

174

Inestabilidad de los Frentes
de Trabajo en las Canteras
de Piedra Laja del
Departamento de Lavalleja
(Uruguay).



GUSBIN J-C

Montevideo

1984

DI. NA. MI. GE.

ADVERTENCIA.

- Definición industrial y comercial del término "Piedra Laja" = masas de piedra que por tratamiento adecuado se separan en chapas de unos 2 centímetros de espesor y con superficie suficientemente plana y homogénea como para elaborar con ellas, materiales de revestimiento sin tener que alisar la superficie.
- Todas las informaciones geológicas, técnicas, económicas, topográficas, etc. de las diferentes explotaciones de Piedra Laja del departamento de Lavalleja se encuentran en los registros respectivos de la División Minería de la DI. NA. MI. GE. caracterizados por un número de asunto (As.).
- Este estudio del problema de inestabilidad de los frentes en las canteras de piedra laja utiliza la terminología y la secuencia de análisis empleada en Mecánica de Rocas y mencionadas en el trabajo bibliográfico: "Aplicación de la Mecánica de Rocas a la estabilidad de los taludes en las explotaciones a cielo abierto".

I N D I C E

Página.

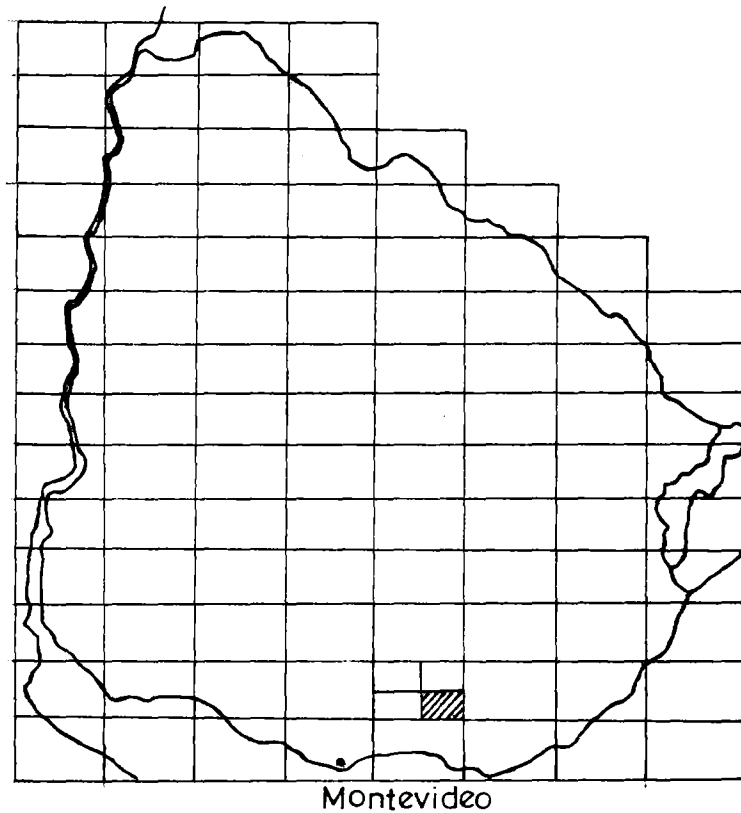
1. Introducción.	1
<u>Primera parte:</u> Estudio del Cabeceo en las canteras de Piedra Laja del departamento de Lavalleja.	
2. Características de la Piedra Laja	4
3. Cinemática del Cabeceo.	11
a. Primera etapa: Abertura y derrumbamiento de la roca superficial.	11
b. Segunda etapa: Formación de un apilado	15
c. Tercera etapa: Alteración y deslizamiento del apilado	17
4. Estudio de la ruptura por abertura.	19
a. Estudio a 2 dimensiones de la abertura de las rocas superficiales subverticales.	21
b. Estudio a 3 dimensiones de la abertura de las rocas superficiales subverticales.	25
5. Conclusiones.	26
<u>Segunda parte:</u> Derrumbamiento por abertura de la Piedra Laja en las canteras del departamento de Lavalleja.	
6. Estudio estructural	28
7. Estudio a 2 dimensiones de la abertura (construcción de la curva de estabilidad)	34
8. Estudio a 3 dimensiones de la abertura.	35
9. División litológica y en clases de buzamiento	39
10. Extrapolación de la curva de estabilidad	41
11. Conclusiones.	43
<u>Tercera parte:</u> Anexos.	
A1. Análisis petrográfico y químico de la piedra laja.	46
A2. Nuevos usos de la red polar equiareal.	49
A3. Determinación de las líneas de isodensidades de polos	52
A4. Búsqueda de la ley analítica expresando las distribuciones de medidas	56
Bibliografía	59
Lista de figuras, fotografías y planchas.	61

1. INTRODUCCION.

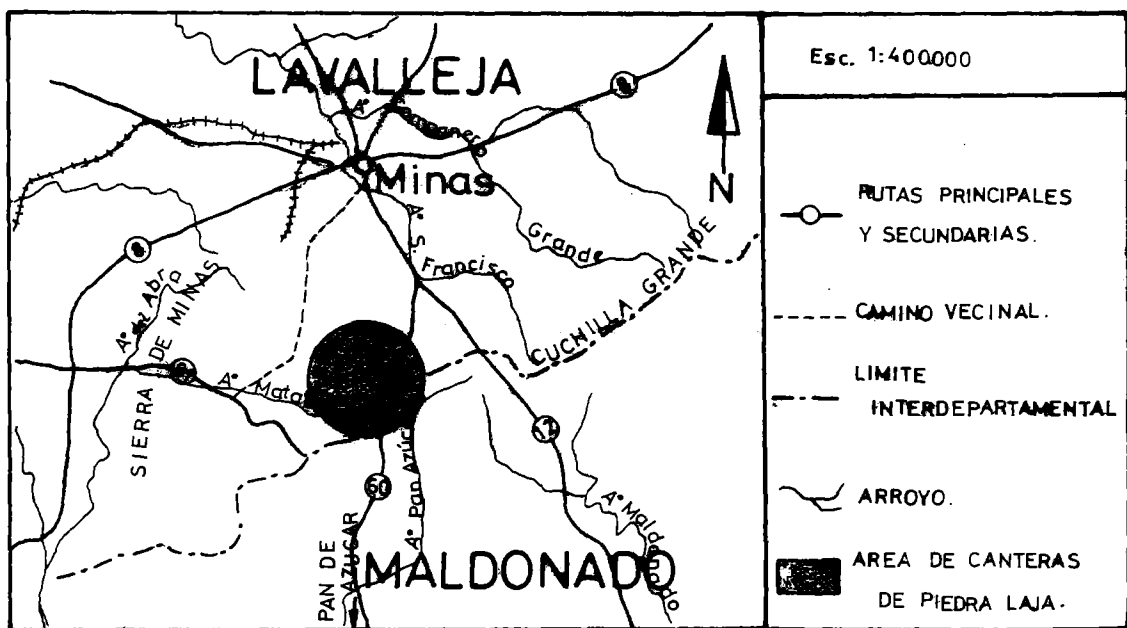
Durante una visita, el día 19 de octubre de 1983, a la cantera de piedra laja de Jesús González As. Nº 85/71, ubicada en el departamento de Lavalleja, se observó un fenómeno característico de las rocas esquistosas, mostrando generalmente un buzamiento marcado hacia el interior del macizo, fenómeno llamado "cabeceo". Este nos sugirió realizar un estudio más completo sobre el mecanismo y la cinética del cabeceo y un análisis teórico a 2 y a 3 dimensiones de la abertura de las rocas superficiales subverticales. Este estudio fué realizado en Marzo 84 y es intitulado: "Estudio del Cabeceo en las canteras de Piedra Laja del departamento de Lavalleja" y constituye la primera parte de este trabajo.

La segunda parte intitulada "Derrumbamiento por Abertura de la Piedra Laja en las canteras del departamento de Lavalleja" es la aplicación de la teoría desarrollada en la primera parte y la construcción de la curva real de estabilidad en relación a su esquistosidad y buzamiento. Este diagrama de estabilidad permitirá definir las alturas adecuadas de los frentes de trabajo y las medidas de seguridad requeridas.

Mapa de Ubicación



Fotoplano : Fuente del Puma G-27
 2ª Sección Judicial del Depto de Lavalleja



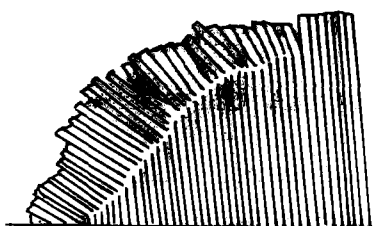
La Ubicación precisa de cada Canteras se encuentra en los Libros Registros de la División Minería de la DI.NA.MI.GE.

En fin, los anexos constituyen la tercera parte de este trabajo.

Varias canteras de piedra laja sometidas al fenómeno de ruptura por cabeceo fueron el objeto de observación; estas son: Carlos Beretta As. No. 66/72; Francisco Carinci As. Nº 86/71; Jesús González As. No. 85/71 y 89/69; Lajas Uruguayas S.A. As. Nº 244/75; F. Pereira As. Nº 85/73; J. Riffaud As.No. 124/80 y Ruffo Ltda. As.No. 21/70 y 164/72. El trabajo de campo fué realizado durante los días 16 a 18 de noviembre de 83 y los días 14 a 18 de mayo de 84 en el departamento de Levalleja (Ver Mapa de Ubicación).

Primera Parte

Estudio del Cabeceo en las canteras de Piedra Laja del departamento de Lavalleja.



GUSBIN J-C

Marzo 84

Montevideo

DI. NA. MI. GE.

2. CARACTERISTICAS DE LA PIEDRA LAJA.

Los yacimientos en estudio pertenecen al borde occidental del Grupo Lavalleja, en las proximidades de la formación Sierra de Animas. En esta parte del grupo Lavalleja, las rocas dominantes son filitas, filitas calcáreas y calizas magnesianas, generalmente grises o negras denotando ambiente reductor.

En esta zona del grupo Lavalleja, las litologías presentes son de metamorfismo de bajo grado y presentan en general un rumbo noreste con buzamientos de 70 a 85° hacia el NW.

Las rocas filitosas, pero sobretudo las calizas filitosas y las filitas calcáreas son destinadas a la producción de piedra laja.

El análisis petrográfico de varias muestras tomadas en las principales explotaciones nos ha permitido clasificar estas rocas en forma general como calcofilitas según la clasificación de las rocas metamórficas de baja temperatura de H.G.F. Winkler (Ver anexo A1).

Se trata de rocas compuestas por capas alternadas de caliza cristalina y lechos sericitas y/o cloríticas. La recristalización de los minerales arcillosos originales a sericita es un fenómeno fundamental para la viabilidad técnica de empleo de la piedra laja.

La calcofilita es bien laminada con niveles subparalelos de minerales filitosos rítmicamente distribuidos en dirección normal a la esquistosidad.

Estas se constituyen en bancos de algunas decenas de metros de potencia pasando gradualmente hacia términos más filitosos o más calcáreos debido al cambio en su composición mineralógica hasta perder su estructura y quedar inhabilitadas para ese uso industrial.

La piedra laja explotable en las diferentes explotaciones estudiadas se distribuye en bandas subparalelas de rumbo N 40 - 50 E y buzamiento 75° - 87° NW con potencia variable; tiene total continuidad en el sentido del rumbo y solamente la pierde por la eventual existencia de fallas perpendiculares, que desplazan posteriormente los bloques entre si.

La explotabilidad técnica de un yacimiento de filitas calcáreas destinadas a la producción de piedra laja (empleada en baldosas y revestimiento) depende de varios parámetros fundamentales: fisibilidad (planos separados cada 2 - 3 cm.); buzamiento casi vertical (necesario por el método de extracción utilizado); espesor de los bancos y condiciones topográficas apropiadas.

La piedra laja industrialmente explotable no debe presentar pliegues secundarios sino que su origen debe responder a una sola fase tectónica plástica aunque puedan existir otras fases tectónicas rígidas superpuestas. Resulta evidente que para ser usada con los fines normales, las direcciones de fisibilidad deben dar superficies casi perfectamente planas.

Las alturas de los frentes de trabajo encontradas en las diferentes explotaciones visitadas oscilan entre 3 (J.González As.89/69 y 13 (Libro Gigante As. 66/72) metros, con características constantes de la piedra laja en sentido vertical.

El frente de trabajo y las paredes de la explotación están constituidas por el plano de esquistosidad de la roca y la extracción se efectúa por acufamiento y empuje, hacia el piso de la cantera.

Los fenómenos de meteorización de esta calcofilita son principalmente causados por la disolución del carbonato y la pérdida de cohesión entre los minerales filitosos componentes: sericita, clorita.

Es frecuente la aparición de lechos milimétricos de pirita (ambiente reductor) que por meteorización se oxida a limonita o hematita y quita valor estético a las rocas a explotar.

- Un perfil típico según la resistencia mecánica sería el siguiente:

0 m. a 0,30 m. suelo vegetal

0,30 m. a 0,70 m. regolito de trozos angulosos de 1 a 5 cm.

de arista

a partir de 0,70 m. piedra laja (filita, calcofilita) explotable o no

- Características de la esquistosidad de la filita:

- . Su esquistosidad tiene una importancia primordial, ella guía su ruptura; por lo tanto su grado de separación es $\gamma \cong 1$ y su continuidad $h \cong 1$.
- . La característica de la superficie: hastial liso no existiendo puente rocoso.
- . Relleno: - por su propia alternación,
 - fisura rellena de piedras,
 - venillas de cuarzo (de origen hidrotermal) con niveles piritosos.

Plancha 2

INSTITUTO GEOLOGICO DEL URUGUAY

INVENTARIO MINERO

ESBOZO GEOLOGICO

1981

FUENTE DEL PUMA

G-27

ESCALA
1:50000



REFERENCIAS

- COBERTURA SEDIMENTARIA INDIFERENCIADA
- FORMACION SIERRA DE ANIMAS
- TRAQUITAS, RIOLITAS Y SIENITAS
- FORMACION SALUS
- CUARCITAS, CONGLOMERADOS Y BRECHAS
- PRECAMBRICO SUPERIOR MODERNO
- SERIE CONGLOMERADICA DE "LAS VENTANAS"
- SIITITOS Y METASEDIMENTOS INDIFERENCIADOS
- CUARCITAS
- ESQUISTOS SERICITIZADOS CON INTERCALACIONES INDIFERENCIADAS
- CALIZAS Y ESQUISTOS CALCAREOS
- ROCAS VOLCANICAS BASICAS
- ROCAS VOLCANICAS ACIDAS
- CALIZAS Y ESQUISTOS CALCAREOS
- ESQUISTOS, CUARCITAS, LEPTINITAS Y MICAESQUISTOS
- ANFIBOLITAS
- NEISES LEUCOCROTAS, ORTOLEPTINITAS, GRANITOS
- COMPLEJO GRANITO-NEISICO "DEL SAUCE" MICAESQUISTOS - ANFIBOLITAS - CALIZAS
- CONJUNTO NEISICO Y GRANITO INDIFERENCIADO
- MICROGRANITOS Y MICROGRANODIORITAS
- GRANITO CALCO ALCALINO A BIOTITA
- GRANITOS Y GRANODIORITAS HORNBLENDO - BIOTITICOS
- LEUCOGANITOS POTASICOS
- PRECAMBRICO MEDIO
- COMPLEJO INDIFERENCIADO GRANITOS, NEISES, MICAESQUISTOS ANFIBOLITAS Y LEPTINITAS
- MILONITAS, CATACLASITAS

SERIE DE MINAS

SERIE ZANJA DEL TIGRE

SERIE PAN DE AZUCAR

GRANITOS INTRUSIVOS

* (3) MINERALIZACION CON NUMERO DE FICHERO

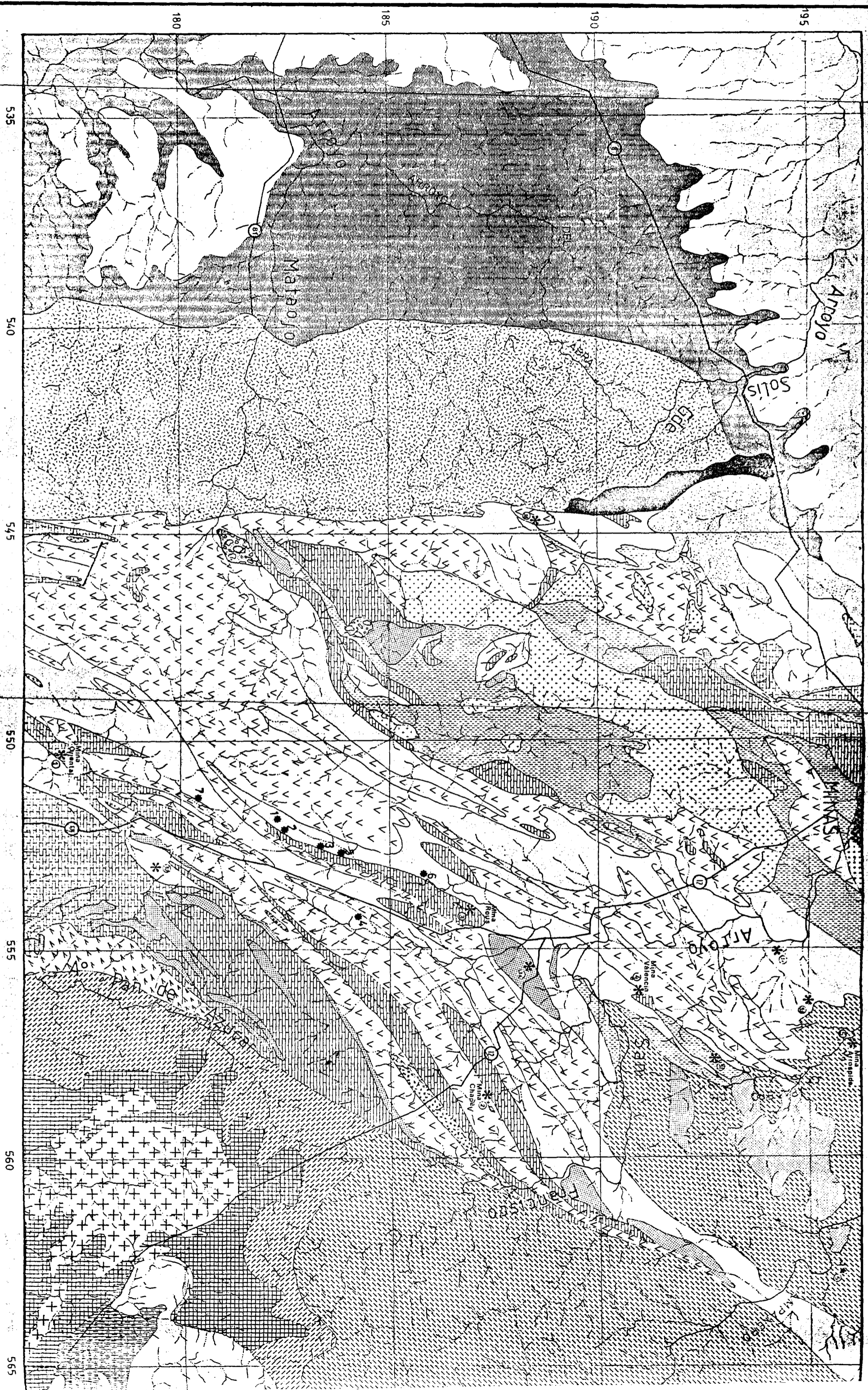
* (2) ANOMALIA RADIMETRICA, CON NUMERO DE FICHERO

5* Canteras de Piedra Laja

GEOLOGIA	GEOLOGOS DEL IIGU	PLANO
DIBUJO	ALICIA RISSO	
LETRA	1981	

Canteras de Piedra Laja

- 5
- 1: J. Gonzalez As. 85/71
- 2: J. Gonzalez As. 89/69
- 3: Libro Gigante As. 66/72
- 4: Ruffo Ltda As. 103/68
- 5: Lajas Uruguayas As. 244/75
- 6: F. Pereira As. 85/73
- 7: Ruffo Ltda As. 21/70



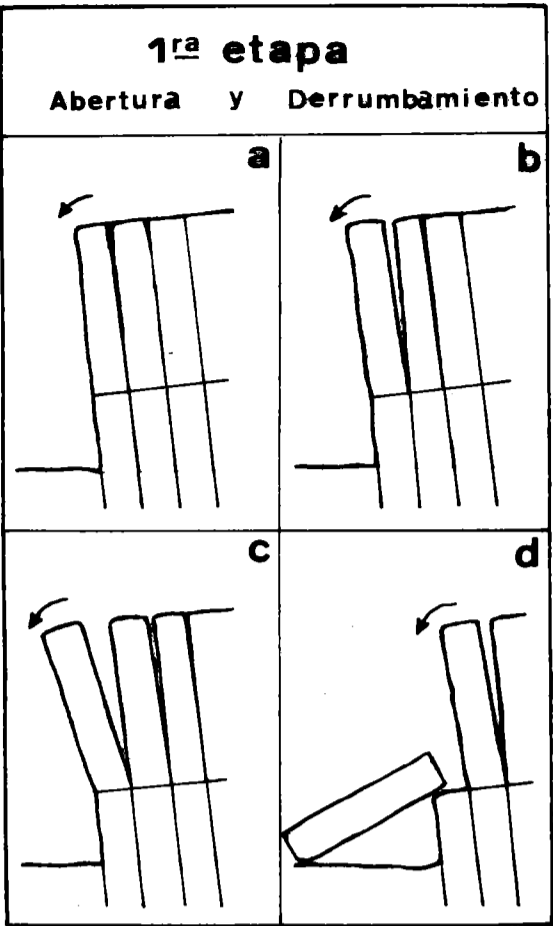
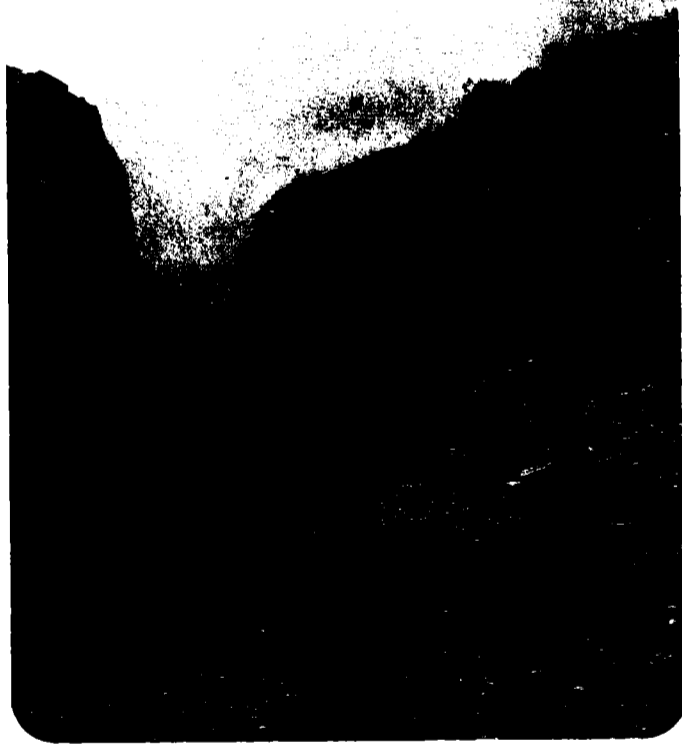


Figura I : Secuencia de la abertura y del derrumbamiento de la roca superficial.

Foto I : Fenómeno de cabeceo en la cantera de piedra laja de Jesús González As. N°85/71.



3. CINEMATICA DEL CABECEO.

El fenómeno observado en estas explotaciones de piedra laja es asimilable al cabeceo. Este, poco conocido, pero muy generalizado, se presenta en una configuración de rocas muy esquistosas presentando generalmente un buzamiento marcado hacia el interior del macizo.-

Definimos 3 etapas distintas, cada etapa será estudiada cinematicamente.-

Estas son sucesivamente:

- Abertura y derrumbamiento de las rocas superficiales (hojas o columnas).
- Formación de un apilado.
- Alteración y deslizamiento del apilado.

a. Primera etapa: Abertura y derrumbamiento de la roca superficial..

La ruptura de equilibrio estático del elemento rocoso, ocasiona la abertura de una fisura y la rotación del elemento hasta su derrumbamiento (figura 1). Un factor importante que influye positivamente en la rotación es la presión hidrostática en la fisura y la presencia de piedras jugando como empujador.- La alteración al nivel de la discontinuidad (esquistosidad) tiene poca importancia.

Este fenómeno de abertura se propaga a las otras hojas rocosas siguientes.

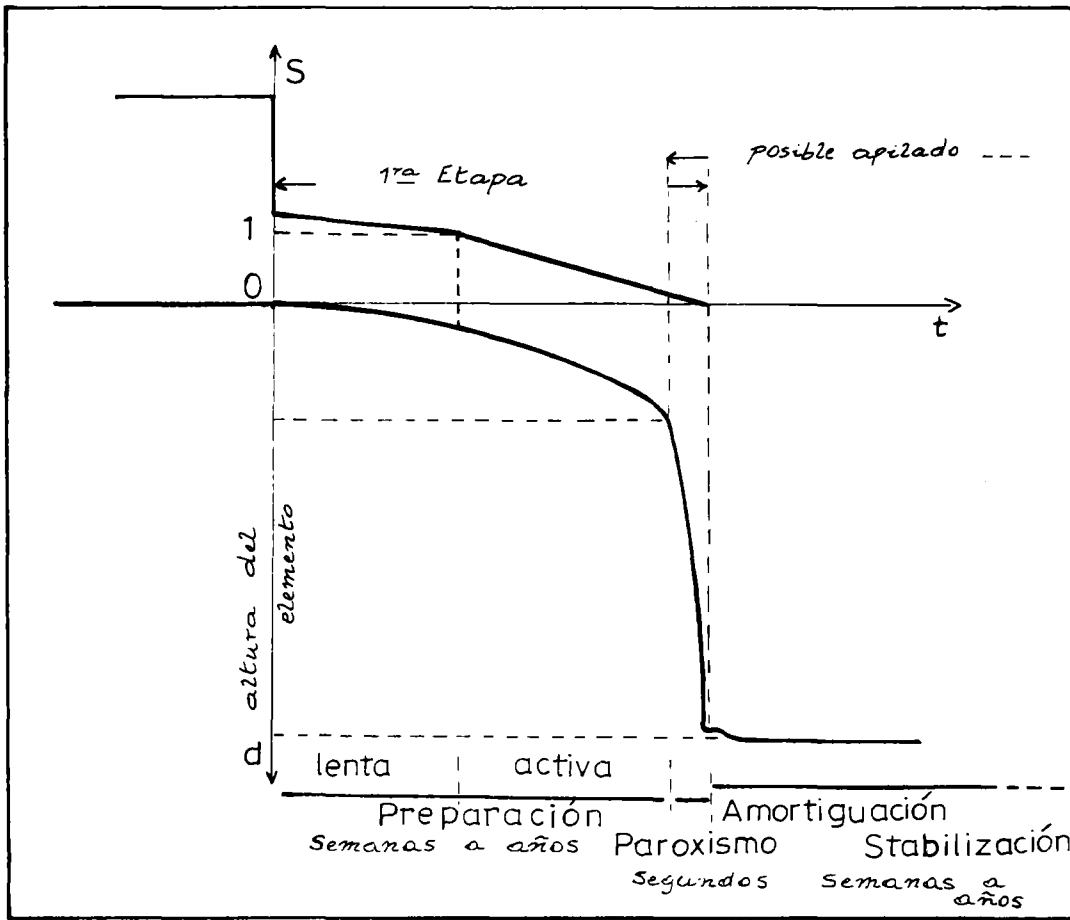


Figure 2 : Diagrama esquemático dinámico de la abertura de un elemento rocoso.

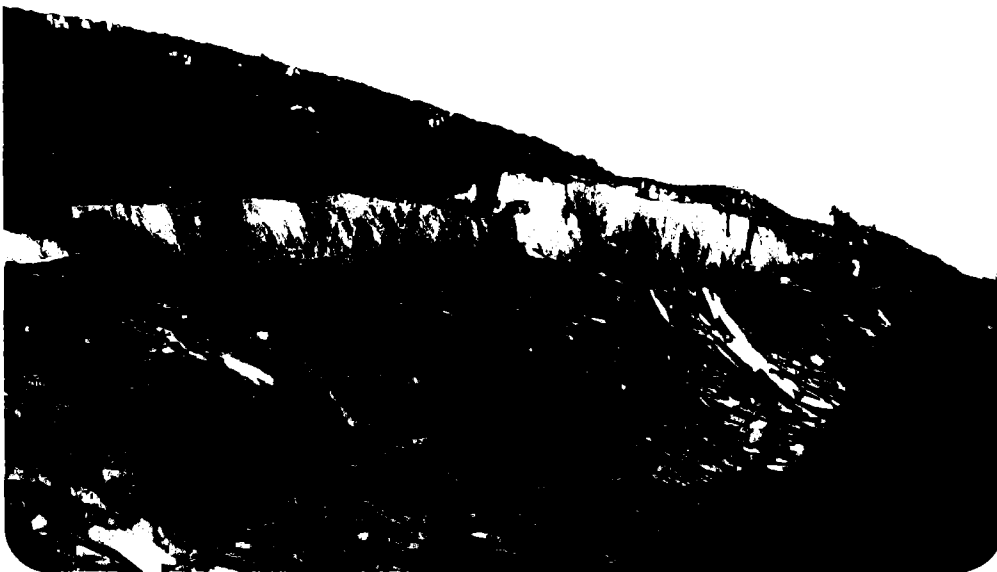


Foto 2 : Fenómeno de cabeceo en el primer piso de la cantera de Jesús González As. N°85/71.

Cada etapa será representada por un diagrama esquemático ilustrando la dinámica del movimiento de roca (figuras 2, 4 y 6).-

Las abscisas (groseramente a la escala logarítmica) tanto (+) o (-) representan el tiempo.-

Las ordenadas (+) representan el coeficiente de seguridad S, y las ordenadas (-) representan el desplazamiento de la cabeza del elemento rocoso o de una partícula de la masa afectada hacia abajo.-

Distinguimos 4 fases:

- preparación del fenómeno;
- paroxismo o crisis morfodinámica;
- amortiguación o "relajación";
- estabilización o "consolidación".

-Diagrama esquemático dinámico de la abertura (lra.etapa)

nota: el período de amortiguación y de estabilización corresponde a la posible formación de un apilado.

2ª etapa
Formación del apilado

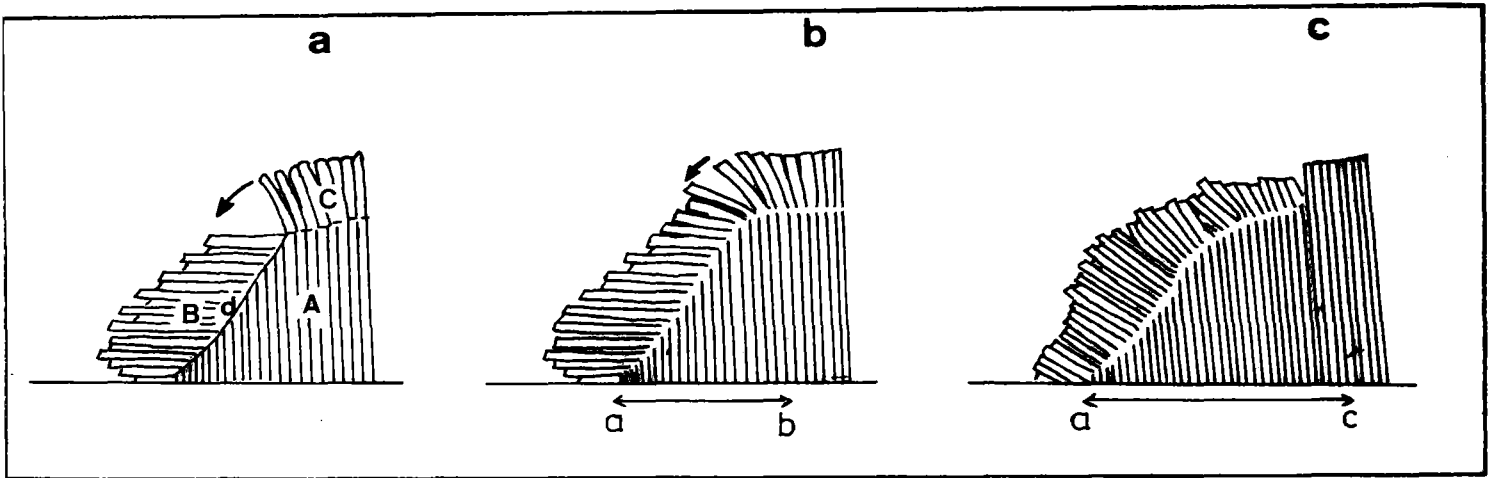


Figura 3 : Secuencia de la formación de un apilado por la repetición de la primera etapa.

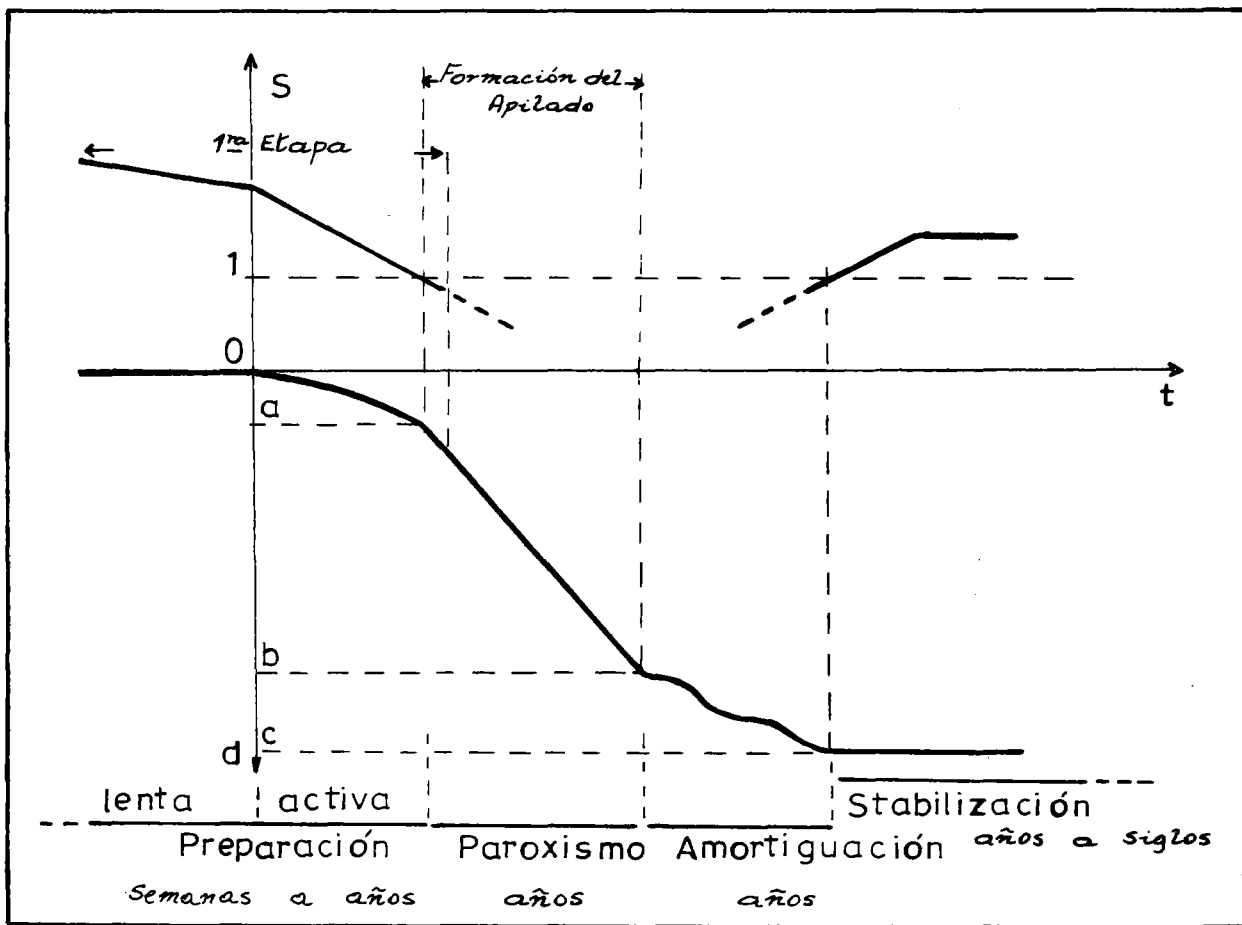


Figura 4 : Diagrama esquemático dinámico de la formación del apilado.

b. Segunda etapa: Formación de un apilado.

Los elementos rocosos derrumbados son totalmente desjuntados los unos de los otros y forman un apilado, este macizo es más estable que una pila de bloques echados en desorden. Podemos hablar de una albañilería del macizo. La ruptura de tal apilado se produce por la eliminación de una parte del sostén (la ruptura se trasmite progresivamente a una parte del macizo).-

La formación del apilado se realiza por la repetición de la primera etapa sobre las rocas superficiales.-

La figura 3 nos muestra la formación y la estabilización de éste.-

Algunas definiciones (figura 3a.)

A: macizo no herido por el cabeceo,

B: apilado de las hojas rocosas;

C: elementos superficiales sufriendo de abertura y después de derrumbamiento,

D: discontinuidad artificial constituída por el macizo de filita y el apilado.

El apilado puede ser formado por hojas horizontales (figura 3 a - b) o por hojas inclinadas (figura 3c).-

En el diagrama esquemático de la formación del apilado (figura 4), las ordenadas (-) representan el desplazamiento de la abertura a través del yacimiento de filita.-



Foto 3 : Deslizamientos de apilados en una cantera del Libro Gigante As. Nº 66/72.

3 etapa
DESPLAZAMIENTO

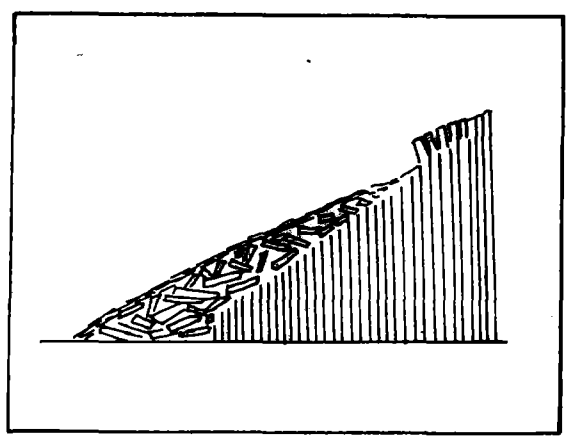


Figura 5 : Deslizamiento de un apilado.

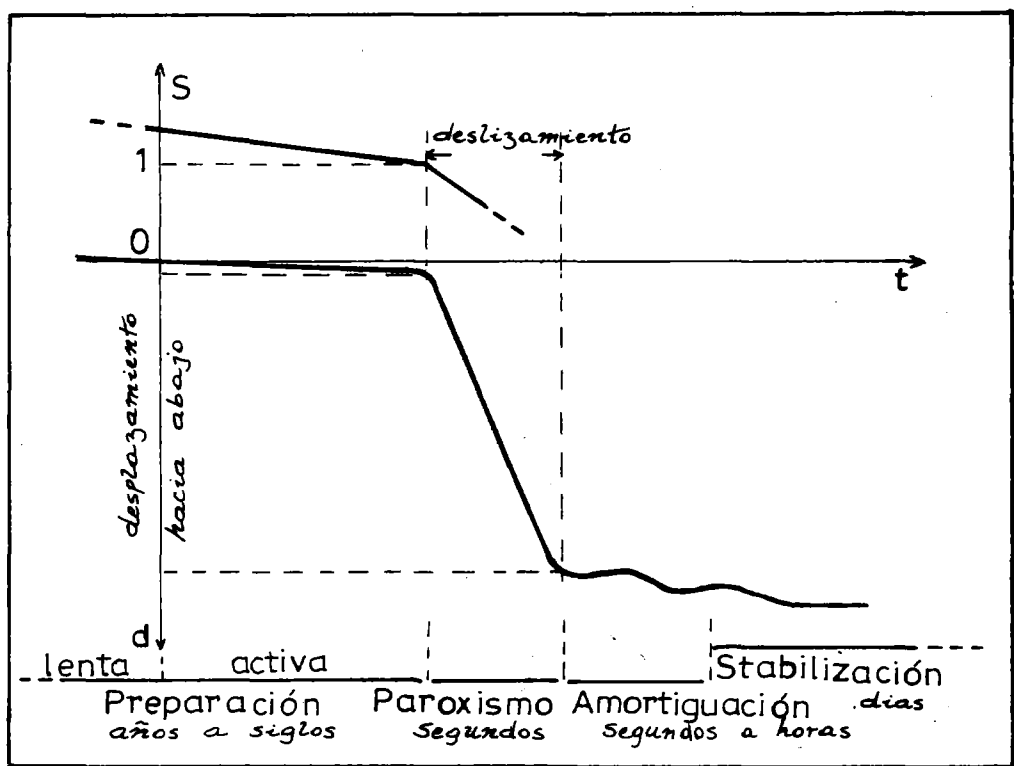


Figura 6 : Diagrama esquemático dinámico del deslizamiento de un apilado.

C. Tercera etapa: Alteración y Deslizamiento del Apilado.

Los fenómenos de meteorización de estas filitas están principalmente causados por la disolución del carbonato y la pérdida de cohesión entre los minerales filitosos componentes: sericita, clorita.

En el anexo, están los resultados de los análisis efectuados en los laboratorios de la DI. NA. MI. GE.

La alteración afecta principalmente el área separando el apilado del macizo de filita. El deslizamiento se produce en el área de la discontinuidad artificial, aproximativamente plana.

Este macizo (apilado), de un punto de vista mecánico puede ser asimilado a un medio pulverulento con un ángulo de fricción interno importante, por el hecho de existir un cierto orden en el arreglo de las hojas. Los deslizamientos que se producen, son de tipo pulverulento, cuando el talud es importante y superior a 60 - 65°.

Estos deslizamientos se acompañan de un esponjamiento importante. Las figuras 5 y 6 ilustran respectivamente el deslizamiento y la cinética del apilado.

Blocometría:

La blocometría es diferente según las distintas etapas.

La primera afecta solamente a los elementos morfológicos de la roca superficial, pudiéndose hablar de metros cúbicos. Estos elementos son hojas finas que poseen una longitud y una altura dadas en mts. y un espesor dado en decímetros.

La segunda y la tercera afectan macizos importantes de varias decenas a centenas de metros cúbicos. La propagación y la trayectoria de estas rupturas resultan de fácil determinación.

NOTA: En numerosos casos, solo la primera etapa se desarrolla en totalidad o con abertura y sin derrumbamiento, sin nunca llegar a la formación de un apilado.

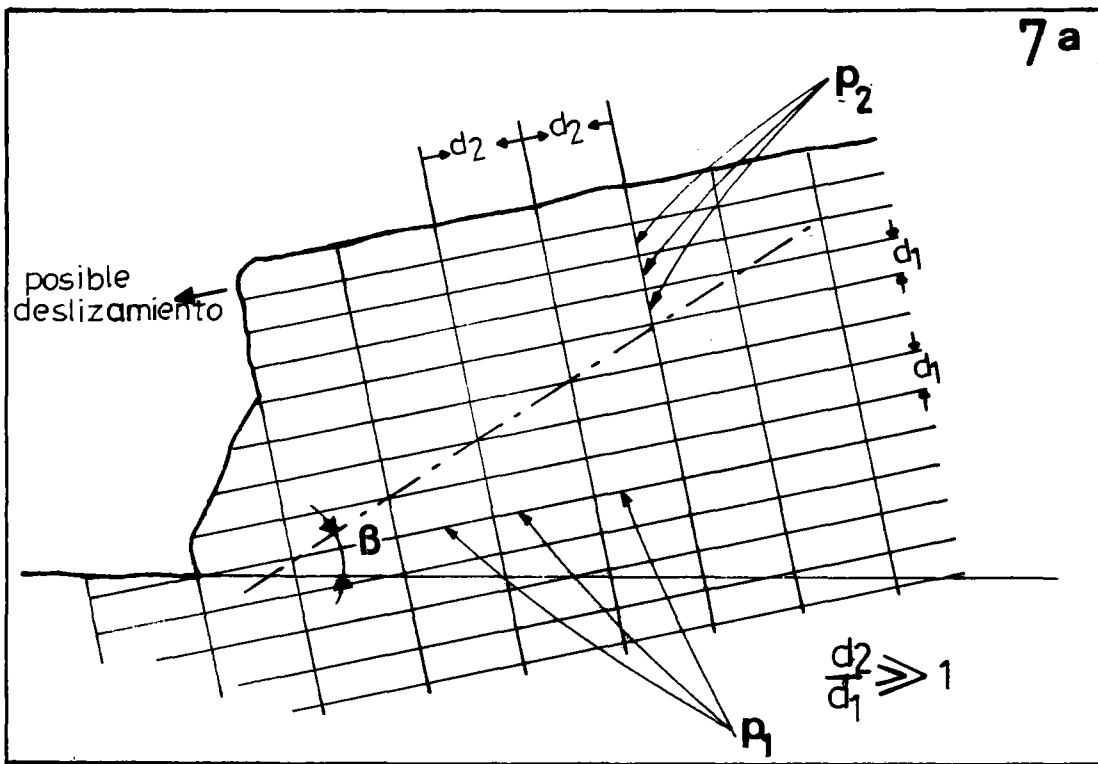


Foto 4 : Cantera Lajas Uruguayas S.A. As. N°244/75.

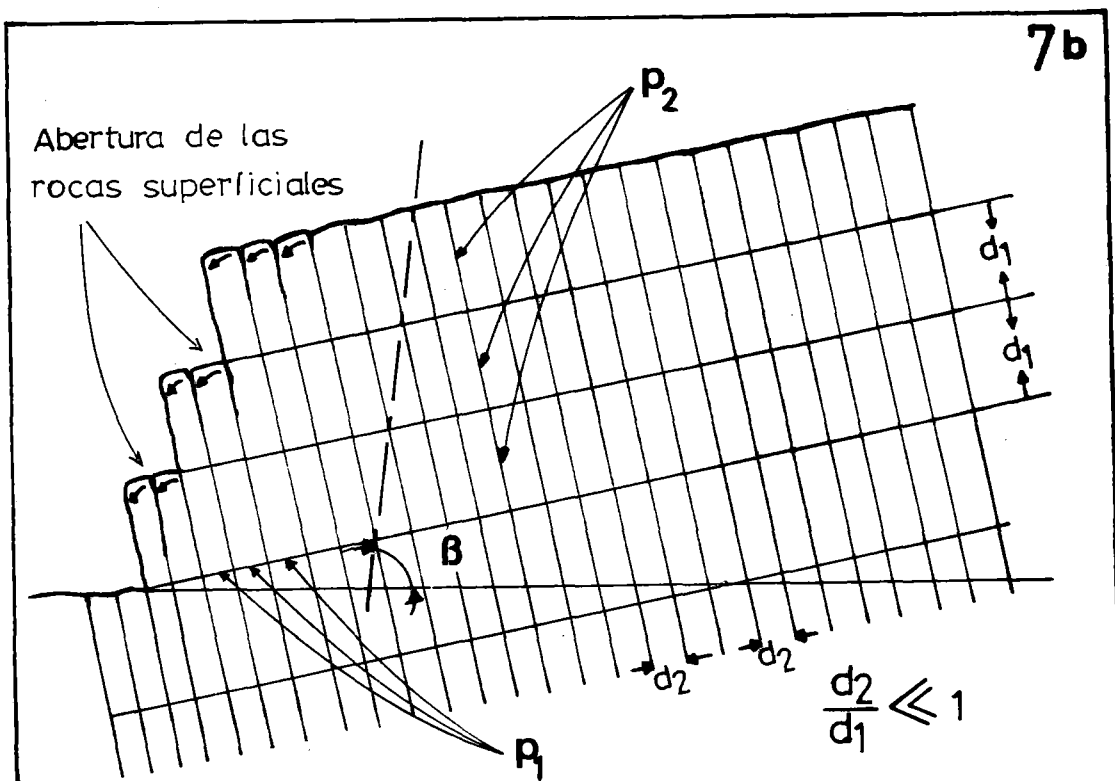


Figura 7 : Efecto del espacio entre las discontinuidades sobre el tipo de ruptura.

4 . ESTUDIO DE LA RUPTURA POR ABERTURA .

Dos mecanismos principales de ruptura fueron observados:

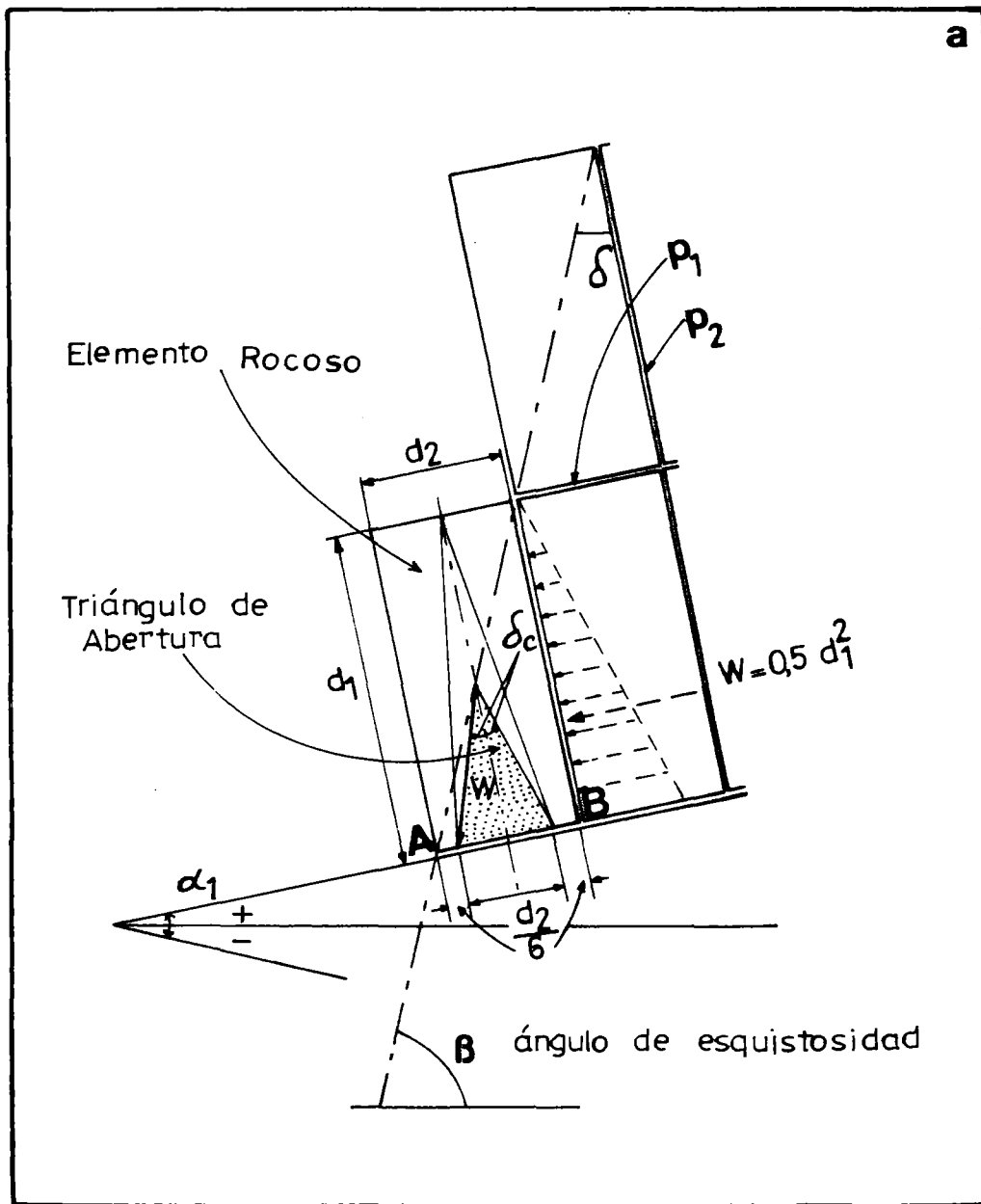
- la abertura y el derrumbamiento de las hojas de roca sana o poco alterada, fenómeno activado por las presiones hidrostáticas;
- el deslizamiento posterior del apilado constituido por el Cabeceo o de una parte de los taludes verticales, consecuencia de una alteración importante debida a las aguas de infiltración y de circulación.

El mecanismo del cabeceo de rocas esquistosas empieza por la abertura de la roca superficial hacia el exterior del macizo.

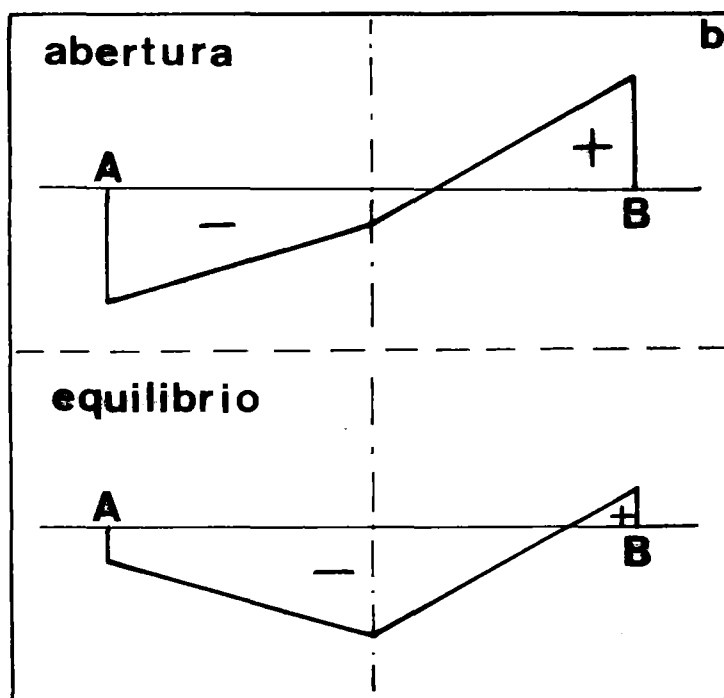
La ruptura por cizallamiento en los planos p_1 no puede tener lugar primero. La presencia de rocas muy esquistosas subverticales nos da una ruptura por abertura de los elementos rocosos superficiales según los planos p_2 .

La figura 7 ilustra con un ejemplo simple el efecto del espacio entre las discontinuidades, introduciendo la relación $d_2 / d_1 \ll 1$ dan superficies de talud peligrosas, particularmente para un ángulo de esquistosidad $\beta \geq 60$ grados.

Este mecanismo de ruptura por rotación se trasmite a través del macizo.



$S=1,5$
$\tan \delta_c = \frac{2}{3} \frac{d_2}{d_1}$
$\tan \delta = \frac{d_2}{d_1}$
$\beta = 90 + \alpha_1 - \delta$



Momentos dinámicos

Figura 8 : Abertura de las rocas superficiales - estudio a 2 dimensiones .

a. Estudio a 2 dimensiones de la abertura de las rocas superficiales subverticales.

La figura 8 nos presenta el concepto analítico en condición plana. Nos muestra un sistema ortogonal de discontinuidades p_1 y p_2 . El estudio de estabilidad límite contra la rotación de un elemento o de un subsistema rocoso cuadrilátero definido por p_1 y p_2 determina el coeficiente de seguridad S como la relación entre el momento de equilibrio y el momento de rotación:

$$S = \cotg \alpha_1 \cdot d_2 / d_1$$

Tomando un coeficiente de seguridad $S = 1,5$ (Terzaghi y Hansen) [4] se ve que si la resultante (peso o peso y presión hidrostática) es al interior de un triángulo formado por el centro geométrico del elemento cuadrilátero como cúspide y como base, los dos terceros del espaciamiento de las discontinuidades d_2 , este elemento es estable.

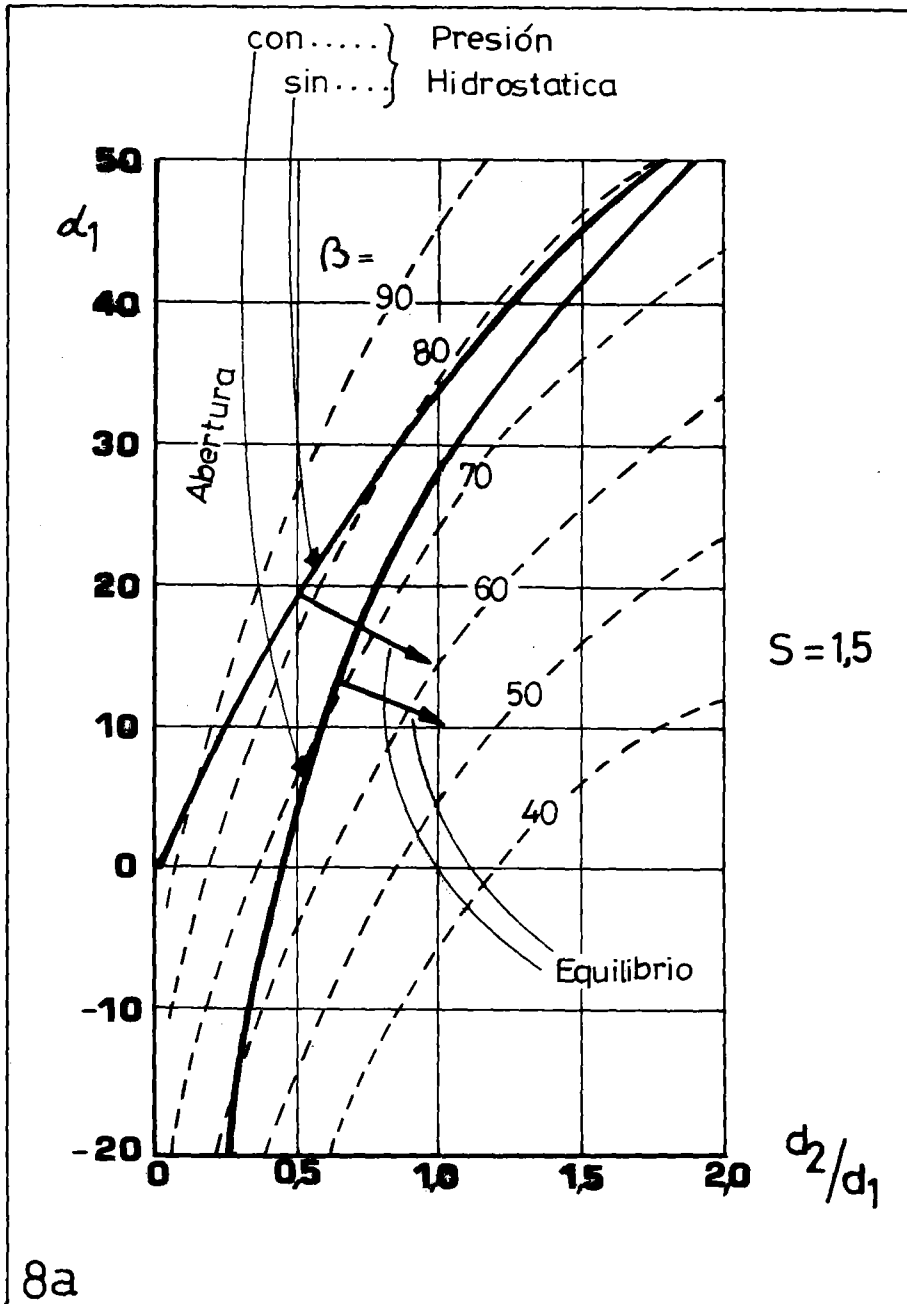
El ángulo crítico δ_c de este triángulo es dado por

$$\tg \delta_c = \frac{2}{3} d_2 / d_1$$

donde d_1 y d_2 son los espaciamientos medios de las familias de discontinuidades p_1 y p_2 .

La figura 8b representa la resultante de los momentos dinámicos actuando a lo largo de AB.

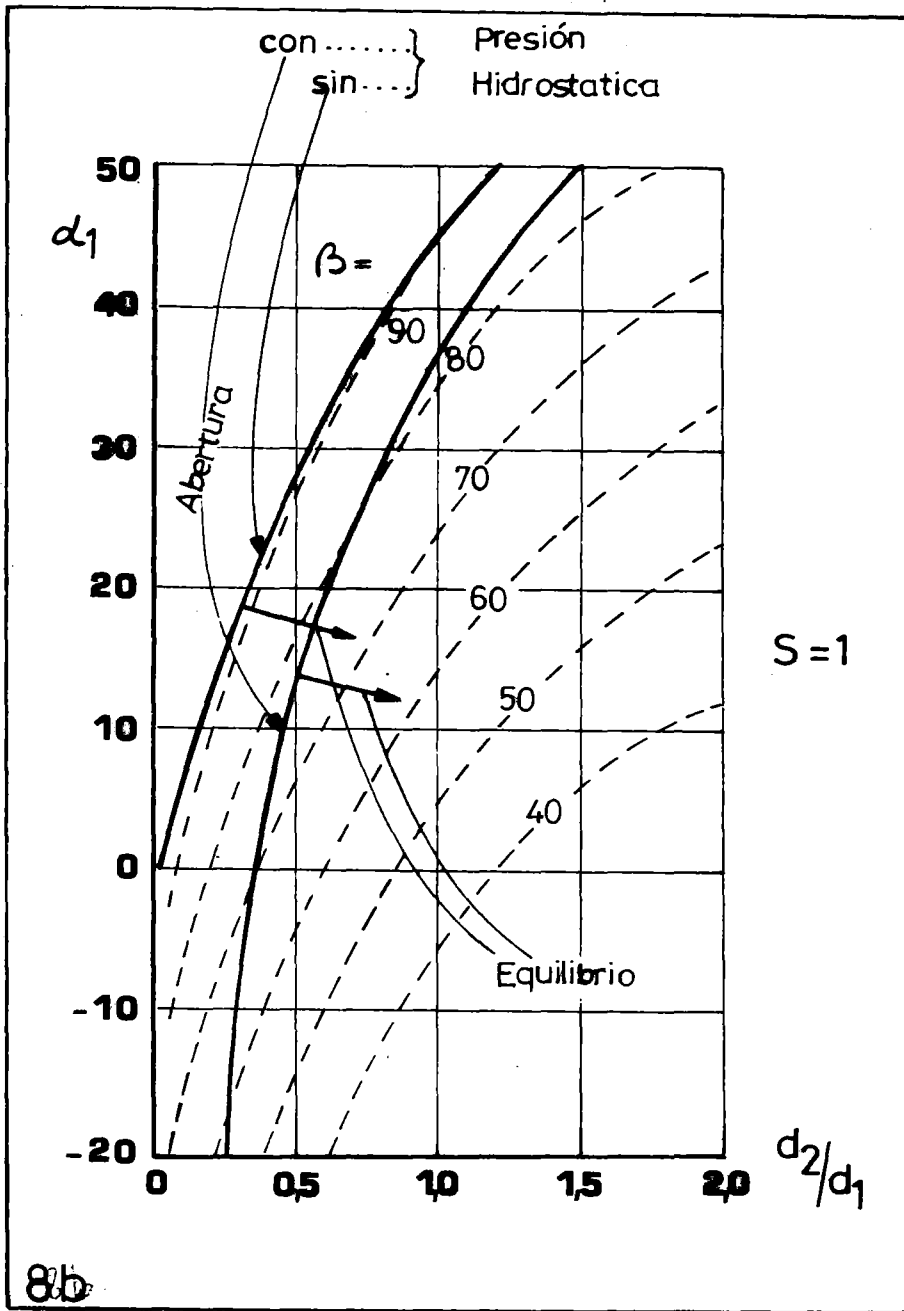
Nota : Otros criterios contra la abertura pueden ser también tomados.



Gráfica I .

La gráfica N^o 1 está basada según el criterio de estabilidad enunciado anteriormente. Este nos muestra que para bancos u hojas subverticales, con $d_2 / d_1 \leq 0,5$, con planos p_1 subhorizontales, teniendo en cuenta que el buzamiento está marcado hacia el exterior del macizo, una ruptura superficial por abertura en presencia de agua puede ocurrir.

La acción de la presión hidrostática actuando perpendicularmente a la discontinuidad p_2 , agrava mucho el fenómeno. En esta gráfica, los taludes con $\beta \geq 60^\circ$ son afectados.



Gráfica 2 .

La gráfica Nº 2 fué realizada tomando un coeficiente de seguridad $S = 1$. También se nota la importancia decisiva de la presión hidrostática.

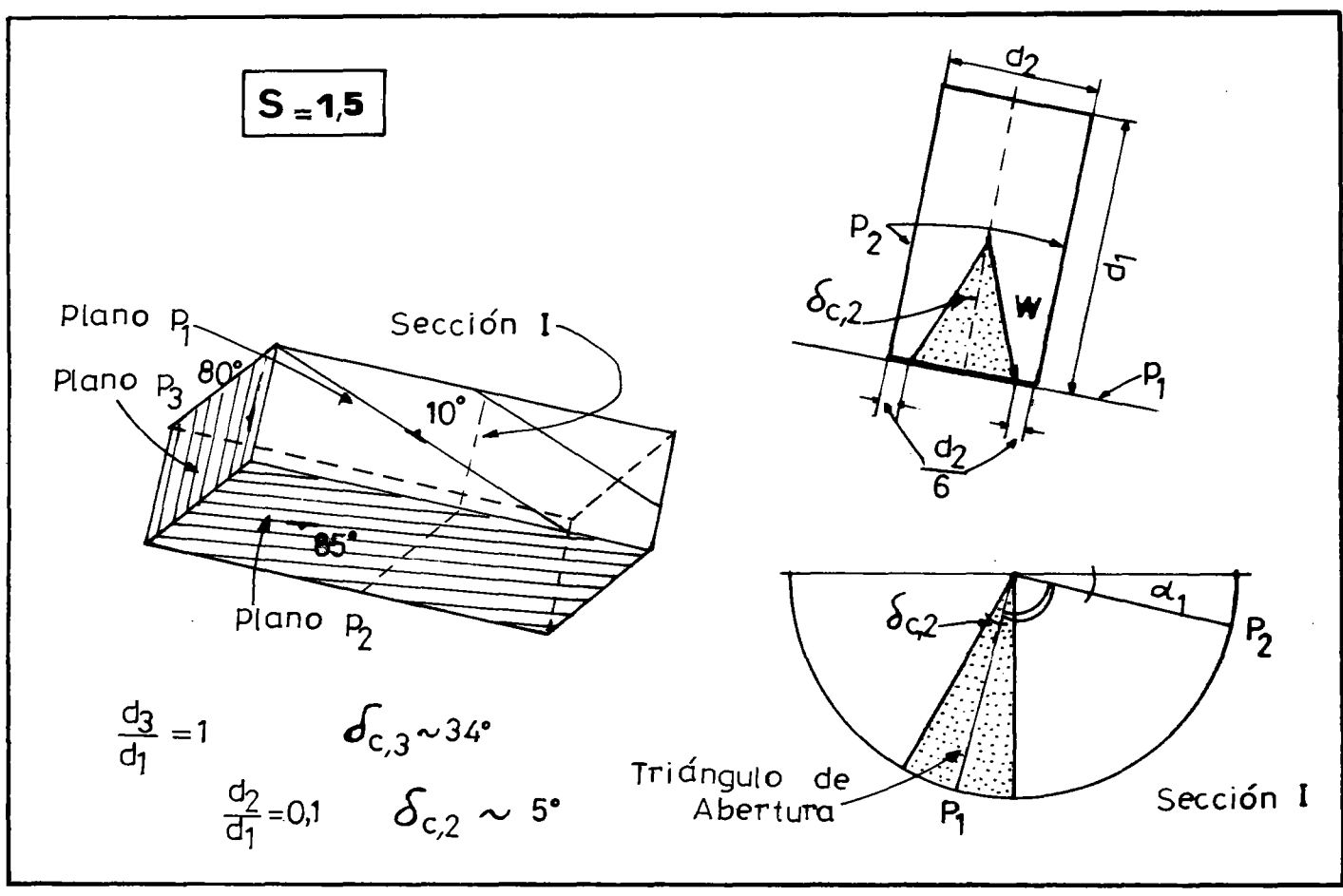
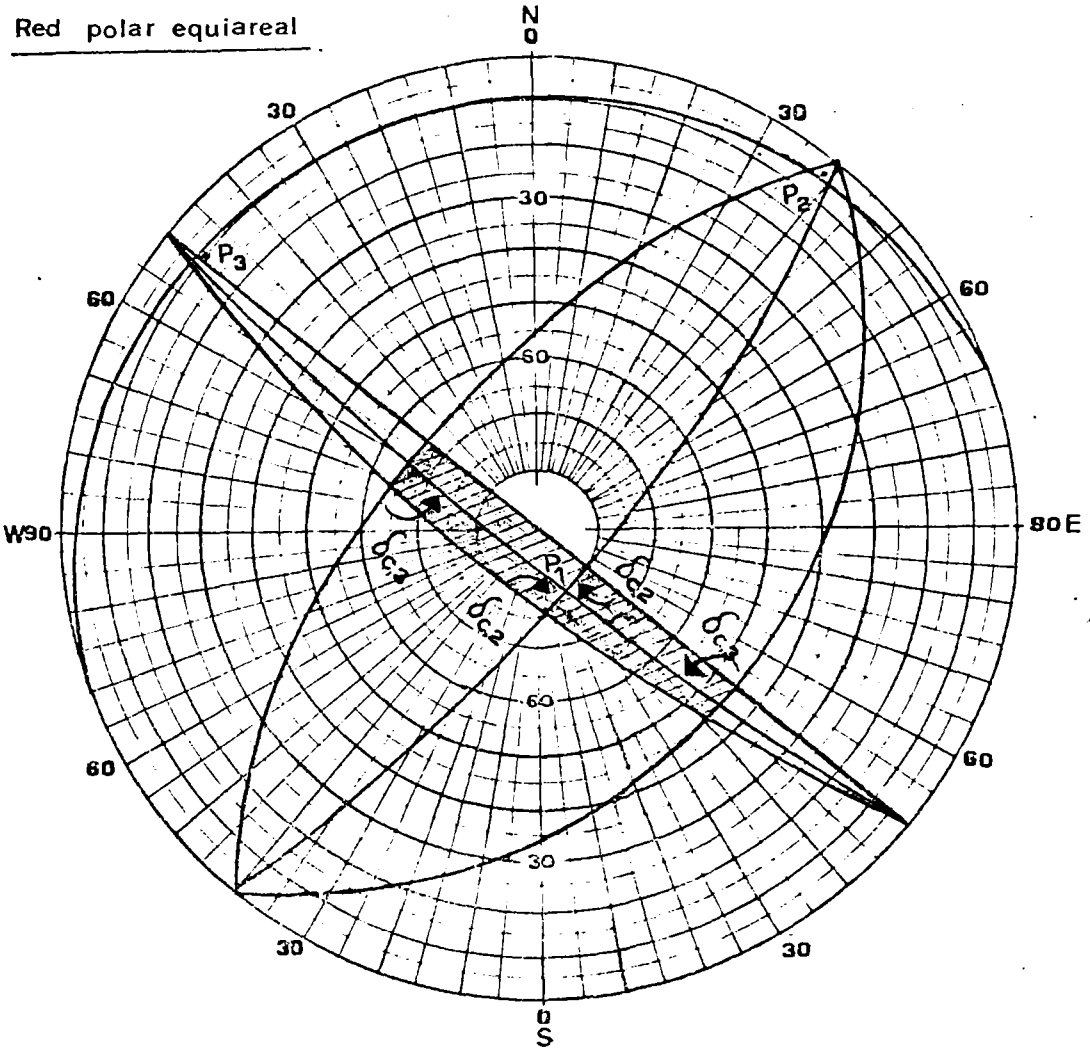


Figura 9 : Abertura de las rocas superficiales - estudio a 3 dimensiones .

b. Estudio a 3 dimensiones de la abertura de las rocas superficiales subverticales.

La figura 9 representa el análisis del problema a 3 dimensiones en una explotación a cielo abierto.

El hemisferio de referencia muestra los tres polos de un sistema ortogonal de discontinuidades (sistema determinado por las direcciones principales medias de las 3 familias : p_1 N 70 E 10° p. NW; p_2 N 50 W 85° p. SW ; p_3 N 40 E 80° p. SE).

El área rectangular alrededor del polo p_1 representa la zona de seguridad en el frente de la abertura. Esta área es formada por trazas de los dos conos de abertura sobre la superficie del hemisferio de referencia, con F_1 dando la dirección de su eje común ($S = 1,5$)

Cualquier dirección de fuerza (representando el peso o el peso y las presiones hidrostáticas) cayendo en esta zona no da una abertura. Los conos son definidos por los ángulos críticos δ_c con respecto al polo p_1

Del hemisferio podemos deducir los puntos siguientes:

- el peso del elemento rocoso que tiene una dirección a través del centro del hemisferio, cae en el límite de la zona de seguridad.

La abertura se produce según el eje formado por los planos p_1 y p_2 .

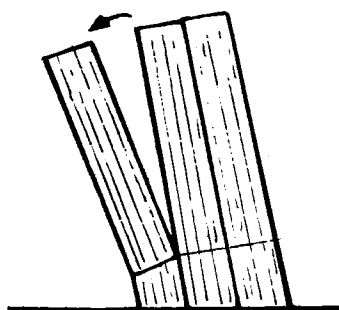
- Las superficies libres, naturales o artificiales de dirección NW-SE y de inclinación hacia el NE pueden ser afectadas por el mecanismo de abertura.
- Debido a la geometría de los elementos rocosos, la abertura según el eje formado por p_1 y p_3 es prácticamente excluida.

5. CONCLUSIONES.

- En la medida de lo posible, las canteras de piedra laja deberán ser abiertas por la parte en que la laja se presenta en inclinación positiva, en efecto tal frente no sufre de ningún problema de abertura de sus elementos superficiales.
- Si una explotación no puede realizarse de esta manera, la elección de la altura de banco (ofreciendo seguridad) y del número de terrazas, se hará después de un estudio estructural definiendo las familias de discontinuidades y el espacio entre ellas. Se deberá utilizar los métodos de estudio a 2 o 3 dimensiones anteriormente mencionados (la altura del frente definirá el espacio d_1).
Esta teoría será el objeto de una aplicación en las canteras de piedra laja (segunda parte).
- La presión hidrostática provocada por las aguas de lluvia es el factor primordial de la abertura de las rocas, esta será eliminada por un drenaje adecuado.
- La elección del coeficiente de seguridad S dependerá de las condiciones topográficas;
 - una topografía desfavorable (terrenos sobreimpuestos); $S = 1,5$
 - una topografía favorable; $S = 1$
- El deslizamiento del apilado se desarrolla a continuación de una alteración larga y tal fenómeno debe ser vigilado.

Segunda Parte

Derrumbamiento por Abertura de la Piedra Laja en las canteras del departamento de Lavalleja.



GUSBIN J-C

Junio 84

Montevideo

DI.NA.MI.GE.



Foto 5 : Cabeceo en la cantera de piedra
laja - Libro Gigante As. Nº66/72.

6. ESTUDIO ESTRUCTURAL.

Todas las canteras de Piedra Laja visitadas fueron el objeto de un estudio estructural, habiéndose confeccionado un diagrama estructural, densidad de polos de esquistidad y diaclasas (figuras 10 a, b, c y d).

La presencia de bancos subverticales y la influencia importante de su buzamiento sobre la estabilidad necesitaban la medición precisa de su buzamiento. Las mediciones de este se realizaron con el clinómetro de la Brunton Pöchet Transit a falta de clinómetro más preciso.

La determinación del porcentaje de densidades de los polos se efectuó con la ayuda de 4 redes contadoras circulares representadas en el anexo A₃. Gracias a éstas, el trabajo se hizo más fácil y rápido.

En el anexo A₂, se presenta una nueva utilización de la red polar equiareal para la representación estructural y el cálculo de estabilidad.

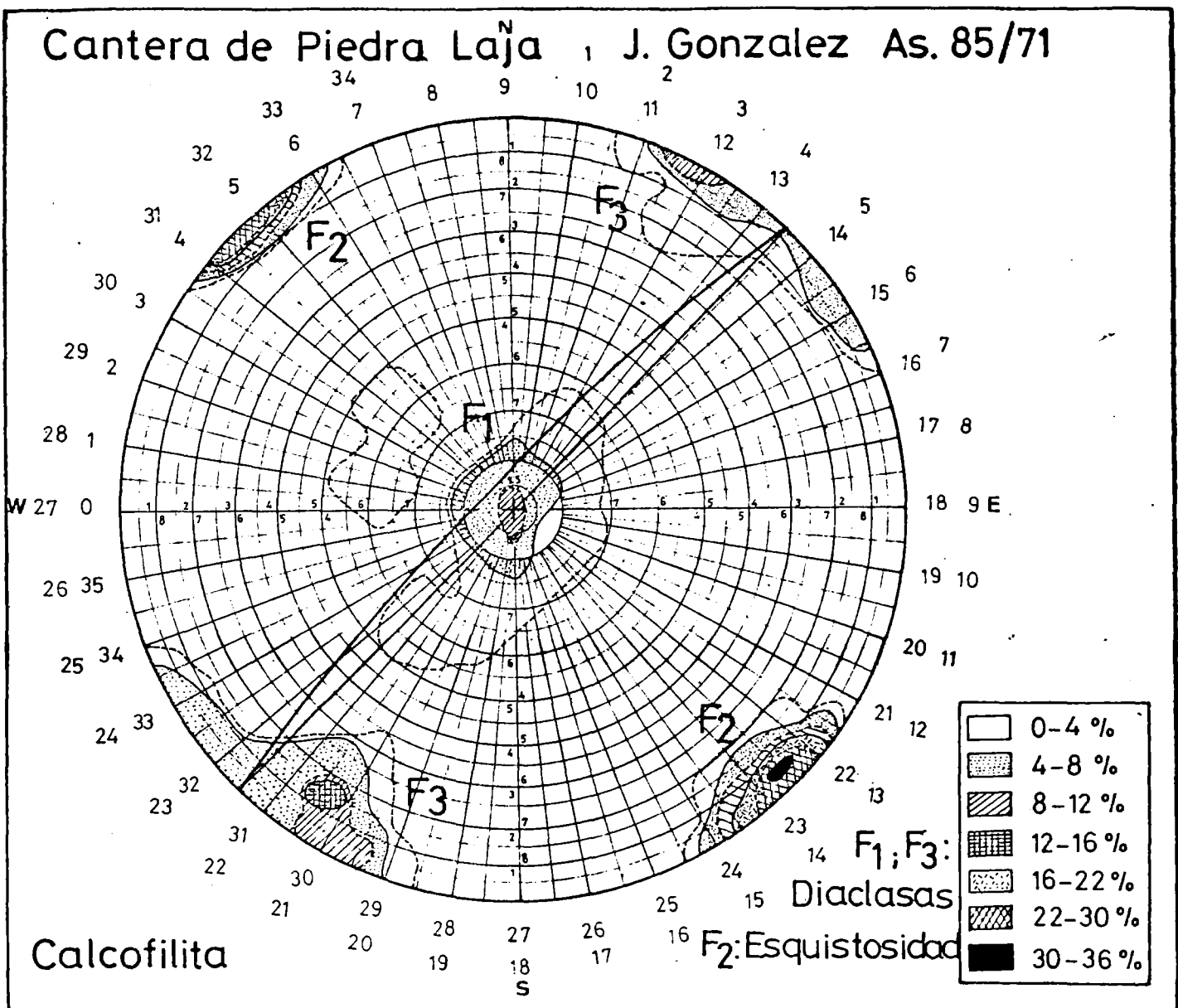


Figura 10 a : Diagrama estructural de la cantera de Piedra Laja J.González As.Nº 85/71.

(Diagrama de Schmidt, semi esfera inferior)

El semicírculo representa el plano del frente de trabajo subvertical, determinado por el plano medio de esquistosidad representado por la nube de polos F₂.

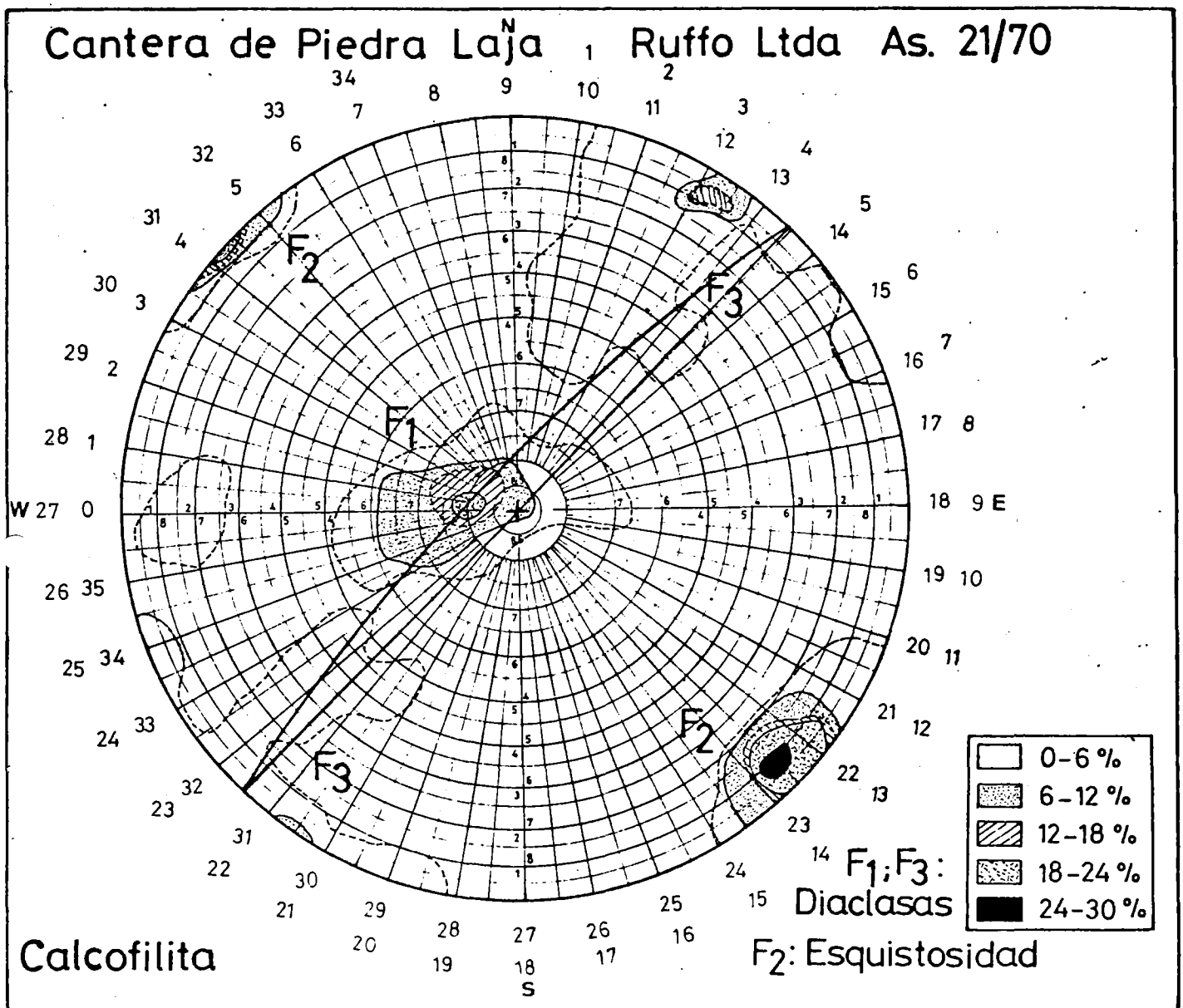


Figura 10 b: Diagrama estructural de la cantera de Piedra Laja de Ruffo Ltda. As. Nº 21/70.

(Diagrama de Schmidt, semi esfera inferior)

El semicírculo representa el plano del frente de trabajo subvertical, determinado por el plano medio de esquistosidad representado por la nube de polos F₂.

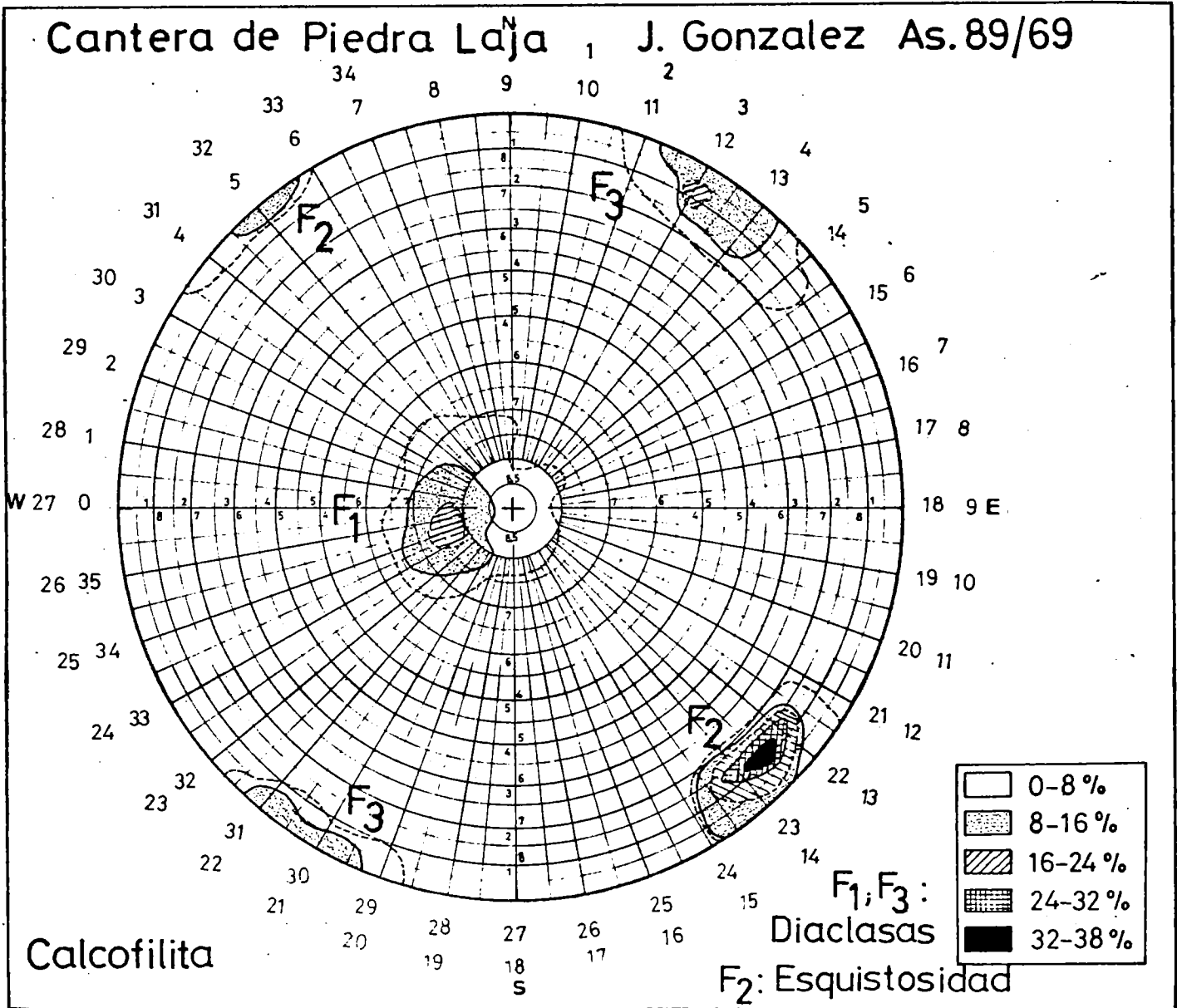


Figura 10 d : Diagrama estructural de la cantera de Piedra Laja J. González As. Nº 89/69.
(Diagrama de Schmidt, semi esfera inferior).

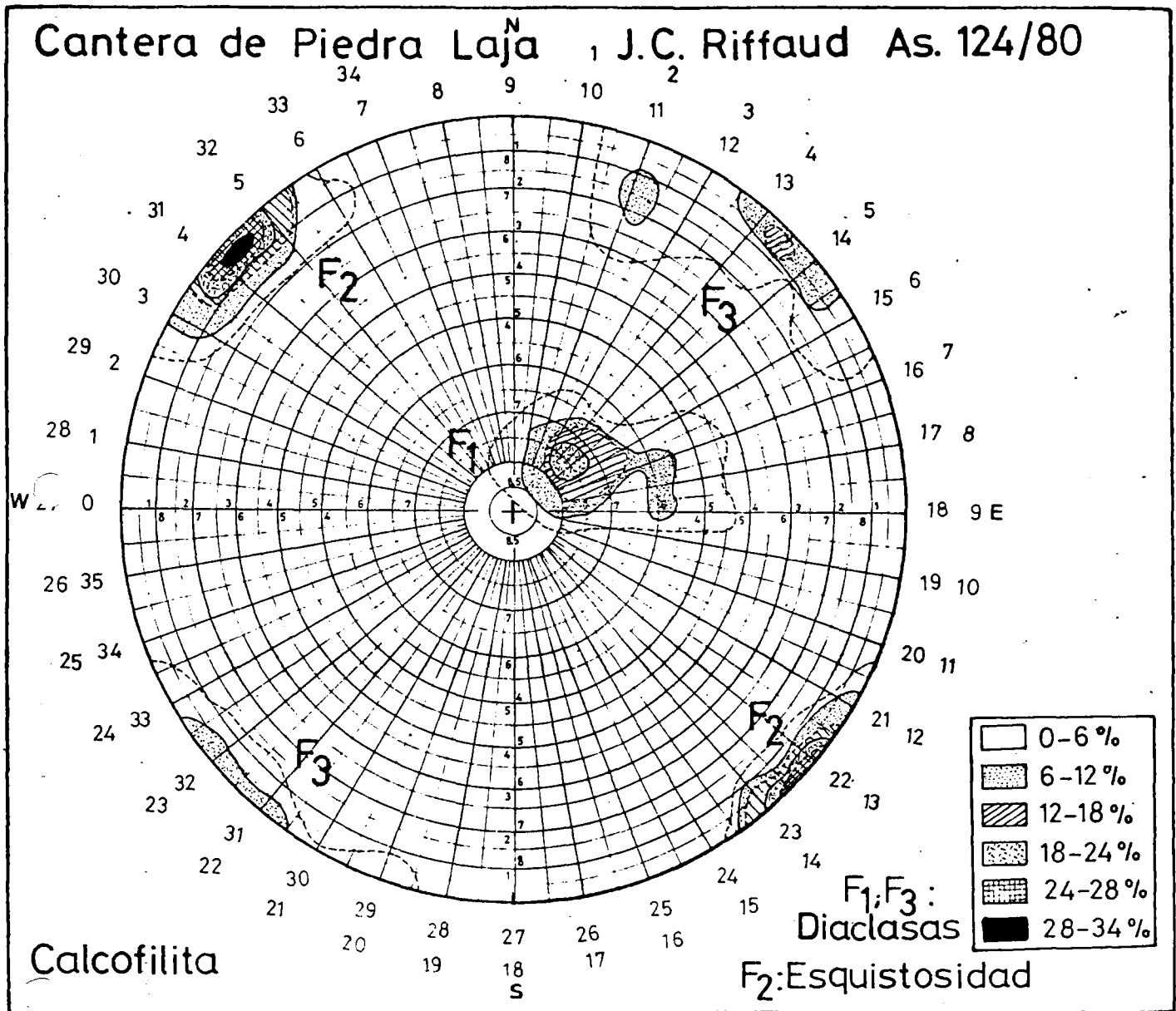


Figura 10 c : Diagrama estructural de la cantera de Piedra Laja J.C. Riffaud As. Nº 124/80.

(Diagrama de Schmidt, semi esfera inferior).

7. ESTUDIO A 2 DIMENSIONES DE LA ABERTURA.

(Construcción de la curva de estabilidad)

Este estudio a dos dimensiones consistió en la construcción de la curva real de estabilidad en relación a la esquistosidad y buzamiento de la roca. La esquistosidad ($\frac{d_2}{d_1}$) caracterizada por la relación entre los espaciamentos medios de las familias de discontinuidades p_1, p_2 y el buzamiento de la roca superficial caracterizado por el ángulo α_1 (Ver "Estudio del cabeceo en las canteras de Piedra Laja del departamento de Lavalleja" p.21).

Para estas dos variables, fué realizado un muestreo importante en las canteras, permitiendo asimilar cada distribución de medidas (esquistosidad y buzamiento) a una ley Gaussiana $N(m, \sigma)$, caracterizándola por su media (m) y su desviación standard (σ). (Ver Anexo A4).

En el diagrama de esquistosidades y buzamientos representamos la situación (derrumbe o estabilidad) de las canteras o de un lugar particular en estas por pequeños rectángulos caracterizados por la media y la desviación standard de la variable.

Trazamos la curva de estabilidad y esta corresponde a la curva teórica de coeficiente de seguridad teórica $S = 0,55$. Esta diferencia importante proviene de la no consideración de la cohesión en las discontinuidades p_1 y p_2 , y de la resistencia a la compresión en p_1 en el estudio teórico de la abertura de las rocas superficiales. El trazo de la curva de estabilidad se efectuó de tal manera que ella no corte las zonas de abertura.

Esta nueva curva representará desde ahora, la curva de estabilidad real a la cual se da el coeficiente de seguridad real $(C_s) = 1$.

El coeficiente de seguridad efectivo de cada cantera o zona de esta podrá ser calculado tomando esta curva como referencia, se hizo el cálculo para las canteras de F.Carince ($C_s = 2,2$) y J.Riffaud ($C_s = 3,2$).

8. ESTUDIO A 3 DIMENSIONES DE LA ABERTURA.

Un estudio a 3 dimensiones fué efectuado en las canteras de Piedra Laja J.C.Riffaud As.124/80 y J. González As.89/69 (Ver figuras 11 a y b).-

Las direcciones principales medias de las familias de discontinuidades (esquistosidad y diaclasas) fueron determinadas a partir de los diagramas de polos (figuras 10c y d). El área rectangular sombreado con trazos representa la zona de seguridad con relación a la abertura; cualquier dirección de fuerza (representando el peso o este y las presiones hidrostáticas u otra fuerza suplementaria) que caiga en esta zona no da abertura, ni derrumbe.

En la cantera J.González As.89/69, solo el peso de la roca ocasiona la abertura de ésta. En la cantera J.C.Riffaud As, 124/80, el contrario, la roca estable puede resistir a presiones hidrostáticas o/y a una pequeña fuerza de empuje.

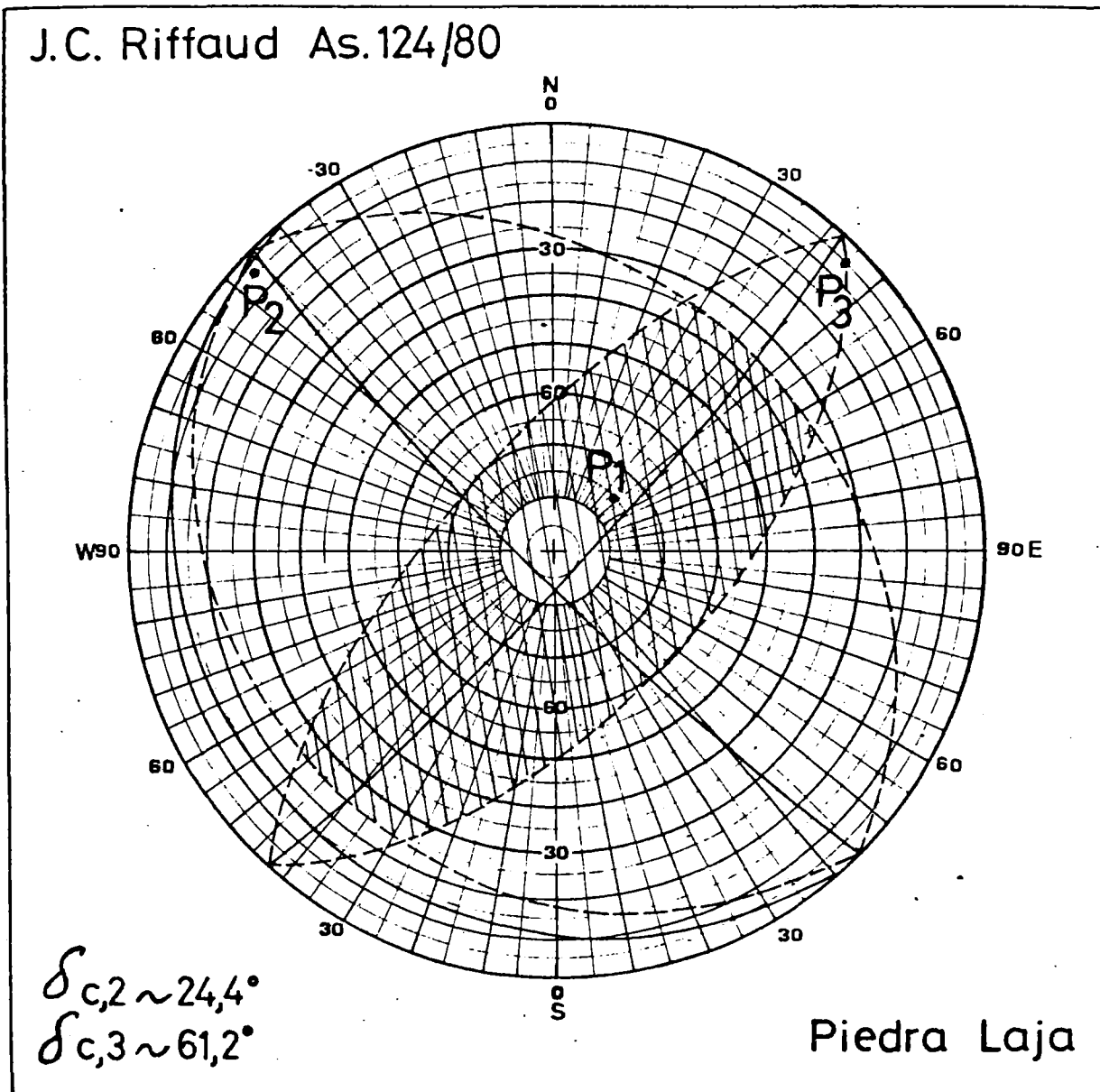


Figura 11a : Estudio a 3 dimensiones de la abertura de la Piedra Laja en la cantera de J.C.Riffaud As.Nº 124/80.

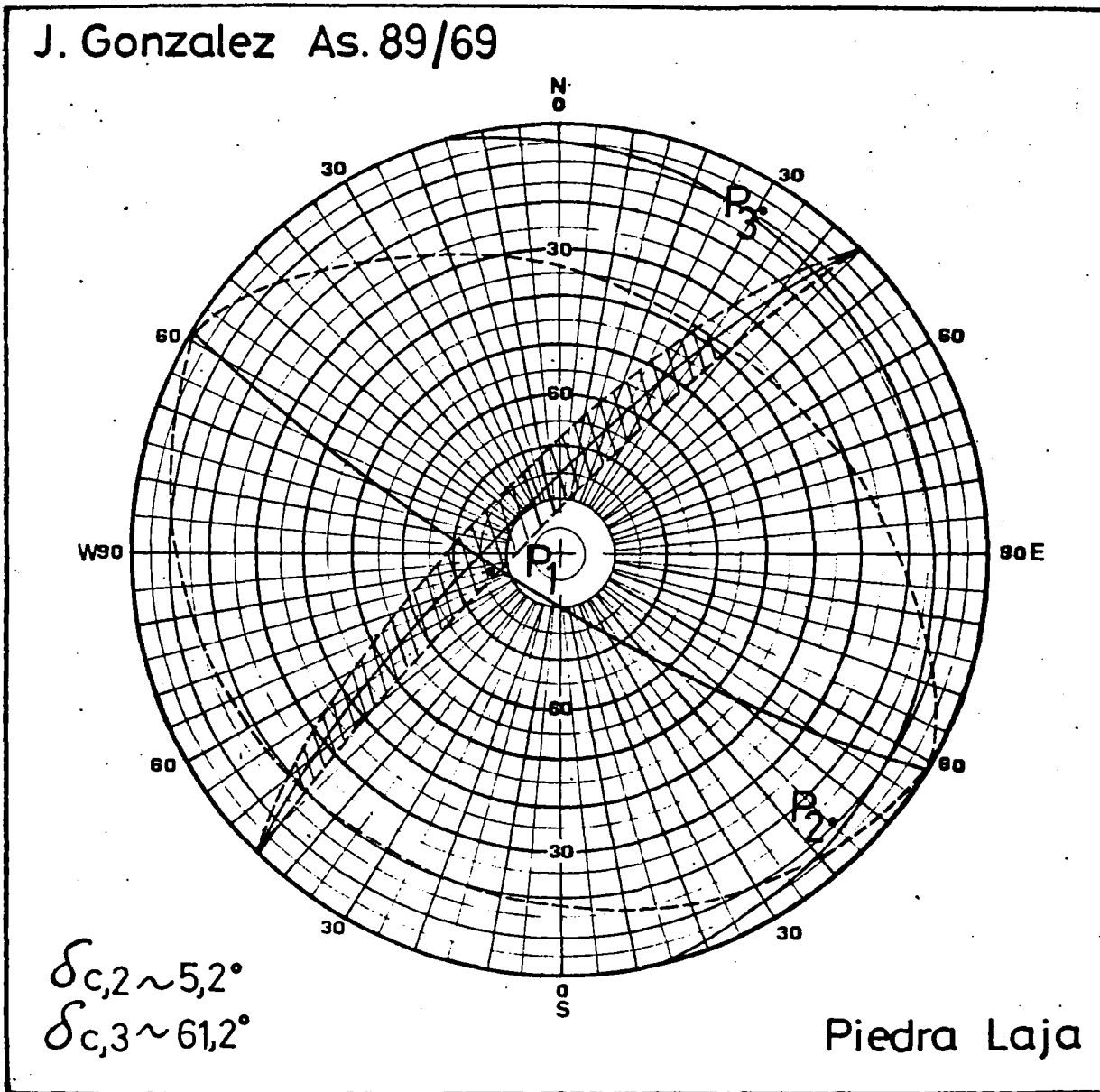


Figure 11 b : Estudio a 3 dimensiones de la abertura de la Piedra Laja en la cantera de J.González As. Nº 89/969.

Fig.12 División en clases.

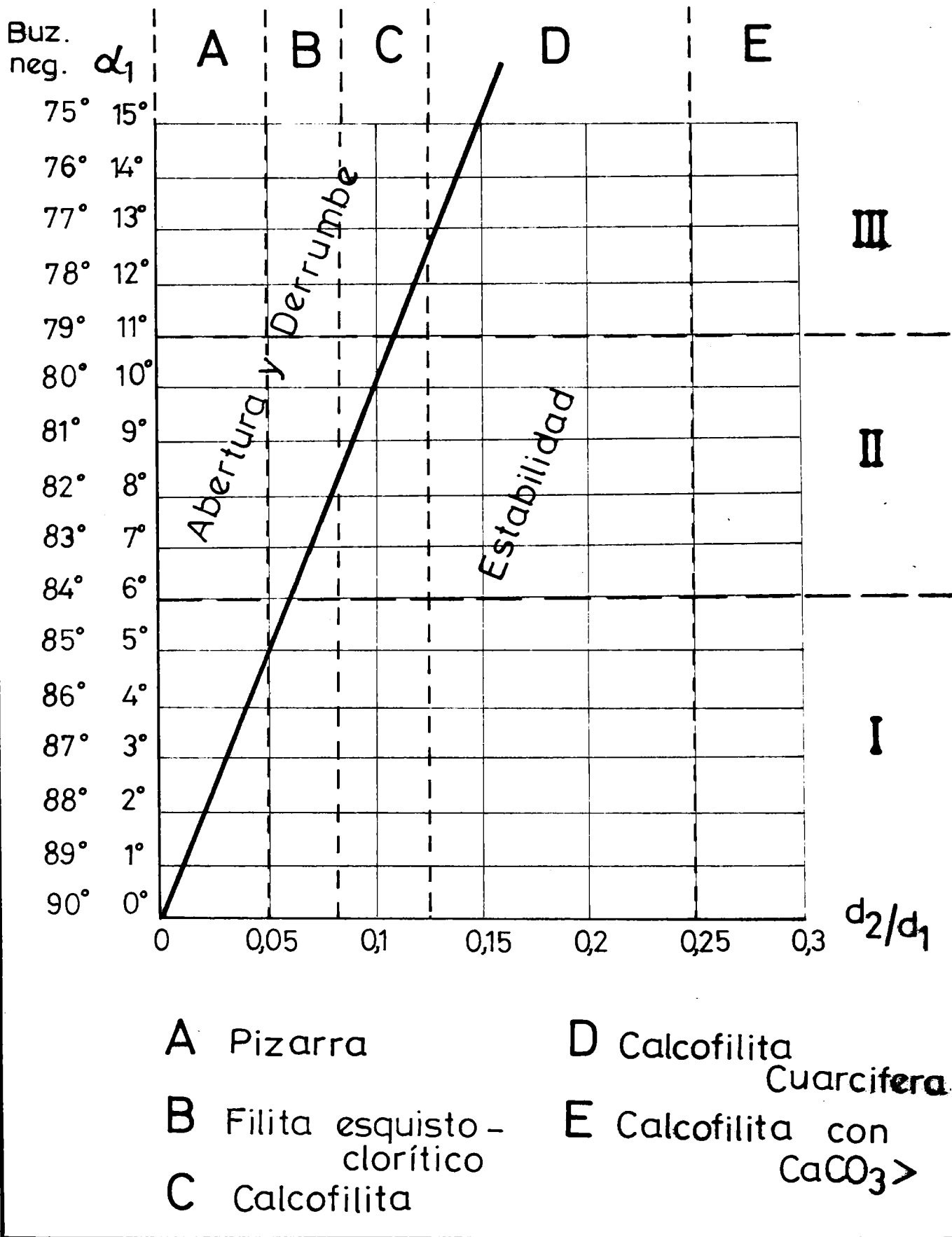


Figura 12 ; División litológica y en clases de buzamiento de la curva real de estabilidad.

9. DIVISION LITOLÓGICA Y EN CLASES DE BUZAMIENTO.

Para facilitar la utilización de la curva de estabilidad, utilizaremos la siguiente gráfica en la cual la esquistosidad está dividida en tipos petrográficos y su buzamiento dividido en clases (Ver figura 12).

Esquistosidad: Los sectores representan diferencias en la fisibilidad de la roca determinadas por textura y composición diferentes (fisibilidad disminuyendo).

A: pizarra

B: filita esquistó-clorítico

C: calcofilita con bajo tenor
de CaCO_3

} → roca ideal para su utilización
como Piedra Laja.

D: calcofilita cuarcífera (llamada por los canteristas "piedra macho")

E: calcofilita con alto tenor de CaCO_3
(llamada por los canteristas "piedra filítica marmolizada"; es difícil separarla en placas de 2 a 3 cms. de espesor aunque se realiza)

Buzamiento: La separación en 3 clases se efectuó en forma arbitraria pudiéndose dividir en otras clases.

Subdividamos entonces el buzamiento en - $\boxed{75^\circ, 79^\circ}$
- $\boxed{79^\circ, 84^\circ}$
- $\boxed{84^\circ, 90^\circ}$

Esta división en clases será utilizada para sacar conclusiones.

Fig.13 - Extrapolación de la Curva de Estabilidad

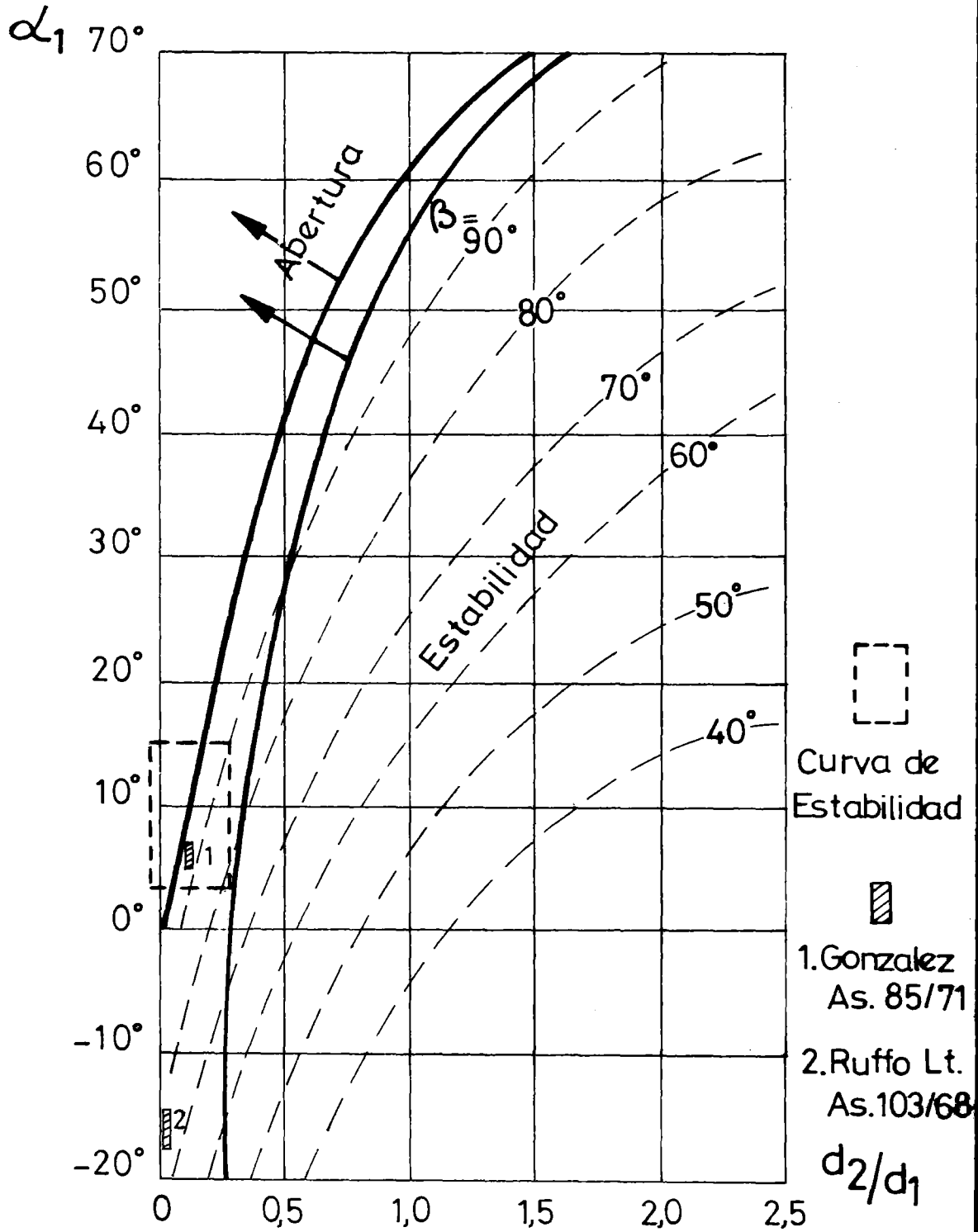


Figura 13 ; Extrapolación de la curva de estabilidad.

10. EXTRAPOLACION DE LA CURVA DE ESTABILIDAD.

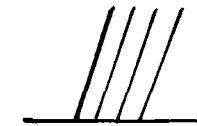
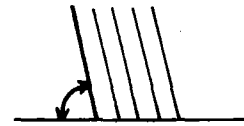
La determinación de la curva real de estabilidad en las canteras de Piedra Laja en relación a la esquistosidad y su buzamiento, nos permite extrapolar la curva y de esta manera construir una curva de estabilidad general considerando todo tipo de roca con cualquier buzamiento.

Una verificación de la validez de esta curva en rocas más masivas como por ejemplo granitos, mármoles, sería muy interesante.

La curva de estabilidad real teniendo en cuenta la influencia de la presión hidrostática no pudo ser construída, considerando las pocas observaciones realizadas (J.González As. Nº 85/71 y Ruffo Ltda. As. Nº 103/68).- donde influye considerablemente la presión. Se construyó una curva teórica a partir de los elementos teóricos de la página 20 (Estudio a 2 dimensiones de la abertura de las rocas superficiales subverticales).

Tabla 1

Alturas limites
de Seguridad
(metros).



	Clase I [90°-84°]	Clase II [84°-79°]	Clase III [79°-75°]	Inclinac. positiva
Pizarra	—	—	—	4
Filita esquistoclorítico	4	3	2	6
Calcofilita	6	4	3	8
Calcofilita cuarcífera	8	6	4	10
Calcofilita con $\text{CaCO}_3 >$	10	8	6	10

Tabla 1 : Alturas limites de Seguridad .

11. CONCLUSIONES.

Sacamos las siguientes conclusiones teniendo en cuenta la división de clases realizada en la figura 12. Esta va a permitirnos elegir la altura del frente de trabajo o paredes de la explotación más conveniente, reuniendo todos los factores de seguridad.

La tabla I nos presenta las diferentes alturas aconsejables en una explotación de Piedra Laja evitando la abertura y el derrumbamiento de la roca.

Observaciones sobre la tabla.

- La explotación de la pizarra nunca podrá efectuarse con un frente de trabajo mostrando un buzamiento marcado hacia el interior del macizo (= inclinación negativa).

- A pesar de una explotación con frente de trabajo con buzamiento positivo que ofrece una gran seguridad frente a la abertura, es aconsejable utilizar la explotación en escalón, reduciendo la altura de un banco (piso) y facilitando las futuras profundizaciones de la cantera con total seguridad.

- El desagüe tiene una gran importancia en todos los casos, impidiendo la influencia de las presiones hidrostáticas, factor primordial de la abertura de las rocas superficiales.

- La anchura del banco dependerá de la conformación de la filita y permitirá el buen desarrollo en la extracción de los diferentes pisos.

(Anchura = 0,5 a 1,5 X altura del banco).

- Las alturas de banco dadas en la tabla I son los límites superiores.

La explotación en escalón tiene como inconveniente un aumento de 1,5 a 2 veces del volumen de estéril, pero se evitará numerosas limpiezas de pisos debidas a la existencia de derrumbes.

En la medida de lo posible, las canteras de Piedra Laja deberán ser abiertas en donde la laja presenta inclinación positiva, en efecto tal frente no sufre de ningún problema de abertura de sus elementos superficiales.

La utilización de la curva de estabilidad con factor de seguridad $C_S = 1$, necesitará la determinación de la media y de la desviación standard del buzamiento del banco de Piedra Laja en toda la explotación o en diferentes lugares si se observan importantes diferencias en buzamiento, así como la determinación de la roca que constituye el frente de trabajo y las paredes de la cantera.

El factor tiempo disminuye el coeficiente de seguridad aumentando la alteración de la roca (discontinuidades, rellenos,..) pero no es posible de decir en que medida, además en la vida de una cantera, la acción del tiempo sobre la abertura puede ser considerado como despreciable.

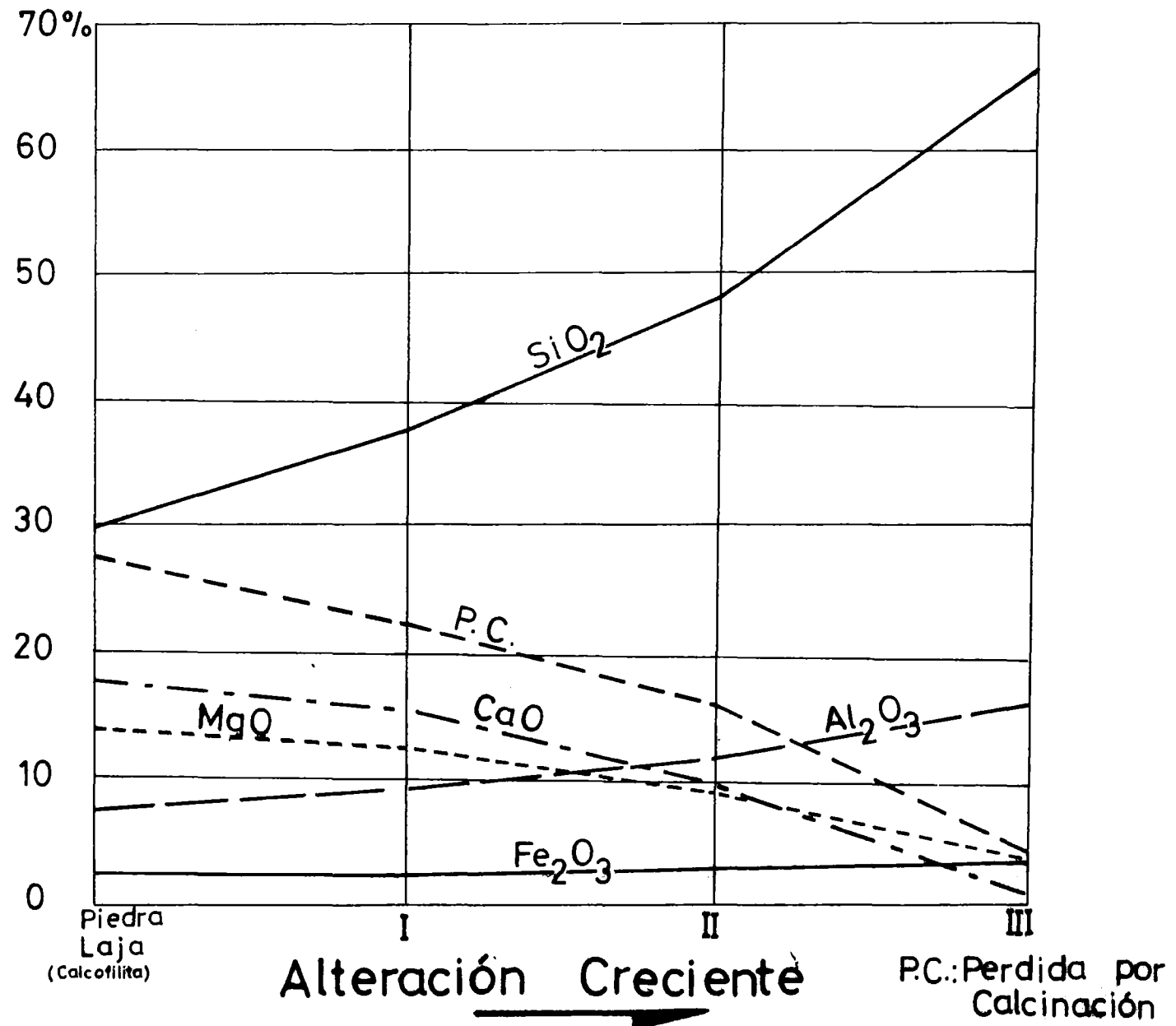
En las canteras de Piedra Laja ya existentes, una vigilancia de los bordes de las paredes y del frente se hará diariamente, y si una laja amenaza de derrumbarse será adecuado provocar su derrumbamiento empujándola hacia el piso.

Tercera Parte

Anexos.

Fig.14_Evolución Química de una Piedra Laja

Figura 14 : Evolución química de una Piedra Laja en alteración creciente (Laboratorios de la DI. NA. MI. GE.).



A1. ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y QUÍMICO DE LA PIEDRA LAJA.

Análisis químicos.

Análisis químicos fueron realizados en el departamento de Laboratorios de la DI. NA. MI. GE. por el Ingeniero Y. Culshaw con el fin de mostrarnos la evolución química de una piedra laja en alteración creciente (Ver figura 14).

Mecanismo de alteración.

Los mecanismos que intervienen son naturalmente complejos. Pero se puede explicar el fenómeno de alteración de la manera siguiente.

Los oxígenos que ocupan las cúspides de los tetraedros de sílice dejan lugar a iones $(OH)^-$. El hecho de que la unión Si - OH es más fuerte que la unión SiO permite que esta sustitución sea posible. Esta última sin embargo debilita considerablemente las uniones entre los tetraedros de sílice y los cationes (Na, K, Ca, Mg,).

Estos cationes serán liberados de la red o más bien intercambios con los iones H^+ pasando en solución. El fenómeno va a progresar de la superficie externa hacia el interior, provocando el debilitamiento, la deformación y finalmente la destrucción de la red cristalina.

En realidad, la sílice y la alúmina, que desempeñan la misma función, aunque los tetraedros de alúmina sean más frágiles que los de sílice, se combinan a los iones $(OH)^-$ para formar hidróxidos amorfos los cuales se combinan entre ellos extructurándose en forma de filosilicatos dando lugar a la formación de minerales arcillosos.

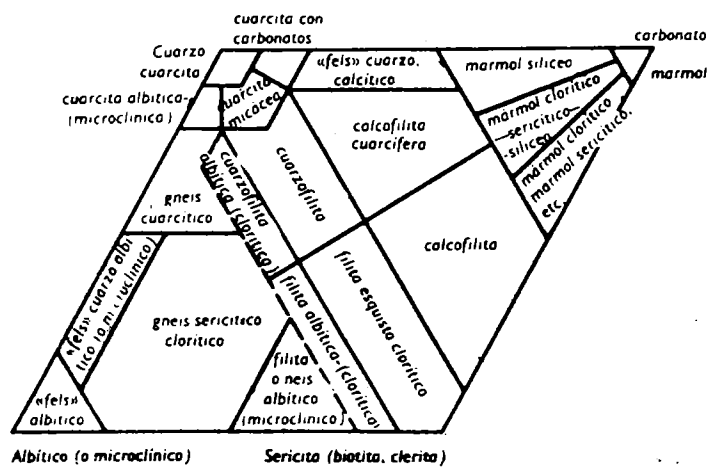


Figura 15 : Composición de las rocas metamórficas de baja temperatura en términos de ciertos componentes fundamentales (Petrogenesis de rocas metamórficas - H.G.F. Winkler [13]).

ANÁLISIS PETROGRÁFICO.

El análisis petrográfico de las diferentes muestras nos revela que son:

- 1). Calcofilitas con textura granoblástica a granolepidoblástica con un bandeo composicional dado por capas más ricas en sericita; como minerales esenciales tenemos la calcita, el cuarzo y la sericita, la turmalina se encuentra como mineral accesorio;
- 2). filita con textura lepidoblástica compuesta de los mismos minerales principales;
- 3). calcofilitas con un alto porcentaje de calcita con textura granoblástica.

Los tres tipos brindan una buena fisibilidad para su utilización como piedra laja.

Los análisis fueron realizados por de la DI. NA. MI. GE. y las rocas fueron clasificadas según el diagrama de H.G.F. Winkler [13] (Ver figura 15).

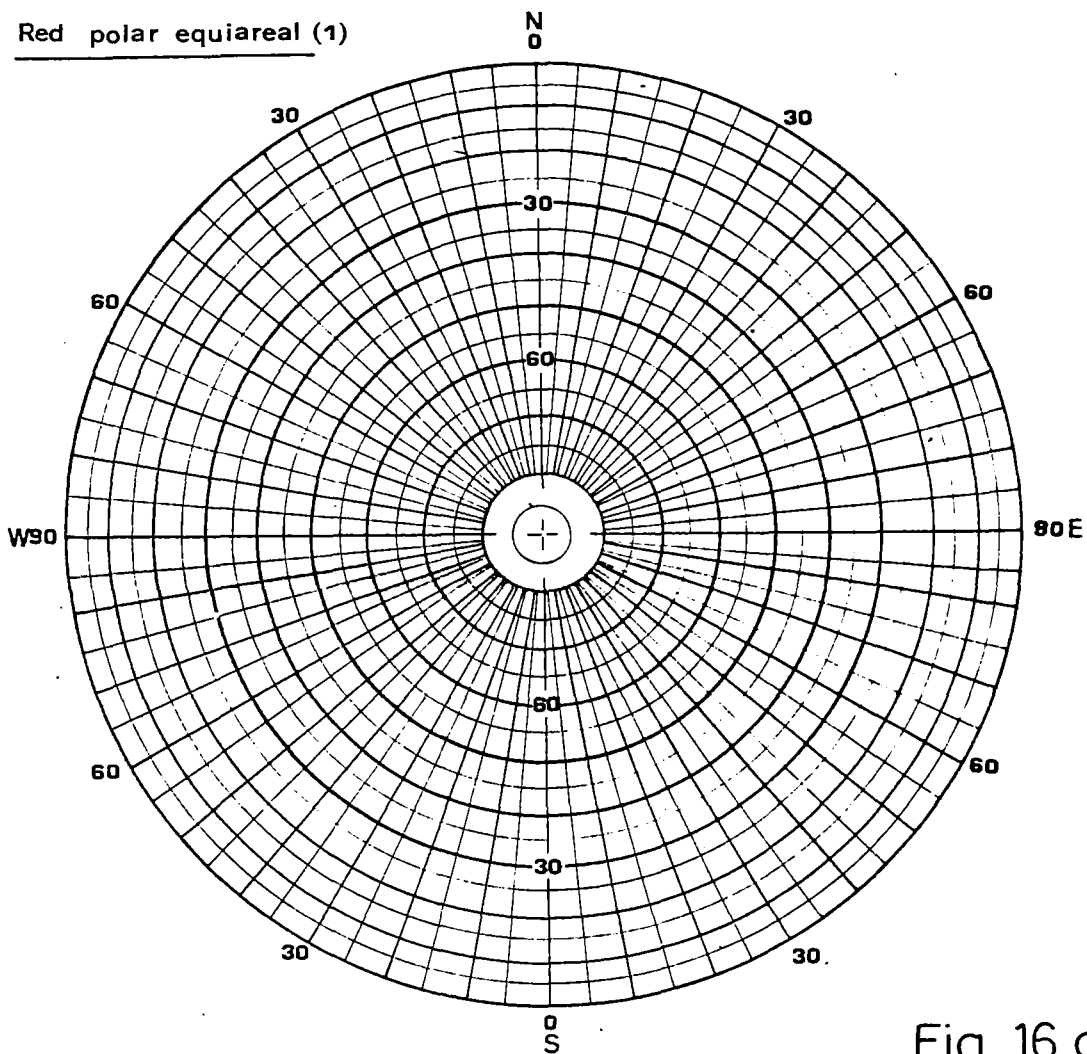


Fig. 16 a

A. 2 Nuevos usos de la red polar equiareal.

La red polar equiareal se construye espaciando los círculos menores de acuerdo con el esquema correspondiente de la proyección Lambert. El uso más frecuente en geología de esta red es el estudio de orientación preferencial de rumbos (rosa de rumbos).

En mecánica de rocas, utilizamos la red polar equiareal como medio de representación final y de lectura rápida de los resultados como también en cálculo gráfico de estabilidades.

La red polar equiareal Nº 1 permite la representación de planos. La dirección y el buzamiento de los planos son de lectura inmediata.

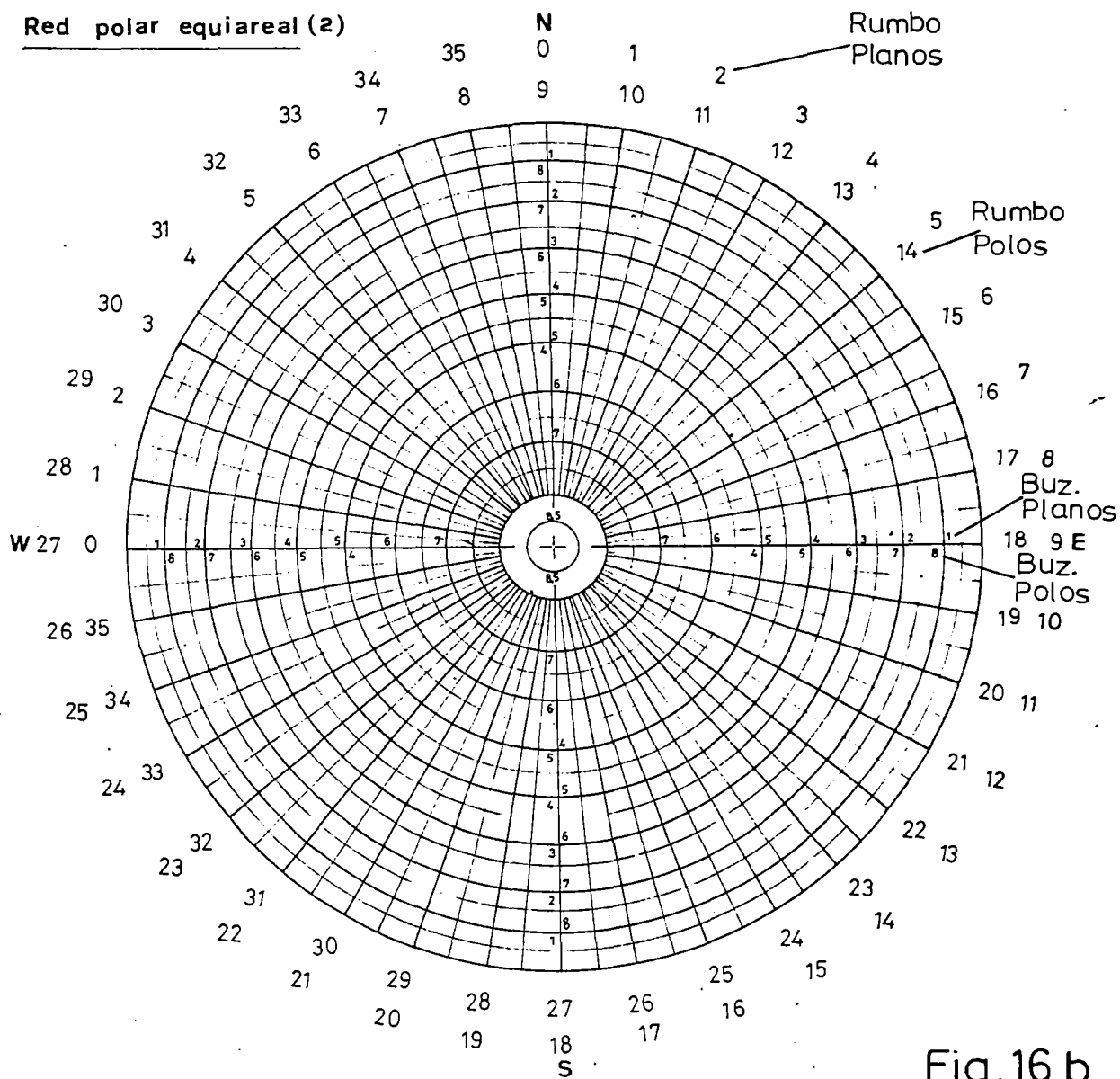


Fig.16 b

En la red polar equiareal Nº 2, la dirección y buzamiento de los planos y de los polos pueden ser leídos directamente: en la escala superior se lee la dirección (o rumbo) y buzamiento de los planos; en la escala inferior se lee la dirección y buzamiento de los polos.

El buzamiento de los planos en las dos redes es determinado por el círculo tangente a su proyección.

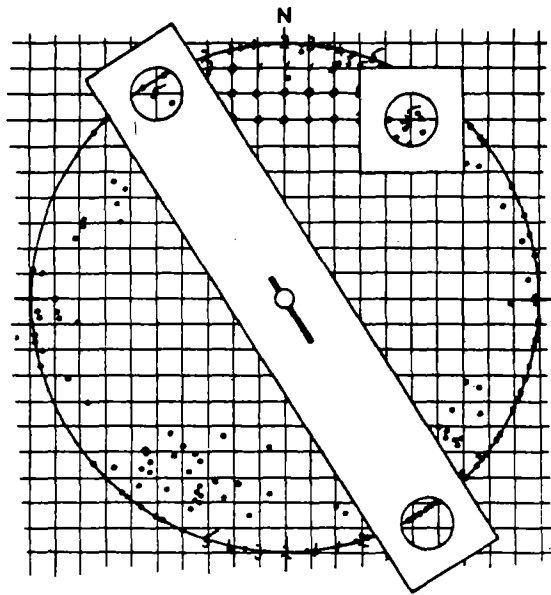


Figura 17 : Contage por áreas de los polos.
(Contador de Schmidegg)

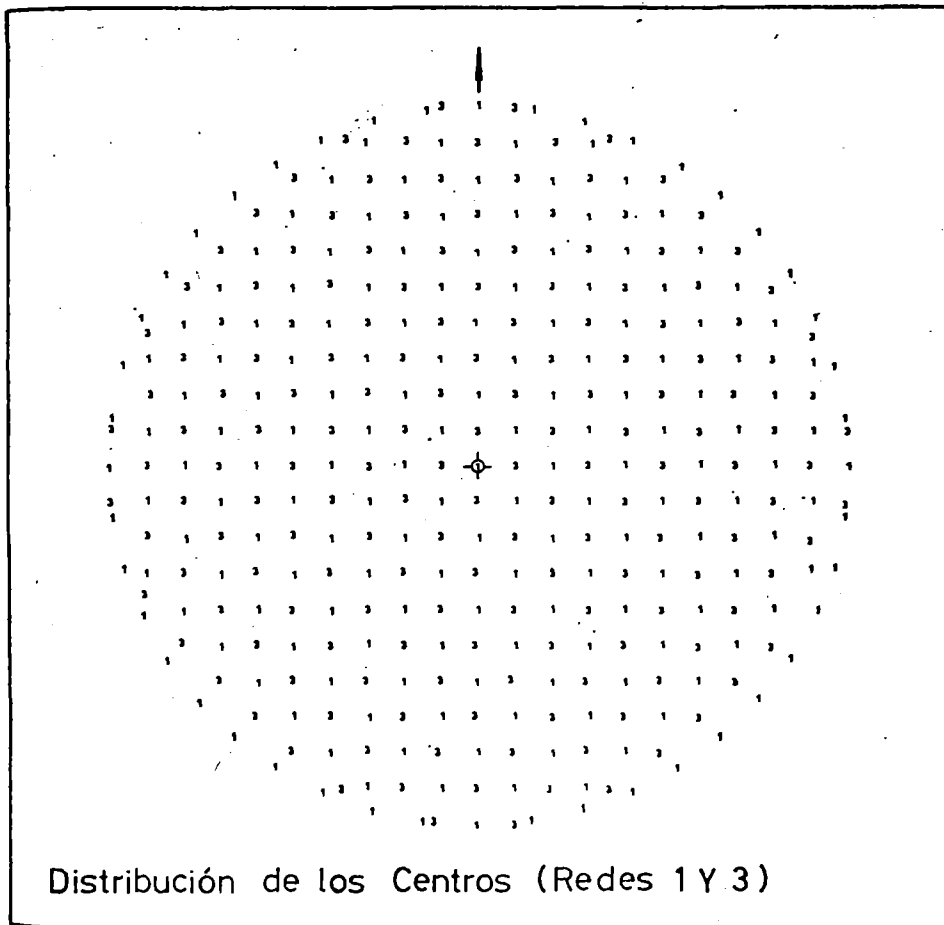
A. 3. DETERMINACION DE LAS LINEAS DE ISODENSIDADES DE LOS POLOS.

La determinación de líneas de isodensidades de los polos en cada unidad de área de la esfera se efectúa desplazando a través de la proyección de un círculo (de 1% de superficie) recortado en una plancha fina de metal o plástico. Aunque se puede mover el contador como se quiera, se acostumbra a centrarlo sucesivamente en las intersecciones de una cuadrícula colocada debajo del papel transparente. Para puntos cerca del primitivo se emplea un contador con un círculo en cada extremo diseñado por Schmidegg (figura 17).

Por más rapidez, facilidad y precisión, utilizaremos las redes contadores circulares. Estas permiten una mejor distribución de los centros de los círculos cerca del primitivo y da un mejor estudio de la concentración de los polos. Estas redes que se emplean sucesivamente, se colocan debajo del papel transparente.

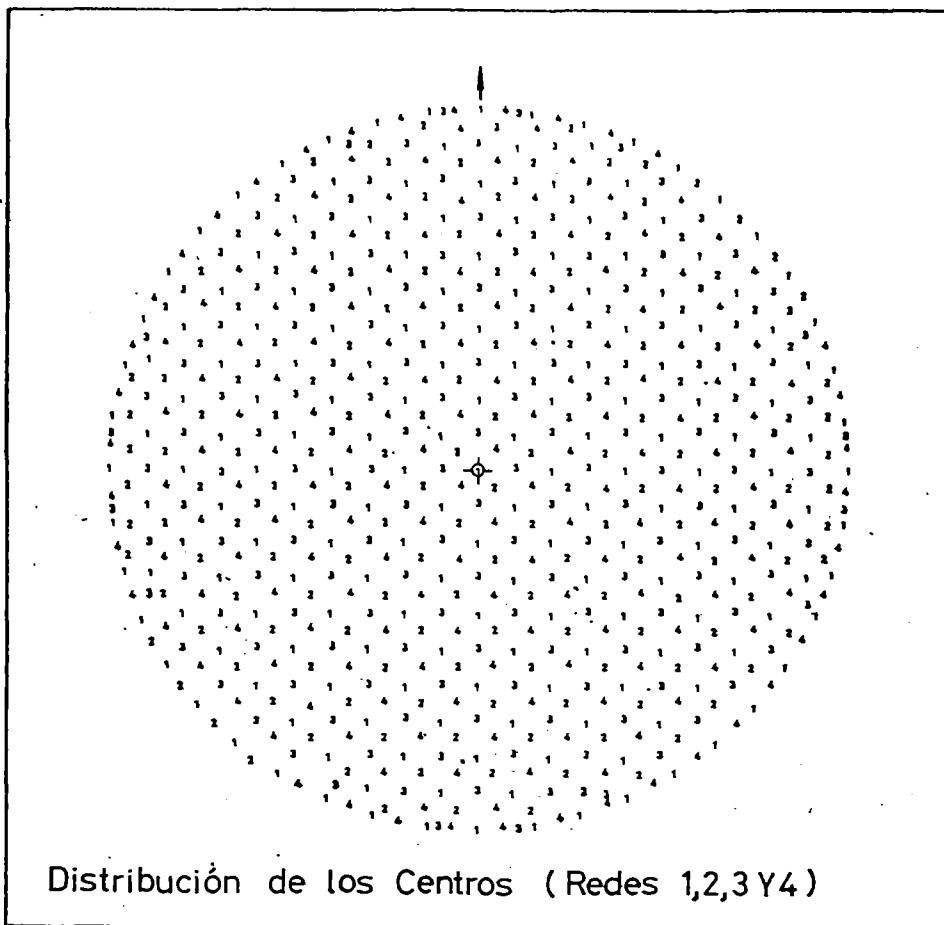
Las figuras 18 a y b nos muestran la distribución de los centros de los círculos utilizando las redes contadoras 1 y 3 y 1, 2, 3 y 4. Las redes contadoras circulares son representadas en las figuras 19 a, b, c y d.

OBSEVACION: El uso de una red contadora circular en una proyección equiareal teóricamente no tiene justificación, ya que los círculos menores se proyectan en general como elipses y no como círculos en el esquema de Lambert, pero las inexactitudes que resultan son pequeñas.



Distribución de los Centros (Redes 1 Y 3)

Figura 18a : Distribución de los centros de los círculos
utilizando las redes contadoras circulares 1 y 3 .



Distribución de los Centros (Redes 1,2,3 Y4)

Figura 18b : Distribución de los centros de los círculos
utilizando las redes contadoras circulares
1 , 2 , 3 y 4 .

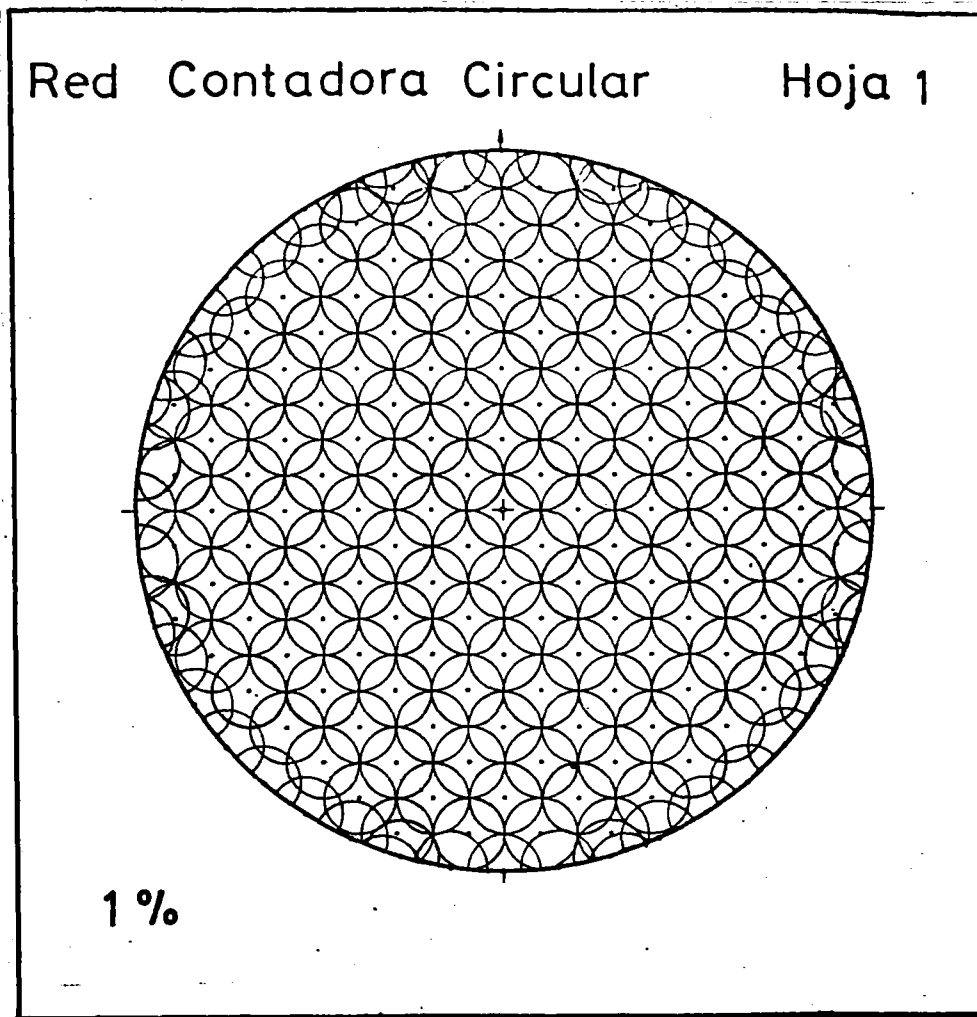


Figura 19 a : Red contadora circular N^o 1.

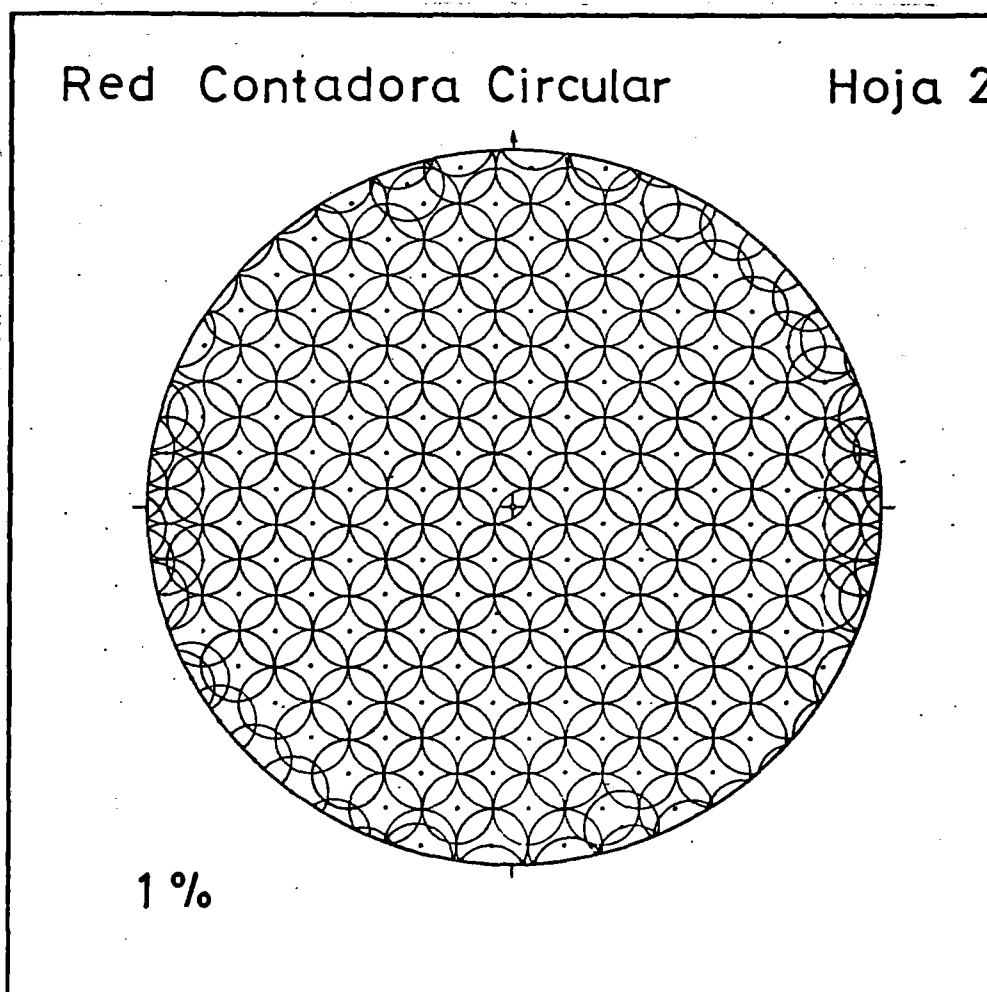
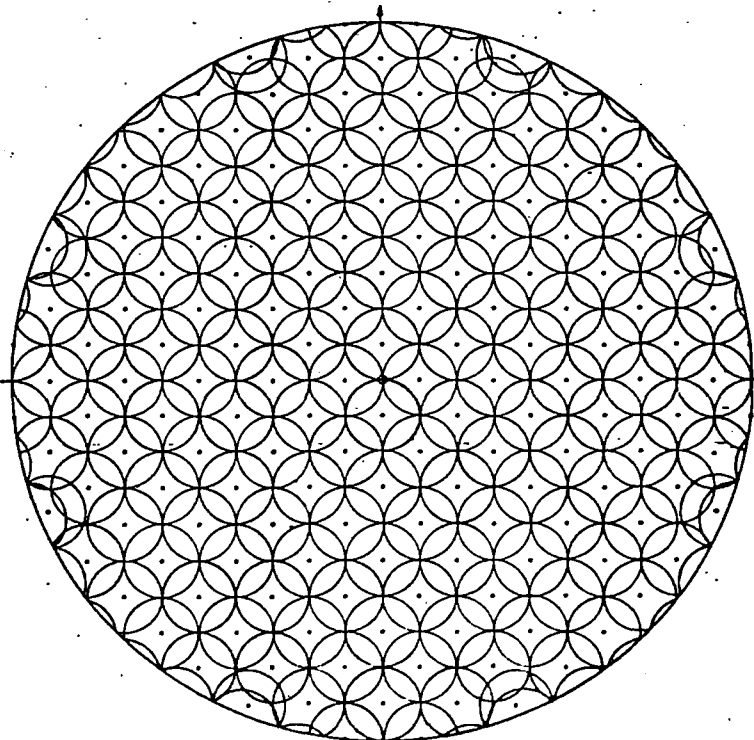


Figura 19 b : Red contadora N^o 2 .

Red Contadora Circular

Hoja 3

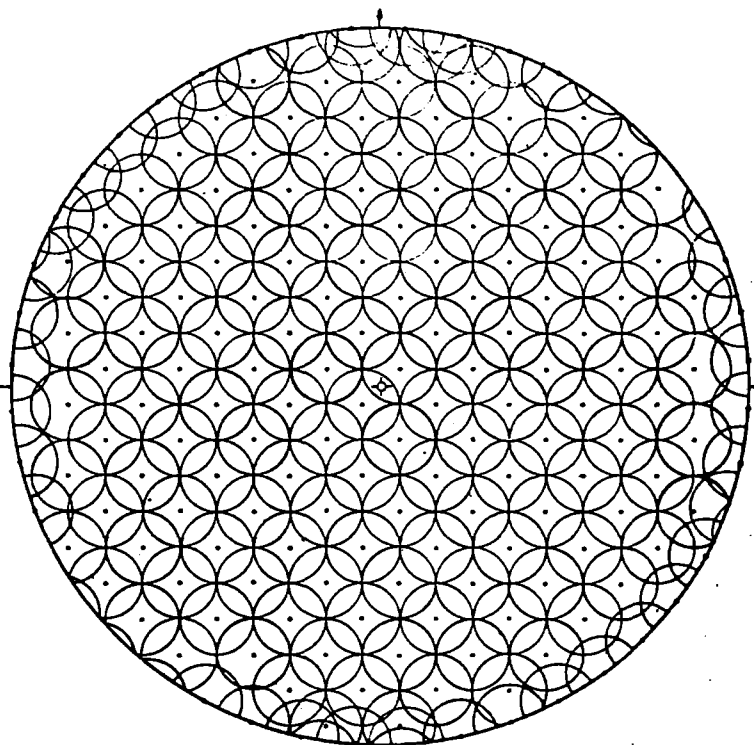


1%

Figura 19 c : Red contadore circular N^o 3.

Red Contadora Circular

Hoja 4



1%

Figura 19 d : Red contadora N^o 4 .

A 4. BUSQUEDA DE LA LEY ANALITICA EXPRESANDO LAS DISTRIBUCIONES DE MEDIDAS.

Tomaremos como ejemplo el muestreo de medidas de buzamiento, efectuado en las diferentes canteras de Piedra Laja. Se definieron intervalos de clases de un grado a partir de este muestreo. La distribución de población es desconocida. Vamos en un primer lugar estimar sus características.

Estimador de la media m_1 :

$$\hat{m}_1 \approx \frac{\sum n_h \cdot X_h}{N}$$

con n_h : número de buzamiento en esta clase
 X_h : medio de clase
 N : número total de buzamientos

Estimador de la variación y del error tipo:

$$\mu_{2:x} \approx \frac{\sum n_h \cdot X_h^2}{N} - \left(\frac{\sum n_h \cdot X_h}{N} \right)^2$$

con $\hat{\mu}'_{2:x} = \frac{N}{N-1} \cdot \mu_{2:x}$

N grand $\rightarrow \hat{\sigma}' = \sqrt{\hat{\mu}'_2}$

Búsqueda de una forma analítica probable que caracteriza la distribución:

La hipótesis que esta repartición responde a una ley de Gauss de media \hat{m}_1 y de desviación standard $\hat{\sigma}'$ fué verificado positivamente por el test en χ^2 (chi cuadrado).

Todas las distribuciones estudiadas responden a una Ley de Gauss.

Aplicación - Población única de buzamientos.

Intervalos de clase	n_h	X_h	$n_h \cdot X_h$	$n_h \cdot X_h^2$
89° - 88°	0	88,5	0	0
88° - 87°	10	87,5	875	76562,5
87° - 86°	12	86,5	1038	89787
86° - 85°	12	85,5	1026	87723
85° - 84°	22	84,5	1859	157085,5
84° - 83°	24	83,5	2004	167334
83° - 82°	12	82,5	990	81675
82° - 81°	10	81,5	815	66422,5
81° - 80°	0	80,5	0	0
Σ	102	—	8607	726.589,5

Cantera de Piedra Laja
(J.Gonzalez As.Nº 85/7I).

$$\hat{m}'_1 = \frac{8607}{102} = 84,38$$

$$\hat{m}'_2 = \frac{726.589,5}{102} = 7123,43$$

$$\hat{\mu}'_2 = \left[7123,43 - (84,38)^2 \right] \cdot \frac{102}{101} = 3,48$$

$$\hat{\sigma}' = k_1 \cdot s = 1,8655 \cdot \left(1 + \frac{1}{4 \cdot 101} \right) = 1,87$$

$$s = \sqrt{\hat{\mu}'_2} \cdot \left(1 + \frac{1}{4(N-1)} \right) \quad \underline{N(84,38 ; 1,87)}$$

Distribución normal de las poblaciones de buzamientos de los frentes de trabajos en las canteras de Piedra Laja $N(m, \sigma)$.

- J. Gonzalez As. Nº 85/71 : N (84,38 ; 1,87)
 - J. Gonzalez As. Nº 89/69 : N (78,53 ; 1,82)
 - Lajas Uruguayas As. Nº 244/75 : N (77,68 ; 1,6)
 - Libro Gigante As. Nº 66/72 : N (76,5 ; 1,075)
 - F. Carince As. Nº 86/71 : N (87,22 ; 1,98)
 - Ruffo As. Nº 21/70 : N (82,33 ; 2,4)
-

BIBLIOGRAFIA.

1. BOSSI J. "Yacimiento de filita para uso como piedra laja"
Padrón Nº 3878 - Dpto. de Lavalleja;
División Minería - As. Nº 66/72;
DI. NA. MI. GE.; Montevideo, 10/1982.
2. BROADBENT C.D. "Fracture Studies at the Kimbley Pit";
9p.; Proceedings of the Symposium on the
Theoretical Background to the Planning of
Open Pit Mines with special reference to Slope
Stability; Johannesburg ; 9/1970.
3. DIVISION MINERIA - Libros de Registro; Explotaciones de Piedra
Laja; departamento de Lavalleja; As.Nros. 66/72 -
86/71 - 85/71 - 89/69 - 244/75 - 85/73 - 124/80 -
21/70 y 164/72.
4. DWIGHT A., ROBERT A. "Safety factors for probabilistic slope desing"
Journal of the geotechnical engineering division;
Vol.108; sept.82.
5. GUSBIN J-C "Aplication de la Mécanique des Roches a la Stabilité
des fronts dans les exploitations a ciel ouvert";
División Minería ; DI.NA.MI.GE.;Montevideo; 12/1983.
6. JENNINGS J-E. " A Mathematical Theory for the Calculation
o the Stability of Slopes in Open Cast Mines "
Proceedings of the Symposium on the Theoretical
Background to the Planning of Open Pit Mines
with special reference to Slope Stability -
Johannesburg 9/1970

7. KLAUS W.J. " Three Dimensional Stability analyses of Slopes in Jointed Rock "
Proceedings of the Symposium on the Theoretical Background to the planning of Open Pit Mines with special reference to Slope Stability -
Johannesburg 9/1970
8. LACROIX A.M. "Classification des talus et versants instables" ; Bull. Liaison Labo. P. et Ch.; Special X; janv. 1981; pp 55-62.
9. PARENT J. "Geologie Appliquée au Genie Civil - Fascicule 1 : L' altération superficielle"; 2^e éd. 1973; Presses Universitaires de Bruxelles.
10. PHILLIPS F.C.: "La aplicación de la Proyección Estereográfica en Geología Estructural"; 1977; 132 p. ; H.Blume; Madrid.
11. SAUCEZ J. "Organization industrielle - Elements de recherche opérationnelle appliquée aux mines et aux grands chantiers"; 1978; Faculté Polytechnique de Mons.
12. TERZAGHI K. "Mechanism of landslides in Application of Geology to engineering practice "; Geol. Soc. Amer. (Berkey Volume); pp. 83 - 123; 1950.
13. WINKLER H.G.F. "Petrogénesis de rocas metamórficas"; p.340 ; ed.H.Blume ; Madrid ; 1978 .

LISTA DE FIGURAS

Primera parte: Estudio del Cabeceo en las canteras de Piedra Laja del departamento de Lavalleja.

	<u>Página</u>
Fig. 1 - Secuencia de la abertura y del derrumbamiento de la roca superficial	10
" 2 - Diagrama esquemático dinámico de la abertura de un elemento rocoso	12
" 3 - Secuencia de la formación de un apilado por la repetición de la primera etapa	14
" 4 - Diagrama esquemático de la formación del apilado	14
" 5 - Deslizamiento de un apilado	16
" 6 - Diagrama esquemático dinámico del deslizamiento del apilado	16
" 7 - Efecto del espacio entre las discontinuidades sobre el tipo de ruptura	18
" 8 - Abertura de las rocas superficiales -estudio a 2 dimensiones- gráficas para S=1 y 1,5	20
" 9 - Abertura de las rocas superficiales -estudio a 3 dimensiones	24

Segunda parte: Derrumbamiento por Abertura de la Piedra Laja en las canteras del departamento de Lavalleja.

Fig.10 - Diagrama estructural de canteras de Piedra Laja.	
a: J.González As.Nº 85/71	29
b: Ruffo Ltda. As.Nº 21/70.	30
c: J.C.Riffaud As.Nº 124/80	31
d: J.González As.Nº 89/69	32
" 11 - Estudio a 3 dimensiones de la abertura de la Piedra Laja.	
a: J.C.Riffaud As.Nº 124/80	36
b: J.González As.Nº 89/69.	37
" 12 - División litológica y en clases de buzamiento de la curva real de estabilidad	38
" 13 - Extrapolación de la curva de estabilidad	40

Tercera Parte: Anexos.

" 14 - Evolución química de una Piedra Laja en alteración creciente	45
" 15 - Composición de las rocas metamórficas de baja temperatura en términos de ciertos componentes fundamentales	47

Fig. 16 - Redes polares equiareales	49
" 17 - Contage por áreas de los polos (Contador de Schmidegg).	51
" 18 - Distribución de los centros de los círculos utilizando las redes contadoras circulares.	53
" 19 - Redes contadoras circulares 1, 2, 3 y 4	54

LISTA DE PLANCHAS.

Plancha 1 - Mapa de ubicación	2
" 2 - Esbozo geológico - Fuente del Fuma.	8
" 3 - Curva de estabilidad.	33
Tabla 1 - Alturas límites de Seguridad.	42

LISTA DE FOTOGRAFIAS.

Foto 1 - Fenómeno de cabeceo en la cantera de Piedra Laja J. González As.Nº 85/71	10
Foto 2 - Fenómeno de cabeceo en el primer piso de la cantera J.González As.Nº 85/71.	12
Foto 3 - Deslizamientos de apilados en una cantera del "Libro Gigante" As.Nº 66/72	16
Foto 4 - Cantera Lajas Uruguayas S.A. As.Nº 244/75	18
Foto 5 - Cabeceo en la cantera de Piedra Laja Libro Gigante As.Nº 66/72.	27

