mismo grupo que su distancia angular sea $\leq \alpha$. De hecho, el programa calcula directamente el coseno de la distancia angular y verifica que sea $\geq C_{\min}$. Además se grafican en la pantalla los casquetes centrados en cada polo con amplitud α a cada lado.

El centro de cada grupo se define como el punto de la esfera cuyas coordenadas son los promedios de las respectivas coordenadas de las proyecciones centrales de todos los puntos del grupo sobre el plano tangente a la esfera en dicho centro. Tal como resulta naturalmente de esta definición recursiva, la determinación de cada centro se realiza como un proceso iterativo hasta satisfacerse una tolerancia prefijada. Este proceso iterativo ha sido organizado de manera tal que resulta más simple que el propuesto por Grossman (1985).

En una tabla de valores se muestran la cantidad de polos de cada grupo, las coordenadas de su centro, la dirección y buzamiento del respectivo círculo máximo, y algunos parámetros estadísticos que caracterizan la distribución bivariada normal de polos sobre el plano tangente a la esfera en el centro del grupo. Ellos son las desviaciones estándar máxima y mínima (σ_M , σ_m) y el ángulo ω_M que corresponde al valor máximo, medido desde el plano meridiano en sentido horario.

No se incluyen en este tratamiento los polos aislados ni tampoco los que forman grupos que contienen menos del 5 % de total de polos; sin embargo, sus respectivas cantidades aparecen en la tabla de valores.

DIAGRAMAS

El programa elabora varios diagramas que, una vez completados, pueden ser exhibidos en cualquier orden, y

optativamente impresos. Ellos son:

1) Diagrama de posiciones, con las proyecciones de todos los polos.

2) Diagrama de agrupamientos: aparecen todos los polos y los respectivos casquetes de amplitud α a cada lado. Optativamente, se pueden hacer aparecer en forma destacada los centros de los grupos con su respectiva numeración.

3) Diagrama de densidades: al plano de proyección se superpone una cuadrícula, cada una de cuyas celdas se representa por un "centro de cuenta" situado sobre la esfera. La cuenta correspondiente a cada centro es la cantidad de polos situados en un casquete centrado en él, con área igual al 1% de la superficie de la esfera. Finalmente los valores normalizados de las cuentas se expresan como porcentajes de la cantidad total de polos y se grafican en un diagrama con distintas densidades de sombreado para las cuales se provee una escala de referencia. Por razones de mayor aplicabilidad el diseño del diagrama se ha hecho para pantalla monocromática; podría fácilmente mejorarse utilizando distintos colores.

4) Diagrama de círculos máximos: se grafican las proyecciones de la mitad inferior de cada círculo máximo representativo de un grupo. Los respectivos centros, que fueron determinados antes, pueden ser exhibidos y numerados optativamente. También pueden trazarse círculos máximos suplementarios, con datos suministrados por el usuario.

5) Diagrama de estadística: alrededor del centro de cada grupo se trazan las proyecciones equiareales de las proyecciones centrales sobre la esfera de varias elipses de dispersión situadas en cada caso sobre el respectivo plano tangente. Como valores de probabilidad acumulada correspondientes a cada elipse se han elegido arbitrariamente 50 %, 70 % y 90 %.

PLANILLAS

La ya mencionada tabla de valores correspondiente a la división en grupos puede exhibirse o imprimirse en cualquier momento.

Otra opción disponible es el listado de los polos correspondiente a cada grupo en particular, junto con los respectivos valores que fueron ingresados como datos.

Referencias básicas:

Grossman, N.F.: Influencia das descontinuidades na deformabilidade dos maciços rochosos. Lab. Nac. Eng. Civil de Portugal, 1er. Relatorio, 1978.

Grossman, N.F.: The bivariate normal distribution on the tangent plane at the mean attitude: Proceedings of the International Symposium on Fundamentals of Rock Joints, Björkliden, 1985.

TRATAMIENTO DE MEDICIONES REALIZADAS POR LINEAS DE MUESTREO

Las observaciones de campo realizadas por líneas de muestreo tienen por objeto la determinación de espaciamientos y frecuencias de familias de planos de discontinuidades geológicas caracterizadas por tener aproximadamente una misma orientación (promedio) en el espacio.

El tratamiento computacional provisto por el programa LINEA se descompone en varias opciones independientes, seleccionables por un menú.

1.- INTERSECCIONES DE PLANOS DE DISCONTINUIDAD CON LINEAS DE MUESTREO.

Una línea de muestreo ("scan-line") queda definida por su punto de origen, su dirección y su inclinación. Sean:

A = dirección o azimut, medido desde el Norte en sentido horario (grados).

B = inclinación, positiva hacia abajo (grados).

Cada plano de discontinuidad queda caracterizado por su dirección y su intensidad de buzamiento. Sean:

C = dirección de buzamiento, es decir, de máxima pendiente hacia abajo (grados).

D = intensidad de buzamiento (grados).

El punto de afloramiento en el terreno de cada plano de discontinuidad, debajo de la línea de muestreo, queda determinado por el punto de medición, que es el punto de la línea de muestreo situado en la vertical del punto de afloramiento, y por la distancia vertical entre ambos puntos. Sean:

E = distancia vertical entre ambos puntos (metros).

F = progresiva del punto de medición, es decir, su distancia desde el origen (metros).

Con estos datos puede calcularse la intersección de cada plano con la línea de muestreo. Dicha intersección quedará determinada por su progresiva (P).

En el análisis que sigue todas las alturas se consideran positivas hacia abajo.

Se planteará una ecuación que permitirá calcular P . Para ello se igualarán dos expresiones distintas de la altura del punto de intersección, medida desde el origen.

Por un lado, dicha altura es simplemente $P \text{ sen } B$.

Por otro lado: la distancia desde el punto de medición hasta el de intersección, medida sobre la línea de muestreo, es $P-F$. Su proyección sobre un plano horizontal es $(P-F) \cos B$; pero en esta proyección el punto de medición se confunde con el de afloramiento, y por lo tanto esta es también la distancia horizontal de dos puntos situados sobre el plano de discontinuidad, a saber: el de afloramiento y el de intersección. Si además esta distancia se proyecta sobre la dirección de máxima pendiente del plano, se obtiene $(P-F) \cos B \cos (A-C)$. Como consecuencia, entre un punto y otro del plano de discontinuidad la altura aumenta en $(P-F) \cos B \cos (A-C) \operatorname{tg} D$. Si además se tiene

en cuenta que la altura del punto de medición es $F \operatorname{sen} B$, y por lo tanto la altura del punto de afloramiento es $F \operatorname{sen} B + E$, la altura total del punto de intersección es

$$(P-F) \cos B \cos (A-C) \operatorname{tg} D + F \operatorname{sen} B + E$$

Igualando ambas expresiones de la altura, y despejando P , se obtiene:

$$P \operatorname{sen} B = (P-F) \cos B \cos (A-C) \operatorname{tg} D + F \operatorname{sen} B + E$$

$$(P-F) \operatorname{sen} B = (P-F) \cos B \cos (A-C) \operatorname{tg} D + E$$

$$(P-F) (\operatorname{sen} B - \cos B \cos (A-C) \operatorname{tg} D) = E$$

$$P = F + \frac{E}{\operatorname{sen} B - \cos B \cos (A-C) \operatorname{tg} D}$$

Según esta fórmula, la progresiva P del punto de intersección queda expresada como la progresiva F del punto de medición, más una corrección.

Las excepciones a la validez de la fórmula son obvias. El caso $D = 90^\circ$ corresponde a un plano vertical. Un denominador nulo corresponde a un plano paralelo a la línea de muestreo.

Para una línea de muestreo con n observaciones, el programa calcula las n progresivas corregidas que corresponden a las intersecciones, y los $n-1$ espaciamentos. Del conjunto de espaciamentos determina a continuación el mínimo, el máximo, el promedio, la desviación standard y el intervalo de confianza del 95%. La inversa del espaciamiento promedio es la frecuencia medida sobre la línea.

¶ 2.- FRECUENCIAS PRINCIPALES A PARTIR DE MUESTREOS.

Se tienen N familias de planos, cada una de ellas caracterizada por la dirección α_i y la inclinación β_i de su normal (para $i = 1, \dots, N$).

Supongamos por el momento que para cada familia se conoce λ_i , la *frecuencia principal*, es decir, medida en la dirección de la normal.

Nos interesa, como paso inmediato, estudiar la frecuencia que

corresponderá a todo este conjunto de planos según una observación hecha a lo largo de una línea de muestreo cualquiera. Por conveniencia, tomaremos un conjunto bien determinado de M líneas de muestreo, cada una de ellas caracterizada por su dirección α_j y su inclinación β_j (para $j = 1, \dots, M$).

El coseno del ángulo formado por la normal a la familia i y la línea de muestreo j estará dado por:

$$\begin{aligned} \cos \theta_{ij} &= \cos (\alpha_i - \alpha_j) \cos \beta_i \cos \beta_j + \sin \beta_i \sin \beta_j = \\ &= \cos \alpha_i \cos \beta_i \cos \alpha_j \cos \beta_j + \\ &\quad + \sin \alpha_i \cos \beta_i \sin \alpha_j \cos \beta_j + \sin \beta_i \sin \beta_j \end{aligned}$$

Entonces la frecuencia inducida sobre la línea j por todas las familias de planos será

$$\tilde{\lambda}_j = \sum_{i=1}^N \lambda_i |\cos \theta_{ij}| \quad (j = 1, \dots, M)$$

Es necesario tomar el valor absoluto del coseno porque para el cálculo de la frecuencia no cabe distinguir entre los dos lados de un plano.

Pasemos ahora a analizar el problema real.

Lo que nos interesa en esta etapa es resolver el problema inverso al planteado hasta ahora; esto es, determinar las frecuencias principales a partir de las frecuencias medidas sobre las líneas de muestreo. Las $\tilde{\lambda}_j$ serán por lo tanto nuestros datos, y las λ_i nuestras incógnitas.

Estas consideraciones conducen naturalmente al planteo de un sistema sobredeterminado ($M > N$) de ecuaciones lineales, que será preciso resolver según el criterio de cuadrados mínimos.

El sistema de ecuaciones normales es

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \sum_{j=1}^M |\cos \theta_{ij}| |\cos \theta_{kj}| = \sum_{j=1}^M \tilde{\lambda}_j |\cos \theta_{kj}| \quad (k = 1, \dots, N)$$

que se puede escribir también

$$\sum_{i=1}^N a_{ki} \lambda_i = \sum_{j=1}^M \tilde{\lambda}_j |\cos \theta_{kj}| \quad (k = 1, \dots, N)$$

llamando

$$a_{ki} = \sum_{j=1}^M |\cos \theta_{ij}| |\cos \theta_{kj}| \quad (k, i = 1, \dots, N)$$

Los a_{ki} son los elementos de la matriz del sistema normal (simétrica y definida positiva).

El programa plantea el sistema normal y lo resuelve por el método de Cholesky.

Puesto que la precisión de los datos no suele ser muy grande, en general es conveniente que M sea bastante mayor que N .

La introducción de datos inconsistentes puede dar lugar a que aparezcan resultados negativos como valores de una o más frecuencias.

¶ 3.- FRECUENCIAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS.

Las fórmulas que se desarrollarán a continuación son análogas a algunas que aparecen en el punto anterior, con la única diferencia de que ahora se refieren a una línea arbitraria (es decir, con cualquier orientación en el espacio) y no solamente a un determinado conjunto de líneas de muestreo.

La dirección de una línea arbitraria se define por

α = azimut (sentido horario desde el Norte).

β = inclinación (positiva hacia abajo).

El valor de la frecuencia en la dirección de la línea es función de las variables α y β :

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda} = \tilde{\lambda}(\alpha, \beta) &= \sum_{i=1}^N \lambda_i |\cos \theta_i| = \\ &= \sum_{i=1}^N \lambda_i |\cos(\alpha_i - \alpha) \cos \beta_i \cos \beta + \sin \beta_i \sin \beta| \end{aligned}$$

Para simplificar el análisis, llamaremos

$$\begin{aligned} C_i &= \cos \theta_i = \cos(\alpha_i - \alpha) \cos \beta_i \cos \beta + \sin \beta_i \sin \beta = \\ &= \cos \alpha_i \cos \beta_i \cos \alpha \cos \beta + \\ &\quad + \sin \alpha_i \cos \beta_i \sin \alpha \cos \beta + \sin \beta_i \sin \beta \end{aligned}$$

Entonces podrá escribirse

$$|C_i| = |\cos \theta_i| = C_i \operatorname{sgn} C_i$$

donde sgn (función signo) es una función seccionalmente constante que toma solamente los valores -1 , 0 y $+1$.

Destacamos que tanto C_i como $\operatorname{sgn} C_i$ son funciones de α y β . A continuación definiremos otras funciones de las mismas variables.

$$\begin{aligned} CACB &= \sum_{i=1}^N \lambda_i \operatorname{sgn} C_i \cos \alpha_i \cos \beta_i \\ SACB &= \sum_{i=1}^N \lambda_i \operatorname{sgn} C_i \sin \alpha_i \cos \beta_i \\ SB &= \sum_{i=1}^N \lambda_i \operatorname{sgn} C_i \sin \beta_i \end{aligned}$$

Con estas notaciones, puede escribirse abreviadamente:

$$\tilde{\lambda} = CACB \cos \alpha \cos \beta + SACB \sin \alpha \cos \beta + SB \sin \beta,$$

teniendo presente que $CACB$, $SACB$ y SB dependen del vector $(\operatorname{sgn} C_i)_{i=1,n}$, cuyas componentes pueden valer -1 , 0 ó $+1$.

Los extremos locales de $\tilde{\lambda}$ pueden buscarse igualando a cero sus derivadas parciales con respecto a α y β , pero ello solamente es válido en los puntos en que esta función es diferenciable. De las definiciones de $CACB$, $SACB$ y SB surge con claridad que tales puntos son aquéllos en que todos los C_i son distintos de cero. Vale decir, $\operatorname{sgn} C_i$ puede valer solamente -1 ó $+1$. Los restantes puntos, en los que algún C_i vale 0 , serán objeto de una investigación posterior (*extremos cuspidales*).

Derivando e igualando a cero se tienen las condiciones necesarias para la existencia de extremos en los puntos donde la función es diferenciable:

$$\frac{\partial \tilde{\lambda}}{\partial \alpha} = -CACB \sin \alpha \cos \beta + SACB \cos \alpha \cos \beta = 0$$

$$\frac{\partial \tilde{\lambda}}{\partial \beta} = -CACB \cos \alpha \sin \beta - SACB \sin \alpha \sin \beta + SB \cos \beta = 0$$

También necesitaremos las derivadas segundas:

$$\frac{\partial^2 \tilde{\lambda}}{\partial \alpha^2} = - CACB \cos \alpha \cos \beta - SACB \sin \alpha \cos \beta$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{\lambda}}{\partial \alpha \partial \beta} = + CACB \sin \alpha \sin \beta - SACB \cos \alpha \sin \beta$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{\lambda}}{\partial \beta^2} = - CACB \cos \alpha \cos \beta - SACB \sin \alpha \cos \beta - SB \sin \beta$$

Conviene aclarar que, para el cálculo de estas derivadas, los coeficientes $CACB$, $SACB$ y SB han sido tratados como constantes porque, si bien ellos son funciones de α y β , permanecen constantes en todo un entorno de cada punto considerado.

Para analizar los puntos en que se anulan las derivadas primeras conviene distinguir dos casos:

Primer caso: $\cos \beta \neq 0$.

Las derivadas primeras se anulan tomando

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{SACB}{CACB}$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{SB}{CACB \cos \alpha + SACB \sin \alpha}$$

Con el fin de normalizar adecuadamente los ángulos α y β , transformaremos en alguna medida las expresiones precedentes:

Sea $K = + \sqrt{(CACB)^2 + (SACB)^2}$. Entonces es $CACB = K \cos \alpha$, $-SACB = K \sin \alpha$. Con esto quedan bien definidos los signos de $\cos \alpha$ y $\sin \alpha$, y el valor de α está determinado sin ambigüedad entre 0° y 360° .

También es $\operatorname{tg} \beta = SB / K$, y por lo tanto haciendo

$$L = + \sqrt{K^2 + (SB)^2} \text{ se tendrá } K = L \cos \beta, SB = L \sin \beta.$$

Reemplazando, los valores de las derivadas segundas quedan:

$$\frac{\partial^2 \tilde{\lambda}}{\partial \alpha^2} = - K \cos \beta = - L \cos^2 \beta < 0$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{\lambda}}{\partial \alpha \partial \beta} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{\lambda}}{\partial \beta^2} = -K \cos \beta - SB \operatorname{sen} \beta = -L < 0.$$

Con esto queda demostrado que todos los pares (α, β) analizados en el primer caso constituyen extremos locales, y más precisamente máximos. El valor de cada máximo local es $\tilde{\lambda} = L$.

Conviene observar que, por ser $K > 0$ y $L > 0$, es siempre $\cos \beta > 0$. Si a una cierta combinación de signos $(\operatorname{sgn} C_i)_{i=1,n}$ corresponden valores de $CACB$, $SACB$ y SB que proporcionan un máximo local (α, β) , tomando en lugar de cada signo el opuesto se obtendrá un nuevo máximo local que corresponde a la dirección opuesta a la anterior $(\alpha \pm 180^\circ, -\beta)$, con el mismo valor L . Para evitar repeticiones inútiles, de cada uno de estos pares de valores se tendrá en cuenta solamente el que corresponda a $\beta > 0$, es decir, $SB > 0$. Si fuera $\beta = 0$ se elegirá $0 \leq \alpha < 180^\circ$.

Segundo caso: $\cos \beta = 0$.

El análisis particular de este caso muestra que hay máximo local si y sólo si $CACB = SACB = 0$. Se elegirá $\beta = 90^\circ$ como dirección representativa, con $\tilde{\lambda} = SB > 0$.

PROCEDIMIENTO GENERAL DE BÚSQUEDA DE MÁXIMOS:

En general, los desarrollos de los párrafos anteriores pueden resumirse así: para cada posible combinación de signos $(\operatorname{sgn} C_i)_{i=1,n}$ que no incluya ceros hay que determinar los respectivos valores de $CACB$, $SACB$ y SB . Conocidos éstos, es inmediato determinar los puntos (α, β) que cumplen las condiciones necesarias para la existencia de extremos locales. A continuación, debe comprobarse si los valores de $\operatorname{sgn} C_i$ fijados a priori son efectivamente los que corresponden al par (α, β) . Solamente en caso afirmativo se estará en presencia de un máximo local; de lo contrario, el par deberá desecharse y pasar a analizar otra combinación de signos.

PROCEDIMIENTO GENERAL DE BÚSQUEDA DE MÍNIMOS:

Los mínimos locales se presentan como extremos cuspidales. Hay que investigar todas las combinaciones posibles $C_i = C_j = 0$ con

$i \neq j$. Es decir, hay que resolver las ecuaciones

$$\cos (\alpha_i - \alpha) \cos \beta_i \cos \beta = - \operatorname{sen} \beta_i \operatorname{sen} \beta$$

$$\cos (\alpha_j - \alpha) \cos \beta_j \cos \beta = - \operatorname{sen} \beta_j \operatorname{sen} \beta$$

de donde resulta, si β_i y β_j son ambos distintos de cero:

$$\operatorname{tg} \alpha = - \frac{\cos \alpha_i \operatorname{sen} \beta_j \cos \beta_i - \cos \alpha_j \operatorname{sen} \beta_i \cos \beta_j}{\operatorname{sen} \alpha_i \operatorname{sen} \beta_j \cos \beta_i - \operatorname{sen} \alpha_j \operatorname{sen} \beta_i \cos \beta_j}$$

$$\operatorname{tg} \beta = - \frac{\cos (\alpha_i - \alpha) \cos \beta_i}{\operatorname{sen} \beta_i} = - \frac{\cos (\alpha_j - \alpha) \cos \beta_j}{\operatorname{sen} \beta_j}$$

En caso de ser, por ejemplo, $\beta_i = 0$ pero $\beta_j \neq 0$, no puede tenerse $\cos \beta = 0$ y por lo tanto debe ser $\cos (\alpha_i - \alpha) = 0$; además, $\operatorname{tg} \beta$ se calculará a partir de la fórmula con el índice j . Lo mismo vale intercambiando en todo ambos índices.

Finalmente, si $\beta_i = \beta_j = 0$, debe ser $\alpha_i \neq \alpha_j$. Entonces resulta $\cos \beta = 0$, y el azimut α queda indeterminado.

Estas son condiciones necesarias para la existencia de mínimos locales. Para cada par (α, β) que las cumpla se requiere ahora comprobar si efectivamente se trata de un mínimo.

Con el propósito de analizar el valor de la frecuencia en el punto (α, β) y su variación en un entorno del mismo, la expresaremos como una suma de tres términos:

$$\tilde{\lambda} = \tilde{\lambda}_i + \tilde{\lambda}_j + \tilde{\lambda}_m$$

donde

$$\tilde{\lambda}_i = \lambda_i | \cos (\alpha_i - \alpha) \cos \beta_i \cos \beta + \operatorname{sen} \beta_i \operatorname{sen} \beta | = \lambda_i C_i \operatorname{sgn} C_i$$

$$\tilde{\lambda}_j = \lambda_j | \cos (\alpha_j - \alpha) \cos \beta_j \cos \beta + \operatorname{sen} \beta_j \operatorname{sen} \beta | = \lambda_j C_j \operatorname{sgn} C_j$$

$$\tilde{\lambda}_m = CACB_m \cos \alpha \cos \beta + SACB_m \operatorname{sen} \alpha \cos \beta + SB_m \operatorname{sen} \beta,$$

siendo

$$CACB_m = \sum_k \lambda_k \operatorname{sgn} C_k \cos \alpha_k \cos \beta_k$$

$$SACB_m = \sum_k \lambda_k \operatorname{sgn} C_k \operatorname{sen} \alpha_k \cos \beta_k$$

$$SB_m = \sum_k \lambda_k \operatorname{sgn} C_k \operatorname{sen} \beta_k$$

donde las sumas indicadas se extienden para k desde 1 hasta N , pero con $k \neq i, j$.

Definimos también los siguientes coeficientes por derivación parcial de C_i , C_j y $\tilde{\lambda}_m$ con respecto a α y a β :

$$DCA_i = \operatorname{sen} (\alpha_i - \alpha) \cos \beta_i \cos \beta$$

$$DCB_i = -\cos (\alpha_i - \alpha) \cos \beta_i \operatorname{sen} \beta + \operatorname{sen} \beta_i \cos \beta$$

$$DCA_j = \operatorname{sen} (\alpha_j - \alpha) \cos \beta_j \cos \beta$$

$$DCB_j = -\cos (\alpha_j - \alpha) \cos \beta_j \operatorname{sen} \beta + \operatorname{sen} \beta_j \cos \beta$$

$$DLA_m = (-CACB_m \operatorname{sen} \alpha + SACB_m \cos \alpha) \cos \beta$$

$$DLB_m = (-CACB_m \cos \alpha - SACB_m \operatorname{sen} \alpha) \operatorname{sen} \beta + SB_m \cos \beta$$

En un entorno del punto (α, β) , y para cualquier desplazamiento a lo largo del círculo máximo $C_i = 0$, se tiene

$$dC_i = DCA_i d\alpha + DCB_i d\beta = 0$$

$$dC_j = DCA_j d\alpha + DCB_j d\beta$$

y por lo tanto

$$\tilde{d\lambda}_i = 0$$

$$\tilde{d\lambda}_j = \lambda_j |DCA_j d\alpha + DCB_j d\beta|$$

$$\tilde{d\lambda}_m = DLA_m d\alpha + DLB_m d\beta$$

puesto que C_j (que es igual a dC_j) toma ambos signos, y los demás C_k (con $k \neq i, j$) conservan sus signos respectivos.

En las expresiones de $\tilde{d\lambda}_j$ y $\tilde{d\lambda}_m$, la condición $dC_i = 0$ permite eliminar $d\beta$ o bien $d\alpha$ (según convenga, para evitar denominadores nulos):

$$\tilde{d\lambda}_j = \lambda_j \left| \frac{DET_{ji}}{DCB_i} d\alpha \right| = \lambda_j \left| \frac{DET_{ji}}{-DCA_i} d\beta \right|$$

$$\tilde{d\lambda}_m = \frac{DET_{mi}}{DCB_i} d\alpha = \frac{DET_{mi}}{-DCA_i} d\beta$$

donde

$$DET_{ji} = DCA_j \cdot DCB_i - DCB_j \cdot DCA_i = -DET_{ij}$$

$$DET_{mi} = DCA_m \cdot DCB_i - DCB_m \cdot DCA_i$$

La suma $d\tilde{\lambda} = d\tilde{\lambda}_m + d\tilde{\lambda}_j$ será positiva o nula para cualquier valor arbitrario de $d\alpha$ o de $d\beta$ si se cumple

$$\lambda_j \cdot |DET_{ij}| \geq |DET_{mi}|$$

Todo el razonamiento debe repetirse intercambiando i con j . De allí resulta

$$\lambda_i \cdot |DET_{ij}| \geq |DET_{mj}|$$

La verificación de ambas condiciones asegura que hay un mínimo relativo en el punto (α, β) .

¶ 4.- FRECUENCIA EN UNA DIRECCIÓN CUALQUIERA.

La aplicación de la fórmula

$$\tilde{\lambda} = \tilde{\lambda}(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^N \lambda_i | \cos(\alpha_i - \alpha) \cos \beta_i \cos \beta + \sin \beta_i \sin \beta |,$$

que ya intervino reiteradamente en los desarrollos anteriores, ha sido incorporada al programa como una opción independiente que permite calcular la frecuencia en cualquier dirección (α, β) .-

Referencias básicas:

J.A. Hudson, S.D. Priest: Discontinuities and rock mass geometry. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 16, pp. 339-362, 1979.

P.F. Wallis, M.S. King: Discontinuity spacings in a crystalline rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 17, pp. 63-66, 1980.

S.D. Priest, J.A. Hudson: Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 18, pp. 183-197, 1981.

J.A. Hudson, S.D. Priest: Discontinuity frequency in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 20, pp. 73-89, 1983.

A. Karzulovic, R.E. Goodman: Determination of principal joint frequencies. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 22, pp. 471-473, 1985.

O. Hildenberg: Trabajo Final de Licenciatura en Geología (Tema: Evaluación estructural de la fundación de la presa Anizacate). Universidad Nacional de Río Cuarto, 1987.-

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA
FACULTAD DE MATEMATICA, ASTRONOMIA Y FISICA (Fa.M.A.F.)
Grupo de Análisis Numérico y Computación

Ing. Arcadio M. Niell, Lic. Graciela E. Jazan.

Córdoba, Septiembre de 1992

El presente trabajo ha sido elaborado en cumplimiento del actual convenio con la Empresa AGUA Y ENERGIA ELECTRICA DE LA NACION.

Representante técnico: Geól. Néstor Vendramini.

Informe 6.1

ESTABILIDAD DE TALUDES
EN ROCAS Y SUELOS

Tema: Análisis de estabilidad de taludes.-

Resumen: Se ha desarrollado un modelo estructurado de cálculo por criterios de equilibrio límite para fallas en cuña de taludes en macizos rocosos, considerando máxima carga de variables, subpresión, sismo, etc. Además del cálculo determinístico, se agrega un tratamiento estocástico (optativo) a partir de parámetros estadísticos obtenidos en el procesamiento de datos estructurales (ver Informe 1.1 citado en Referencias).

También se ha desarrollado un modelo para fallas circulares, aplicable a suelos o a rocas fracturadas, con posibilidad de tomar en cuenta las características no lineales del material.-

¶ 1.- FALLAS EN CUÑA: CÁLCULO DETERMINÍSTICO.

El procedimiento de cálculo de fallas en cuña implementado en el programa TALUD ha sido tomado del libro de Hoek y Bray citado en Referencias, pero con extensas adaptaciones para facilitar su uso y para sistematizar el proceso.

DATOS:

Los siguientes datos deben suministrarse en un archivo elaborado según el modelo que se acompaña, o bien (optativamente) ingresarse por teclado.

Aun cuando se elija ingresar los datos por archivo, algunos

de ellos pueden después ser modificados por teclado para el procesamiento de distintos casos.

Los ángulos se miden en grados, a saber: azimutes en sentido horario desde el Norte (*NESW*), buzamientos e inclinaciones desde el horizonte con signo positivo hacia abajo. Para las demás magnitudes (longitudes, fuerzas, y sus derivados) puede emplearse cualquier sistema de unidades, con tal de que sea coherente.

El talud y la posible falla en cuña quedan definidos por datos geométricos y físicos, referidos casi todos a cinco planos:

- ▶ #1 y #2: los dos costados de la cuña (planos de discontinuidad);
- ▶ #3: la superficie superior del terreno;
- ▶ #4: el frente del talud;
- ▶ #5: la fractura de tensión, en caso de existir.

En lo que se refiere al procedimiento de cálculo, la única diferencia entre los planos #1 y #2 consiste en que el primero se toma como referencia para las dimensiones lineales (H_1 , L).

Los datos son los siguientes:

- ▶ (α_i, ψ_i) , $i=1, \dots, 5$: Azimut e intensidad de buzamiento para los cinco planos. Si no existe fractura de tensión, esto se indica convencionalmente dando un valor negativo cualquiera a α_5 .
- ▶ (c_i, ϕ_i) , $i=1, 2$: Fuerza de cohesión y ángulo de fricción de los planos #1 y #2 (Ley de Coulomb).
- ▶ H_1 : Altura del talud, referida al plano #1.
- ▶ L : Distancia desde la cresta hasta la fractura de tensión, medida a lo largo de la traza del plano #1. Si no hay fractura de tensión, debe darse de todos modos un valor cualquiera.
- ▶ η : Signo del talud. Vale +1 si la cresta está situada por detrás del pie, y vale -1 si la cresta avanza con respecto al pie.
- ▶ (γ, γ_w) : Pesos específicos de la roca y del agua.
- ▶ (T, α_6, ψ_6) : Magnitud, azimut e inclinación de la fuerza de anclaje (cables y bulones).
- ▶ (E, α_7, ψ_7) : Magnitud, azimut e inclinación de la carga exterior (fuerza sísmica).

PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO:

Tras la lectura de los datos el programa calcula numerosos parámetros referidos a la geometría de la cuña. Luego verifica la coherencia de los datos: debe existir una cuña cuyo deslizamiento sea cinemáticamente posible, y en caso de existir fractura de tensión, los datos de ésta deben ser compatibles con los de la cuña. La ejecución continúa solamente si se cumplen estas condiciones; de lo contrario, termina con un mensaje de error.

Todos los cálculos que se describen a continuación se hacen en dos versiones: para talud saturado y para talud seco. La primera corresponde al caso en que las caras de la cuña y la fractura de tensión están completamente llenas de agua. Se trata de dos situaciones extremas que el programa toma en cuenta automáticamente en forma paralela, sin variantes optativas. Sin embargo, si el usuario quisiera considerar una situación intermedia, podría obtenerla asignando artificialmente un valor menor que el real al dato correspondiente al peso específico del agua (γ_w).

Un menú provee tres opciones de cálculo que pueden ejercitarse en cualquier orden y cuantas veces se desee, lo que permite modificar por teclado los datos de la fuerza de anclaje T y/o de la carga exterior E (según el caso).

Con las dos primeras opciones se obtiene como resultado el factor de seguridad F . Para la tercera, el valor de F es un dato que debe ingresarse por teclado.

► Opción 1: Cálculo del factor de seguridad F cuando las fuerzas T y E son nulas o están especificadas en magnitud y dirección.

► Opción 2: Cálculo del mínimo factor de seguridad F que se obtiene con una carga exterior E de magnitud dada. En este caso el programa determina también el azimut y la inclinación que corresponden a la dirección más desfavorable de la carga E .

► Opción 3: Cálculo de la fuerza de anclaje T de magnitud mínima que se requiere para alcanzar un valor prefijado del factor de seguridad F . En este caso el programa determina también el azimut y la inclinación que corresponden a la dirección óptima de la fuerza de anclaje T .

¶ 2.- FALLAS EN CUÑA: CÁLCULO ESTADÍSTICO.

En la práctica, la orientación geométrica de los planos de posible falla se conoce con una cierta indeterminación. Un tratamiento realista de la incertidumbre resultante puede encararse mediante un planteo estadístico, para el cual existen muchas variantes factibles.

Por razones de claridad, sencillez y aprovechamiento del trabajo ya realizado, hemos elegido el tratamiento implementado en el programa TALEST, que se describe a continuación.

El azimut de buzamiento (α) y la intensidad de buzamiento (ψ) de un plano de discontinuidad no se prestan con facilidad para ser directamente utilizados como variables aleatorias. En cambio, el tratamiento ya realizado en nuestro trabajo "Representación de planos de discontinuidades geológicas en proyección equiareal", que amplía y desarrolla un planteo anterior de Grossman (ver Referencias) permite utilizar una distribución normal bivariada en el plano tangente a la esfera unidad, con punto de contacto en el polo promedio de cada familia de planos. Los datos que aquí se

requieren son algunos de los resultados proporcionados por el programa de proyección equiareal.

Concretamente, a los datos descritos en la sección anterior se requiere agregar los siguientes, para cada uno de los planos #1 y #2:

▶ $(\sigma_M, \sigma_m, \omega_M)$: Semiejes de la elipse de dispersión sobre el plano tangente (desviaciones standard), y ángulo (en grados) medido en sentido horario desde el plano meridiano hasta el eje mayor.

Los datos de orientación de los planos #1 y #2 que aparecen al principio del archivo de datos son interpretados por TALEST como valores que definen en cada caso el polo promedio. A partir de allí y de la elipse de dispersión, mediante un procedimiento para la generación de números al azar con distribución gaussiana, se generan sucesivas posiciones aleatorias del par de polos que definen las orientaciones de ambos costados de la cuña.

Para cada corrida aleatoria se realiza todo el cálculo descrito en ¶ 1, comenzando por la verificación de la geometría de la cuña. Solamente si esta geometría resulta válida el cálculo prosigue hasta su terminación; de lo contrario, la corrida se descarta y se genera inmediatamente otra.

Continuamente se exhiben en pantalla el promedio y la desviación standard de los valores calculados hasta el momento para el factor de seguridad F (Opciones 1 y 2) o para la magnitud de la fuerza de anclaje T (Opción 3). Siempre estos cálculos se realizan paralelamente para los casos de talud saturado y talud seco. Al completarse una cantidad prefijada de corridas con geometría válida, se exhiben los valores finales.

¶ 3.- FALLAS CIRCULARES.

El programa CIRCULAR aplica el método de Bishop (1955) adaptado por Hoek. La geometría de la falla se supone definida por su centro y su radio. A los efectos del cálculo el talud se considera dividido en franjas que pueden corresponder a diferentes características materiales. Para cada franja deben proporcionarse como datos el ángulo de inclinación de la superficie de deslizamiento, la altura de la franja, la altura del agua subterránea y el ancho de la franja.

Los datos generales incluyen, además de la densidad del material y la subpresión en la grieta de tensión, los valores de los parámetros que definen el comportamiento no lineal del material según una ley de tipo Hoek; como variante optativa, puede aplicarse una ley de tipo Coulomb dando para cada franja los valores de la densidad, el ángulo de fricción y la cohesión del material.

El cálculo del factor de seguridad se realiza en forma iterativa hasta satisfacer una tolerancia prefijada.

Tanto el centro como el radio de la superficie de deslizamiento se suponen definidas *a priori*. Por lo general será necesario realizar el cálculo varias veces con distintas

posiciones. Queda como proyecto a desarrollar en el futuro próximo la determinación automática de los valores críticos que proporcionan el mínimo factor de seguridad.

REFERENCIAS

E. Hoek, J.W. Bray: *Rock slope engineering*. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1977.

N.F. Grossman: The bivariate normal distribution on the tangent plane at the mean attitude. *Proceedings of the International Symposium on Fundamentals of Rock Joints*, Björkliden, 1985, pp. 3-11.

P.H.S.W. Kulatilake, R.E. Finley, A. Ghosh: Effect of variability of joint orientation and strength on factor of safety of wedge stability. *Proceedings of the International Symposium on Fundamentals of Rock Joints*, Björkliden, 1985, pp. 25-33.

O. Hungr: An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimensions. *Geotechnique* 37, No. 1, pp. 113-117, 1987.

A. Niell, G. Jazan, N. Vendramini: Representación de planos de discontinuidades geológicas en proyección equiareal. *FAMAF, Informe (1.1) presentado por convenio con la Empresa Agua y Energía Eléctrica de la Nación*, Córdoba, julio 1991.

AJUSTE DE RESISTENCIA AL CORTE SEGUN EL CRITERIO DE BARTON

La siguiente ley empírica ha sido propuesta por Barton y aplicada por diversos autores para modelizar la resistencia pico de discontinuidades rocosas:

$$\tau_p = \sigma_n \operatorname{tg} \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \Phi_r \right]$$

donde

τ_p = máxima resistencia al corte σ_n = tensión normal JCS = resistencia de la junta a la compresión	}	Tensiones (MPa)
--	---	--------------------

JRC = coeficiente de rugosidad de la junta Φ_r = ángulo de fricción residual	}	Ángulos (°)
--	---	----------------

El propósito de este trabajo ha sido automatizar el cálculo de los coeficientes JRC y JCS a partir de los valores de las demás variables obtenidos mediante ensayos de laboratorio. Cada conjunto de valores medidos comprende un solo valor fijo del ángulo de fricción residual Φ_r y una cierta cantidad de pares (σ_n , τ_p). A criterio del técnico interviniente, el ángulo de fricción residual Φ_r podrá ser reemplazado en ciertos casos por el ángulo de fricción básico Φ_b , recomendándose su evaluación cuidadosa debido a su importante influencia sobre los resultados.

Se ha elaborado un programa (BARTON) que realiza el ajuste de los parámetros según el criterio de cuadrados mínimos por el método simplex [ver Caceci - Cacheris, 1984]. Para acelerar el cálculo se parte de una primera aproximación obtenida por regresión lineal, previa linealización de la ley. Un menú de pantalla facilita el ingreso de datos y el control de la secuencia del procedimiento.

La salida se hace por tablas y por gráficos que, en función de σ_n , muestran los siguientes valores: la resistencia al corte τ_p , el ángulo de fricción instantáneo Φ_i definido por la pendiente de la curva en cada punto, y el ángulo de fricción activo Φ_a que corresponde a la cuerda que une el origen con cada punto de la curva. También se determina el error medio cuadrático.

Las experiencias realizadas han permitido comprobar que el problema de la determinación de los parámetros en función de los datos de ensayo suele ser mal condicionado; esto es, una perturbación accidental de un dato individual puede modificar considerablemente los resultados, especialmente el valor de JCS . Por ello se recomienda no operar con datos escasos. Cada ensayo debería contener no menos de 10 pares de valores.

Se incluye como opción la posibilidad de fijar como dato el valor de JCS (obtenido por ensayos de laboratorio), quedando entonces JRC como único parámetro a determinar.

Referencias básicas:

N. Barton and V. Choubey: The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics 10, pp. 1-54, 1977.

Cruden: Estimating joint roughness coefficients. Journal of Rock Mechanics, 1979.

S. Bandis, A.C. Lumsden, and N.R. Barton: Some effects of scale on the shear strength of joints. Journal of Rock Mechanics, 1981.

M. Caceci and W. Cacheris: Fitting curves to data. BYTE 9, No. 6, pp. 340-362, May 1984.

M.J. Reeves: Rock surface roughness and frictional strength, Journal of Rock Mechanics, 1985.

A. Clerici: Shear strength measurement along joints in rock with a rigid behavior. IAEG, 1990.

INTERACCIÓN ROCA - SOPORTE PARA TUNELES CIRCULARES

Tema: Interacción roca-soporte.-

Resumen: Análisis de tensiones y deformaciones en excavaciones subterráneas (túneles de sección circular). La secuencia de cálculo incluye:

- 1) Curva característica de la masa rocosa (con deformación elástica y plástica);
- 2) Rigidez y máxima presión del soporte para los casos de revestimientos de hormigón o de cerchas metálicas, y para el caso de bulones o cables anclados;
- 3) Curvas de reacción para un solo sistema de soporte y para sistemas de soporte combinados.-

La obra de Hoek y Brown citada en Referencias incluye un análisis simplificado de la interacción roca-soporte y de la reacción de distintos tipos de soportes (simples o combinados) para túneles circulares excavados en macizos rocosos.

Entre las diversas hipótesis simplificativas, se supone: que la longitud del túnel es tal que el problema puede tratarse en forma bidimensional; que las tensiones horizontal y vertical *in situ* son iguales, de magnitud p_0 ; que el soporte instalado ejerce una presión radial uniforme p_i sobre las paredes del túnel; que la masa rocosa original tiene un comportamiento elástico lineal caracterizado por el módulo de Young E y la relación de Poisson ν ; que sus características de rotura están dadas por una ley del tipo utilizado habitualmente por Hoek,

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m \sigma_c \cdot \sigma_3 + s \sigma_c^2)^{1/2};$$

que la masa rocosa rota tiene un comportamiento perfectamente plástico, y su tensión límite también obedece a una ley del tipo

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_r \sigma_c \cdot \sigma_3 + s_r \sigma_c^2)^{1/2};$$

que el comportamiento de la roca no depende del tiempo; que la zona plástica se extiende hasta un radio r_e que depende de la presión *in situ* p_0 , la presión del soporte p_i y las características materiales de la masa rocosa en ambas zonas (elástica y plástica); y que el análisis puede llevarse a cabo manteniendo la simetría radial, agregando solamente al final un término que tenga en cuenta el peso de la roca en la zona plástica.

El programa INTER provee seis opciones de cálculo que pueden ejercitarse en forma independiente (salvo las excepciones que se indican más abajo). Ellas son:

- ▶ 1.- Curva característica para masa rocosa.
- ▶ 2.- Rigidez del soporte y máxima presión del soporte para revestimiento de hormigón vaciado o lanzado.
- ▶ 3.- Rigidez del soporte y máxima presión del soporte para cerchas de acero bloqueadas.
- ▶ 4.- Rigidez del soporte y máxima presión del soporte para anclaje de bulones o cables.
- ▶ 5.- Curva de reacción del soporte para un solo sistema de soporte.
- ▶ 6.- Curva de reacción del soporte para sistemas de soporte combinados.

DESCRIPCIÓN DE LAS OPCIONES

- ▶ 1.- Curva característica para masa rocosa.

La determinación de puntos de la curva característica se realiza para sucesivos valores de la presión del soporte p_i , desde 0 hasta un máximo igual a la presión *in situ* p_0 , a intervalos de Δp_i (dato).

Previamente se ha calculado el valor de un parámetro M que permite determinar un valor crítico de la presión del soporte, igual a $p_0 - M \sigma_c$. Para valores de p_i por debajo de este valor crítico, la deformación de la roca alrededor del túnel es plástica, y para valores superiores es elástica. Según el caso, se utiliza una u otra secuencia de cálculo para determinar el valor de la deformación.

Básicamente, los resultados consisten en sucesivos puntos de la curva característica (presión p_i versus deformación u_i) para la roca que rodea al túnel. Esto es todo lo que se calcula en el

rango elástico, es decir, en la segunda parte de la tabla de resultados.

En la primera parte, correspondiente al rango plástico, se calcula también el espesor de la corona plástica (diferencia de radios, $r_e - r_i$) y se tiene en cuenta la influencia del peso muerto de la masa rocosa rota. Para cada punto de la curva característica básica, que en este caso corresponde a las paredes laterales del túnel, se calculan otros dos que corresponden al techo y al piso, sumando y restando a p_i el término $\gamma_r(r_e - r_i)$. Vale decir que en este rango se calculan de hecho tres curvas características.

► 2, 3 y 4.- Rigidez del soporte y máxima presión del soporte para revestimientos de: hormigón vaciado o lanzado, cerchas de acero bloqueadas y anclaje de bulones o cables (respectivamente).

A partir de los respectivos archivos de datos (cuyos modelos se acompañan) cada una de estas opciones calcula dos valores: la rigidez k y la máxima presión del soporte p_{smax} .

► 5.- Curva de reacción del soporte para un solo sistema de soporte.

Para ejercitar esta opción se requiere haber hecho antes el cálculo correspondiente a por lo menos una de las opciones 2, 3 y 4. Como dato adicional, ingresado por teclado, se requiere la deformación inicial del túnel antes de la instalación del soporte (u_{i0}).

Se calcula una variación lineal de la deformación u_i a partir de su valor inicial u_{i0} , para valores de p_i desde 0 hasta p_{smax} .

► 6.- Curva de reacción del soporte para sistemas de soporte combinados.

Para ejercitar esta opción se requiere haber hecho antes los cálculos correspondientes a por lo menos dos de las opciones 2, 3 y 4. El programa verifica que tales cálculos hayan sido hechos con un mismo valor del radio del túnel. Como dato adicional, ingresado por teclado, se requiere la deformación inicial del túnel antes de la instalación del soporte (u_{i0}).

Con un valor de la rigidez igual a la suma de las rigideces de los dos sistemas de soporte, se calcula la variación lineal de la deformación hasta alcanzar p_i el menor de los dos valores de p_{smax} que corresponden a uno y otro sistema.

MODELOS DE ARCHIVOS DE DATOS

Se incluyen en Anexo para las opciones 1, 2, 3 y 4.

REFERENCIAS

Hoek, Brown: *Underground excavation in rocks*. London:
Institution of Mining and Metallurgy.
