

121
2ej.

u. n. a. m.
facultad de ingeniería

"Compendio de Problemas Relativos a la Mecánica de Rocas"

t e s i s

que para obtener el título de:

ingeniero civil

p r e s e n t a

Gabriel Pedroza

Escalera

méxico, d.f.

1988



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

	Página
1. INTRODUCCION	1
2. MUESTRAS DE ROCA Y SUS DISCONTINUIDADES	
2.1 Definición	2
2.2 Antecedentes	2
2.3 Propiedades Físicas o Índice de las Rocas	2
2.4 Propiedades Mecánicas de las Rocas	12
2.5 Problemas Resueltos	22
2.6 Problemas Propuestos	39
3. COMPORTAMIENTO DE MACIZOS ROCOSOS	
3.1 Geología Estructural	44
3.2 Discontinuidades	44
3.3 Reconocimiento General en Campo	45
3.4 Estereogramas	46
3.4.1 Diagrama de Puntos [Falsilla de Wulff]	47
3.5 Reconocimientos Geofísicos	49
3.5.1 Método Geofísico de Refracción	49
3.5.2 Método de Resistividad Eléctrica	55
3.6 Índice de Calidad de la Roca	59
3.7 Determinación "in situ" del Módulo de Deformabilidad	60
3.7.1 Pruebas Estáticas de Placa	61
3.7.2 Galería	62
3.8 Medición de Esfuerzos Tectónicos	64
3.8.1 Método de Relajación de Esfuerzos	64
3.9 Medición del Esfuerzo Cortante "in situ" en los Macizos Rocosos	66
3.9.1 Prueba de Corte Directo o Método de Socavón	66
3.10 Flujo de Agua en Rocas	67

	Página
3.10.1 Prueba de Bombeo	67
3.10.2 Prueba Lugeon	70
3.10.3 Prueba Lefranc - Mandel. Para Terreno Aluvial o Roca muy Fisurada	72
3.10.4 Prueba Nasberg. Para materiales aluviales no saturados	72
3.10.5 Pozos de Filtración. Para materiales no saturados [Sin NAF]	73
3.11 Problemas Resueltos	75
3.12 Problemas Propuestos	93
4. ANALISIS Y DISEÑO DE OBRAS EN MACIZOS ROCOSOS	
4.1 Análisis de Estabilidad de Taludes	104
4.1.1 Tipos de Deslizamiento	104
4.1.2 Fuerzas actuantes en un Talud de Roca	104
4.1.3 Análisis del Factor de Seguridad	106
4.2 Análisis Tridimensional mediante operaciones vectoriales	112
4.2.1 Definición de los planos de debilidad vectorialmente	112
4.2.2 Resultante del Sistema \bar{R}	114
4.2.3 Determinación del modo de deslizamiento	117
4.2.4 Factor de Seguridad cuando el - deslizamiento ocurre en un plano	118
4.2.5 Análisis por Rotación de un Talud	122
4.3 Problemas Resueltos	126
4.4 Problemas Propuestos	147
5. CONCLUSIONES	155

I. INTRODUCCION

Se pretende cubrir con este trabajo los temas y conceptos incluidos en la guía de estudio proporcionada a los alumnos de la materia de Geotecnia referentes únicamente a la Mecánica de Rocas.

Dentro del proceso enseñanza - aprendizaje se hace necesario ejemplificar la exposición teórica de los temas correspondientes a un determinado curso. Esto se logra en gran medida enriqueciendo el material de trabajo por medio de problemas prácticos.

El objetivo es por lo tanto, proporcionar al estudiante de mecánica de rocas algunos ejemplos en un grado de dificultad creciente de modo tal que vaya adquiriendo seguridad en el dominio de la materia.

En cada uno de los capítulos se presenta un breve resumen de los principales conceptos teóricos del tema en cuestión, seguido de una serie de problemas resueltos, y finalmente algunos problemas propuestos con sus respectivos resultados.

Espero sea de mucha utilidad este trabajo a mis compañeros estudiantes y profesionistas.

Finalmente, agradezco la ayuda prestada para llevar a cabo este trabajo a los señores ingenieros Hugo Sergio Haas Mora, Roberto Hernández Bravo, Carlos Díaz Mora, etc.

2. MUESTRAS DE ROCA Y SUS DISCONTINUIDADES

2.1 Definición

La Mecánica de Rocas es una ciencia teórica y aplicada que trata del comportamiento mecánico de las rocas y que estudia la reacción de éstas a los campos de fuerza que están sujetos.

2.2 Antecedentes

En la Mecánica de Rocas es muy importante el conocimiento de las propiedades de las rocas para lograr un diseño seguro y económico. Estas propiedades las agrupamos según sus características o efectos que le producen al macizo rocoso en propiedades físicas o índice y propiedades mecánicas.

2.3 Propiedades físicas o índice de las rocas

- Composición mineralógica

Se refiere a la variedad y modo de integración de los minerales en la roca.

- Estructura

En un macizo rocoso son los rasgos macroscópicos de la roca.

- Textura

Es el arreglo de las partículas o granos.

- Gravedad específica o densidad de sólidos

$$S_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_o}$$

donde:

W_s = peso de los sólidos

V_s = volumen de sólidos

γ_o = peso específico del agua

Dado que una roca está formada de diferentes minerales todos ellos de diferente densidad de sólidos; la densidad de sólidos de la roca será entonces el promedio pesado de las densidades de cada tipo de cristal.

Por medio del análisis petrográfico de secciones delgadas dará el porcentaje de los distintos minerales, por lo tanto:

$$S_s = \frac{\sum_{i=1}^n S_{si} V_i}{V_t = 1}$$

donde:

S_{si} = densidad de sólidos del componente

V_i = porcentaje decimal del volumen del componente i

Los valores de S_s pueden variar desde 2.1 hasta 7.6, según el mineral presentado.

- Porosidad (n)

Se define como $n = \frac{V_v}{V_t} \times 100$

donde:

V_v = volumen de vacíos

V_t = volumen total

la porosidad cuando la muestra está saturada de agua:

$$n = \frac{w - S_s}{1 + wS_s}$$

donde:

w = contenido de agua

y los poros de la roca están llenos de mercurio.

$$n = \frac{w_{Hg} \cdot S_s / S_{sHg}}{1 + w_{Hg} \cdot S_s / S_{sHg}}$$

- Porosidad de fisuración

Se puede obtener con un porosímetro.

Por otro lado, Walsh evalúa la porosidad de fisuración mediante la obtención del módulo de compresibilidad volumétrica de una muestra de roca sometida a presión hidrostática. Ver Fig. 1

Las fisuras de la muestra se van cerrando al aumentar el esfuerzo con la consiguiente pérdida de volumen de la muestra hasta alcanzar el punto A. La recta AB representa el comportamiento de la matriz no fisurada; su prolongación hasta el eje horizontal, indica el valor de .

Por otro lado, la velocidad de las ondas sónicas pueden ayudarnos a conocer el índice del grado de fisuración.

Fourmaintraux propone el siguiente procedimiento, primero, calcular la velocidad de las ondas longitudinales (V_{ℓ}^*) como si el espécimen no tuviera poros ni fisuras. Si la composición del mineral es conocida, V_{ℓ}^* puede calcularse como:

$$\frac{1}{V_{\ell}^*} = \sum \frac{C_i}{V_{\ell}^*, i}$$

donde:

$V_{\ell}^{*,i}$ = velocidad longitudinal de i-ésimo mineral

C_i = porcentaje proporcional al volumen de la roca con el valor de la velocidad de onda longitudinal del espécimen V_{ℓ} (Ver Tabla 2) se define:

$$IQ = \frac{V_{\ell}}{V_{\ell}^{*}} \times 100\%$$

IQ tiene una variación por la presencia de poros de:

$$IQ\% = 100 - 1.6np$$

Para la clasificación del fisuramiento del espécimen Fourmaintraux graficó el valor de IQ contra la porosidad. (Ver Fig. 2).

T A B L A 1

VELOCIDADES LONGITUDINALES	
<u>Mineral</u>	<u>V(m/seg)</u>
Cuarzo	6050
Olivino	8400
Augita	7200
Anfíbola	7200
Muscovita	5800
Ortoclasa	5800
Plagioclasa	6250
Calcita	6600
Dolomita	7500
Magnetita	7400
Yeso	5200
Epidota	7450
Pirita	8000

T A B L A 2

VALORES TIPICOS DE V* EN ROCA	
<u>Roca</u>	<u>V* (m/seg)</u>
Gabro	7000
Basalto	6500 - 7000
Caliza	6000 - 6500
Dolomita	6500 - 7000
Arenisca y	
Cuarcita	6000
Granito	5500 - 6000

- Peso específico seco (γ_d)

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_m}$$

donde:

W_s = peso de sólidos

V_m = volumen de la muestra

- Peso específico saturado (γ_{sat})

$$\gamma_{sat} = \frac{W_{sat}}{V_m}$$

donde:

W_{sat} = peso de la muestra saturada.

- Peso volumétrico o peso específico (γ_m)

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m}$$

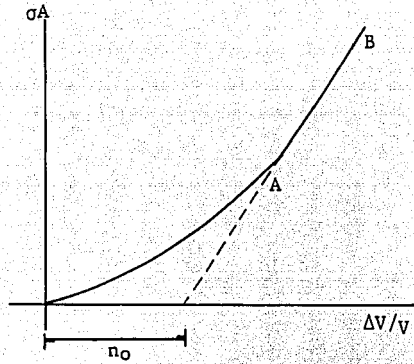


FIG. 1. VARIACION DEL VOLUMEN DE LA MUESTRA EN FUNCION DE LA PRESION HIDROSTATICA APLICADA.

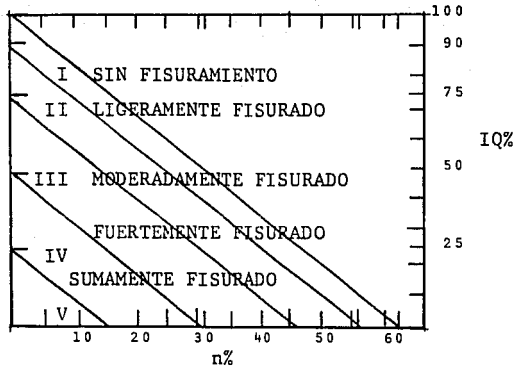


FIG. 2. CLASIFICACION DEL FISURAMIENTO DE ESPECIMENES DE ROCA.

W_m = peso de la muestra

V_m = volumen de la muestra

- Relación de vacíos (e)

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

V_v = volumen de vacíos

V_s = volumen de sólidos

- Contenido de agua o humedad natural (w%)

$$W = \frac{W_a}{W_s} \times 100$$

W_a = peso del agua

W_s = peso de la muestra seca

- Contenido de agua de la roca saturada

Este factor es importante porque al aumentar el contenido de agua - al grado de saturación, la resistencia a la compresión simple disminuye.

- Grado de saturación ($G_w\%$)

$$G_w = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

V_w = volumen del agua

V_v = volumen de vacíos

- Permeabilidad al agua, k

La permeabilidad en las rocas obedecen en la mayoría de las veces a la ley de Darcy:

$$q_x = k \frac{dh}{dx} A$$

donde:

q_x = gastos en dirección x (dirección del flujo), en cm^3/seg

k = coeficiente de permeabilidad, en cm/seg

h = carga hidráulica, en cm .

A = área de la sección transversal, normal a x, en cm^2

Con temperatura diferente a los 20°C , o bien, con otros fluidos:

$$q_x = \frac{k}{\mu} \frac{dp}{dz} A$$

donde:

ρ = presión en el fluido (igual a γh)

μ = viscosidad del fluido

En este último caso las unidades del coeficiente de permeabilidad son de área.

La unidad de permeabilidad es el Darcy:

$$1 \text{ Darcy} = 9.87 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$$

$$1 \text{ Darcy} = 10^{-3} \text{ cm}/\text{seg}$$

Para obtener k en laboratorio se mide el gasto que pasa por una muestra en un penetrómetro de carga constante, su solución será:

$$k = \frac{V_L}{hAt} \quad \text{donde} \quad \frac{h}{L} = i$$

donde:

V = volumen de agua, en cm^3 generalmente, que escurre a través del área A en cm^2 .

- t = tiempo en seg., durante el cual fluye la cantidad V de - -
 agua.
- i = gradiente hidráulico, igual a la pérdida de carga h en cm,
 entre la longitud L en cm. recorrida.

Cuando se requiere obtener la constante de percolación k_p , o sea, - -
 cuando se requiere tomar en cuenta la verdadera velocidad a través de
 los poros, se tiene que:

$$k_p = \frac{k}{n}, \text{ donde } n \text{ es porosidad de la muestra.}$$

- Permeabilidad al aire (k_a). La expresión que permite conocer la permeabilidad al aire es:

$$k_a = \frac{aL}{At} \log N \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \frac{1}{13.6}$$

donde:

- a = área transversal del tubo
 A = área de la sección transversal de la muestra
 13.6 = densidad del mercurio
 L = altura de la muestra
 t = tiempo en el que se lleva a cabo el descenso
 La velocidad de descenso entre h_1 y h_2 determina la permeabilidad al aire.

- Sensitividad (S)

En las muestras de roca, la sensitividad caracteriza la magnitud de la variación de la permeabilidad de éstas al cerrarse o abrirse sus fisuras.

$$S = \frac{k_{div1}}{k_{conv50}}$$

donde:

k_{div1} = permeabilidad de la muestra sometida a flujo divergente con una presión hidráulica interior de 1 Kg/cm^2 . El flujo divergente se logra cuando la presión hidráulica aplicada a la roca produce esfuerzos de tensión.

k_{conv50} = permeabilidad en flujo convergente sometiendo la muestra a una presión hidráulica exterior de 50 Kg/cm^2 . El flujo convergente se genera cuando la presión hidráulica aplicada a la roca produce esfuerzos de compresión.

El cálculo se hace igualmente para k_{conv50} y k_{div1} :

$$k = \log_N \frac{r_1}{r_2} \left(\frac{Q}{2\pi L}, \frac{1}{p} \right)$$

donde:

r_2 y r_1 = radios exterior e interior del espécimen.

q = gasto

L = longitud del espécimen

π = constante 3.1416

p = presión aplicada al fluido

- Grado de Alteración (i)

Es también la absorción de la muestra de roca en un tiempo t .

$$i = \frac{P_2 - P_1}{P_1}$$

donde P_2 es el peso de la muestra de roca sumergida en agua en un cierto tiempo " t " hasta lograr su saturación, oscila entre 1.5 y 3 horas y P_1 es el peso de la muestra en estado seco.

- Alterabilidad Específica (A_e)

$$A_e = \frac{P_i - P_f}{P_i} \%$$

donde:

P_i = peso de la muestra pulverizada

P_f = peso final, después de que el ácido sulfúrico actuó 2 horas.

- Anisotropía

Es el fenómeno que ocurre cuando el material se comporta de diferentes formas dependiendo de la dirección de los esfuerzos a que está sometido.

2.4 Propiedades mecánicas de las rocas

Al proyectar una obra de Ingeniería Civil será necesario lograr que los esfuerzos actuantes en el macizo rocoso no alcancen los niveles de esfuerzo tolerables con la consiguiente falla local o falla total de la misma; que las cargas aplicadas a la masa rocosa no le provoquen deformaciones que dañen a destruyan a la estructura.

Para elaborar un análisis completo es recomendable por lo tanto, considerar las propiedades mecánicas del macizo rocoso.

A continuación se menciona cada una de estas propiedades:

- Dureza

Como parámetro de resistencia, se observa que al aumentar el conteni-

do de cuarzo en la roca, aumenta la resistencia.

En forma ascendente están: Talco, Yeso, Calcita, Fluorita, Apatita, Ortoclasa (feldespato), Cuarzo, Topacio, Corindón, Diamante.

- Durabilidad

Depende de la naturaleza de la roca, el ambiente, porosidad, estructura geológica de la roca y su exposición al intemperismo.

La National Bureau of Standards (USA) estima la vida de las rocas con fines constructivos.

arenisca de Ohio	1 año a muchos siglos
limonita	20 a 40 años
mármol, grano grueso	40 años
mármol, grano fino	50 a 200 años
gneiss	50 años a muchos siglos
granito	75 a 200 años

Un análisis petrográfico de las rocas dará buena información para cada caso.

- Elasticidad

Todo material sólido se deforma bajo la acción de una carga o un esfuerzo, si el material recobra completamente su estado inicial después de cargarlo y posteriormente descargarlo se dice que es elástico.

Ensayando un espécimen de roca de radio R y longitud L a una prueba de compresión simple, se obtienen las siguientes constantes elásticas (Ver Fig. 3).

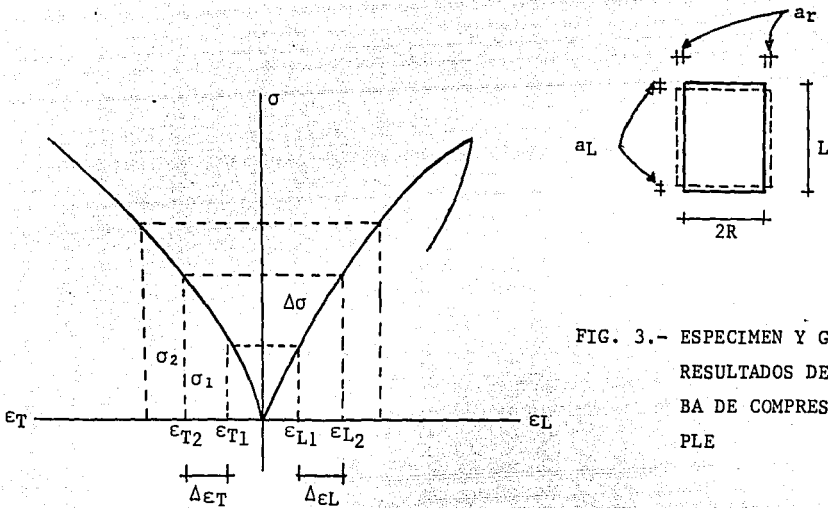


FIG. 3.- ESPECIMEN Y GRAFICA DE RESULTADOS DE UNA PRUEBA DE COMPRESION SIMPLA

Módulo de Young (E). - En Geología se le llama deformabilidad, y es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación, cuando no hay variación lineal E se calcula por incrementos.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

donde:

$\Delta\sigma$ = es el esfuerzo dado en un intervalo, en kg/cm².

$\Delta\epsilon$ = es la deformación producida en dicho intervalo.

Módulo de Deformabilidad Transversal

$$M_2 = \frac{\sigma}{\epsilon_T}$$

Módulo de Deformabilidad Longitudinal

$$M_1 = \frac{\sigma}{\epsilon_L}$$

$$\epsilon_T = \frac{a_T}{2R} \quad \epsilon_T = \text{deformación unitaria transversal}$$

$$\epsilon_L = \frac{a_L}{L} \quad \epsilon_L = \text{deformación unitaria longitudinal}$$

Módulo de Poisson. Es una relación de deformaciones unitarias

$$\nu = \frac{\epsilon_T}{\epsilon_L} = \frac{1}{m}$$

m = es el número de Poisson

si $\nu = 0.5$ el material es incompresible, deformación constante, en rocas duras y sanas ν oscila entre 0.15.

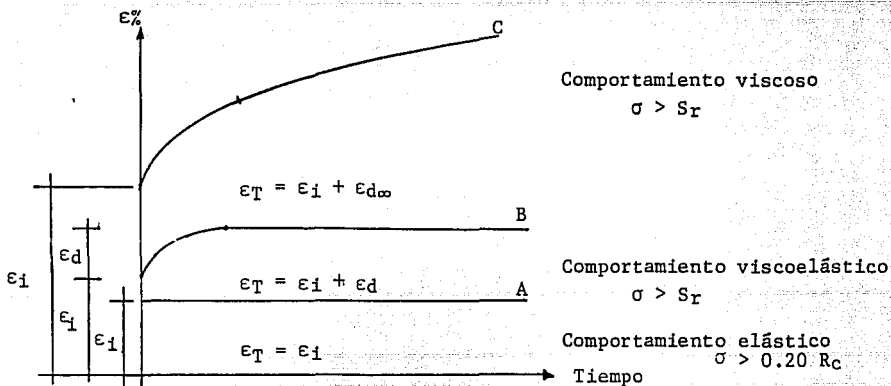
Cuando el material está cercano a la falla ν oscila alrededor de 0.30.

- Deformabilidad de las rocas

Efectos del tiempo en la deformabilidad de las rocas.

Las rocas presentan diferente comportamiento o diferente forma de deformación conforme al tiempo transcurrido. Por ejemplo, algunas tienen un comportamiento elástico como las rocas ígneas intrusivas, cuarcita y calizas muy duras. Viscoelástico como sedimentarias, metamórficas, rocas ígneas extrusivas con cierta alteración. Viscoso como salgema, potasa.

Para dar una idea de cómo se presentan estos diferentes tipos de comportamiento, se puede ver la siguiente gráfica.



La recta A representa un comportamiento elástico, el material de falla cuando el esfuerzo es menor a 0.2 de la resistencia a compresión simple durante una deformación constante.

$$\sigma < 0.20R_c$$

La curva B representa un comportamiento viscoelástico y S_r es la resistencia residual.

La curva C representa un comportamiento viscoelástico

La resistencia residual se presenta de forma diferente en las rocas.

S_r varía alrededor de $0.8R_c$ en rocas densas y es igual a $0.35R_c$ en calizas por ejemplo.

Para clasificar las rocas desde el punto de vista de su deformabilidad se utiliza:

$\frac{\epsilon_d - \epsilon_i}{\epsilon_i}$	Para rocas viscosas	>5
	Para rocas viscoelásticas	0 y 5
	Para rocas elásticas	es nulo

ϵ_i = deformación inicial

ϵ_d = deformación adicional

Resistencia al esfuerzo cortante

Criterios de falla más utilizados en Mecánica de Rocas:

1.- Máximo esfuerzo de tensión.

La falla frágil se alcanza cuando el esfuerzo principal - σ_3 aplicado iguala la resistencia uniaxial en tensión σ_t última.

2.- Criterio Coulomb

La resistencia al corte S , de un material cohesivo, suelo o roca, varía con el esfuerzo normal σ_n actuante en la superficie de falla.

$$S = \tau = \sigma_n \tan \phi + C$$

donde:

τ = esfuerzo cortante
 ϕ = ángulo de fricción
 C = cohesión

Caso I.- Cuando $\phi \neq 0$ y $C \neq 0$

El esfuerzo normal en el plano de ruptura vale:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha$$

σ_1 y σ_3 son esfuerzos principales mayor y menor respectivamente y α ángulo de ruptura. Fig. 4

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sen 2\alpha$$

Caso II.- Cuando $C = 0$, Fig. 5, la resistencia a la falla por esfuerzo cortante vale:

$$S = \tau = \sigma_n \tan \phi$$

Caso III.- Cuando $\phi = 0$ (Caso Tresca), Fig. 6, la resistencia a la falla por esfuerzo cortante vale:

$$S = \tau = C = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \text{constante}$$

Si $\sigma_3 = 0$ y $\phi = 0$, la resistencia a la falla por esfuerzo cortante vale:

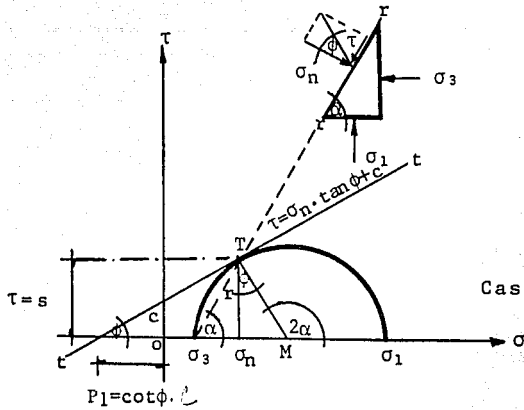


FIG. 4
Caso General Mohr - Coulomb

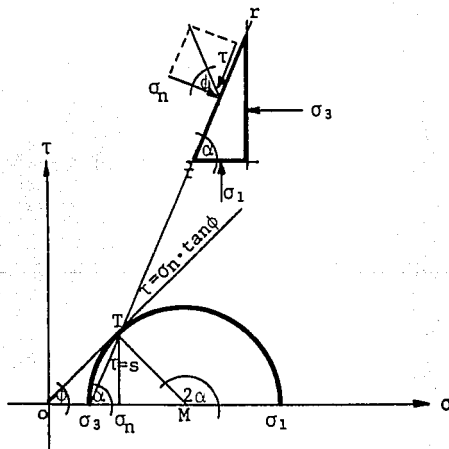


FIG. 5
Mohr - Coulomb
 $c = 0$

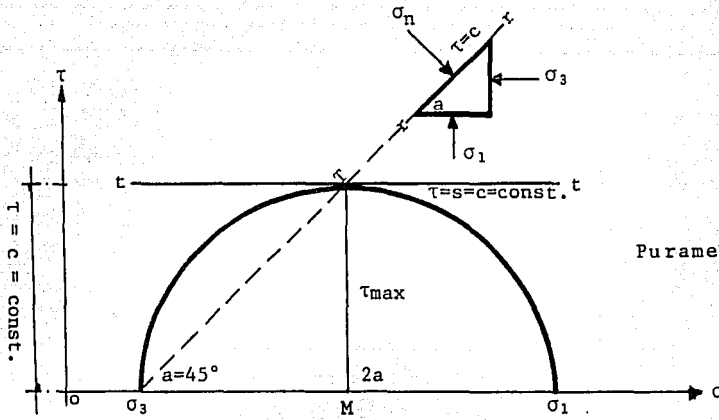


FIG. 6
 Puramente Cohesivo
 $\phi = 0$

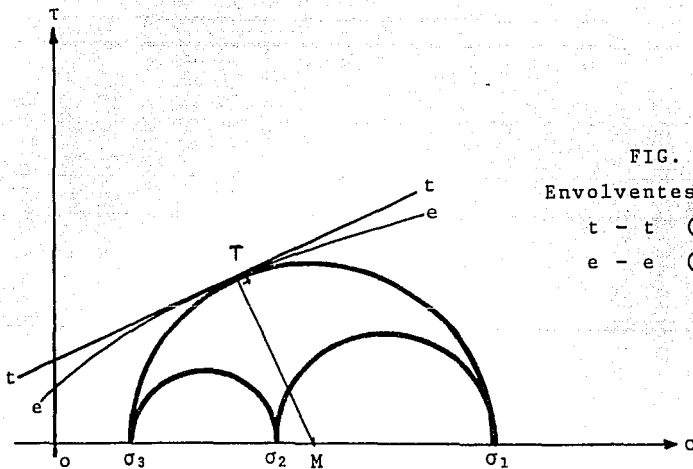


FIG. 7
 Envolventes de Mohr
 $t - t$ (recta)
 $e - e$ (curva)

$$S = \tau = C = \frac{\sigma_1}{2}$$

Para el caso general tenemos que

$$\text{sen } \phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2p_i}$$

donde:

$p_i = C \cot \phi$ es el esfuerzo inicial en la probeta cuando

$C = 0$, $p_i = 0$ y

$$\text{sen } \phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$$

tanto en el caso general, como cuando $C = 0$

$$\alpha = 45^\circ + \phi/2$$

cuando $\phi = 0$

$$\alpha = 45^\circ$$

3.- Criterio Mohr

El método considera una envolvente de falla a los círculos de Mohr resultado de los ensayos triaxiales. Cada círculo de Mohr está en función de las tensiones principales mayor y menor en rotura, ignorándose la influencia de la tensión principal intermedia. La falla ocurre cuando el círculo es tangente a la línea e-e, -- Fig. 7.

- Plasticidad

La plasticidad de un material sólido es la propiedad de deformarse con t́nua y permanentemente. En el estado pĺstico, las deformaciones permanentes pueden ocurrir sin fractura, con lo que se acepta que un material falló cuando sus deformaciones son muy grandes aunque no "se rompa".

El t́rmino "fractura" implica la aparici3n de dos superficies de separaci3n en el material.

2.5 Problemas Resueltos

1.- En un estudio de campo se extrajo una muestra de roca saturada con un peso de 1526 gr., al ser secada al horno su peso fue de - - 1053 gr., además su peso específico relativo fue de 2.7.

a) Calcular: e, n, w, γ_m , γ_d

S o l u c i ó n :

$$W_s = 1053 \text{ gr.}$$

$$W_m = 1526 \text{ gr.}$$

$$W_w = W_m - W_s$$

$$W_w = 1526 - 1053 = 473 \text{ gr.}$$

$$V_w = W_w / \gamma_o, \gamma_o = 1 \text{ gr/cm}^3$$

$$V_w = 473 / 1 = 473 \text{ cm}^3$$

$$V_s = \frac{W_s}{S_s \gamma_o} = \frac{1053}{(2.7)(1)} = 390 \text{ cm}^3$$

$$V_m = V_w + V_s = 473 + 390 = 863 \text{ cm}^3$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{473}{390} = 1.21$$

$$n = \frac{V_v}{V_m} = \frac{473}{863} = 0.55 \text{ ó } 55\%$$

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{473}{1053} = 0.45 \text{ ó } 45\%$$

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} = \frac{1526}{863} = 1.77 \text{ gr/cm}^3$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_m} = \frac{1053}{863} = 1.22 \text{ gr/cm}^3$$

- b) Con los resultados anteriores y el análisis petrográfico de una sección labrada revela que la pieza es un granito con un 45% de cuarzo, 30% de feldespato y 25% de plagioclasa. Determine el grado de fisuración de la muestra.

S o l u c i ó n : (Determinación del grado de fisuración)

granito con: 45% cuarzo
30% feldespato
25% plagioclasa

La velocidad de onda longitudinal con la ecuación , y de la Tabla 1:

V_L^* (cuarzo) = 6050 m/seg
 V_L^* (feldespato) = 5800 m/seg
 V_L^* (plagioclasa) = 6250 m/seg

sustituimos en la ecuación

$$\frac{1}{V_L^*} = \frac{0.45}{6050} + \frac{0.30}{5800} + \frac{0.25}{6250}$$

$$V_L^* = 6020.3 \text{ m/seg}$$

el valor de la velocidad de onda longitudinal del espécimen es:

$$V_L = 5750 \text{ m/seg}$$

por lo tanto, el índice de calidad de la roca con la ecuación

$$IQ = \frac{5750}{6020.3} \times 100$$

$$IQ = 95.51\%$$

con los valores de $n\%$ e $IQ\%$ y la gráfica de la Figura 2, concluimos que el espécimen se puede considerar sin fisuramiento.

2.- En una muestra de granito superficial, se obtuvieron los siguientes datos:

- (γ_m) peso volumétrico de la muestra 2.54 gr/cm³
- (w_o) peso sumergido de la muestra durante 24 hrs., 95 gr.
- (w_s) peso de la muestra en estado seco, 75 gr.
- (V_m) volumen de la muestra, 60 cm³.

El diámetro de la muestra cilíndrica es de 20 cm. Posteriormente se supo que la permeabilidad por flujo divergente era de: - - - $k_{div} = 2.8 \times 10^{-5}$ cm/seg y que la permeabilidad por flujo convergente era de: $k_{conv} = 2.5 \times 10^{-6}$ cm/seg. Calcular:

- a) Grado de alteración (i)
- b) Contenido de agua (w)
- c) Sensitividad (s)

S o l u c i ó n :

$$a) i = \frac{P_2 - P_1}{P_1} = \frac{95 - 75}{75} = \frac{20}{75} \therefore i = 0.27 \text{ ó } 27\%$$

$$b) \gamma_m = \frac{W_m}{V_m}$$

$$W_m = \gamma_m V_m = 2.54 \times 60 = 152.4 \text{ gr.}$$

$$W_w = W_m - W_s = 152.4 - 75 = 77.4 \text{ gr.}$$

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100 = \frac{77.4}{75} \times 100 \therefore W = 103.2\%$$

$$c) S = \frac{k_{div}}{k_{conv}} = \frac{2.8 \times 10^{-5}}{2.5 \times 10^{-6}} \therefore s = 11.2$$

3.- Se tiene una muestra de 4.56 kg., la cual se deja secar obteniéndose un peso de 4.26 kg. Posteriormente, se toma otra muestra - en estado natural de la misma roca, encontrando que su peso era

de 3.76 kg.; la que se pulverizó obteniendo un peso de 3.26 kg. Sometiéndose a la acción del ácido sulfúrico y que al secarse - dió un peso de 1.76 kg. Obtener:

- a) Grado de alteración
- b) Alteración específica

S o l u c i ó n :

- a) $P_2 = 4.56 \text{ kg.}$
- $P_1 = 4.26 \text{ kg.}$

$$i = \frac{P_2 - P_1}{P_1} = \frac{4.56 - 4.26}{4.26}$$

$$i = 0.07$$

- b) $P_i = 3.26 \text{ kg.}$
- $P_f = 1.76 \text{ kg.}$

$$\text{Alt. esp} = \frac{P_i - P_f}{P_i} = \frac{3.26 - 1.76}{3.26}$$

$$\text{Alt. esp} = 0.46$$

4.- Una muestra de granito se extrajo del subsuelo, obteniéndose un peso volumétrico de 2.67 Ton/m³, con un contenido de agua del - 8%. ¿Cuál sería el contenido de agua de la muestra, suponiendo que se sacara hasta que su peso volumétrico fuese de 2.54Ton/m³.

S o l u c i ó n :

$$\gamma_{m1} = 2.67 \text{ Ton/m}^3$$

$$\gamma_{m2} = 2.54 \text{ Ton/m}^3$$

$$w_1 = 8\%$$

$$\gamma_{m1} = \frac{Ww1 + Ws}{V_m}$$

$$\gamma_{m2} = \frac{Ww2 + Ws}{V_m}$$

$$Ww1 = W1 Ws$$

$$Ww2 = W2 Ws$$

$$\gamma_{m1} = \frac{W1 Ws + Ws}{V_m}$$

$$\gamma_{m2} = \frac{W2 Ws + Ws}{V_m}$$

$$\gamma_{m1} = \frac{Ws}{V_m} (1 + W1)$$

$$\gamma_{m2} = \frac{Ws}{V_m} (1 + W2)$$

considerando que tanto W_s como V_m no se alteran.

$$\frac{\gamma_{m1}}{1+W1} = \frac{\gamma_{m2}}{1+W2}$$

$$1 + W2 = \frac{\gamma_{m2}}{\gamma_{m1}} (1 + W1)$$

$$W2 = \left[\frac{\gamma_{m2}}{\gamma_{m1}} (1 + W1) - 1 \right] \times 100$$

$$W2 = \left[\frac{2.54}{2.67} (1 + 0.08) - 1 \right] \times 100$$

$$W2 = 2.74\%$$

5.- A una muestra cuya altura es de 3 cm. y su diámetro de 10 cm., - se le aplicó la prueba de permeabilidad de aire obteniéndose:

$$h_1 = 3 \text{ cm.}$$

$$h_2 = 1.7 \text{ cm.}$$

$$\text{Area del tubo capilar} = 0.4 \text{ cm.}^2$$

Los datos anteriores se obtuvieron en un lapso de 35 min. al - - efectuar la prueba. Obtener la permeabilidad al aire.

S o l u c i ó n :

$$a = 0.4 \text{ cm}^2$$

$$t = 2100 \text{ seg.}$$

$$h_1 = 3 \text{ cm.}$$

$$h_2 = 1.7 \text{ cm.}$$

$$L = 3 \text{ cm.}$$

$$D = 10 \text{ cm.}$$

$$k_{aire} = \frac{aL}{A_t} \ln \frac{h_1}{h_2} \frac{1}{13.6}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (10)^2}{4} = 78.54 \text{ cm}^2$$

$$k_{aire} = \frac{0.4 \times 3}{78.5 \times 2100} \ln \frac{3}{1.7} \frac{1}{13.6}$$

$$k_{aire} = 3.04 \times 10^{-7} \text{ cm/seg.}$$

6.- Obtenga la expresión de la permeabilidad en función de la presión confinante:

S o l u c i ó n :

presión confinante P_o
para un espesor dr ; $i = \frac{dp}{dr}$

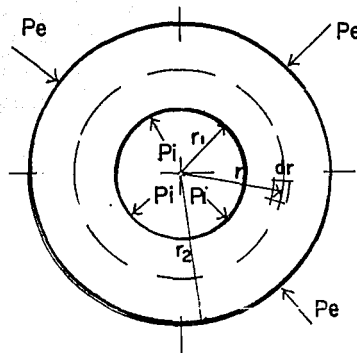
$$Q = Av ; \quad v = ki'$$

$$Q = A K \frac{dp}{dr}$$

$$\text{entonces } Qdr = A K dp$$

$$\text{si } Q = \text{cte y } A = 2\pi rL$$

$$Qdr = 2\pi r L K dp$$



$$\frac{Q}{2\pi LK} \frac{dr}{r} = dp$$

integrando en ambas partes $\frac{Q}{2\pi LK} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \int_0^{P_0} dp$

$$\frac{Q}{2\pi LK} \ln \frac{r_1}{r_2} = p$$

$$K = \frac{Q}{2\pi L} \frac{1}{p} \ln \frac{r_1}{r_2}$$

7. En una prueba de laboratorio con una muestra de roca de 35 cm² de área y 20 cm. de longitud se probó en un permeámetro de carga -- constante, la muestra estuvo sometida a una carga de 1.50 m. de agua, el volumen filtrado fue de 75 cm³ en 8 min. Determinar:

- El coeficiente de permeabilidad.
- velocidad de descarga.
- Dar una interpretación de los resultados.

$$a) K = \frac{VL}{ThA} = \frac{75 \times 20}{8 \times 60 \times 150 \times 35}$$

$$K = 5.95 \times 10^{-4} \text{ cm/seg.}$$

$$b) V = K_i = 5.95 \times 10^{-4} \left(\frac{150}{20} \right)$$

$$V = 4.46 \times 10^{-3} \text{ cm/seg.}$$

- Cuando se tienen valores de K menores a 10⁻⁷ cm/seg se puede decir que la permeabilidad del terreno es baja, lo que implica que el espécimen de prueba que se extrajo del macizo roco so presenta probablemente poca fisuración. En general, los

resultados de laboratorio, nunca se deben tomar como 100% representativos, pues sólo sirven para dar una idea.

- 8.- Determinar la altura que debe tener una muestra sometida a una prueba de permeabilidad al agua. De la prueba se obtuvieron los siguientes datos:

carga constante en la prueba H, 1.20 m.

Diámetro del espécimen D, 15 cm.

volumen de agua durante 15 min., es de 0.003 lts.

constante de permeabilidad del espécimen K, 10^{-5} cm/seg

S o l u c i ó n :

$$K = \frac{LV}{ATH}, \quad L = \frac{KATH}{V}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3.14 (15)^2}{4} = 176.72 \text{ cm}^2$$

$$1 \text{ lt} = 1 \text{ dm}^3 = 1000 \text{ cm}^3 \quad \therefore 0.003 \text{ lt} = 3 \text{ cm}^3$$

$$L = \frac{10^{-5} \times 176.72 \times 15 \times 120}{3}$$

$$L = 1.06 \text{ cm.}$$

- 9.- Una probeta de roca basáltica se somete a una prueba de compresión simple con un esfuerzo de 150 kg/cm², se obtiene una deformación longitudinal de 3 mm. y una deformación transversal de 1 mm. Determinar:

- La deformación unitaria longitudinal
- La deformación unitaria transversal
- La relación de Poisson

- d) El módulo de deformación longitudinal y el módulo de deformación transversal.

$$a_L = 3 \text{ mm.}$$

$$a_T = 1 \text{ mm.}$$

S o l u c i ó n :

- a) Deformación unitaria longitudinal

$$\epsilon_L = \frac{a_L}{L} = \frac{3}{150} = 0.02 \quad \therefore \epsilon_L = 2\%$$

- b) Deformación unitaria transversal

$$\epsilon_T = \frac{a_T}{2R} = \frac{1}{50} = 0.02 \quad \therefore \epsilon_T = 2\%$$

- c) Relación de Poisson

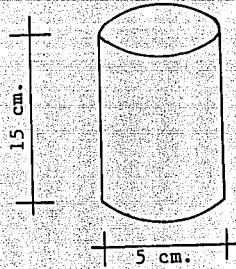
$$\nu = \frac{\epsilon_T}{\epsilon_L} = \frac{0.02}{0.02} = 1 \quad \therefore \nu = 1$$

- d) Módulo de deformación longitudinal

$$M_L = \frac{\sigma}{\epsilon_L} = \frac{150}{0.02} = 7500 \quad \therefore \epsilon_L = 7500 \text{ kg/cm}^2$$

Módulo de deformación transversal

$$M_T = \frac{\sigma}{\epsilon_T} = \frac{150}{0.02} = 7500 \quad \therefore \epsilon_T = 7500 \text{ kg/cm}^2$$



- 10.- En una prueba de compresión simple, una muestra de arenisca se somete a un esfuerzo de 170 kg/cm^2 , obteniendo una deformación inicial de 0.5 mm . y una deformación final de 2 mm , ambas deformaciones son unitarias.
- Obtener la resistencia residual de la roca.
 - Determinar la deformación diferida.
 - ¿Cómo se clasifica la roca?



S o l u c i ó n :

- a) Para una arenisca

$$S_r = 0.5 R_c$$

$$\text{pero } R_c = \sigma = 170 \text{ Kg/cm}^2$$

- b) Deformación diferida

$$\epsilon_f = \epsilon_i + \epsilon_d$$

$$\epsilon_d = \epsilon_f - \epsilon_i$$

$$\epsilon_d = 2 - 0.5 = 1.5$$

$$\epsilon_d = 1.5 \text{ mm.}$$

- c) Clasificación

$$\frac{\epsilon_d - \epsilon_i}{\epsilon_i} = \frac{1.5 - 0.5}{0.5} = 2$$

$$\text{como } \frac{\epsilon_d - \epsilon_i}{\epsilon_i} < 5$$

el material tiene un comportamiento viscoelástico.

- 11.- En una masa de roca se dan los siguientes valores, para un estado de esfuerzos.

$$\sigma_H = 5.7 \text{ kg/cm}^2$$

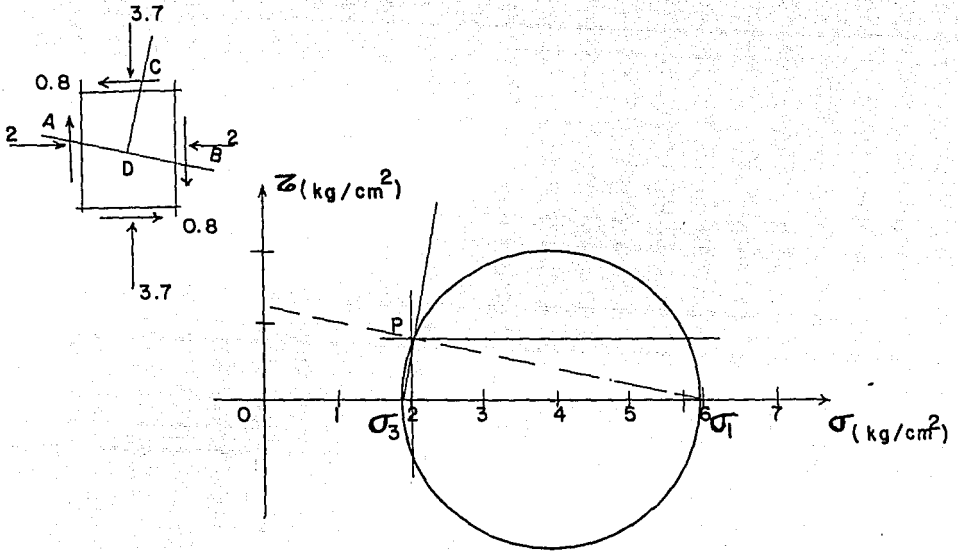
$$\sigma_n = 2.0 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau_n = \tau_H = 0.8 \text{ kg/cm}^2$$

Determinar la magnitud y dirección de los esfuerzos principales

S o l u c i ó n :

La resolución del problema se hará utilizando el círculo de Mohr.



R e s p u e s t a :

La magnitud de los esfuerzos principales por la ecuación

$$\sigma_{x \text{ min}}' = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}}$$

$$\sigma_{1, 3} = \frac{5.7 + 2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{5.7 - 2}{2}\right)^2 + 0.8}$$

$$\sigma_{1, 3} = 3.85 \pm 2.06$$

$$\sigma_3 = 1.8 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_1 = 5.9 \text{ Kg/cm}^2$$

Valores que se pueden verificar en el círculo de Mohr.

La dirección de los esfuerzos con la ecuación

$$\tan 2\alpha = \frac{\tau_{x y}}{\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}}$$

$$2\alpha = \arctan \frac{2(0.8)}{5.7 - 2}$$

$$\therefore 2\alpha = 26^\circ \text{ y } \alpha = 13^\circ$$

El esfuerzo σ_1 actúa en el plano AB y el σ_3 en el CD como se puede apreciar en la solución gráfica del problema.

- 12.- De un macizo rocoso (marga) se toman muestras del material y se someten a pruebas triaxiales. En la primera prueba la presión de confinamiento es de 1.6 Kg/cm² y el material falla cuando se incrementa la presión axial en 5.0 Kg/cm². En la segunda, la presión del confinamiento es de 3.2 Kg/cm² y el material falla cuando el esfuerzo llega a 10.8 Kg/cm². Finalmente, la presión de confinamiento aplicada al espécimen fue de 5 Kg/cm² y al incrementar se el esfuerzo axial en 10.7 Kg/cm².

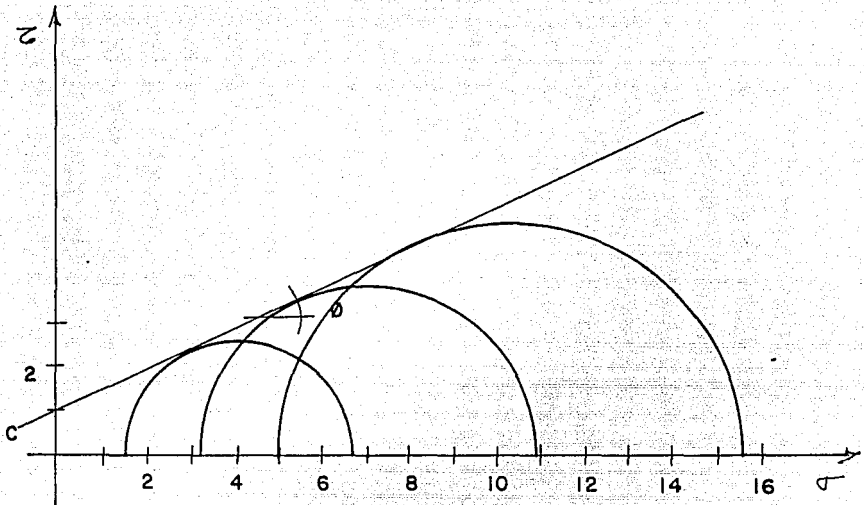
Si la ley de resistencia al esfuerzo cortante es determinada por el criterio de Coulomb, ¿qué valores de la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ) se obtendrían?.

S o l u c i ó n :

Para resolver este problema, se utilizará al procedimiento gráfico apoyándose en la teoría del círculo de Mohr.

Por lo tanto, se traza el círculo de Mohr localizando en el eje -

horizontal los esfuerzos principales dados en el problema.



R e s p u e s t a :

De la figura

$$c = 1 \text{ Kg/cm}^2$$

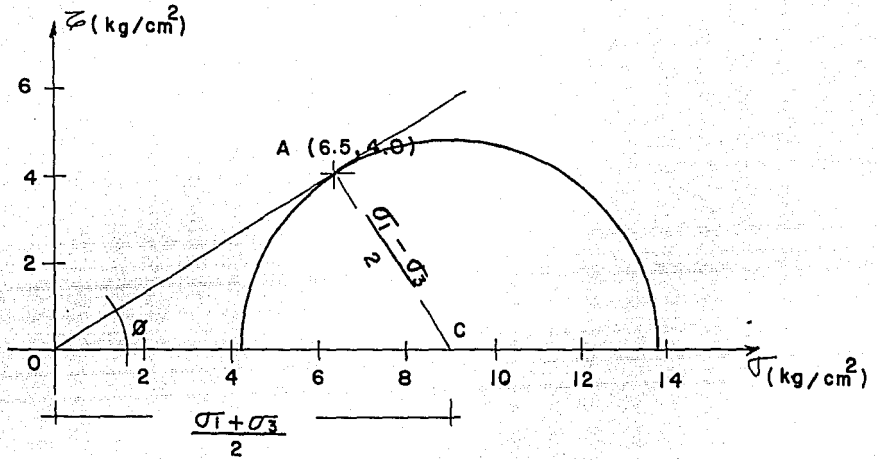
$$\phi = 29.52^\circ$$

13.- A un espécimen de roca (arenisca), se le somete a una prueba triaxial CD, cuando éste cede en su plano de falla se presentan los siguientes esfuerzos. Calcular: σ_1 , σ_3 y ϕ

$$\sigma_\alpha = 6.5 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\tau_\alpha = 4.0 \text{ Kg/cm}^2$$

Solución:



$$\phi = \arctan \frac{4}{6.5} = 35.1^\circ$$

$$\overline{OA} = \sqrt{(6.5)^2 + (4.0)^2} = 7.63$$

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \frac{7.63}{\cos \phi} = \frac{7.63}{\cos 35.1^\circ} \approx 9$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = 7.63 \tan \phi = 7.63 \tan 35.1^\circ \approx 4.7$$

$$\sigma_1 = 9.4 + \sigma_3$$

$$\sigma_1 = 9.4 + (18 - \sigma_1)$$

$$2\sigma_1 = 27.4$$

$$\sigma_1 = 13.7 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_3 = 4.3 \text{ Kg/cm}^2$$

La solución gráfica al problema sería proyectando una línea perpendicular a la línea de falla definida por el origen y (σ_n, τ_n) hasta cortar el eje horizontal de esfuerzos normales, finalmente, se traza el círculo de Mohr y se definen los valores σ_1 y σ_3 .

- 14.- En una prueba triaxial aplicada a una muestra de roca, se obtiene que el esfuerzo vertical a la falla es de 2000 psi y se sabe que el ángulo de fricción del material es de 60° . ¿Cuál será la fuerza cortante a la falla si se sabe también que la cohesión del material es nula?.

S o l u c i ó n :

Se sabe que la ley de resistencia es:

$$S = \tau = \sigma_n \tan \phi$$

por lo tanto

$$\tau = 2000 \tan 60^\circ$$

$$\tau = 2753 \text{ psi } \approx 193.7 \text{ Kg/cm}^2$$

- 15.- De un macizo rocoso se extrajo una muestra y se le realizó una prueba triaxial. La envolvente de Mohr señala que la cohesión es de 0.3 T/m^2 y el ángulo de fricción interna del material de $\phi = 48^\circ$, si el esfuerzo normal a la falla es igual a 4 T/m^2 .

Para el cálculo considere la Teoría de Coulomb.

- ¿Cuál es el esfuerzo cortante necesario para llevar el espécimen de prueba a la falla?
- Trace el círculo de Mohr y de los valores de los esfuerzos normales mayor y menor.

De el valor del máximo esfuerzo cortante

S o l u c i ó n :

a) La ley de resistencia es la siguiente:

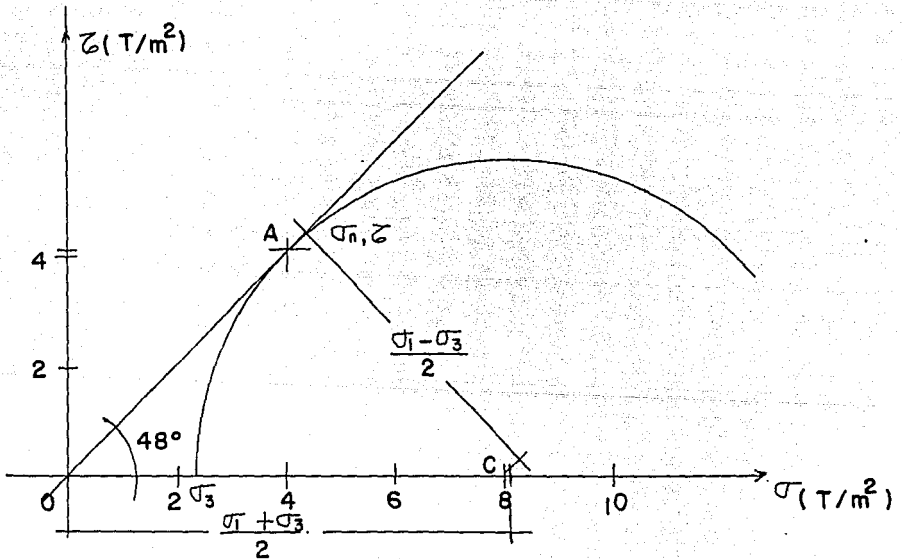
$$\tau = \tan\phi + C$$

por lo tanto

$$S = \tau = 4 \tan 48^\circ + 0.3$$

$$S = 4.06 \text{ T/m}^2$$

b)



$$\overline{OA} = \frac{4.06}{\text{sen}48^\circ} = 5.84$$

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \frac{5.84}{\text{cos}48^\circ} = 8.02$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = 5.84 \tan 48^\circ = 5.48$$

$$\sigma_1 = 10.97 + \sigma_3$$

$$\sigma_1 = 10.97 + (16.04 - \sigma_1)$$

$$\sigma_1 = 13.5 \text{ T/m}^2$$

$$\sigma_3 = 2.53 \text{ T/m}^2$$

$$\tau_{\max} = 5.48 \text{ T/m}^2$$

2.6 Problemas Propuestos

- 1.- Determina la densidad de sólidos de un macizo rocoso, la muestra pesa en estado seco 2.8 Kg. y el volumen de la muestra fue de 2625 cm³, su peso en estado saturado es de 4 Kg.
- 2.- Ahora se desea determinar w , n , γ_m con los datos anteriores.
- 3.- Una muestra rocosa intemperizada pesa $W_m = 130$ gr. y tiene un volumen $V_m = 40$ cm³, si $S_s = 3.81$, $W_s = 122$ gr. Calcule W_w , w , γ_m , V_v , e y n . ¿Cuál es la condición de la muestra?
- 4.- Calcule el grado de alteración, si el peso sumergido de la muestra en agua es de 4 Kg. y el peso en estado seco es de 2.8 kg.
- 5.- En una muestra de caliza se obtuvieron los siguientes resultados, la muestra de la roca estaba parcialmente saturada con $V = 1.2$ cm³, $W = 30\%$, $S_s = 2.66$. Calcule el peso volumétrico de la muestra y el peso volumétrico seco de la muestra.
- 6.- De una muestra geológica se labra una lámina para realizar un estudio petrográfico el cual revela que la roca es un basalto con un 93% de plagioclasa, un 3% de cuarzo y 4% de feldespato. La muestra en estado saturado pesa 2.475 gr. y seca pesa 2.451 gr., el volumen es igual a 0.884 dm³.

Calcular:

- a) La gravedad específica con la muestra
- b) La gravedad específica con el análisis petrográfico y tome el valor más coherente
- c) La porosidad en función del contenido de agua
- d) Determinar el grado de fisuración de la roca

7.- Un análisis petrográfico revela que la roca en estudio es una riolita con 32% de cuarzo, un 33% de feldespato alcalino y 35% de plagioclasa.

El volumen de vacíos es de 20 cm³ y el volumen total es de 500 cm³.

Calcular:

- La densidad de sólidos.
- La porosidad y el contenido de agua.
- Determinar el grado de fisuración de la roca.
- Calcular la porosidad si los vacíos estuvieran llenos de mercurio.

8.- En una prueba de permeabilidad en laboratorio se obtuvieron los siguientes datos:

La longitud de la muestra es de 2.8 cm., el área transversal es de 78.35 cm². la carga a la que estuvo sometida la muestra fue de 1.2 cm., el volumen filtrado es de 0.25 cm³ en un tiempo de 2100 seg.

Determinar:

- La permeabilidad.
- La velocidad de descarga.
- En base a los anteriores resultados dar una interpretación y qué posibles consecuencias se tendrían durante una inyección para impermeabilización de un macizo rocoso, además diga qué tipo de lechada usaría.

9.- Calcular la permeabilidad al aire de una muestra cuya altura es de 2.5 cm. y 15 cm. de diámetro.

Los valores de la prueba son los siguientes:

El radio del tubo capilar es de 0.4 cm.

El nivel inicial de mercurio es de 1.2 cm. (h_i) y al finalizar la prueba el nivel del mercurio baja 0.5 cm. en un tiempo de 2100 seg.

- 10.- Se sabe que la permeabilidad de una muestra de esquisto es de 1.3×10^{-7} cm/seg.
- La muestra labrada para la prueba de permeabilidad al aire tiene 4.85 cm. de altura y un diámetro de 8 cm.
- El radio del tubo capilar del dispositivo de prueba es de 8.5 mm.
- Calcular los valores de h_1 y h_2 si al relizar la prueba se presenta un desnivel de 9 mm. en el tubo capilar, en un lapso de 48 min.
- 11.- Calcular la sensibilidad de una roca, si al realizarle una prueba de permeabilidad se obtuvieron los siguientes datos:
- El gasto convergente fue de 75 cm³ en 30 min., el gasto divergente fue de 75 cm³ en 8 min.
- La muestra tiene 12 cm. de altura con un radio exterior de 4 cm. y un radio interior de 2 cm.
- 12.- A una muestra de riolita se le realizaron varias pruebas de laboratorio. Su peso húmedo saturado fue de 4054 gr. y al secarla -- fue de 3903 gr.
- Dicha muestra fue sometida a una prueba de compresión bajo una -- carga de 3730.64 Kg. La deformación longitudinal de la muestra -- fue de 3 mm. y la deformación transversal de 2.5 mm.
- El diámetro del espécimen es de 5 cm. con una altura de 6 cm.
- Finalmente, se le sometió a una prueba de permeabilidad al agua -- con el objeto de conocer su sensibilidad.
- La constante K_{conv} fue de 2.8×10^{-6} cm/seg y el flujo pasó a través de la muestra en un tiempo de 45 min.
- Para el flujo divergente se utilizó el mismo volumen de agua filtrado por la muestra en un tiempo de 2100 seg.
- Un radio interior de 2 cm. Tomar en cuenta para el cálculo los -- datos anteriores.

Calcular:

- El módulo de Poisson
- El módulo de deformación longitudinal y transversal
- El grado de alteración
- La sensibilidad

13.- Se realizó una prueba de compresión simple a una muestra en laboratorio. La carga aplicada fue de 13571.68 Kg., el diámetro del espécimen es de 8 cm., la altura de 20 cm.

Las deformaciones longitudinales y transversales que le provoca la carga a la muestra son de 2.5 mm. y 4.4 mm., respectivamente.

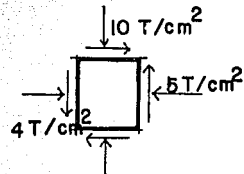
Al aplicar otra nueva carga se incrementa la deformación en 1 mm, nuevamente en ambas direcciones.

Calcular:

- Módulo de Poisson
- Módulo de deformación trasnversal
- Módulo de deformación longitudinal
- Deformabilidad longitudinal
- Deformabilidad transversal
- Módulo de Young
- Clasifique la roca desde el punto de vista de su deformabilidad, además, calcule su resistencia residual.

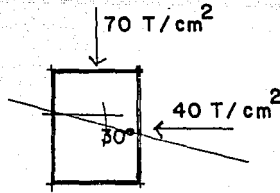
14.- Para el estado de esfuerzos que se muestra en la figura, determinar:

- Los planos principales
- Esfuerzos principales
- Esfuerzo cortante máximo



15.- Un macizo rocoso presenta el estado de esfuerzos de la figura. Determinar en el plano situado a 30° respecto al esfuerzo mayor el esfuerzo normal y cortante a que está sometida.

.....



16.- De un macizo rocoso se extrae una muestra y se somete a una prueba triaxial, el esfuerzo cortante de ruptura es de 4.06 Kg/cm^2 , y el esfuerzo máximo es de 5.48 Kg/cm^2 .

Calcular los esfuerzos principales mayor y menor, así como el esfuerzo vertical aplicado.

17.- De un macizo de roca calichosa se extraen muestras de material y se les somete a pruebas de compresión triaxial. En la primera prueba se obtiene un esfuerzo de confinamiento de 170 Kg/cm^2 y un esfuerzo normal de 220 Kg/cm^2 . En la segunda prueba el material falla cuando el esfuerzo axial llega a 118 Kg/cm^2 y un esfuerzo de confinamiento de 330 Kg/cm^2 . Finalmente, el último espécimen falla cuando el esfuerzo vertical se incrementa en 117 Kg/cm^2 de un esfuerzo horizontal de 60 Kg/cm^2 .

- Graficar los círculos de Mohr y su envolvente (curva)
- Determine la cohesión y el ángulo de fricción interna del material.

18.- De un macizo rocoso se extrajo un espécimen y se le realizó una prueba triaxial. La envolvente de Mohr señala que la cohesión es de 0.2 T/m^2 y el ángulo de fricción interna el material es de $\phi = 53^\circ$, el esfuerzo normal a la falla es igual a 4 T/m^2 .

- Calcule el esfuerzo cortante necesario para llevar el espécimen de prueba a a la falla.
- Dé el valor del máximo esfuerzo cortante y los valores de los esfuerzos normales mayor y menor
- Trace el círculo de Mohr

3. COMPORTAMIENTO DE MACIZOS ROCOSOS

3.1 Geología Estructural

Los aspectos de distorsión de la corteza terrestre, relacionada con las deformaciones y clasificación en grupos de pliegues y fallas con diversas características, es campo de estudio de la Geología Estructural.

3.2 Discontinuidades

Uno de los aspectos más importantes en el comportamiento mecánico de un macizo rocoso son las discontinuidades que se presentan en éste, de tal forma que en la Mecánica de Rocas se define a un macizo rocoso por sus discontinuidades más que por su litología.

Se entiende por discontinuidad, las fallas, fracturas, diversos tipos de juntas, estratificaciones, laminación y foliación, contactos, etc.

Algunos datos necesarios para el registro de discontinuidades en campo son:

- Rumbo.- Angulo horizontal entre una línea y una dirección de coordenadas específica, por lo general el norte real o el sur real.
- Buzamiento o Echado.- Inclinação de la línea de máxima pendiente de un plano inclinado. Se mide perpendicularmente a la dirección (Ver Fig. 8)

δ Angulo de buzamiento real medido en el plano vertical perpendicular a la dirección de la capa.

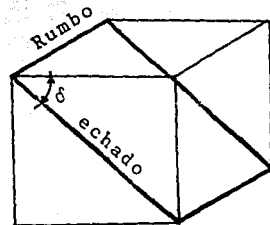


FIG. 8

3.3 Reconocimiento general en campo

Un reconocimiento general en el campo proporciona la información que se deberá clasificar y analizar con amplio criterio. Por ejemplo, si se tienen tres tipos diferentes de familias de discontinuidades, se realizaría un sondeo en la parte del cuerpo del macizo rocoso de la familia de discontinuidades No. 1 (Ver Fig. 9) ya que esta primera familia de discontinuidades es la que probablemente regirá el comportamiento mecánico del macizo rocoso. Sin embargo, si existiera alguna sola discontinuidad, como la No. 4 que está rellena de arcilla, entonces, ésta última será la que rija en mayor medida el comportamiento mecánico del macizo rocoso.

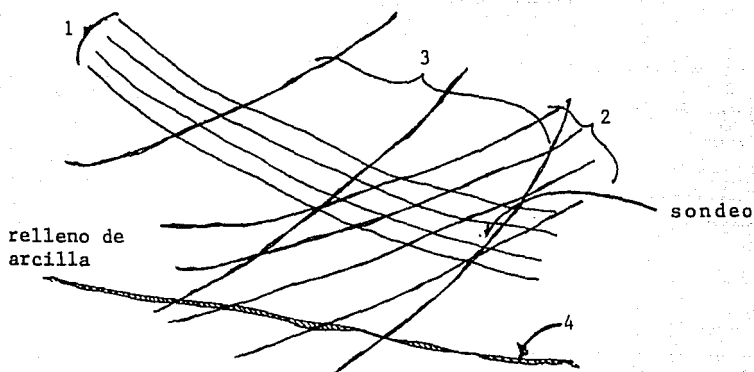


FIG. 9 PLANO DE DISCONTINUIDADES

Existen y se debe tomar muy en cuenta las llamadas zonas ciegas, o sea discontinuidades que no se puede apreciar por estar ocultas o fuera de nuestro alcance, un método para obtener la información sería llevando a cabo sondeos tanto verticales como horizontales a través de una amplia zona del macizo rocoso.

.....

3.4 Estereogramas

Para representar la posición y dirección preferencial del fracturamiento de un macizo rocoso, se utilizarán los diagramas de puntos y los de frecuencia que muestran en forma objetiva y estadística los resultados de las mediciones y observaciones realizadas en campo.

A continuación se muestra una estereofalsilla llamada también falsilla estereográfica meridional o de Wulff.

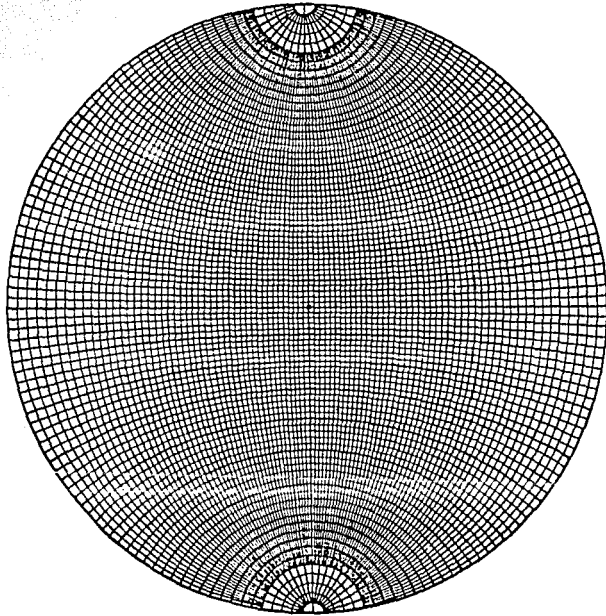


FIG. 10 FALSILLA DE WULFF

3.4.1 Diagrama de Puntos (Falsilla de Wulff)

Es una representación de los planos de discontinuidad por medio de -- puntos llamados polos en un plano denominado red estereográfica. Un polo se genera como sigue: si se supone que todos los planos de las - discontinuidades pasan por el centro de una esfera de referencia, la línea perpendicular a cada plano de discontinuidad que se pasa por el centro de la esfera, la atravesará en dos puntos, llamados polos.

A continuación se presenta gráficamente el proceso de la proyección - estereográfica de un plano de discontinuidad.

En Geometría Descriptiva se representaría un plano, como se ve en la Fig.11. Ahora bien, si el plano se hace pasar por una esfera, su representación será la de la Fig.12. Tomando la mitad de la esfera y - haciendo proyectar todos los puntos de la parte inferior del círculo máximo al plano horizontal, mediante su unión con el punto centro P, Fig.13, se tendrá como resultado la proyección del plano de disconti- nuidad en dos dimensiones, (Ver Fig.14).

Precisamente si se proyecta un polo de la recta que pasa por el cen- tro de la esfera y que es perpendicular al plano de discontinuidad, - sobre el plano horizontal quedará representado por el punto "q" en la proyección de dos dimensiones.

Con la falsilla de Wulff se pueden representar los planos de disconti nuidad por medio de las líneas curvas como en la Fig.14. Esta herra- mienta tiene muy amplias aplicaciones, y se puede usar para represen- tar los planos de discontinuidad por medio de polos.

El procedimiento para la representación se presentará como un ejemplo, además de algunos otros ejercicios.

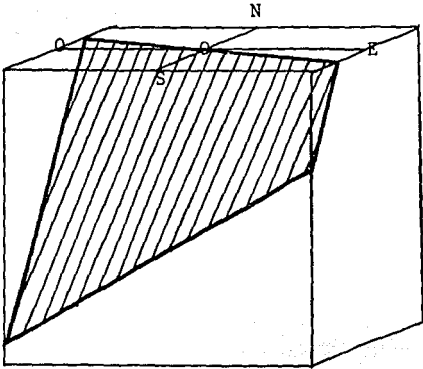


FIG. 11

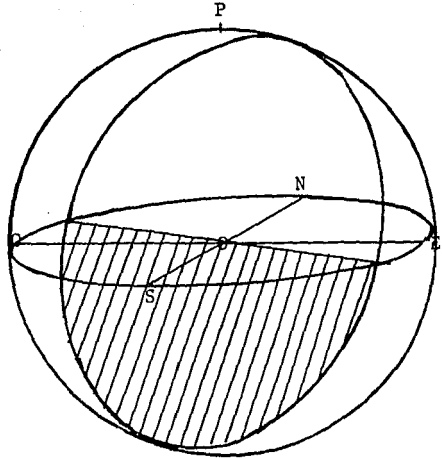


FIG. 12

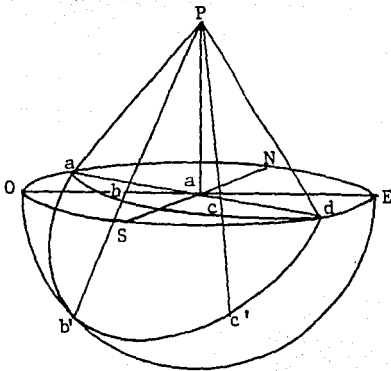


FIG. 13

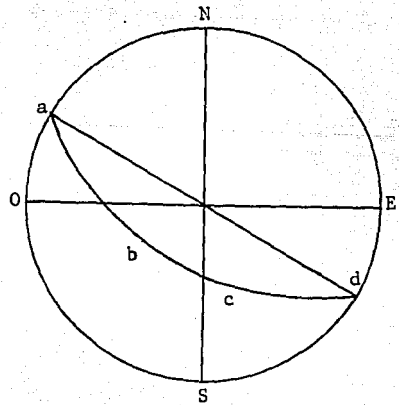


FIG. 14

3.5 Reconocimientos Geofísicos

Para obtener información de las capas que subyacen a una cierta profundidad es necesario auxiliarse de métodos que sean relativamente poco complicados. Para esto se han ideado métodos en los que con un adecuado análisis interpretativo y matemático permiten darse cuenta de cómo se encuentran las diferentes capas.

Estos métodos son aplicables en la exploración de áreas extensas y por medio de la correlación de velocidades o resistividades se puede inferir el tipo de material en los distintos estratos.

Estos estudios deberán estar apoyados por lo menos en un sondeo convencional para avalar los resultados obtenidos de las pruebas geosísmicas.

3.5.1 Método geosísmico de refracción

Los métodos geosísmicos de refracción requieren distancias largas de observación y se utilizan principalmente en la exploración de capas someras con fuertes contrastes de velocidad.

El método se basa en la medición del tiempo que tarda en viajar una onda sísmica a través de un medio; dicha onda es generada por impacto para estudios con profundidad de 10 m. y por explosión para estudios de mayor profundidad.

El impacto se produce con un martillo, y la explosión con una pequeña carga de dinamita.

Por medio de geófonos que son dispositivos electromagnéticos se lograrán captar las oscilaciones del suelo transformándolas en señales eléctricas, éstos por lo regular registrarán sólo la componente vertical. Su rango de sensibilidad oscila entre 5 y 100 ciclos por segundo.

do.

Finalmente, el fenómeno es captado en un aparato registrador denominado oscilógrafo.

Se recomienda colocar los geófonos equidistantes entre sí, de esta forma se puede verificar los resultados en el sentido opuesto, o bien, más cercanos en el extremo en que se genera la onda; pero no a menos de 2 m. y a distancias mayores en la parte más alejada, pero no a más de 20 m.

Con los resultados se obtiene una gráfica tiempo-distancia o domocrónica.

A continuación se presentan cuatro casos de la técnica sismológica de refracción:

Caso No. 1.- Estratigrafía Uniforme

En la gráfica se observa simetría entre las dos rectas respecto a la línea de tendido. La velocidad del medio es igual a la tangente del ángulo formado por la vertical y la línea.

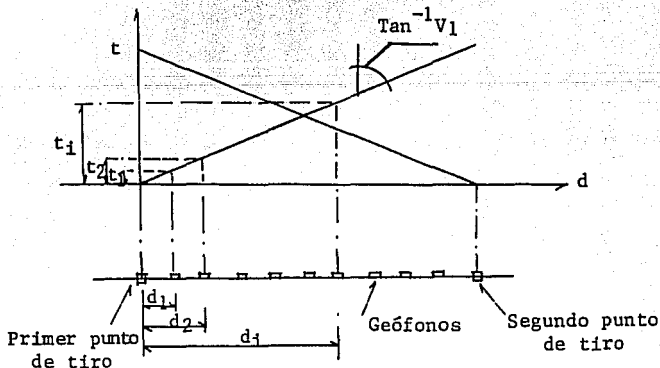


FIG. 15 GRAFICA DISTANCIA TIEMPO PARA EL CASO DE ESTRATIGRAFIA UNIFORME

Caso No. 2.- Estratigrafía de dos capas paralelas

En este caso la gráfica también es simétrica pero cada prueba queda representada por dos rectas de diferente pendiente (Fig.16); las velocidades en cada estrato se calculan como en el caso anterior y el espesor del estrato superior se obtiene con la expresión:

$$h = \frac{d_0}{2} \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \quad \dots(3.1)$$

donde:

d_0 = distancia crítica del punto de generación de la onda -
al cambio de pendiente de la gráfica tiempo-distancia.

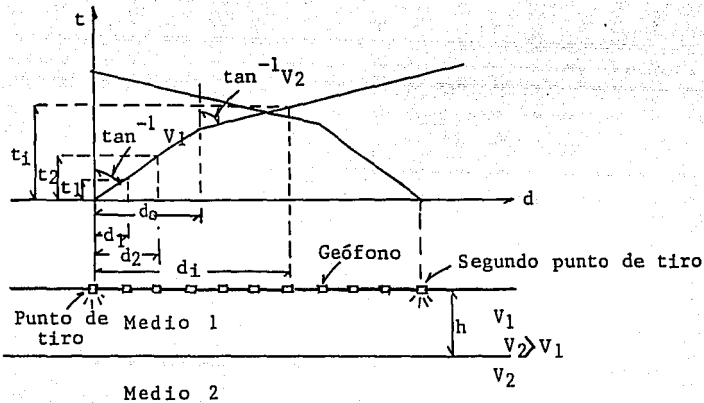


FIG. 16 GRÁFICA DOMOCRONICA PARA EL CASO DE 2 CAPAS CON CONTACTO PARALELO A LA SUPERFICIE DEL TERRENO

Caso No. 3.- Estratigrafía de 2 capas con contacto inclinado

La gráfica distancia-tiempo en esta caso no es simétrica (Fig.17), la velocidad del estrato superior (V_1) se determina como en los casos an

teriores; la velocidad del estrato inferior (V_2) y el echado del contacto (α) se calculan con las expresiones siguientes:

$$\alpha = \frac{1}{2} (\text{sen}^{-1} \frac{V_1}{U_d} - \text{sen}^{-1} \frac{V_1}{U_u}) \quad \dots (3.2)$$

$$V_2 = \frac{V_1}{\text{sen } i_0} \quad \dots (3.3)$$

$$i_0 = \frac{1}{2} (\text{sen}^{-1} \frac{V_1}{V_2} + \text{sen}^{-1} \frac{V_1}{U_u}) \quad \dots (3.4)$$

donde:

α = inclinación del contacto (echado)

U_u = velocidad aparente (debida al echado) del estrato inferior cuando se mide subiendo por el contacto. Se determina de la gráfica

U_d = velocidad aparente (debida al echado) del estrato inferior cuando se mide bajando por el contacto. Se determina de la gráfica.

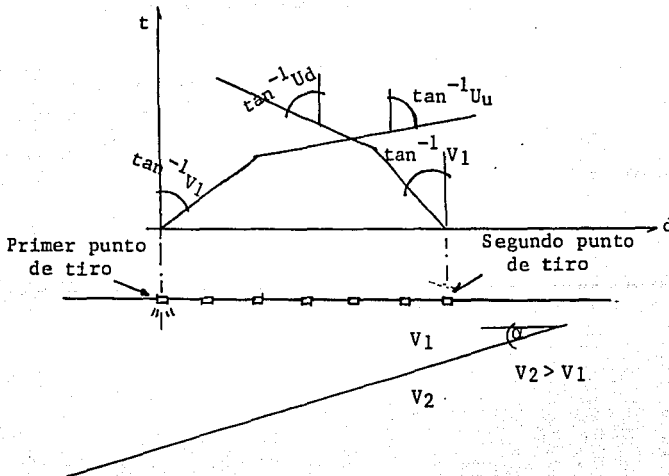


FIG. 17 DOMOCRONICA PARA CASO DE 2 CAPAS CON CONTACTO
CON ECHADO α

Caso No. 4.- Estratigrafía de 3 capas paralelas

En este caso se tienen gráficas simétricas para cada prueba pero en cada una de ellas se tienen tres rectas de pendiente diferente (Fig. 18); las velocidades en los tres medios (V_1, V_2, V_3) se calculan como en los casos 1 y 2 y las profundidades de los contactos (h_1, h_2) con las expresiones siguientes:

$$h_1 = \frac{T_2}{2} \frac{V_1 V_2}{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \quad \dots (3.5)$$

$$h_2 = \frac{1}{2} T_3 - 2h_1 \frac{V_3^2 - V_1^2}{V_1 V_3} \cdot \frac{V_2 V_3}{\sqrt{V_3^2 - V_2^2}} \quad \dots (3.6)$$

donde:

T_1 = tiempo de intersección al origen. Se determina de la gráfica.

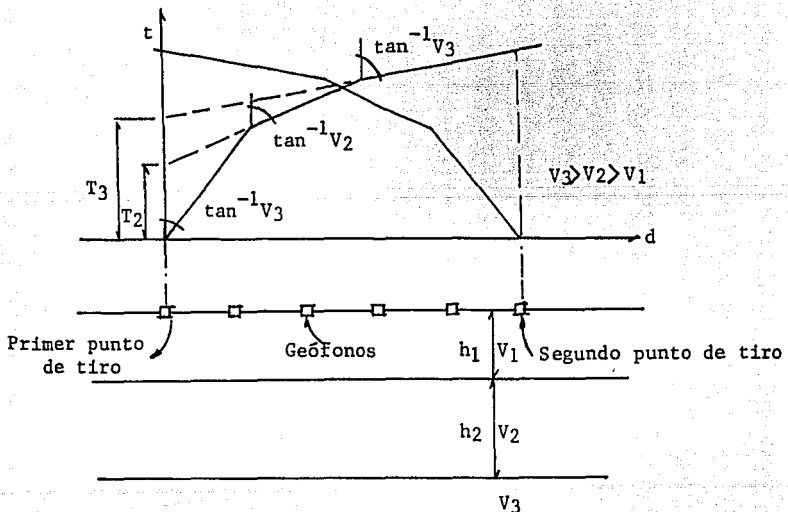


FIG. 18 GRAFICA TIEMPO DISTANCIA PARA EL CASO DE TRES ESTRATOS PARALELOS

De acuerdo a las diferentes velocidades observadas, se puede inferir cuál material pudiera conformar cualquier estrato.

A continuación se presenta en la Tabla No. 1 la relación entre material probable y la velocidad obtenida.

Tabla No. 1 . Velocidades de las ondas longitudinales en distintos tipos de rocas y suelos

M A T E R I A L	VELOCIDAD (m/seg)
suelo superficial	170 - 500
arcilla	1000 - 2800
arcilla arenosa	975 - 1160
arcilla arenosa cementada	1160 - 1280
limo	760
aluvión	550 - 1000
aluvión (terciario)	800 - 1500
aluvión profundo	1100 - 2360
depósito glacial	490 - 1700
dunas	500
loess	375 - 400
arena seca	400
arenisca	2400 - 4000
lutita	1800 - 3800
marga	3000 - 4700
caliza	3000 - 5700
dolomita	5000 - 6200
granito	4000 - 5600
gneiss masivo	5100 - 7500
esquistos o pizarra	2290 - 4700
rocas ígneas de basamento	5500 - 6600
agua	1435 - 1490

Propiedades dinámicas.- Para determinar el módulo de elasticidad dinámico y la relación de Poisson se acepta que el problema de transmisión de ondas es un problema elástico, ya que las deformaciones que se inducen al medio son muy pequeñas. Se pueden obtener para la velocidad de la onda longitudinal y transversal, las siguientes expresiones:

$$V_L = \sqrt{\frac{E_{din}}{\rho} \cdot \frac{1 - \gamma}{(1 + \gamma)(1 - 2\gamma)}} \quad (3.7)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E_{din}}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \gamma)}} \quad (3.8)$$

donde:

V_L = velocidad de las ondas longitudinales, m/seg.

V_T = velocidad de las ondas transversales, m/seg.

γ = relación de Poisson del medio

E_{din} = módulo de elasticidad dinámico del medio, kg/m^2 .

ρ = masa por unidad de volumen del material,

$$\frac{\text{kg seg}^2}{\text{m}^4}$$

Para determinar la velocidad de las ondas transversales se usan geófonos sensibles a la componente horizontal del movimiento, llamados -- geófonos de cortante.

Si la velocidad de las ondas longitudinales es mayor de 3000 m/seg se puede suponer una relación de Poisson igual 0.30 y aplicando la fórmula se calcula E_{din} ; el error de esta determinación es del orden del 10%. Cuando la velocidad de las ondas longitudinales es menor de -- 3000 m/seg se necesita medir la velocidad de la onda transversal y -- usando simultáneamente las fórmulas anteriores se puede calcular E_{din} .

3.5.2 Método de resistividad eléctrica

Se basan en la diferencia de resistividad eléctrica del material, estas resistividades eléctricas varían conforme al material, y a sus -- condiciones químicas, por ejemplo, una masa rocosa con alto contenido

de sales da resistividades bajas.

Estos métodos tienen la ventaja de poder emplearse abajo del nivel freático, localizar cavernas y estratos blandos que no se identifican con el método geosísmico.

Como un caso particular en arenas limpias por su dificultad en la obtención de muestras inalteradas, se recurre a la expresión:

$$\rho = \frac{1.56}{(\rho/\rho_0)^{0.9}} \quad (3.9)$$

donde:

ρ = resistividad aparente de la arena

ρ_0 = resistividad del agua.

A continuación se presentan algunos rangos de resistividades eléctricas para diferentes tipos de material.

M A T E R I A L	RESISTIVIDAD ($\Omega \times m$)
arcillas	$0.5 < \rho < 20$ xm.
calizas	$100 < \rho < 500$
esquistoso	$50 < \rho < 100$
rocas ígneas alteradas	$100 < \rho < 500$
rocas ígneas sanas	$500 < \rho < 10000$
capas superficiales secas	$4000 < \rho < 5000$
arena de duna seca	50,000

En campo la forma de obtener la información requerida, se logra aplicando una corriente eléctrica con la finalidad de crear campos potenciales y dependiendo del arreglo, se calcula la resistividad eléctrica, en términos generales se tiene:

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} \quad (3.10)$$

donde:

k = depende de la posición de los electrodos.

ΔV = es la diferencia de potencial

I = intensidad de corriente aplicada.

La resistividad aparente depende de las características eléctricas de las capas y del coeficiente k .

En las siguientes gráficas se observa cómo se genera el fenómeno en campo y cómo se pueden interpretar los resultados:

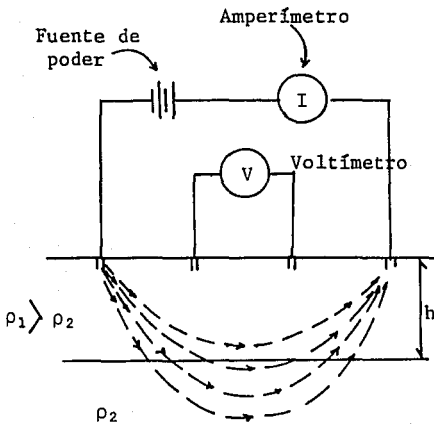


FIG. 19

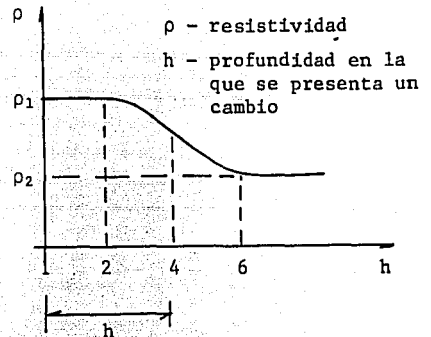


FIG. 20

Se puede observar en primer lugar en la gráfica de la figura 20 que el subsuelo no es homogéneo debido a que se presenta una diferencia en la resistividad, lo que indica que probablemente exista un traslape.

La altura a la que se presenta dicho traslape es h .

Se han diseñado diferentes tipos de arreglos en lo que respecta a la disposición de los electrodos. Uno muy común es el método Wenner, - figura 21.

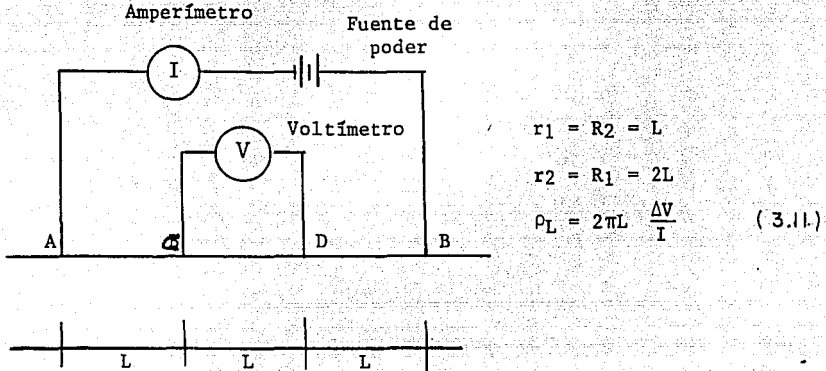


FIG. 21

donde:

- ρ_L = resistividad en el tramo L, en ohms (Ω)
- L = distancia entre electrodos, en metros (m)
- ΔV = diferencia de potencial en milivoltios (mV)
- I = intensidad de corriente aplicada, en amperes (A)
- A y B = electrodos de corriente
- C y D = electrodos de potencia

Para un sondeo vertical al arreglo anterior se le puede hacer variar la distancia L de acuerdo a la profundidad deseada, pudiéndose llegar a una profundidad de hasta 300 m.

Cuando la distancia entre electrodos es corta, del orden del espesor de la capa, la resistividad aparente se aproxima al valor de la resistividad de la primera capa.

Cuando se utilizan separaciones largas entre electrodos, la resistividad aparente tiende al valor de la resistividad de la segunda capa.

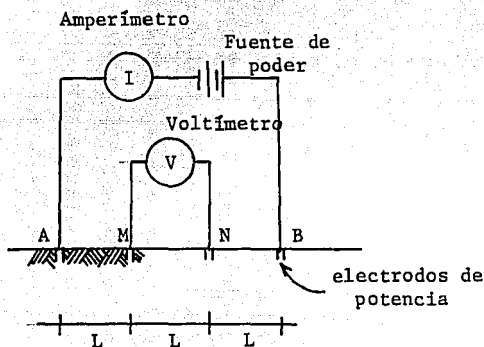


FIG. 22

L depende de la profundidad deseada si L aumenta se cubre más campo y viceversa.

$$\rho_L = \frac{2\pi L}{I} (V_M - V_N) \quad (3.12)$$

Para llevar a cabo un levantamiento se pueden utilizar diferentes métodos como sería un rastreo a través de la dirección de una línea previamente trazada. En este caso se grafica la distancia con su respectiva variación de la resistividad.

Combinando la técnica de exploración vertical y de rastreo se obtendrá una información más completa del sondeo realizado.

Como una nota adicional, se recomienda buscar información preliminar de tipo geotécnico, geológico, etc. de la zona en estudio para cualquier sondeo, ya sea geofísico o convencional.

3.6 Índice de Calidad de la Roca

Con el material recuperado después de realizar un sondeo convencional (a base de broca), se pueden deducir las condiciones en las que se presenta el macizo rocoso. Una medida comparativa en relación a la calidad del material estudiado es el ICR (Índice de Calidad de la Ro-

ca) ó RQD (Rock Quality Disignation).

$$\text{ICR} = \frac{\text{Longitud de los testigos} \geq 10 \text{ cm.}}{\text{Avance del muestreo}} \quad (3.14)$$

Otro factor que puede decir algo de las condiciones del macizo, es el porcentaje de recuperación.

$$\% \text{ Recuperación} = \frac{\text{Longitud total de los testigos}}{\text{Avance del muestreo}} \quad (3.15)$$

La relación entre el ICR ó RQD y la calidad de la roca se presenta a continuación:

ICR (RQD)	CALIDAD DE LA ROCA
0 - 25	Muy mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Regular
75 - 90	Buena
90 - 100	Excelente

N o t a . - Los tramos que se ajusten con precisión deben tomarse como uno solo.

3.7 Determinación "in situ" del módulo de deformabilidad

Para la determinación en campo de la deformabilidad de un macizo rocoso, se puede hacer por medio de la prueba de placa.

Los resultados están en función de diversas variables como son la carga (P), geometría (d), módulo de deformabilidad (μ), módulo de Poisson (γ).

Su expresión matemática es la siguiente:

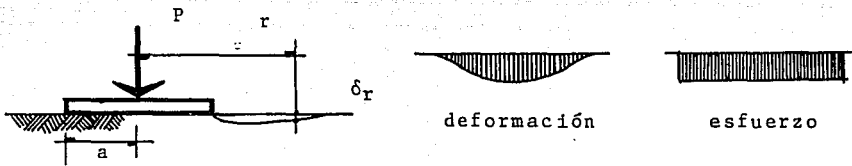
$$\delta = f(P, d, \mu, \nu)$$

3.7.1 Pruebas Estáticas de Placa

Este tipo de pruebas siguen siendo las más frecuentes. Comunmente el área es del orden de 1 m^2 y la máxima presión aplicada alcanza valores de 200 kg/cm^2 . El equipo consta de un dispositivo de carga (gato, columna y placa de apoyo), un gato plano Freyssinet y un dispositivo de medición de los desplazamientos superficiales (marco fijo y micrómetros). La prueba permite obtener una relación entre los desplazamientos superficiales δ y la carga aplicada P .

Las fórmulas para su cálculo se dan a continuación según sea el caso:

Para una Placa Flexible:



Para $z = 0$

$$\delta_r = \frac{4(1-\nu^2)rP}{\pi^2 Ea^2} \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \frac{a^2}{r^2} \sin^2 \theta} \, d\theta - \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - \frac{a^2}{r^2} \sin^2 \theta}} \quad (3.16)$$

Si $r = 0$

$$\delta_r = \frac{2(1-\nu^2)}{\pi Ea} P \quad (3.17)$$

Si $r = a$

$$\delta_r = \frac{4(1-\nu^2)}{\pi^2 Ea} P \quad (3.18)$$

z = profundidad a la que se desea obtener la deformación.

a = radio de placa

r = distancia a la deformación

P = carga aplicada

ν = módulo de Poisson

E = módulo de deformabilidad

Para una Placa Rígida:

$$\delta_{(r < a)} = P \frac{1 - \nu^2}{2Ea} \quad z = 0 \quad (3.19)$$

$$\delta_{(r > a)} = P \frac{1 - \nu^2}{\pi E a} \arcsen \frac{a}{r} \quad z = 0 \quad (3.20)$$

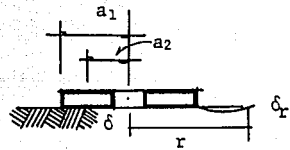
$$\delta_r = \frac{P(1 + \nu)}{2\pi E a} \left[\frac{dz}{a^2 + z^2} \right] + z(1 - \nu) \tan^{-1} \frac{a}{z} \quad (3.21)$$

para $r = 0$ y $z \neq 0$



Para el centro de una Placa Anular y una profundidad z :

$$\delta_z = \frac{P}{\pi E (a_2^2 - a_1^2)} \{ [(1 + \nu) z^2]$$



$$[(a_1^2 + z^2)^{-\frac{1}{2}} - (a_2^2 + z^2)^{-\frac{1}{2}}] + [2(1 - \nu^2)]$$

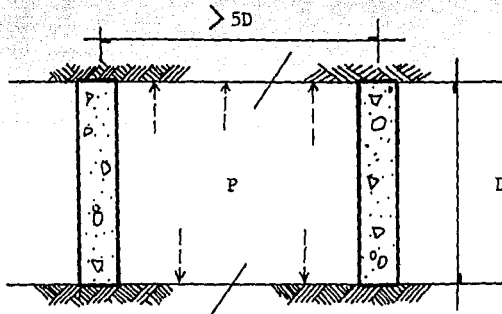
$$[(a_2^2 + z^2)^{-\frac{1}{2}} - (a_1^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}] \quad (3.22)$$

3.7.2 Galería

Consiste principalmente en aplicar una determinada presión dentro de una galería (túnel), midiendo las deformaciones producidas en el macizo rocoso. La galería debe estar revestida.

Las condiciones que se deben cumplir son las siguientes: que la sección sea circular, que el tramo de prueba sea 5 veces mayor al diámetro del túnel; se deberán evitar fugas.

El procedimiento consiste básicamente en cerrar el tramo de prueba -- con muros de concreto, recubriendo las paredes interiores y sellando las partes donde se pudieran presentar fugas, finalmente, se aplica presión hidráulica.



Con los valores de Presión y Deformación, se calcula el módulo de deformabilidad de la roca.

Si el recubrimiento es flexible:

$$E = \frac{PD}{\Delta D} (1 + \nu) \quad (3.23)$$

Si el recubrimiento es rígido:

$$E = \frac{PD}{\Delta D} - \frac{2eE_c}{D} \quad (3.24)$$

donde:

E_c = módulo de deformabilidad del concreto =

P = presión aplicada

D = diámetro

ΔD = incremento en el diámetro

e = espesor del concreto

ν = módulo de Poisson de la roca

E = módulo de deformabilidad de la roca

3.8 Medición de esfuerzos tectónicos

Los esfuerzos horizontales son a menudo diferentes a los esfuerzos -- verticales producidos por el peso propio de la masa. Esto sin duda - se puede inferir al observar las discontinuidades que presenta la corteza terrestre. La obtención de los esfuerzos tectónicos de un macizo rocoso se puede calcular de una manera aproximada por el método de relajación de esfuerzos del que sólo se verá un caso muy general.

3.8.1 Método de Relajación de Esfuerzos

Como caso particular del método está el de relajación de esfuerzos en la superficie de una excavación.

El procedimiento consiste en colocar alrededor de un punto, en la pared de una galería, tres medidores de desplazamientos según direcciones radiales a 60° (Fig. 23). Posteriormente, se recorta en forma concéntrica esta zona para producir un alivio de los esfuerzos actuantes en la superficie instrumentada. Se registran las deformaciones longitudinales así inducidas ϵ_a , ϵ_b y ϵ_c en las direcciones a-a', b-b' y c-c', respectivamente. Se construye el círculo de Mohr de las deformaciones (Fig. 24) y se calculan los esfuerzos principales actuantes en la superficie instrumentada, a partir de las deformaciones principales ϵ_1 y ϵ_2 , mediante las ecuaciones

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_1 + \nu \epsilon_2) \quad (3.25)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_2 + \nu \epsilon_1) \quad (3.26)$$

siendo E y ν el módulo de Young y la relación de Poisson de la roca, respectivamente.

Suponiendo que la masa de roca fuera elástica, homogénea e isótropa y sometida a esfuerzos principales vertical σ_p y horizontal σ_q lejos de la galería, el esfuerzo principal mayor determinado en la pared lateral de un túnel circular, de eje normal al plano P - Q, sería vertical e igual a $3 \sigma_p - \sigma_q$, mientras el esfuerzo principal menor en el techo de ese mismo túnel sería horizontal, normal al eje de la galería e igual a $3 \sigma_q - \sigma_p$.

En consecuencia, es necesario calcular los valores de σ_p y σ_q con base en los valores de σ_1 y σ_2 determinados en varios puntos de la sección transversal del túnel. De no ser elástica y homogénea la masa rocosa este cálculo resulta dudoso, por lo que se recomienda verificarlo con otra alternativa del método de relajación de esfuerzos.

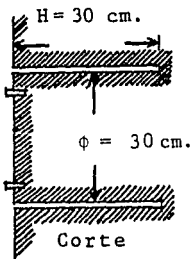


FIG. 23 ALIVIO DE ESFUERZOS EN GALERÍA

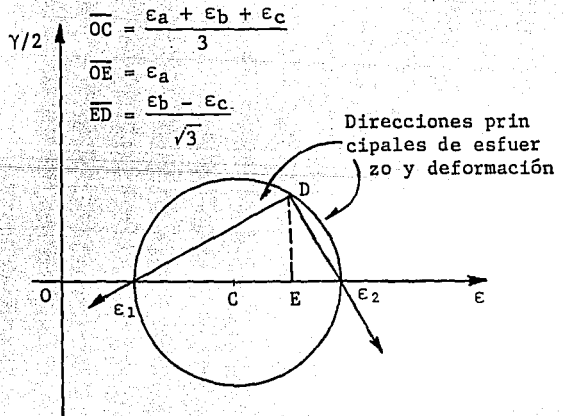


FIG. 24 CÍRCULO DE MOHR DE LAS DEFORMACIONES

3.9 Medición del esfuerzo cortante "in situ" en los macizos rocosos

La determinación del esfuerzo cortante de un macizo rocoso es importante para investigar la estabilidad de grandes estructuras naturales o artificiales, por ejemplo, una ladera natural o un conjunto cortina-cimentación.

El esfuerzo cortante se puede determinar en laboratorio o campo.

La prueba de Corte Directo o Triaxial de campo tiene la finalidad de determinar el ángulo de fricción del material, parámetro fundamental en el estudio de la repartición de esfuerzos y la resistencia de un medio discontinuo.

3.9.1 Prueba de Corte Directo o Método del Socavón

La prueba de corte directo se lleva a cabo aislando de la masa rocosa un espécimen prismático de roca, limitado en su cara inferior por la discontinuidad. Sobre la cara superior de la muestra se ejerce una fuerza constante normal al plano potencial de la falla, mientras simultáneamente se aplica, en incrementos, un esfuerzo tangencial que induce la falla del bloque.

En la Fig.25 N es la carga normal directamente aplicada a la muestra, T es la carga lateral variable. El valor mínimo de la fuerza normal total aplicada a la muestra es $N_{\min} = T \tan \alpha$, designando por α al ángulo de inclinación de la carga lateral con respecto a la horizontal.

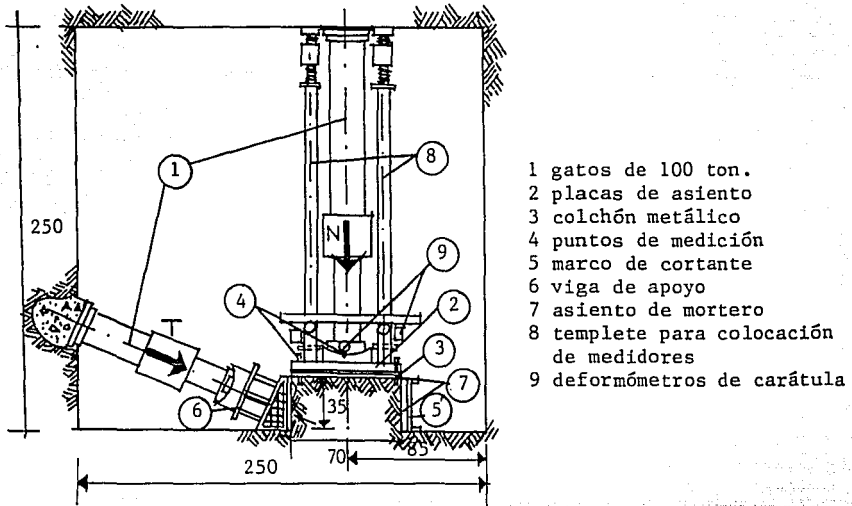


FIG. 25 MONTAJE DE LA PRUEBA IN SITU DE CORTE DIRECTO

3.10 Flujo de agua en rocas

El flujo de agua se determina con la permeabilidad. Las pruebas de permeabilidad se seleccionan de acuerdo a las condiciones del suelo, tales como el tipo de material, localización del nivel freático, homogeneidad en los estratos, etc. En la actualidad las pruebas más frecuentes son: Prueba de Bombeo, Prueba Lugeon, Prueba Lefranc-Mendel, Prueba Nasberg y Pozos de Filtración.

A continuación se presentan las fórmulas y parámetros de cálculo para cada una de estas pruebas.

3.10.1 Prueba de Bombeo

El sistema es mostrado en la Fig. 26 consta de varios pozos de observación y un pozo central o de bombeo.

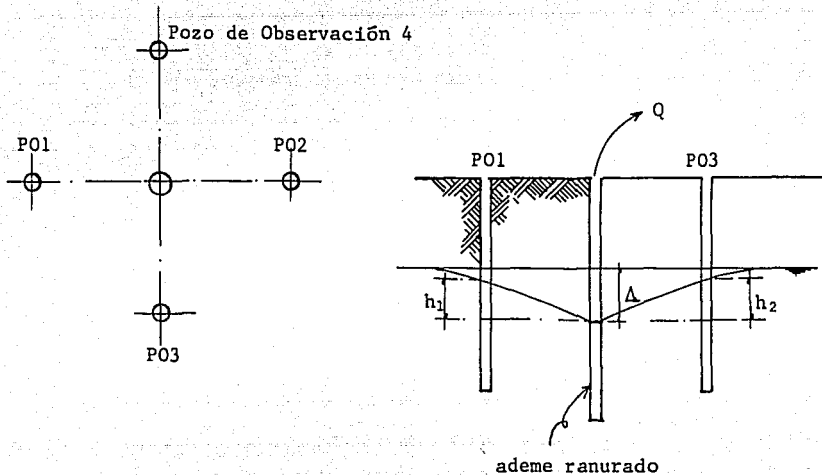


FIG. 26 SISTEMA DE POZOS DE OBSERVACION

Theis-Lubin y Dupuit-Thiem desarrollaron fórmulas para el cálculo de la permeabilidad en las que intervienen todos los parámetros y valores obtenidos en la prueba.

- Método de Theis-Lubin. Para un régimen transitorio

Son aceptadas las siguientes hipótesis:

El manto permeable es homogéneo, isótropo, de permeabilidad uniforme y extensión infinita.

El pozo central de bombeo atraviesa todo espesor del manto acuífero y su radio es muy pequeño. El agua fluye inmediatamente fuera de la zona abatida.

Una forma simplificada para el cálculo de la permeabilidad, aceptan-

do las anteriores condiciones es la siguiente:

$$K = \frac{2.3q}{4\pi\Delta H} \log_{10} \frac{t}{t'} \quad (3.27)$$

donde:

- H = espesor del manto permeable, en m.
- K = coeficiente de permeabilidad, en m/seg.
- q = gasto constante de bombeo, en m³/seg.
- t = tiempo transcurrido desde el inicio del bombeo.
- t' = tiempo transcurrido desde la suspensión del bombeo.
- Δ = Abatimiento residual en uno de los pozos de observación.

- Métodos de Dupuit-Thiem. Para regimen permanente

Se aceptan las siguiente hipótesis:

El material es homogéneo y el nivel freático estático.

Lejos del pozo, el gradiente hidráulico es constante con la profundidad a lo largo de la superficie exterior de un cilindro, cuyo eje de revolución coincide con el del pozo, el cual abarca la totalidad del manto permeable, ver Fig. 26.

Con los datos obtenidos en la prueba, se calcula la permeabilidad con la ecuación:

$$K = \frac{2.3q}{(h_2^2 - h_1^2)} \log_{10} \frac{R_2}{R_1} \quad (3.28)$$

donde:

- q = gasto de bombeo, en m³/seg
- h₁, h₂ = alturas, en m. del nivel libre del agua con respecto al extremo profundo del pozo de bombeo, para las líneas de los pozos 1 y 2, respectivamente.

R_1, R_2 = distancias de las líneas de los pozos 1 y 2.

K = permeabilidad, m/s

3.10.2 Prueba Lugeon

Una vez instalado el equipo para la prueba se procede como sigue:

Se anotan todos los datos, como: NAF (Nivel de Aguas Freáticas), longitud del tramo de prueba, diámetro y longitud de la tubería.

Se aplica un primer incremento de presión y se anota el gasto ya estabilizado (pueden transcurrir 5 ó 10 min.).

Se repite el paso anterior incrementando la presión hasta llegar a 10 kg/cm². Las presiones pueden ser de 1, 2, 4, 6, 8 y 10 kg/cm² y después en secuencia descendente 10, ..., 1 kg/cm².

El cálculo de la permeabilidad se hace en Unidades Lugeon. Se obtiene, dividiendo el gasto correspondiente a una presión de 10 kg/cm², expresado en litros por minuto (l/min) entre la longitud de la zona probada en metros.

La presión efectiva es igual a $P = P_m + \frac{H_m}{10} - P_c$ (3.29)

donde:

P_m = presión manométrica.

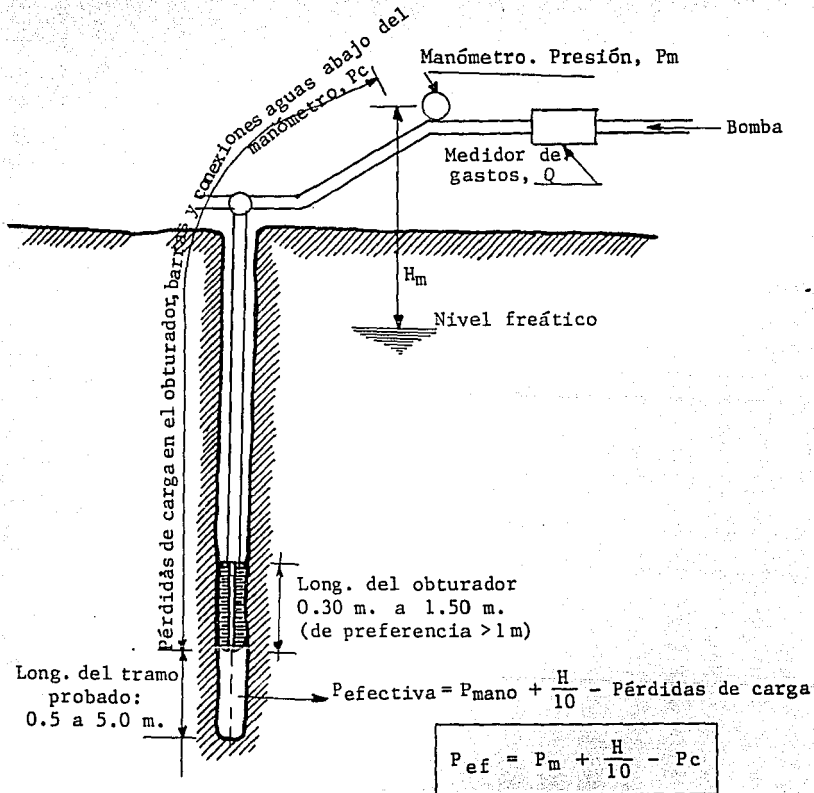
P_c = presión que toma en cuenta las pérdidas de carga en la tubería y el obturador.

H_m = presión debida a la profundidad que existe entre el nivel freático y el plano de lectura del manómetro.

Si graficamos el gasto y la presión se obtienen curvas que ayudan a -

interpretar el fenómeno y de esta manera se puede saber el comportamiento del macizo rocoso al efectuar la prueba. (Verse gráficas).

Una Unidad Lugeon equivale en permeabilidad = 1.3×10^{-5} cm/seg.



1 Lugeon = 1 litro por metro y por minuto bajo 10 kg/cm² de presión efectiva

1 Lugeon $\approx 10^{-7}$ m/seg

FIG. 29 PRUEBA LUGEON

3.10.3 Prueba Lefranc-Mandel. Para terreno aluvial o roca muy fisurada

La prueba se realiza inyectando agua en una cavidad de geometría definida, contemplándose en un coeficiente C que tiene dimensión de longitud.

Según la forma geométrica C adopta los siguientes valores, siendo r el radio.

Cavidad en forma de disco	$C = 4r$
Cavidad semiesférica	$C = 2\pi r$
Cavidad esférica	$C = 4\pi r$
Tubo perforado de longitud L	$C = \frac{4\pi}{\frac{2}{L} \log \frac{L}{r} - \frac{1}{2H}}$

El coeficiente de permeabilidad será después de la prueba.

$$K = \frac{Q}{C(H_i - H_0)} \quad (3.30)$$

donde:

H_0 = altura estabilizada desde el nivel freático a la parte superior del ademe.

H_i = altura del nivel del agua medida después de la variación con el tiempo, en la perforación.

Cuando el nivel queda estabilizado durante 10 min., entonces se anota el valor de H_i .

3.10.4 Prueba Nasberg. Para materiales aluviales no saturados

$$K = \frac{0.423}{h^2} q \log_{10} \frac{4h}{d} \quad (3.31)$$

donde:

q = gasto de absorción

h = tirante de agua constante

d = diámetro de la perforación bajo la condición $25 < \frac{h}{d} < 100$

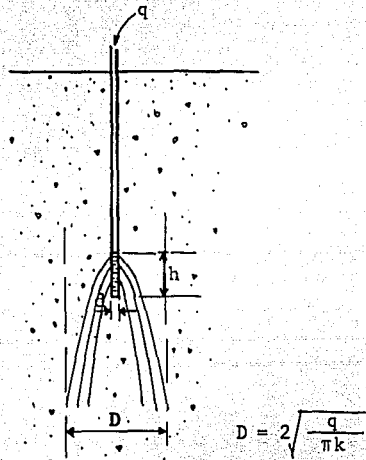


FIG. 30 PRUEBA NASBERG

3.10.5 Pozos de Filtración. Para materiales no saturados (sin N.A.F.)

El coeficiente de permeabilidad se determina con la ayuda de una red de flujo y de la medida en un tiempo t, de las cantidades de agua necesarias para mantener constante el nivel entre dos pozos, previa saturación de los materiales. (Véase Fig. 31)

$$K = \frac{N_V F}{N_C H_{mt} I} \quad (3.32)$$

donde:

H_m = desnivel medio entre los tirantes de los pozos.

- K = coeficiente de permeabilidad, en m/h
 l = distancia entre pozos.
 N_C = número de canales de flujo, que resultan del trazo de la red de flujo.
 N_V = número de partes en que se divide arbitrariamente la caída de potencial en la red de Flujo que se forma entre los dos pozos.
 t = tiempo en que se midió el volumen de agua añadido a cada pozo.

$$F = \frac{C_1 A_2 H_{2m} - C_2 A_1 H_{1m}}{A_2 H_{2m} + A_1 H_{1m}} \quad (3.33)$$

donde:

- A_1 = área media mojada del pozo 1
 A_2 = área media mojada del pozo 2
 C_1 = volumen de agua añadido al pozo 1
 C_2 = volumen de agua añadido al pozo 2
 H_{1m} = tirante medio del pozo 1
 H_{2m} = tirante medio del pozo 2

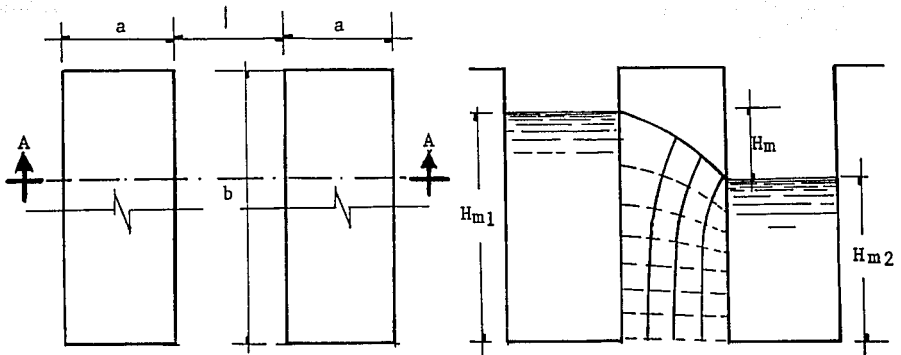


FIG. 31 CARACTERISTICAS GEOMETRICAS DE LOS POZOS DE FILTRACION Y SU RESPECTIVA RED DE FLUJO

3.11 Problemas Resueltos

1.- En un macizo rocoso se identificaron las siguientes discontinuidades.

Se descubrió una discontinuidad entre 2 estratos con rumbo $N45^{\circ}E$ y echado $45^{\circ}W$. (P₁).

Una falla en el macizo rocoso, con rumbo $N30^{\circ}E$ y echado $40^{\circ}E$. -- (P₂).

Además otras fallas más pequeñas con las siguientes direcciones: $N30^{\circ}W$; $60^{\circ}E$. (P₃) y $N10^{\circ}E$; $15^{\circ}E$ (P₄).

Se desea representar las anteriores discontinuidades en el plano estereográfico utilizando la fasilla (Red o diagramas estereográficas de Wulff

Procedimiento para la primera discontinuidad:

- 1) Se coloca un trozo de papel transparente sobre la red estereográfica de Wulff (pudiera ser la equiarial), se dibuja la circunferencia y los ejes N-S y E-W, Figura No. 32
- 2) Para localizar la línea de dirección del plano, contar 45° a la derecha desde el Norte y marcar el punto sobre la primitiva. Figura No. 32 . Si se tratase de un rumbo NW se contaría a la izquierda.
- 3) Se gira el transparente hasta lograr que el punto coincida -- con un círculo máximo, o sea, hasta que la marca de la dirección del plano esté exactamente en el punto Norte de la falsilla de Wulff, en este caso se gira el transparente 45° a la izquierda.
- 4) Para localizar el círculo máximo que representa el echado o buzamiento, se comienza a contar la cantidad de grados a partir del punto señalado por el echado, en éste caso se comienzan a contar 45° desde la derecha de la primitiva (Este) hacia adentro a lo largo del diámetro Este-Oeste de la falsilla.

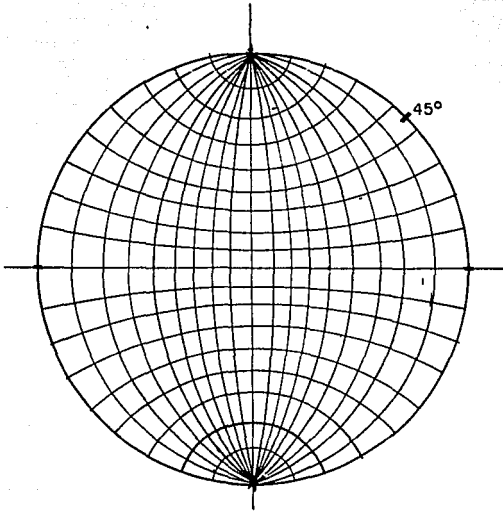


FIG. 32

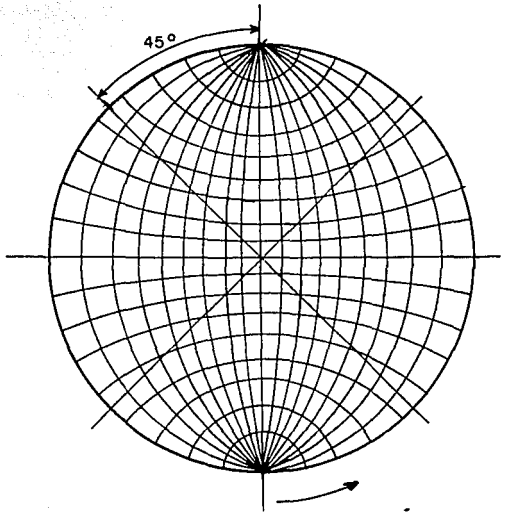


FIG. 33

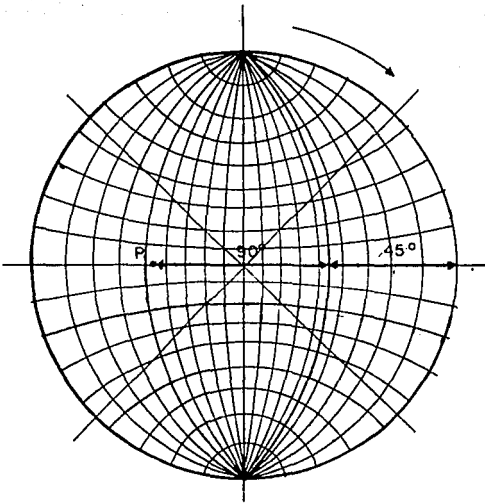


FIG. 34

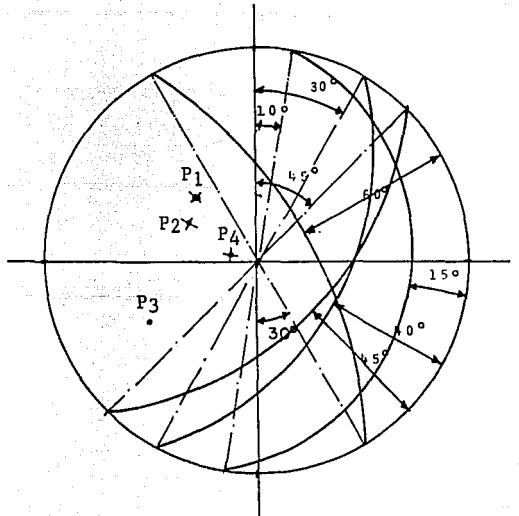


FIG. 35

Trazar el arco correspondiente. Figura No.34 .

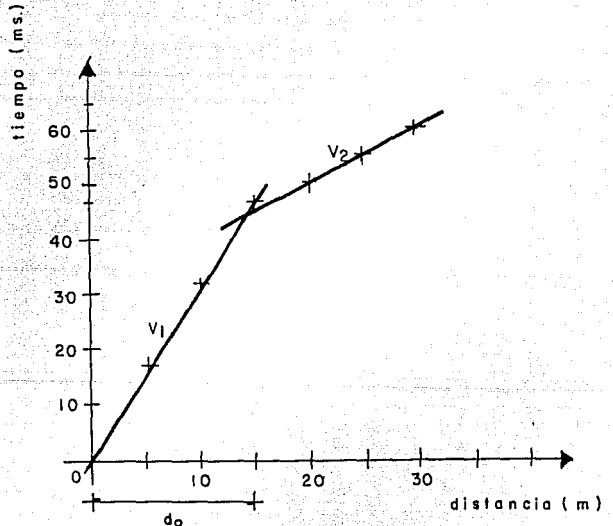
5) Se comprueba el resultado visualmente.

La representación del plano por medio de un punto se localizará siempre a 90° del plano en la proyección estereográfica, en tonces, desde la traza del círculo máximo se cuentan 90° de de recha a izquierda o viceversa, según sea el caso, a lo largo del diámetro Este-Oeste, y se marca P_1 que es la proyección del polo en el plano.

Las otras discontinuidades se pueden localizar igual.

2.- En una prueba geosísmica se obtuvieron los siguientes resultados. Determinar la altura a la que se encuentra el estrato y dibujar la gráfica distancia - tiempo.

DISTANCIA (m)	TIEMPO (miliseg)
5	17
10	32
15	47
20	50
25	55
30	60



de la gráfica:

$$V_1 = \frac{10}{30} = 0.33 \text{ m/miliseg. } \hat{=} 333.33 \text{ m/s}$$

$$V_2 = \frac{15}{13} = 1.15 \text{ m/miliseg. } \hat{=} 1153.38 \text{ m/s}$$

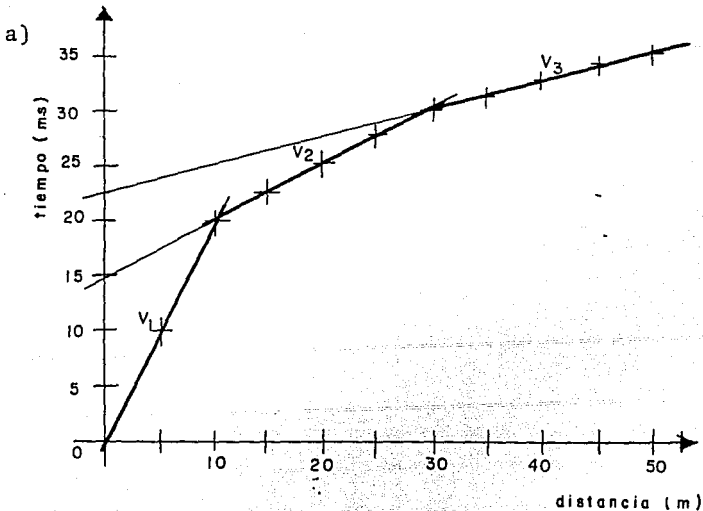
con la ecuación: 3.1

$$h = \frac{15}{2} \frac{1.15 - 0.33}{0.33 + 1.15} = 5.60 \text{ m.}$$

3.- Los resultados de un ensaye geosísmico de refracción, proporcionaron los siguientes resultados:

<u>DISTANCIA</u> (m)	<u>TIEMPO</u> (miliseg)
5	10
10	20
15	22.5
20	25
25	27.5
30	30
35	31
40	32.5
45	34
50	35

- Dibujar la gráfica democrónica
- Determinar las velocidades dedonde longitudinales para cada uno de los estratos que resulten
- Supóngase una estratificación horizontal y determínese las profundidades de cada uno de los estratos que se presenten.
- De acuerdo a la magnitud de las velocidades de onda resultante, es decir, de qué tipo de materiales se pueden tratar.



$$b) V_1 = \frac{10(0.3048)}{20(0.001)} = 152.4 \text{ m/s}$$

$$V_2 = \frac{20(0.3048)}{10(0.001)} = 609.6 \text{ m/s}$$

$$V_3 = \frac{20(0.3048)}{5(0.001)} = 1219.2 \text{ m/s}$$

con la ecuación: 3.5

$$c) h_1 = \frac{0.015}{2} \cdot \frac{(152.4)(609.6)}{\sqrt{(609.6)^2 - (152.4)^2}}$$

$h_1 = 1.181 \text{ m.}$ profundidad donde empieza el estrato 1

con la ecuación: 3.6

$$h_2 = \frac{1}{2} (0.0225 - 2(1.181) \frac{\sqrt{(1219.2)^2 - (152.4)^2}}{(152.4)(1219.2)})$$

$$h_2 = \frac{1}{2} (0.0225 - 10.82)$$

$h_2 = 5.4$ profundidad donde empieza el estrato 2

$$h_3 = 1.181 + 5.4$$

$h_3 = 6.581 \text{ m.}$ profundidad donde empieza el estrato 3

con la tabla: I

d) Posibles materiales:

Estrato 1 es arena seca

Estrato 2 es limo

Estrato 3 es arcilla

4.- Al llevar a cabo un sondeo geosísmico de refracción, se obtuvieron los resultados de la Tabla 1. Posteriormente, se verificó la prueba y se observaron ciertas variantes en los resultados, - Tabla 2.

TABLA 1

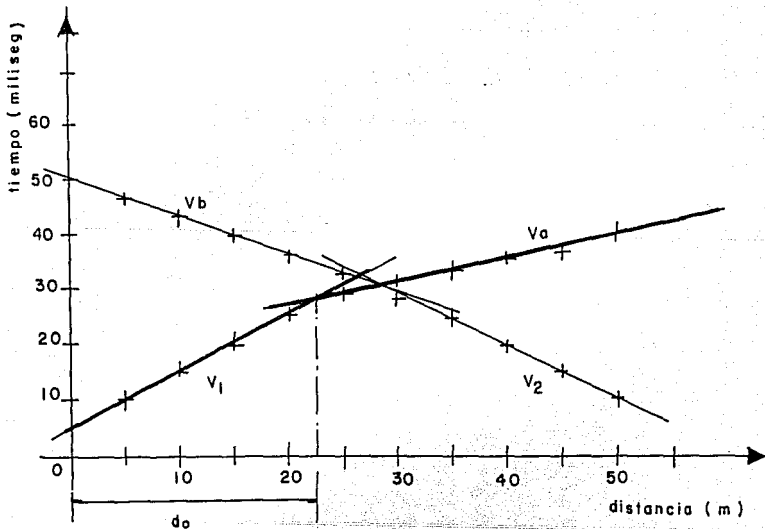
DISTANCIA (m)	TIEMPO (miliseg)
5	10
10	15
15	20
20	25
25	30
30	31
35	33
40	35
45	37
50	40

TABLA 2

DISTANCIA (m)	TIEMPO (miliseg)
5	10
10	15
15	20
20	25
25	29
30	33
35	37
40	40
45	43
50	46

- Obtener la gráfica democrónica (ambas pruebas)
- Calcule las diferentes velocidades
- Diga de qué tipo de estratificación se trata. De ser necesario calcúlese el echado (Además diga cuál o cuáles materiales se encuentran en los estratos).

a)



$$b) V_b = \frac{25}{18(0.001)} \hat{=} 1389 \text{ m/s}$$

$$V_a = \frac{20}{17(0.001)} \hat{=} 1589 \text{ m/s}$$

considerando

$$V_1 \hat{=} V_2 = \frac{20}{19(0.001)} \hat{=} 1053 \text{ m/s}$$

c) Se trata de una estratificación con echado y su valor es el siguiente:

$$\alpha = \frac{1}{2} (\text{sen}^{-1} \frac{1053}{1389} - \text{sen}^{-1} \frac{1053}{1589})$$

$$\alpha = 3^{\circ}59'46''$$

El material es probablemente arcilla.

5.- En un estudio geofísico dentro de la zona de transición cercana a Ciudad Universitaria, se efectuaron sondeos geoeléctricos "en un mismo sitio". Se dispuso un arreglo tipo Wenner, los datos de la prueba así como los resultados fueron los siguientes:

Pba. No.	1	2	3	4
L (m)	5	10	20	25
I (A)	33	51	5	6
V _A (mV)	100	90	30	15
V _B (mV)	119	105	35	20

- Calcule las resistividades eléctricas.
- Grafique los resultados
- Según los resultados, cuáles son los posibles materiales que conforman la estratificación.

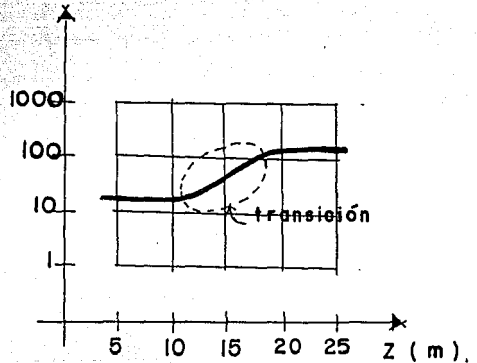
con la ecuación 3.12

a) $\rho_1 = \frac{2\pi \times 5 \times 19}{33} = 18.1$ b) $\rho(\Omega \cdot \text{m})$

$\rho_2 = \frac{2\pi \times 10 \times 15}{51} = 18.5$

$\rho_3 = \frac{2\pi \times 20 \times 5}{5} = 125.7$

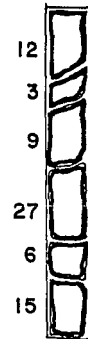
$\rho_4 = \frac{2\pi \times 25 \times 5}{6} = 130.9$



- c) Para el primer estrato se encontró arcilla; para el segundo estrato probablemente es roca ígnea:

Determinar en la muestra de la figura, la recuperación total y el índice de calidad de la roca. Si se sabe que la longitud de avance del muestreo fue de 90 cm. Mencione además, la calidad de la misma.

cm



S o l u c i ó n :

Longitud del testigo recuperado = $12+3+0+27+6+15 = 72$ cm.

Con la ecuación 3.14

$\text{ICR} = \frac{12+27+15}{90} = 0.60$

$\text{ICR} = 60\%$

con la ecuación

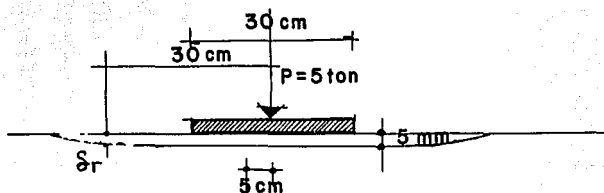
$$\% \text{ recuperación} = \frac{72}{90} = 0.80 \quad \% \text{rec} = 80\%$$

con la Tabla referente a los ICR.

De acuerdo con el ICR, se trata de una roca de:

Calidad regular

- 7.- Los resultados obtenidos durante la ejecución de una prueba de -- placa circular de tipo rígido, con un diámetro de 30 cm. en un macizo rocoso, indica que para una carga de 5 Ton. se obtuvo una deformación de 5 mm. en un punto localizado a 5 cm. del centro de la placa. Se desea conocer la deformación a 30 cm. del mismo centro, se sabe que $\nu = 0.30$ y que el valor de E permanece constante.



S o l u c i ó n :

con la ecuación 3.19

$$0.005 = \frac{5(1-(0.3)^2)}{2E(0.15)} \quad \dots\dots (1)$$

despejando E de (1)

$$E = \frac{5(1-(0.3)^2)}{2(0.005)(0.15)}$$

$$E = 3033.33 \text{ Ton/m}^2$$

deformación a 30 cm., con la ecuación 3.20.

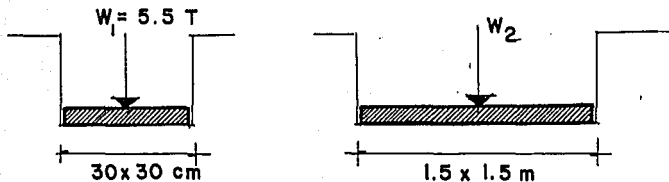
$$\delta_r = \frac{5(1-(0.3)^2)}{3033.33(0.15)} \text{sen}^{-1} \left(\frac{0.15}{0.30} \right)$$

$$\delta_r = \frac{4.55}{454.99} (0.1667) = 1.67 \times 10^{-3}$$

$$\delta_r = 1.67 \text{ mm.}$$

- 8.- Se realizó una prueba de carga sobre una placa de 30 x 30 cm. sobre una arena densa, con $c = 0$, $\gamma_m = 1.84 \text{ Ton/m}^3$ con una profundidad de 60 cm. La falla ocurrió cuando se le aplicaron 5.5 Ton. ¿Cuál será la carga necesaria para llegar a la falla en una placa de 1.5 x 1.5 m. desplantada a la misma profundidad?.

S o l u c i ó n :



$$q_u = (\text{resistencia última}) = \frac{W}{A} \frac{\text{carga}}{\text{Area}}$$

$$q_u = \frac{5.5}{(0.30)^2} = 61.1 \frac{\text{T}}{\text{m}^2}$$

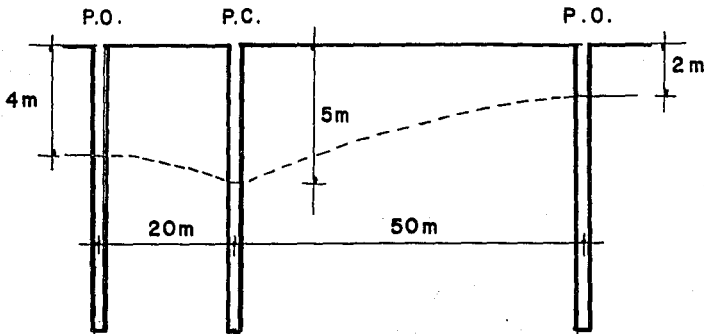
$$\text{por lo tanto, } w_2 = 61.1 (1.5)^2 = 137.5 \text{ Ton.}$$

- 9.- En una prueba de permeabilidad realizada mediante pozos de bombeo a base de un pozo central y 2 pozos de observación localizados a

20 m. y a 50 m. de distancia respecto al pozo central, se obtuvieron los siguientes resultados, gasto de bombeo establecido durante el tiempo de ejecución de la prueba 5.3 l/s/seg. Nivel de abatimiento del pozo central 5 m., nivel de abatimiento del pozo 1, 2 m., nivel de agua pozo 2, 4 m. (Todos los niveles están referidos al terreno natural).

Determine la permeabilidad.

S o l u c i ó n :



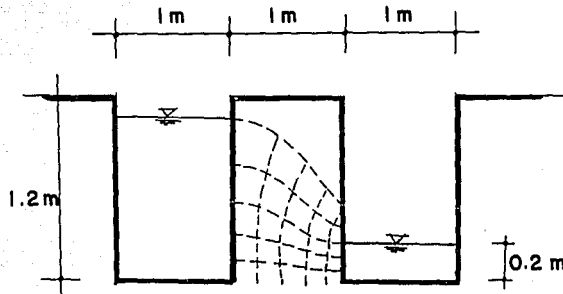
con la ecuación 3.28

Permeabilidad:

$$K = \frac{2.3(0.0053)}{[(3)^2 - (2)^2]} \log_{10} \frac{50}{20}$$

$$K = 9.7 \text{ m/seg} = 9.7 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

- 10.- Determine la permeabilidad del subsuelo a partir de una prueba mediante pozos de filtración, cuyas características geométricas son: ancho, 1 m.; largo 3 m.; separación entre pozos, 1 m. El tiempo de ejecución de la prueba fue de 20 min. y los volúmenes de agua añadidos a los pozos fueron de 200 lts. y 124 lts., respectivamente. El tirante del pozo 1 fue de 0.20 m. y el tirante del pozo 2 fue de 1.20 m.



S o l u c i ó n :

$$C_1 = 200 \text{ lts.}$$

$$C_2 = 124 \text{ lts.}$$

$$H_{m1} = 1.0 \text{ m}$$

$$H_{m2} = 0.2 \text{ m}$$

$$A_1 = 3 \times 1 \times 0.20 = 0.60 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 3 \times 1 \times 1.20 = 3.60 \text{ m}^2$$

con la ecuación 3.33

$$F = \frac{0.200(3.6)(1.20 - 0.124(0.6)0.20)}{3.60(1.20) + 0.60(0.20)} = 0.19124$$

$$N_v = 5$$

$$N_c = 5$$

$A_m = 1 \text{ m.}$

$t = 20 \text{ min.}$

$L = 1 \text{ m.}$

con la ecuación 3.32

$$K = \frac{5(0.19124)}{5(1)(20)(1)} = 9.5 \times 10^{-3} \text{ m/seg}$$

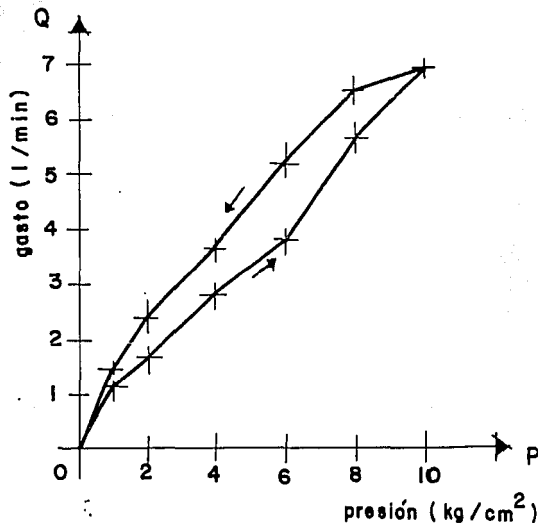
11.- Los resultados obtenidos durante la ejecución de la prueba de permeabilidad Lugeon realizada en un tramo de prueba localizado entre 15 y 16 m. de profundidad fueron los siguientes:

<u>PRESION CORREGIDA (Kg/cm²)</u>	<u>GASTO (lts/min)</u>
1	1.2
2	1.7
4	2.8
6	3.8
8	5.6
10	6.8
8	6.5
6	5.2
4	3.7
2	2.4
1	1.4
0	0

- Dibujar la gráfica presión-gasto
- Determinar la permeabilidad en unidades Leugeon
- Dar la posible interpretación de la prueba.

S o l u c i ó n :

a)



$$b) \text{ Permeabilidad (K)} = \frac{Q_{10}}{\text{long}} = \frac{6.8 \text{ lt/min}}{1 \text{ m}} = 6.8 \text{ UL}$$

$$K = 6.8 \text{ UL}$$

c) Se puede decir que se trata de un DESTAPAMIENTO A PRESION, la abertura y cierre de las fisuras no son reversibles.

12.- En un terreno de material aluvial se decidió realizar la prueba Nasberg. Los datos son los siguientes:

El diámetro de la tubería es de 4", la relación $h/d = 50$, se utilizaron 1000 lts de agua, la operación se realizó en un lapso de $\frac{1}{2}$ hora.

Calcule la permeabilidad.

S o l u c i ó n :

$$q = \frac{1000}{0.5(3600)} = 0.56 \text{ l/s}$$

$$l = 0.56 \text{ l/s}$$

$$\frac{h}{d} = 50; \quad d = 4" = 4 \times 2.54 = 10.16 \text{ cm.}$$

$$\frac{h}{0.1016} = 50; \quad h = 50(0.1016)$$

$$h = 5.08 \text{ m.}$$

con la ecuación 3.31

$$K = \frac{0.423}{(5.08)^2} (0.56 \times 10^{-3}) \log_{10} 4(50)$$

$$K = 2.11 \times 10^{-5} \text{ m/seg}$$

- 13.- Se realiza una prueba de corte directo en un macizo rocoso, la carga normal a la falla aplicada sobre la muestra es de 35 Ton. Si el ángulo de inclinación con respecto a la horizontal es de 30° , determine la carga lateral que se aplicó para obtener el esfuerzo por cortante.

S o l u c i ó n :

La fuerza mínima aplicable es de:

$$N_{\text{mín}} = T \tan \alpha$$

entonces:

$$35 \text{ Ton} = T \tan 30^\circ$$

por lo tanto:

$$T = \frac{35 \text{ Ton}}{\tan 30^\circ} = \frac{35 \text{ Ton}}{0.577}$$

$$T = 60.62 \text{ Ton.}$$

- 14.- Se lleva a cabo una prueba de permeabilidad Lefranc-Mendel para un terreno aluvial, los datos iniciales al realizar la perforación para la prueba son: nivel de aguas freáticas está a 4 m., la altura del nivel de agua medida después de la variación y una vez estabilizado es de 2 m.

La longitud del tubo perforado es de 1 m. y de diámetro desconocido. El volumen del recipiente es de 100x100x50 en cm. y el tiempo que requirió ser llenado fue de 8 minutos y medio.

Si la permeabilidad fue de $K = 7.8 \times 10^{-3}$ m/seg, calcule el diámetro de la tubería si $H = 1$ m.

S o l u c i ó n :

Los valores de $H_0 = 4$ m. y $H_i = 2$ m.

el gasto será: $Q = \frac{100 \times 100 \times 50}{8.5 \times 60} = 980.4$ cm³/seg

por lo tanto sustituyendo valores en 3.30.

$$0.78 = \frac{980.4}{C(4-2)}$$

despejando el valor de C

$$C = \frac{980.4}{2(0.78)} = 628.47$$

sustituimos en la ecuación para el cálculo de C para tubo perforado y tenemos:

$$628.5 = \frac{4\pi}{\frac{2}{100} \log \frac{100}{r} - \frac{1}{2(100)}}$$

$$\frac{4\pi}{628.5} = \frac{2}{100} \log \frac{100}{r} - \frac{1}{2(100)}$$

$$\frac{2}{100} \log \frac{100}{r} = \frac{4\pi}{628.5} + \frac{1}{2(100)}$$

$$\log \frac{100}{r} = \left(\frac{4\pi}{628.5} + \frac{1}{200} \right) \frac{100}{2}$$

$$\frac{100}{r} = \text{Antilog} \left[\left(\frac{4\pi}{628.5} + \frac{1}{200} \right) 50 \right]$$

.....

$$r = \frac{100}{\text{Antilog}\left(\frac{200\pi}{628.5} + \frac{1}{4}\right)}$$

$$r = 5.623 \text{ cm.}$$

por lo tanto el diámetro es:

$$D = \frac{5.623 \times 2}{2.54} = 4.428''$$

El diámetro comercial ajustable sería el de 4", aunque en realidad el diámetro que se maneja es de 90 mm.

15.- Al realizarse una prueba de permeabilidad por el método de Theis-Lubin en un terreno en el que se sabe que la permeabilidad del material es de 1.2×10^{-4} m/seg se obtienen los siguientes parámetros.

El gasto utilizado es de 3 tambos de 200 litros en un lapso de 3 min.

El tiempo transcurrido desde la suspensión del bombeo es de 5 min.

El espesor del manto permeable es de 13 m.

Verifique el valor del abatimiento residual que se obtendría con respecto a uno de los pozos de observación.

S o l u c i ó n :

Con la ecuación 3.27 despejamos Δ

$$\Delta = \frac{2.3q}{4\pi KH} \log_{10} \frac{t}{t'}$$

donde:

$$\pi = 3.1416$$

$$K = 1.2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$H = 13 \text{ m.}$$

$$t' = 5 \text{ min.}$$

$$t = 3 \text{ min.} + 5 \text{ min.} = 8 \text{ min.}$$

$$q = 200 \text{ l/min.}$$

$$\Delta = \frac{2.3 \times 200 \times 0.001}{4 \times 3.1416 \times 1.2 \times 10^{-4} \times 13 \times 60} \log_{10} \frac{8}{5}$$

$$\Delta = 2.35 \log_{10} 1.6$$

$$\Delta = 0.08 \text{ m.}$$

Por lo tanto, el desnivel que se observaría en las anteriores condiciones sería de 8.0 cm. del pozo central a un pozo de observación.

3.12 Problemas Propuestos

- 1.- En un macizo rocoso se identificaron las siguientes discontinuidades.

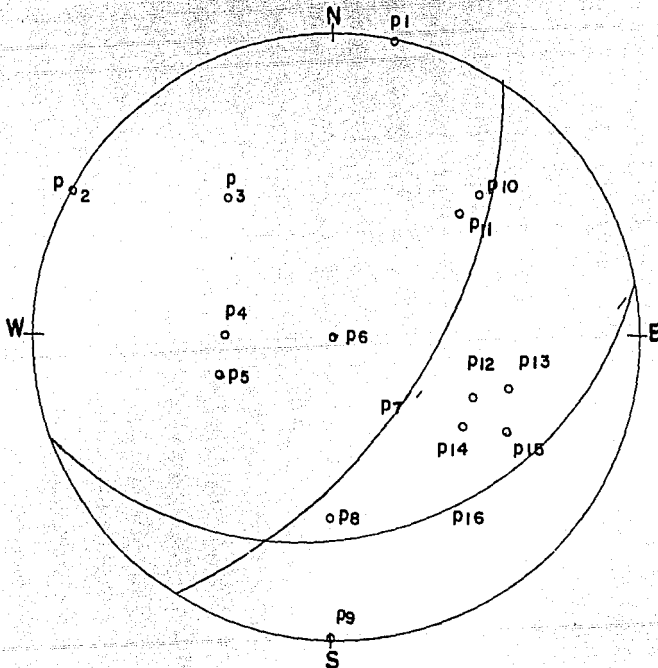
Una grieta con rumbo $N35^{\circ}E$ y echado $S15^{\circ}E$, llámesele al punto P_1 .

Un cambio estratigráfico con rumbo $S40^{\circ}E$ y echado $S10^{\circ}W$; P_2 .

Una falla rellena de arcilla con rumbo $N21^{\circ}E$ y $50^{\circ}SE$; P_3

Represente las discontinuidades anteriores en el plano estereográfico utilizando la falsilla de Wulff.

- 2.- Del siguiente plano estereográfico, indique los rumbos y echados de las discontinuidades ahí señaladas por puntos y curvas, para su solución utilice la falsilla de Wulff en la Fig. 10.



3.- Los resultados de un estudio geosísmico de refracción proporcionaron los siguientes resultados:

<u>DISTANCIA</u> (m)	<u>TIEMPO</u> (miliseg)
5	13
10	26.5
15	40
20	45
25	50
30	55
35	60
40	62.5
45	65
50	67.5
55	70

- Dibujar la gráfica democrónica.
- ¿Cuáles son las velocidades?
- ¿Cuál es la profundidad de los estratos?

4.- En una prueba geosísmica se obtuvieron los siguientes resultados:

<u>DISTANCIA</u> (m)	<u>TIEMPO</u> (miliseg)
0	0
5	17
10	32
15	47
20	51
25	53
30	60
35	62
40	64
45	66
50	68

- Dibujar la gráfica distancia-tiempo o democrónica.
- Determinar las velocidades de onda longitudinal.
- Suponiendo una estratificación horizontal, determinar las profundidades de cada uno de los estratos.
- Tomando en cuenta la magnitud de las velocidades de onda, decir de qué materiales se puede tratar.

5.- Se sabe por la historia geológica del Valle de la Ciudad de México que en las zonas cercanas a Ciudad Universitaria, existe entre la formación arcillosa del terreno una capa de roca volcánica producto de la erupción del volcán Xitle. Para construir el "metro", se decidió realizar un estudio geoelectrico, con la finalidad de darse cuenta del espesor y posición de las diferentes capas. En un kilómetro se colocaron tres estaciones y se obtuvieron los resultados de la tabla, además de saber que los valores de las re-

sistividades en la zona para los diferentes materiales son: arcilla $15 < \rho < 18$, basalto $600 < \rho < 800$. Al arreglo Wenner se le amplificó un metro por ensaye o prueba. La profundidad del estudio -- son 15 m.

PBA. O DIST. L	RESISTENCIA $R = \Delta V / I$ (Ω)			RESISTIVIDAD $\rho = 2\pi L R$ ($\Omega \times m$)		
	Est 1	Est 2	Est 3	Est 1	Est 2	Est 3
1	2.9	2.85	2.75			
2	51	53	54			
3	37	39	42			
4	31	32	27			
5	24	21	25			
6	20	19	19.5			
7	18	14	15			
8	13	14	15			
9	14	13	12			
10	0.25	12	11			
11	0.2	0.25	9			
12	0.25	0.24	0.23			
13	0.22	0.21	0.2			
14	0.17	0.2	0.18			
15	0.16	0.17	0.18			

a) Calcule en la misma tabla las resistividades

b) Grafique los valores por estación

c) Elabore un posible perfil estratigráfico: arcilla \sim basalto \times

6.- En un macizo rocoso se pidió conocer el índice de calidad de la roca, el porcentaje de recuperación y la calidad de la misma. Los resultados del sondeo se muestran en la figura



7.- De una prueba de placa flexible se obtuvieron los siguientes valores: la carga aplicada $P = 150$ Ton., el módulo de Poisson $\nu = 0.3$, módulo de deformabilidad $E = 4000$ T/m², radio de la placa - 0.50 m. Obtener la deformación producida al terreno:

- a) A 0.25 m. del centro de la placa y profundidad nula
- b) A 0.75 m. del centro de la placa y profundidad nula
- c) Al centro de la placa y profundidad de 0.20 m.
- d) Al centro de la placa
- e) Al filo de la placa

8.- Determinar la deformación de un terreno que le produce la carga - de 10 Ton., por medio de una placa anular, con radio exterior de 0.60 m. e interior de 0.20 m. El módulo de Poisson es de 0.48 y el de deformabilidad igual a 3000 Kg/cm².

La deformación que se requiere saber es la que se produce a 10 - cm., 50 cm., 1.0 m. y 2.0 m. de profundidad.

9.- Se realiza una prueba de galería en un macizo rocoso, cuyas características son las siguientes:

La longitud del tramo del túnel es de 5 m., y un diámetro de - - acuerdo a la norma.

Si la presión aplicada es de 200 lb/pulg² y se presenta un incremento en el diámetro de 12 mm. ¿Cuál es el valor del módulo de deformabilidad de la roca, considerando:

- a) Que el recubrimiento es flexible y el módulo de Poisson del material vale 0.21
- b) Que el recubrimiento es rígido y que el espesor del recubrimiento es de 18 mm.

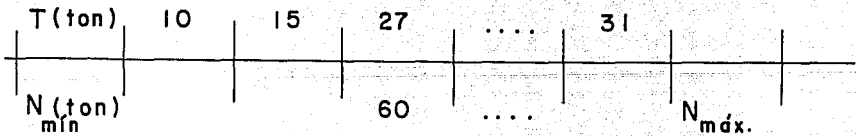
10.1- Se desean conocer los esfuerzos principales actuantes en un macizo rocoso por el método de relajación de esfuerzos en la superficie de una excavación.

Los valores de las deformaciones inducidas E_a , E_b y E_c son igual a 0.002 cm., 0.0045 cm. y 0.00335 cm., en las direcciones a-a', b-b' y c-c', respectivamente.

Calcular los esfuerzos principales σ_1 y σ_2 si el módulo de Young es igual a 2499 Kg/cm² y el módulo de Poisson de la roca es igual a 0.185

10.2- Para conocer el esfuerzo cortante en un macizo rocoso, se efectuó una prueba de corte directo por el método del socavón.

Los valores en la carga lateral variable están dados en la siguiente tabla.



a) Calcular la tabla anterior

b) Si el valor de la fuerza normal total aplicada para que falle el espécimen es de 90 Ton., ¿Cuál será entonces el valor de la fuerza lateral presentado? (Anotar el valor en la misma tabla).

11.- Los resultados obtenidos durante la ejecución de una prueba de placa circular rígida de 30 cm. de diámetro indican que para una carga de 5 Ton. se tiene una deformación superficial de 5 mm. en un punto localizado en el centro de la placa, siendo $\nu = 0.4$. Obtener el módulo de deformabilidad.

12.- Para la prueba de pozo de filtración se cuenta con los siguientes datos:

C_1 = un gasto de 0.583 lts.

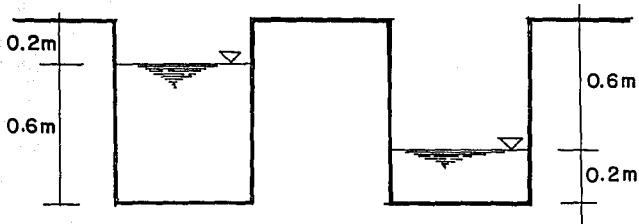
C_2 = un gasto de 0.167 lts.

profundidad total de los pozos 4.5 m.

el coeficiente de permeabilidad 0.09

Encontrar el área del pozo 2 si sabemos que el pozo 1 es igual a 30.8 m².

El tiempo de prueba fue de 27 min.



Encuentre también, la permeabilidad con los datos de la figura

$N_c = 3$

$N_v = 4$

13.- La permeabilidad obtenida mediante pozos de bombeo fue de 0.03 m/s. Del pozo central al primer pozo se tiene una distancia de 25 m. El abatimiento en el pozo central fue de 7.5 m. El abatimiento

del pozo 1 fue de 6.5 m. y el del pozo 2 fue de 3.5 m., todo con respecto al terreno natural.

El gasto establecido durante el tiempo de inyección de la prueba fue de 18 l/s.

Determine la distancia a la que se encuentra el pozo de observación 2.

- 14.- Se lleva a cabo una prueba de permeabilidad utilizando el método de pozos de filtración, las dimensiones de los pozos de prueba están en la fig. a, para tales dimensiones el valor de la permeabilidad se obtiene así:

$$K = \frac{5F}{12.3 Hmt}$$

Después de conservar los niveles de agua en los pozos como se se ñala en la fig. a, durante 48 hrs. Se anotan después de las últimas X horas, los valores finales promedio, del volumen de agua añadido, los niveles iniciales y finales y el tiempo transcurrido, teniéndose:

Para el área media mojada del pozo 1, $H_{1m} = 2.85$ m., para el - - área media mojada del pozo 2, $H_{2m} = 1.76$ m. El volumen de agua añadido al pozo 1 es de 20 cubetas de 15 litros cada una. El volumen de agua añadido al pozo 2 es de 18 cubetas de 15 litros cada una.

- 15.- Para la proyección de una pantalla de una presa, se realizaron pruebas de permeabilidad Lugeon a todo lo largo del tramo donde estará colocada la cimentación de la cortina. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla.

La prueba se realizó para un tramo de 1 m. a una profundidad determinada.

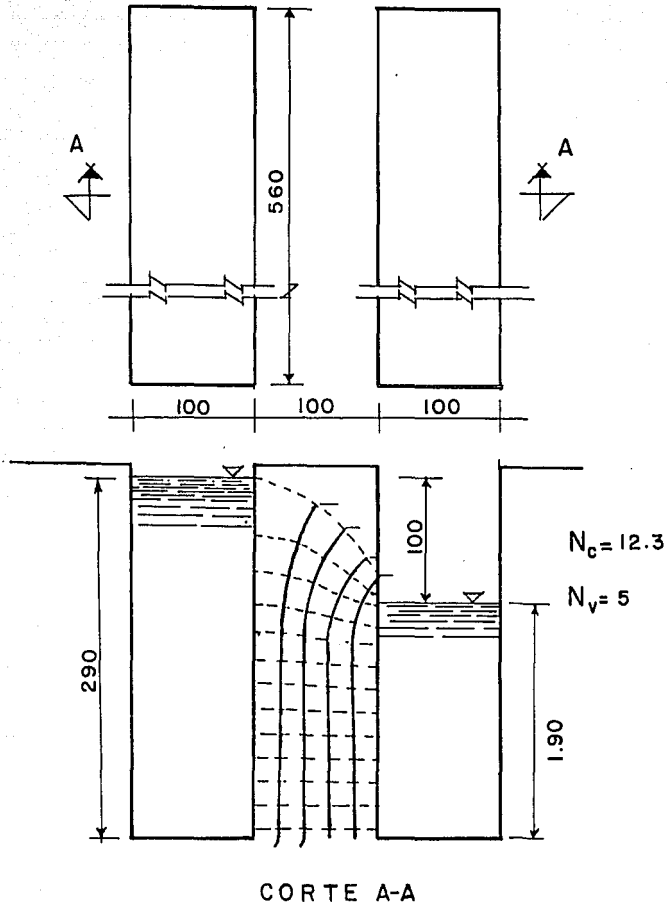


Fig. a

PRESION CORREGIDA (Kg/cm ²)	GASTO (l/MIN) A DIFERENTES PUNTOS DE LA LINEA DE CIMENTACION DE LA PANTALLA DE LA PRESA				
	A 0 Km.	A 0.5 Km.	A 1 Km.	A 1.5 Km.	A 2.5 Km.
1	1.1	2.85	0.8	0.4	0.9
2	2.2	5.70	1.3	0.7	1.7
4	4.35	11.35	2.0	1.8	3.4
6	6.5	13.8	2.85	5.0	5.8
8	8.65	4.6	8.85	9.8	10.3
10	10.8	14.7	15.0	14.3	15.0
8	8.6	11.65	12.0	10.0	10.5
6	6.4	8.7	9.0	6.0	6.0
4	4.2	5.8	6.0	2.0	3.5
2	2.0	3.0	3.0	0.6	2.0
1	1.0	1.5	1.5	0.5	1.0

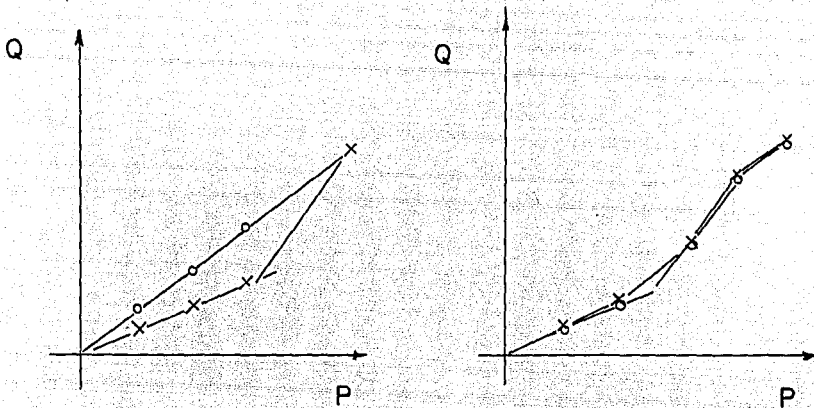
- Obtenga las gráficas gasto-presión de las diferentes pruebas
- Calcule la permeabilidad en cada una de los casos en unidades Lugeon
- Con los datos anteriores de una posible interpretación, tanto de cada una de las pruebas como la presentación que se tendría a lo largo del tramo de prueba.

Diga en qué lugar se presentarían mayores dificultades para impermeabilizar el área, si se sabe que para un medio poroso o roca fisurada, $K = 1.3 \times 10^{-5}$ cm/seg.

16.- Explique brevemente lo que indican las siguientes gráficas:

.....

.....



17.- Para realizar una prueba de permeabilidad Lugeon se sabe que:

La longitud de la tubería es de 20 m., y su diámetro de 4". El coeficiente de fricción de la tubería es igual a 0.0148 y que el coeficiente por pérdidas en accesorios es igual a 3.79.

El gasto que proporciona la bomba es de 0.101 m³/seg y la altura desde el manómetro al NAF es igual a 5 m.

a) Calcule las pérdidas de presión debidas al sistema si se sabe que:

$$\text{las pérdidas en la instalación (en m. de columna de agua)} = \frac{V^2}{2g} + f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} + K_a \frac{V^2}{2g}$$

b) ¿Qué presión debería leerse en el manómetro para que la presión efectiva realmente fuera sucesivamente de 1, 2, 4, 6, 8, 10?

18.- Se hace una prueba de permeabilidad tipo Lefranc-Mendel, la carga aplicada es de 10 m., el gasto es de 18 l/s y el coeficiente de permeabilidad es de 3.75×10^{-6} cm/seg.

Calcular los parámetros geométricos para las cavidades:

- a) En forma de disco
- b) Semiesférica
- c) Esférica

19.- Por medio de la fórmula simplificada de Theis-Lubin para régimen transitorio, calcular el valor del coeficiente Δ/q , si se consideraran los siguientes valores:

El espesor del manto permeables es de 6 m.

El coeficiente de permeabilidad es de 2.5×10^{-4} cm/seg

El tiempo transcurrido desde el inicio del bombeo es de 10 min.

El tiempo transcurrido desde la suspensión del bombeo son 3 min., además, qué desniveles se presentarían si los gastos variaron de 10, 12, 14 y 20 l/seg.

20.- Calcular la permeabilidad de un material aluvial no saturado por medio del método Nasberg si:

El gasto de absorción fue de 10 L/s, el tirante de agua constante es de 2 m.

Además, se sabe que $h/d = 0.30$

Calcular también el diámetro teórico D.

4. ANALISIS Y DISEÑO DE OBRAS EN MACIZOS ROCOSOS

4.1 Análisis de estabilidad de taludes

Además de la experiencia del ingeniero proyectista, la cual es muy importante, se deben tomar en cuenta la mayor cantidad de variables posibles para llevar a cabo un análisis de la estabilidad de un talud. Dentro de estas variables están, el grado de alteración, rugosidad y tipo de material, etc.

Una de las variables más importantes está la orientación y número de discontinuidades, ya que ésto define en gran medida el tipo de deslizamiento por presentarse.

4.1.1 Tipos de deslizamiento

Los deslizamientos pueden ser de traslación, rotación o caídos, éstos últimos son imprevisibles y no se hará referencia a ellos.

Deslizamiento por Traslación.- Movimiento causado por falla cortante a lo largo de una o varias superficies, puede presentarse en bloque o losa.

Deslizamiento por Rotación.- Su superficie de falla es curva, a lo largo de la cual ocurre el movimiento del talud. Puede presentarse como falla por el pie del talud, falla de base o tipo local.

4.1.2 Fuerzas actuantes en un talud de roca

Peso del bloque W. Para su cálculo se requiere de sus superficies exteriores, superficie de falla o discontinuidades que determinen el probable comportamiento del macizo (grieta de tensión y superficie de

deslizamiento).

Presión de Agua U y V. Se calcula conociendo el régimen del flujo de agua existente en el macizo, utilizando piezómetros o se supone un tirante de agua Z_w , en la grieta de tensión. La presión a lo largo de la superficie de deslizamiento disminuye.

Fuerza Sísmica, KW. Se determina de acuerdo a un coeficiente K que indica que la aceleración inducida por el sismo guarda una proporción - con respecto a la gravedad, por lo tanto, la fuerza sísmica será igual a KW.

Vibraciones. Este tipo de efectos ocurren cuando se usan explosivos, y se cuantifican con la siguiente relación:

$$V = \alpha \left(\frac{R}{N_e} \right)^\beta \quad (4.1)$$

donde:

V = es la velocidad máxima de una partícula y nos indica el daño inferido en taludes rocosos en cm/s

R = es la distancia a la que detona una carga de explosivos N_e por cada retardo.

$\alpha\beta$ = son valores que dependen del tipo de roca como de la forma en que se detonan los explosivos, Ver Tabla.4.1 abajo.

<u>METODO</u>	<u>α</u>	<u>β</u>
Detonación en la parte inferior de los barrenos.	18.5-185	1.6
Detonación con la técnica - Coyote	5.3-21.2	1.1
Precorte	571	1.6

Los valores límite de la partícula se relacionan de acuerdo al daño - estructural que pudiera provocarse. Ver Tabla.4.2 en seguida.

VELOCIDAD DE LA PARTICULA EN CM/SD A Ñ O

Menor a 5.1 para taludes en roca	Daño estructural muy pequeño
12.7	Daño leve, como la rotura de acabados
30.5	Caídos de roca en túneles sin revestimiento
63.5	Inicio de agrietamiento de la roca
254	Rotura de la roca

Fuerzas de anclaje. Son las fuerzas que ayudan a la estabilidad en talud.

4.1.3 Análisis del factor de seguridad

El factor de seguridad varía según las condiciones en que se encuentre el talud, por ejemplo, en una excavación o en la acumulación de material o carga, o cuando la presión hidrostática varía entre 0 y su valor máximo.

Un valor de 1.5 será aceptable en condiciones estáticas y de 1.1 en condiciones de vaciado rápido o por sismo.

Taludes en arenas

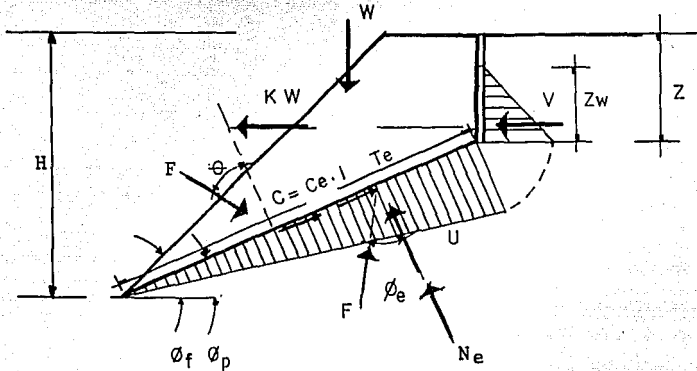
La estabilidad en este caso la determina el ángulo de fricción interna del material y su condición límite es:

$$\alpha = \phi \quad (4.2)$$

Se aceptan factores de seguridad de 1.1 ó 1.2 para efectos de erosión.

Método Bidimensional

Se aplica a deslizamientos de traslación, el problema se puede visualizar de acuerdo a la siguiente figura:



FUERZAS ACTUANTES EN UN TALUD

El factor de seguridad se obtiene así:

$$FS = \frac{c A + [W \cos \phi_p - U + F \cos \theta - (V + KW) \sin \phi_p] \tan \phi}{W \sin \phi_p + (V + KW) \cos \phi_p - F \sin \theta} \quad (4.3)$$

donde:

- A = longitud de la superficie de deslizamiento
- c = cohesión en la superficie de deslizamiento
- ϕ = ángulo de fricción en la superficie de deslizamiento
- ϕ_p = ángulo que forma la superficie de deslizamiento con la horizontal
- U = fuerza de subpresión actuando en la superficie de falla
- V = fuerza de subpresión actuando en la grieta de tensión.
- K = coeficiente sísmico

F = fuerza debida al anclaje

θ = ángulo que forma F con la norma a la superficie de deslizamiento su valor óptimo es igual a ϕ cuando el talud está seco

Cuando existe subpresión hidrostática se acepta como máximo valor admisible para el equilibrio.

$$U_{\text{máx}} = \frac{1}{\tan\phi_e} [C_e L + W(\text{sen}\alpha \tan\phi_e - \text{cos}\alpha)] \quad \dots (4.4)$$

La fuerza impulsora del movimiento en el momento de la falla es igual a:

$$I = (C_e - C_d)L + (W\text{sen}\alpha - U)(\tan\phi_e - \tan\phi_d) \quad \dots (4.5)$$

designando por a la aceleración inicial de la masa y por g la aceleración de la gravedad, se tiene que:

$$a = \frac{g}{W} I \quad \dots (4.6)$$

En las fórmulas anteriores:

W = peso del volumen de roca analizado

L = longitud de la superficie de deslizamiento

C_e = cohesión estática del material

C_d = cohesión dinámica del material

α = ángulo de inclinación con respecto a la horizontal

ϕ_e = ángulo de fricción estático

ϕ_d = ángulo de fricción dinámico

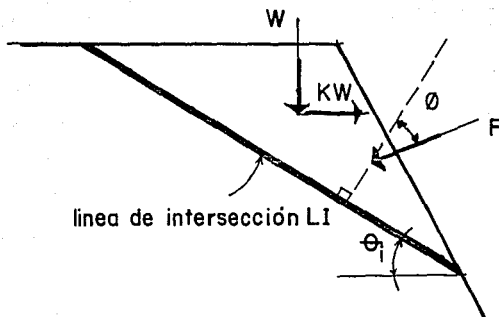
Método de la cuña

El deslizamiento en bloque se presenta sobre dos superficies de falla

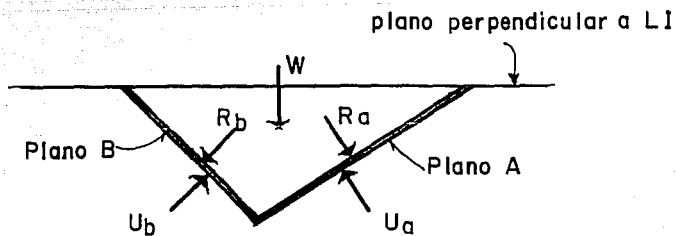
adoptando la forma de una cuña.

Su geometría y fuerzas que intervienen en la estabilidad de la cuña, se presentan en las siguientes figuras:

- a) Plano vertical que contiene a la línea de intersección de los planos A y B



- b) Plano perpendicular a la línea de intersección



El factor de seguridad se calcula así:

$$FS = \frac{C_a A_a + C_b A_b + (R_a - U_a) \tan \phi_a + (R_b - U_b) \tan \phi_b}{W \sin \phi_1 + K W \cos \phi_1 - F' \sin \theta} \quad (4.7)$$

donde:

C_a, C_b = cohesión de los planos A y B

ϕ_a, ϕ_b = ángulo de fricción de los planos A y B

A_a, A_b = superficie de los planos A y B

U_a, U_b = fuerza de subpresión en los planos A y B

R_a, R_b = reacción, en los planos A y B, debida a las fuerzas

W, KW y F

W = peso de la cuña

K = coeficiente sísmico

F = fuerza debida a anclas

ϕ_1 = ángulo que forma la línea de intersección de los planos A y B con la horizontal

F' = componente de F , paralelo al plano vertical que pasa por la línea de intersección de los planos A y B

θ = ángulo que forma F' con la normal a la línea de intersección de los planos A y B

El echado corregido entre los dos planos de discontinuidad será:

$$\tan \alpha_c = \tan \alpha \cdot \cos \beta \quad (4.8)$$

siendo:

α_c = echado corregido

α = echado del plano de deslizamiento

β = ángulo que forman los planos A y B

Método de las Dovelas

La estabilidad de una ladera en rocas se analizará dividiendo ésta en una serie de bloques utilizando los principios del análisis de estabilidad de un talud en roca.

Deslizamiento de Traslación en Bloque

En estos análisis se desprecia la cohesión tanto estática como dinámica, en planos de falla.

La geometría considera un volumen tetrahédrico limitado por los siguientes planos, un plano ACD o plano 1, un plano BCD o plano 2, un plano ABC o plano 3 y una cubierta o superficie limitada por la porción de la masa de roca ABD. El volumen es indeformable, se puede deslizar por una o dos de sus caras y sus planos potenciales de deslizamiento son indeformables. ver fig 4.1

para i planos de deslizamiento

$$i = 1, \dots, n$$

$$\vec{R}_i = \vec{N}_i + \vec{T}_i$$

La condición de equilibrio es:

$$\vec{R} = \vec{W} + \vec{Q} + \sum_{i=1}^n \vec{U}_i + \vec{H}$$

donde:

R_i = reacción en el plano i

N_i = componente normal de la reacción

T_i = componente tangencial

W = peso del bloque

\vec{Q} = carga adicional al bloque

\vec{U}_i = fuerza de empuje hidrostático en el plano i

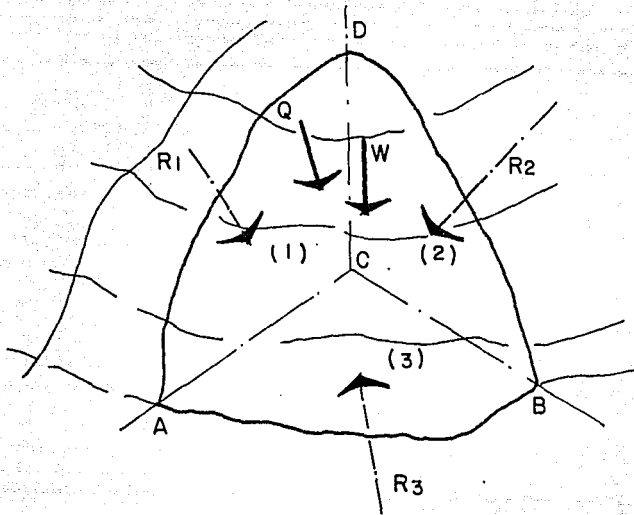


FIGURA 4 | DESLIZAMIENTO DE TRASLACION EN BLOQUE

4.2 Análisis tridimensional mediante operaciones vectoriales

4.2.1 Definición de los planos de debilidad vectorialmente

Para este tipo de análisis se referirán los planos de debilidad en relación al talud analizado (Wittke). Recuérdese que una discontinuidad se identifica por su rumbo y echado.

Con el sistema mostrado en la Figura 4 2, el eje X será paralelo al -- rumbo de la superficie del talud. El rumbo potencial de deslizamiento está dado por el ángulo β , medido sobre un plano horizontal en sentido contrario al giro de las manecillas del reloj a partir del eje X positivo, $0^\circ \leq \beta < 180^\circ$.

El echado del plano es el ángulo γ , que es el ángulo con respecto a la horizontal, como se sabe es perpendicular al rumbo, $0^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$; y se mide con respecto a la horizontal X hacia abajo en dirección $\beta - 90^\circ$

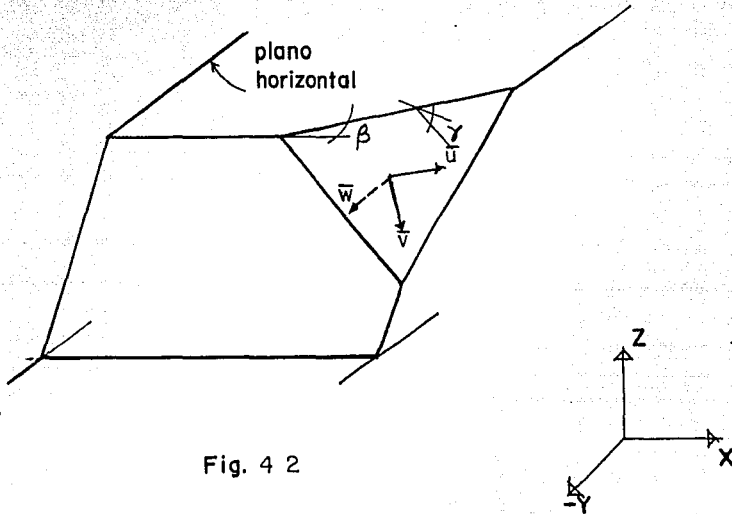


Fig. 4 2

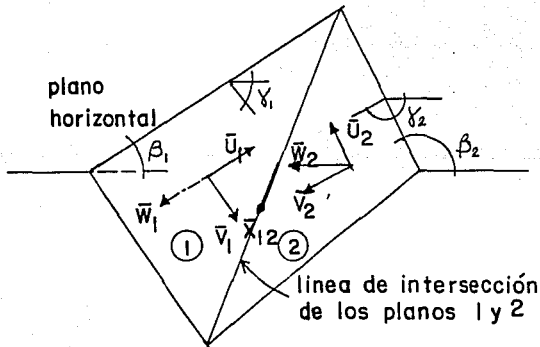


Fig. 4 3

Los ángulos β y γ definen dos vectores unitarios \bar{U} y \bar{V} correspondientes al rumbo y el echado del plano de discontinuidad, entonces:

$$\bar{U} = \cos\beta\hat{i} + \sin\beta\hat{j}$$

$$\bar{V} = \cos\gamma\sin\beta\hat{i} - \cos\gamma\cos\beta\hat{j} - \sin\gamma\hat{k}$$

Si $\bar{U} \cdot \bar{V} = 0$ se verifica que el rumbo y el echado están a 90° .

El producto cruz de \bar{U} y \bar{V} , da otro vector unitario \bar{W} perpendicular a los vectores \bar{U} y \bar{V} y al plano descrito por ellos. El sentido de \bar{W} sigue la regla del tornillo de cuerda derecha girando de \bar{U} hacia \bar{V} a través del ángulo menor ($<180^\circ$).

Por lo tanto, para un talud de roca que contiene dos fallas (plano 1 y plano 2) se obtendrán de sus respectivos rumbos y echados conocidos por los ángulos β_1 y β_2 , γ_1 y γ_2 los \bar{U}_1 , \bar{U}_2 , \bar{V}_1 , \bar{V}_2 , \bar{W}_1 y \bar{W}_2 , -- véase Figura 4.3

El vector \bar{X}_{12} que corre a lo largo de la línea de intersección entre los planos 1 y 2 se obtiene realizando el producto cruz entre los vectores normales a sus respectivos planos \bar{W}_1 y \bar{W}_2 , entonces:

$$\bar{X}_{12} = \bar{W}_2 \times \bar{W}_1$$

Se denomina plano 1 a aquel de los dos planos cuyo β es menor. Cuando β_1 y β_2 son iguales, el plano 1 será el de menor γ . Con ésto se garantiza la veracidad de las indicaciones siguiente ya que van de acuerdo al sistema coordinado elegido.

4.2.2 Resultante del Sistema. \bar{R}

Se obtiene sumando todas las fuerzas actuantes sobre el talud, que son:

El peso de la cuña \bar{W} , que actúa verticalmente hacia abajo pasando por el centro de gravedad S de la cuña. Ver Figura 4.6 . El vector OS se obtiene así:

$$\overline{OS} = \frac{1}{4} (\overline{OD} + \overline{OC} + \overline{OB})$$

donde: \overline{OD} , \overline{OC} y \overline{OB} están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\overline{OD} = \left(\frac{h_1}{\tan\alpha \cdot \tan\beta_1} - \frac{h_1}{\tan\gamma_1 \sin\beta_1}, \frac{h_1}{\tan\alpha}, h_1 \right)$$

$$\overline{OC} = \left(\frac{h_1}{\tan\alpha \cdot \tan\beta_1} - \frac{h_1}{\tan\gamma_2 \sin\beta_2}, \frac{h_1}{\tan\alpha}, h_1 \right)$$

$$\overline{OB} = \frac{\tan\alpha - \tan\epsilon_x}{\tan\epsilon_x - \tan\delta} \cdot \frac{\delta}{\tan\alpha} \cdot h_1$$

donde:

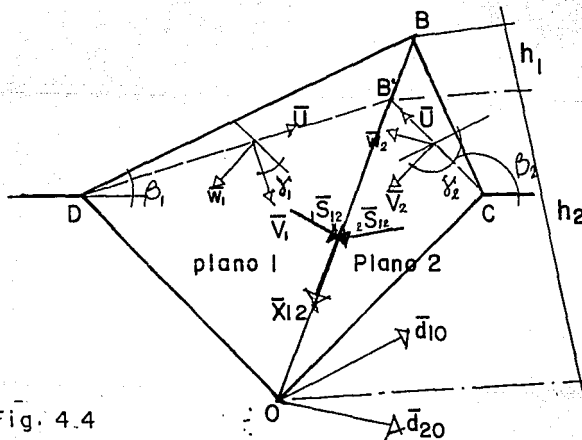
$$\epsilon_x = \tan^{-1} \left(\frac{X_{12}Z}{X_{12}Y} \right)$$

α = inclinación de la cara inferior del talud

δ = inclinación de la cara superior del talud

h_1 y h_2 son las alturas de los taludes principal y secundario, respectivamente.

Los valores de h_1 , h_2 , α , δ , γ_1 , β_1 , γ_2 , β_2 se muestran en la Figura 44



El peso de la cuña se obtiene multiplicando su volumen por el peso volumétrico del material.

El volumen se puede calcular con la siguiente expresión:

$$V = \frac{1}{6} \overline{DB}^1 \times \overline{DC} (h_1 + h_2)$$

$$\overline{DC} = \overline{OC} - \overline{OD}$$

$$\overline{DB}^1 = \overline{OB}^1 - \overline{OD}$$

$$\overline{OB}^1 = \frac{X_{12}}{X_{12Z}} h_1$$

La fuerza de subpresión \overline{U} , se obtiene sumando vectorialmente cada una de las fuerzas que actúan en los planos de debilidad. La fuerza \overline{U}_n de subpresión es igual a la magnitud de la fuerza por el vector unitario en la dirección ascendente perpendicular al plano de debilidad. Este último se obtiene dándole la dirección correcta al vector \overline{W} definido por el producto cruz $\overline{U} \times \overline{V}$.

La fuerza externa \overline{Q} , se obtiene sumando vectorialmente todas las fuerzas debidas por peso adicional o por algún tipo de anclaje.

Las fuerzas producidas por carga dinámica, según Wittke equicomparativamente con una fuerza sísmica horizontal $\overline{H} = K_1 \overline{W}$ se obtiene una fuerza paralela a la proyección horizontal del vector unitario del echado \overline{U} , por lo tanto:

$$H = \hat{i} \left(\frac{V_x}{(V_x^2 + V_y^2)^{\frac{1}{2}}} \right) K_1 W + \hat{j} \left(\frac{V_y}{(V_x^2 + V_y^2)^{\frac{1}{2}}} \right) K_1 W$$

donde, K_1 es el coeficiente sísmico con valores entre 0 y 0.3.

Finalmente, la resultante \overline{R} del sistema será la suma vectorial de todas las fuerzas actuantes.

$$\overline{R} = \overline{W} + \sum \overline{U}_i + \sum \overline{Q}_i + \overline{H}$$

4.2.3 Determinación del modo de deslizamiento

La resultante \bar{R} de la cuña de roca OBCD, Figura 4.4 rompe el contacto entre la misma cuña y los planos 1 y 2 cuando:

$$\bar{R} \cdot \bar{W}_1 < 0$$

$$\bar{R} \cdot \bar{W}_2 > 0$$

ya que el resultado $\bar{R} \cdot \bar{W}_1$ es negativo y por lo tanto, en sentido contrario a \bar{W}_1 indicando desprendimiento. El resultado $\bar{R} \cdot \bar{W}_2$ es positivo y sigue la dirección de \bar{W}_2 indicando también desprendimiento cuando:

$$\bar{R} \cdot \bar{W}_1 > 0$$

$$\bar{R} \cdot \bar{W}_2 < 0$$

La cuña se mantiene en contacto con los planos 1 y 2.

Para saber si la cuña desliza sobre el plano 1 o el plano 2, obtenemos dos vectores ubicados en los planos 1 y 2 y que son perpendiculares a la línea de acción \bar{X}_{12} , entonces:

$$\text{sobre el plano 1: } {}_1\bar{S}_{12} = \bar{X}_{12} \times \bar{W}_1$$

$$\text{sobre el plano 2: } {}_2\bar{S}_{12} = \bar{X}_{12} \times \bar{W}_2$$

El deslizamiento ocurrirá por la línea de intersección, si:

$$\bar{R} \cdot {}_1\bar{S}_{12} > 0$$

$$\bar{R} \cdot {}_2\bar{S}_{12} > 0$$

$Ex < \alpha$ si $0 < \alpha < \pi$ y $Ex < \delta$ si $\alpha = \pi$

$$\text{donde: } Ex = \tan^{-1} \left(\frac{X_{12Z}}{X_{12Y}} \right)$$

X_{12Z} y X_{12Y} son las componentes z y X del vector \bar{X}_{12} .

Las desigualdades de E_x , α y δ , determinan si la cuña tiende al deslizamiento.

Si $\bar{R} \cdot \bar{W}_1 > 0$ hay contacto con el plano 1 y si $\bar{R} \cdot \bar{S}_{12} < 0$ indicará que no hay tendencia a la intersección.

4.2.4 Factor de Seguridad cuando el deslizamiento ocurre en un plano

Llamemos ϕ^1 al ángulo que forma una fuerza \bar{R} y la normal de un plano, \bar{W} . Figura 4 5

$$\tan \phi^1 = \frac{R_T}{R_N} \quad (A)$$

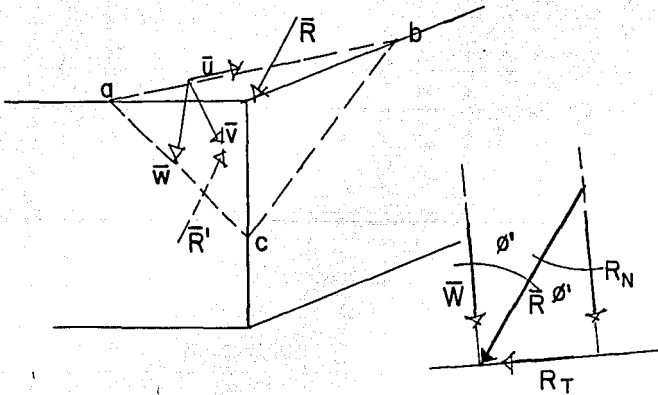


Fig. 4 5

R_T y R_N son las componentes normal y tangencial al plano i de deslizamiento respectivamente.

El factor de seguridad quedará definido por la magnitud de la fuerza resistente disponible entre la componente tangencial de la resultante del sistema, o sea:

$$FS = \frac{R_N \tan \phi}{R_T} \quad (B)$$

donde ϕ es el ángulo de resistencia al corte entre las superficies, - por lo tanto, en términos generales:

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \phi^1} \quad (C)$$

Ahora bien, la componente normal es igual a:

$$\bar{R}_N = \bar{R} \cdot \bar{W}$$

y la componente tangencial es igual a:

$$\bar{R}_T = \bar{R} - (\bar{R} \cdot \bar{W}) \bar{W}$$

Sustituimos en (A) y obtendremos:

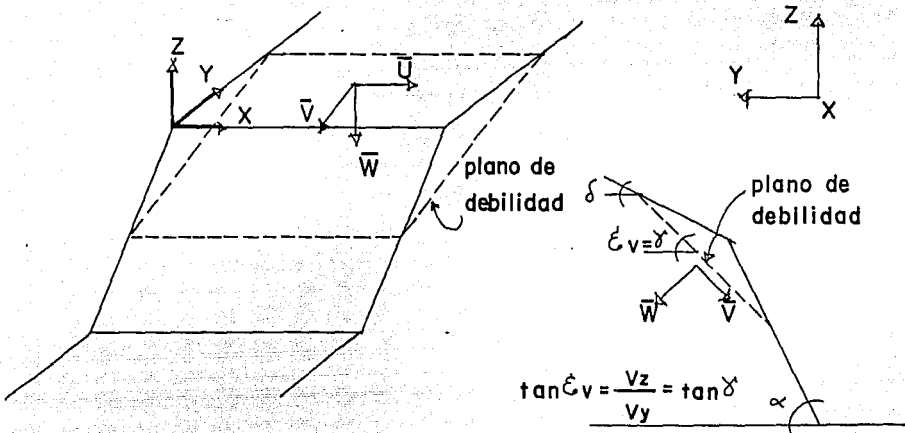
$$\tan \phi^1 = \frac{[(RyWz - RzWy)^2 + (RzWx - RxWz)^2 + (RxWy - RyWx)^2]^{\frac{1}{2}}}{(RxWx + RyWy + RzWz)} \quad (D)$$

Entonces el factor de seguridad para una cuña si el talud se desliza sobre un plano de debilidad 1, será:

$$FS = \frac{(\bar{R} \cdot \bar{W}_1) \tan \phi_1}{(\bar{R} \cdot \bar{W}_1) \bar{W}_1} = \frac{N_1 \tan \phi_1}{T_1}$$

pero para el plano 2 $N_2 = -(\bar{R} \cdot \bar{W}_2)$ debido a que W_2 tiene sentido contrario.

* Cuando el plano de debilidad es paralelo al rumbo y sólo actúa el peso $\bar{W} = (0, 0, -W)$.



$$\bar{U} = (1, 0, 0), \bar{V} = (0, V_y, V_z) \text{ y } \bar{W} = (0, -V_z, V_y)$$

sustituimos valores en (D):

$$\tan \phi^1 = \frac{-R_z W_y}{R_z W_z} = \frac{-(-W)(-V_z)}{-W(V_y)} = \frac{V_z}{V_y} = \tan \gamma$$

por lo tanto:

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \gamma} \quad \dots (F)$$

para que haya deslizamiento $E_v < \alpha$ si $0 < \alpha < \pi$ ó $E_v < \delta$ si $\alpha = \pi$

si se incluye una fuerza de subpresión $U = K_W$, entonces:

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \gamma} - K \frac{\tan \phi}{\text{sen } \gamma} \quad \dots (G)$$

Factor de seguridad cuando el deslizamiento ocurre por la línea de intersección.

Primeramente se calcula la fuerza motora en dirección del deslizamiento. Ver Figura 4.4.

$$T_{12} = \frac{\bar{R} \cdot \bar{X}_{12}}{\bar{X}_{12}}$$

El vector \bar{T} es igual a F_T $\frac{\bar{X}_{12}}{\bar{X}_{12}}$

El vector normal a la línea de intersección es:

$$\bar{N}_{12} = \bar{R} - \bar{T}_{12}$$

Para obtener la resistencia por fricción sobre los planos 1 y 2 - se determinan las componentes \bar{N}_1 y \bar{N}_2 de N_{12}

$$N_1 \bar{w}_1 + N_2 (-\bar{w}_2) = \bar{N}_{12}$$

N_1 y N_2 son las magnitudes de \bar{N}_1 y \bar{N}_2 , así pues:

$$N_1 w_{1x} - N_2 w_{2x} = N_{12x}$$

$$N_1 w_{1y} - N_2 w_{2y} = N_{12y}$$

$$N_1 w_{1z} - N_2 w_{2z} = N_{12z}$$

Resolviendo dos de las tres ecuaciones, obtenemos N_1 y N_2 , por consiguiente.

$$F.S. = \frac{N_1 \tan \theta_1 + N_2 \tan \theta_2}{T_{12}}$$

Cálculo del factor de seguridad contra rotación.

El análisis por rotación en una cuña como la OBCD alrededor de - cada uno de los ejes \bar{OC} , \bar{OD} , \bar{d}_{1B} , \bar{d}_{2B} , \bar{d}_{10} ó \bar{d}_{20} es similar.

Los vectores de los ejes de rotación \bar{d}_{10} y \bar{d}_{20} pasan por O y son perpendiculares a los planos 1 y 2, respectivamente, por lo tanto, \bar{d}_{10} y \bar{d}_{20} serán iguales a los vectores unitarios \bar{w}_1 y $-\bar{w}_2$ -

respectivamente, Figura 4.4.

Imaginando una forma de rotación, digamos alrededor del eje \bar{d}_{10} , todos los puntos de la cuña en la zona ODB se mueven paralelos al plano 1 mientras que la superficie OCB de la cuña de roca se separa del plano 2.

El punto de aplicación I de la resultante \bar{R} se puede obtener conociendo los puntos de aplicación de las diversas fuerzas actuantes.

4.2.5 Análisis por rotación de un talud.

Para el análisis por rotación, es necesario conocer el punto de aplicación I de la fuerza resultante \bar{R} . Este se obtiene conociendo los puntos de aplicación de las diversas fuerzas actuantes sobre la cuña.

Existe la posibilidad de rotación sobre el eje \bar{d}_{10} , cuando la resultante \bar{R} tiene componente escalar positiva de momento alrededor de los ejes \bar{x}_{12} y \bar{d}_{10} , o sea.

$$M_x = \text{momento de } \bar{R} \text{ alrededor de } \bar{x}_{12} = \bar{x}_{12}(\bar{O}I \times \bar{R}) > 0$$

$$M_{d_{10}} = \text{momento de } \bar{R} \text{ alrededor de } \bar{d}_{10} = \bar{d}_{10}(\bar{O}I \times \bar{R}) > 0$$

Similarmente, los momentos de \bar{R} alrededor de los ejes \bar{x}_{12} y \bar{d}_{20} deben satisfacer las siguientes ecuaciones:

$$M_x = \bar{x}_{12} \cdot (\bar{O}I \times \bar{R}) < 0$$

$$M_{d_{20}} = \bar{d}_{20} \cdot (\bar{O}I \times \bar{R}) > 0$$

Además, para que exista rotación alrededor del eje \bar{d}_{20} , deben -

cumplirse algunas consideraciones cinemáticas, las cuales dependen de la magnitud de los ángulos η , k_{10} y k_{20} , que se definen así:

$$\eta = \cos^{-1} (\vec{w}_1 \cdot \vec{w}_2) \quad 0 < \eta < \pi$$

$$k_{10} \text{ DOB} = \cos^{-1} \frac{\overline{OD} \cdot \overline{OB}}{(\overline{OD})(\overline{OB})} \quad 0 < k_{10} < \pi$$

$$k_{20} \text{ COB} = \cos^{-1} \frac{\overline{OC} \cdot \overline{OB}}{(\overline{OC})(\overline{OB})} \quad 0 < k_{20} < \pi$$

El rango de los ángulos η , k_{10} y k_{20} para los cuales la rotación es cinemáticamente imposible, se presenta a continuación:

Eje de Rotación \vec{d}_{10}

η	k_{10}	k_{20}	Condición Suplementaria
$0 < \eta < \pi$	$> \pi/2$	$> \pi/2$	-
$0 < \eta < \pi$	$< \pi/2$	$> \pi/2$	-
$\eta < \pi/2$	$> \pi/2$	$< \pi/2$	$\frac{\tan k_{20}}{\tan(\pi - k_{10})} > \sec(\pi - \eta)$

Eje de Rotación \vec{d}_{20}

η	k_{10}	k_{20}	Condición Suplementaria
$0 < \eta < \pi$	$> \pi/2$	$> \pi/2$	-
$0 < \eta < \pi$	$> \pi/2$	$< \pi/2$	-
$\eta < \pi/2$	$< \pi/2$	$> \pi/2$	$\frac{\tan k_{10}}{\tan(\pi - k_{20})} \sec(\pi - \eta)$

El análisis para determinar el factor de seguridad estático para rotaciones alrededor de los ejes \bar{d}_{10} y \bar{d}_{20} es similar, por lo que las ecuaciones se presentan en función de uno solo de los ejes, \bar{d}_{10} .

El factor de seguridad por rotación se obtiene del cociente entre la magnitud del momento resistente $M_{rd_{10}}$ y la magnitud del momento de volteo $M_{d_{10}}$.

$$F.S. = \frac{M_{rd_{10}}}{M_{d_{10}}}$$

donde:

$$M_{rd_{10}} = N_1 \tan \varphi_1 \cdot OQ$$

$$y \quad M_{d_{20}} = Tt \cdot OQ$$

por lo tanto

$$F.S. = \frac{N_1 \tan \varphi_1}{Tt}$$

N_1 es la magnitud de la componente normal de la resultante \bar{R}_1 - que actúa en el punto de intersección Q con el plano 1.

$$\bar{N}_1 = (\bar{R} \cdot \bar{W}_1) \bar{W}_1$$

$\bar{T}t$ se obtiene descomponiendo la fuerza tangencial

\bar{T}_1 de la resultante \bar{R} . La otra componente de \bar{T}_1 es $\bar{T}r$.

$\bar{T}t$ es la fuerza que tiene la dirección tangente a la rotación que Q realiza en el caso de una rotación alrededor de \bar{d}_{10} y por lo tanto, es la única componente de carga que ocasiona momento de volteo.

\bar{T}_r tiene la dirección del vector \overline{OQ} y no provoca volteo.

$$\bar{T}_1 = \bar{R} - \bar{N}_1 \quad - (a)$$

$$\bar{T}_1 = \bar{T}_r + \bar{T}_t = c_1 (-\overline{OQ}) + c_2 (\overline{OQ} \times \bar{w}_1) \quad - (b)$$

En la ecuación (b) - \overline{OQ} y $\overline{OQ} \times \bar{w}_1$ son vectores en la dirección \bar{T}_r y \bar{T}_t , con lo que:

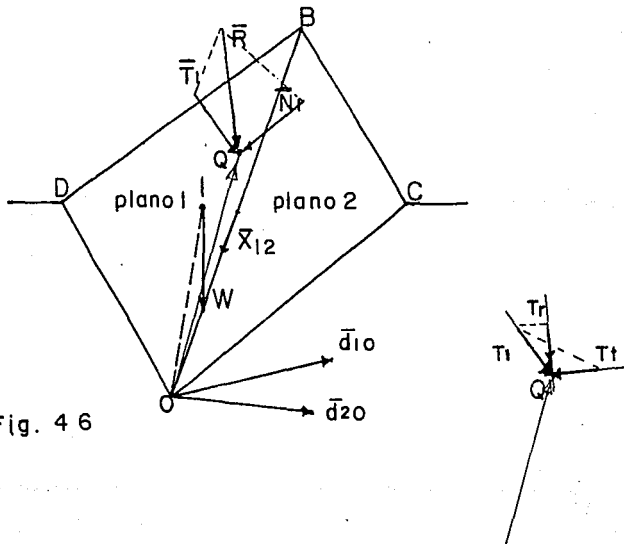
$$\bar{T}_r = -c_1 \overline{OQ}$$

y

$$\bar{T}_t = c_2 (\overline{OQ} \times \bar{w}_1)$$

Los valores de los coeficientes c_1 y c_2 se obtienen igualando las componentes en x, en y y en z de las ecuaciones (a) y (b).

Los momentos $M_{d_{10}}$ y $M_{d_{20}}$ son a menudo negativos y en estos -- casos únicamente la estabilidad por deslizamiento necesita analizarse.



4.3 Problemas Resueltos

1. Problema

Se están realizando explosiones a una distancia de 50m. de un talud de roca, la cantidad de explosivo utilizada para la detonación es de 605kg. Se sabe por observación que $\alpha = 10.3$ y $\beta = -1.1$

- Calcular la velocidad máxima que se genera al efectuar la prueba.
- Según el resultado anterior y la tabla 4.2, diga que efectos ocasionaría a las estructuras aledañas. Además, diga si la velocidad desarrollada queda dentro del rango permitido..

S o l u c i ó n :

- Con la ecuación 4.1

$$V = 10.3 \left(\frac{50}{\sqrt{605}} \right)^{-1.1}$$

$$V = 4.72 \text{ cm/s}$$

- El daño estructural es muy pequeño, el valor de la velocidad queda dentro del rango.

2. Problema

Se desea analizar un talud en roca caliza, cuya geometría queda definida por la cara del talud, un camino provisional de acarreo y una discontinuidad que es la superficie potencial de deslizamiento; su ángulo con respecto a la horizontal es de 18° .

El lugar es seco con lo que no se considerará nivel freático, - (n.f.).

Se considera además que la carga adicional transmitida al talud debida a los camiones es de 0.75 T/m.

De las pruebas de laboratorio se sabe que la cohesión y el ángulo de fricción en la superficie de deslizamiento son respectivamente $c = 1.8 \text{ T/m}^2$ y $\phi = 22^\circ$; el peso volumétrico del material es igual a 2.4 T/m^3 .

- Con el método bidimensional calcule el factor de seguridad.
- Según el resultado anterior.

S o l u c i ó n :

- Los datos del problema son:

$U = 0$ y $V = 0$, no hay n.f.

K no se considera por lo tanto es nulo

F aún no está determinado

$A = 13 \text{ m}$.

$c = 1.8 \text{ T/m}^2$

$\phi = 22^\circ$

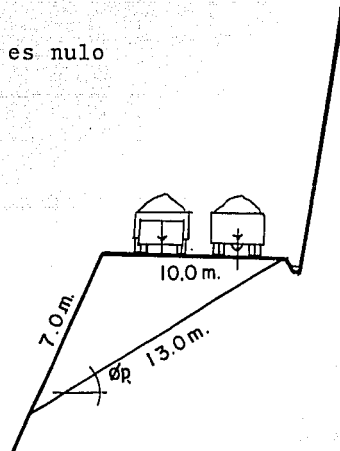
$\phi_p = 18^\circ$

con lo que:

$$\cos 18^\circ = 0.9511$$

$$\text{sen } 18^\circ = 0.3090$$

$$\tan 22^\circ = 0.4040$$



Cálculo del peso:

$$\text{semiperímetro} = \frac{10+7+13}{2}$$

$$\text{s.p} = 15 \text{ m.}$$

$$\text{área} = \sqrt{15(15-10)(15-7)(15-13)}$$

$$a = 34.6 \text{ m}^2$$

Si $\gamma_m = 2.4 \text{ T/m}^2$, el peso propio del talud será:

$$w = 34.6 \times 2.4$$

$$w = 83.04 \text{ T/m}$$

y el peso total será:

$$w_T = 83.04 + 0.75$$

$$w_T = 83.79 \text{ T/m}$$

Sustituimos valores en la ecuación 4.3

$$FS = \frac{1.8(13) + 83.79(0.9511)(0.4040)}{83.79(0.3090)}$$

$$FS = 2.15$$

- b) El factor de seguridad mínimo recomendado para cuando el talud está en condiciones permanentes o estáticas es de 1.5, - por lo tanto, el valor obtenido indica un buen margen de seguridad.

3. Problema

Se desea conocer el valor máximo aceptable de la subpresión, -- así como también la aceleración inicial desarrollada por la masa de un macizo rocoso cuyo volumen es de 60 m³ por metro y un peso volumétrico de 1.2 T/m³.

El macizo se encuentra apoyado sobre un pequeño estrato de arcilla de 10 cm., fuertemente compactado por el peso. Según las -

Según las pruebas de laboratorio se tiene una cohesión y ángulo de fricción estáticos de 1.6 T/m² y 35°, respectivamente, también se determinaron la cohesión y ángulo de fricción dinámicos, que son respectivamente iguales a 1.3 T/m² y 29°, la superficie potencial de deslizamiento es de 30 m. y su ángulo de buzamiento es de 30°.

S o l u c i ó n :

Cálculo del máximo valor de subpresión con la ecuación 4.4

$$U_{\text{máx}} = \frac{1}{\tan 35^\circ} [1.6(30) + 1.2(60) [\sin 30^\circ \tan 35^\circ - \cos 30^\circ]]$$

$$U_{\text{máx}} = 1.43 \{48 + 72(-0.5159)\}$$

$$U_{\text{máx}} = 1.43 (10.86)$$

$$U_{\text{máx}} = 15.52 \text{ T/m}$$

La fuerza impulsora del movimiento en el momento de la falla -- con la ecuación 4.5 es igual a:

$$I = (1.6 - 1.3)30 + (72(0.5) - 15.52)(0.7002 - 0.5543)$$

$$I = 9 + 20.48(0.1459)$$

$$I = 11.99 \text{ T/m}$$

por lo tanto, la aceleración inicial desarrollada será:

$$a = \frac{9.81}{72} (11.99)$$

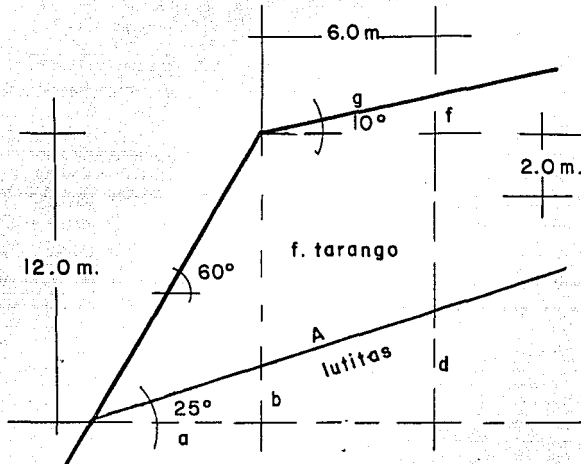
$$a = 1.63 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

4. Problema

Se requiere analizar un talud conformado por la geometría mostrada en la figura. La falla potencial de deslizamiento es una discontinuidad entre dos estratos, arriba formación Tarango y -

abajo lutita.

Las pruebas de laboratorio nos indican que la cohesión y ángulo de fricción entre materiales es respectivamente $c = 1.9 \text{ T/m}^2$ y $\phi = 21^\circ$, el peso volumétrico del material es igual a 2.1 T/m^3 :



- Calcular el factor de seguridad si la grieta de tensión se presenta a 6 m. del hombro del talud, el nivel freático se ha localizado a 2 m. de profundidad como se indica en la figura.
- Calcule el factor de seguridad si se considera un valor de 0.1 como coeficiente sísmico y una fuerza de anclaje de 65 T/m.
- Si el factor de seguridad se limita a 1.5 ¿qué fuerza de an-

claje se necesitaría, si la grieta de tensión se localiza al hombro del talud?.

S o l u c i ó n :

a) Para el cálculo del peso con lo que se calculan las magnitudes necesarias:

$$a = \frac{12}{\tan 60^\circ} = 6.93 \text{ m.}$$

$$b = 6.93 \tan 25^\circ = 3.23 \text{ m.}$$

$$d = 12.93 \tan 25^\circ = 6.03 \text{ m. y } A = \frac{6.03}{\sin 25^\circ} = 14.27 \text{ m.}$$

$$f = 6 \tan 10^\circ = 1.06 \text{ m.}$$

$$g = \frac{6}{\cos 10^\circ} = 6.09 \text{ m.}$$

con lo que se tiene los datos necesarios para el cálculo del área para el trapecio.

área del talud = área del trapecio - área del triángulo

$$\text{área del trapecio} = (6.09 + 12.93) \frac{13.06}{2} = 124.22 \text{ m}^2$$

$$\text{área del triángulo} = 12.93 \frac{(6.03)}{2} = 38.98 \text{ m}^2$$

$$\text{área del talud} = 124.22 - 38.98 = 85.24 \text{ m}^2$$

El peso será entonces:

$$w = 85.24 \times 2.1 = 179.0 \text{ T/m}$$

La fuerza de subpresión hidráulica será:

$$U = \gamma_w Z_w A / 2 = 1 \times 3.97 \times \frac{14.27}{2} = 28.33 \text{ T/m}$$

La fuerza debida a la presión hidrostática será:

$$V = \gamma_w Z_w^2 / 2 = 1 \frac{(3.97)^2}{2} = 7.88 \text{ T/m}$$

El factor de seguridad con la ecuación 4.3 será:

$$FS = \frac{1.9(14.27) + [179 \cos 25^\circ - 28.33 - 7.88 \sin 25^\circ] \tan 21^\circ}{179 \sin 25^\circ + 7.88 \cos 25^\circ}$$

$$FS = 0.93$$

b) Si consideramos un valor de $\theta = 45^\circ$

$$FS = \frac{27.11 + [133.9 + 65 \cos 45^\circ - [7.88 + 0.1(179)] \sin 25^\circ] \tan 21^\circ}{75.65 + 25.78 \cos 25^\circ - 65 \sin 45^\circ}$$

$$FS = 1.73 > 1.5$$

con lo que se cumplen las condiciones de seguridad.

c) Primeramente el peso es igual a:

$$\text{área} = \frac{6.93}{2} (12 - 3.23) = 27.76 \text{ m}^2$$

$$w = 27.76 \times 2.1 = 58.29 \text{ T/m}$$

$$A = \frac{3.23}{\sin 25^\circ} = 7.64 \text{ m}$$

$$U = 1 \times 6.77 \times \frac{7.64}{2} = 25.86 \text{ T/m}$$

$$V = \frac{1(6.77)^2}{2} = 22.92 \text{ T/m}$$

Sustituyendo valores:

$$1.5 = \frac{1.9(7.64) + [58.29 \cos 25^\circ - 25.86 + F \cos 45^\circ - [22.92 + (0.1)(58.29)] \sin 25^\circ] \tan 21^\circ}{58.29 \sin 25^\circ + 28.75 \cos 25^\circ - F \sin 45^\circ}$$

simplificando:

$$F(1.06 + 0.707) - 55.91 = 0$$

$$F = \frac{55.91}{1.77}$$

$$F = 31.59 \text{ T/m}$$

- 5.- Calcular el Factor de Seguridad de una cuña de roca apoyada sobre un plano con rumbo 30° NE y 40° de buzamiento al SE. El ángulo de fricción $\phi = 35^\circ$.

S o l u c i ó n :

Considerando que el eje X positivo tiene la dirección del rumbo del plano. La cuña está sometida exclusivamente a la acción del peso propio W.

Las coordenadas vectoriales unitarias son"

$$\vec{u} = (1 , 0 , 0) ; \vec{w} = (0 , -0.809 , -0.588)$$

El vector normal al plano es:

$$\vec{W} = \vec{u} \times \vec{v} = (0 , 0.588 , -0.809)$$

$$\vec{R} = \vec{W} = (0 , 0 , -W)$$

La magnitud de la componente de R, normal al plano de deslizamiento es :

$$N = \vec{R} \cdot \vec{w} = 0.809 W$$

$$\text{Por lo que } N = N \cdot \vec{w} = (0 , 0.476 W , -0.655 W)$$

La componente tangencial $\vec{T} = \vec{R} - \vec{N}$

$$T = (0 , -0.476 W , -0.345 W)$$

$$T = [(-0.476)^2 + (-0.345)^2]^{1/2} W = 0.59 W$$

El factor de seguridad será :

$$F S = \frac{N \tan 35^\circ}{T} = \frac{0.809 W (\tan 35^\circ)}{0.59 W}$$

$$F S = 0.84$$

Corroborando tenemos:

$$F S = \frac{\tan 35^\circ}{\tan 40^\circ} = 0.84$$

6.- PROBLEMA

Suponga en el problema anterior que la cara del talud sigue una dirección E - W. Calcule el factor de seguridad.

En este caso $\phi = 30^\circ$ con lo que las coordenadas vectoriales son :

$$\vec{u} = (\cos 30^\circ, \sin 30^\circ, 0)$$

$$\vec{u} = (0.891, 0.454, 0)$$

$$\vec{v} = (\cos 40^\circ, \sin 30^\circ, -\cos 40^\circ \cos 30^\circ, -\sin 40^\circ)$$

$$\vec{v} = (0.367, -0.721, -0.587)$$

El vector normal al plano es :

$$\vec{w} = \vec{u} \times \vec{v} = (-0.266, 0.523, -0.809)$$

La magnitud de la componente de \vec{R} , normal al plano de deslizamiento es :

$$N = \vec{R} \cdot \vec{w} = 0.809 W$$

$$\vec{N} = 0.809 W \cdot \vec{w} = (-0.215, 0.423, -0.654) W$$

la componente tangencial es :

$$\vec{T} = \vec{R} - \vec{N} = (0.215, -0.423, -0.346) W$$

$$T = [(0.215)^2 + (-0.423)^2 + (-0.346)^2]^{1/2} W$$

$$T = 0.59 W$$

el factor de seguridad es:

$$F S = \frac{0.809 \tan 35^\circ}{0.59} = 0.84$$

con lo que se obtiene el mismo resultado.

7.- PROBLEMA

Suponga en el problema anterior que la cuña de roca soporta una carga adicional de $0.3 W$, la dirección de la fuerza está dada por el vector unitario $\bar{e}_q = (0.22, -0.925, -0.309)$.

En este caso $\bar{R} = \bar{W} + \bar{Q}$

$$\bar{Q} = Q \cdot \bar{e}_q = 0.3 W (0.222, -0.925, -0.309)$$

$$\bar{Q} = (0.067, -0.278, -0.093) W$$

$$\bar{R} = (0.067, -0.278, -1.093) W$$

Si $\bar{w} = (-0.266, 0.523, -0.809)$

$$N = \bar{R} \cdot \bar{w} = (-0.018 - 0.145 + 0.884) W$$

$$N = 0.724 W$$

$$\bar{N} = N \cdot \bar{w} = (-0.193, 0.379, -0.586) W$$

$$\bar{T} = \bar{R} - \bar{N} = (0.260, -0.657, -1.679) W$$

$$T = 1.82 W$$

El factor de seguridad será :

$$F S = \frac{0.724 \tan 35^\circ}{1.82} = 0.398$$

8.- PROBLEMA

La cuña del problema anterior se refuerza con un cable -- que proporciona una fuerza de $1.2 W$ actuando en dirección paralelamente opuesta al vector unitario del echado. También un sistema de anclaje proporciona una fuerza de $0.8 W$ actuando perpendicularmente al plano de deslizamiento.

En este caso.

$$N = (0.73 + 0.8) W \quad \text{y} \quad T = (1.82 - 1.2) W$$

$$F S = \frac{1.53 \tan 35^\circ}{0.62} = 1.51$$

Aquí el factor de seguridad aumenta, debido a la fuerza -- adicional proporcionada a la cuña.

- 9.- En la cuña anterior actúa una fuerza de subpresión U que -- provoca que el factor de seguridad decrezca hasta 1.0 ; se -- desea saber el valor de la fuerza U .

Como se sabe la subpresión provoca un empuje ascendente, y actúa normalmente al plano de deslizamiento con lo que:

$$N = 1.53 W - U$$

entonces

$$1.0 = \frac{(1.53 W - U) \tan 35^\circ}{0.62 W}$$

$$\frac{0.62 W}{\tan 35^\circ} = 1.53 W - U$$

con lo que

$$U = (1.53 - \frac{0.62}{\tan 35^\circ}) W$$

$$U = 0.52 W$$

Aquí no podemos corroborar el valor con la ecuación - - -
 (G) porque es un sistema de fuerzas el que actúa -
 en la cuña.

10.- PROBLEMA

Si en la cuña solo actúa el peso propio se puede obtener -
 la magnitud de una resistencia dinámica NW por medio de
 la ecuación.

$$NW = W \operatorname{sen} (\theta - \alpha)$$

en este caso

$$N = \operatorname{sen} (35^\circ - 40^\circ) = - 0.078$$

11.- PROBLEMA

Aplicando la ecuación (4.7) analizar un talud de roca
 que desliza por sus dos superficies potenciales de falla.

El rumbo del plano A es 45° NE y 20° E de echado. El rumbo
 del plano B le corresponden 50° NW y echado 10° W. La
 cara del talud tiene un rumbo de 60° NE y 21° E, su altu
 ra es de 10 m. La falla B se produce por una transición
 de materiales.

Del laboratorio se obtiene que los ángulos de fricción -
 interna del material 1 ; 1 y 2 son $\phi_1 = 20^\circ$ y $\phi_{1,2} = 15^\circ$.

La cohesión para 1 ; 0.8 T/m^2 y para 1 y 2 disminuye -

0.5 T/m^2 . El peso volumétrico del material 1 es de 1.2 T/m^3 .

Las fuerzas adicionales son:

Fuerza sísmica con un coeficiente $k = 0.15$

Fuerza de anclaje de 10 T a 60° .

Fuerzas de subpresión para los planos A y B son de 5 T y -3 T respectivamente.

Calcular el factor de seguridad.

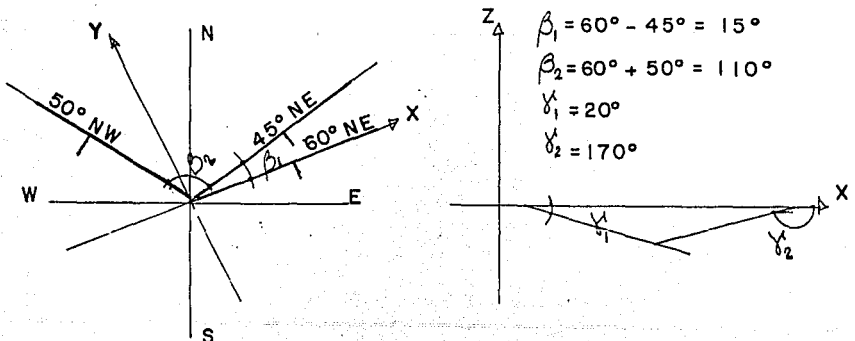
S O L U C I O N

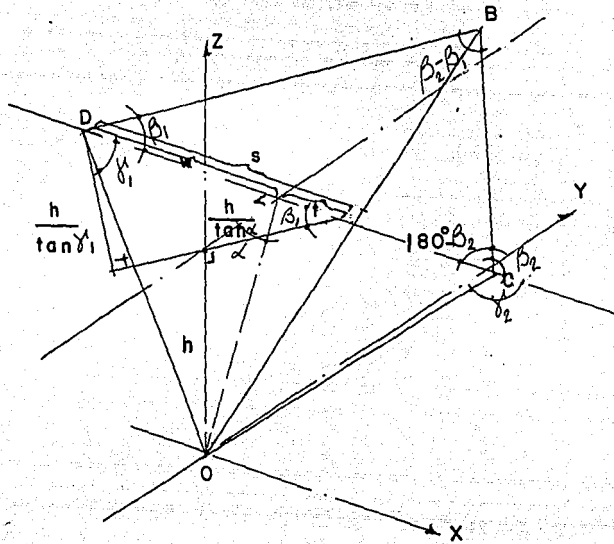
- a) Valiéndonos el álgebra vectorial se calculará: las áreas donde actúan las reacciones R_A y R_B , el volumen de la cuna, el ángulo de intersección entre los dos planos. Ver Fig..

La Resultante del sistema está dada así:

$$\bar{R} = \bar{W} + \bar{H} + \bar{F} + \bar{U}$$

Siguiendo el sistema de Wittke, se obtendrán los valores para $\beta_A, \beta_B, \gamma_A$ y γ_B con respecto al eje x paralelo al rumbo del talud.





Los vectores unitarios son:

$$\bar{u}_1 = (0.972 , 0.233 , 0)$$

$$\bar{v}_1 = (0.222 , -0.925 , -0.309)$$

$$\bar{w}_1 = (-0.072 , 0.30 , -0.951)$$

$$\bar{u}_2 = (-0.156 , 0.988 , 0)$$

$$\bar{v}_2 = (-0.880 , -0.139 , -0.454)$$

$$\bar{w}_2 = (-0.449 , -0.071 , 0.891)$$

$$\bar{x}_{12} = (-0.199 , -0.491 , -0.14)$$

$$\bar{x}_{12} = - 0.14$$

Los vectores que definen el talud son:

$$\overline{OD} = (-8.93 , 29.21 , 10)$$

$$\overline{OC} = (15.25 , 29.21 , 10)$$

$$\overline{DC} = (24.18 , 0 , 0)$$

$$\overline{OB} = (14.21 , 35.07 , 10)$$

$$\overline{DB} = (23.14 ; 5.86 , 0)$$

$$\overline{CB} = (-1.04 , 5.86 , 0)$$

El ángulo de intersección entre los planos A y B es igual a:

$$\epsilon_x = \theta_p = \tan^{-1} \left(\frac{0.14}{0.49} \right)$$

$$\theta_p = 17.72^\circ$$

Nota: damos por hecho que se cumplen las condiciones cinemáticas.

Cálculo de las áreas necesarias:

$$A_T = / \overline{DB} \times \overline{DC} / = 141.7 \text{ m}^2$$

$$A_1 = / \frac{\overline{OD} \times \overline{DB}}{2} / = 383.2 \text{ m}^2$$

$$A_2 = / \frac{\overline{OC} \times \overline{CB}}{2} / = 66.85 \text{ m}^2$$

El peso de la cuña es igual a:

$$W = 141.7 \times \frac{10}{6} \times 1.2 = 283.4 \text{ T}$$

El análisis para obtener la fuerza normal a la línea de - - deslizamiento será.

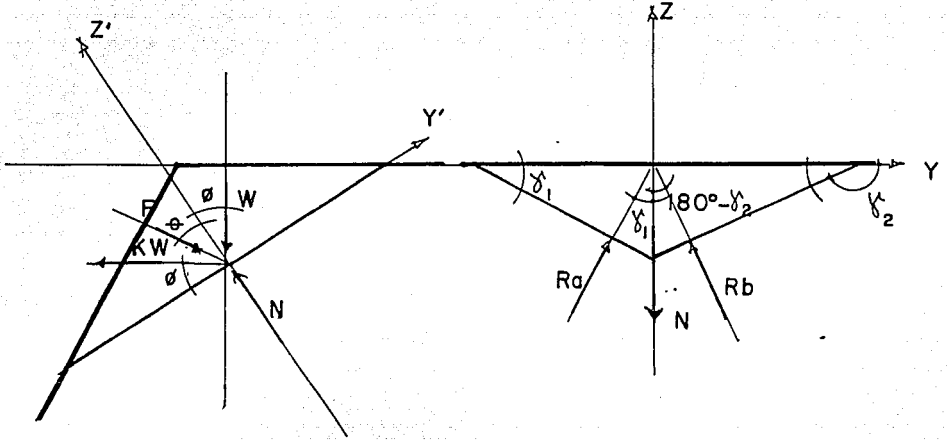


Fig. a

Fig. b

De la Figura a, hacemos $\Sigma F_z^1 = 0$

$$N = W \cos \phi + F \cos \theta - kW \operatorname{sen} \phi$$

$$N = W(\cos \phi - k \operatorname{sen} \phi) = F \cos \theta$$

De la Figura b, hacemos $\Sigma F_z = 0$ y $\Sigma F_x = 0$

$$N = Ra \cos \gamma_1 + Rb \cos (180^\circ - \gamma_2)$$

$$0 = Ra \operatorname{sen} \gamma_1 - Rb \operatorname{sen} (180^\circ - \gamma_2)$$

$$N = Ra (\cos \delta_1 + \text{sen } \delta_1 \cot (180^\circ - \delta_2))$$

$$Ra = \frac{N}{\cot \delta_1 + \cot (180^\circ - \delta_2)}$$

$$Rb = \frac{Ra \text{ sen } \delta_1}{\text{sen} (180^\circ - \delta_2)}$$

Sustituyendo valores se obtiene.

$$N = 283.4 (\cos 17.73^\circ + 0.15 \text{ sen } 17.72^\circ) + 10 \cos 60^\circ$$

$$N = 266.7 \text{ T}$$

$$Ra = \frac{266.7}{\cot 20^\circ + \cot (180^\circ - 170^\circ)}$$

$$Ra = 28.4 \text{ T}$$

$$Rb = 28.4 \frac{\text{sen } 20^\circ}{\text{sen } 10^\circ}$$

$$Rb = 56.1 \text{ T}$$

El valor de T se obtiene haciendo $\sum Fy^1$ en la Figura a.

$$T = W \text{ sen } \phi p + KW \cos \phi p - F \text{ sen } \theta$$

$$T = 283.4 (\text{sen } 17.7^\circ + 0.15 \cos 17.7^\circ) - 10 \text{ sen } 60^\circ$$

$$T = 110.6 \text{ T}$$

Finalmente el factor de seguridad será con la ecuación

$$FS = \frac{0.8(283.2) + 0.3(66.85) + (28.4 - 5) \tan 20^\circ + (56.1 - 3) \tan 15^\circ}{110.6}$$

$$F.S = \frac{347}{110.6} = 3.13$$

Nota: La ecuación 4.7, es un caso particular en el que se limitan las direcciones de las fuerzas actuantes, pero se incluyen las fuerzas por cohesión. Para un caso más general se hace necesario el cálculo vectorial para mayor facilidad.

12.- PROBLEMA.

Revisar las condiciones de estabilidad de un talud en roca con rumbo 45° NE y 30° SE de echado, con una altura de 20 m.

El peso volumétrico del material es 2.3 T/m^3

El talud está cruzado por dos fallas

Falla A rumbo 45° NW
 echado 60° SW ; $\phi = 40^\circ$

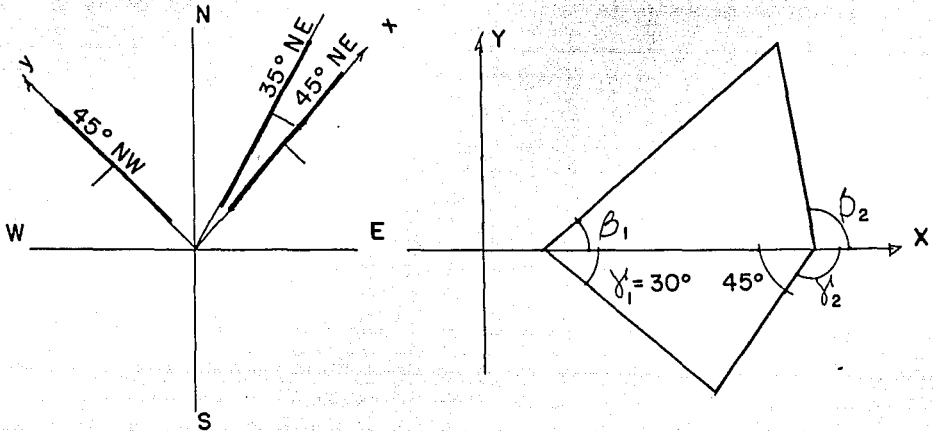
Falla B rumbo 35° NE
 echado 70° SE ; $\phi = 30^\circ$

a) Suponga que la cuña está sometida a la acción de su propio peso.

S O L U C I O N

$$\beta_1 = 10^\circ \quad \gamma_1 = 30^\circ$$

$$\beta_2 = 90^\circ \quad \gamma_2 = 135^\circ$$



plano B = plano 1

plano A = plano 2

Cálculo de \bar{u} , \bar{v} y \bar{w} para los planos 1 y 2

$$\bar{u}_1 = (0.985, 0.174, 0)$$

$$\bar{v}_1 = (0.150, -0.853, -0.5)$$

$$\bar{w}_1 = (-0.087, 0.493, -0.866)$$

$$\bar{u}_2 = (0, 1, 0)$$

$$\bar{v}_2 = (-0.707, 0, -0.707)$$

$$\bar{w}_2 = (-0.707, 0, -0.707)$$

La resultante será $\bar{R} = (0, 0, -W)$

y los posibles modos de falla serán:

$$\bar{R} \cdot \bar{w}_1 = 0.866 \text{ W} > 0$$

$$\bar{R} \cdot \bar{w}_2 = -0.707 \text{ W} < 0$$

la cuña se mantiene en contacto con los dos planos.

Para determinar las condiciones cinemática se calcula - - -
 \bar{x}_{12} , $1\bar{s}_{12}$ y $2\bar{s}_{12}$.

$$\bar{x}_{12} = \bar{w}_2 \times \bar{w}_1 = (-0.349, -0.674, -0.349)$$

$$\lambda_{12} = |\lambda_{12}| = 0.835$$

$$1\bar{s}_{12} = \bar{x}_{12} \times \bar{w}_1 = (0.756, -0.272, 0.231)$$

$$2\bar{s}_{12} = \bar{x}_{12} \times \bar{w}_2 = (-0.477, 0.493, -0.477)$$

$$\bar{R} \cdot 1\bar{s}_{12} = 0.231 \text{ W} > 0$$

$$\bar{R} \cdot 2\bar{s}_{12} = 0.477 \text{ W} > 0$$

$$\xi_x = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{12} z}{\lambda_{12} y} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{-0.349}{-0.674} \right)$$

$$\xi_x = 27.4^\circ ; \quad \zeta = 0^\circ ; \quad \alpha = 30^\circ$$

COMO $\zeta < \xi_x < \alpha$ y $0 < \alpha < \pi$

y como $\bar{R} \cdot 1\bar{s}_{12} > 0$ y $\bar{R} \cdot 2\bar{s}_{12} > 0$ se concluye que el -
 deslizamiento es cinemáticamente posible y que ocurre por
 la línea de intersección.

La magnitud de la fuerza impulsora será:

$$T_{12} = \frac{\bar{R} \cdot \bar{x}_{12}}{\lambda_{12}} = \frac{0.349 \text{ W}}{0.835}$$

$$T_{12} = 0.418 \text{ W}$$

La fuerza vectorial será igual a:

$$\bar{T}_{12} = T_{12} \cdot \frac{\bar{x}_{12}}{\lambda_{12}} = (-0.175, -0.337, -0.175) \text{ W}$$

La fuerza normal será:

$$\bar{N}_{12} = \bar{R} - \bar{T}_{12} = (0.175, 0.337, -0.826) W$$

$$\bar{N}_{12} = N_1 \bar{w}_1 + N_2 (-\bar{w}_2)$$

$$0.175 W = -0.087 N_1 + 0.707 N_2$$

$$0.337 W = 0.493 N_1 - 0 N_2$$

$$-0.826 W = -0.866 N_1 - 0.707 N_2$$

$$N_1 = \frac{0.337 W}{0.493} = 0.684 W$$

$$N_2 = \frac{0.175W + 0.087 (0.684 W)}{0.707}$$

$$N_2 = 0.332 W$$

El factor de seguridad será:

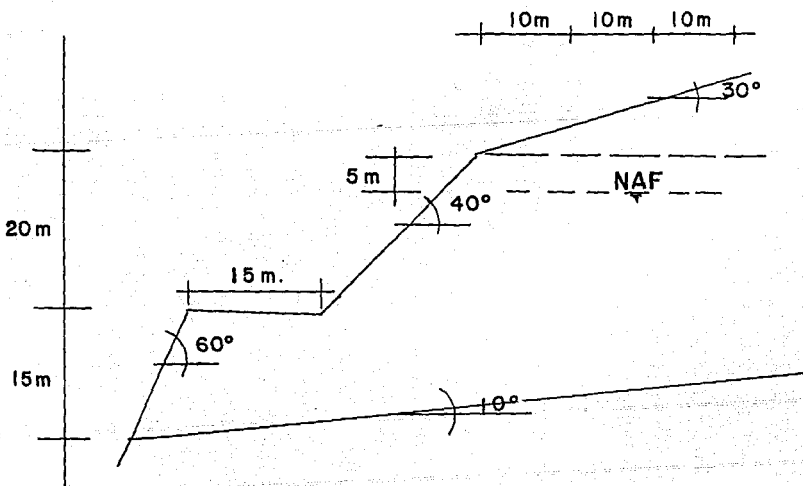
$$FS = \frac{N_1 \tan \theta_1 + N_2 \tan \theta_2}{T_{12}}$$

$$FS = \frac{0.684 \tan 30^\circ + 0.332 \tan 40^\circ}{0.418}$$

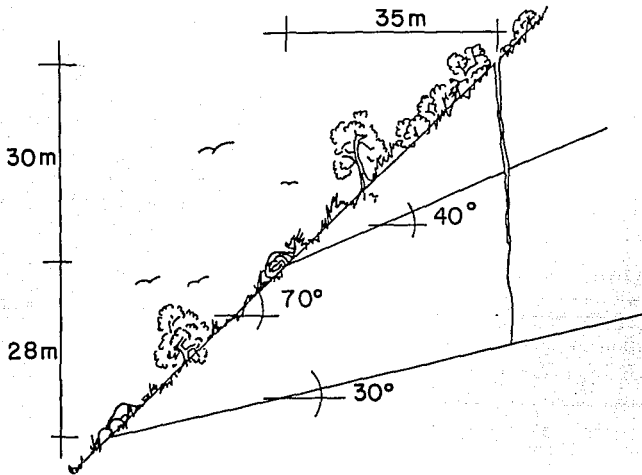
$$FS = 1.61$$

4.4 Problemas Propuestos

- 1.- Se limita la velocidad de la partícula a 5.1 cm/s ya que no se desea correr riesgos en estructuras aledañas a la zona de pruebas, la distancia al talud es de 300 m. La detonación se hace con la técnica coyote cuyos valores de α y β corresponden a 10.3 y 1.1. Calcular la cantidad máxima de explosivos por usar.
- 2.- Se tiene un talud de roca con las características mostradas en la figura. Para la falla potencial de deslizamiento, la cohesión C es igual a 1.8 T/m^2 y el ángulo de deslizamiento interno del material ϕ es igual a 35° . El peso volumétrico γ_m es igual a 2.0 T/m^3 el nivel freático está a 5 m., según se indica en la figura. Calcular:
- El factor de seguridad si la grieta de tensión se localiza a los 10 primeros metros del hombro del talud, el coeficiente sísmico es de 0.15.
 - La fuerza de anclaje si el factor de seguridad se limita a 1.2 y si la grieta de tensión se localiza a los 30 m.



3.- Calcular el factor de seguridad de un talud de roca compuesto por 3 estratos como se muestra en la figura.

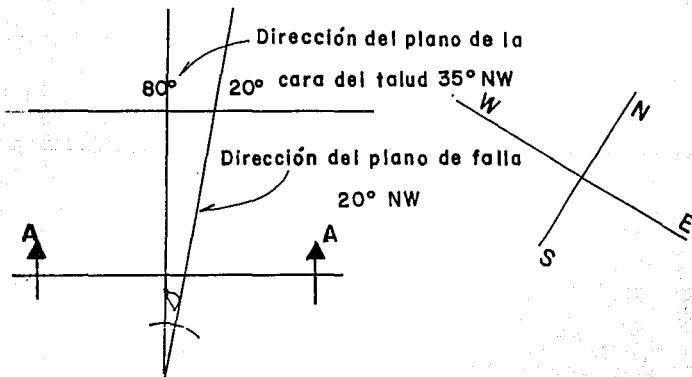
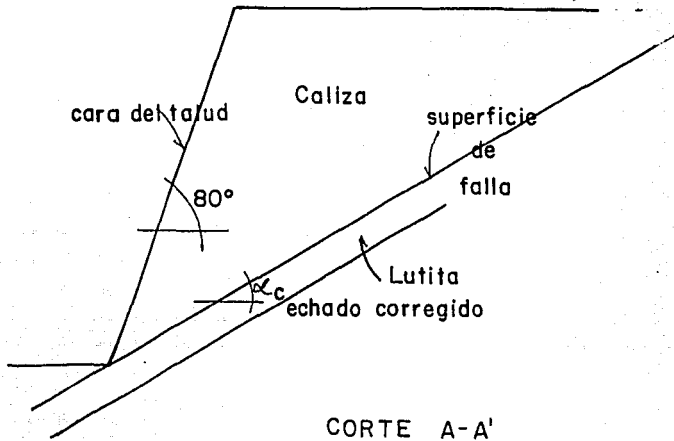


Los parámetros para los dos posibles planos de deslizamiento se dan en la siguiente tabla.

Estrato	Material	ϕ	c	ϕ_p	γ_m
1	caliza	27	0.3	40	1.7
2	toba	31	0.12	30	2.3

El nivel freático y la grieta de tensión se señalan en la figura, el coeficiente sísmico en la zona de estudio es de 0.10 .

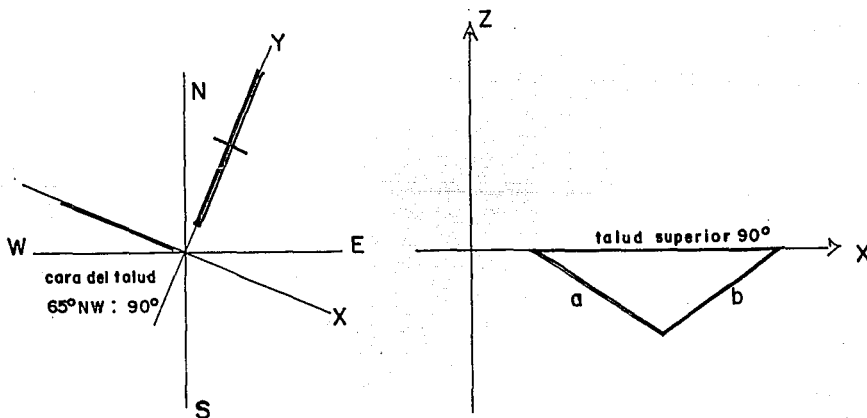
- 4.- Se tiene un talud de calizas cuyo manto interior está apoyado sobre lutitas con rumbo de 20° NW y echado de 20° W. La cara del talud propuesto tiene un rumbo de 35° NW con echado de 80° E, y una geometría según se muestra en la figura.



PLATA

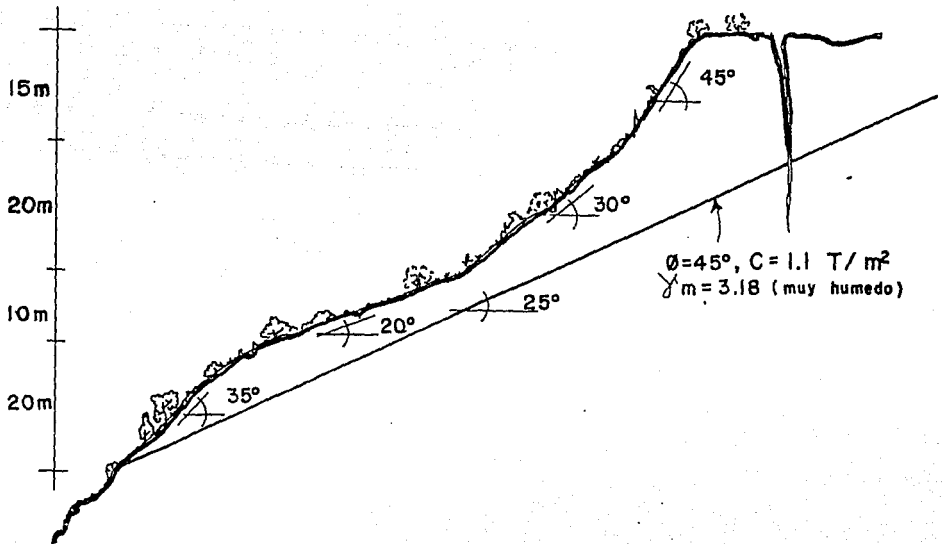
Se sabe que en el contacto caliza - lutita $C = 1.8 \text{ T/m}^2$, $\phi = 20^\circ$. La falla del talud es perpendicular al plano del talud. El peso volumétrico es igual a 2.2 T/m^3 . Considérese efectos de subpresión por filtraciones de agua.

- 5.- De los problemas 2, 3 y 4 calcular la aceleración del movimiento, suponiendo que ϕ_d y C_d son nulos.
- 6.- Se desea aplicar el método de la cuña para calcular el factor de seguridad de un talud compuesto por dos estratos como se muestra en la figura. Los valores de C y ϕ en las superficies potenciales de deslizamiento son $C_a = 1.3 \text{ T/m}^2$, $C_b = 1.9 \text{ T/m}^2$ y $\phi_a = 22^\circ$, $\phi_b = 31^\circ$. Para el plano a, el rumbo vale $N25^\circ E$ y un echado de $30^\circ E$. Para el plano b, el rumbo es el mismo pero el echado es $30^\circ NW$. El coeficiente sísmico es de 0.15 no existe fuerza de anclaje y la fuerza por subpresión es de $U_a = 2 U_b$ siendo $U_b = 2 \text{ T/m}^2$. La altura del talud es de 10 m , ver fig. El peso volumétrico del material es de $\gamma_m = 1.95 \text{ T/m}^3$.



Nota: analice 1 m^2 de superficie.

- 7.- Considerando que C_a , C_b , U_a , U_b , K y F valencero, calcular el factor de seguridad del talud.
- 8.- Por el método de las dovelas. Calcular el factor de seguridad para el talud mostrado en la figura.



- 9.- Calcule el FS de una cuña de roca apoyada sobre un plano - - cuyo rumbo es E - W y buza 60° al Sur. El ángulo de fricción $\phi = 48^\circ$. La cuña está sometida a la acción del peso propio W . La orientación de la cuña sigue el sistema - - - Wittke.
- 10.- Calcule el FS si a la cuña del problema anterior:
- Si el talud soporta una carga adicional $0.5 W$ con rumbo Este.
 - Si la carga adicional del problema anterior actúa en -- dirección paralela al vector unitario del echado.
- 11.- Considere que bajo el plano de la cuña de peso \bar{W} del problema 9, actúa una fuerza de subpresión \bar{U} , la cual crece - - hasta que el F.S. decrece hasta alcanzar el valor de 1.0.
- 12.- La misma cuña sometida a la acción de su peso propio W , - - una fuerza de subpresión de $\frac{1}{4}W$ actuando normal al plano de deslizamiento y una fuerza \bar{A} que tiene una magnitud - - - $A = 1/6 W$ actuando en dirección $S22^\circ W$ y echado de $30^\circ E$.
- 13.- La cuña de un talud está formada por dos fallas, cuyos planos de deslizamiento siguen las siguientes direcciones: - plano A; rumbo $N 3^\circ E$; echado $40^\circ W$; $\phi_A = 35^\circ$; plano B; rumbo $N 44^\circ E$; echado $51^\circ E$; $\phi_B = 13^\circ$.
- La altura del talud es de 15 m. El peso volumétrico de la cuña $2.2 T/m^3$.

- a) Revisar las condiciones de estabilidad del talud si la cuña está sometida a la acción de su propio peso.
 b) Si se le introducen al análisis fuerzas de subpresión

Subpresión en el plano 1 U1 100 Tm (normal al plano 1)
 Subpresión en el plano 2 U2 100 Tm (normal al plano 2)

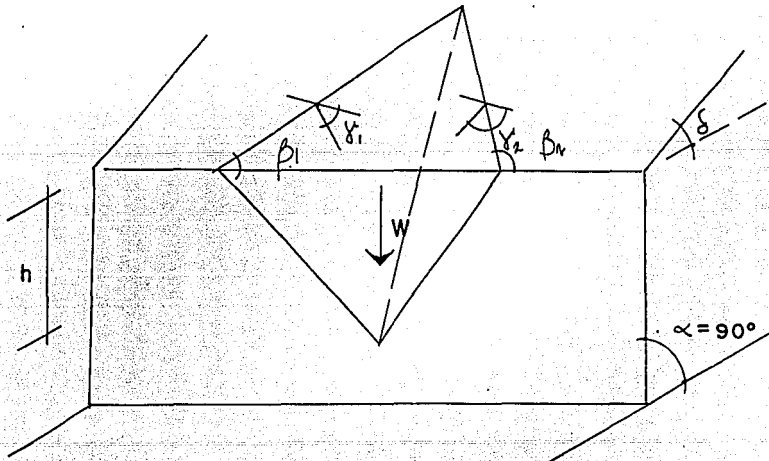
14.- Revisar las condiciones de estabilidad de un talud de roca -
 cuya orientación es E - W y buza al Norte.

El talud está formado por dos fracturas cuyos planos A y B -
 tienen las siguientes orientaciones

plano A	rumbo :	N 70° W
	echado :	45° W
plano B	rumbo :	N 18° E
	echado :	65° W

$\alpha = 90^\circ$; $\delta = 20^\circ$; $\phi_A = 30^\circ$; $\phi_B = 25^\circ$; $\gamma_m = 2.5 \text{ T/m}^3$

La altura del talud es de 23 m.



- a) Considerando el peso propio solamente.
- b) Considerando una fuerza adicional por anclaje de - 160 Ton. en dirección al peso.

15.- Revisar las condiciones de estabilidad de un talud E - W - echado 80° S y $\alpha = 70^\circ$; $\delta = 25^\circ$; $\gamma_m = 2.9 \text{ T/m}^3$.

- a) En la cuña sólo actúa el peso propio.
- b) En la cuña actúa una carga adicional de 250 Tm en el - sentido contrario al peso.

16.- Suponiendo que el talud no coincide con el rumbo E - W. - Calcular FS.

Rumbo del talud :	S 30° E
echada del talud:	N 51° E
rumbo de la falla A:	S 45° E
echada de la falla A:	30° E
rumbo de la falla B:	S 40° W
echado	25° W

5. CONCLUSIONES

La presente tesis no ha pretendido incluir todos los aspectos que se relacionan con problemas de la Mecánica de Rocas, pero considera de una manera general los conocimientos necesarios que se requieren a nivel Licenciatura.

Este trabajo representa uno de los primeros intentos para proporcionarle al estudiante una ayuda que complemente su aprendizaje en la materia de Geotecnia IV, conteniendo más de 120 problemas entre resueltos y propuestos, estructurado de tal manera que pueda ser ampliado con más ejercicios, sobre todo, de temas que no fueron tratados aquí.

Finalmente, es mi mejor deseo llegue a constituir una herramienta más de ayuda al estudiante de Ingeniería Civil.

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

- 1.- Raúl J. Marsal, Daniel Reséndiz N. "Presas de Tierra y -
Enrocamiento" Capítulo II. Propiedades Mecánicas de las -
Rocas Jesús Alberro A. Limusa, 1975.
- 2.- Comisión Federal de Electricidad.
Manual de diseño de obras civiles. Geotecnia (varios - -
ejemplares).
- 3.- D. M. Ragan. Geología Estructural. Ed. Savisa.
- 4.- F.C. Phillips, M.A.
Aplicación de la Proyección Estereográticas en Geología --
Estructural. Ed. Blume.
- 5.- Secretaria de Recursos Hidráulicos. 1970.
Manual de Mecánica de Suelos.
- 6.- E. Hoek et. Brown
Escavaciones Subterranas en Roca
Ed. Mc. Graw Hill.
- 7.- Ing. Carlos Díaz Mora
Apuntes de Geotecnia IV.
Facultad de Ingeniería. UNAM.

8.- Hugo Sergio Hass Mora.

Apuntes de la Clase de Geotecnia IV.

Facultad de Ingenieria.