

5-10 ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN EL SECTOR SURESTE DE LA MINA
CHUQUICAMATA

Juan Pallauta M.
Codelco Chile, División Chuquicamata

RESUMEN

En este trabajo se analiza la probabilidad de falla en el Sector 5 de la Mina Chuquicamata, durante la explotación de las reservas contenidas en los bancos inferiores del área, ubicada en la vecindad del derrumbe de 12 millones de ton. ocurrido en el año 1969.

La estabilidad del macizo rocoso, se establece a través del análisis de los elementos de fábrica estructural y usando un modelo bidimensional de tajadas, con superficies de ruptura circulares - cilíndricas.

El estudio recomienda una modificación del diseño minero, que consiste en la descarga de 14,7 millones de ton. de roca en los bancos superiores del Sector 5.

ABSTRACT

This paper analyzes the probability of fault in Sector 5 of Chuquicamata pit, during the lower benches ore remotion, in the vicinity of the zone where 12 million tons of rock collapsed in 1969.

The rock mass stability is established by the inspection of structural fabric elements and using a bidimensional slice model with circular-cylindrical slide surfaces..

The study recommends the modification of mining design, consisting of the extraction of 14,7 million tons of waste in the Sector 5 upper benches.

1.- ANTECEDENTES GEOLOGICOS

1.1. Marco Geológico

El yacimiento de Chuquicamata está ubicado en la Segunda Región, provincia El Loa, Fig. 1, 1 600 km al norte de Santiago, 240 km al noreste de Antofagasta y 17 km al norte de Calama. Las coordenadas geográficas que lo determinan son: 22° 17' latitud sur y 68° 55' longitud oeste.

En el área, en orden de importancia, se reconocen rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, dispuestas en franjas de rumbo N 10°-15° E. El principal rasgo estructural corresponde a una falla de extensión regional de rumbo NS, denominada Falla Oeste, que marca el límite occidental del yacimiento de Chuquicamata.

Al oeste de la falla, se reconoce la granodiorita Fortuna, al este de la estructura, se disponen en orden de edad creciente; el Pórfido Chuqui, roca huésped de la mineralización, la granodiorita Elena, el monzogranito Este y el granito Mesa.

Las rocas metamórficas y sedimentarias, se emplazan en las unidades más antiguas del complejo intrusivo y corresponden a remanentes ígneos de composición intermedia a básica y principalmente a calizas y conglomerados, que afloran en franjas delgadas y discontinuas.

1.2. Estructuras

En el yacimiento de Chuquicamata, se distinguen cuatro zonas de cizalle con rumbo norte-sur, asociadas a un dislocamiento principal y sistemas de fallas secundarias, entre los que se reconocen sistemas conjugados con rumbo noreste y noroeste, producidos por cizalle y sistemas de fallas de tensión, con rumbo

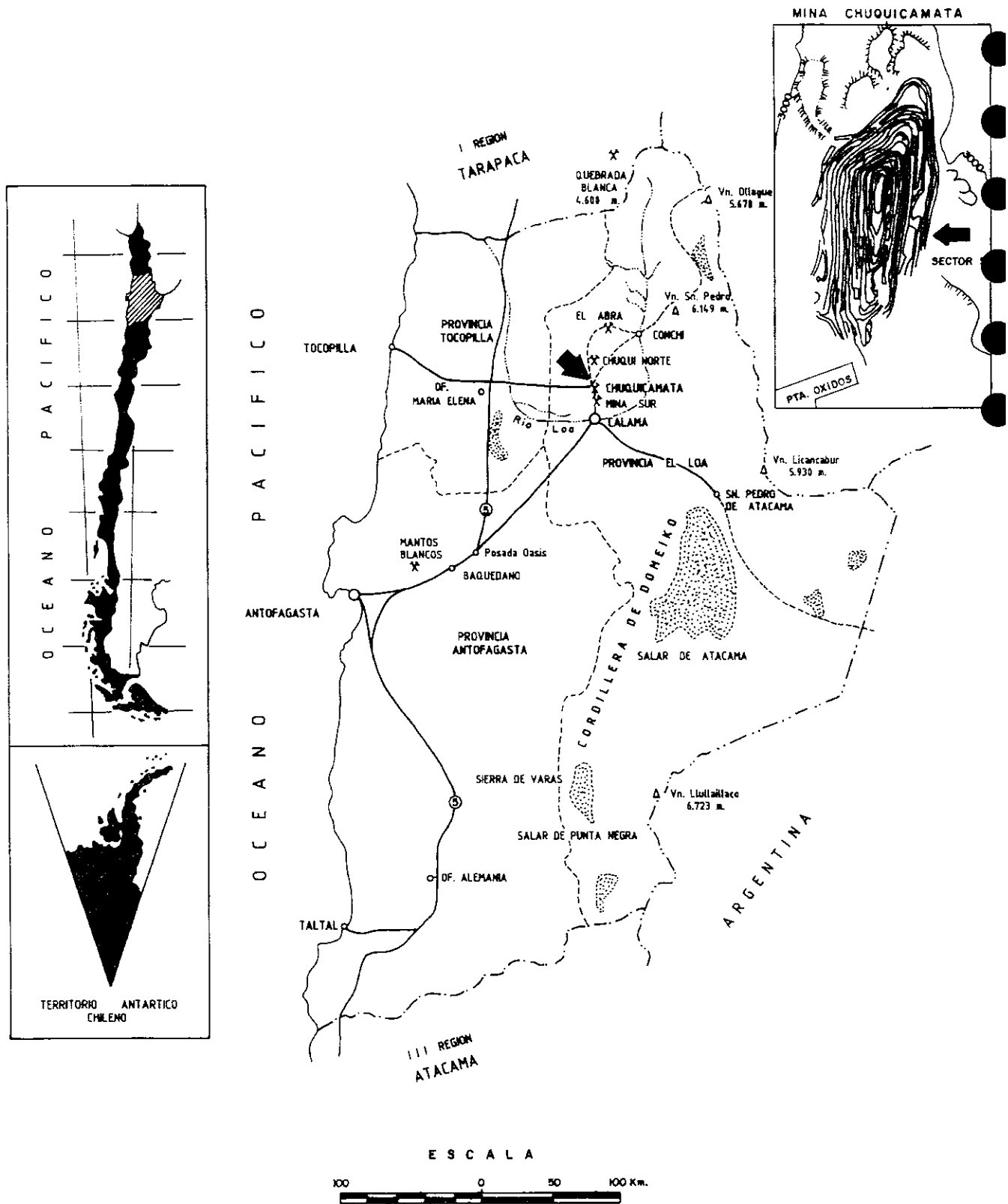


FIGURA 1.- MAPA DE UBICACION, YACIMIENTO CHUQUICAMATA SEGUNDA REGION, ANTOFAGASTA.

este-oeste, Fig. 2. Movimientos postminerales han sobreimpuesto otros rasgos estructurales que tienden a oscurecer el patrón original.

1.2.1. Zonas de Cizalle

- Zona de Falla Oeste. Se reconoce como tal la zona de 100 a 150 m de ancho, emplazada en la granodiorita Fortuna, adyacente a la Falla Oeste y paralela a ella. En parte incompetente y en parte saturada con agua. La Falla Oeste, se define como la superficie fallada que marca el límite occidental del yacimiento.

La existencia de dos salbandas principales, separadas sólo por algunos metros, sugiere la ocurrencia a lo menos de dos fallamientos, conocidos por algunos autores como ramas este y oeste de la falla. El primero de ellos se remontaría a épocas preminerales (LOPEZ, 1942), mientras el último correspondería a un período posterior al relleno de la pampa, debido a que afecta a las gravas de cobertura en el extremo sur del rajo.

- Zona de Falla Americana. Con un ancho medio de 200 m, se dispone en dirección N 10° E. Aparentemente está formada por dos segmentos, debido a desplazamientos en echelón causado por una falla del sistema Estanques Blancos, de rumbo noreste. En el extremo sur de la mina, la Zona de Falla Americana, tiene su mejor expresión y se une a la Falla Oeste.

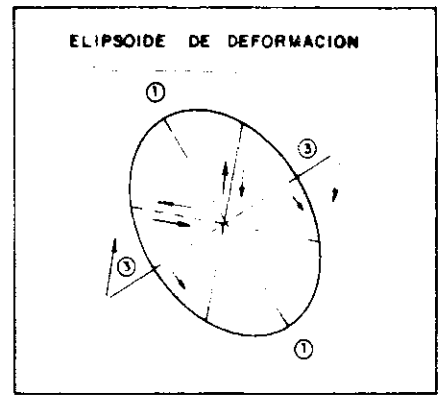


FIGURA 2.- MAPA ESTRUCTURAL, YACIMIENTO CHUQUICAMATA.

- Zona de Falla Banco C-2. Mejor desarrollada en la parte norte de la mina, donde se dispone en forma paralela a la zona silicificada del sistema Falla Americana. Al sur, el sistema es menos relevante y se ramifica en forma de "cola de caballo".
- Zona de Transición. A escala regional, puede correlacionarse con el sistema de falla Mesabi, desplazado en echelón por fallas del sistema Estanques Blancos. La zona de Transición, como su nombre lo indica, corresponde al límite oriental del cuerpo mineralizado y está integrada por fallas de rumbo N 10° E, desplazadas por fallas de rumbo noreste y noroeste. Al norte se reconoce la zona de Falla Panizo, como prolongación de la zona de Transición.

1.2.2. Zonas de Tensión

Se incluyen en esta denominación las fracturas secundarias, contemporáneas al fallamiento principal de rumbo norte-sur, producidas principalmente por esfuerzos tensionales. Atendiendo a su concentración en el yacimiento se distinguen las siguientes áreas:

- Area comprendida entre las zonas de Falla Oeste y Banco C-2, caracterizada por la presencia de abundantes vetas y vetillas de cuarzo.
- Area comprendida entre las zonas de falla Banco C-2 y Panizo, caracterizada por fracturas de rumbo noreste y este-oeste, en general mineralizadas.
- Area comprendida entre las zonas de falla Banco C-2 y de Transición, presenta un fracturamiento menos marcado que el área anterior, caracterizado por ramifi-

caciones de rumbo noreste y este-oeste. En algunos casos corresponden a cuerpos vetiformes que se proyectan fuera del yacimiento.

1.3 Unidades Geológicas

Atendiendo a las necesidades operacionales, el yacimiento se ha zonificado en "unidades geológicas", definidas como volúmenes de roca de comportamiento uniforme. Para tal efecto se ha tomado como criterio de zonificación, la alteración y mineralización presentes en la roca. Se estima que esta zonificación es válida para estudios geotécnicos, debido que en gran medida, el comportamiento mecánico del macizo rocoso está controlado por las variables consideradas.

1.4. Agua Subterránea

En la mina, las manifestaciones de agua subterránea se restringen a las vecindades de la Falla Oeste, donde afloran en forma esporádica vertientes de corta duración, la falla, con una permeabilidad media de $1,6 \cdot 10^{-6}$ cm/seg, actúa como barrera del agua contenida en la granodiorita Fortuna. En el resto del perímetro del rajo, el agua se manifiesta en cantidades pequeñas y entrampada en fracturas. La zona de saturación está controlada por el agrietamiento de la roca causado por las tronaduras, FALCON et al (1976).

1.5. Geología Local y Antecedentes Geotécnicos

El sector 5, geológicamente similar al área del deslizamiento ocurrido en 1969, se ubica inmediatamente al norte de esta zona, entre las coordenadas N-3700/N-4400 y E-3500/E-4000. En el extremo sureste del sector 5, Fig. 3, formando parte del coronamiento de la excavación, se emplaza la granodiorita Elena en contacto gradacional con el pórfido Chuqui, que aflora en los bancos inferiores de la pared.

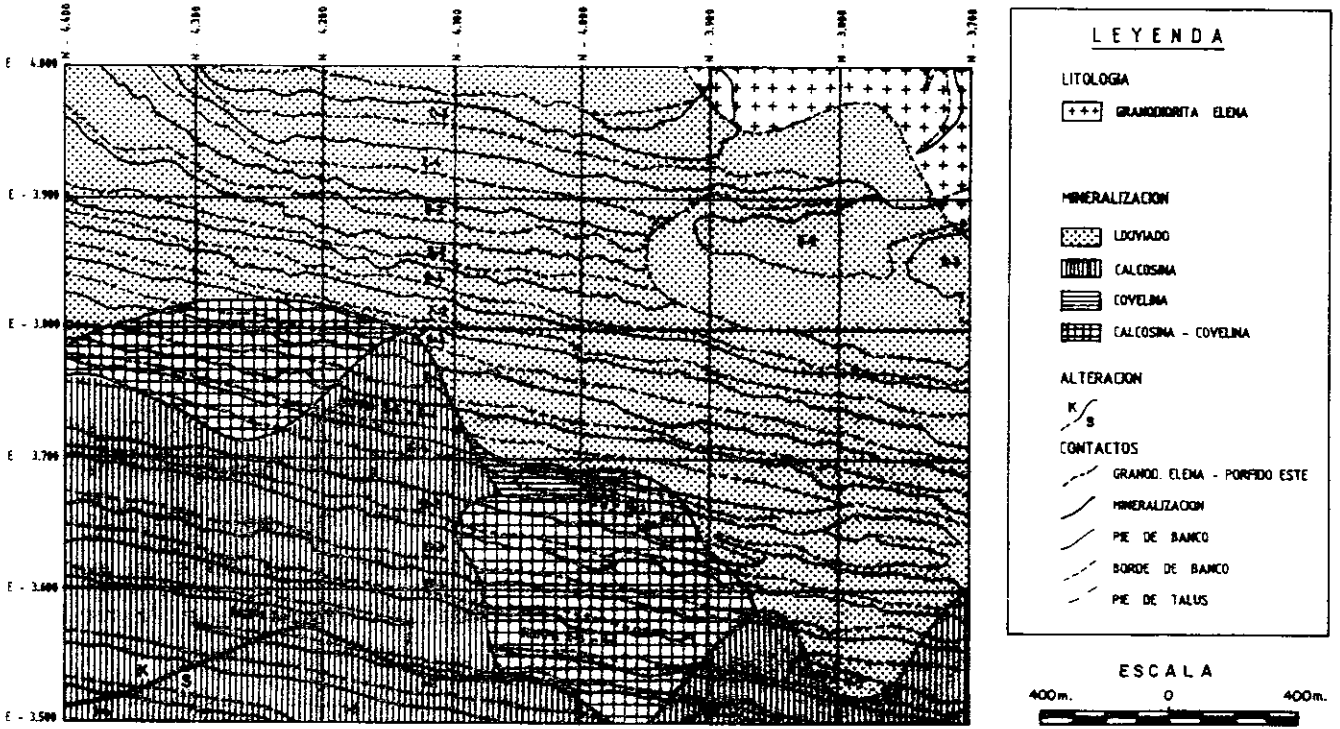


FIGURA 3.- MAPA GEOLOGICO SECTOR 5, MINA CHUQUCAMATA.

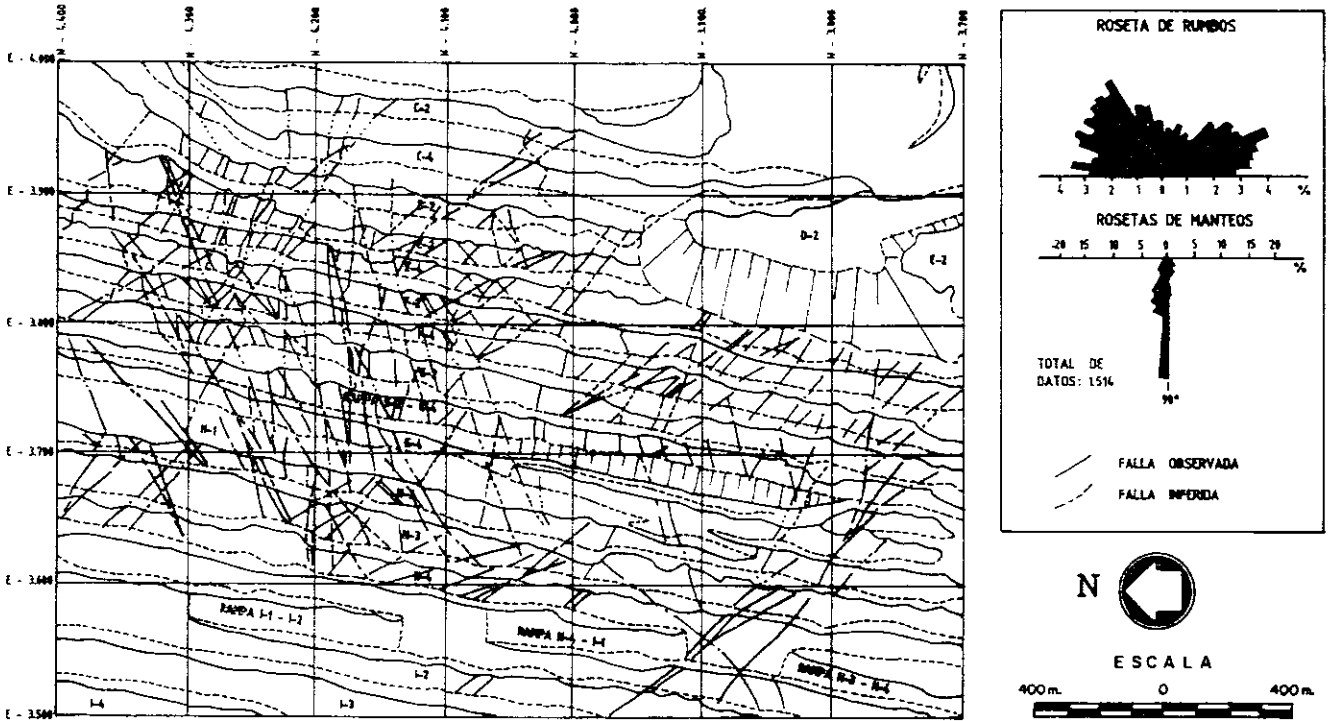


FIGURA 4.- MAPA ESTRUCTURAL SECTOR 5, MINA CHUQUCAMATA.

En esta zona del yacimiento, la roca huésped corresponde a la variedad denominada pórfido Este, texturalmente caracterizada por la presencia de una masa fundamental heterogranular, constituida por cristales anhedrales de cuarzo y feldespato potásico.

En la parte oriental del área, se reconoce la alteración propilítica, en el pórfido Este y la granodiorita Elena, caracterizada por la cloritización de los minerales máficos y la presencia de la asociación calcita - epidota - hematita especular.

Inmediatamente al oeste de la zona propilítica, y restringida al pórfido, se reconoce la alteración potásica, definida por la presencia de megacristales hipidiomorfos y guías de feldespato potásico y la presencia de biotita secundaria.

Sobreimpuesta a las alteraciones descritas, como producto de la acción de soluciones supérgenas, se desarrolla la alteración arcillosa que afecta total o parcialmente a las plagioclasas y al feldespato potásico. La presencia de la alteración arcillosa, comúnmente asociada a la ocurrencia de óxidos de hierro, es característica en la zona lixiviada del yacimiento y se extiende hacia la zona de sulfuros controlada por fallas y/o zonas de cizalle.

La unidad geológica lixiviado, presente en los bancos superiores del sector 5, no presenta concentraciones económicas de óxidos de cobre, éstos se restringuen a vetillas con mineralización de atacamita, brochantita y antlerita, también es frecuente encontrar arcillas con contenido de cobre en el relleno de fracturas.

La mineralización de sulfuros, restringida a los bancos inferiores, corresponde a la zona de enriquecimiento supérgeno donde la calcosina y covelina reemplazan total o parcialmente a calcopirita y bornita.

El estudio estadístico de las fallas del sector 5, demuestra que en el rumbo, están presente todas las alternativas descritas para las fallas "secundarias" del yacimiento. No ocurre lo mismo en el caso del manto, donde existe una marcada tendencia a la vertical. No obstante, en el sector estudiado, se reconocieron los siguientes "dominios estructurales", Fig. 4.

- Dominio de rumbo noroeste. Se desarrolla preferentemente entre las coordenadas N-4100 y N-4400, con buena continuidad en el rumbo.
- Dominio de rumbo noreste. Se ubica en el sur del sector 5 entre las coordenadas N-3500 y N-3900 y al igual que el caso anterior, presenta notable continuidad en el rumbo.

Ambos sistemas están igualmente representados en la parte central del área, entre las coordenadas N-3900 y N-4100 y son de continuidad restringida.

- Dominio de rumbo nor-noreste. Se desarrolla en los bancos superiores del área, es menos relevante que los anteriores y corresponde a una zona de cizalle formada por estructuras cortadas y desplazadas en forma de echelón por los sistemas noreste y noroeste.

Para complementar la descripción geológica del área, se incluyen los siguientes antecedentes geotécnicos del sector:

- En la zona lixiviada, el fracturamiento mecánico de la roca es alto y se observan grietas de tensión en las bermas de los bancos y en el coronamiento de la excavación. También son frecuentes fracturas horizontales en el talud de los bancos, ubicadas en el tercio superior, éstos efectos pueden ser atribuidos al alivio de carga producido por la extracción de la roca confinante y/o a las ondas de choque producidas por las tronaduras.

- Sondajes practicados en la pared este, han revelado la presencia de yeso en fracturas a partir de los 30 m de profundidad. Algunos autores relacionan la distensión de la roca en superficie con la disolución del yeso, producida por aguas de regadío durante períodos de operación.

De cualquier forma, en el Sector 5 se observa la presencia de una masa rocosa en deformación. Para evaluar sus efectos en la estabilidad de la pared, se recurre a la información de mapeos y a las características geomecánicas de las unidades litológicas presentes.

2.- ANALISIS ESTRUCTURAL

El análisis estructural tiene como objetivos: determinar estadísticamente la longitud de la roca no perturbada (bloque unitario) y establecer cuñas donde el deslizamiento es cinéticamente posible.

El análisis estadístico del fracturamiento de la masa rocosa, permite determinar el tamaño medio del bloque unitario, necesario para escalar la cohesión in-situ, a partir de los ensayos de laboratorios, TURINZEV et al (1973).

El segundo objetivo, dirigido a establecer zonas estructuralmente débiles, se logra al analizar la posición relativa de las intersecciones de estructuras planares, respecto a la cara libre de la excavación y/o a través de modelos matemáticos que permitan simular las condiciones de terreno.

2.1. Fracturamiento de la Masa Rocosa

Para modelar las condiciones de terreno en el análisis de estabilidad de taludes en roca, es fundamental definir en forma cuantitativa el grado de fracturamiento del macizo rocoso.

Este objetivo se consiguió a través del tratamiento estadístico de los antecedentes estructurales, donde se obtuvieron los siguientes resultados:

- Número de fallas por intervalo de 30 m	7,33 - 3,23
- Potencia media de fallas (cm)	12,55 - 8,60
- Longitud de roca fallada (cm) por intervalo de 30 m.	91,99 - 76,80
- Sistemas de diaclasas reconocidas por intervalo de 30 m	8,26 - 4,07
- Número de diaclasas por metro	5,18 - 1,77

En la Fig. 5, se muestran los histogramas correspondientes a la potencia de fallas y tamaño de bloque unitario. El histograma de potencia de falla sugiere una distribución logarítmica, con un valor modal de 7,5 cm mientras al tamaño de bloque unitario, corresponde una distribución normal con una media de 90,54 cm.

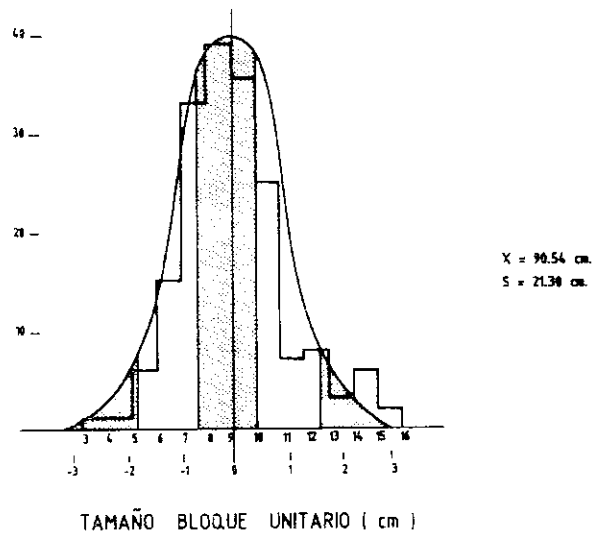
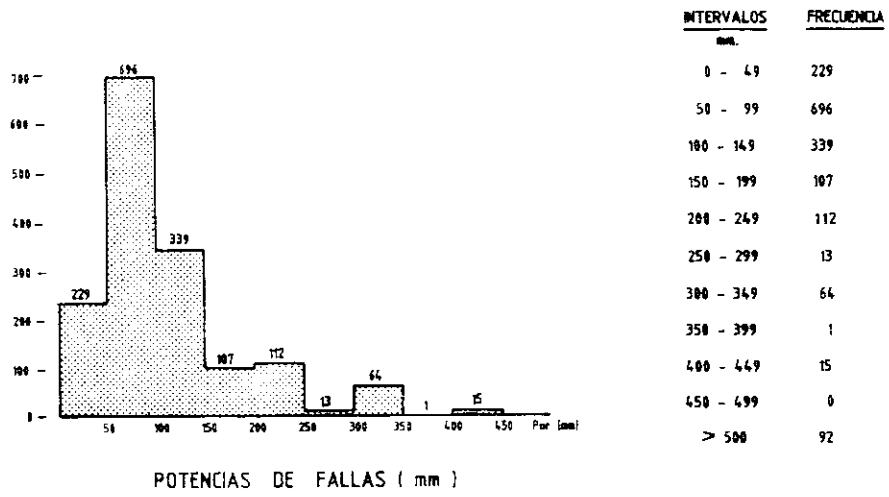
2.2. Análisis de Cuñas

El análisis de cuñas, tiene como objetivo explicar las áreas de distensión, observadas en la pared, como producto de la incompatibilidad del diseño, respecto al patrón estructural de la masa rocosa.

Las estructuras reconocidas en el Sector 5, no determinan la presencia de cuñas mayores comprometiendo la estabilidad de la pared. No obstante, se recurre a este análisis, para investigar pequeños volúmenes relacionados con fallas locales.

2.2.1. Análisis de Intersecciones

Para ubicar zonas estructuralmente débiles, se determina la posición espacial de las posibles intersecciones de fallas y/o diaclasas.



Bu (m)	Z	OCURRENCIA %	CLASIFICACION GEOTECNICA		
			DE COATES	R.Q.D (%)	FF
0.26 - 0.50	- 1.90	2.87	MUY FRACTURADA	16 - 0	6
0.51 - 0.75	- 0.73	20.40	FRACTURADA	33 - 17	5
0.76 - 1.00	0.44	43.73	BLOQUES (76.47 %)	49 - 34	4
1.01 - 1.25	1.62	27.74		66 - 50	3
1.26 - 1.50	2.79	5.00		82 - 67	2
1.50		0.26	MASIVA	100 - 83	1

FIGURA 5.- HISTOGRAMAS DE DISTRIBUCION, POTENCIAS DE FALLAS Y TAMAÑO BLOQUE UNITARIO.

En la Fig. 6 se observa una cuña elemental limitada por dos planos estructurales, con su intersección AB orientada hacia la excavación. El análisis consiste en investigar la posibilidad cinética de deslizamiento de la cuña considerando como directriz de movimiento la intersección AB.

2.2.2. Tratamiento de la información Estructural del Sector 5

El análisis de intersecciones, se realizó para cada intervalo de mapeo de 30 m de longitud, considerando en forma separada: fallas, diaclasas y el conjunto de fallas más diaclasas.

La determinación de todas las intersecciones posibles, resultantes de combinar de dos en dos los elementos estructurales de un intervalo, se realizó a través del computador. Con un programa que determina las intersecciones y concentración de intersecciones, usando como datos de entrada, el rumbo, manteo y un "factor de ponderación": Asociado a la potencia de falla y al número de diaclasas por metro lineal. Cuando se procesa el conjunto, este factor debe compatibilizarse, estableciendo una equivalencia entre ambos criterios.

El programa asigna un "factor de peso" a la intersección, al establecer el producto de los factores de ponderación correspondientes a las estructuras tratadas. Obtenidas las intersecciones, el paso siguiente consiste en establecer áreas de isoconcentraciones, usando el sistema de integración, establecido para la red de proyección estereográfica equiareal.

Finalmente, se obtienen los "clusters" que caracterizan las concentraciones de intersecciones, definidos por su ubicación espacial y dispersión angular.

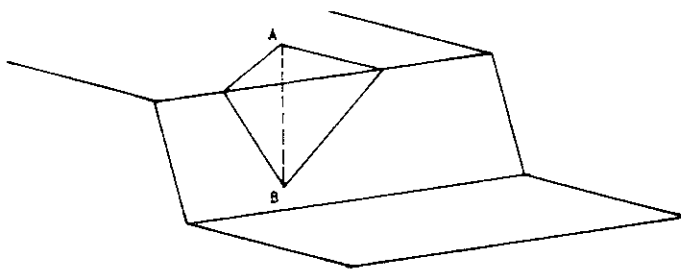


FIGURA 6.- CUÑA ELEMENTAL

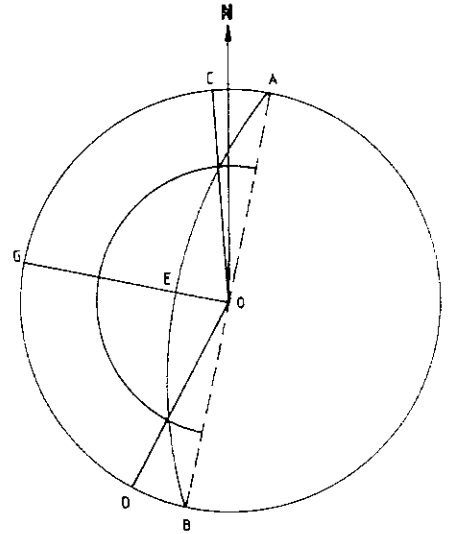
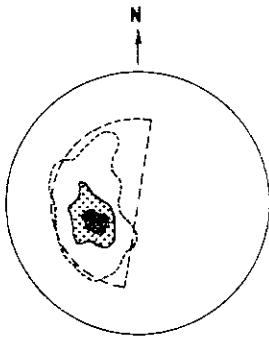
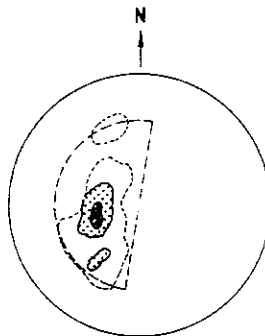


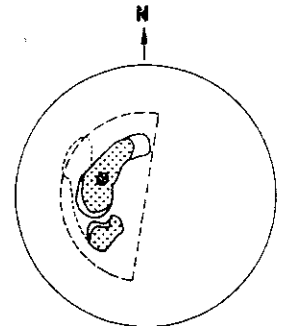
FIGURA 7.- PROYECCION ESTEREOGRAFICA DE LOS ELEMENTOS CONSIDERADOS EN EL ANALISIS DE CUÑAS.



AREA NORTE (N 4.200 - N 4.400; E 3.600 - E 4.000)



AREA CENTRAL (N 3.900 - N 4.100; E 3.800 - E 3.950)



AREA SUR (N 3.550 - N 3.800; E 3.750 - E 3.900)

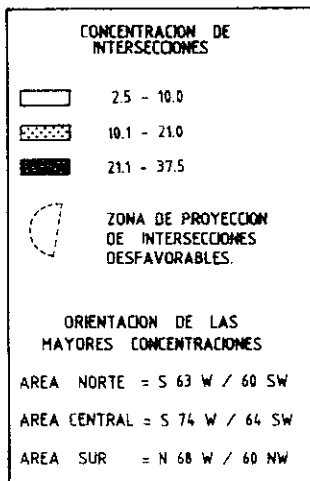


FIGURA 8.- AREAS DE MENOR ESTABILIDAD SECTOR 5, MINA CHUQUICAMATA.

Para analizar las intersecciones cuya orientación es desfavorable respecto a la cara libre del talud, y la posibilidad cinética de deslizamiento, se usó la siguiente información:

- Posición espacial de la cara libre del talud:

Rumbo N 13° E, manteo 70° NW

- Angulo de fricción interna del macizo rocoso

$$\theta = 38^\circ$$

Estos parámetros permiten determinar el área HFI, Fig. 7 que corresponde al lugar geométrico de todas las intersecciones orientadas en forma desfavorable respecto a la cara libre del talud, donde el deslizamiento de cuñas es cinéticamente posible.

2.2.3. Áreas Estructuralmente Débiles

El análisis de intersecciones orientadas en forma desfavorable identificó las siguientes áreas de menor estabilidad en el Sector 5, Fig. 8.

Área Sur : Comprendida entre las coordenadas N-3550 - N-3800; E-3750 - E 3900. Corresponde a una zona de distensión donde se observan grietas de tensión.

Área Central: Comprendida entre las coordenadas N-3900 - N-4100; E-3800 - E-3950. Corresponde a un campo de grietas de tensión en el coronamiento de la excavación.

Área Norte : Comprendida entre las coordenadas N-4200 - N-4400; E-3600 - E-4000. Compromete los bancos superiores e inferiores del

talud, sin que en ella se observe distensión del macizo rocoso, lo que puede atribuirse a intercalaciones de zonas competentes.

El análisis de las intersecciones, orientadas en forma desfavorable, también permite definir el sentido de las deformaciones, atendiendo a la tendencia de sus orientaciones. De acuerdo a esto, las deformaciones en el Sector 5, se desarrollarían del modo siguiente: en el norte hacia el suroeste, en el centro hacia el oeste y en el sur hacia el noroeste.

3.- EVALUACION DE LA ESTABILIDAD DEL SECTOR 5

3.1. Análisis de Estabilidad del Sector 5

Para cuantificar la estabilidad del sector 5, se empleó un modelo de tajadas bidimensional, Fig. 9 con superficies de falla de forma circular-cilíndrica, BISHOP (1954), construidas según el método propuesto por SOKOLOVSKY (1954) in SUKJE (1969). El análisis, se realizó en secciones este-oeste, espaciadas cada 50 m, considerando como límites las coordenadas N-4300 / N-3800.

3.1.1. Parámetros Geométricos

La definición del talud, se estableció en un sistema de coordenadas bidimensional, con el origen situado en el pie de la estructura, Fig. 10. Donde los parámetros de diseño son:

- Altura del talud (H). Definida por la diferencia en elevación existente entre el pie y el "coronamiento" del talud.

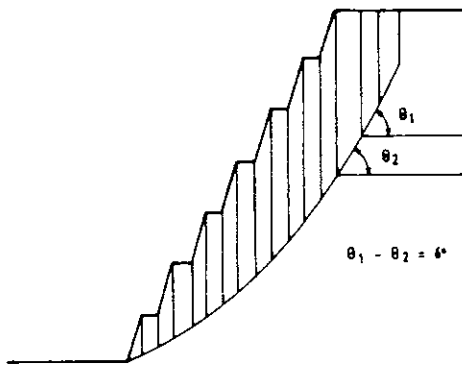


FIGURA 9.- MODELO DE TAJADAS.

A ($H \cot \alpha$, H), B ($H \cot \alpha + n \lambda$, H), C ($H \cot \alpha + n \lambda$, $H - H_{90}$),
 E ($\frac{H \cot \alpha + n \lambda}{2}$, $\frac{H - H_{90}}{2}$) y la recta OD, determinada por la relación

$$Y = \text{tg} \left\{ \alpha - \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \right\} X$$

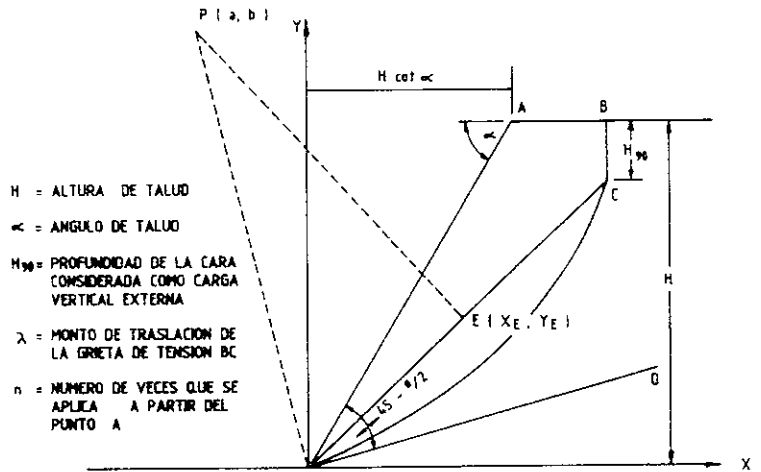


FIGURA 10.- SUPERFICIE DE RUPTURA CIRCULAR.

H_1 = ALTURA DESCARGA
 CD = ANCHO DE LA BERMA DE CONTENCIÓN
 α_1 = ANGULO TECNOLÓGICO DETERMINADO POR LA ALTURA DE UN BANCO (h_b) Y EL ANCHO DE LA BERMA (a)
 π = ANGULO DE BANCO

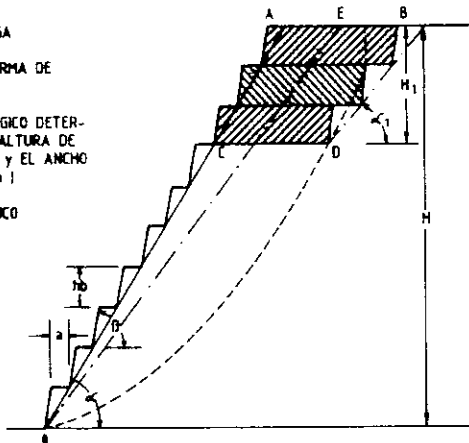


FIGURA 11.- ALTERNATIVAS DE DESCARGA.

- Angulo de talud (α). Definido como el ángulo que forma la horizontal y la recta que une el pie del talud, definido por O (0,0), con el coronamiento P (H cot α , H). Esta definición propuesta para taludes de geometría uniforme, se extiende a diseños irregulares, donde pueden existir dos o más ángulos de talud. En tales casos, es posible establecer un ángulo de talud compensando geoméricamente las áreas involucradas.

3.1.2. Parámetros Resistentes del Macizo Rocosó

En el modelo se usaron los valores medios de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario, es decir, para efectos de cálculo, el macizo rocoso se consideró homogéneo e isótropo. No obstante, para taludes que no presentan características de homogeneidad en sus materiales, los parámetros geomecánicos de las unidades que integran la masa rocosa en el volumen investigado, pueden introducirse en forma separada.

En general, c_i , θ_i , γ_i , son los parámetros de las unidades que intervienen en el talud, l_i es la longitud de la traza de ruptura que incluye estos materiales y A_i , el área del bloque en deslizamiento que comprende la unidad cuyo peso unitario es γ_i .

En este caso particular los parámetros: $c = 10 \text{ tm/m}^2$, $\theta = 38^\circ$ y $\gamma = 2,59 \text{ tm/m}^3$ corresponden a los parámetros medios de la masa rocosa, estimados mediante ensayos de especímenes de roca, obtenidos de un muestreo orientativo que incluyó la totalidad del área en estudio, y ratificados por el análisis inverso del derrumbe de 1969, realizado por diversos especialistas.

3.1.3. Método de Cálculo

En las secciones estudiadas (11), se realizaron los siguientes estudios, cuyos resultados se especifican en la Tabla # 1.

- Determinación del factor de seguridad del diseño, usando un método iterativo que permite el análisis de numerosas alternativas de falla para establecer la superficie más probable de ruptura. (Factor de seguridad FS, es un número adimensional que establece la razón entre la resistencia al corte del material, movilizada a través de la superficie de falla y las fuerzas motrices desarrolladas por la acción del peso del volumen analizado).
- Conocido el factor de seguridad, se procedió a evaluar la descarga necesaria para garantizar condiciones de autosoporte, de la pared durante la operación. En el caso del Sector 5 esta condición se satisface, cuando el factor de seguridad de la superficie más probable de ruptura, alcanza el valor de 1,5.
- La descarga, consiste en extraer peso de la parte superior del bloque activo, en intervalos equivalentes a la altura de un banco (13 m). Esta operación se realiza en forma iterativa, hasta alcanzar la condición señalada en el punto anterior.

Los procesos incluidos en el método descrito, demandan un gran número de cálculos en cada sección analizada. Con el objetivo de lograr una mayor expedición y minimizar errores se diseñaron dos programas computacionales, dirigidos a evaluar la estabilidad y descarga del área en estudio.

4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El sector 5 corresponde a una zona inestable de la pared este de la mina, donde se observa la distensión progresiva del macizo rocoso evidenciada por: el deterioro de bancos, hundimientos de bermas, asentamientos locales y la presencia de grietas de tensión en el coronamiento y bancos superiores de la excavación.

Atendiendo a la mecánica de fallamiento, se tiene que las deformaciones plásticas se desarrollan en el interior del macizo rocoso a partir de un foco, donde el estado tensional supera el límite de fluencia del material, y se propagan en la dirección del esfuerzo normal menor. En estructuras de taludes, estas deformaciones se propagan en el sentido de la menor presión litostática y sus manifestaciones superficiales se restringen inicialmente, a las zonas superiores del talud.

Considerando lo anterior, en el sector 5 se puede inferir la existencia de un bloque activo, gravitando sobre el material que constituye la base del talud, bloque pasivo. De este punto de vista la extracción de mineral en los bancos inferiores exige adoptar las medidas necesarias para minimizar la influencia del bloque superior en la estabilidad de la pared.

Como se especifica en el Punto 3, el factor de diseño, para explotar los bancos inferiores del sector 5, se estimó en 1,5. Se desprende de la Tabla # 1, que en la totalidad del sector en estudio no se satisface esta condición, lo que implica tomar medidas para aumentar el autosoporte del talud. En términos generales, existen dos alternativas de solución:

- Aumentar artificialmente la resistencia, mediante alguna técnica de fortificación.

- Modificar el diseño, con el objetivo de disminuir los esfuerzos en la superficie de ruptura potencial.

En este caso, se descarta la primera alternativa debido a que los estudios realizados en otras minas demuestran que los costos son prohibitivos para la minería de cobre a cielo abierto.

Para modificar el diseño existen también dos soluciones geométricas que permiten restar peso al bloque en deslizamiento: disminuir, el ángulo de talud, lo que implica dimensionar el retiro de una cuña de la forma OAE, Fig. 11, y extraer materiales de la parte superior del talud, desde la posición AC hasta una posición BD limitada por la traza de la superficie más probable de ruptura.

De estas dos soluciones posibles, la segunda es más adecuada debido a que ofrece mayor flexibilidad operacional y menor tiempo de preparación.

Para determinar la altura H_1 de material a remover Fig. 11, se usó un programa que permite incrementar el factor de seguridad del diseño, simulando la extracción sucesiva de huinchas de material con altura predeterminada (13 m).

En la Tabla # 1 se detallan las variaciones del factor de seguridad obtenidas al establecer la descarga en las secciones analizadas, de donde se desprende que en la mayoría de los casos (6) se logran las condiciones de seguridad impuestas al diseño cuando la descarga alcanza el nivel del banco E-4, exceptuando: las secciones: N-4150, N-4200, N-4300, donde la solución se localiza 13 m más arriba (E-3) y las secciones: N-3800, N-4250, donde la descarga incluye niveles inferiores, bancos F-1 y F-2 respectivamente.

La extracción de material que satisface las condiciones de diseño en todo el sector analizado, implica la remoción de 20,3 millones de toneladas de lastre e incluye el nivel del banco F-2. No obstante, se estima que la descarga debe limitarse al nivel del banco

DESCARGA AL BANCO	ELEV.	FACTOR DE SEGURIDAD SECCION										
		3.800	3.850	3.900	3.950	4.000	4.050	4.100	4.150	4.200	4.250	4.300
C 1	2.929				1.15	1.15	1.14	1.14	1.11	1.12	1.01	1.14
C 2	2.914		1.16	1.17	1.16	1.17	1.15	1.16	1.12	1.14	1.02	1.16
C 3	2.902		1.17	1.19	1.17	1.18	1.17	1.17	1.14	1.17	1.04	1.18
C 4	2.890		1.18	1.20	1.19	1.20	1.19	1.21	1.16	1.20	1.06	1.21
D 1	2.878	1.13	1.21	1.22	1.23	1.24	1.22	1.24	1.20	1.26	1.09	1.26
D 2	2.866	1.17	1.25	1.28	1.27	1.28	1.28	1.29	1.24	1.31	1.13	1.31
E 1	2.854	1.21	1.30	1.32	1.33	1.34	1.34	1.36	1.30	1.39	1.17	1.39
E 2	2.842	1.26	1.36	1.40	1.40	1.42	1.40	1.43	1.38	1.47	1.23	1.47
E 3	2.830	1.32	1.43	1.47	1.48	1.50	1.48	1.52	1.44	1.54	1.29	1.56
E 4	2.818	1.39	1.52	1.53	1.51	1.54	1.53		1.54		1.37	
F 1	2.806	1.49									1.45	
F 2	2.794										1.54	

TABLA 1.- VARIACION DEL FACTOR DE SEGURIDAD, PARA DIFERENTES ALTERNATIVAS DE DESCARGA.

TONELAJE A DESCARGAR EN LA FRANJA NORTE 3.800 - NORTE 4.300						
BANCO	ELEVACION (m.s.n.m.)	CONJUNTO DE BANCOS	ALTURA m.	LONGITUD A DESCARGAR (n) EN DIRECCION NORTE - SUR	LONGITUD A DESCARGAR EN DIRECCION ESTE - OESTE	CUBICACION T. M.
C 2	2.914	SUP C 2	36	550	87	4.307.688
C 3	2.902					
C 4	2.890	C 3 - C 4	24	550	76	2.444.442
D 1	2.878					
D 2	2.866	D 1 - D 2	24	550	90	2.923.074
E 1	2.854					
E 2	2.842	E 1 - E 2	24	550	83	2.683.758
E 3	2.830					
E 4	2.818	E 3 - E 4	24	550	74	2.376.066
TOTAL (T.M.)						14.735.028

TABLA 2.- CUBICACION DEL MATERIAL A EXTRAER, POR BANCO, PARA OBTENER UN FACTOR DE DISEÑO DE 1.5.

E-4, Fig. 11, donde se cumple con las normas de seguridad establecidas en el 82% de los casos analizados e implica remover 14,7 millones de toneladas, según lo determinado por la cubicación que se detalla en la Tabla # 2.

Finalizada la descarga y durante el período que se mantenga el Sector 5 en explotación, se recomienda mantener un control visual del estado de las bermas en un entorno de 25 m de las secciones N-3800 y N-4250.

BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ, O., MIRANDA, J., y GUZMAN, P., 1980. Geología del Complejo Chuquicamata, Anales del Congreso Cincuentenario, Inst. de Ing. de Minas de Chile. Vol. II pp. 314-363.
- BISHOP, A., 1954. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Proc. Eur. Conf. Stabl. Earth Slopes, Stockholm, I. pp. 1-13.
- FALCON, E. y HENRIQUEZ, H., 1976. Hidrogeología de la mina Chuquicamata. Informe final. Instituto de Investigaciones Geológicas. Inédito. 22 páginas.
- KENNEDY, B. y NIEMEYER, K., 1969. Slope Monitoring Systems used in the Prediction of a Major Slope Failure at the Chuquicamata Mine, Chile, Open Pit Mine Symposium, Planning Open Pit Mines. Edited by P. W. J. Van Rensburg, Johannesburg.
- LOPEZ, V., 1942. Chuquicamata, Chile in Ore Deposits as related to Structural features, ed. by W. H. Newhouse, Princenton, New Jersey, pp. 126-128.
- SUKJE, L., 1969. Rheological Aspects of Soil Mechanics. Great Britain, Pitman Press - 571 páginas.
- TURINTZEV, J., CHARRON, D., REYES, M., SOTO, C., PALLAUTA, J., NUÑEZ, A. y LEITE, C., 1973. Estabilidad de Taludes en mina Chuquicamata. Informe CIMM, Inédito, 276 páginas.