

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA,
MINERA Y METALURGICA

ESCUELA DE POST GRADO



**"Utilización de Las Proyecciones
Estereográficas en el Análisis
de Estabilidad de Excavaciones
Subterráneas en la mina Animón
Pasco"**

T E S I S

**PARA OPTAR EL GRADO DE MASTER DE CIENCIAS
CON MENCIÓN EN INGENIERIA DE MINAS**

Porfirio B. Poma Rique

Lima - Perú
◆ 1998

PREFACIO

En la minería se usan diferentes métodos de minado, según sea las características geométricas y geomecánicas de los cuerpos mineralizados y las rocas circundantes. Los requisitos para el diseño y construcción son variados según se trate de excavaciones pequeñas y provisionales o excavaciones grandes y permanentes.

Em gran medida el diseño de las excavaciones subterráneas tiene que ver con el grado de estabilidad que requiere estas estructuras. Por ésta razón el autor, tratando de identificar los problemas más comunes en un proyecto de excavación subterránea en rocas presenta el siguiente trabajo titulado **“Utilización de las Proyecciones estereográficas en el análisis de estabilidad de excavaciones subterráneas en la Mina Animón en Pasco”** Mina de propiedad de la Cía Minera Chungar S.A., como medio para obtener el grado académico de Master de Ciencias, con mención en Ingeniería de Minas, contribuyendo de esta manera a usar una metodología, que hace décadas solamente era utilizada en la geología y que ahora proporciona a la minería procedimientos mucho más sencillos y claros para la representación de la geometría tridimensional de discontinuidades rocosas y la distribución vectorial de fuerzas que se presentan dentro de la masa rocosa, constituyendo así una de las herramientas más importantes en la evaluación cinemática de la estabilidad de rocas dentro de una excavación subterránea en forma parecida al análisis de estabilidad de taludes en minería superficial.

Se ha tratado de dar un enfoque introductorio y generalizado en la materia, estando plenamente convencido de que el manejo de las técnicas estereográficas identifica y ayuda a comprender los problemas más críticos de estabilidad de bloques en el diseño de excavaciones subterráneas.

En la preparación, sustento y culminación del presente trabajo agradezco al asesor Dr. Ing. Raimundo Almenara, así mismo la gran ayuda recibida de Dr. Ing. J.A. Samaniego, para terminación del proyecto, del mismo modo se agradece a los Ingenieros: M. Sc. Pedro H. Tumialán de la Cruz y M. Sc. Douglas Hernán Arteaga Lucas asesores nombrados por la revisión del Proyecto de Tesis y sus valiosas recomendaciones. Finalmente deseo agradecer a mi hija Mariela por el paciente trabajo de mecanografiado.

Lima, Diciembre de 1997

Porfirio Poma Rique

CONTENIDO

Dedicatoria	I
Fotografía	II
Prefacio	III

CAPITULO I

1.-	Generalidades	1
1.1:	Resumen	2
1.2:	Introducción	3
1.3:	Objetivos generales.	5
1.4:	Metodología y áreas de investigación.	5
1.5:	Conceptos fundamentales.	6
1.6:	Tipos de discontinuidades.	9

CAPITULO II

2.-	Fundamentos Teóricos	11
2.1:	Características estructurales del macizo rocoso	12
2.1.1:	Introducción.	12
2.1.2:	Familias de discontinuidades v tamaño de muestreo.	13
2.1.3:	Orientación (α), buzamiento (β) de los planos normales a las discontinuidades.	20
2.1.4:	Grado de confianza del agrupamiento de las familias.	24
2.1.5:	Frecuencia (λ) espaciamiento (e) de las discontinuidades.	26
2.1.6:	Longitud de traza de las discontinuidades.	28
2.1.7:	Parámetros geomecánicos asociados a la resistencia en discontinuidades.	29
2.2.:	Análisis de fuerzas y modelos de fallamiento	30
2.2.1:	Representación del vector fuerza.	31

2.2.2:	Representación estereográfica de fuerzas coplanares.	33
2.2.3:	Modelo de fallamiento en discontinuidades.	35
2.3:	Metodología de muestreo de los datos de campo	39
2.3.1:	Introducción	39
2.3.2:	Métodos de muestreo.	40
2.3.3:	Muestreo por el método de Línea de Detalle.	40
2.3.4:	Selección de zona de muestreo.	41
2.3.5:	Procedimientos y nomenclatura en el método de Línea de Detalle.	42

CAPITULO III

3.-	Muestreo y análisis estadístico de la geometría de las discontinuidades.	44
3.1:	Introducción	45
3.2:	Muestreo de los datos de campo.	45
3.2.1:	Características geológicas de la zona de estudio.	45
3.2.2:	Características de las Línea de Detalle.	47
3.2.3:	Datos de orientación de discontinuidades.	48:
3.3:	Análisis estadístico de las orientaciones de los polos de las discontinuidades.	52
3.3.1:	Diagrama de polos y Número de familias.	52
3.3.2:	Cálculo de la orientación media de cada familia de discontinuidades.	54
3.4:	Cálculo del valor promedio de espaciamiento de discontinuidades de cada familia.	57
3.5:	Determinación y análisis de los parámetros de resistencia al corte en los planos de discontinuidades.	58

CAPITULO IV

4.-	Evaluación cinemática de la Estabilidad de bloque rocoso en la Mina Animón	60
4.1:	Introducción.	61

- 4.2: Método de las proyecciones estereográficas paralelo a la superficie de excavación. 61
 - 4.2.1: Posibilidad cinemática y congruencia. 62
 - 4.2.2: Metodología para el gráfico de datos. 67
 - 4.2.3: Interpretación geométrica. 69
 - 4.2.4: Comportamiento del bloque roco o bajo la accion de fuerzas gravitacionales 73

CAPITULO V

- 5.- Análisis de la Estabilidad del bloque rocoso en la Mina Animón 80
 - 5.1: Introducción. 81
 - 5.2: Análisis de triángulos esféricos v dimensionamiento del tetraedro.82
 - 5.2.1: Construcción del bloque tetraedro. 82
 - 5.2.2: Dimensionamiento del tetraedro. 84
 - 5.3: Determinación de la magnitud de las fuerzas actuantes. 92
 - 5.4: Determinación del grado de estabilidad. 94
 - 5.4.1: Descomposición del grado de estabilidad. 95
 - 5.4.2: Cálculo del Factor de Seguridad. 95

CAPITULO VI

- 6.- Conclusiones y Recomendaciones 100
 - 6.1: Conclusión. 101
 - 6.2: Recomendación. 104
 - 6.3: Lista de Figuras 106
 - 6.4: Lista de Tablas 107

Referencias Bibliográficas. 108

Anexos. 111

CAPITULO I

1.- GENERALIDADES

1.1.- RESUMEN

El presente trabajo, introduce las técnicas Estereográficas como una herramienta potente y muy útil en el análisis de la Estabilidad de Excavaciones subterráneas. donde las rocas presentan características estructurales bien pronunciadas. son resistentes y que al construir una excavación. originan en su entorno la formación de bloques rígidos de rocas. potencialmente inestables. ocasionando fallamientos por caída libre o deslizamientos de estos bloques hacia el espacio libre de la excavación.

En los capítulos introductorios, se explican las bases del fundamento teórico de los métodos de análisis de las características geométricas, de orientación, de resistencias, y métodos de muestreo de campo de las discontinuidades que originan los bloques rígidos, así como los posibles modos de fallamiento, cuando estos se encuentran sometidos a fuerzas gravitacionales en especial.

Se resuelven los problemas de estabilidad, haciendo monitoreos de posibilidad cinemática de fallamiento de los bloques rocosos, asegurándose las congruencias geométricas, mediante técnicas Estereográficas, seleccionando y clasificando los bloques críticos potencialmente inestables, calculando sus volúmenes y pesos, para luego cuantificarlas mediante índices o Factores de Seguridad. El trabajo se ilustra con numerosos gráficos, tablas y datos de campo obtenidos del Nivel 270 de la Mina Animón jurisdicción de Pasco, propiedad de la Cía Minera Chungar S.A..

1.2.- Introducción:

Durante muchos siglos, las operaciones mineras han sido excavaciones relativamente pequeñas y provisionales. En las últimas décadas, al descubrirse grandes cuerpos mineralizados y a profundidades considerables, se han desarrollado técnicas de minado acorde con el aumento del tamaño de las operaciones. Muchas empresas mineras se han visto obligadas a modernizar sus métodos de explotación, equipo, etc. para lograr un nivel competitivo en el mercado mundial.

Este fenómeno trae consigo la necesidad de, desde el punto de vista geotécnico una clasificación más útil y racional de las excavaciones subterráneas, especialmente dirigidas a obtener un mayor grado de estabilidad o seguridad. Cantidad de recursos que se destinan al estudio de estabilidad de las estructuras subterráneas, estará en relación al uso que se le pretende dar y al tiempo que deben permanecer abiertas estas excavaciones.

La toma de datos de campo y su interpretación geotécnica es esencial para aplicar cualquier método de análisis de estabilidad. Así podemos deducir de un análisis de campo los siguientes resultados:

- a.- Si la masa rocosa presenta características estructurales bien definidas, es competente y se ubica a bajas profundidades; donde los esfuerzos in situ pueden considerarse mínimo o nula, la estabilidad de la masa rocosa dentro de una excavación subterránea será función de la interacción de las orientaciones de los planos de discontinuidades respecto a la orientación de las superficies de excavaciones, así como de la resistencia al corte que representa los planos de discontinuidades más persistentes y frecuentes.

Los problemas de estabilidad van a estar relacionados al fallamiento de bloques rígidos. es decir la inestabilidad será debida a una geología estructural adversa donde no hay la necesidad de una clasificación rigurosa del macizo rocoso.(7)

- b.- Por otro lado. si la masa rocosa presenta características de baja resistencia. meteorización o intemperismo . incompetente. y muy fracturados. para el análisis de su estabilidad. será necesario hacer una rigurosa clasificación de la calidad de la masa rocosa. compatibilizando el tamaño y forma de las aberturas subterráneas.(7)

El presente trabajo. centra su estudio en excavaciones en el primer tipo de masa rocosa expuesta. Para ello se predispone una revisión teórica de las características geométricas y geomecánicas de las discontinuidades. paralelamente a un análisis de fuerzas por métodos estereográficos. junto a un modelo de fallamiento elegido. Aspectos claves en la determinación de la estabilidad de bloques rígidos en macizos rocosos.

Para el efecto. es necesario hacer una recopilación sistemática de datos de campo. introduciendo una metodología de muestreo por "Lineas de Detalle". para obtener en especial. los datos de orientación y buzamiento de planos de discontinuidades.

En el contexto general. detallamos el proceso de cálculo del número de familias de discontinuidades y las orientaciones y buzamientos promedios de cada familia mediante el uso del método vectorial. antes que los métodos convencionales de contorno manual de polos. introduciendo además los factores de corrección necesarios cuando se utilizan las técnicas de muestreo de campo por "línea de detalle". y comprobándose en cada caso el grado de agrupamiento de cada familia por métodos estadísticos.(13)

Una vez calculados eficientemente el numero de familias. sus orientaciones y buzamientos promedios. se evalúa la posible estabilidad cinemática. utilizando las

técnicas de las proyecciones estereográficas acorde con la geometría y orientación de las excavaciones subterráneas. Determinaremos las propiedades geométricas del bloque rocosos potencialmente inestable o capaz de moverse en dirección a la excavación y que debe ser congruente con los triángulos esféricos en la proyección estereográfica.

Se introduce luego, la acción de las fuerzas sobre el bloque rocosos, deduciendo la categoría de comportamiento cinemático, que nos indicarán el tipo de fallamiento del bloque rocoso.

Finalmente, usando adecuadamente los parámetros de resistencia al corte de los planos de discontinuidades más preponderante, calculamos el Factor de seguridad que medirá el grado de estabilidad de la excavación subterránea.

1.3.- Objetivos Generales:

El objetivo del presente trabajo es el de evaluar la estabilidad de los bloques rígidos en masas rocosas competentes, empleando las técnicas estereográficas, mediante una detallada evaluación geométrica del medio rocoso, teóricamente exento de significativos esfuerzos de campo.

1.4.- Metodología y área de investigación:

TRABAJO DE CAMPO:

- a.- La tarea se inicia con un reconocimiento de la zona de estudio, previamente identificando, las diferentes zonas litológicas, a fin de ubicar las principales estructuras geológicas, obteniéndose los datos que permitirán posteriormente cuantificar las características geológicas dentro de la mina.
- b.- Identificados los diferentes tipos de roca y las estructuras principales (fallas, contactos, etc.), procedemos a las mediciones de campo para obtener los datos de las discontinuidades como: orientación, buzamiento, persistencia, etc. y con ellos identificar en función de las características

estructurales del macizo rocoso los dominios estructurales. Los dominios estructurales son zonas en donde la estructura del macizo presenta características similares en todo el área.

TRABAJO DE GABINETE:

- c.- Las familias de discontinuidades son graficadas en una proyección estereográfica que representa planos paralelos a la superficie de excavación, y simultáneamente son identificados los triángulos esféricos asociados por congruencia a bloques rocosos de forma tetraédrica.
- d.- En la misma red estereográfica, se gráfica las fuerzas que actúan sobre cada bloque tetraédrico, deduciendo la categoría de su comportamiento dentro de cinco alternativas. (13)
- e.- Descompuestas las fuerzas en sus componentes y utilizando adecuadamente los parámetros de resistencia al corte de los planos de discontinuidades, se determina el factor de seguridad del bloque.

Para poder cumplir con los objetivos, presentamos en forma de flujo-grama las áreas de investigación, presentado en la Figura N° 1.

1.5.- Conceptos fundamentales:

Discontinuidades:

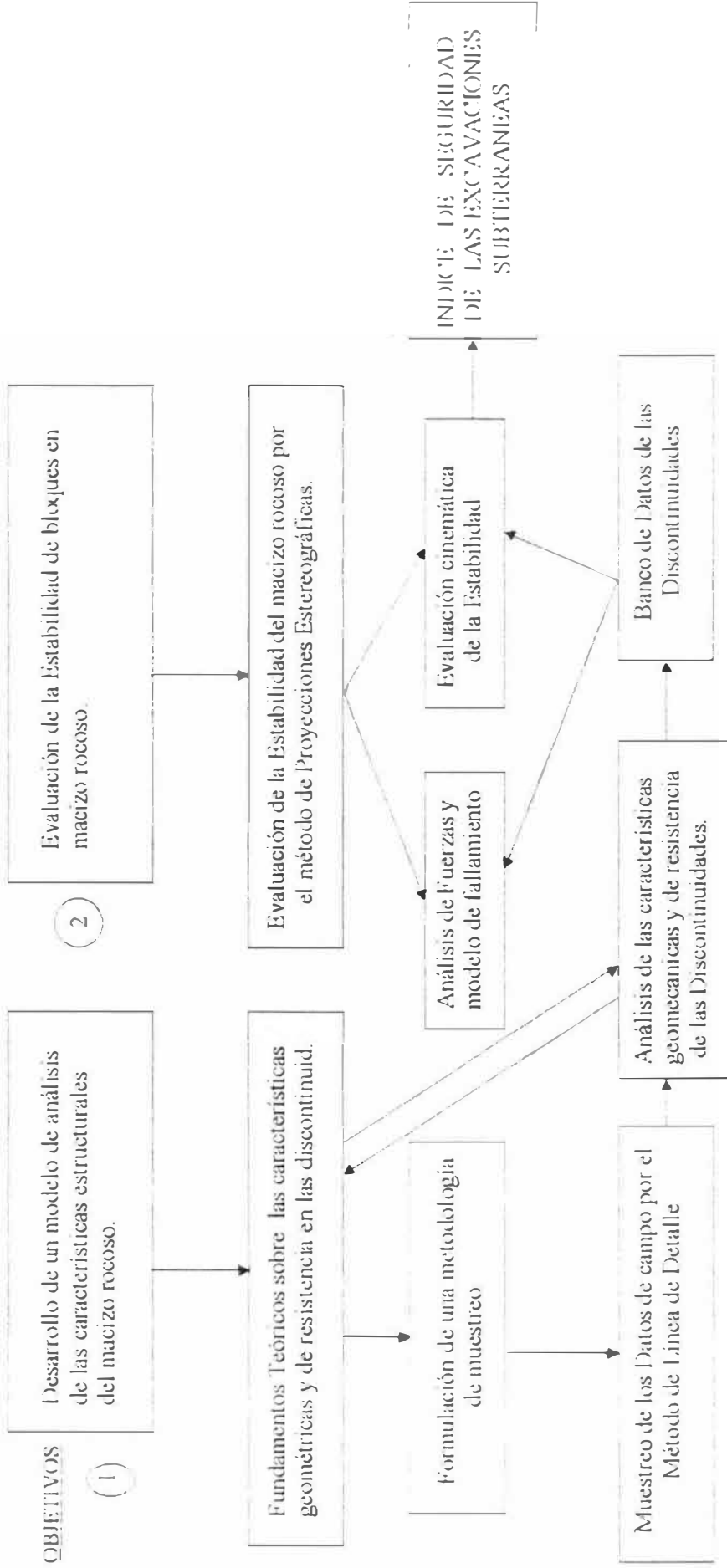
Es cualquier rotura o interrupción de la continuidad de la masa rocosa, que incluye características como: fracturas, planos de estratificación, diaclasas, fallas, etc.

Superficie de discontinuidad:

Es cada uno de las superficies del plano donde se presenta la discontinuidad. Se manifiesta como una línea en la pared de la excavación (intersección de dos

FLUJOGRAMA DE AREAS DE INVESTIGACION

Fig. N° 1



planos). Ambas superficies pueden estar en contacto, ser muy cerradas, tener pocas asperezas o estar completamente separadas.

Rumbo: (strike):

Es el ángulo horizontal entre el Norte geográfico o sur geográfico y la línea de intersección del plano horizontal y el plano de discontinuidad. (12)

Dirección del buzamiento :

Es el ángulo horizontal medido entre el Norte geográfico y la línea de intersección entre el plano horizontal y el plano vertical que pasa por la línea de máxima pendiente del plano de discontinuidad.

Buzamiento (dip):

Es el ángulo vertical comprendido entre la dirección de buzamiento y la línea de máxima pendiente del plano de discontinuidad.

Plunge o inmersión:

Es el ángulo medido en algún plano específico entre una línea y la horizontal.(12)

Trend:

Es el ángulo horizontal medido desde el Norte geográfico a la línea de intersección entre el plano vertical y la dirección del plunge. Análogo a la dirección de buzamiento cuando se trata de planos.

Terminación:

Forma como termina las discontinuidades como: terminación en roca intacta, sobre otra discontinuidad, o se extienden más allá del área de muestreo.

Rugosidad:

Son irregularidades de la superficies de una discontinuidad y es fundamental en la determinación del ángulo de fricción en los ensayos de resistencia al corte.

Ondulación:

Son irregularidades grandes de la superficie de discontinuidad y deben ser variaciones sistemáticas del buzamiento y rumbo.

En minería subterránea no se tiene en cuenta por las limitaciones del tamaño de la excavación.

Apertura:

Es la distancia perpendicular entre las superficies de una discontinuidad.(11)

Relleno:

Es el material que ocupa el espacio entre las superficies de una discontinuidad y puede estar ocupado parcial o totalmente. Es importante porque cuando adquiere preponderancia determinar la resistencia al corte de la discontinuidad.(11)

Presencia de Agua:

Es el agua contenido en las discontinuidades y ejercen una presión normal a los labios de la discontinuidad, tendiéndola a abrir

1.6.- Tipos de Discontinuidades:

Nombre genérico para todas las características estructurales del macizo rocoso. Estas son particularmente importantes, porque representan planos de debilitamiento de la masa rocosa. Mencionaremos la más importante, aunque hay tipos de discontinuidades menores, como foliaciones, laminaciones, pizarrosidad, esquistosidad, a pesar de su pronunciada anisotropía, en cierto modo su

comportamiento mecánico va casi unida a la del material rocoso. Entre las discontinuidades que realmente repercuten en el grado de estabilidad están. (11)

Estratos:

También llamados planos de estratificación, es un nivel o un horizonte litológico, homogéneo, depositada en forma paralela a la formación infravacante. Están separadas por superficies de erosión.

Fracturas:

Son discontinuidades producidas por esfuerzos tectónicos que han sobrepasado el límite de resistencia de la roca, y pueden ser: (17)

a.- Diaclasas:

Planos de debilidad en rocas duras, que no han sufrido deslizamiento o desplazamiento. El tipo más común son las fracturas de tensión, porque se presentan casi perpendiculares a los planos de sedimentación.

b.- Fallas:

Cuando las fracturas han sufrido un desplazamiento que generalmente abarca grandes longitudes.

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1. CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES DEL MACIZO ROCOSO

2.1.1.- Introducción:

El término estructura geológica, se emplea para describir las masa rocosas consideradas en 3 dimensiones, denominadas genéricamente como “discontinuidades” y comprenden todas las superficies planas o casi planares, que hacen del macizo rocoso un medio discontinuo.

El comportamiento mecánico de una masa rocosa (deformabilidad, resistencia, permeabilidad, etc) depende mayormente de las características geotécnicas de las discontinuidades, antes que de las propiedades de las rocas circundantes. Tales características es función por un lado de los parámetros geométricos (orientación, espaciamiento, persistencia, etc.); y por otro lado de los parámetros de resistencia al corte (ángulo de fricción, cohesión),este último depende de los parámetros geotécnicos de las discontinuidades (rugosidad, relleno, apertura, etc.).

Todas éstas características de las discontinuidades, descritas, analizadas y evaluadas convenientemente y relacionadas con la orientación de las superficies de la excavación, determinan el grado de estabilidad de las excavaciones subterráneas.

El objetivo de hacer las mediciones de las orientaciones de las discontinuidades en el campo, es obtener información estadística sobre la posición tridimensional de las discontinuidades. En ingeniería geotécnica se acostumbra a definir tales orientaciones en terminos de “dirección del

adapta mejor al uso de computadoras para el ploteo de datos, evitando confusiones en su interpretación.

2.1.2: Familias de discontinuidades v tamaño de muestreo:

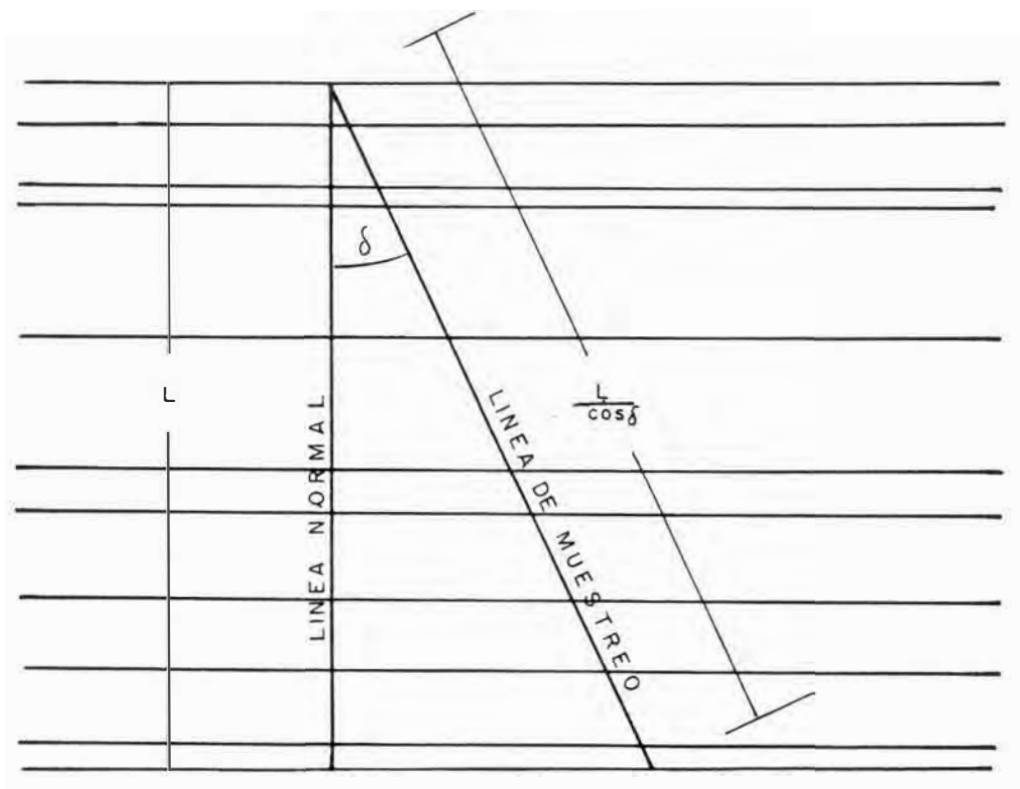
Los datos de campo de orientación de discontinuidades, pueden obtenerse, tanto de los testigos de perforaciones diamantinas, así como de mediciones a través de líneas de detalle en las superficies expuestas de las rocas. Los datos obtenidos por cualquiera de los métodos mencionados, se pueden representar gráficamente sobre una red estereográfica. Generalmente las discontinuidades en el macizo rocoso aparecen agrupadas, con orientaciones casi paralelas, formando familias. (13)

Los procedimientos más simples para su análisis son graficando sobre una red estereográfica puntos que representan los polos, es decir, las normales a cada uno de los planos de discontinuidades. Para visualizar mejor, es recomendable usar símbolos de diferentes formas y tamaños para representar a cada tipo de estructura que permitirán distinguir mejor los conjuntos e identificar aquellos que pueden influir en el comportamiento del macizo rocoso.

Cuando la toma de datos se hace mediante una línea de detalle, es necesario tener en cuenta algunas restricciones que impone el régimen lineal de muestreo, y naturalmente influirá en los resultados, por lo que se recomienda: "La línea de detalle debe tender en lo posible a tratar de interceptar preferentemente a las discontinuidades más grandes v persistentes, formando ángulos agudos los más pequeño posible con la normal a los planos de discontinuidades". (13)

Esto se explica: si asumimos un conjunto de discontinuidades planares y paralelas de dirección de buzamiento (α_D, β_D) y una línea de muestreo de trend y plunge (α_S, β_S) como se muestra en la figura: 2.

FIG. Nº 02



FAMILIA DE DISCONTINUIDADES INTERSECTADA POR UNA
LINEA DE MUESTREO DE ORIENTACION GENERAL

El ángulo entre la normal a los planos de discontinuidades y la línea de muestreo es (δ).

Si consideramos el número de discontinuidades o tamaño de muestreo a través de la línea normal como (N) sobre una longitud (L), la frecuencia (λ) de discontinuidades sobre esta normal será:

$$\lambda = \frac{N}{L} \quad \dots\dots (2.1)$$

y por otro lado, una línea de muestreo que hace un ángulo (δ) con la línea normal a la familia, tendrá una longitud:

$$\frac{L}{\cos \delta}$$

para interceptar el mismo número de discontinuidades (N) y la frecuencia a través de la línea de muestreo será:

$$\lambda_s = \frac{N}{\frac{L}{\cos \delta}} = \frac{N \cos \delta}{L}$$

$$\lambda_s = \lambda \cos \delta \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Esto demuestra que el número de discontinuidades (λ_s) de una familia interceptado por una línea de muestreo que hace un ángulo agudo (δ) con la línea normal a la familia, se reduce con el incremento del ángulo (δ) y se aproxima a cero cuando (δ) tiende a 90° .

Si analizamos de una manera más general. donde se supone la existencia de (n) familias y elegimos una familia cualquiera (i), cuya dirección de buzamiento y buzamiento es $(\alpha_{Di} / \beta_{Di})$, su frecuencia (α_{Si}) medido a lo largo de la línea de detalle será:

$$\lambda_{Si} = \lambda_i \text{Cos } \delta_i \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Su tamaño o número de discontinuidades a lo largo de la línea de detalle será:

$$N_{Si} = \lambda_{Si} L_S = \lambda_i \text{Cos } \delta_i L_S$$

De acuerdo con la ecuación (2.3) el tamaño de la muestra dependerá del valor (λ_i) y el ángulo (δ_i) .

Terzaghi. (15), sugirió que ésta dependencia del ángulo (δ_i) podría conducir a serios errores de interpretación de los resultados.

Si teóricamente consideramos todas las discontinuidades de la familia paralelos. el tamaño de la muestra sería:

$$N_i = \frac{L_S}{\text{Cos } \delta_i} = \lambda_i L_S \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

Pero en la práctica. las discontinuidades no son nada paralelas. por lo que habría de tratar a cada uno de las discontinuidades en forma separada. como si fuesen una familia: en otras palabras. el número de familias sería el mismo que el número de discontinuidades:

$$N_{Si} = 1$$

De ésta manera la ecuación (2.4) el tamaño de una discontinuidad será:

$$N_i = \frac{1}{\text{Cos } \delta_i} \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

Siendo:

δ_i = Ángulo agudo entre la línea perpendicular a una familia y la línea de detalle. Su valor deducido algebraicamente es:

$$\delta_i = \text{Arc. Cos} [\text{Cos} (\alpha_N - \alpha_S) \text{Cos} \beta_N \text{Cos} \beta_S - \text{Sen} \beta_N \text{Sen} \beta_S]$$

con esto la ecuación (2.5) se transforma en:

$$w_p = \frac{1}{\text{Cos} (\alpha_N - \alpha_S) \text{Cos} \beta_N \text{Cos} \beta_S - \text{Sen} \beta_N \text{Sen} \beta_S} \dots\dots\dots [2.6]$$

siendo:

w_p = Factor de corrección ponderado para el tamaño de una discontinuidad.

α_N β_N = Trend y plunge de la normal al plano de las discontinuidades.

α_S β_S = Trend y plunge de la línea de muestreo.

Se debe tener cuidado en considerar el valor absoluto del ángulo (δ_i) para no generar valores negativos.

El uso del factor de corrección ponderado (w_p) puede traer algunas complicaciones como:

“Si la línea de detalle y la normal a la familia de discontinuidades hace un ángulo (δ_i) cercano a 90°. el factor (w) podría tener un valor muy alto y producir una falsa concentración de polos e inducir a interpretaciones engorrosas o erróneas” (13)

Para tratar de mitigar estas tendencias. pueden utilizarse las alternativas siguientes: propuestas por Priest S.D.(13)

- a.- Durante el proceso de muestreo. procurar en lo posible de que el valor del ángulo agudo (δ_i) no sea muy alto (70°).
- b.- Procesar los datos por el método de contorneo manual.

c.- Procesar los datos analíticamente sobre bases estadísticas.

El camino más fácil para minimizar la primera alternativa, es utilizando cuando menos 3 líneas de detalle mutuamente ortogonales y aproximadamente de la misma longitud, de manera que cualquiera de las discontinuidades que pasara desapercibida por una línea de muestreo, por efecto de un alto valor del ángulo agudo (δ_i) quedará interceptada por las otras líneas. La ventaja de líneas ortogonales de detalle es para evitar el uso del factor de corrección ponderado (w) y por consiguiente el incremento del tamaño de muestreo, y los datos de orientación podrán graficarse directamente en la red estereográfica.

El proceso de contorneo de los datos de orientación, básicamente tienen tres etapas: (13)

- a.- Cada uno de los polos de los planos de discontinuidades se plotea sobre una red estereográfica junto a su factor de corrección ponderado (w).
- b.- Usando adecuadamente la Red de Conteo (fig.19) y la Reglilla de conteo de polos se mide la variación de la concentración de polos, cada retículo circular de la reglilla tiene un área equivalente al 1% del área total de la proyección, el número de polos ponderado que encierra el retículo circular se coloca en el centro de la misma, expresada en %.
- c.- Se contornea los valores promedios a intervalos apropiados obteniendo las curvas isovalóricas de concentración de polos.

Cuando hay gran cantidad de polos, éste proceso puede ser lento y tedioso, por lo que es recomendable emplear un programa de cómputo.

El tamaño de la muestra ponderada (N_w), viene a ser la sumatoria de todos los factores de corrección (w) de cada discontinuidad previamente corregidas para cada línea de detalle y son graficados en la misma red estereográfica.

El proceso analítico de datos, mediante el uso de computadoras, ayuda a graficar los polos en la red estereográfica de área circular de radio R mediante las coordenadas rectangulares (x,y):

Los datos de campo, se registran generalmente en términos de dirección de buzamiento y buzamiento (α_D / β_D) de cada plano de discontinuidad. Como se tiene que graficar los puntos que representan los polos de tales planos, hay la necesidad de convertir los valores originales a dirección de buzamiento y buzamiento (α_N / β_N) de los polos de cada plano de discontinuidad, mediante las siguientes relaciones: (13)

$$\alpha_N = \alpha_D = 180^\circ$$

$$0 \leq \alpha_N \leq 360 \quad \dots\dots[2.7]$$

$$\beta_N = 90 - \beta_D$$

En función de estos parámetros se calculan las coordenadas cartesianas (x,y) de cada polo construyéndose así el "Diagrama de polos", que se obtiene usando las siguientes relaciones:

TABLA N° 1

Coordenadas Cartesianas (x,y) de un punto sobre proyecciones estereográficas del hemisferio inferior de radio (R)

TIPO DE PROYECC.	X	Y
EQUIANGULAR	$R \text{Sen } \alpha_N \text{ Tan } (45 - \beta_N)$ 2	$R \text{Cos } \alpha_N \text{ Tan } (45 - \beta_N)$ 2
EQUIAREAL	$R \sqrt{2} \text{ Sen } \alpha_N \text{ Cos } (45 - \beta_N)$ 2	$R \sqrt{2} \text{ Cos } \alpha_N \text{ Cos } (45 - \beta_N)$ 2

En el Diagrama de polos, se pueden identificar visualmente las tendencias de agrupación de los polos, y delimitar las zonas de concentración

formando agrupamientos o familias de polos de las discontinuidades, determinando posteriormente sus orientaciones promedios.

Cuando el diagrama de polos presenta una amplia dispersión de los mismos, normalmente dan lugar a ciertas superposiciones o traslapes de polos, en algunos grados entre las agrupaciones adyacentes, ocasionando ciertas dificultades en el proceso de separación de los límites de las agrupaciones o familias. Algunos investigadores como Steffen, Jennings(14) y Miller(10), investigaron el uso del análisis estadístico para interpretar la parte traslapada y determinar con ciertas ventajas los límites de los agrupamientos, e incluso sugirieron gráficos de "distribución de polos" para ayudar a definir los límites de las familias. Concluyendo, en algunos casos, estas evaluaciones pueden ser críticas por lo que es recomendable en tales circunstancias disponer de la experiencia y del buen juicio del profesional.

2.1.3: Orientación (α), Buzamiento (β) de los planos normales a las discontinuidades (Polos):

Cuando se ejecuta manualmente el conteo de polos para calcular los valores promedios de orientación y buzamiento de las discontinuidades, se establece como norma un entorno del orden del 20% de dispersión alrededor del valor promedio de la dirección del buzamiento y buzamiento de cada familia, lo que se infiere que toda fractura individual dentro de éste entorno pertenece a la familia.(6)

Por otro lado, si consideramos una familia compuesto por (N) discontinuidades y tomando un polo cualquiera de éste (i) de trend y plunge (α_i β_i) y que se encuentra asociada a un factor ponderado (Wp) calculado según la ecuación (2.6), el tamaño total de la muestra ponderada (N_w) será:

$$N_w = \sum_{i=1}^N W_p \quad \dots\dots[2.8]$$

Cada uno de los factores ponderados (W_p) será tan grande o igual a la unidad, consecuentemente (N_w) será mayor que (N) o la relación ($N_w:N$) tendrá valores típicos de 2 a 5.

Este incremento del tamaño efectivo de muestreo tiene una importancia crítica cuando se desea calcular vectorialmente o estimar con precisión los valores de orientación y buzamiento, más no tiene mayor injerencia cuando se realiza los cálculos por contorno de polos, ya que éste presenta los resultados en valores porcentuales. (13)

En vista de esto, hay la necesidad de "Normalizar" cada uno de los factores ponderados (W_p) de manera que el tamaño total de muestreo ponderado sea igual a (N). Este factor normalizado (W_n) para cada discontinuidad está dada por:

$$W_N = \frac{N}{\sum W_p} \quad \dots (2.9)$$

de manera que:

$$N_w = \sum_{i=1}^N W_n$$

siendo el valor de ($N: N_w$) constante.

Resumiendo: La corrección de los datos de orientación sigue las siguientes secuencias:

- a.- Se evalúa (W_p) usando la ecuación (2.6)
- b.- Se evalúa (N_w) usando la ecuación (2.8)
- c.- Se evalúa (W_n) usando la ecuación (2.9)

Con estas premisas. podemos ingresar a determinar los valores promedios de las orientaciones y buzamientos de los polos de cada familia de discontinuidad.

Una alternativa para calcular la orientación promedio de las diferentes familias. es utilizando el análisis vectorial.

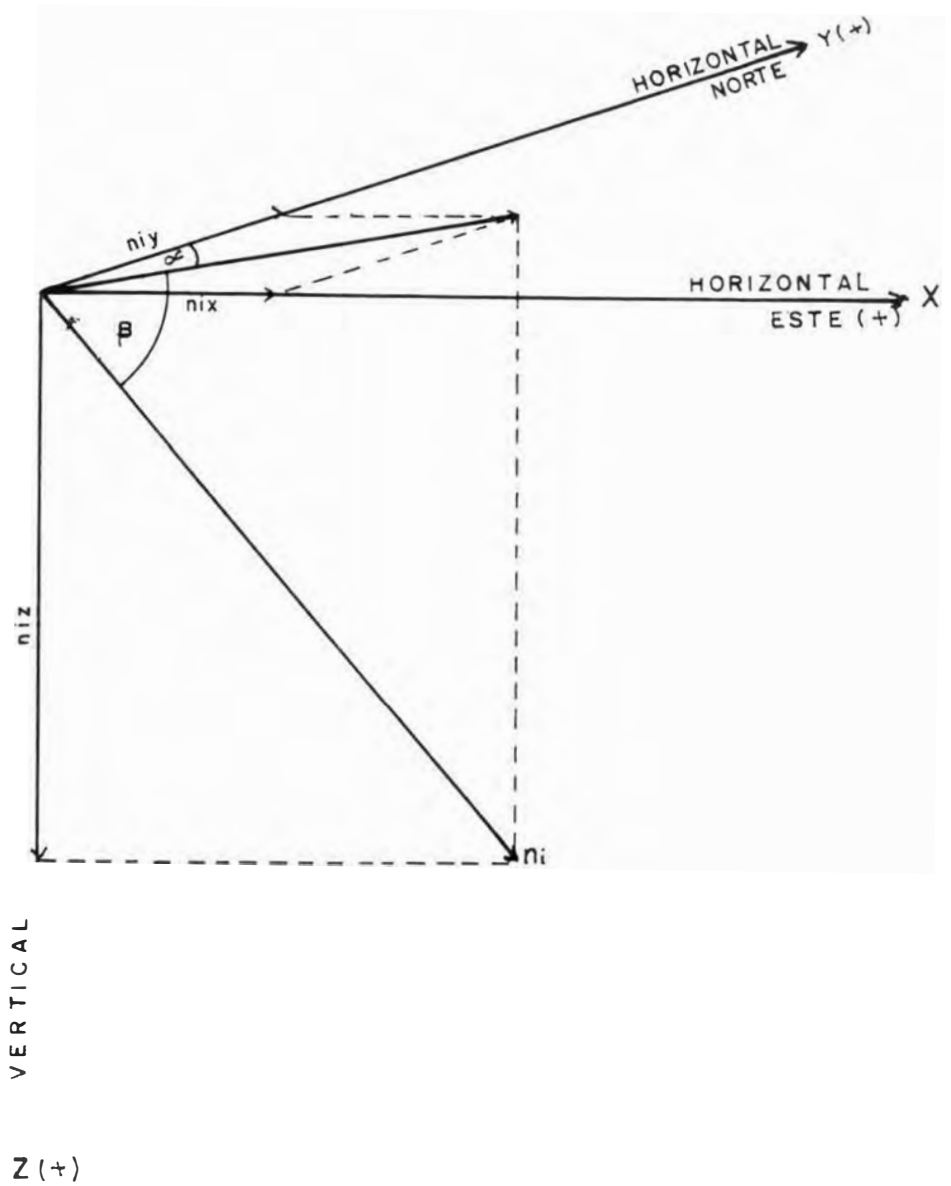
Asumiendo un sistema de coordenadas cartesianas como se muestra en la figura. [3], donde las componentes cartesianas [x,y,z] de un determinado polo (i) representado por el vector (n_i) y de magnitud (W_n), el cual tiene su punto inicial en el origen y es alineado paralelamente a la normal (polo) de la discontinuidad (i), están dadas por: n_{ix} , n_{iy} , n_{iz} , que en función de los parámetros (α_N β_N) para cada una de las discontinuidades serán:

$$\begin{aligned}
 n_{ix} &= Wn \text{ Sen } \alpha_{NJ} \text{ Cos } \beta_{NJ} \\
 n_{iy} &= Wn \text{ Cos } \alpha_{NJ} \text{ Cos } \beta_{NJ} \\
 n_{iz} &= Wn \text{ Sen } \beta_{NJ} \qquad \dots\dots (2.10)
 \end{aligned}$$

La sumatoria de estos componentes de todas las discontinuidades ($i = 1$ a n) daran las componentes cartesianas: r_x , r_y , r_z , del vector resultante (r_n) promedio:

$$r_x = \sum_{j=1}^N n_{ix}$$

FIG. N° 03



VECTOR DESCOMPUESTO EN SUS COORD. CARTESIANAS

$$r_y = \sum_{j=1}^N n_{iy} \quad \dots (2.11)$$

$$r_z = \sum_{j=1}^N n_{iz}$$

La magnitud del vector (r_n) dada por (R_w) es:

$$R_w = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2} \quad \dots (2.12)$$

El trend (α_N) y por el plunge (β_N) del vector (r_n) estará dada por:

$$\alpha_N = \text{Arc. Tan} \frac{r_x}{r_r} + q \quad \dots [2.13]$$

$$\beta_N = \text{Arc. Tan} \frac{r_z}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}} \quad \dots [2.14]$$

2.1.4: Grado de confianza del agrupamiento de las familias

Evaluated por Fisher. sobre un análisis estadístico generalizado de dispersión sobre una esfera.

Al principio no fue considerado la corrección por la orientación de la línea de muestreo. desde que implícitamente asume éste factor normalizado (W_n) igual a la unidad o sea ($W_n = 1$) o lo que es lo mismo $N_w = N$.

Fisher presentó una relación que permite evaluar el grado de agrupamiento (K) para una familia. dada por:

$$K = \frac{N_w - 1}{N_w - R_w} \quad \dots\dots[2.15]$$

Si todas las discontinuidades de una familia. fuesen teóricamente paralelos ($N_w = R_w$) el valor de (K) sería infinito. por lo contrario, si las discontinuidades estuviesen orientados al azar (R_w muy pequeño) el valor de (K) se acercaría a la unidad.

En la práctica el valor de (K) es raramente menor de cinco. En general cuanto mayor sea el valor de (K) menor será la dispersión de las orientaciones.

En éste análisis es factible introducir el factor de corrección normalizado. Fisher hizo la asunción fundamental de que los vectores que representan la población se encuentran dispersos al azar. cerca de algún valor real o verdadero de orientación. es decir que los polos de las discontinuidades se encuentran dispersos dentro de una familia.

Dedujo que la probabilidad $P_1 (< \theta)$ de que un determinado vector que representa a un polo seleccionado al azar en una determinada familia. haga un ángulo (θ) menor con la orientación promedio. Esta probabilidad está dada por:

$$P_1 (< \theta) = 1 - e^{-K(1 - \cos \theta)} \quad \dots (2.16)$$

En otras palabras. existe la probabilidad (P_1) de que el polo de una discontinuidad de una determinada familia seleccionado al azar. se encuentre dentro de un cono que tiene como centro la orientación promedio y como ángulo el definido por (θ) como:

$$\theta = \text{Arc Cos } 1 + \frac{1}{K} \ln(1-P_1)$$

Así mismo, la probabilidad $P_2(< \theta)$ de que el vector resultante (r_n) que representa el mejor valor estimado de la orientación promedio de los polos de una familia, haga un ángulo (θ) menor con la orientación verdadera, probabilidad dada por familia:

$$P_2(< \theta) = 1 - e^{-K R w (1 - \text{Cos } \theta)} \quad \dots (2.17)$$

y cuando el ángulo (θ) sea mayor con la orientación promedio, su probabilidad será:

$$P_2(< \theta) = e^{-K R w (1 - \text{Cos } \theta)}$$

La zona definida por las ecuaciones (2.16) y (2.17) definen la zona denominada de **confianza**.

2.1.5.- Frecuencia (λ), espaciamento (ϵ) de las discontinuidades

Frecuencia (λ): Se define como el número de discontinuidades por unidad de longitud. (8)

El grado o intensidad de fracturamiento en una masa rocosa es función del distanciamiento de sus discontinuidades por cada familia, que en la mayoría de los casos definen el comportamiento mecánico del macizo rocoso. Por ésta razón la estimación de las frecuencias de las discontinuidades normalmente ocupan un lugar importante en la investigación de cualquier proyecto de excavación en rocas.

Sin embargo, las frecuencias de discontinuidades obtenidas a través de una sola línea de detalle, por sí solas serán insuficientes para estimar una adecuada descripción o intensidad real de fracturamiento para propósito de diseño. El valor de la frecuencia lineal en diferentes direcciones puede ser crucial en los requerimientos de soporte.

La forma de medida más utilizada de la intensidad de fracturamiento es la frecuencia lineal y dependen de la línea de muestreo (hay frecuencia superficial, volumétrica) por lo expuesto, como en el caso del tamaño de muestreo explicado, habrá un valor máximo de frecuencia en una dirección de la línea de muestreo y un valor mínimo en otra dirección, y cuando se tratan de excavaciones subterráneas hay limitaciones al escoger la orientación más conveniente de muestreo.

El espaciamento (ϵ): Se define como la separación promedio existente entre los planos de las discontinuidades de una familia y es equivalente al recíproco de la frecuencia ($\epsilon = 1:\lambda$). (11)

El espaciamento de las discontinuidades es el factor determinante del tamaño o volumen de los bloques de roca. si este espaciamento es pequeño la resistencia del macizo rocoso es pequeña, y si están muy espaciadas generan grandes bloques, son más resistentes, masivos y competentes.

La importancia del espaciado crece cuando existen otros factores condicionantes de la deformación del macizo rocoso, como por ejemplo, cuando la resistencia al corte es pequeña, puede producirse deslizamiento a través de las discontinuidades. El espaciado también tiene gran influencia en la permeabilidad y flujo de agua a través del macizo rocoso.

Para el análisis del espaciamento de las discontinuidades de cada familia, es necesario realizar algunos ajustes de los datos de muestreo de campo, de tal manera que se utilicen en el cálculo los valores reales de distanciamiento mas no los valores aparentes, obviamente dependerán

también de la orientación de la línea de muestreo. Por ésta razón. Bridges (1), estableció que muy poca información útil puede conseguirse en este aspecto cuando la normal a los planos de discontinuidad y la línea de muestreo hagan ángulos mayores de 70°. También admitió que el espaciamiento de las discontinuidades de una familia, dan información más útiles que los tomados en su conjunto de varias familias.

Los datos de espaciamiento de discontinuidades generalmente son graficadas estadísticamente para obtener los, "histogramas de espaciamiento" esto se obtiene graficando los datos de espaciamiento vs porcentaje de valores de espaciamiento de cada clase y de cada familia.: la curva que mejor se ajusta a los requerimientos de los datos son usados para describir la distribución.

Como consecuencia de estos tipos de análisis, muchos trabajos han dado como resultado modelos de distribución exponencial y logaritmica normal.

Un análisis detallado, tanto de la frecuencia (λ) como de los esparcimientos (\equiv) de las discontinuidades, que por cierto nos conducirían a un conocimiento más profundo del tamaño o volumen del bloque de roca dentro del macizo fracturado, va más allá de los alcances del presente trabajo. Aquí nos limitaremos al análisis del bloque rocoso de mayor volumen que puede caber dentro de la cara expuesta de la excavación subterránea elegida.

2.1.6.- Longitud de traza de las discontinuidades:

Denominada continuidad o persistencia, se refiere a la extensión o tamaño de una discontinuidad. Este parámetro se cuantifica observando las longitudes de las superficies estudiadas en el afloramiento y sus dimensiones reales solamente pueden determinarse aproximadamente debido a las áreas muy limitadas de las excavaciones subterráneas.

Crudin (3), explicó en detalle las técnicas y problemas más asociadas con las mediciones de la longitud de traza, generalmente es muy dificultoso.

debido a las irregularidades de la roca expuesta y por las limitaciones de las dimensiones de una excavación subterránea.

El tamaño y forma de las discontinuidades raramente pueden ser bien examinadas, además que mediante el análisis detallado de éste parámetro nos ayudará a diferenciar las resistencias de una discontinuidad y la de la roca intacta circundante. Desafortunadamente no existen métodos directos de medición. Mc Mahon (9), concluyó que las frecuencias de persistencias de las discontinuidades más grandes observadas, es independiente de la frecuencia real de las discontinuidades.

Al igual que el espaciamiento, una longitud de traza puede graficarse en forma de histogramas y no necesariamente sigue un modelo particular, sino que podrá variar de acuerdo al tipo de roca y a la orientación de la cara rocosa expuesta.

En la práctica generalmente, se adapta las mediciones de la longitud de la semi-traza medidas por encima de la línea de muestreo, según el rumbo o el buzamiento y se evalúa las discontinuidades más persistentes. En interior mina, es recomendable estimar éste parámetro de acuerdo a las dimensiones de la abertura para ponderar su acción (> 50 cm). (2)

La longitud de traza, junto al espaciado de las discontinuidades definen el volumen y la forma de los bloques o cuñas rocosas en un macizo fracturado, que quedan expuestas en una abertura subterránea.

2.1.7.- Parámetros geomecánicos asociados a la resistencia de las discontinuidades

El comportamiento mecánico de una masa rocosa es descrito frecuentemente por su resistencia, deformabilidad y permeabilidad, este es resultado de la acción combinada del comportamiento tanto de la roca intacta como de las discontinuidades. En exposiciones relativamente cortas generalmente toda discontinuidad se le tipifica geoméricamente de forma

plana y de poseer baja resistencia y alta deformabilidad y permeabilidad que la roca intacta...(16)

Entre estos tipos de parámetros podemos considerar las siguientes: rugosidad, ondulación, terminación, longitud de traza, apertura, relleno, presencia de agua. Estas fueron definidas en el acápite [1.4.]

Las características geomecánicas de las discontinuidades asociadas a su resistencia al corte descritas arriba, son de mucha importancia práctica porque estos parámetros definen o controlan entre otros la resistencia al corte de las discontinuidades.

En cuanto a éstas características geotécnicas de las discontinuidades, no haremos un análisis rigurosos de los datos de campo, sino más bien tomaremos los valores de referencias, ya que el muestreo de campo va dirigido a un tipo particular de trabajo. Se ha preferido obtener los valores de resistencia al corte de cada familia de discontinuidades de tablas existentes que más se aproximan a las características geotécnicos de los tipos de discontinuidades. (16)

Sin embargo, dejamos constancia que lo óptimo es obtener estos valores directamente de los ensavos de corte directo en un laboratorio. (2)

Entendemos además, que un análisis detallado de estas características geotécnicas de las discontinuidades son muy útiles para determinar la calidad del macizo rocoso, lo que no es objeto del presente trabajo.

2.2.- Análisis de fuerzas y modelo de fallamiento:

En mecánica de rocas por lo general se estudia las fuerzas actuantes sobre un cuerpo sólido y sus efectos. Una fuerza es una cantidad vectorial que tiene orientación, magnitud y sentido. Una fuerza cualquiera de magnitud (R) podría representarse en término de trend y plunge (α β).

Los métodos de las proyecciones estereográficas, es una herramienta muy importante y una alternativa para la representación gráfica y análisis de las propiedades de orientación de vectores, , pero aún así pueden plotearse sobre una red estereográfica para su análisis geométrico. Esta metodología tiene la ventaja sobre los métodos vectoriales, porque facilita una visualización de la realidad física de un problema enfatizando la relación geométrica de las fuerzas asociadas.

(13)

2.2.1: Representación del Vector Fuerza:

Una fuerza puede representarse por medio de un vector (R) y quedar definida en términos de sus tres componentes cartesianas: R_x , R_y , R_z , teniendo como punto de inicio el origen del sistema de coordenadas, como se mostró en la figura 4.

Si se conocen las componentes cartesianas, pueden calcularse la fuerza resultantes (R), su magnitud $|R|$ y su orientación en función del trend plunge ($\alpha \beta$).

La magnitud de la fuerza resultante estará dada por

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2} \quad \text{..... (2.18)}$$

El trend (α) y plunge (β) por

$$\alpha = \text{Arc Tan} \frac{R_x}{R_y} = \alpha$$

$$\beta = \text{Arc Tan} \frac{R_z}{\sqrt{R_x^2 + R_y^2}} \quad \text{..... (2.19)}$$

Siendo (q) un ángulo que asegura que (α) se ubique en el cuadrángulo adecuado.

Conociendo el trend/plunge ($\alpha \beta$) de una fuerza, podemos entonces graficar como un punto sobre una proyección estereográfica con las siguientes normas y convención: (13)

- a.- En una proyección estereográfica, pueden graficar únicamente datos de "orientación" de una fuerza mediante puntos. En cuanto a su **magnitud**, sólo nos permite indicar adjunto a cada punto.
- b.- Por conveniencia, la componente (R_z) dirigida hacia abajo, se considera como positivo, de esta manera el plunge (β) también será positivo, todo lo contrario se toma como negativo.

En el caso de que la componente (R_z) sea negativo, las componentes originales (x,y,z) se multiplican por (-1) antes de aplicar las ecuaciones (2.19) así nos aseguramos que el plunge (β) siempre será positivo.

Las componentes cartesianas del vector (R) serán:

$$\begin{aligned} R_x &= S \cdot R \cdot \text{Sen } \alpha \cdot \text{Cos } \beta \\ R_y &= S \cdot R \cdot \text{Cos } \alpha \cdot \text{Cos } \beta \quad \dots\dots (2.20) \\ R_z &= S \cdot R \cdot \text{Sen } \beta \end{aligned}$$

Donde:

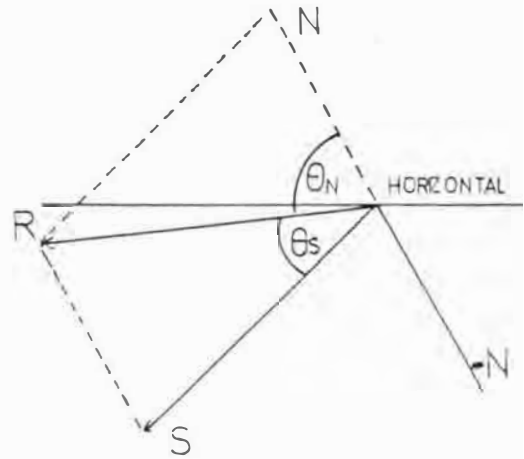
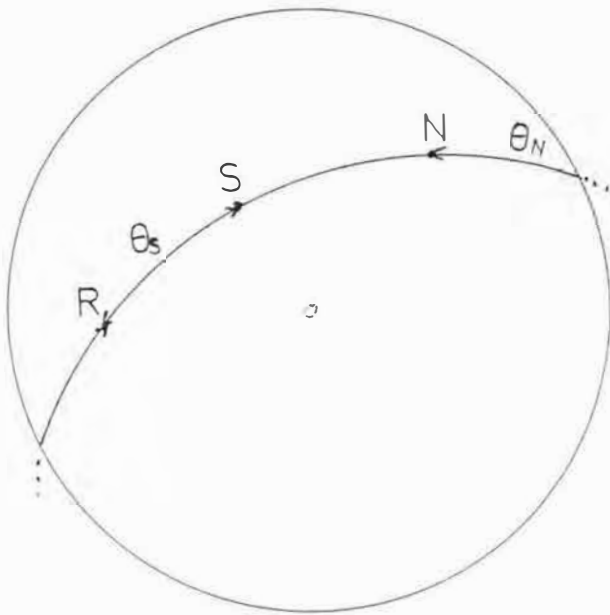
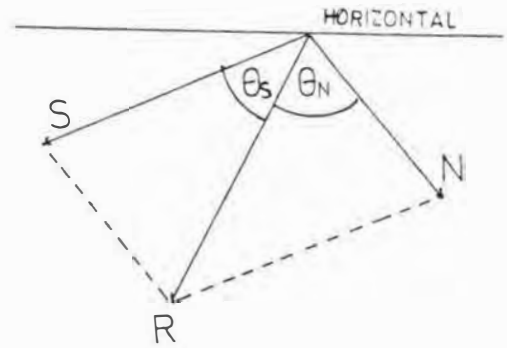
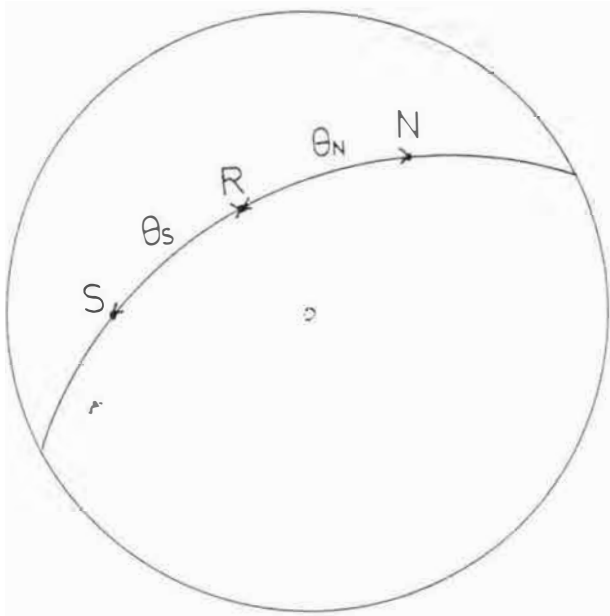
S = Indica el sentido de la fuerza. Es (-1) cuando la fuerza se dirige hacia abajo y es (+1) cuando la fuerza se dirige hacia arriba. Cuando la fuerza es horizontal es (+1) cuando actúa en la dirección especificada por el trend (α) y es (-1) si es opuesta a ésta dirección.

2.2.2.- Representación Estereográfica de fuerzas coplanares

Un problema frecuente en el análisis de fuerzas es la descomposición del vector fuerza resultante en dos componentes, resultando las tres coplanares, por consiguiente plotean en un mismo gran círculo que pertenece a un plano en las proyección estereográfica.

La representación gráfica por éste método provee una ventaja de dar directamente las magnitudes y sentidos de la fuerzas componentes, obviamente obedeciendo algunos principios como: (13)

- a.- Una fuerza resultante (R) y sus dos componentes (N, S) son siempre coplanares, cuando todos ellos pertenecen a un mismo gran círculo de un plano en una proyección estereográfica entendiéndose por gran círculo, la proyección sobre el plano horizontal de la red. de la intersección del plano de discontinuidad con la esfera del hemisferio inferior.
 - b.- Si ambos componentes tienen idéntico sentido, el punto de ploteo de la fuerza resultante, se ubicará entre los dos puntos de las fuerzas componentes del gran círculo, y las tres fuerzas tendrán un mismo sentido. Los ángulos que forman entre ellos (θ_N, θ_S) serán medidos internamente y directamente en el gran círculo.
 - c.- Si las componentes tienen diferentes sentidos el punto de la fuerza resultante ploteará a un lado del punto que representa a la fuerza componente que tiene el mismo sentido que la resultante en el gran círculo. El ángulo se medirá internamente, aquel que pertenece al mismo sentido de la fuerza resultante y externamente al que pertenece a la componente de sentido contrario a la resultante.
- Estos conceptos se visualiza mejor en los siguientes diagramas:



Cualquiera de las componentes tanto (N) como (S) pueden tener sentido contrario a la resultante. En todos los casos:

$$\theta_N - \theta_S = 180^\circ$$

La magnitud de (N) y (S) de acuerdo con la ley de los senos será:

$$\begin{aligned} & R \operatorname{Sen} \theta_N \\ S & \\ & \operatorname{Sen} (\theta_N - \theta_S) \\ & \dots\dots (2.21) \\ & R \operatorname{Sen} \theta_S \\ & \operatorname{Sen} (\theta_N - \theta_S) \end{aligned}$$

Un caso particular, es cuando las componentes (N) (S) forman un ángulo recto y estereográficamente (R) plotea entre los puntos (N) y (S) del gran círculo.

El valor de $\theta_N - \theta_S = 90^\circ$

convierte a la ecuación (2.21) en:

$$\begin{aligned} S &= R \operatorname{Sen} \beta_D \\ N &= R \operatorname{Cos} \beta_D \\ & \dots\dots (2.22) \end{aligned}$$

Donde:

$$\beta_D = \text{Buzamiento o plunge de (S)}$$

En este caso, ambos (N) y (S) tienen sentido de (R)

2.2.3.- Modelo de fallamiento en discontinuidades

La estabilidad o inestabilidad de las aberturas subterráneas y particularmente de los bloques rocosos, materia de análisis del presente estudio, depende de una parte de la orientación, magnitud y sentido de la

fuerza resultante, respecto a la orientación de la cara de la excavación y por otro lado del modelo o mecanismo de fallamiento de las discontinuidades que se adopte.

El comportamiento mecánico de las discontinuidades se analizan desde el punto de vista de su resistencia al corte y de su deformación, y los modelos más simples son obtenidas de las descripciones de las curvas de regresión, el cual consideran implícitamente el complejo mecanismo de resistencia y deformación de las discontinuidades. (16)

El presente trabajo nos referimos rápidamente al modelo de resistencia y específicamente a su mecanismo y los parámetros de resistencia al corte que en ella intervienen. Hay diferentes modelos desarrollados por muchos autores como: Coulomb, Morh, Landanyi, Barton, etc.

Uno de los modelos más simples y prácticos de resistencia al corte en los planos de discontinuidades es el desarrollado por Navier-coulomb y es el más ampliamente aceptado y utilizado.

Está basado en cierto modo sobre la magnitud de $|N|$ que viene a ser la fuerza normal compresiva efectiva (N) que actúa a través del plano de discontinuidad. A ésta fuerza se le denomina "Fuerza efectiva" y representa los esfuerzos combinados, en particular de la carga gravitacional y los efectos de la presión de agua... (2)

El modelo de resistencia al corte se asume cuando (N) es compresivo y la resistencia al corte (T) que se produce a través de los planos de discontinuidad sin sufrir significativo desplazamiento, está dada por:

$$T = C + A - N \tan \phi \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

Donde:

T = Resistencia al corte.

C' = Resistencia cohesiva efectiva promedio o intrínseca.

A = Area de la interfaces.

ϕ' = Angulo de fricción efectivo.

N = Magnitud del esfuerzo normal

Este modelo de resistencia al corte propuesta es la que usaremos en el presente trabajo.

Si (N) fuera una fuerza de tracción a través del plano de discontinuidad, entonces ocurre una separación entre los labios de la discontinuidad y no habrá mecanismo de deslizamiento y fallaría por tracción. Por otro lado, el parámetro de resistencia (c') representa la resistencia intrínseca al corte cuando el esfuerzo normal es cero. el valor de (c') depende mayormente del material de relleno o del cementante de las fracturas cuando se encuentran rellenas. o de la rugosidad de los labios de las fracturas cuando no están rellenas. El valor de (c'), teóricamente pueden variar desde cero hasta 700 KN/m^2 , pero en la práctica fluctúan entre 5 a 50 KN/m^2 , para muchos tipos de discontinuidades y de roca. (13)

El otro parámetro de resistencia al corte ϕ o ángulo de fricción interna efectiva, depende del tipo de mineralización y de la rugosidad de los planos de discontinuidades.

Los valores de los parámetros de resistencia al corte efectivo en discontinuidades son determinados mediante un adecuado programa de ensayos de campo y de laboratorio.

En el plano de discontinuidad se produce por efecto de las condiciones de fuerzas, esfuerzos cortantes (S) y éste de ninguna manera debe de exceder el valor de la resistencia al corte, para mantener el equilibrio del bloque rocoso. En caso contrario, habría deslizamiento y por lo tanto inestabilidad.

La relación (T:S) es una forma de medida del grado de estabilidad de una masa rocosa. cuando ésta relación excede la unidad. el bloque se considera estable. y mayores de la unidad implica más grado de estabilidad. Por lo contrario cuando son menores de la unidad. implican inestabilidad.

A la relación (T:S) normalmente se le denomina "Factor de seguridad " y se le refiere por el parámetro (F).

En excavaciones subterráneas. no es práctico dar un índice equivalente de estabilidad cuantitativa como en el diseño de taludes. Pero como es evidente que las necesidades de estabilidad tienen que aumentar de acuerdo a las categorías de una excavación este factor de seguridad para un simple plano de deslizamiento estará dado por: (13)

$$F = \frac{T}{S} = \frac{C \cdot A + N \cdot \tan \phi}{S} \dots\dots\dots (2.24)$$

Cuando se tratan de deslizamientos sobre dos planos de discontinuidades. el esfuerzo de corte que se genera será el que corresponde a cada plano y sus parámetros serán:

Plano 1: C_1', ϕ_1', A_1, N_1

Plano 2: C_2', ϕ_2', A_2, N_2

Luego el factor de seguridad será definido por:

$$F = \frac{C_1' \cdot A_1 + N_1 \cdot \tan \phi_1' + C_2' \cdot A_2 + N_2 \cdot \tan \phi_2'}{S} \dots\dots\dots (2.25)$$

Implícitamente estamos asumiendo un mismo factor de seguridad para ambos planos. Debemos aclarar que el factor de seguridad definida en las ecuaciones anteriores es meramente índice de estabilidad v válidos

solamente para el mecanismo de fallamiento asumidos. así como la forma de distribución de los esfuerzos.

2.3.- Metodología de muestreo de datos de campo:

2.3.1: Introducción:

La toma de datos de campo. tiene por objeto de dar a conocer las condiciones geológicas estructurales de la zona, materia de estudio. su geología regional y local. Por lo que se infiere los tipos de roca y su estructura en un área relativamente pequeña. forman parte de un modelo geológico, mucho mayor, que refleja el proceso geológico a gran escala de la región. porque de ello se deducen las tendencias estructurales que muchas veces pueden pasar desapercibidas. si solamente se tienen en cuenta la información detallada puntual de la masa rocosa. Para ello es importante localizar toda la información ya existente del área de estudio.

Cada mina tiene sus características geológicas propias. por lo que exige desarrollar su propia metodología de minado. basado en sus experiencias. obviamente perfeccionando cada vez más su tecnología.

Para un proceso de muestreo. la mina debe de zonificarse en unidades geológicas de similares características litológicas. es necesario seguir los siguientes: (11)

- a.- Dividir la mina (zonificar) de acuerdo a la litología.
- b.- Identificar fallas regionales.
- c.- Muestreo de Línea de Detalle en cada zona litológica.
- d.- Analizar datos y luego identificar los dominios estructurales (estas representan las mismas familias de discontinuidades y la misma litología) , secciones verticales. donde se muestran gráficamente la distribución espacial de cada dominio de la mina.

2.3.2.- Métodos de Muestreo:

En la actualidad existen diversos métodos disponibles para el muestreo de datos de discontinuidades, todos ellos tienen sus ventajas y desventajas, dependiendo del tipo de exposición, información requerida y de los objetivos que se persigue.

El método de Línea de detalle ofrecen muchas... ventajas, y se considera el método más popular fácil y apropiado para el muestreo de las propiedades geométricas de las discontinuidades. (5)

Otras variaciones de éste método, son el muestreo superficial, usando líneas circulares de detalle pero genera problemas de interpretaciones, especialmente cuando se analizan el espaciado de las discontinuidades.

2.3.3.- Muestreo por el método “Línea de Detalle”:

Este método es preciso y representativo si las orientaciones de las líneas son mutuamente ortogonales y sean seleccionadas sobre una suficiente longitud para cada área de estudio.

El levantamiento de campo resulta bastante detallado tanto en intensidad como en variabilidad en comparación con otros métodos, la objetividad de los datos y los análisis cuantitativos de los resultados ofrecen superioridad sobre otras técnicas de muestreo. (5)

Sin embargo, como cualquier otro método o modelo, existen algunos inconvenientes asociados con el levantamiento de “Línea de detalle” y han sido eficazmente aclarados. Terzaghi (15) analizó que para cualquier familia de discontinuidades, aquellas líneas de detalle con orientaciones casi paralelos al rumbo de las discontinuidades, muchas fracturas pasarían casi inadvertidas y por lo tanto no ser registradas en el muestreo. Además el espaciamiento entre discontinuidades pueden aparentar ser grandes por

lo que las correcciones serían muy excesivas. y recomendó para evitar todos estos inconvenientes. que las líneas de detalle deben orientarse en direcciones más o menos ortogonales y no habría que aplicar correcciones que de alguna manera pueden desmerecer el trabajo. (2)

Es necesario. distinguir las discontinuidades de origen natural de las discontinuidades producidas por efecto de la voladuras. Las longitudes de las líneas de detalle es muy importante. para que la toma de datos sea tal que los análisis de los resultados sean lo más precisos. Como regla. algunos autores recomiendan 30 metros para obtener 100 observaciones. (2) Hudson y Priest (8) recomiendan una longitud 50 veces el promedio de su espaciamiento, como para obtener una buena estimación de la frecuencia de discontinuidades. También ellos concluyeron que son necesarios 200 observaciones para producir un histograma de espaciamiento.

2.3.4.- Selección de la zona de muestreo:

La calidad de los resultados. generalmente dependen de una buena selección de la exposición de la roca. para ello es necesario seguir algunas recomendaciones de Harrinson J.M.(5):

- a.- Se selecciona la zona cuyas características litológicas nos permite realizar el análisis de estabilidad de bloques rígidos, o cuando el índice de calidad del macizo rocoso se encuentra en rangos donde la inestabilidad sea consecuencia de una geología estructural adversa.
 - b.- Las líneas de detalle se instalan de preferencia en las paredes verticales de la excavación. y no deben presentar protuberancias. de manera que la cinta quedan adheridas a la superficie rocosa.
 - c.- La orientación y números de "líneas de detalle", prácticamente van a estar limitadas por la orientación de las excavaciones subterráneas.
- Si las condiciones lo permiten. se pueden disponer orientados ortogonalmente para poder registrar el mayor número de datos.

- d.- La superficie rocosa debe ser en lo posible fresca. sin perturbaciones producidas por las ondas explosivas.
- e.- La localización de las líneas de detalle. deben estar lo suficientemente agrupadas. para asegurarse que todas ellas se ubiquen dentro del dominio estructural elegido.
- f.- Es recomendable que el lugar de trabajo sea seguro. y el personal debe ser lo suficientemente experimentado.

2.3.5.- Procedimientos de campo para el muestreo por el método de línea de detalle

En la zona de trabajo se sigue las siguientes pautas: (5)

- 1.- Se selecciona adecuadamente los instrumentos y el personal necesario para el levantamiento lineal.
- 2.- Se describe macroscópicamente el tipo de roca que debe concordar con el estudio geológico previo o existente. así mismo se reconoce y diferencian con símbolos especiales los tipos de discontinuidades como: planos de sedimentación, diaclasas, fallas, fracturas, etc. Todos ellos se registran en la respectiva hoja de muestreo.
- 3.- Luego cada línea de detalle elegido se le localiza en un determinado lugar designándolo por un número de referencia y cada área de mapeo por una letra. esto ayuda a la identificación y los análisis posteriores. La cinta de la línea de muestreo debe estar bien fijado y en la línea recta y en contacto directo con la superficie de la roca. midiendo la orientación de la cara de las rocas con una brújula Brunton. Es recomendable hacer diagramas de cada área de trabajo.
- 4.- La ubicación de la muestra a lo largo de la cinta de la línea de muestreo se hace anotando la intersección de la discontinuidad en el punto que marca la cinta. registrando los datos de orientación y los otros detalles. y así se hace sucesivamente con todas las discontinuidades a lo largo de la cinta. cuando la cara de la roca es lisa. el procedimiento se hace más fácil y rápido. por lo contrario. si presenta irregularidades. la cinta no entra en contacto entonces se

hace más dificultoso. La dirección de buzamiento y buzamiento de los planos de discontinuidades en el punto de intersección con la cinta se hace con una brújula.

- 5.- La longitud de la semitraza visible, se mide en la parte superior de la línea de detalle, ocasionalmente puede hacerse en la parte inferior, cuando la visibilidad es muy débil en la parte superior. Para línea de detalle verticales, esta medida se hace al lado derecho.
- 6.- Referente al tipo de terminaciones, únicamente se registran las terminaciones arriba de la línea de detalle. Hay 3 posibles tipos de acuerdo a los siguientes criterios:
 - (a) cuando las terminaciones no es visible, en el área de exposición, es decir son de dimensiones grandes.
 - (b) cuando termina en otras discontinuidades.
 - (c) cuando terminan o desaparecen en roca intacta.
- 7.- Las mediciones de la apertura de las discontinuidades se hacen generalmente usando conjuntos de láminas o gage (0.04 - 0.63 mm) introduciendo dentro de cada discontinuidad cuando éstas son pequeñas. Es importante tener en cuenta la presencia de alteraciones o intemperismos que pueden presentarse en los planos de discontinuidad.
- 8.- Para las mediciones de la rugosidad, se establecen perfiles lineales, colocando reglas graduadas, fijándolas firmemente a la roca, el perfil se mide a lo largo del rumbo y dirección de buzamiento.
- 9.- Cuando las discontinuidades contienen material de relleno que separan las paredes, se registran el espesor y el tipo de relleno que pueden ser: arcillas, calcitas, cloritas, yeso, etc.

Para cada una de las características geotécnicas de los planos de discontinuidades aludidas, existen nomenclaturas y convenciones adaptables para cuantificarlas en el momento de muestreo.

(ver anexoB)

CAPITULO III

3.- MUESTREO Y ANALISIS ESTADISTICO DE LA GEOMETRIA DE LAS DISCONTINUIDADES EN LA MINA ANIMON

3.1.- Introducción:

Como hemos venido acotando en el capítulo anterior, en el presente trabajo, se da especial énfasis al muestreo y análisis de las características geométricas de las discontinuidades de la masa rocosa, de tal manera de obtener promedios estadísticos de la dirección del buzamiento y buzamiento de cada familia de discontinuidades. Previamente al ploteo de polos, así como el agrupamiento en familias, se efectúa por métodos computacionales antes que el método manual de conteo de polos.

Así mismo, la toma de datos en la mina elegida, constituye más que un trabajo específico, una metodología aplicable a cualquier otro lugar cuyas características geotécnicas sean similares al modelo del macizo rocoso.

Para tener una idea del grado de fracturamiento de la masa rocosa, con los datos de localización de cada discontinuidad de cada familia, se ha calculado los valores promedios de espaciamiento de discontinuidades para cada familia, ya que tales resultados podrían servir para otros tipos de análisis adicional.

Por otro lado, no detallamos en el muestreo de los datos de campo, el análisis de los parámetros geotécnicos de las discontinuidades, como se dijo, se ha preferido usar los valores promedios de la resistencia al corte de cada familia de discontinuidades, especialmente de aquellos que potencialmente ofrecen mayores índices de fallamiento dentro de la excavación subterránea.

3.2.- Muestreo de los datos de campo:

3.2.1.- Características geológicas de la zona de estudio:

El lugar para el muestreo elegido fue la Unidad minera de Animón de la Cía Minera Chungar S.A., como una acción técnica complementaria a un Proyecto de Desarrollo del Nivel 270, cuyos trabajos topográficos estuvo a cargo de TRPM Ingenieros S.A. de quien es integrante el autor. Este trabajo de desarrollo del mencionado nivel se realizó en el mes de Junio de 1994.

UBICACION:

La zona pertenece al distrito de Huayllay, provincia y departamento de Pasco, cuyas coordenadas geográficas son:

Longitud Oeste 76° 25´

Latitud Sur 11° 00´

ASPECTOS GEOLOGICOS:

Localmente la zona presenta rocas calcáreas con contenido arcilloso y lutitas del cretáceo a las que sobreyacen las capas rojas del terciario inferior de aspecto medianamente fracturados.

La mina viene actualmente desarrollando el nivel inferior (270) que se inicia del Pique Montenegro hacia el Este, y su importancia radica, que será el nivel principal de extracción, drenaje y ventilación de la mina.

El levantamiento geológico estructural preliminar del Nivel 270 corresponde a la zona circundante a los Piques Montenegro y Auxiliar, donde presentan rocas calcáreas y lutitas fracturados, y comprende aproximadamente los límites de coordenadas topográficas locales:: 3810N a 3870N y 5400E a 5440E.

La abertura subterránea comprendida entre ambos Piques y el ramal NW del nivel 270 tienen las dimensiones de 3.0m x 3.0m de sección, es el lugar donde se instalarán la estación de baterías de locomotoras, tolvas de carguío y se construirán adicionalmente transversales para los pozos de bombeo. El inicio del ramal NE, lleva puertas de control de aire de ventilación y otros. Por ésta razón es que en ésta zona se ha localizado las tres líneas de muestreo (ver plano en el anexo).

Antes de la obtención propiamente de los datos, se hizo la limpieza de las paredes rocosas, se pintaron los puntos de travesía de la cinta, y eliminaron algunas protuberancias.

3.2.2.- Características de las “líneas de Detalle”:

En el área de estudio, ha sido levantado 3 líneas de detalle, cuyas características son:

LINEA DE DETALLE N° I:

Ubicación	Pique Auxiliar Crucero Sur
Coordenadas de punto inicial	3830.630 N 5440.400 E
Distancia horizontal	20 m
Superficie muestreada	:Cara Vertical Oeste
Orient. Lin. De Detl.	174 00
N° discontinuidades	70
Sección de la abertura:	3m. x 3.m
Condiciones	Tanto techo como las paredes presentan humedad leve y no llevan ningún tipo de sostenimiento.

LINEA DE DETALLE N° II:

Ubicación	Pique Auxiliar Crucero N.
Coord. punto inicial	3843.121 N 5438.110 E
Distancia horizontal	15 m
Superficie mapeada	Cara vertical Oeste
Orientación de línea de detalle	355 00
N° de discontinuidades	58
Secc. de la abertura	3m. x 3m.
Condiciones	Poca humedad, zona de estación de baterías, no está reforzada.

LINEA DE DETALLE N° III:

Ubicación	:	Pique Auxiliar C-NE
Coord. punto inicial	:	3852.550 N
	:	5439.800 E
Distancia horizontal	:	20 m
Superficie mapeada	:	Cara Vertical NW
Orientación de Línea de Detalle	:	025 / 00
N° de discontinuidad	:	50
Sección de la abert.	:	2.5m x 2.5m
Condiciones	:	Roca fracturada, poca agua casi igual a las anteriores.

Las orientaciones de las líneas de detalles (I) y (II) son más o menos similares, pero para mitigar los posibles errores por alineamiento hemos añadido la línea de detalle (III), aunque no satisface enteramente las recomendaciones de ser ortogonales, entre si ya que las orientaciones de las excavaciones no nos permite ofrecer tales condiciones óptimas, pero sí de límites permisibles de equidad para obtener el tamaño de muestras suficientes.

3.2.3.- Datos de Orientación de las discontinuidades:

De las respectivas hojas de las **líneas de detalle** de campo Tabla N° 18 figuran la dirección del buzamiento y buzamiento de los planos de las discontinuidades, se extrae estos datos y se les transforma en datos de orientaciones de las normales o polos de tales discontinuidades usando los procedimientos explicados en el Cap 2 acápite 2.1.2 mediante la ecuación (2.7) y se obtienen los datos tabulados en las tablas, 2, 3, 4;

TABLA N° 2

LINEA DE FALLA I: 174° 00° DATOS DE POLOS

N°	α_N	β_N	N°	α_N	β_N	N°	α_N	β_N
1	039	30	25	220	16	49	150	51
2	215	20	26	198	50	50	333	19
3	135	62	27	340	20	51	146	65
4	320	39	28	134	20	52	250	22
5	153	40	29	152	63	53	185	50
6	235	21	30	234	24	54	151	65
7	182	68	31	156	44	55	326	20
8	010	10	32	335	11	56	180	30
9	190	30	33	181	50	57	348	09
10	245	06	34	342	15	58	192	50
11	140	53	35	145	65	59	338	15
12	332	18	36	339	14	60	237	15
13	158	54	37	155	58	61	205	20
14	228	30	38	194	45	62	238	10
15	188	52	39	244	26	63	142	30
16	238	20	40	198	40	64	350	06
17	161	63	41	331	34	65	188	40
18	345	09	42	170	45	66	218	25
19	119	49	43	243	20	67	160	60
20	150	60	44	250	35	68	242	05
21	218	10	45	336	05	69	184	60
22	172	40	46	128	30	70	174	30
23	330	10	47	216	10			
24	165	60	48	170	50			

TABLA N 3 °

LINEA DE DETALLE - II: 355 00 DATOS DE POLOS

N°	α_N	β_N	N°	α_N	β_N	N°	α_N	β_N
1	050	40	21	192	60	41	167	66
2	340	28	22	321	12	42	234	14
3	194	50	23	161	68	43	180	40
4	241	25	24	215	35	44	333	32
5	162	50	25	160	60	45	187	45
6	332	23	26	333	20	46	230	18
7	118	30	27	207	27	47	135	60
8	240	24	28	245	22	48	330	19
9	183	40	29	120	45	49	170	60
10	221	19	30	186	40	50	235	28
11	156	60	31	190	65	51	140	40
12	226	20	32	228	10	52	347	20
13	188	14	33	150	45	53	191	22
14	352	18	34	350	05	54	170	20
15	159	45	35	200	34	55	343	12
16	238	29	36	345	05	56	182	40
17	175	49	37	188	59	57	337	15
18	359	18	38	220	50	58	155	50
19	189	65	39	150	40			
20	253	15	40	329	14			

TABLA N° 4

LINEA DE DETALLE III: 025 00 DATOS DE POLOS

N°	α_N	β_N	N°	α_N	β_N	N°	α_N	β_N
1	168	40	18	334	20	35	183	53
2	340	15	19	198	65	36	251	25
3	170	40	20	220	26	37	160	50
4	253	20	21	176	55	38	345	08
5	165	42	22	342	10	39	139	58
6	338	05	23	185	20	40	237	23
7	150	50	24	230	40	41	053	63
8	235	22	25	161	40	42	339	09
9	155	45	26	335	20	43	188	62
10	330	30	27	190	40	44	240	10
11	196	61	28	236	20	45	151	24
12	244	14	29	150	20	46	333	14
13	205	40	30	341	19	47	166	42
14	347	10	31	175	30	48	233	50
15	185	44	32	245	43	49	199	60
16	248	14	33	208	64	50	227	10
17	220	30	34	337	20	-	-	-

3.3.- Análisis estadístico de las orientaciones de los Polos de las Discontinuidades

En principio cada línea de muestreo pueden representarse en redes estereográficas separadas, luego se les compara para comprobar si representan al mismo dominio estructural. Si no hay tal coincidencia se vuelve a chequear los límites del dominio. Si los límites son correctos, se pueden graficar las muestras de todas las líneas de detalle en un mismo diagrama. (2)

El gráfico de los puntos que representan a las normales o polos pueden hacerse manualmente. Aquí lo efectuaremos utilizando el Diagrama Polar de ángulos iguales (ver. Fig. 17)

3.3.1.- Diagrama polar v número de familias:

Cada polo se gráfica como un punto, cuyas coordenadas cartesianas están dadas por las fórmulas de la Tabla 1, acápite 2.1.2. De ésta forma se tiene el diagrama de polos de la Fig 4.

De la inspección del diagrama de polos, podemos establecer los límites de sus agrupamientos, en éste caso, queda dividido en 3 zonas, cada uno representan familias de discontinuidades con límites de trend/plunge establecidos y con el número de discontinuidades como se muestra a continuación.

TABLA N° 5

SET	AGRUPAMIENTO DE POLOS		N° DE MUESTRAS (N)
	RANGO DE POLOS (NORMALES)		
	TREND (α)	PLUNGE (β)	
1	020 - 210	00 - 90°	92
	210 - 300	00 - 90°	44
3	300 - 020	00 - 90°	42

FIG. N° 04

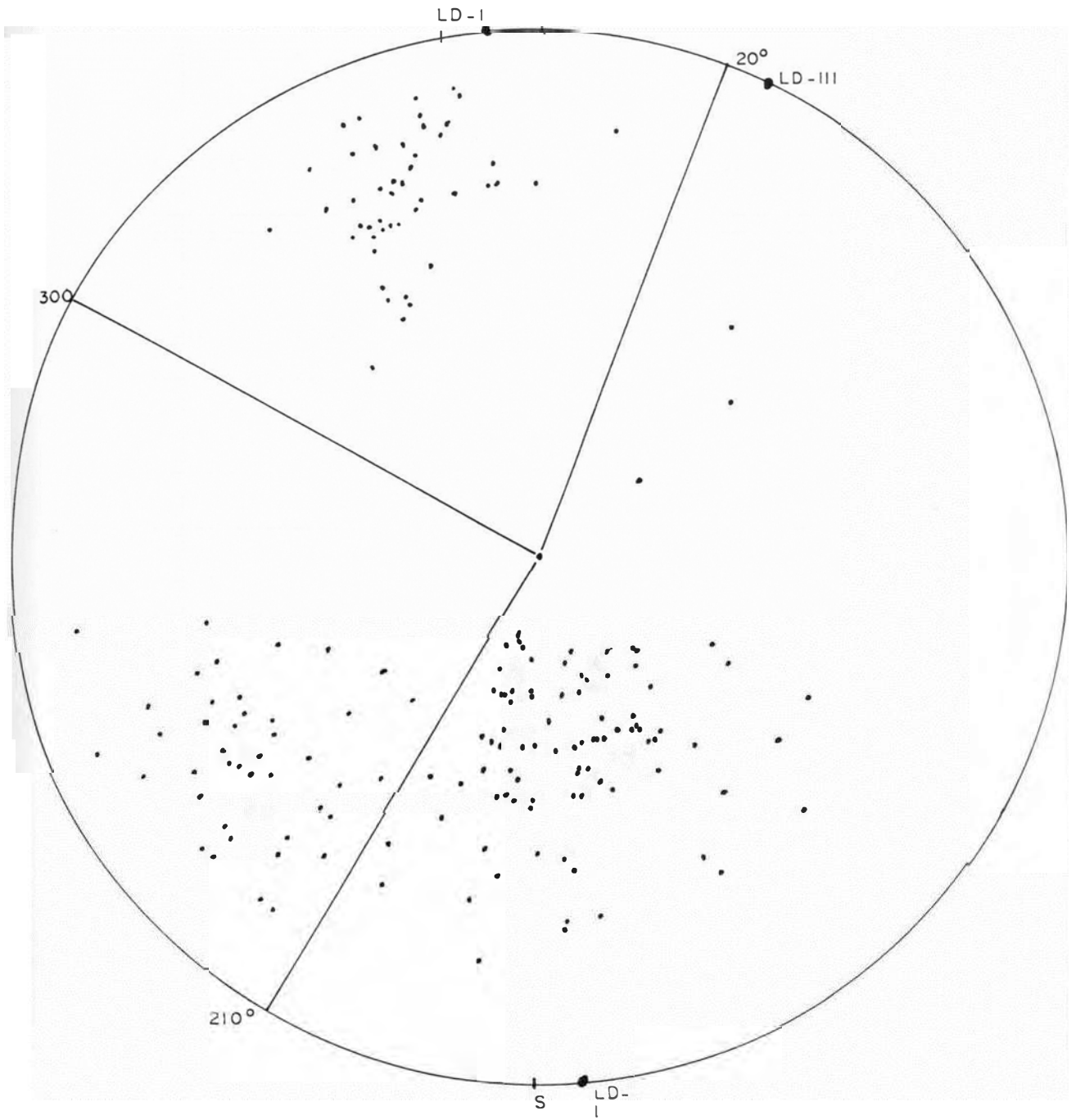


DIAGRAMA DE POLOS DE DISCONTINUIDADES

3.3.2.- Cálculo de la orientación media de cada familia de discontinuidades

Antes de realizar los cálculos para determinar el trend y el plunge promedios de cada familia de discontinuidades, es necesario corregir los datos de orientación de la línea de muestreo, dado a que no siempre es la más óptima para recoger los datos, y é ta corrección estará en función del ángulo agudo (δ) que hace la normal de cada discontinuidad con la línea de muestreo de acuerdo con el ítems (2.1.2) y dada por la ecuación (9.2.6). Como aquí, $\beta_S = 0$, esta ecuación se convierte en:

$$W = \frac{1}{\cos(\alpha_N - \alpha_S) \cos \beta_N}$$

Luego seguimos con los siguientes pasos:

- a.- Cálculo del factor ponderado (W_p) eee (2.6)
- b.- Cálculo de (N_w) ecuación (2.8)
- c.- Cálculo del factor normalizado eee. (2.9)
- d.- Cada polo representado por un vector (n) y de magnitud (W_p), luego se calculan sus componentes cartesianas dadas por: n_{ix} , n_{iy} , n_{iz} . Los cálculos se realizan para cada familia.

La tabla número 6.muestra estos resultados:

TABLA N° 6

RESUMEN DE LAS ORIENTACIONES DE POLOS

SET	RANGO DE POLOS		N° POLOS	CONSTANT. DE FISHER (K)	PROMEDIO DE POLOS	
	TREND	PLUNGE			TREND	PLUNG
	(α_N)°	(β_N)°			(α_N)°	(β_N)°
1				11.96	167.92	50.71
1 w	0.20 - 210	00 - 90	92	14.04	164.95	53.06
2				29.37	234.58	22.39
2w	210 - 310	00 - 90	44	31.23	237.47	22.58
3				19.76	337.77	16.74
3w	310 - 020	00 - 90	42	58.32	338.24	17.68

Del análisis de éste cuadro, se deduce que la familia (I) muestra una amplia dispersión de polos, puesto que el valor de la constante de Fisher (K) de 11.96 es relativamente bajo en comparación con las familias II y III de 29.37 y 19.76 respectivamente. También se calculó los promedios de la orientación, usando el factor de corrección para cada línea de detalle para cada familia que se indica con el subíndice (w).

Las tablas 7 y 8 dan los resúmenes de los resultados obtenidos:

TABLA N° 7

RESUMEN DE LOS PROMEDIOS DE ORIENTACION DE LOS
POLOS DE LAS DISCONTINUIDADES

SET	RANGO DE POLOS			PROM. DE POLOS	
	TREND (α_N)	PLUNGE (β_N)	N° POLOS	TREND (α_N)	PLUNGE (β_N)
1	020 - 210	00 - 90	90	166°	52°
2	210 - 310	00 - 90	44	236°	22,5°
3	310 - 020	00 - 90	42	338°	17°
			178		

TABLA N° 8

RESUMEN DE LOS PROMEDIOS DE ORIENTACION DE LOS
PLANOS DE DISCONTINUIDADES

SET	RANGO - ORIENT.			PROM. ORIENTACION	
	TREND α_D	PLUNGE β_D	N° DISCONT.	TREND α_D	PLUNGE β_D
1	200 - 030	00 - 90	92	346°	38°
2	030 - 130	00 - 90	44	056°	67,5°
3	130 - 200	00 - 90	42	158°	73°
			178		

3.4.- Cálculo del valor promedio de espaciamiento de cada familia

Una buena aproximación es determinar el número de discontinuidades de cada familia en cada línea de detalle. esto se determina a partir de la hoja de muestreo de campo.

Luego se determina el ángulo (δ) que hace cada línea de muestreo con la orientación promedio de cada familia. La ecuación (2.6) se transforma en:

$$\delta = \text{Arc Cos} [\text{Cos} (\alpha_N - \alpha_S) \text{Cos} \beta_N]$$

El espaciamiento promedio de las discontinuidades en cada línea de detalle se calcula por: (8)

$$E = \frac{D \text{Cos} \delta}{N}$$

Siendo:

E = Espaciamiento promedio por línea de muestreo.

D = Longitud de la línea de detalle.

N = Número de discontinuidades.

De conformidad con esto obtenemos los resultados [tabla 9]

Este cálculo es importante. porque conociendo los espaciamiento promedios. podemos determinar la frecuencia aproximada de las discontinuidades de cada familia para calcular el grado de fracturamiento o el índice volumétrico de las discontinuidades de la masa rocosa.

TABLA 9

PROMEDIO DE ESPACIAMIENTO

SET	SCANLINE		ANGULO (δ)°	ESPACIAM (m)	ESPAC - PROMD. E
	Nº	D			
1	1	20	52.43	0.33	0.34
	2	15	52.55	0.29	
	3	20	61.40	0.40	
2	1	20	64.30	0.50	0.72
	2	15	63.40	0.52	
	3	20	37.60	1.13	
3	1	20	23.20	1.15	1.07
	2	15	23.86	0.98	
	3	20	49.30	1.08	

3.5.- Determinación y análisis de los parámetros de resistencia al corte de los planos de las discontinuidades

De conformidad con las características geotécnicas de los planos de discontinuidades de cada familia, los que aparentemente pueden causar dificultades de inestabilidad es la familia de fracturas (2) por presentar supuestamente planos de estratificación, pizarrosidad, y el set (3) que presentan características de diaclasamiento cerradas. La familia (1) son fracturas pequeñas de orientación muy dispersa con terminaciones muy variadas por lo que representaría poca importancia en el comportamiento de la masa rocosa.

Por otro lado, debido a la falta de disponibilidad y facilidades para obtener los datos de resistencia directamente de los ensayos de laboratorio hemos recurrido a obtenerlas de tablas ya tabuladas que existen de numero os autores (Kulhawy, Deere, Miller, Barton, etc.) que cuidadosamente se ha analizado y finalmente seleccionado de acuerdo a las particularidades de la roca . "método Kicking the rock" .(16) y solamente tomados los valores de los parámetros de resistencia al corte como, la cohesión y el ángulo de fricción interna para aplicar el modelo de fallamiento elegido para los planos de discontinuidades. Para el caso de valores picos se presenta la siguiente tabla de valores.

TABLA N° 10

V. ALORESDE LOS PARAMETROS DE RESISTENCIA
AL CORTE EFECTIVA (c' , θ')

SET	COHESION - EFECTUA C' (KN / m ²)	ANG. DE - FRICC. EFECT. ϕ °
2	49.00	31°
3	72.00	38°

CAPITULO IV

4.- EVALUACION CINEMATICA DE LA ESTABILIDAD DE BLOQUES ROCOSOS DE LA MINA ANIMON

4.1.- Introducción.-

Una vez analizados los datos de campo, determinando el número de familias, espaciamentos, resistencias, etc. es importante investigar los efectos que producen los sistemas de discontinuidades más grandes y persistentes, cuyas combinaciones pueden producir o contribuir a formar bloques de rocas de diferentes tamaños y formas, propensos a formar zonas de inestabilidad, lo que nos induce hacer un análisis del comportamiento de la geometría del bloque y los mecanismos de fallamiento con relación a la geometría y orientación de la excavación subterránea. Para ello es necesario postular un mecanismo de fallamiento y definir su grado de estabilidad. Para efectuar este tipo de análisis, existen diferentes métodos.

- a.- Método vectorial: que utiliza el álgebra vectorial.
- b.- Método de las proyecciones estereográficas: desarrolladas por Brady Brown
- c.- Métodos mixtos: que viene a ser una combinación del método gráfico de proyecciones estereográficas y el método vectorial, desarrolladas por Goodman - Genha bloques claves.(4)
- d.- Método de proyecciones estereográficas sobre superficies de la excavación: desarrolladas por S. Priest que utilizan rotaciones estereográficas. (13)

4.2.- Métodos de las Proyecciones estereográficas paralelo a la superficie de la excavación

El principio de todo método estereográfico es la representación de una figura de tridimensional en una superficie bidimensional, llamada "área de proyección", este área es un círculo horizontal, producto de la intersección de un plano horizontal con una esfera, ejemplo la representación de un plano mediante un punto. Por conveniencia utilizaremos los puntos de la semiesfera inferior proyectados en el círculo horizontal.

El método de análisis propuesto, exige que el círculo de proyección sea paralelo a la superficie expuesta de la excavación subterránea y esto se consigue mediante una adecuada rotación de la proyección estereográfica. Existen dos tipos de redes de proyección estereográfica comúnmente usadas en ingeniería: la de áreas iguales de Lambert Schmidt y la de ángulos iguales o de Wulff llamadas propiamente redes estereográficas. Aquí usaremos la red de ángulos iguales, (ver. fig.18) por la razón de que para representar los grandes círculos de los planos de discontinuidades, se hacen más fáciles y rápidas utilizando un compás. Se deja constancia que puede utilizarse indiferentemente cualquiera de los 2 tipos ya que al final no muestran diferencias substanciales, sobre todo teniendo en cuenta los objetivos que se persigue.

Por otro lado, para delimitar un bloque de roca, se requiere por lo menos la concurrencia de 4 planos, dando lugar a la formación de un tetraedro, como la forma más simple de todas las figuras geométricas. De los 4 planos, 3 pertenecen a diferentes familias de discontinuidades el cuarto corresponde a la superficie libre de la excavación y representa la base del tetraedro. Esto da motivo a diferentes grados de inestabilidad, en otras palabras, cuando no hay abertura no hay desequilibrio o inestabilidad.

En el análisis de bloques rígidos, postulamos dos mecanismos simples de fallamiento: (13)

- a.- Desprendimiento vertical del bloque a través del espacio libre de la excavación, y
- b.- Deslizamiento del bloque a través de uno o dos planos, o simplemente a través de la línea de intersección de dos planos..

4.2.1.- Posibilidad Cinemática v Congruencia:

Asumimos que la cara libre expuesta de una excavación subterránea, tenga característica planar y el espacio tridimensional queda dividido en dos semi-espacios: Uno, el constituido por la roca propiamente, y el otro por el espacio libre creado por la excavación. El semiespacio constituido por la roca puede

tipificarse además en otros dos tipos: "colgantes" que corresponden a los techos y paredes verticales y los "no colgantes" referidos a pisos y bancos.

Para el análisis de estabilidad de cuerpos rígidos rocosos, expuestos sobre una cara libre de una excavación subterránea originada por la ubicación y orientación de las familias de discontinuidades más la cara libre de la excavación, definirán los bloques tetraédricos potencialmente inestables, que pueden caer en dicha superficie, definiendo así los "bloques críticos" que tienden a deslizarse hacia el espacio libre y bloque no críticos que se dirigen hacia el interior de la masa rocosa (ver figura N° 5).

En el análisis de "bloques críticos" es importante definir y diferenciar entre: "Inestabilidad potencial" e "Inestabilidad real o verdadera".

Un bloque es considerado "potencialmente inestable" si físicamente puede ser removido o extraído de la masa rocosa sin perturbar a la roca adyacente y se dice que es "cinemáticamente posible", desde que su inestabilidad potencial es evaluada sobre su "libre movimiento" sin tener en cuenta a las fuerzas que pueden causar su remoción.

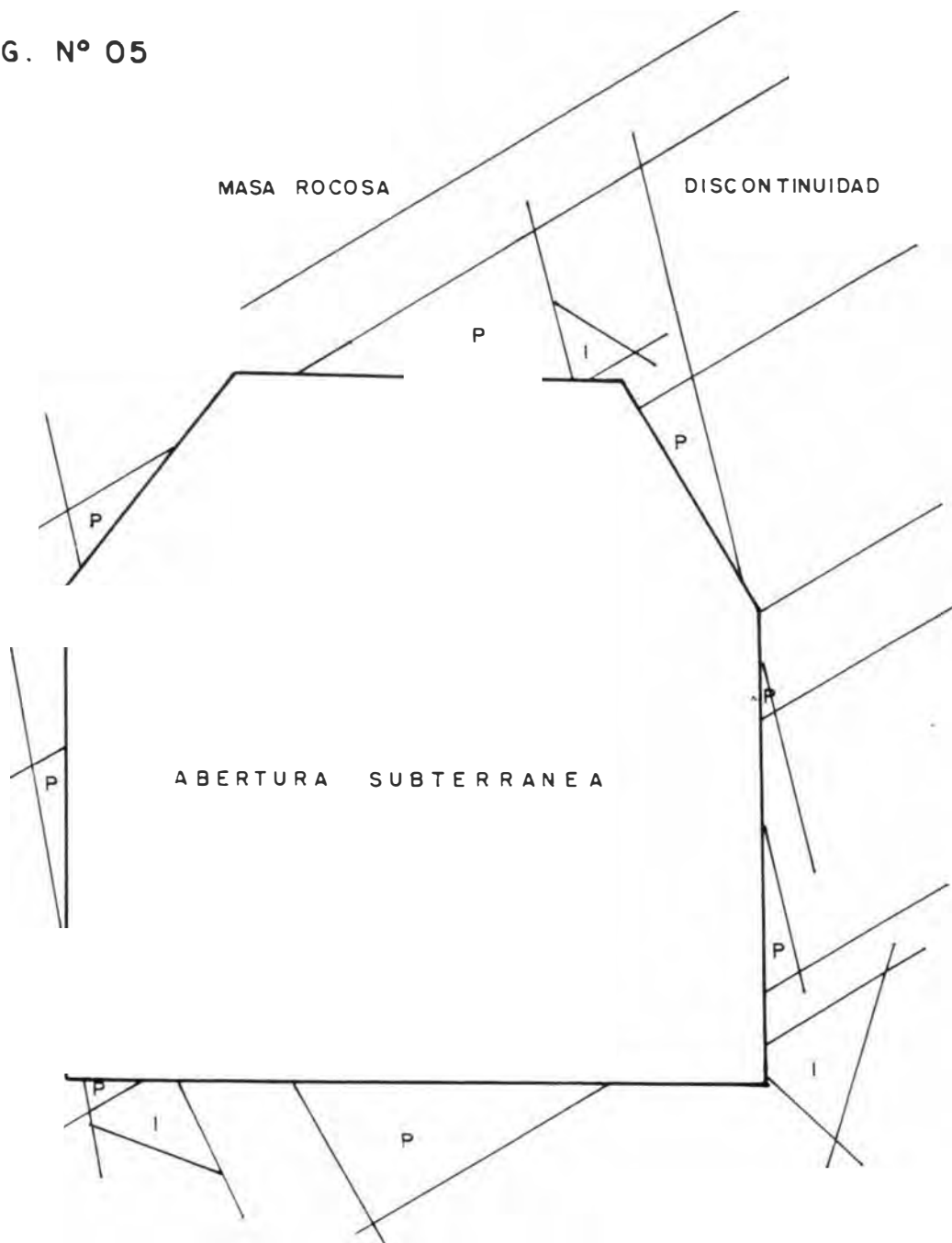
Por otro lado, un bloque rocoso, es realmente inestable, cuando además de ser cinemáticamente posible, las fuerzas tendientes a removerlas de la masa rocosa, exceden a aquellas fuerzas que tienden a mantenerlas en su lugar...

Los conceptos de posibilidad cinemática, pueden visualizarse mejor, mediante la siguiente figura: N° 5.

En todo análisis de éste tipo, el problema inicial consiste en descubrir o localizar la posición relativa de grupos de 3 planos de discontinuidades que definen un bloque tetraédrico sobre una cara libre y que sean cinemáticamente posibles.

Ello se consigue graficando en una red estereográfica los grandes círculos de los planos de las discontinuidades, estos se interceptan formando triángulos

FIG. N° 05



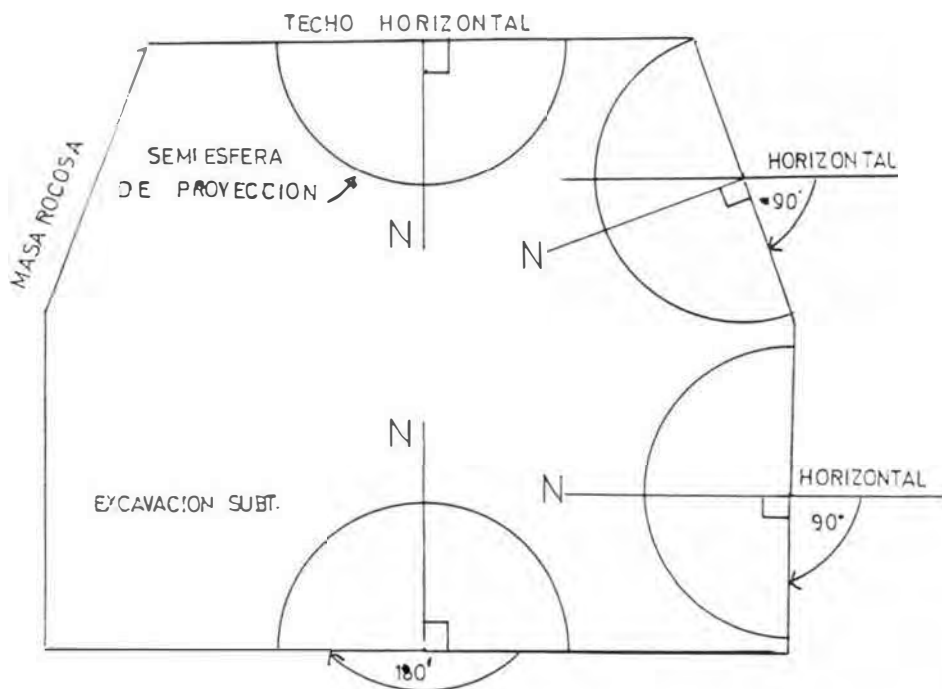
P = Posible de moverse (críticos)

I = Imposible de moverse (no críticos) no genera posibilidad cinemática

BLOQUES RIGIDOS ALREDEDOR DE LA EXCAVACION

esféricos cuyos lados coinciden con la posición física de sus respectivos planos, delimitando así un bloque tetraédrico cinemáticamente posible. A esta importante propiedad se le denomina "Congruencia cinemática". Esto ocurre cuando se dan las siguientes Condiciones cinemáticas dadas para una proyección estereográfica: (13)

- a.- El área de proyección estereográfica debe ser paralela a la cara de la excavación.
- b.- La proyección hemisférica debe ser convexa hacia el lado libre o semi-espacio libre, conforme indica en el siguiente diagrama:



Para el caso del semi-espacio rocoso de cara colgante horizontal de una excavación subterránea, el plano de proyección estará representado por la cara de la roca (bóveda) y el bloque estaría dentro de la masa rocosa, teniendo como base del tetraedro la bóveda de la abertura y el hemisferio inferior de proyección se ubicaría en el semi-espacio libre de la excavación.

Cuando se trata de semi-espacio rocoso colgante No horizontal y de semi-espacios No colgantes, la generación de sus respectivos triángulos esféricos

congruentes cinemáticamente con la cara dada conducen al procedimiento que necesariamente involucra ROTACION o giro de la proyección hemisférica para poder cumplir con la primera condición cinemática de proyección propuesta.

El valor de este ángulo de giro dependerá del buzamiento de la cara de la excavación. En general, si la cara libre tiene un ángulo de buzamiento (β) el ángulo de giro (δ) será:

$$\delta = \beta \quad \text{Para caras colgantes} \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

$$\delta = (180 - \beta) \quad \text{Para caras no colgantes}$$

Es necesario aclarar que, durante esta rotación la orientación absoluta, tanto de los planos de las discontinuidades, la cara de la excavación y de las otras características físicas de la masa rocosa permanecen inalterables.

Así, la línea normal a la cara expuesta (N_f) rotará hasta ubicarse en el centro de la red. Esto solo puede conseguirse rotando alrededor de un eje o charnela que viene a ser el rumbo de dicha cara y se consigue haciendo coincidir el rumbo con el eje Norte-Sur de la red. Este procedimiento genera 2 sentidos diferentes de rotación para llevar (N_f) al centro de la red. El sentido correcto es regido por la segunda condición cinemática de proyección: "que la semi-esfera de proyección debe ser convexa al lado libre de la cara de excavación".

Para una cara de excavación colgante, el ángulo de giro (δ) es siempre agudo y para llevar (N_f) al centro de la red, se consigue trasladando (N_f) en el sentido tal que su trayecto al centro de la proyección sea directo.

Si la cara de la excavación no es colgante, el ángulo de rotación (δ) es siempre obtuso, por lo que (N_f) primero debe rotar al perímetro de la red y luego por el extremo diametralmente opuesto llegar al centro de la red.

Si la cara de excavación es vertical, el ángulo de rotación (δ) es de 90° , la posición inicial de (N_f) es el perímetro de la red, por lo que hay 2 posiciones que satisfacen esta condición, en éste caso primero se plotea (N_f) en el perímetro que corresponde a semi-espacio libre, luego se gira al centro de la red estereográfica.

Cualquiera que sea la orientación de la cara de la excavación, la característica esencial de toda rotación, es de que todos los otros puntos (datos) de la proyección, deben ser rotados en la misma magnitud angular de giro (δ) alrededor del mismo eje y en el mismo sentido.

Durante ésta etapa de ploteo, es mucho más fácil y simple rotar "puntos" antes que intentar rotar grandes círculos.

Cuando una proyección estereográfica se construye satisfaciendo las condiciones cinemáticas para una cara dada, cualquier triángulo esférico sobre esta proyección será cinemáticamente congruente con el bloque tetraédrico, facilitando visualmente la geometría de la Posibilidad cinemática de los bloques tetraédricos y estén directamente relacionados con la geometría de sus triángulos correspondientes de la proyección hemisférica.

En todos los casos, la posición teórica del observador, estaría dentro de la masa rocosa, mirando desde el interior hacia afuera, hacia el espacio libre perpendicularmente a la superficie de la cara.

4.2.2.- Metodología de Grafico de Datos:

Primero:

Sobre la red estereográfica se plotean todos los puntos (datos) de las discontinuidades, previa nomenclatura, como:

- Las normales o polos de cada set de discontinuidades ($N_1, N_2, N_3 \dots N_n$)
- Las líneas de máxima pendiente, representados por el punto medio de los grandes círculos ($D_1, D_2, D_3 \dots D_n$).

- La dirección del rumbo de la cara de la excavación (Sf).
- La normal o polo de la cara de la excavación (Nf).
- La línea de máxima pendiente de la cara de la excavación (Df).
- La normal al plano horizontal (Nn) que se plotea en el centro de la red.

Segundo:

Se identifica el tipo de la cara de la excavación si es colgante, no colgante, deduciendo si es necesario rotar o no..

Tercero:

Si no es necesario rotar, se plotea ciclográficamente los grandes círculos de las distintas familias de discontinuidades, así como el plano horizontal a partir de sus respectivos polos o normales.

Cuarto:

Si es necesario rotar, conocido el buzamiento de la cara, se determinan el ángulo de giro (δ) de acuerdo con las ecuaciones (5.1) y como sigue. La dirección del rumbo de la cara de la excavación se superpone sobre el diámetro Norte-Sur de la red. Si el ángulo de giro (δ) es agudo (cara colgante) el sentido de rotación es tal que (N_f) se mueve un ángulo (δ) a través del diámetro Este - Oeste, directamente al centro de la red, si el ángulo de giro (δ) es obtuso (cara no colgante), (N_f) rota primero al perímetro y luego reingresa por el lado diametralmente opuesto de la red.

Si el ángulo de giro (δ) es de 90° (cara vertical), (N_f) inicialmente es ploteado sobre el lado libre del perímetro, luego es girado directamente al centro de la red.

A todos los puntos rotados, colocamos el subíndice (r) para diferenciar de los puntos originales no rotados.

Las líneas de máxima pendiente rotados (D_{1r} , D_{2r} ... D_{nr}) siempre plotearán en un punto ubicado a lo largo de su respectivo gran círculo.

únicamente en algunas circunstancias especiales, plotean en el punto medio del gran círculo.

Todos los otros puntos (datos) son rotados a lo largo de los pequeños círculos en el mismo valor del ángulo de giro (δ) y en el mismo sentido..

Cualquier punto que sobresale del perímetro de la red, su rotación continua después de reingresar por el lado diametralmente opuesto. La línea de máxima pendiente de la cara rotada (D_{f}) siempre termina sobre el perímetro de la red.

Una vez rotados todos los puntos, se procede como en el punto tercero.

Los resultados de estos análisis para el Nivel 270 de la mina Animón, se representan en las figuras N° 6 y 7. Para ello se han elegido las superficies de la excavación siguiente:

1er. CASO: La bóveda de la excavacion, para el crucero Norte Sur v no necesitará rotación.fig. 6.

2do. CASO: La pared vertical para la misma zona, v que necesariamente necesita rotación ($\delta = 90^\circ$) fig. 7.

4.2.3.- Interpretación geométrica:

Cada triángulo esférico sobre una proyeccion estereográfica es cinematicamente congruente con el bloque tetraédrico asociado a una cara dada. Esto significa que el plano de proyección (área de la red) es paralelo a la cara de la excavación. El centro de la proyección representa la normal a la cara y consecuentemente es paralelo al "eje normal" del bloque.

La intersección de los grandes círculos de 3 planos de discontinuidades dan las 3 aristas, delimitando así el triángulo esférico congruente.

FIG. N° 6

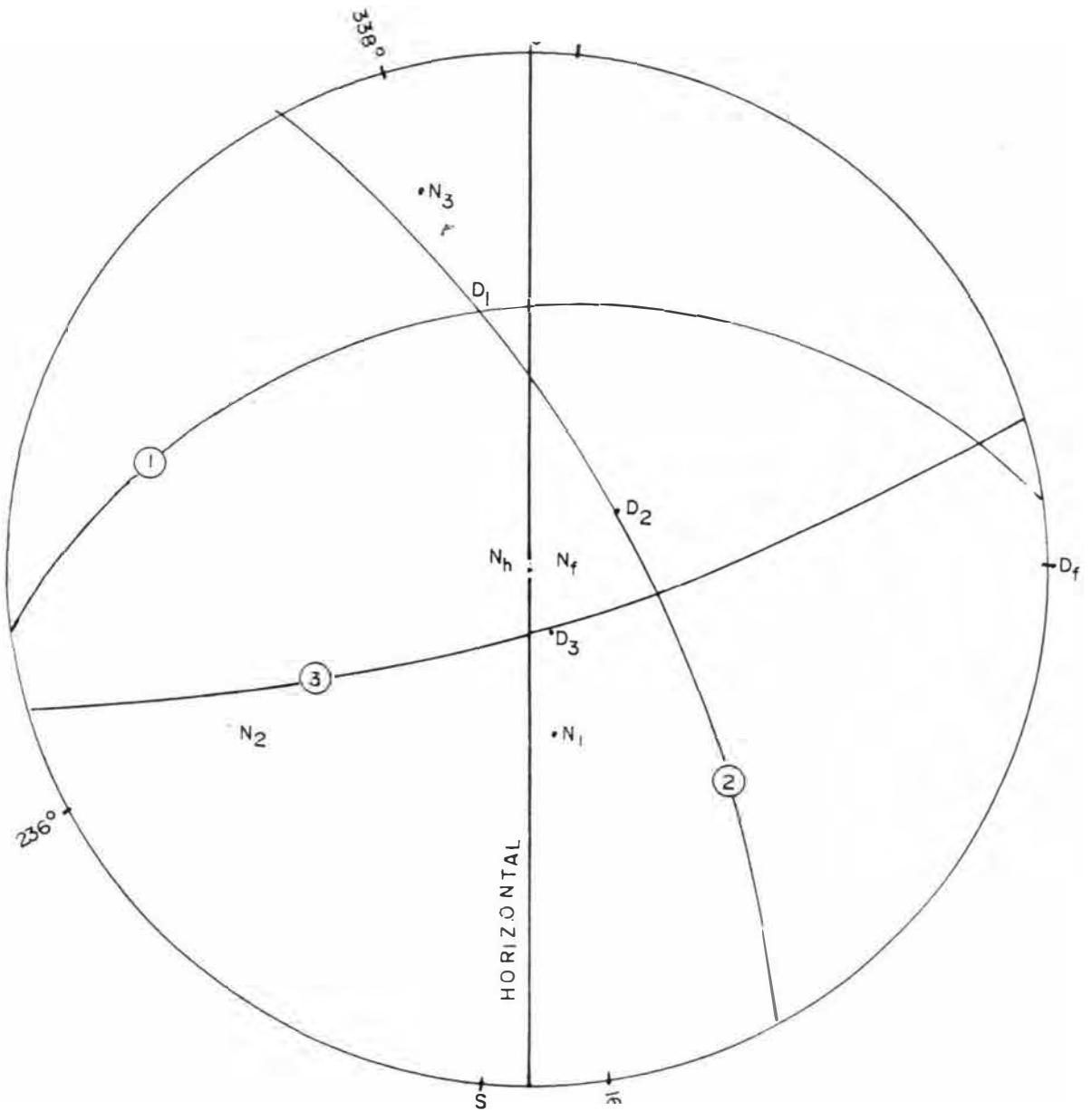


GRAFICO DE PUNTOS EN EL ESTEREOGRAMA
PARA LA BOVEDA DE LA EXCAVACION

FIG. N° 7

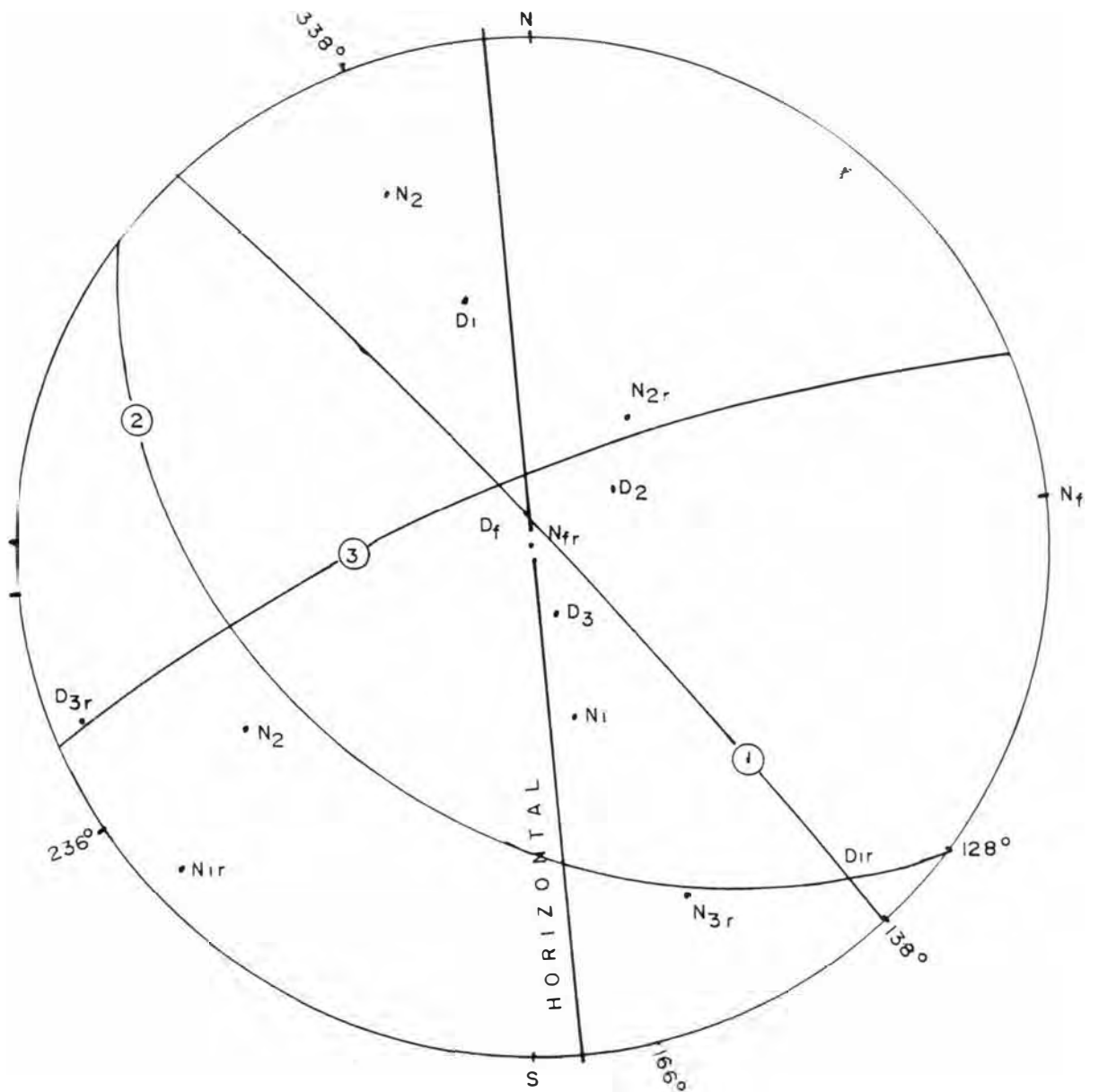


GRAFICO DE PUNTOS Y ROTACION DEL ESTEREOGRAMA
PARA LA PARED VERTICAL DE LA EXCAVACION

Cualquier diámetro de la proyección representa el gran círculo de un plano normal. Por otro lado, un triángulo esférico puede considerarse como el generado por las "líneas de superficie", (13) del bloque, entendiéndose esto como la intersección del plano normal a la base del tetraedro con cualquiera de los lados triangulares del tetraedro (las aristas constituyen casos especiales de la "línea superficial").

Por lo que cualquier bloque que se deduce a ser inestable por deslizamiento, debe deslizarse a lo largo de una "línea superficial" del bloque.

Cuando la línea rotada de máxima pendiente (D_{\mp}) de la cara de la roca, se superpone en el azimut Sur de la red, el rumbo de la cara de excavación se colocará sobre el diámetro Este-Oeste de la red, de éste modo el gran círculo del plano horizontal rotado, divide a la red de proyección en 2 zonas: Uno arriba y otro abajo de la horizontal rotada..

La línea de máxima pendiente rotada (D_{\mp}) de la cara, sirve para diferenciar esta 2 zonas, desde que éste plotea debajo de la horizontal y cualquier punto que plotea en el mismo lado a (D_{\mp}) ploteará debajo de la horizontal y cualquier punto que plotea sobre el lado opuesto a (D_{\mp}) ploteará arriba de la horizontal.

Los puntos originales del: norte, sur, este y oeste, son interpretados como: arriba, debajo, derecha e izquierda respectivamente en el plano de la cara inclinada. Por consiguiente, cualquier línea representada por un punto sobre la proyección que plotea debajo del plano horizontal rotado, la línea es interpretada como dirigida hacia abajo, hacia el espacio libre, cuando el punto plotea arriba del plano horizontal rotado, la línea se interpreta como dirigida hacia arriba, hacia el espacio libre. (13)

Por otro lado es de vital importancia, registrar el sentido de las fuerzas actuantes de acuerdo a su orientación y sentido. Una fuerza resultante (r)

puede considerarse dirigida hacia afuera, hacia el espacio libre o hacia el interior de la masa rocosa.

Para evaluar éste sentido, primero se plotea las fuerzas sobre la red estereográfica representados por un punto (r) luego se rota de acuerdo con el valor del ángulo de giro (δ) y se obtiene la posición rotada (r_r). La tabla número 11 puede visualizar el sentido de las fuerzas.

TABLA N° 11

INTERPRETACION DEL SENTIDO DE UNA FUERZA RESULTANTE SOBRE UNA PROYECCION ESTEREOGRAFICA

SENTIDO DE LA FUERZA (r)	POSICION (R_R) SOBRE LA PROYECCION HEMISFERICA INCLINADA	
	PLOTEA ARRIBA DEL PLANO HORIZONTAL	PLOTEA DEBAJO DEL PLANO HORIZONTAL
Sentido hacia arriba.	Fuerza dirigida hacia afuera hacia el espacio libre.	Fuerza dirigida hacia el interior del macizo rocoso.
Sentido hacia abajo	Fuerza dirigida hacia el interior de la masa rocosa	Fuerza dirigida hacia afuera hacia el espacio libre.

4.2.4.-Comportamiento de bloques rocosos bajo la acción de fuerzas gravitacionales

Dado las circunstancias del lugar de muestreo respecto al contenido de humedad, relativamente bajo, hemos simplificado el modelo y considerado al macizo rocoso relativamente seco, y calculado la fuerza resultante sin tener en cuenta el efecto de la presión de agua dentro de las discontinuidades, a sabiendas que la presión de agua en magnitudes

considerables de hecho varían el grado de estabilidad de las estructuras subterráneas.

Por lo expuesto, solamente consideramos la acción de las fuerzas gravitacionales, el vector (r) de la fuerza resultante, tiene una dirección vertical con un sentido hacia abajo. La orientación de (r_r) sobre la red estereográfica paralela a la superficie de excavación, estará dada por la vertical rotada $(N_{hr} = r_r)$. Para cualquier cara colgante $(r_r$ o $N_{hr})$ plotea debajo de la horizontal y estará dirigida hacia afuera, hacia el espacio libre y para cualquier cara No colgante $(r_r$ o $N_{hr})$ ploteará arriba de la horizontal y estará dirigida hacia el interior de la masa rocosa. La cara vertical se considera colgante en este caso. El plano horizontal es el lugar geométrico de puntos que hacen un ángulo de 90° con (N_{hr}) . (13)

La relación entre la geometría del bloque y la orientación de la fuerza resultante se expresa en términos del ángulo (θ) medidos desde (N_{hr}) o (r_r) al punto (L) ubicado en una "línea superficial" del bloque sobre el perímetro del triángulo esférico asociado.

Este ángulo (θ) es medido internamente a lo largo del diámetro que contiene a (N_{hr}) o (r_r) y a (L) y se encuentra en el rango de $(0^\circ < \theta < 180^\circ)$. De manera que sobre un triángulo esférico dado siempre existirá la posibilidad de un punto único (L_{\min}) asociado a un valor mínimo del ángulo (θ) y otro punto (L_{\max}) que hace máximo el ángulo (θ) . Cualquiera de estos puntos pueden ubicarse sobre un lado o en un vértice del triángulo esférico lo que dependerá de la orientación que tenga (N_{hr}) y la geometría del bloque.

Existen 6 condiciones para determinar los valores de (L_{\min}) y (L_{\max}) sobre un triángulo esférico dado. Los primeros 3 posibles valores, se ubican sobre cada una de los lados del triángulo esférico donde cada lado es intersectado por el diámetro que contiene a (N_{hr}) o (r_r) y a la normal rotada (N_r) de dicho plano, ya que estas líneas son coplanares con la

normal asociada y la fuerza vertical resultante. Por lo contrario, si uno de estos puntos no corta al triángulo esférico, debe descartarse, porque No representa una línea superficial del bloque.

Los otros 3 posibles valores restantes, son los vértices del triángulo esférico, el cual representa las 3 esquinas del triángulo. Sin embargo, en muchos casos identificar (L_{\min}) y (L_{\max}) es relativamente fácil, simplemente inspeccionando las líneas de máxima pendiente de los planos o lados y las esquinas de los triángulos esféricos.

Las posibles combinaciones de los valores anteriores dan lugar a CINCO categorías diferentes de comportamiento y que se resumen en la siguiente tabla N° 12

De conformidad con dicha tabla, bloques de la categoría Ia, Ib, no pueden fallar, no pueden ser removidos, porque todas las líneas de superficie del bloque, están dirigidas hacia arriba, hacia la cara de la roca. Bloques de la categoría IIa, IIIb, sí se consideran inestables, deslizan a lo largo de la línea superficial del bloque. Esta línea dada por (L_{\min}) para una cara colgante IIa, y dada por (L_{\max}) para una cara No colgante IIIb, ambas pueden ser líneas de máxima pendiente rotada de un simple plano, dando lugar al deslizamiento a través de un plano o a través de la línea de intersección entre dos planos.

Cuando el deslizamiento se produce a través de un plano, la dirección y plunge del deslizamiento son dados por la dirección del buzamiento y buzamiento del plano en cuestión. Para el deslizamiento a través de la línea de intersección de dos planos, la orientación verdadera de la línea de intersección puede calcularse revertiendo la rotación de éste punto o replanteando los planos involucrados sobre la proyección estereográfica.

TABLA 12

COMPORTAMIENTO CINEMATICAMENTE GRAVITACIONALES		DE POSIBLE	BLOQUE SUJETO	TETRAEDRICO A CARGAS
Posición de N_{hr}	Cara colgante o vertical (r_f) dirigida hacia abajo, hacia afuera al espacio libre		Cara No colgante (r_f) dirigida hacia el interior de la masa rocosa	
	Triángulo Esférico plotea totalmente arriba del plano horizontal	Parte del Triángulo esférico plotea debajo del plano horizontal	Triángulo esférico plotea totalmente arriba del Plano Horizontal	Parte del Triángulo Esférico plotea debajo del Plano Horizontal
	I a	II a		
N_{hr} Plotea fuera del triángulo esférico	Bloque asociado dirigido hacia arriba no puede moverse	Bloque asociado si es inestable desliza hacia afuera a lo largo de (L_{min})	I b Bloque asociado dirigido hacia arriba no puede moverse	II b Bloque asociado si es inestable desliza hacia afuera a lo largo de (L_{max})
Plotea dentro del triángulo esférico	III Bloque asociado si es inestable cae verticalmente			

Los bloques de la categoría II son los más probables a ser inestables, si la dirección de deslizamiento tiene un plunge muy inclinada hacia abajo. Esto ocurre en los bloques de la categoría IIa, cuando θ_{min} es pequeño, y para bloques de la categoría IIb cuando θ_{max} es grande.

Los resultados de la interpretación geométrica han sido analizados separadamente y han sido presentados en las figuras 8 y 9.

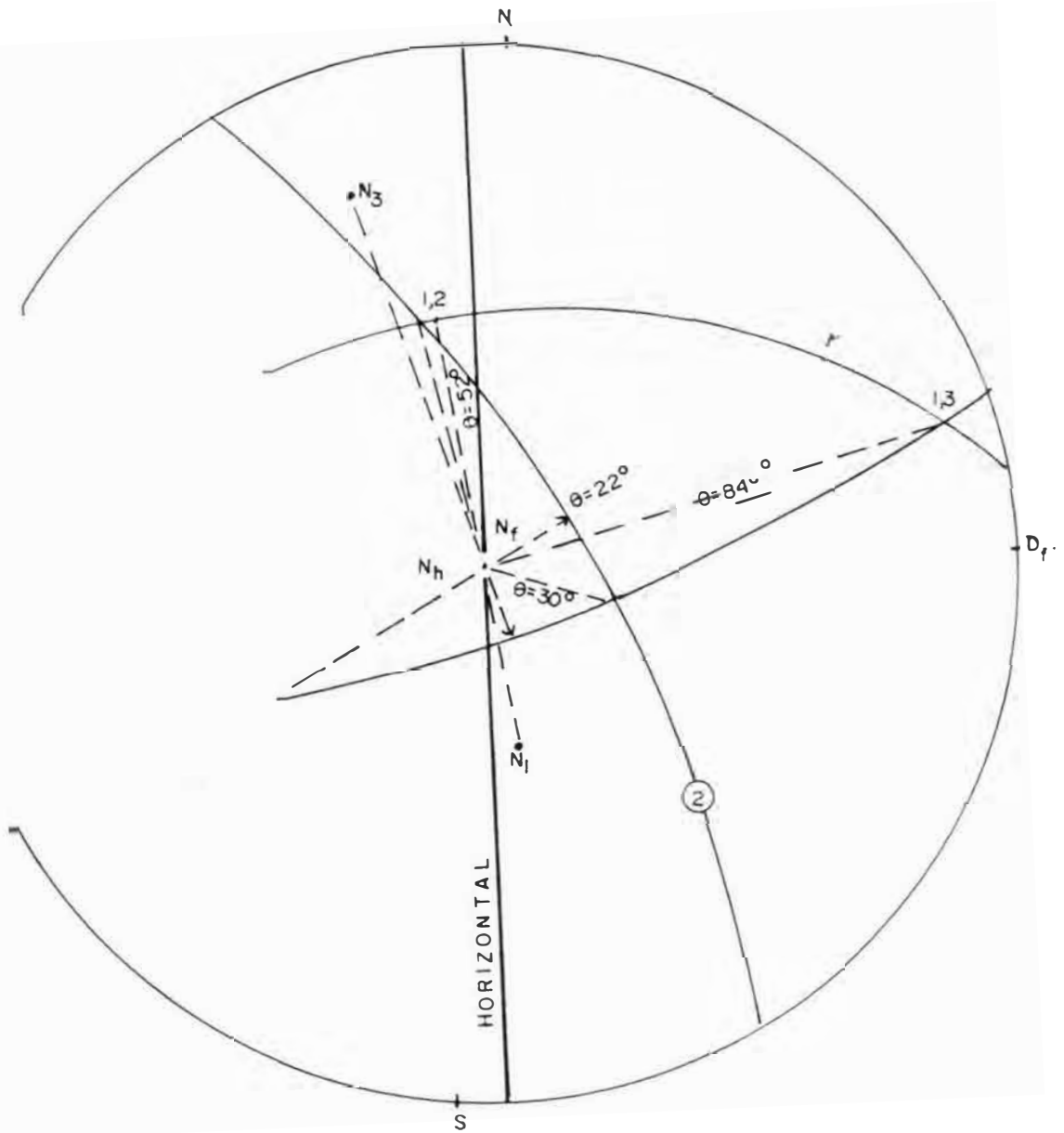
De la fig. N 8. que pertenece a la representación del bloque tetraédrico ubicado en la bóveda. que no ha sido necesario rotar. la excavación tiene azimut de 355° .

Aquí. el triángulo esférico plotea debajo de la horizontal con (N_h) fuera del triángulo esférico. El bloque es inestable y pertenece a la categoría IIa y se deslizará a través de $\theta_{\min} = 22^\circ$ que pertenece a la superficie del plano 2. cuya máxima pendiente tiene la orientación de $056/67.5^\circ$ (Los otros valores de θ ploteados en el estereograma son de valores mayores. excepto sobre el plano 3 que no es línea superficial del bloque. por no interceptar al triángulo.

De la fig. N 9. que pertenece a la pared vertical de la excavación ha sido necesario rotar el diagrama ($\delta = 90$).

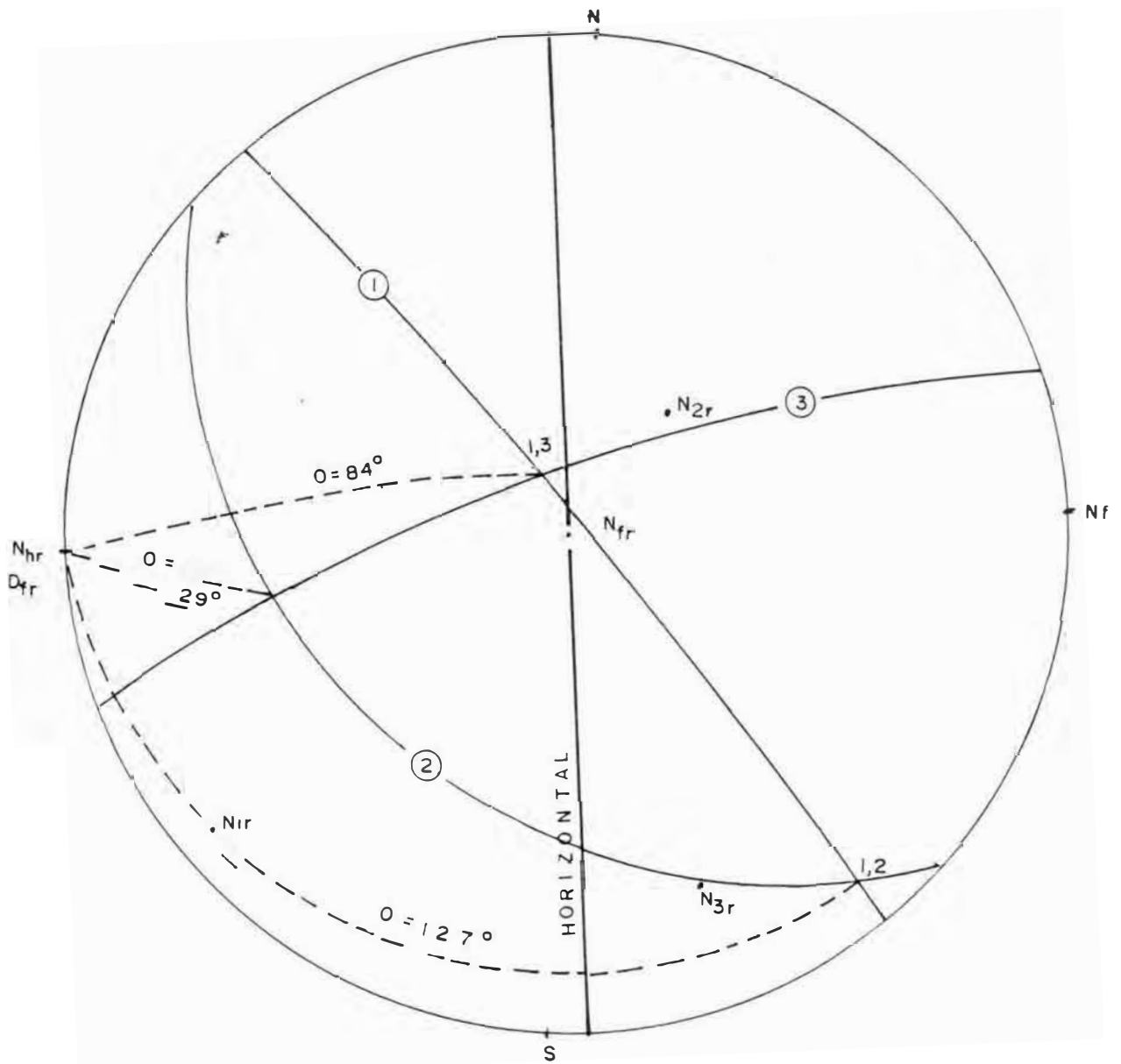
En este caso. el triángulo esférico plotea parte debajo de la horizontal con (N_{tr}) fuera del triángulo esférico. El bloque es inestable cinematicamente. y pertenece al grupo IIa y se deslizará a través de las intersecciones de los planos 2 y 3. o cuando haga $\theta_{\min} = 29^\circ$ como muestra la figura. El trend y plunge de ésta línea de deslizamiento es $256/29$.

FIG. N° 8



CINEMATICA DEL BLOQUE INESTABLE EN LA
BOVEDA DELA EXCAVACION

FIG. N° 9



CINEMATICA DEL BLOQUE INESTABLE EN

LA PARED VERTICAL DE LA EXCAVACION

CAPITULO V

5.- ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE BLOQUES ROCOSOS EN LA MINA ANIMON

5.1.- Introducción:

La construcción e interpretación de las proyecciones estereográficas explicadas en capítulos previos, proveen una herramienta muy valiosa para la evaluación de las posibilidades cinemáticas y mecanismo de falla potencial de un bloque tetraédrico que se expone en excavaciones subterráneas. (7)

Una característica importante de ésta evaluación es la de clasificar en 5 diferentes categorías la posibilidad cinemática de fallamiento del bloque tetraédrico. Esta clasificación se basa primordialmente en la interacción entre el triángulo esférico (geometría del bloque) y la orientación y sentido de la fuerza resultante (r) que actúa sobre el bloque. Esta fuerza que no únicamente puede ser el peso del bloque, sino que además pueden estar presente otros tipos de fuerzas externas como: presión de agua sobre los planos de discontinuidades, acción de los pernos de anclaje, efectos sísmicos, etc.

Antes de iniciar los cálculos de las magnitudes del peso y la fuerza resultante, es necesario establecer los criterios por el cual la estabilidad de un bloque ha sido evaluada en una categoría dada.

Cualquier bloque clasificado en la categoría I Tabla (12) es considerado estable a menos que pueden cambiarse las fuerzas actuantes sobre el bloque rocoso. Los bloques clasificados en la categoría III es libre de moverse en la dirección de la fuerza resultante (desprendimiento) el cual inducen la creación de fuerzas normales de tracción en los planos de discontinuidad que delimitan el bloque.

Sabemos por estudio de mecánica de rocas, que en los planos de discontinuidades, la resistencia a la tracción es cero, y de conformidad con ésta asunción, cualquier bloque que pertenece a la categoría III, será realmente inestable, a menos que exista otra fuerza igual y contraria, que mantenga en equilibrio el bloque, esto puede ser un perno de anclaje o algún otro sistema de refuerzo.

Los bloques de la categoría II realmente son considerados inestables y pueden fallar por deslizamiento a través de un simple plano o a través de la intersección de dos planos. Ya que los bloques clasificados en esta categoría son verdaderamente inestables y no dependen de la resistencia al corte de los planos de deslizamiento ni de las fuerzas actuantes sobre tales planos. Estas fuerzas dependen en parte de las orientaciones de los planos involucrados y en parte de la magnitud de la fuerza resultante que actúan sobre el bloque.

En lo que resta de este estudio, será dedicado al análisis de estabilidad de bloques de la categoría II, el cual se desarrollará el mecanismo de fallamiento por deslizamiento, propuesto y explicado en el Capítulo II, acapites 2.2 y 2.2.2.

5.2.- Análisis de triángulo esféricos y dimensionamiento del tetraedro:

Un triángulo esférico ploteado sobre una proyección hemisférica, se considera cinemáticamente congruente con el bloque tetraédrico asociado, cuando las trazas de los planos que forman la cara de los triángulos del tetraedro tienen la misma posición relativa con los grandes círculos asociados al triángulo esférico en la proyección estereográfica.

Por consiguiente, para efectuar el análisis geométrico, se construye un dibujo a escala de la base del tetraedro y de todo el volumen. Este dibujo en planta, es visto en una dirección normal a ésta base, mirando teóricamente desde el interior de la masa rocosa hacia afuera, hacia el espacio libre.

5.2.1: Construcción del bloque tetraédrico:

Para ello es necesario seguir las siguientes etapas:

A: EN LA PROYECCION ESTEREOGRAFICA:

- 1.- Se trazan dentro de la red estereografica las líneas diametrales que unen los terminales del gran círculo de cada plano que definen el bloque tetraédrico. Como sabemos, estas líneas dan el rumbo de cada plano.

- b.- Se trazan las líneas diametrales que pasan a través de los vértices de cada uno de los triángulos. Estas líneas dan la orientación de las trazas producidas, del plano normal que pasa a través del vértice interceptado de la cara de la excavación.
- c.- Se construye la línea diametral del gran círculo del plano horizontal rotado. Esta línea da la "línea de referencia horizontal" en el plano de la cara de la excavación.

B; CONSTRUCCION DEL PLANO DEL TETRAEDRO:

- d.- Sobre un papel transparente y a una escala conveniente, se dibuja una línea recta para representar la "línea de referencia horizontal en el plano de la cara y se elige sobre esta, en la margen izquierda un punto arbitrario.
- e.- Este punto arbitrario, representa un vértice o la intersección de 2 planos que forman la base del tetraedro. Este punto se superpone en el centro exacto de la proyección estereográfica, se rota convenientemente hasta hacer coincidir con la línea horizontal, luego se trazan las líneas asociadas a los planos que forman éste vértice de la proyección.

El vértice derecho del triángulo ocurre donde la línea asociada con el segundo plano interceptada el margen derecho de la cara en el dibujo. Este punto es ahora colocado en el centro de la proyección, se repite lo anterior trazando la traza del tercer plano y habremos construido el triángulo de la base del tetraedro.

- f.- Para construir la vista en planta del vértice del tetraedro, un vértice del triángulo es colocado o superpuesto en el centro de la red estereográfica y debidamente orientado, se trazan las líneas diametrales de los vértices del triángulo esférico. Este proceso se

repite para los otros vértices de la cara del triángulo y quedará definido el tetraedro en planta.

Es necesario indicar que la escala elegida debe ser concordante con el tamaño del bloque. La aproximación adoptada aquí, es la de analizar el bloque más grande que podría dar cabida la superficie expuesta de la excavación, como hemos indicado en el capítulo II. 2.1.4.

Las dimensiones que delimitan el tamaño del bloque pueden ser el ancho de la excavación (bóvedas) o su altura respectiva.

Finalmente, habiendo ploteado el tetraedro y el triángulo esférico congruente en la proyección estereográfica se pueden obtener los datos necesarios para cuantificar sus dimensiones requeridas para los cálculos posteriores.

Los resultados para ambos casos se muestran en los gráficos números 10.11.12 y 13 respectivamente.

5.2.2.- Dimensionamiento del tetraedro:

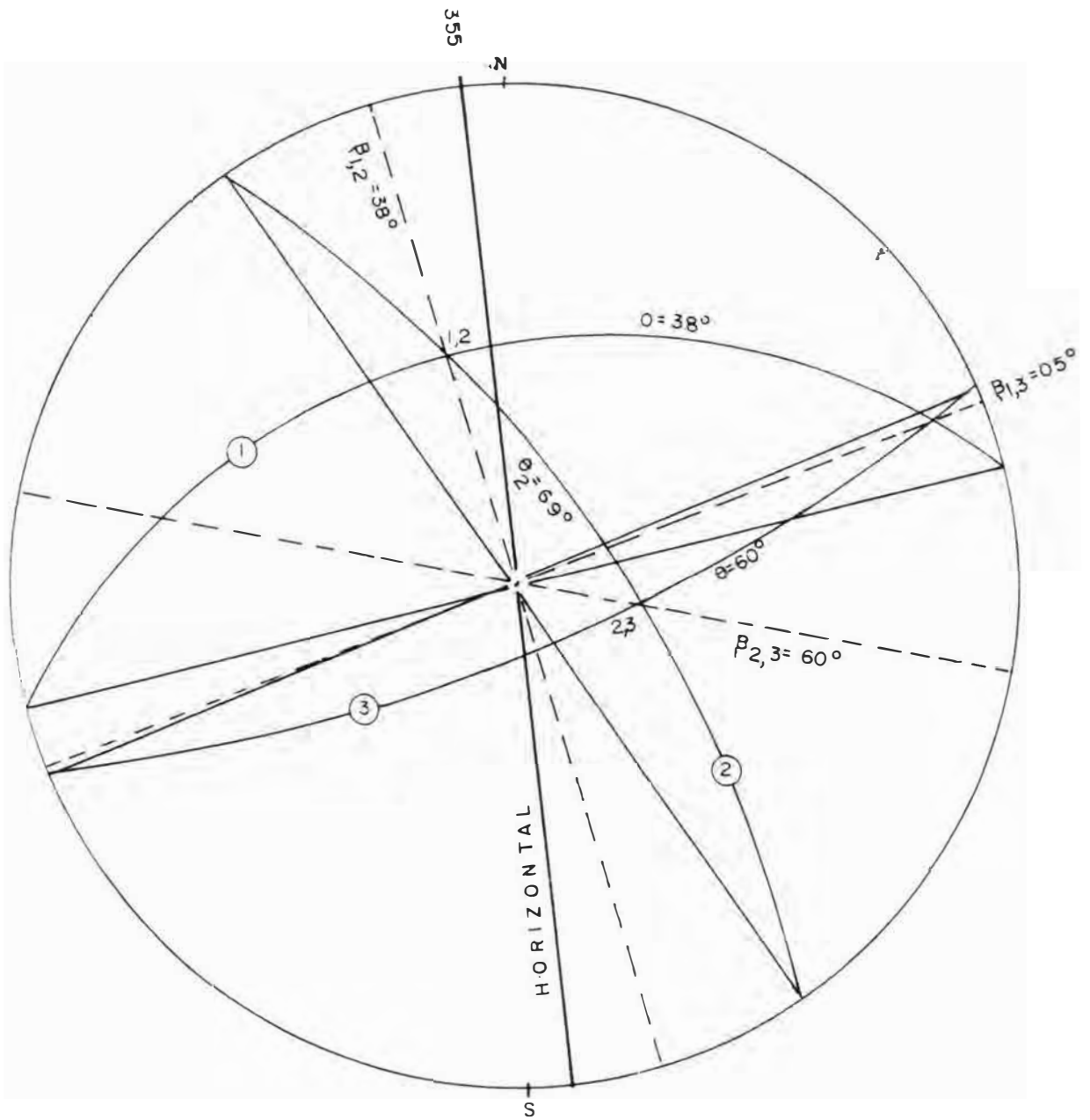
De las figuras de los gráficos mencionados, tanto de la proyección estereográfica como del dibujo en planta y de conformidad con la nomenclatura utilizada podemos obtener:

DEL PLANO DEL TETRAEDRO:

Escalando la figura en todos los casos:

- Dimensiones de los 3 lados de la base de tetraedro (l_1, l_2, l_3).
- Las longitudes aparentes de las aristas del tetraedro (l_{12}, l_{23}, l_{13}).

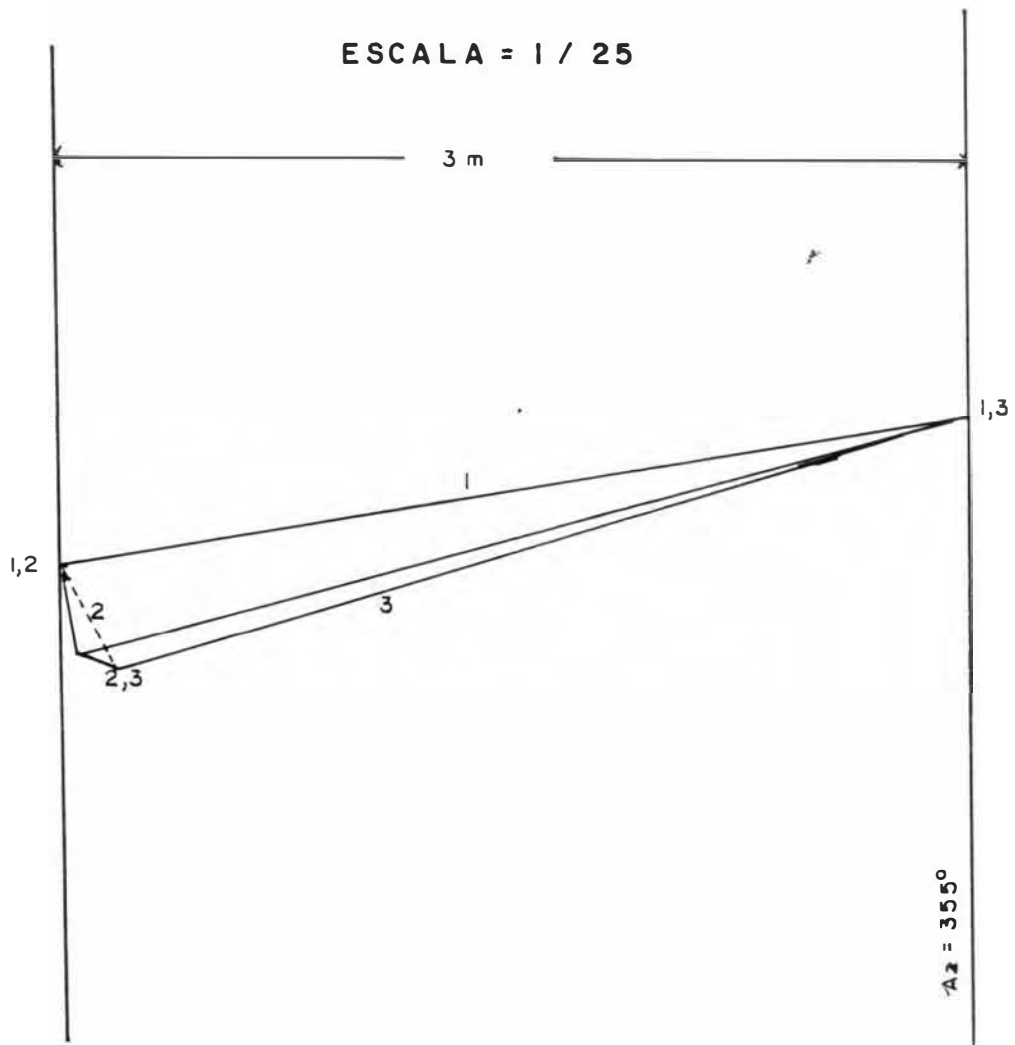
FIG. N° 10



TRIANGULO ESFERICO DE LA BASE DEL BLOQUE
UBICADO EN LA BOVEDA DE LA EXCAVACION

FIG. Nº 11

DIMENSIONADO DEL BLOQUE TETRAEDRO
 UBICADO EN LA BOVEDA DE LA EXCAVACION

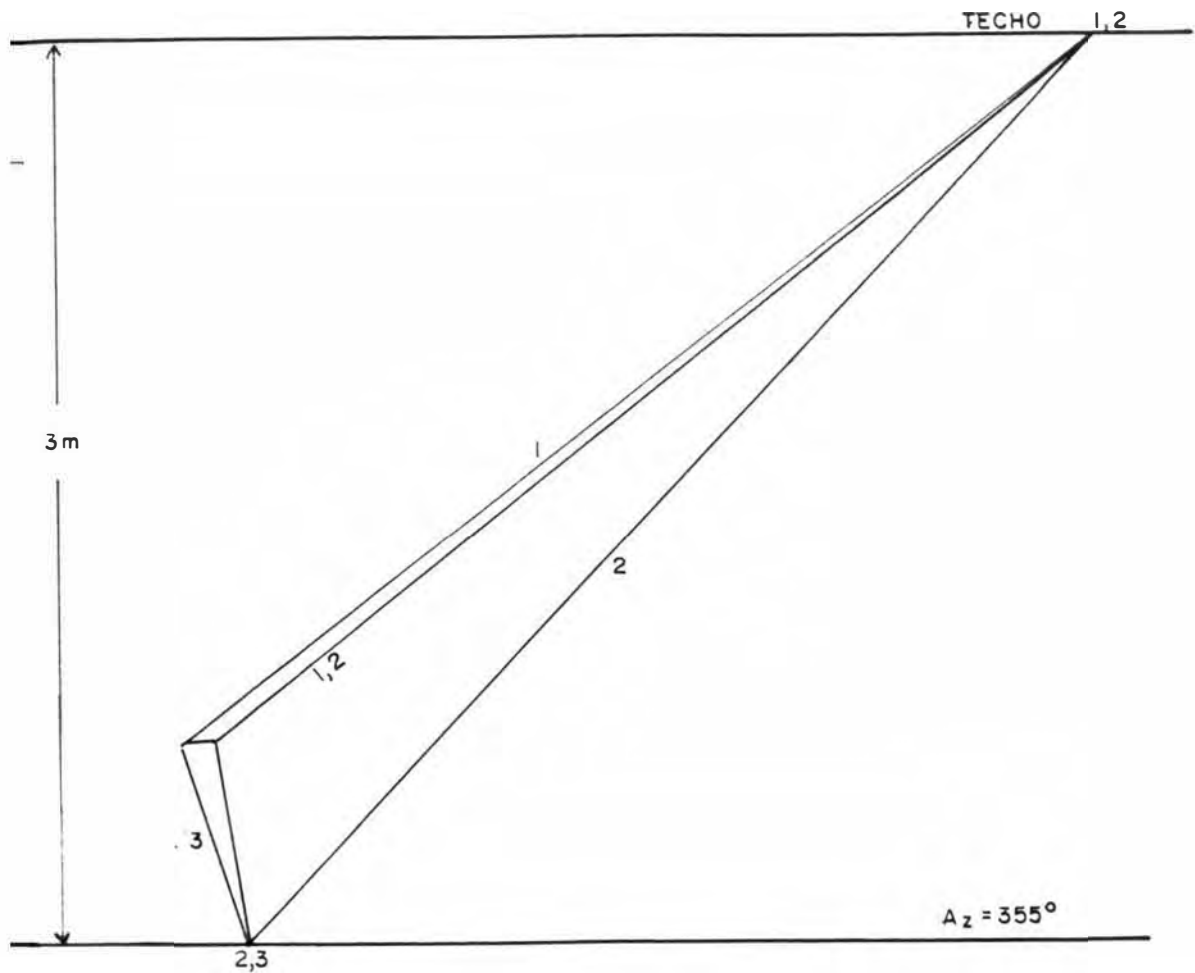


LADOS DE BASE TETRAEDRO	ARISTAS PROYECTADAS	ANGULOS BASE TRIANGULO
$L_1 = 3.01 \text{ m}$	$L_{1,2} = 0.30 \text{ m}$	$\theta_{1,2} = 71^\circ$
$L_2 = 0.40 \text{ m}$	$L_{1,3} = 3.02 \text{ m}$	$\theta_{1,3} = 07^\circ$
$L_3 = 2.91 \text{ m}$	$L_{2,3} = 0.25 \text{ m}$	$\theta_{2,3} = 103^\circ$

FIG. N° 13

DIMENSIONADO DEL BLOQUE TETRAEDRO UBICADO
EN LA PARED VERTICAL DE LA EXCAVACION

ESCALA = 1/25



LADOS DE BASE
TETRAEDRO

ARISTAS
PROYECTADAS

ANGULO BASE
TETRAEDRO

$$L_1 = 3.81 \text{ m}$$

$$L_{1,2} = 3.68 \text{ m}$$

$$\theta_{1,2} = 09^\circ$$

$$L_2 = 4.10 \text{ m}$$

$$L_{1,3} = 0.15 \text{ m}$$

$$\theta_{1,3} = 109^\circ$$

$$L_3 = 0.70 \text{ m}$$

$$L_{2,3} = 0.75 \text{ m}$$

$$\theta_{2,3} = 62^\circ$$

TABLA N° 13

DAIOS PARA EL DIMENSIONADO DEL TETRAEDRO

A: OBTENIDAS DE LAS PROYECCIONES ESTEREOGRAFICAS

ITEMS	PARAMET.	1° CASO	2° CASO
		BOVEDA HORIZ.	PARED VERT.
ANGULO	ρ_2	38°	06°
PLUNGE DE LAS ARISTAS	β_{13}	05°	74°
	β_{23}	60°	28°
ANGULO EN EL VER TICE DEL TETRAEDRO	θ_1	83°	99°
	θ_2	69°	113°
	θ_3	60°	58°

B: OBTENIDAS DEL TETRAEDRO PROYECTADO

LADOS DEL TRIANGULO DE BASE	L_1	3.01 m	3.81 m
	L_2	0.40 m	4.10 m
	L_3	2.91 m	0.70 m
ARISTAS PROYECTADAS	L_{12}	0.30 m	3.68 m
	L_{13}	3.02 m	0.15 m
	L_{23}	0.25 m	0.75 m
ANGULO INTERNO DE LA BASE DEL TRIANGULO	θ_{12}	71°	09°
	θ_{13}	07°	109°
	θ_{23}	103°	62°

- Los ángulos internos del triángulo de la base del tetraedro midiendo directamente con un transportador.

DE LA PROYECCION ESTEREOGRAFICA

- Los ángulos agudos que hacen las aristas con el plano base horizontal ($\beta_{12}, \beta_{23}, \beta_{13}$).
- Los ángulos en el vértice del tetraedro ($\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$).

Los cálculos se resumen en la tabla N° 13

Con estos valores procedemos a calcular:

- a.- Cálculo del valor de las aristas: (L)

Los datos son las longitudes aparentes (l_{12}, l_{23}, l_{13}) y serán:

$$L_{12} = \frac{l_{12}}{\cos \beta_{12}} \quad L_{23} = \frac{l_{23}}{\cos \beta_{23}} \quad L_{13} = \frac{l_{13}}{\cos \beta_{13}}$$

- b.- Cálculo del área de la base del tetraedro: (Ab)

Puede calcularse tomando cualquier par de lados adyacentes y su ángulo respectivo.

$$Ab = \frac{1}{2} l_{12} l_{13} \text{ Sen } \theta_{12} = \frac{1}{2} l_{23} l_{13} \text{ Sen } \theta_{23} = \frac{1}{2} l_{12} l_{23} \text{ Sen } \theta_{13}$$

- c.- Cálculo del área de las caras laterales del tetraedro (AL)

$$A = \frac{1}{2} \frac{L_{12} L_{13}}{\cos \beta_{12} \cos \beta_{13}} \text{ Sen } \theta_{12}$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{L_{12} L_{23}}{\cos \beta_{12} \cos \beta_{23}} \right] \sin \alpha_2$$

$$A_3 = \frac{1}{2} \left[\frac{L_{13} L_{23}}{\cos \beta_{13} \cos \beta_{23}} \right] \sin \alpha_3$$

d.-Cálculo de la altura del tetraedro (h)

Se mide a lo largo del eje normal a la base,

$$h = l_{12} \tan \beta_{12} = l_{23} \tan \beta_{23} = l_{13} \tan \beta_{13}$$

e.- Cálculo del volumen del tetraedro: (V)

Con los datos previos ya conocidos:

$$V = \frac{1}{3} A_b \times h$$

La precisión obtenida por éste método gráfico depende del cuidado que se pone en la construcción de la proyección estereográfica y de la construcción del tetraedro. Sus valores pueden estar dentro de un margen de error del orden del 5 %.

Los diferentes resultados se resumen en la tabla 14..

TABLA N° 14

DIMENSIONAMIENTO DEL TETRAEDRO (m)

DIMENSIONES	PARAMET.	TECHO HORIZONT	PARED VERTICAL
ARISTAS DEL TETRAEDRO	L_{12}	0,40	3,70
	L_{13}	3,00	0,85
	L_{23}	0,50	0,54
AREA DE LA BASE TETRAEDRO	A_b	0,56	1,25
AREA LATERAL DE CARAS - DEL TETRAEDRO	A_1	0,57	1,00
	A_2	0,09	1,44
	A_3	0,66	0,20
ALTURA DEL TETRAEDRO	h	0,31	0,44
VOLUMEN DEL TETRAEDRO	v	0,09	0,27

5.3.- Determinación de la magnitud de las fuerzas actuantes

Para evaluar la estabilidad de un bloque rocoso, primero es necesario determinar la orientación, magnitud y sentido de la resultante (r) de las fuerzas actuantes sobre el bloque. Para ello es necesario calcular la fuerza resultante, luego éste se plotea en la proyección estereográfica.

En nuestro caso, la fuerza más importante que actúan sobre el bloque es su peso (W). Este tiene una orientación vertical y un sentido hacia abajo, su magnitud viene dada por:

$$W = V (d)$$

Donde:

V = Volumen del tetraedro.

d = Peso específico del material rocoso.

No. hemos referido anteriormente a otras fuentes de fuerzas, puede ser la generada por la presión de agua en los planos de discontinuidades, y son los más difíciles de estimar y tienen una influencia muy decisiva en la estabilidad de un bloque. En algunos casos la presión de agua en las masas rocosas, pueden cambiar sustancialmente la categoría del comportamiento del bloque. Una discusión detallada del flujo de agua en las discontinuidades de la masa rocosa va más allá de los propósitos del presente trabajo. Sin embargo, podemos dar algunos alcances basados sobre simples asunciones gravitacionales.

La magnitud de la fuerza (H) generado por la presión del agua (P) actuante sobre el plano de discontinuidades de área (A) y esta dada por

$$H = P \cdot A$$

Esta fuerza siempre actúa normal al plano de la discontinuidad en el sentido tal que tiende a dilatar la discontinuidad (P es positivo).

Cuando se determina (r) es necesario considerar a las fuerzas actuantes sobre el bloque como opuestas a su reacción. De este modo la fuerza proveniente del agua asociada a un plano de discontinuidad que subyace a un bloque dado debe tener un sentido hacia arriba, y cuando suprayace al bloque, tendrá un sentido hacia abajo.

En muchos casos, mediante una simple inspección del plano a escala o del triángulo esférico asociado, podrá deducirse si un plano subyace o suprayace al bloque.

El peso específico promedio estimado para el tipo de roca de la zona es aproximadamente: ($d = 30 \text{ kN/m}^3$).

Los pesos de los tetraedros considerados se resumen en la tabla 15:

TABLA N° 15

CALCULO DE LOS PESOS DEL TETRAEDRO			
ITEMS	d (KN/m ³)	VOLUMEN (m ³)	PESO (KN)
1° CASO			
TECHO HORIZ.	30	0,09	2,70
2° CASO			
PARED VERTICAL	30	0,27	8,10

5.4.- Determinación del grado de estabilidad:

Con la información obtenida hasta el momento es suficiente para determinar la categoría del comportamiento del bloque de acuerdo con la tabla propuesta.

Los bloques que pertenecen a la categoría I son asumidos como estables, no removibles y tienen un Factor de seguridad teóricamente infinito.

Los bloques que pertenecen a la categoría III son asumidos como inestables sea cual fuera la magnitud de la fuerza resultante (r) y se considera con Factor de Seguridad Cero.

Los bloques de la categoría II se asumen que serán inestables y fallarán tanto por deslizamiento sobre un simple plano o doble plano de discontinuidad.

5.4.1.: Descomposición de la fuerza resultante:

En éste caso, es necesario descomponer la fuerza resultante (r), peso del bloque rocoso en su componente normal (N) que actúa perpendicular al plano de discontinuidad y su componente de corte (S) que actúa paralelo a dicho plano de deslizamiento, de acuerdo a los métodos descritos en el Capítulo II, 2.2 del presente trabajo.

Las componentes de fuerza Normal y de Corte que actúan sobre el bloque, determinan las cargas a que está sometido la estructura como consecuencia de la interacción de su peso y la orientación de su peso y la orientación de los planos de discontinuidad y de la propia cara de la excavación.

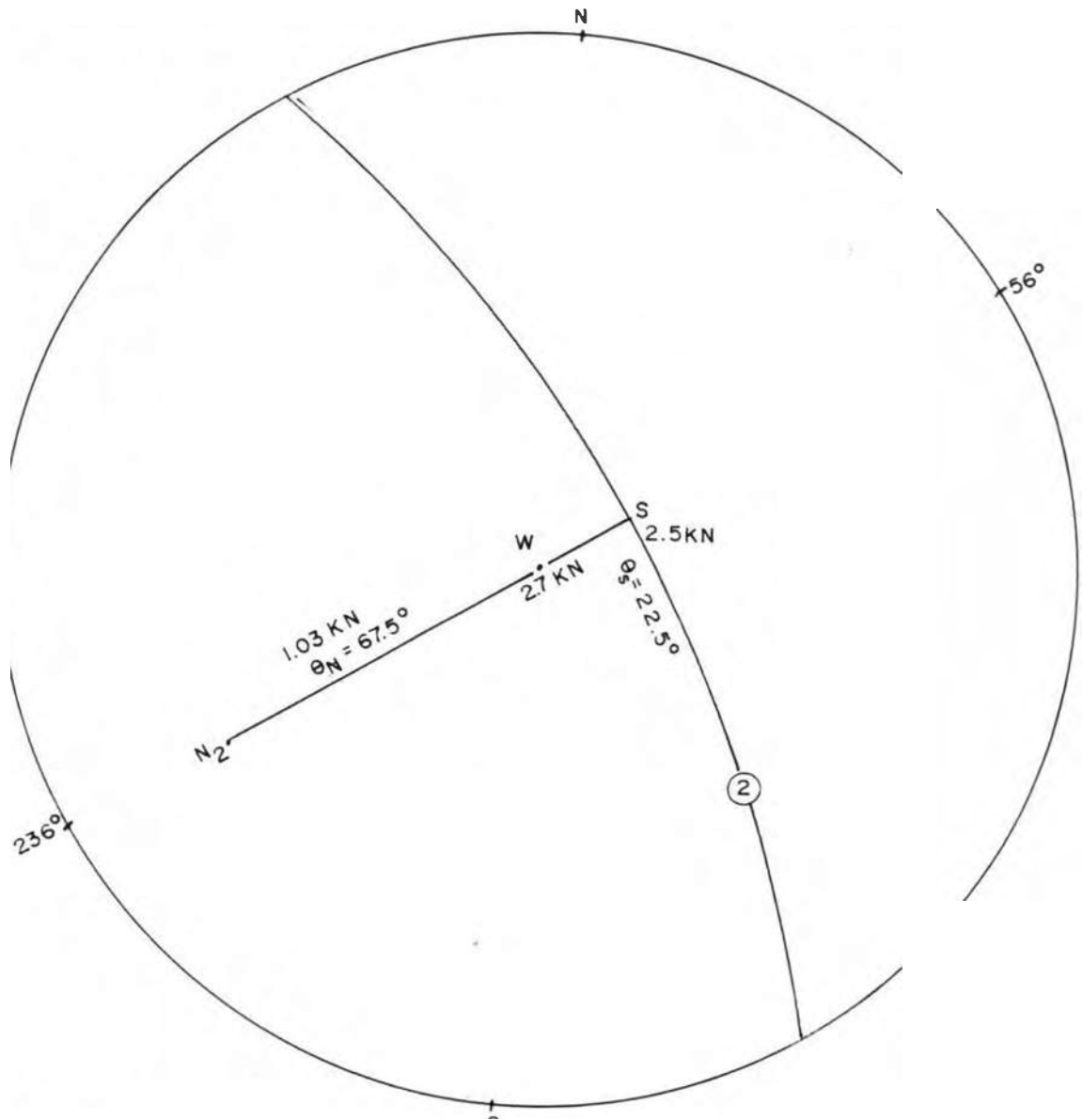
El ploteo de las fuerzas y su descomposición pueden visualizarse en las figuras 14 y 15 para ambos casos. Los resultados se ven en la Tabla 16.

5.4.2.- Cálculo del Factor de Seguridad:

Las fuerzas de corte que se generan en el plano de discontinuidad, comparada con la resistencia al corte en dichos planos dan un factor o un índice conocido como **Factor de Seguridad**, que calcula el grado de estabilidad de la estructura subterránea.

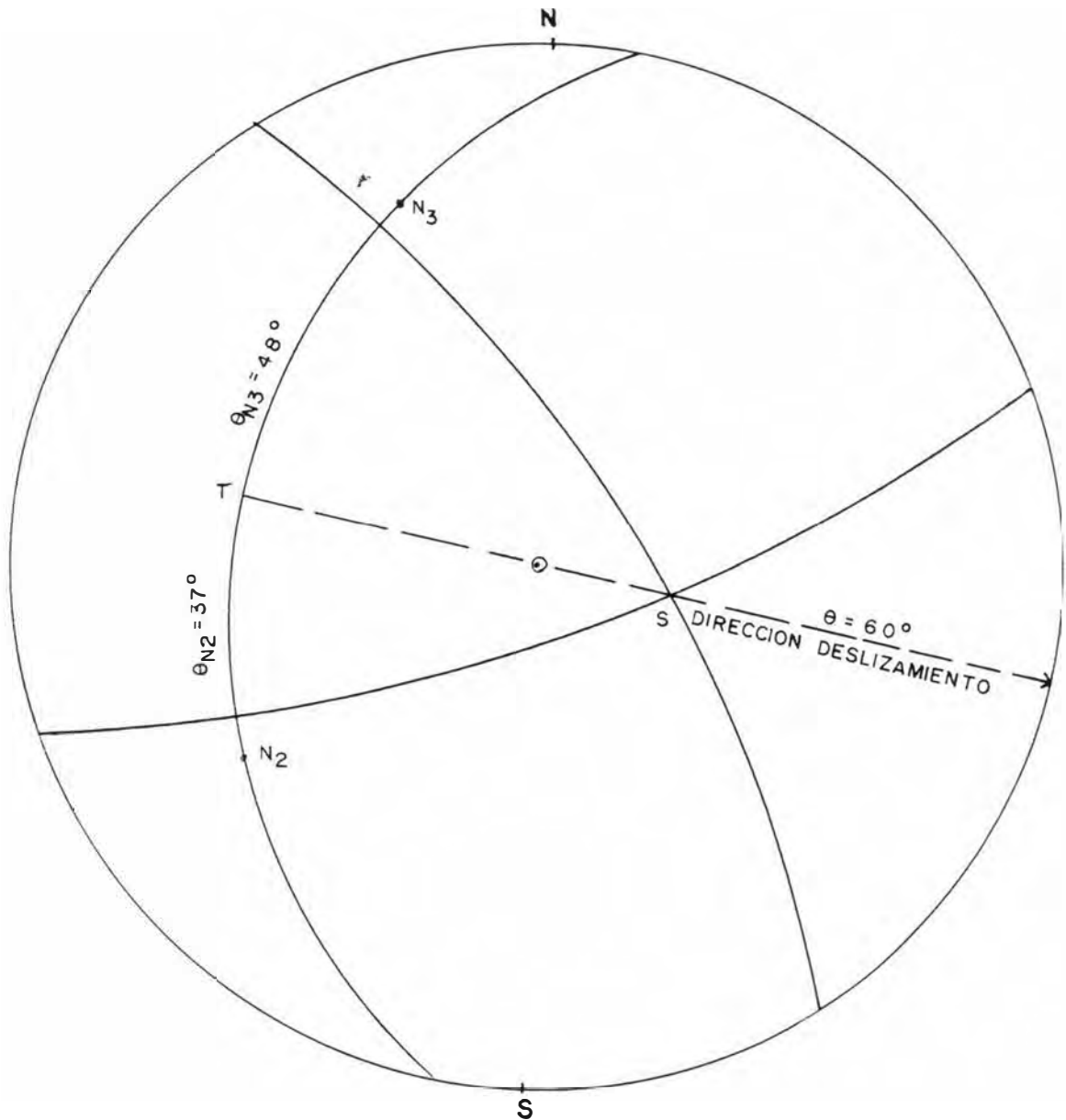
Para determinar la resistencia al corte de los planos de discontinuidad, se requieren conocer los parámetros de resistencia al corte, como son: la cohesión (C') y el ángulo de fricción (ϕ') que se generan en la superficie de corte de los planos donde se producirán las fallas potenciales de deslizamiento, así mismo conocer las fuerzas normales que se generan en dichos planos, como consecuencia de la descomposición en tales direcciones del peso del tetraedro y otras fuerzas actuantes. Se calcula la resistencia al corte en cada plano comprometido en el deslizamiento (ver capítulo 3 inc. 3.4.4). Los resultados se presentan en la Tabla. 17.

FIG. N° 14



DESCOMPOSICION DEL PESO(W) DEL BLOQUE TETRAEDRO SOBRE LA BOVEDA EN DIRECCION DEL PLANO DE DESLIZAMIENTO Y SU NORMAL

FIG. N° 15



DESCOMPOSICION DEL PESO(W) DEL BLOQUE TETRAEDRO DE LA PARED VERTICAL EN DIRECCION DE LA LINEA DE DESLIZAMIENTO Y PERPENDICULAR AMBOS PLANOS

TABLA N° 16

RESUMEN DE DESCOMPOSICION DE FUERZAS

ITEMS	1° CASO BOVEDA HORIZONT.	2° CASO PARED VERTICAL
FUERZA RESULT. (W) (KN)	2.7 KN	8.10 KN
α / β PLANO-O-LINEA DE DESLIZAMIENTO	056 / 67.5°	102 / 60
S FUERZA PARALELA PLANO- O-LINEA DESLIZAMIENTO	2.50 KN	7.01
N_1 FUERZA NORMAL AL PLANO (1)	-	-
N_2 FUERZA NORMAL AL PLANO 2	1.03 KN	3.02
N_3 FUERZA NORMAL AL PLANO 3	-	2.44

TABLA N° 17

FACTOR DE SEGURIDAD

	PARAMET.	BOVEDA HORIZONT.	PARED VERTICAL
AREA DE LOS LADOS TRIANGULARES DEL TETRAEDRO	A_1	-	-
	A_2	0.09 m ²	1.44 m ²
	A_3	-	0.20
COHESION DE LOS PLANOS QUE FORMAN LOS LADOS DEL TETRAEDRO: PLANOS DESLIZAMIENTO	C_1	-	-
	C_2	49 KN / m ²	49 KN / m ²
	C_3	-	72 KN / m ²
ANGULOS DE ROZAMIENTO DE LOS PLANOS DE DESLIZAMIENTO	ϕ_1	-	-
	ϕ_2	31°	31°
	ϕ_3	-	38°
FUERZA NORMAL A CADA PLANO DE DESLIZAMIENTO DESCOMPUESTO DE (W)	N_1	-	-
	N_2	1.03 KN	3.02 KN
	N_3	-	2.44 KN
RESISTENCIA AL CORTE PLANO-O-RECTA-DESLIZ.	T	5.0 KN / m ²	89.0 KN / m ²
FUERZA-CORTE-PLANO-O- RECTA DE DESLIZMT.	S	2.50 KN / m ²	7.01 KN / m ²
FACTOR DE SEGURIDAD $F = \frac{T}{S}$	F	2.00	12.65

CAPITULO VI

6.1.- CONCLUSIONES

6.2.- RECOMENDACIONES

6.1.- CONCLUSIONES

- 1.- El presente trabajo, trata sobre la estabilidad de excavaciones subterráneas que se construyen en macizos rocosos fracturados con poca humedad y que estén sometidos únicamente a efectos de fuerzas gravitacionales y donde los esfuerzos in situ prácticamente son nulos. Analiza la estabilidad de bloques rígidos o cuñas rocosas en la bóveda y paredes de excavación subterránea asumiendo fallas por desprendimiento o deslizamiento, en relación con la geometría y tamaño de la excavación así con la estructura de la masa rocosa.
- 2.- El método desarrollado para el análisis de la estabilidad de bloques rígidos es mediante el uso de las proyecciones estereográficas, proyectando las características estructurales de la masa rocosa desde el hemisferio inferior sobre planos de proyección orientados paralelamente a la superficie de la excavación subterránea, por lo que generalmente se hace un giro o rotación del sistema estereográfico.
- 3 - Dentro de las características de las discontinuidades se han descrito esencialmente, las geométricas, siguiendo luego las geomecánicas.
En los análisis se ha incidido en el reajuste del número de discontinuidades o tamaño muestreo, mediante la aplicación de un **factor ponderado de corrección** que se genera como consecuencia de la orientación relativa de la línea de muestreo, respecto a la línea normal a cada familia de discontinuidades.

- 4.- Para la determinación de la dirección del buzamiento y buzamiento de cada familia de discontinuidades se ha utilizado el método vectorial, introduciendo el factor de corrección por un lado, luego sin el factor de corrección, promediando después los resultados, obviamente ajustando el grado de agrupamiento de cada familia, mediante la aproximación de Fisher. En el análisis de los datos de campo de la mina en estudio se ha detectado la presencia de 3 familias de discontinuidades.
- 5.- Se ha elegido como modelo de fallamiento el propuesto por Coulomb Navier, por su simplicidad en representar los fallamientos mediante una línea recta de resistencia. Este Criterio de falla relaciona los parámetros de resistencia al corte cohesión, ángulo de fricción y el esfuerzo normal.
- 6.- Se utilizó como método de muestreo de los datos estructurales el de Línea de detalle por su rapidez y versatilidad. El lugar de muestreo fue la Mina Animón de la Cía Minera Chungar S.A. ubicado en el departamento de Pasco.
- 7.- En el capítulo de evaluación cinemática, el método sugiere, para que exista los bloques potencialmente inestables y su posición sobre el estereograma y el espacio tridimensional dividido en semiespacio rocoso y semiespacio libre, postula dos condiciones
 - a.- Que la proyección estereográfica sea paralela a la superficie de excavación, pudiendo ser éstas superficies colgantes y no colgantes
 - b.- Que la proyección estereográfica sea convexa al lado del semiespacio libre de la excavación.
- 8.- A diferencia de otros métodos para el análisis cinemática de cuñas potencialmente inestables, aquí la proyección estereográfica se divide con respecto al plano horizontal rotado, arriba y abajo, y esto se consigue haciendo coincidir la línea rotada de máxima

pendiente de la superficie de excavación con el polo sur de la proyección estereográfica.

- 9.- En estas condiciones y la posición geométrica del triángulo esférico y el sentido de las fuerzas actuantes, se desprende cinco categorías de comportamiento cinemática de los bloques rígidos, expuestos en la Tabla 12. En nuestro análisis para ambos casos corresponde el tipo de comportamiento IIa ,es decir fallamiento por deslizamiento.
- 10.- En la descomposición del peso de la cuña, para calcular el **Factor de seguridad**, se utiliza el método estereográfico, descomponiendo la fuerza según el plunge y el buzamiento del plano o línea de deslizamiento. En el presente trabajo las cuñas resultan ser estables.
- 11.- La metodología ofrecida en el presente trabajo da buenos resultados en macizos rocosos con características estructurales bien definidas.

6.2 .- RECOMENDACIONES

- 1.- Para la toma de los datos estructurales del macizo rocoso, es recomendable anotar, en términos de dirección del buzamiento y buzamiento en vez de rumbo y buzamiento, por su rapidez en copiar dichos datos al estereograma polar.
- 2.- En la toma de datos geológicos estructurales de campo, se sugiere el método de línea de detalle, haciendo las correcciones necesarias. Este método resulta ser sencillo, rápido, económico, adaptable tanto para excavaciones subterráneas como superficiales.
- 3.- El tamaño o número de muestras tomadas del campo, debe estar relacionada con la complejidad geométrica del sistema de discontinuidades. Recomendable entre 100 a 200 muestras cuando presentan características de orientación bien definidas y mayores de 200 muestras cuando aumenta la dispersión.
- 4.- Se recomienda si fuera posible, utilizar en un mismo lugar dos o más líneas de muestreo para evitar ángulos demasiados altos entre la línea de muestreo y el promedio de las orientaciones de cada familia de discontinuidades. de esta forma los factores de corrección serán relativamente bajo y se obtendrán resultados más favorables.
- 5.- Es recomendable analizar los resultados de orientación de cada familia de discontinuidades, especialmente su grado de agrupamiento, para asegurarse de la consistencia de los trabajos de campo y su óptima aplicación.

- 6.- En la toma de datos de campo, debe preferirse la concurrencia de personal experimentado en esta técnica, dadas las limitaciones y dificultades que ofrece una excavación subterránea, así como el grado de precisión que requieren en la ejecución del proyecto.
- 7.- En el análisis cinemático de cuerpos rígidos es recomendable:
 - a) Distinguir entre la posibilidad e imposibilidad cinemática.
 - b) Determinar los bloques críticos
 - c) Analizar la inestabilidad potencial y real de tales bloques
- 8.- En la interpretación geométrica de los bloques es recomendable que la posición de los triángulos esféricos en el estereograma sea congruente con el bloque tetraédrico, esto facilitará su clasificación dentro de las cinco categorías de bloques.
- 9.- En la determinación de los datos para el cálculo del volumen del tetraedro es necesario hacer varias lecturas, tanto en el estereograma como en el tetraedro y luego calcular sus promedios aritmético ya que son valores claves en la exactitud de los datos
- 10.- El método de las proyecciones estereográficas usadas en el análisis de estabilidad de cuñas rocosas, así como en el análisis de fuerzas, demuestra ser una de las herramientas muy interesante, representando una alternativa muy eficaz en los cálculos rápidos, obteniéndose resultados con márgenes de error del orden del cinco por ciento en los cálculos por lo que se sugiere el uso de éstas técnicas en el cálculo de estabilidad de las excavaciones subterráneas.

LISTA DE FIGURAS

- 1.- Flujograma de áreas de investigación.
- 2.- Familia de discontinuidadesa intersectada por una línea de muestreo
- 3.- Vector descompuesto en sus coordenadas cartesianas.
- 4.- Diagrama de polos.
- 5.- Bloques rígidos alrededor de una excavación.
- 6.- Gráficos de puntos en el estereograma para la bóveda de la excavación .
- 7.- Gráficos de puntos y rotación del estereograma para la pared vertical de la excavación
- 8.- Cinemática de bloques inestables sobre la bóvedade la excavación.
- 9.- Cinemática de bloques inestables sobre la pared vertical de la excavación.
- 10.- Triángulo esférico de la base del tetraedro ubicado sobre la bóveda de la excavación.
- 11.- Dimensionado del bloque tetraédrico ubicado sobre la bóveda de la excavación.
- 12.- Triángulo esférico de la base del bloque tetraédrico ubicado en la pared vertical de la excavación.
- 13.- Dimensionado del tetraedro ubicado sobre la pared vertical de la excavación.
- 14.- Descomposición del peso $[w]$ del bloque tetraedro [sobre la bóveda] en dirección del plano de deslizamiento y su normal..
- 15.- Descomposición del peso $[W]$ del bloque tetraedro [en la pared vertical] en dirección de la línea de deslizamiento y la normal a ambos planos.
- 16.- Plano del Nivel 270 de la Mina Animón.
- 17.- Red Estereográfica Polar equiangular
- 18.- Red Estereográfica Hemisférica equiangular
- 19.- Red de Conteo de polos

LISTA DE TABLAS

- 1.- Coordenadas cartesianas para proyecciones estereográficas.
- 2.- Datos de polos de la Línea de Detalle N° 1.
- 3.- Datos de polos de la Línea de Detalle N° II.
- 4.- Datos de polos de la Línea de Detalle N° III.
- 5.- Agrupamiento de polos.
- 6.- Resumen de orientación de polos.
- 7.- Resumen promedio de orientación de polos.
- 8.- Resumen promedio de orientación de los planos de discontinuidades de cada familia.
- 9.- Promedios de espaciamientos.
- 10.- Parámetros de resistencia al corte en planos de discontinuidades por familia.
- 11.- Sentido de las fuerzas en las proyecciones estereográficas.
- 12.- Comportamiento cinemático de bloques rocosos.
- 13.- Datos para el dimensionamiento de bloques tetraédricos.
- 14.- Dimensionamiento de tetraedros.
- 15.- Cálculo de los pesos de los tetraedros.
- 16.- Resumen de la descomposición de fuerzas.
- 17.- Factor de seguridad para los casos tratados.
- 18.- Datos de las características de las discontinuidades.
- 19.- Nomenclatura de parámetros geotécnicos usados para el muestreo de campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1.- BRIDGES. M. C. 1976 " Presentation of fractures data for R-M" 2nd
 Australian New Zealand Conference on Geomechanics. Brisbane
 Australia.
- 2.- COATES. D.F. 1973 " Fundamentos de Mecánica de Rocas " "
 Centro de Investigación Minera. Dirección de Minas Ministerio de
 Energía .Minas y Recursos Naturales . Canadá
- 3.- CRUDEN. D.M. 1977 " Describing the size of discontinuity int. JR-M
 Min .Sci and. Geomechanics" . Abstract. Vol. 14 London.
 Great Britain.
- 4.- GOODMAN. R.F. - GEN-HUA SHI. 1985" Block Teory and its
 aplication to rock engineering." Prentice Hall INC New Jersev
 USA.
- 5.- HARRINSON. J.M. 1982 " Report on Scanline Sampling " Interim.
 Report Imperial College of Science and Technology. London
 Great Britain.
- 6.- HOEK.E BRAY.J.W. 1981 "Rock Slope Engineering " .Intitution of
 Mining and Metallurgy. Revised Third Edition . London Great
 Britain.
- 7.- HOEK ,E BROWN J.W. 1985 " Excavaciones Subterráneas en Rocas " "
 Mc Graw Hill Book Co. U.S.A.

- 8.- HUDSON J.A. / PRIEST, S.D. 1979 "Discontinuities and rock mass geometry" Int. J.R.-M Min. Sei. and Geomechanics. Imperial College of Science and Technology. London. Great Britain.
- 9.- MC MAHON, B.K. 1974 "Design of rock slopes against sliding on pre-existing fractures" Proc. 3rd Congress of the ISRM. Denver USA.
- 10.- MILLER, S.M. 1979 "Geostatistical analysis for evaluation spatial dependence in fracture set characteristics" 16th Apc. Symposium.
- 11.- OYANGUREN, P.R. / DE LA CUADRA. L.I. / LAIN R.R. / GRIJALBO, E.O. 1980 "Mecánica de rocas aplicada a la minería metálica subterránea." Instituto Geológico y Minero de España y de ETSIMM de la Universidad Politécnica de Madrid. España.
- 12.- PHILLIPS, F.C., 1975 "La aplicación de la proyección estereográfica en geología estructural." Editorial Blume. España.
- 13.- PRIEST. S.D. 1985 "Hemispherical projection methods in rock mechanics." Imperial College of Science and Technology George Allen & UNWIN. London Britain.
- 14.- STEFFEN, O.K.N. / JENNING, J.E. 1975 "Definition of design joint for 2D rock slope analysis" Analysis advanced in R-M Proc. Of the 3rd Congress.
- 15.- TERZAGHI, R.D. 1965 "Sources of error in joint surveys geotechnique." Volumen 15 N° 3 ISRM.

- 16.- TOULOUKIAN .Y.S., JUDD.W.R. RCY.R.F. 1981 " Physical properties of rocks and minerals." Mc Graw Hill Book Company. U.S.A.
- 17.- DE SITTER, L.U. 1970 "Geología Estructural" Ediciones Omega. S.A., Barcelona España.