

SIMPOSIO SOBRE INGENIERÍA GEOLÓGICA

Bogotá, Noviembre 25 a 30, 1968

FRACTURACIÓN EN EL BATOLITO ANTIOQUEÑO
Y SU INFLUENCIA EN EL DISEÑO DE OBRAS SUBTERRÁNEAS

INTEGRAL LTDA

Ing. Gerardo Botero Arango
Asesor del Departamento de Geotécnica

Ing. Josué Gutiérrez Villegas
Director del Departamento de Geología

Ing. Rodrigo Álvarez Álvarez
Geólogo del Departamento de Geología

Medellín, Noviembre de 1.968

ÍNDICE

I.	GENERALIDADES	5
	El Batolito Antioqueño	5
	Litología	5
	Séquito de diques	6
	Propiedades mecánicas de la roca del batolito	6
II:	DEFINICIONES Y CLASIFICACIÓN DE DIACLASAS	6
A.	DIACLASAS PRIMARIAS	6
	a) Diaclasas transversales	7
	b) Diaclasas longitudinales	7
	c) Diaclasas diagonales	7
	d) Diaclasas primarias o sub-horizontales	7
B.	DIACLASAS SECUNDARIAS	7
III.	REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA ORIENTACIÓN DE UNA DIACLASA	7
	1. Proyección de igual área	8
	2. Proyección estereográfica	10
	Paralelo entre las dos proyecciones	10
	Obtención de los diferentes diagramas	11
	a) Método de conteo	11
	b) Obtención de diagramas polares contorneados	11
	Factores que influyen en la precisión de los resultados	12
	1ª. Método de proyección	12
	2ª. Fidelidad de datos	12
IV.	RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CENTRAL DE GUATAPÉ	13
	Diagrama del túnel de conducción (captación)	13

Diagrama del túnel de acceso	13
Diagrama del túnel de fuga	13
Diagrama del túnel de fallas, diques, fracturaciones	14
V. CONCLUSIONES Y LIMITACIONES	14
BIBLIOGRAFÍA	16

LISTA DE FIGURAS

- Fig. 1 Disposición general de las obras en la Central de Guatapé
- Fig. 2 Secciones típicas de los Túneles de Acceso a Casa de Máquinas Y Cámara de Válvulas
- Fig. 3 Secciones Típicas de los Túneles de Conducción (Captación) y Fuga
- Fig. 4 Secciones de las Cavernas de Máquinas y Transformadores
- Fig. 5 Proyección de igual área
- Fig. 6 Red de Schmidt
- Fig. 7 Proyección estereográfica
- Fig. 8 Diagrama Polar y Método de Conteo
- Fig. 9 Diagrama Túnel de Conducción y Túnel de Acceso a Cámara de Válvulas
- Fig. 10 Diagrama Túnel de Acceso a Casa de Máquinas
- Fig. 11 Diagrama del Túnel de Fuga
- Fig. 12 Diagrama de Fallas, Diques y Fracturación.

FRACTURACIÓN EN EL BATOLITO ANTIOQUEÑO Y SU INFLUENCIA EN EL DISEÑO DE OBRAS SUBTERRÁNEAS

I- GENERALIDADES

El Batolito Antioqueño: El cuerpo principal de este plutón y sus cuerpos satélites, cubren aproximadamente el 15% de la superficie total del Departamento de Antioquia (62 870 km²). Plutones similares ocurren en otros sitios de la cordillera Central.

El tipo de roca predominante del ígneo antioqueño cae entre una granodiorita o tonalita. Una definición más real de la roca promedia y de los límites del plutón se podrá obtener acopiando los datos existentes, y los que obtuvo el Inventario Minero Nacional Zona II. En general el ígneo se halla totalmente compuesto hasta una profundidad promedia de 35 m.

Litología: La textural normal es granular media gruesa a monzonítica. En las zonas de contacto las texturas son variadas, desde granulares finas pasando por porfiríticas en los xenolitos en proceso de asimilación, hasta fuertemente nesoides y de grano grueso, antes de pasar a los tipos normales.

El color blanco moteado de negro por los ferromagnesianos, principalmente biotita y hornblenda, los minerales constituyentes principales son: Plagioclasa, Ortosa, Cuarzo, Biotita y Hornblenda. A veces predomina la Biotita sobre la Hornblenda o viceversa.

La roca se descompone dando un suelo limo arcilloso de color rojizo. El análisis hecho a dos muestras de este suelo provenientes de la presa de Miraflores y de la Presa de Santa Rita (en construcción) dio el siguiente resultado:

<u>MUESTRA</u>	<u>REPRESA DE MIRAFLORES</u>	<u>PRESA DE SANTA RITA</u>
Cuarzo	35%	35%
Caolinita	42%	65%
Gibbsita	16%	25%
Illita (Mica)	7%	10%

Este limo es en general bastante ácido y no es muy apto para la agricultura.

En general, el Batolito Antioqueño forma cerros romos, en cambio las rocas metamórficas presentan cerros agudos; este contraste topográfico es muy útil para el trazo de contactos en fotografías aéreas. La mayoría de las grandes obras civiles de Antioquia están localizadas sobre el ígneo.

Séquito de diques:

- a). Oscuros (melanocráticos), de grano fino, a veces porfiríticos, color negro a veces verde por cloritización de la hornblenda; generalmente sus espesores varían entre 0.10 a 1.0 m, raras veces presentan espesores mayores, se hallan tanto en las rocas encajantes como en el propio batolito, donde son muy ricos en hornblenda.
- b). Claros (leucocráticos): pegmatitas y aplitas son más comunes, y a veces se presentan en enjambres, pero los más abundantes son delgados y en las vecindades de los contactos.

Propiedades mecánicas de la roca del batolito:

Las siguientes fueron determinadas a partir de corazones tomados a diferentes profundidades:

Muestra No.	Prof pies	L / D	Rango de esfuerzos psi	Módulo secante E 10 ⁶ psi	Relación de Poisson	Esf de compresión.psi
HT-3	708	1.96	0- 500	4.2	0.16	
HT-3	708	1.96	0-1000	5.3	0.17	
HT-3	708	1.96	0-2000	7.3	0.18	13.905
HT-16	327	2.00	0-1850	3.81	0.06	8.318
HT-4	653	1.93	0-8000	12.6	0.22	24.165
T8B	454	2.00	0-1600	3.6	0.11	8.308
T9A	563	2.00	0-1850	6.8	0.18	15.157
HT-1	539	2.00	0-3250	3.49	0.13	13.000

II. DEFINICIONES Y CLASIFICACIÓN DE DIACLASAS

a). Diaclasas: Son planos o superficies de disyunción en las rocas; cuando hay desplazamiento o movimiento se clasifican como fallas. El rumbo o dirección de una diaclasa está dado por la traza del plano de diaclasa en un plano horizontal. El hundimiento o buzamiento es el ángulo que se forma entre el plano horizontal y el de la diaclasa; se mide en un plano vertical, perpendicular el rumbo de la diaclasa. Un sistema de diaclasas es el conjunto de las que tienen aproximadamente la misma orientación.

A. DIACLASAS PRIMARIAS:

Son las originadas durante la consolidación del magma y se dividen en:

- a). Diaclasas transversales: Son aproximadamente normales a las líneas de flujo; por regla general, son rectas y largas; no hay una ley de espaciamiento, son notables por su uniformidad y persistencia, son singenéticas con los diques aplíticos y pegmatíticos que generalmente siguen las diaclasas transversales. Estas diaclasas deben considerarse como equivalentes a fracturas de cizalla o diaclasa de tensión.
- b). Diaclasas longitudinales: Son empinadas, con dirección aproximadamente paralela a la orientación general de las líneas de flujo; son poco uniformes y carecen de claridad, tienden a ser cercanamente espaciadas, siguen a lo largo de ellas pegmatitas, aplitas, diques básicos.
- c). Diaclasas diagonales: Forman un ángulo de 45° con las líneas de flujo, el buzamiento generalmente es mayor de 45° . Se pueden considerar como planos de cizalladura originados por esfuerzos tanto horizontales como verticales; son más comunes en rocas metamórficas y sedimentarias. Estas diaclasas presentan dos direcciones complementarias e iguales.
- d). Diaclasas primarias o sub-horizontales: (“Flat Lying”) Se reconocen en los plutones que muestran una tendencia a desarrollar diques básicos, diques cuarzosos, pegmatitas, aplitas, sub-horizontales. Se desarrollan cerca de los contactos. La clasificación anterior corresponde a los sistemas de diaclasas presentes en plutones menores. Para su determinación es fundamental la definición de las estructuras de flujo. En los plutones más grandes, además de las diaclasas anteriores, se presentan las diaclasas marginales y fallas normales sub-horizontales.

B). DIACLASAS SECUNDARIAS

Son las originadas por el tectonismo. Las principales son las diaclasas de tensión y las de cizalladura.

III. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA ORIENTACIÓN DE UNA DIACLASA:

Para evaluar las frecuencias relativas de varias orientaciones de diaclasas observadas en un área, aclarar las relaciones geométricas entre varias series de ellas y la orientación de los ejes principales en obras de ingeniería (túneles, presas, etc), es necesario o muy conveniente hacer uso de una representación gráfica sencilla para definir la orientación de los planos, lo cual puede lograrse por líneas o puntos, que se obtienen de las intersecciones del plano de diaclasas o de la perpendicular a éste, con una esfera de referencia, al suponer que los planos pasan a través del centro de la esfera (Fig. No. 5 A). De acuerdo con lo anterior, la intersección de un plano cualquiera de diaclasa con la superficie de la esfera, dará

un círculo máximo a la perpendicular que pasa por el centro de la esfera la cortará en los puntos P, P¹, llamados polos. Así los polos de una diaclasa horizontal BCDE están en A y F; los de una vertical ABFD están en E y C; los de una vertical ACFE están en B y D; los de una inclinada HCGE están en P y P¹, (Fig. 5, parte A).

El polo de una diaclasa se puede visualizar como el punto de tangencia de ésta si se desplaza paralelamente a su posición original hasta que apenas toque la superficie de la esfera.

Para representar gráficamente la orientación de una diaclasa, es obvio que basta utilizar únicamente uno de los dos hemisferios de la esfera, debido a que los polos en los dos hemisferios están diametralmente opuestos entre sí, es decir, el polo de un hemisferio es la imagen especular del otro polo en el otro hemisferio.

Los ejes de túneles, etc., se pueden presentar por uno de los puntos en donde un diámetro de la esfera que tenga igual dirección a la del eje del túnel, corte la superficie de ella. Los puntos localizados en la superficie de la esfera de referencia se pueden proyectar en un plano de varios métodos. De éstos, los más comúnmente utilizados son:

1. La proyección de igual área o de Lambert, en la que se utiliza la red de Schmidt, y
2. La proyección estereográfica, en la que se utiliza la red de Wulff

1.- Proyección de igual área:

Se han ideado varias proyecciones de igual área, pero la más utilizada con relación a problemas geológicos, es la de Lambert

Esta proyección se ilustra en la Fig. 5 B, que se obtiene al cortar la esfera de referencia de radio R (Fig. 5 A), a lo largo de un plano vertical perpendicular a la dirección de una diaclasa. En la Fig. 5 B, AF es un diámetro vertical, HG es la línea de mayor pendiente de la diaclasa, cuyo polo es P y su proyección es M. Sea d la distancia del círculo de proyección a M.

De la misma tenemos:

$$d = FM = FP = 2R \operatorname{sen} \alpha / 2 \quad (1)$$

Siendo α el ángulo de buzamiento de la diaclasa

Cuando $\alpha = 90^\circ$, $d = 2R \cdot 2/2 = R$, que es el valor máximo

Cuando $\alpha = 0^\circ$, $d = 0$, que es el valor mínimo, o sea $0 > d < R$

El lugar de los polos que representen planos de igual buzamiento y diferentes direcciones es el círculo del radio igual al valor de d dada por (1) para dicho buzamiento. Es conveniente que el valor d máximo sea igual al radio de la esfera de referencia, lo cual equivale a reducir la escala para los distintos valores de d . Esto se logra de la siguiente manera:

Se multiplica el segundo miembro de la ecuación (1) por una constante K y se averigua su valor sabiendo que cuando $\alpha = 90^\circ$, $d = R$

$$R = 2R \frac{d}{2} K ; 0 \frac{1}{2}$$

Los valores finales están dados por la siguiente ecuación:

$$D = 2 R \sin \alpha / 2. \quad \text{Si } R = 10 \text{ cm, } d = 14.14 \sin \alpha / 2 \text{ cm.}$$

Con esta modificación se disminuye la distorsión debida a la mecánica de la proyección. Para dibujar la proyección del polo de una diaclasa en particular, se traza una línea desde el centro del círculo del ángulo recto con el rumbo de la diaclasa y opuesta a la inclinación del plano y sobre esta la línea se toma la distancia a partir del centro del círculo. Para facilitar la representación se utiliza la red de Schmidt, Fig. 6, que consiste en arcos máximos meridionales que representan las proyecciones de los círculos máximos separados cada dos grados. Los arcos menores representan pequeños círculos dibujados alrededor de los polos de la esfera, espaciados cada dos grados, que sirven para efectos de tomar la dirección de la diaclasa.

Los arcos máximos representan planos con dirección N-S. Cuando se representan planos de diaclasas al oeste, estarán dados por los arcos meridionales, situados a la izquierda del diámetro N-S, y los arcos meridionales situados a la derecha del diámetro N-S, representan planos con buzamientos al Este. Planos verticales de dirección N-S están representados por el diámetro N-S, y los planos horizontales por la circunferencia del círculo de proyección. La orientación de un plano con buzamiento al oeste representado por el sistema del polo, estará indicada situado al Este.

Todo lo anteriormente dicho, ocurre cuando se utiliza el hemisferio inferior. Para representar gráficamente una diaclasa con dirección diferente a la N-S, se superpone papel transparente a la red de Schmidt, se fija en el centro de la red, se indica el diámetro N-S con una marca sobre el papel transparente de la circunferencia de la red; la dirección de la diaclasa se señala de una manera similar, luego se rota el papel transparente hasta que la marca que indica la dirección de la diaclasa coincida con el diámetro norte-sur de la red; luego se traza el arco máximo que representa el buzamiento del plano. El polo estará situado en el diámetro Este-Oeste y a una

distancia del centro del círculo determinada por el ángulo de buzamiento y en el cuadrante opuesto a la dirección de su inclinación.

2.- Proyección estereográfica:

Se utiliza comúnmente en la solución de problemas de cristalografía y de geología estructural, así como en ciertos problemas de petrografía estructural. Algunas veces se emplea para representar datos de orientación de diaclasas. Las figuras 7 A y 7B ilustran dicha proyección.

La Figura 7 A muestra la esfera, el eje AC es vertical, el EF es horizontal ESTE-OESTE, y el eje BD es horizontal NORTE-SUR, EBF, es un plano horizontal, ABCD es un plano vertical NORTE-SUR y ECFA es uno vertical ESTE-OESTE. La parte izquierda de la Fig. 7 A ilustra la proyección de polos y la parte de la derecha indica el método para representar planos. La intersección del plano QBHD buzando al oeste con el hemisferio inferior es BHD. La proyección de H sobre el plano ecuatorial es G y la línea BHD está representada por BGD.

La Fig. No. 7 B representa una sección vertical de la esfera a través del plano de proyección, QH I línea de mayor pendiente, P y P" son el polo y su proyección respectivamente y es el ángulo de buzamiento, R el radio de la esfera y d la distancia de P" al centro de la esfera: su valor está dado por la siguiente ecuación:

$$d = R \tan \alpha/2$$

El arco máximo que representa la proyección de la traza del plano con la esfera, cortará a EF en un punto que dista del centro de la esfera.

$$d = R \tan \frac{(90^\circ - \alpha)}{2}$$

Para representar gráficamente ya sean las trazas o los polos, se utiliza la red de Wulff; el método es idéntico al utilizado con la red de Schmidt en la proyección de igual área.

Paralelo entre las dos proyecciones:

La distorsión hacia la periferia de la proyección estereográfica (red de Wulff) es mayor que en la proyección de igual área (red de Schmidt).

En la primera un área de 10° de lado en la periferia es desproporcionadamente mayor que un área igual hacia el centro. En la proyección de igual área, se elimina gran parte de esta distorsión y las áreas son casi iguales, pero con diferente forma, como se puede ver en la Fig. 6 (áreas sombreadas)

Por consiguiente, el uso de la proyección estereográfica no es adecuada en un trabajo que tenga por objeto mostrar la concentración espacial relativa de datos medidos. Otra diferencia entre las dos proyecciones estriba en el área circular pequeña situada en cualquier parte de la esfera de referencia está representada por un área aproximadamente circular en la proyección estereográfica; mientras que en la proyección de igual área es únicamente circular cerca del centro del círculo de proyección.

Obtención de los diferentes diagramas:

a). Método de conteo: El diagrama resultante de la proyección de los polos por cualquiera de los dos métodos se llama diagrama de puntos o diagrama polar, Fig. 8 A. Los puntos o polos hacia la periferia representan planos casi verticales y hacia el centro son casi horizontales. Un plano vertical tendrá dos puntos en la circunferencia y generalmente se toma uno cualquiera de estos puntos para no dar la impresión equivocada de su abundancia. Por lo tanto los puntos sobre la circunferencia indican planos verticales y pueden ubicarse en cualquier extremo de un diámetro; se procura distribuirlos de tal manera que quede igual número de puntos en cuadrantes opuestos de la circunferencia.

B). Obtención de diagramas polares contorneados: Para obtener el diagrama polar contorneado (contoured polar diagram), se procede al conteo de los puntos o polos. El diagrama polar Fig. 8 A, se coloca sobre un reticulado de 20x20 cm con divisiones a cada centímetro, debido a que la red tiene 10 cm de radio y el área de conteo es el 1% del diagrama. El área de los contadores están relacionados con el reticulado, así por ejemplo; si el área de los contadores es el 2% del diagrama, el reticulado sería 2 cm; en el caso específico a que se refiere este trabajo, se utilizaron contadores con áreas que representan el 1% del total del área del círculo de proyección, a causa de que es una relación apropiada para fines estadísticos, ya que en un diagrama que represente correctamente una disposición al azar de diaclasas, el círculo del contador en cualquier posición incluye el 1% de todos los polos que se representan gráficamente.

El diagrama de polos se coloca sobre el reticulado, de manera que los lados exteriores de éste sean tangentes a la circunferencia del círculo de proyección, Fig. 8 B. Se señala el punto cero del reticulado que corresponde al extremo superior de la línea vertical, que pasa por el centro del círculo. Los contadores se elaboraron de material plástico. El contador central (CC) es un cuadro de 4 cm de lado en cuyo centro se perforó un círculo de 1 cm de radio. El contador periférico (CP) consiste en dos círculos contadores en los extremos de una barra, con una ranura en el centro de la misma; la distancia entre los centros de los dos círculos es igual al diámetro del círculo de proyección.

El contador central se coloca con su centro sobre cada intersección del reticulado y se anota el porcentaje en su centro. El contador central se desplaza sobre todo el diagrama, de izquierda a derecha, un centímetro por vez: después de que se completa este recorrido se mueve el CC un centímetro hacia abajo, y se efectúa otro recorrido. No se toman las posiciones en las márgenes en las cuales el círculo del contador no queda dentro del diagrama. Para el conteo de los puntos en 0 cerca de la periferia, se utiliza el contador periférico ideado por Schmidegg. Se pasa un alfiler a través del centro de la ranura del CP y el centro del círculo de proyección (Fig. 8 B). Se parte de una posición inicial, por ejemplo la N-S, se totalizan los polos que aparecen en los círculos de los contadores, y el total o su porcentaje se anota en ambos centros de los círculos, luego el contador se gira hasta que los círculos se desplacen 1 cm. a lo largo de la periferia y se procede de un modo similar. Se continúa el conteo a todo lo largo de la circunferencia. Para aquellas intersecciones cerca de la periferia no porcentuadas con el CC se procede de la siguiente manera: El CP se desplaza a lo largo de la ranura, hasta que la intersección no porcentuada aparezca en el centro de uno de los círculos del CP y el porcentaje se anota en la intersección no porcentuada, después de que el diagrama ha sido cubierto con cifras porcentuales, se dibujan curvas de igual densidad o porcentaje de la misma manera que se preparan curvas de igual elevación en planos topográficos, partir de puntos de altitud conocida. Es conveniente comenzar por aquellas líneas de mayor porcentaje o densidad; las áreas de mayor densidad se señalan usualmente en negro; las zonas de menor densidad, se indican por medio de convenciones.

Factores que influyen en la precisión de los resultados:

Existe un método para localizar con más precisión las líneas de igual porcentaje (ver Memoir 6, GSA). Pero, en general, la precisión en el trazo de las líneas de igual porcentaje está limitada, debido a dos causas:

1ª. Método de Proyección: como y se anotó, existen distorsiones en ambas proyecciones, las cuales son mayores en la proyección estereográfica. Los contadores circulares utilizados para el conteo son únicamente ciertos en el centro de la red; hacia la periferia se necesitarían para obtener buena precisión contadores de formas elípticas, cada una de 1% del área del diagrama. Sin embargo la experiencia ha mostrado que contadores de forma circular son suficientemente exactos. De acuerdo con la mecánica de la proyección, la precisión en la obtención de las líneas de igual densidad no se puede lograr particularmente cerca a la periferia de la Red o Círculo de Proyección.

2ª. Fidelidad de datos: Ningún levantamiento de diaclasas suministra una información completa acerca de todas las diaclasas presentes en un cuerpo de roca, pero se puede lograr un acercamiento a la real orientación y espaciamiento de las diaclasas si se siguen ciertos métodos en el levantamiento.

El resultado de los datos obtenidos en un túnel depende de los ángulos que hace el eje del túnel con las orientaciones de los sistemas de diaclasas y el tamaño de la sección con respecto al espaciamiento de ellas. Generalmente, en un área desconocida (durante el trabajo de exploración), los datos de fracturas se obtienen de huecos perforados en direcciones adecuadas, por medio de fotografías de las paredes del hueco o por medio de aparatos de TV, junto con el registro de afloramientos de roca en quebradas, ríos, túneles pilotos.

Es conveniente preparar un solo diagrama de todos los datos obtenidos en los diferentes sitios. Posteriormente se harán los diagramas finales con las informaciones tomadas en todas las obras una vez queden concluidas.

Se citan los dos tipos de proyección, ya que en algunos textos presentan tanto la una como la otra. Talobre ilustra un diagrama con la proyección estereográfica en una de las aplicaciones de esta clase de estudios.

IV. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CENTRAL DE GUATAPÉ

Diagrama del Túnel de Conducción (Captación). (Fig. 9)

Se obtuvo la representación gráfica de un total de 500 diaclasas localizadas a lo largo del Túnel de Conducción entre las abscisas 5 067833 y 2 300 y en la longitud total del túnel de acceso a Cámara de Válvulas (total 450 m). Este diagrama muestra un sistema principal N-W ($N.40^{\circ}$ a 30° W), con buzamientos bastante empinados (áreas sombreadas). Otro sistema N-E con buzamientos predominantes poco empinados (intermedios 30° a 60°). En las direcciones N-S y E-W ocurren muy pocas diaclasas.

Diagrama Túnel de Acceso. (Fig. 10):

Este diagrama se refiere al Túnel de Acceso a las cavernas e incluye 400 diaclasas tomadas a lo largo del Túnel, y en las cavernas en una fase de su construcción, así como datos obtenidos en afloramientos de roca en la Q. Farallones y La Araña. En el diagrama se ven más definidamente los sistemas N-W y N-E y similarmente es escasa la ocurrencia de diaclasas en las direcciones N-S y E-W. Aquí el eje del túnel tiene un rumbo $N 30^{\circ}W$.

Diagrama Túnel de Fuga. (Fig. 11):

Se representaron gráficamente un total de 800 diaclasas. No se tuvieron en cuenta las diaclasas representadas por la roca granítica; los datos se tomaron a lo largo del

túnel hasta la abscisa 3 000. También se aprecia claramente los dos sistemas N-W y N-E. En esta zona ocurren mayor número de diaclasas en el sentido N-S y E-W.

Diagrama de Fallas, Diques, Fracturaciones. (Fig. 12):

En esta figura se agruparon los datos obtenidos en los diferentes túneles; igualmente en los diagramas anteriores muestra claramente los sistemas N-W y N-E.

V. CONCLUSIONES Y LIMITACIONES.

De acuerdo con el resultado del estudio, las direcciones más apropiadas para la orientación de ejes de obras serán N-S y E-W. Por lo tanto los túneles de conducción (captación), fuga y las cavernas de casa de máquinas y transformadores están orientados adecuadamente, no así el túnel de acceso a la casa de máquinas y en general el de acceso a la cámara de válvulas. Se deduce por lo tanto que las obras mayores y más importantes quedaron bien localizadas.

Los diques generalmente están asociados a fallas y zonas fracturadas; sus respaldos en general, aparecen con cizalladuras y agua, Cerca de las fallas, la roca se presenta con diaclasas abiertas y los bloques de rocas limitados por estos planos necesitaron pernos; además la roca se halló generalmente cloritizada.

En el túnel de acceso a casa de máquinas, entre las abscisas 780 y 964 (el abscisado aumenta hacia las cavernas), se presentó un dique de 2 metros de espesor, con los respaldos cizallados en una dirección casi paralela el alineamiento del túnel; entre las abscisas 930 y 964, se encontró una zona muy fracturada, con un serie de fallas menores y presencia de gran cantidad de agua, tal que copó la capacidad del sistema de bombeo; hubo necesidad de hacerle un quiebre al alineamiento, para abandonar el dique cizallado . este dique se determinó en la Q. Farallones, abyacente a la zona, la cual presenta la misma orientación N-W del túnel.

No todas las fallas presentaron agua y muchas de ellas necesitaron poco entibado metálico o ningún sostén temporal, debido más que todo a su escaso espesor y a que se cortaron casi perpendicularmente.

Una variedad del plutón que llamaremos roca granítica (muy blanca) con pocos minerales ferromagnesianos (1%), es muy dura, presentó muy alta resistencia a la perforación; su sistema de diaclasas apretadas E-W aproximadamente, son cerraduras y parecen poco extensas. En el túnel de fuga se presenta en tramos de más de 300 m. que intruye al batolito normal; se halló una falla en el contacto en dirección N 75°W.

El túnel de conducción presenta tramos hasta 50 m. de roca muy maciza sin planos de diaclasas con direcciones casi E-W ($N 80^{\circ} - 70^{\circ}W$), con buzamientos suaves al norte y al sur, que se interceptan a lo largo del eje del túnel y a que la sección de este túnel es más reducida.

Las rocas se clasificaron macroscópicamente, Es la primera experiencia en este tipo de trabajos, que tiene su técnica especial y generalmente es llevada a cabo por geólogos con bastante experiencia en estas actividades.

Es bueno anotar que Botero (1963) estudió 142 medidas de alineamientos en el batolito, tomadas de aerofotos y su resultado es similar al resultado obtenido en este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Billings M.P. 1963 Geología Estructural. Traducción, 2ª Ed. 1964
- Balk, R. 1959 Structural Behavior of Igneous Rocks. Memoir 5 G.S.A.
- Botero, A. G 1963 Contribución al conocimiento de la Geología de la Zona Central de Antioquia. Anales de la Facultad de Minas. Medellín.
- Fairbairn, H.W. 1949 Structural Petrology of Deformed Rocks. Addison Wesley Press. Cambridge.
- Klaus, W. J. 1952 An Approach to Rock Mechanics. Proc. Amer Soc. Civ. Engrs. Vol. 88 No. 4,
- Snoff E.B. & E. Ingerson 1938 Structural Petrology Memoir No. 6, Geological Society o America, New York.
- Monathan, C.J. 1963 Discussion on an Approach to Rock Mechanics By Klaus W. John Proc. Amer. Soc, Civ Engrs., 89 SM I: 306.
- Muller, L. 1963 Discussion an Aproach to Rock Mechanics by Klaus W John. proc. Soc. Civ. Engrs. 89 SM 2.
- Terzaghi, K. 1963 Discussion on An Approach to Rock Mechanics by Klaus W. John proc. Soc. Civ. Engrs. 89 SM I
- Terzaghi, R.V.T.H.D 1965 "Sources of Error in Joint Surveys" Geotechnique Vol. XV No. 3.