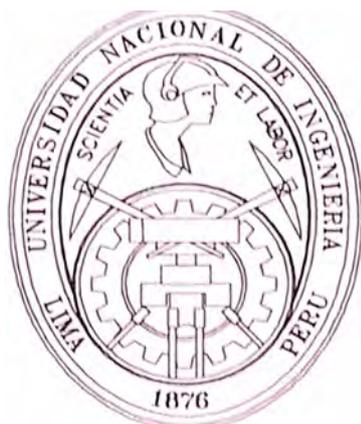


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA



**“INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTÉCNICO EN LABORES
MINERAS”**

VOLUMEN I

TESIS

**Para optar el Título Profesional de
INGENIERO DE MINAS**

RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE

LIMA - PERÚ

2003

A mi abuelo Alfonso, por ser la persona quien silenciosamente me ha apoyado y comprendido, y que en esta etapa de mi vida, pueda ser digno de todo lo que me ha dado. Gracias Abuelo por tus consejos.

A mis Padres Urbano y Teobalda quienes me vieron nacer y que sus enseñanzas que me han inculcado en mi, se puedan reflejar hoy, deseo expresarles mi agradecimiento por su paciencia y comprensión en todo este tiempo, a mi hermano Franco quien me apoyo en todo momento, Gracias.

INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTÉCNICO EN LABORES MINERAS

TABLA DE CONTENIDO

ABSTRACTO
AGRADECIMIENTO
LISTA DE FIGURAS
LISTA DE FOTOS

CAPITULO I

| | Pag. |
|-------------------|------|
| 1.1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.2. OBJETIVO | 2 |
| 1.3. ALCANCES | 3 |

CAPITULO II

FUNDAMENTO DEL PROBLEMA Y DEL CONTROL GEOTÉCNICO

| | |
|--|---|
| 2.1. FUNDAMENTO DEL PROBLEMA | 5 |
| 2.2. FUNDAMENTO DEL CONTROL GEOTÉCNICO | 6 |

CAPITULO III

CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA LA INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA

| | |
|--|----|
| 3.1. SELECCIÓN DEL TIPO DE INSTRUMENTACIÓN. | 10 |
| 3.2. PORQUE SE DEBE REALIZAR MEDICIONES | 10 |
| 3.3. CONSIDERACIONES DEL MEDIO PARA SELECCIONAR UN SISTEMA DE CONTROL | 12 |
| 3.4. DEFINICIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL | 12 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.5. | DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL | 13 |
| 3.5.1. | COMPONENTES DE UN SISTEMA DE CONTROL | 13 |
| 3.6. | CRITERIOS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN UN EQUIPO DE INSTRUMENTACIÓN | 14 |
| 3.6.1. | CERTEZA (EXACTITUD) | 14 |
| 3.6.2. | PRECISIÓN | 14 |
| 3.6.3. | SENSIBILIDAD | 14 |
| 3.6.4. | ERROR | 15 |
| 3.6.5. | RANGO | 15 |
| 3.7. | MÉTODOS DE OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS DE INSTRUMENTACIÓN | 15 |
| 3.7.1. | SISTEMAS MECÁNICOS | 16 |
| 3.7.2. | SISTEMAS ÓPTICOS | 16 |
| 3.7.3. | SISTEMA HIDRÁULICO Y NEUMÁTICO | 16 |
| 3.7.4. | SISTEMA ELÉCTRICO | 17 |
| 3.7.5. | RESISTENCIA ELÉCTRICA DE LOS STRAIN GAUGES | 17 |
| 3.7.6. | BARRA VIBRATORIA | 18 |
| 3.7.7. | AUTO INDUCTANCIA (COEFICIENTE DE AUTO INDUCTANCIA) | 18 |

CAPITULO IV

PRINCIPIOS BÁSICOS EN EL CONTROL GEOTÉCNICO

| | | |
|--------|---|----|
| 4.1. | RECOLECCIÓN DE DATOS GEOLÓGICOS | 20 |
| 4.2. | CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO | 20 |
| 4.3. | RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO | 21 |
| 4.4. | PRINCIPIOS BÁSICOS PARA DETERMINAR EL ESTADO DE ESFUERZOS EN LA MASA ROCOSA IN SITU | 21 |
| 4.5. | SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA MEDIR ESFUERZOS | 22 |
| 4.6. | TIPOS DE ENSAYOS PARA EL CONTROL GEOTÉCNICO IN SITU | 24 |
| 4.6.1. | MEDICIÓN DE ESFUERZOS IN SITU | 24 |
| 4.6.2. | MEDICIÓN DE DEFORMACIONES | 26 |
| 4.6.3. | PRUEBAS DINÁMICAS IN SITU | 28 |
| 4.6.4. | ENSAYOS DE CORTE IN SITU. | 32 |

CAPITULO V
CONTROL GEOTÉCNICO EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

| | | |
|----------|--|----|
| 5.1. | INTRODUCCIÓN. | 36 |
| 5.2. | INSTRUMENTOS DE CONTROL PARA RECABAR DATOS DE DISEÑO | 37 |
| 5.2.1. | DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS “IN SITU” POR ROTURA HIDRÁULICA | 38 |
| 5.2.2. | MEDICIÓN DIRECTA DE LOS ESFUERZOS CON GATOS HIDRÁULICOS | 39 |
| 5.2.2.1. | CELDA DE PRESIÓN HIDRÁULICA | 39 |
| 5.2.2.2. | TÉCNICA DEL GATO PLANO | 40 |
| 5.2.2.3. | TÉCNICA DEL GATO CURVO | 41 |
| 5.2.2.4. | CELDA DE “MENÁRD” Y DE “GLÖTZL” | 43 |
| 5.2.3. | ENSAYO DE CARGA CON PLACA | 49 |
| 5.2.4. | DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE ESFUERZOS POR MEDIO DE TALADROS | 49 |
| 5.2.4.1. | CELDA CON BANDAS EXTENSOMÉTRICAS (STRAIN GAUGE CELLS) | 49 |
| 5.2.4.2. | CELDA TRIAXIAL DE DEFORMACIÓN CSIR (TRIAxIAL STRAIN CELL) | 52 |
| 5.2.4.3. | CELDA LUH | 52 |
| 5.2.4.4. | CELDA HUECA DE INCLUSIÓN CSIRO (HOLLOW INCLUSION CELL) | 54 |
| 5.2.4.5. | DOORSTOPPER (LEEMAN) | 54 |
| 5.2.4.6. | CELDA BIAxIAL FOTOELÁSTICA | 61 |
| 5.3. | CONTROL DE LAS EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS DURANTE LA OPERACIÓN | 67 |
| 5.3.1. | MEDICIÓN DE LA CONVERGENCIA | 68 |
| 5.3.1.1. | TUBO EXTENSOMÉTRICO (TUBE EXTENSOMETER) | 68 |
| 5.3.1.2. | CINTA EXTENSÓMETRICA | 72 |
| 5.3.2. | EXTENSÓMETROS EN MÚLTIPLES PUNTOS DE LA EXCAVACIÓN | 72 |
| 5.3.2.1. | EXTENSÓMETRO MECÁNICO | 77 |
| 5.3.2.2. | EXTENSÓMETRO DE ALAMBRE RESISTENTE | 81 |
| 5.3.2.3. | EXTENSÓMETRO MAGNÉTICO | 83 |
| 5.3.2.4. | EXTENSÓMETRO DE SONDEO SÓNICO | 83 |
| 5.3.3. | MÉTODO DE LIBERACIÓN DE ESFUERZOS | 86 |
| 5.3.3.1. | MEDIDORES DE DEFORMACIÓN TRANSVERSAL (BOREHOLE DEFORMATION METERS) | 88 |

| | | |
|----------|--|----|
| 5.3.3.2. | TENSÓMETRO DE INCLUSIÓN (BOREHOLE INCLUSIÓN STRESSMETERS) | 89 |
| 5.4. | CONTROL DE LAS EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS CIERRE Y ABANDONO | 90 |
| 5.5. | MEDIDA INDIRECTA DE ESFUERZOS EN ROCAS | 91 |
| 5.5.1. | MÉTODOS GEOFÍSICOS | 91 |

CAPITULO VI

APLICACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN EN MINERÍA SUPERFICIAL

| | | |
|----------|---|-----|
| 6.1. | INTRODUCCIÓN | 92 |
| 6.2. | DISEÑO AL INICIO OPERACIÓN | 92 |
| 6.2.1. | ORIENTACIÓN DE LOS TESTIGOS (CORE ORIENTATION) | 93 |
| 6.2.2. | CÁMARAS DE TELEVISIÓN PARA TALADROS (BOREHOLE TELEVISION CAMERAS) | 96 |
| 6.2.3. | CONSIDERACIONES SÍSMICAS EN UN TALADRO | 98 |
| 6.2.3.1. | RECONOCIMIENTO SÍSMICO | 98 |
| 6.2.3.2. | RADAR EN EL TALADRO (BOREHOLE RADAR) | 98 |
| 6.2.4. | NIVEL DE AGUA EN EL TALADRO (BOREHOLE WATER LEVEL) | 100 |
| 6.2.5. | MEDICIÓN DE LA PRESIÓN DE AGUA (WATER PRESSURE MEASUREMENTS) | 101 |
| 6.3. | EVALUACIÓN DEL DISEÑO DEL TALUD | 104 |
| 6.3.1. | DETERMINACIÓN DEL RUMBO Y BUZAMIENTO | 104 |
| 6.3.2. | CUADERNO ELECTRÓNICO | 104 |
| 6.4. | MONITOREO DEL TALUD | 104 |
| 6.4.1. | INTRODUCCIÓN | 104 |
| 6.4.2. | SISTEMAS CONVENCIONALES DE INSTRUMENTACIÓN | 106 |
| 6.4.3. | SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN AUTOMATIZADOS EN MINA A CIELO ABIERTO | 107 |
| 6.4.4. | EXTENSÓMETROS MONTADOS EN SUPERFICIE | 107 |
| 6.4.5. | DECLINÓMETROS (TILTMETERS) | 110 |
| 6.4.6. | CALIBRADORES DEL DESPLAZAMIENTO DEL NIVEL LIQUIDO | 112 |
| 6.4.7. | INSTRUMENTACIÓN PARA EL SUBSUELO (SUB-SURFACE INSTRUMENTS) | 112 |
| 6.4.7.1. | INCLINÓMETROS | 115 |
| 6.4.7.2. | SHEAR STRIPS | 118 |
| 6.4.7.3. | TIME-DOMAIN REFLECTOMETRY | 118 |

CAPITULO VII
CASO PRÁCTICO DE CONTROL GEOTÉCNICO
BOTADERO DE DESMONTE MINA ANTAMINA

| | | |
|--------|---|-----|
| 7.1. | INTRODUCCIÓN | 120 |
| 7.2. | LUGARES DE INSTALACIÓN | 120 |
| 7.2.1 | PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN EN LOS BOTADEROS DE LA COMPAÑÍA MINERA ANTAMINA | 120 |
| 7.3. | INSTRUMENTOS PARA EL CONTROL GEOTÉCNICO | 122 |
| 7.4. | PROCEDIMIENTOS PARA INSTALACIÓN Y CONTROL DE EXTENSÓMETROS DE CABLE EN LOS BOTADEROS | 122 |
| 7.4.1. | INTRODUCCIÓN | 122 |
| 7.4.2. | PROCEDIMIENTOS DE INSTALACIÓN Y CONTROL | 122 |
| 7.5. | RESULTADOS | 129 |

CAPITULO VIII
CONCLUSIONES

CAPITULO IX
RECOMENDACIONES

CAPITULO X
BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

APÉNDICE I

MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS EN ROCAS UTILIZANDO LA TÉCNICA DEL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO O ROTURA HIDRÁULICA.

APÉNDICE II

MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS EN ROCA UTILIZANDO LA TÉCNICA DE PRENSA PLANA (GATO PLANO)

APÉNDICE III

METODOLOGÍA DEL ENSAYO DE CARGA

APÉNDICE IV

MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS ESFUERZOS EN ROCA USANDO UNA CELDA TIPO CSIR O CSIRO CON 9 Ó 12 MEDIDORES DE DEFORMACIÓN

APÉNDICE V

METODOLOGÍA DE TRABAJO DE LOS TENSÓMETROS DE INCLUSIÓN

APÉNDICE VI

PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN EN LOS BOTADEROS DE LA COMPAÑÍA MINERA ANTAMINA

APÉNDICE VII

REGISTROS DE DATOS OBTENIDOS POR LOS EXTENSÓMETROS EN LOS BOTADEROS DE ANTAMINA

ABSTRACTO

Ante problemas de inestabilidad en explotación minera subterránea y superficial por efecto de las excavaciones que perturban la masa rocosa alterando sus condiciones de equilibrio natural, inciden directamente en el comportamiento geomecánico de las labores mineras debido a las solicitaciones estáticas y dinámicas en su entorno y áreas de influencia tienen influencia directa en la generación de riesgos de seguridad física y ambiental, cuyas consecuencias de pérdidas humanas, a la propiedad, recuperación económica del yacimiento y costos operativos. Por lo que, es necesario cuantificar los esfuerzos y deformaciones con la finalidad de establecer medidas de prevención técnica, económica y administración de riesgos.

Comprendiendo que el control del comportamiento de las labores mineras debe formar parte de la gestión técnica y administrativa de los profesionales que dirigen la explotación minera, el presente trabajo propone la aplicación de Instrumentación como un recurso tecnológico para el control geotécnico en labores mineras con la ayuda de la Mecánica de Rocas y el uso de la Instrumentación que permita medir esfuerzos y deformaciones de la masa rocosa en su entorno y áreas de influencia, con la finalidad de asegurar la estabilidad física

En un análisis económico cualitativo los sistemas de control geotécnico, generará costos adicionales de operación para las compañías mineras; pero su necesidad es evidente, ya que mayor será el costo si no se implementa desde el inicio de las labores mineras, y mucho mayor cuando ocurra un accidente con consecuencias graves.

En el aspecto técnico Implementar un sistema de instrumentación también conlleva a enfrentarse a un problema de dependencia tecnología, disponibilidad de equipos por las limitaciones de mercado y fabricantes. Por otro lado, la capacitación para implementar la instrumentación también es un problema debido que el personal debe ser capacitado con formación de Ingeniería Geotécnica y afines.

Con el trabajo pretendemos demostrar, que para asegurar la estabilidad de las labores mineras y su entorno en una explotación minera, dependerá de las investigaciones básica realizadas en el diseño, luego ejecutar las labores mineras de acuerdo a estándares técnicas y parámetros de diseño, y durante la operación ejecutar las mejores practicas en las operaciones unitarias y finalmente durante el cierre y abandono, estableciendo un plan de cierre adecuado. En estas condiciones, implementando un sistema de control geotécnico paralelamente a las etapas del proyecto, aseguraran el cumplimiento de los estándares de factores de seguridad y ambientales, por lo que recomendamos, utilizar la tecnología de la instrumentación para el control geotécnico en las labores mineras en la minería nacional.

EL AUTOR

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Nacional de Ingeniería, por haberme brindado la oportunidad de seguir estudios de formación profesional, de igual manera a los profesores de la Escuela de Minas de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica por sus sabias enseñanzas recibidas.

Mi agradecimiento muy especial a mis asesores, Dr. Carlos Agreda. e Ing. David Córdova R., de quienes he recibido sus enseñanzas, dentro de las aulas universitarias, además; gracias a sus dotes de grandes docentes universitarios, me fue posible realizar el presente trabajo de investigación.

Agradezco a todos mis compañeros de la promoción, de la misma manera a mis amigos empleados de la facultad por haberme apoyado a culminar éste propósito.

Ronald Hernesto Macazana Erique

A S E S O R E S

Dr. Carlos Agreda

Ing. David Córdova

LISTA DE FIGURAS

N° Figura

- Fig. N °01 ENSAYO DINÁMICO - DOMOCRÓNICA
- Fig. N °02 ENSAYO DE CORTE
- Fig. N °03 EQUIPO DE ENSAYO DE CORTE IN SITU
- Fig. N °04 DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS ABSOLUTOS MEDIANTE GATOS CURVOS
- Fig. N °05 CELDA GLÖTZL
- Fig. N °06 CELDA GLÖTZL – MECANISMO UTILIZADO EN LABORES CON CONCRETO
- Fig. N °07 ESQUEMA DE TRABAJO - CELDA GLÖTZL
- Fig. N °08 CELDAS DE GLÖTZL INSTALADAS EN UN REVESTIMIENTO CON SHOTCRETE
- Fig. N °09 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA - ENSAYO DE CARGA
- Fig. N °10 EQUIPO PARA ENSAYO DE CARGA
- Fig. N °11 CELDA LUH
- Fig. N °12 CELDA CSIRO HI
- Fig. N °13 EQUIPO DOORSTOPPER
- Fig. N °14 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL EQUIPO DOORSTOPPER DE LEEMAN
- Fig. N °15 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA MOSTRANDO LA DISTRIBUCIÓN DE LOS MEDIDORES DE DEFORMACIÓN
- Fig. N °16 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA SOBUPERFORACIÓN UTILIZANDO DOORSTOPPER
- Fig. N °17 ELEMENTO DE INSERCIÓN DE LA CELDA LEEMAN
- Fig. N °18 FORMA CORRECTA DE COLOCAR UNA CELDA FOTOELÁSTICA BIAXIAL
- Fig. N °19 ANALIZADOR MANUAL DE PRECISIÓN CELDA FOTOELÁSTICA
- Fig. N °20 EQUIPO DE CALIBRADO DE CELDA FOTOELÁSTICA BIAXIAL
- Fig. N °21 CARACTERÍSTICA PARA CALIBRADO DE CELDA FOTOELÁSTICA BIAXIAL
- Fig. N °22 MECANISMO PARA MEDIR CONVERGENCIA EN UNA LABOR MINERA
- Fig. N °23 TUBO EXTENSÓMETRICO
- Fig. N °24 CINTA EXTENSÓMETRICA
- Fig. N °25 MODELOS DE EXTENSÓMETROS
- Fig. N °26 EXTENSÓMETRO PARA TALADROS (BOREHOLE EXTENSOMETER)
- Fig. N °27 DISTRIBUCIÓN DE LOS EXTENSÓMETROS EN UN TÚNEL

- Fig. N °28 COMPONENTES DE UN EXTENSÓMETRO PARA TALADROS –
MOSTRANDO LOS ANCLAJES
- Fig. N °29 DISTRIBUCIÓN DE LOS ANCLAJES EN UN EXTENSÓMETRO PARA
TALADROS
- Fig. N °30 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN EXTENSÓMETRO CON
ALAMBRE DE RESISTENCIA
- Fig. N °31 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN EXTENSÓMETRO
MAGNÉTICO
- Fig. N °32 EXTENSÓMETRO SÓNICO
- Fig. N °33 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN EQUIPO PARA MEDICIÓN
DE ESFUERZOS
- Fig. N °34 ESQUEMA ISOMÉTRICO DEL CCO
- Fig. N °35 TUBERÍA PARA ORIENTAR EL CCO
- Fig. N °36 ESQUEMA DE LA CÁMARA DE TELEVISIÓN UTILIZADO EN UN
TALADRO (BOREHOLE TELEVISION CAMERA)
- Fig. N °37 RADAR PARA UN TALADRO (BOREHOLE RADAR)
- Fig. N °38 MECANISMO PARA ESTIMAR NIVEL DE AGUA EN EL TALADRO
- Fig. N °39 VARIEDADES DE PIEZÓMETROS
- Fig. N °40 EXTENSÓMETRO DE ALAMBRE
- Fig. N °41 EQUIPO DEL DECLINÓMETRO (TILTMETER)
- Fig. N °42 ESQUEMA DEL EQUIPO PARA MEDIR NIVEL LIQUIDO
- Fig. N °43 EQUIPO PARA MEDIR NIVEL LIQUIDO
- Fig. N °44 EQUIPO PARA INCLINÓMETROS
- Fig. N °45 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL INCLINÓMETRO
- Fig. N °46 SHEAR STRIPS

LISTA DE FIGURAS – APÉNDICES

Nº Figura

- Fig. N °47 GATO PLANO SIMPLE - APLICACIÓN
- Fig. N °48 DOBLE GATO PLANO – APLICACIÓN
- Fig. N °49 DIAGRAMA ESFUERZO – DESPLAZAMIENTO ENSAYO DE CARGA
- Fig. N °50 DIAGRAMA TÍPICO CARGA – DEFORMACIÓN – ENSAYO DE CARGA
- Fig. N °51 VARIACIÓN DE LAS CONSTANTES DE PROPORCIONALIDAD – TENSÓMETRO DE INCLUSIÓN
- Fig. N °52 TENSÓMETRO DE HAWKES – APLICACIÓN
- Fig. N °53 TENSÓMETRO DE HAWKES
- Fig. N °54 SEÑALES PRESENTADAS EN UN TENSÓMETRO FOTOELÁSTICO
- Fig. N °55 CARACTERÍSTICAS DE CALIBRADO
- Fig. N °56 LUPA ANALIZADORA DE UN TENSÓMETRO FOTOELÁSTICO
- Fig. N °57 TENSÓMETRO FOTOELÁSTICO
- Fig. N °58 DISPOSITIVO DE TENSÓMETROS FOTOELÁSTICOS
- Fig. N °59 FACTOR DE CALIBRADO - TENSÓMETRO FOTOELÁSTICO

LISTA DE FOTOS

N° Foto

- Foto. N °01 VISTA PANORÁMICA DE LOS TALUDES DEL DEPOSITO DE ESTÉRILES DE ANTAMINA
- Foto. N °02 VISTA PANORÁMICA DE LOS TALUDES DEL DEPOSITO DE ESTÉRILES DE ANTAMINA (OTRO PUNTO DE OBSERVACIÓN)
- Foto. N °03 VISTA DE EXTENSÓMETRO MECÁNICO, SE PUEDE OBSERVAR LA REGLA GRADUADA Y EL CABLE TENSADO
- Foto. N °04 VISTA DE EXTENSÓMETRO MECÁNICO, DONDE SE MUESTRA COMO SE ENCUENTRA POSICIONADO
- Foto. N °05 VISTA DE UN EXTENSÓMETRO ELECTRÓNICO, TAMBIÉN SE PUEDE OBSERVAR A SU LADO UN EXTENSÓMETRO MECÁNICO
- Foto. N °06 VISTA DE UN EXTENSÓMETRO ELECTRÓNICO Y EL CABLE EL CUAL PRESENTA LAS MISMAS CARACTERÍSTICAS QUE LOS UTILIZADOS PARA LOS EXTENSÓMETROS MECÁNICOS
- Foto. N °07 VISTA COMPLETA DE UN EXTENSÓMETRO ELECTRÓNICO, OBSERVANDO EL PANEL SOLAR.
- Foto. N °08 VISTA DONDE SE PUEDE OBSERVAR LA CALIDAD DEL MATERIAL DEPOSITADO EN LOS BOTADEROS
- Foto. N °09 VISTA DONDE SE OBSERVA LA BERMA EN LA ZONA DE DESCARGA DE MATERIAL
- Foto. N °10 EN ESTA VISTA SE PUEDE APRECIAR LA PERSISTENCIA DE UNA GRIETA QUE SE PRESENTO EN LA PLATAFORMA.
- Foto. N °11 EN ESTA VISTA SE OBSERVA UN HUNDIMIENTO QUE SE PRESENTA EN LA PLATAFORMA DEL BOTADERO, CAUSADA POR LA MALA DISTRIBUCIÓN DEL MATERIAL
- Foto. N °12 EN ESTA VISTA SE OBSERVA UNA GRIETA PRODUCTO DE LA MALA COMPACTACIÓN DEL MATERIAL.
- Foto. N °13 EN ESTA VISTA SE PUEDE OBSERVAR UNA GRIETA QUE SE ENCUENTRA PRÓXIMA A LA ZONA DE DESCARGA DE LOS CAMIONES.
- Foto. N °14 EN ESTA VISTA SE PUEDE OBSERVAR UN TRÍPODE INTERMEDIO QUE SE ENCUENTRA CERCA DE UN AGRIETAMIENTO EN LA PLATAFORMA.
- Foto. N °15 EN ESTA VISTA SE PUEDE OBSERVAR QUE EL EXTENSÓMETRO ESTA REGISTRANDO UN HUNDIMIENTO, OCACIONANDO QUE LAS LECTURAS SEAN MÁS CONTINUAS
- Foto. N °16 EN ESTA VISTA SE PUEDE OBSERVAR EL PUNTO DE REFERENCIA LOCALIZADO EN LA CRESTA DEL TALUD Y EL CABLE TENSADO.

- Foto. N °17 EN ESTA VISTA SE PUEDE OBSERVA QUE LA CINTA INVAR SE ENCUENTRA PERPENDICULAR A LA GRIETA (FORMA CORRECTA PARA LA LECTURA DE DATOS).
- Foto. N °18 MANERA CORRECTA DE TOMAR LECTURA – VISTA DE FRENTE
- Foto. N °19 MANERA CORRECTA DE TOMAR LECTURA – VISTA DE PERFIL
- Foto. N °20 PESO EMPLEADO PARA TENSAR EL CABLE DEL EXTENSÓMETRO
- Foto. N °21 CINTA MÉTRICA GRADUADA LA CUAL VA PEGADA AL TRÍPODE
- Foto. N °22 FORMA INCORRECTA DE TOMAR UNA LECTURA
- Foto. N °23 EN ESTA IMAGEN SE DEBE NOTAR LA TENSIÓN DEL CABLE
- Foto. N °24 SE OBSERVA QUE EL CABLE PASA POR UN GANCHO, EL CUAL TRABAJA COMO UN PESO PARA TENSAR EL CABLE
- Foto. N °25 SE OBSERVA QUE SE DEBE EXTENDER EL CABLE PARA NUEVAS LECTURAS
- Foto. N °26 LA MANO INDICA POR DONDE DEBE PASAR EL CABLE, PARA REGISTRAR EL COMPORTAMIENTO DE LA GRIETA
- Foto. N °27 SE OBSERVA UNA GRIETA POR EL TRÍPODE, SE DEBE CAMBIAR DE POSICIÓN
- Foto. N °28 FORMA CORRECTA DE COLOCAR TRÍPODE
- Foto. N °29 EL TRABAJADOR MUESTRA UN TRÍPODE INTERMEDIO
- Foto. N °30 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA QUE NOS MUESTRA LA FORMA CORRECTA DE TOMA DE LECTURAS.

CAPITULO I

1.1. INTRODUCCIÓN

Durante las tres últimas décadas la explotación minera ha experimentado grandes cambios en el mundo y en el Perú debido al avance científico-tecnológico y al cuidado del ambiente que aplicados a este campo de la actividad humana particularmente se manifiestan en las técnicas de la geoestadística, mecánica de rocas, investigación de operaciones e informática, las mismas que permiten conocer mejor la importancia e interrelación de los procesos de diseño, operación, cierre y abandono de las operaciones mineras subterránea y superficial.

Por otro lado, la explotación minera se encuentra seriamente condicionada por la baja de los precios de los metales en el mercado internacional y por el agotamiento de las reservas minerales en algunos yacimientos, lo cual hace necesaria la adopción de medidas para maximizar el desempeño y racionalizar los recursos en las empresas mineras: métodos selectivos, utilización de equipos adecuados, manejo de una secuencia de minado que garantice una productividad con seguridad e higiene minera así como una gestión administrativa con bajos costos operativos.

En este marco, particularmente queremos reflexionar sobre los riesgos de pérdidas humanas, equipo y a la propiedad, ligado directamente al comportamiento de las labores mineras en las etapas de diseño, operación y cierre de un yacimiento. En este sentido el control del comportamiento de las labores mineras debe formar parte de la gestión técnica y administrativa de los profesionales que dirigen la explotación minera, ya que ciertos defectos e incidentes en dichos comportamientos pueden dar lugar a manifestaciones de inestabilidad, deslizamientos, hundimientos y derrumbes de las labores mineras con los consecuentes accidentes graves e impactos ambientales.

La presente tesis tiene como objetivo presentar los diferentes sistemas de instrumentación aplicables con ayuda de la Mecánica de Rocas para el control

geotécnico de labores mineras, que permita medir esfuerzos y deformaciones de la masa rocosa en su entorno y áreas de influencia, con la finalidad de evaluar su comportamiento de estabilidad física para establecer medidas de prevención técnica, económica y ambiental como elementos de gestión de un proyecto minero.

Para desarrollar el tema, se aplica el principio del control geotécnico mediante sistemas de instrumentación, lo cual permite determinar el comportamiento mecánico y dinámico de la masa rocosa entorno a la labor minera y áreas de influencia, frente a sollicitaciones estáticas y dinámicas, para lo cual, será necesario cuantificar los esfuerzos y deformaciones que estarían involucrados en ellas.

El propósito del presente trabajo, es incentivar en las nuevas generaciones de ingenieros de minas y otros profesionales de las compañías mineras, el uso de sistemas de instrumentación para el control geotécnico en las labores mineras, aplicando la mecánica de rocas, como técnica moderna y eficiente de gestión de riesgos.

En este sentido, se presenta en dos volúmenes, el fundamento técnico y teórico de la Geotécnica en los aspectos de la Mecánica De Rocas para la implementación de un sistema de control geotécnico, una descripción de los problemas aplicables y tipos de equipos de instrumentación existentes, una aplicación de instrumentación en el control de estabilidad de taludes, caso de los botaderos de la mina Antamina ; y, finalmente, las conclusiones y recomendaciones.

1.2. OBJETIVO

El objetivo del trabajo de tesis, es presentar los diferentes sistemas de instrumentación aplicables para el control geotécnico en labores mineras, que permita medir esfuerzos y deformaciones de la masa rocosa en su entorno y áreas de influencia, con la finalidad de evaluar su comportamiento de estabilidad física para establecer medidas de prevención técnica, económica y ambiental como elementos de gestión de un proyecto minero.

Para lograr el objetivo, se realizaron los siguientes trabajos de investigación:

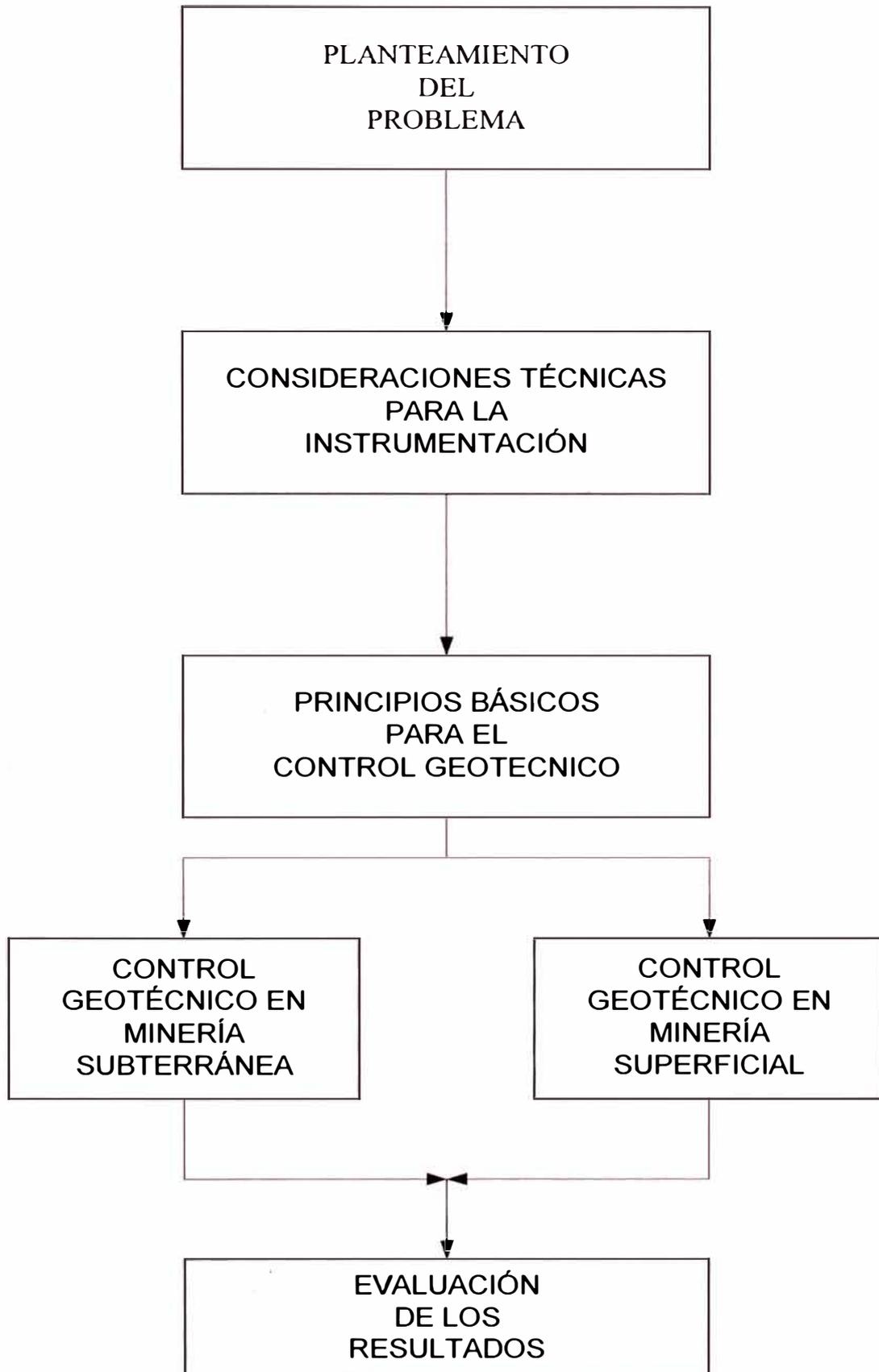
- Recopilación de información técnica científica acerca de los fundamentos y principios de un control geotécnico en labores mineras.
- Identificación de problemas en los cuales se aplicarán control geotécnico.
- Identificación de tipos de instrumentación aplicables para el control geotécnico en labores mineras subterránea y superficial.
- Participación en una aplicación de control geotécnico en botaderos de desmonte.

1.3. ALCANCES

El presente trabajo pretende difundir a los profesionales dedicados a la actividad minera el fundamento de los sistemas de control en labores mineras, modo de instalación, uso y forma de interpretar los datos obtenidos para su aplicación en medidas de prevención, dirigido a estudiantes, profesionales dedicados a la actividad minera..

Incentivar la aplicación de los sistemas de Instrumentación para el control geotécnico de labores mineras como un recurso tecnológico y una alternativa técnica, económica y ambiental de gestión de riesgos y propiciar entre los especialistas en geotecnia y profesionales de la explotación de minas utilizar esta tecnología como elemento de gestión.

ESQUEMA DE TRABAJO PARA REALIZAR UN CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS



CAPITULO II

FUNDAMENTO DEL PROBLEMA Y DEL CONTROL GEOTÉCNICO

2.1. FUNDAMENTO DEL PROBLEMA

Por principio de la mecánica de rocas, cualquier labor de excavación que se realice en un macizo rocoso, producirá inevitablemente un desequilibrio en el mismo, porque al perturbar la masa rocosa, se eliminará el soporte natural circundante, lo que dará lugar a una alteración de las condiciones de equilibrio. Por ello, es indispensable determinar las condiciones de equilibrio pre-existentes para adoptar las medidas de prevención que aseguren su estabilidad.

Como se sabe, en el Perú las labores mineras subterráneas son frecuentemente afectadas por fenómenos de derrumbes, explosiones y caída de rocas debido a la liberación de energía generada por la concentración de esfuerzo y los espacios vacíos dejados por las labores de accesos y explotación minera. Además, son frecuentes los incidentes de inestabilidad en depósitos de desmontes y relaves. Estos problemas son previsibles y deben ser evitados por un permanente control del comportamiento de estabilidad física desde el diseño, construcción y operación de las excavaciones mineras; es decir, un continuo registro del comportamiento de las estructuras geológicas (grietas, fallas) o deformaciones de los elementos de sostenimiento u obras de estabilización.

En minería superficial, los problemas más frecuentes se presentan en los tajos y botaderos de desmontes, los mismos que se ven afectados por deslizamientos de taludes y derrumbe de bancos. Mediante un sistema de control instrumental se puede predecir cuando será la ocurrencia de los fenómenos de inestabilidad y eliminar riesgos de pérdidas de maquinarias, vidas humanas, propiedades y evitar impactos al ambiente.

Cabe señalar que la implementación de los sistemas de control geotécnico generará costos de operación adicionales a las compañías mineras; pero su necesidad es

evidente, ya que mayor será el costo si no se implementa desde el inicio de las labores mineras, y mucho mayor cuando ocurra un accidente con consecuencias graves.

Implementar un sistema de instrumentación también conlleva a enfrentarse con un problema de dependencia en tecnología y disponibilidad de equipos por limitaciones de mercado y fabricantes. Tomando en cuenta sus limitaciones, podemos clasificar los instrumentos como: de alta tecnología, de simple construcción y adaptables; estos instrumentos tienen costos variables y persiste en todos el problema de calibración y puesta a punto. Por otro lado, la capacitación necesaria para operar los instrumentos también representa un problema ya que el personal idóneo debe tener formación en Ingeniería Geotécnica y afines y estar capacitado en el fundamento de la “instrumentación en el control geotécnico” como un sistema. Se trata de un trabajo integrado que involucra conocimiento cabal del problema geotécnico, uso de instrumentos o mecanismos adecuados y personal calificado para asegurar resultados eficientes con alta precisión y confiabilidad.

2.2 FUNDAMENTO DEL CONTROL GEOTÉCNICO

La Instrumentación de Control Geotécnico, permitirá determinar el comportamiento mecánico y dinámico de la masa rocosa en torno a la labor minera y áreas de influencia, frente a sollicitaciones estáticas y dinámicas, para lo cual, es necesario cuantificar los esfuerzos y deformaciones que estarían involucrados en ellas, manifestándose como un problema de estabilidad física, la misma que debe ser evaluada para proponer medidas correctivas mediante la ejecución de obras de estabilización y/o sostenimiento adecuado.

Las informaciones que reportan los instrumentos deben estar expresados en función de desplazamientos los cuales mediante la teoría elástica serán relacionarlos como esfuerzos, siendo este la finalidad para poder determinar la distribución de esfuerzos In Situ. Una vez determinado los esfuerzos, o en otros casos, determinado los desplazamientos, se tendrá una idea clara para evaluar, analizar, diseñar y adecuar las operaciones mineras, manteniendo los estándares de seguridad y cuidado del medio

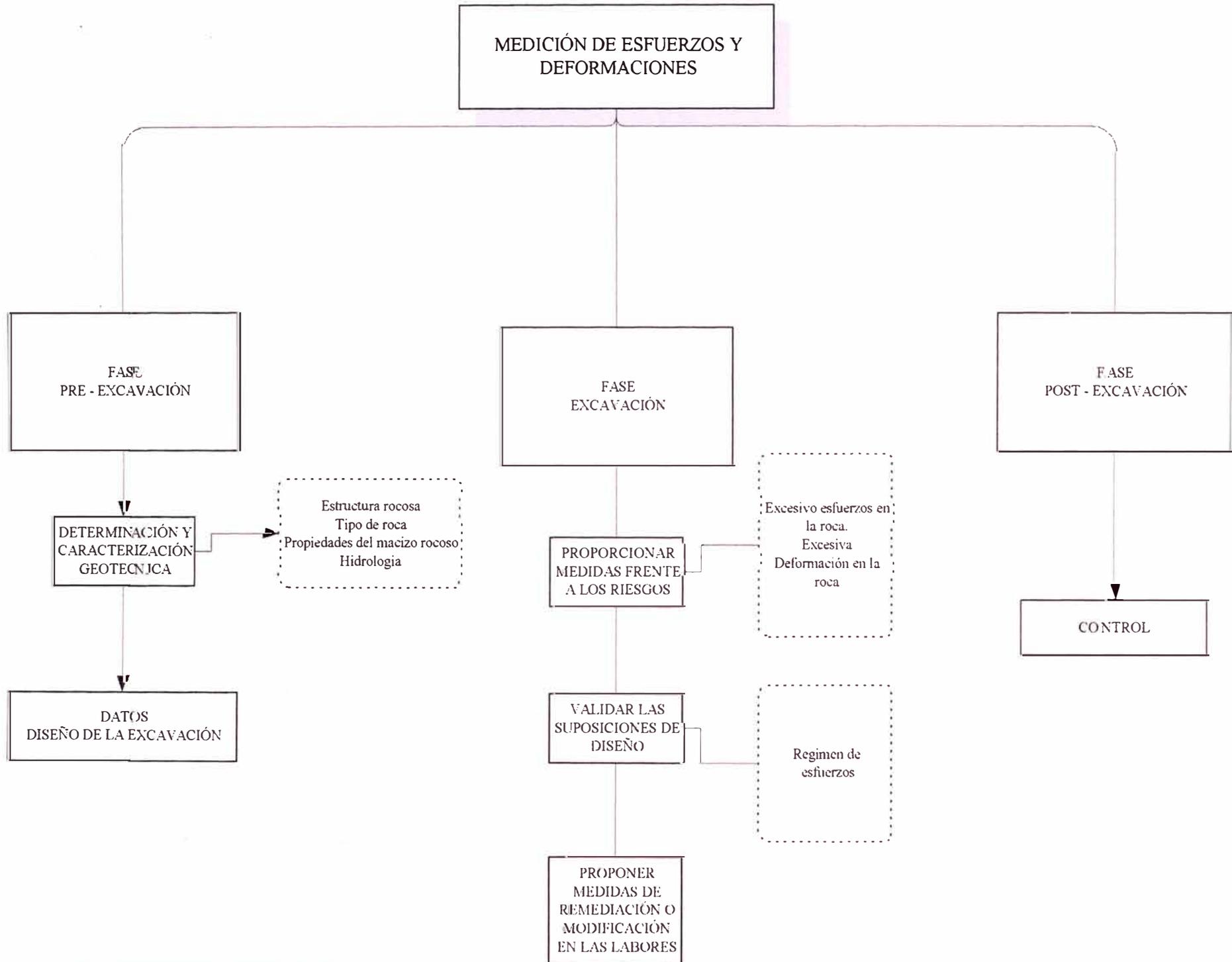
ambientales establecidos, indicadores que controlan los sobre costos en las compañías mineras.

Para implementar un sistema de instrumentación se sigue los siguientes pasos:

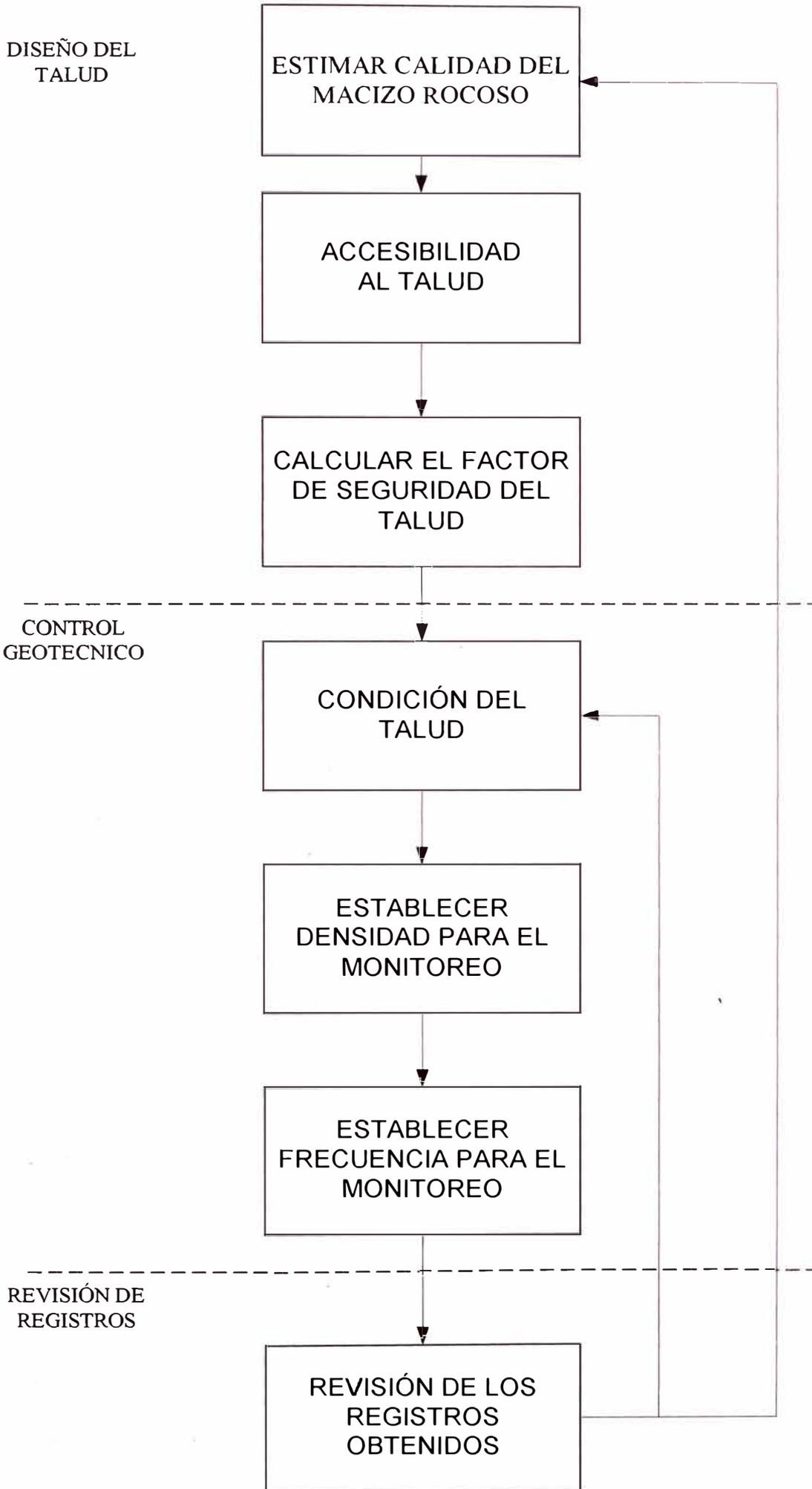
- Evaluación de las características lito-estructurales del área involucrada, motivo del control geotécnico.
- Caracterización y zonificación geomecánica e identificación de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso del área que será motivo de control geotécnico.
- Levantamiento topográfico (planos planta y cortes) e inventario de las labores mineras involucradas
- Evaluación de la problemática de inestabilización y términos de referencia para implementar el control geotécnico
- Selección del tipo de instrumentación aplicable y disponible.
- Diseño e implementación del sistema de instrumentación
- Ejecución de programa de monitoreo, mediciones y registros de resultados
- Interpretación de los resultados, evaluación y propuestas de medidas correctivas.

Analizando las consideraciones anteriores, se presenta en forma esquemática los sistemas de control geotécnico en minera subterránea. (Ver Diagrama N°1). Del mismo modo, se presenta en forma similar para la implementación de instrumentación de control geotécnico en minería superficial. (Ver Diagrama N°2).

DIAGRAMA N°1 CONTROL GEOTECNICO EN MINERÍA SUBTERRÁNEA



**DIAGRAMA N°2
CONCEPTO EMPÍRICO PARA EL CONTROL
GEOTECNICO DE UN TALUD**



CAPITULO III

CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA LA INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA

3.1. SELECCIÓN DEL TIPO DE INSTRUMENTACIÓN.

Para seleccionar un sistema de instrumentación de control geotécnico adecuado a las condiciones y normas existentes, se deben considerar los lineamientos generales que a continuación describimos:

- **El medir las cosas obvias primero.** Por ejemplo, en la estabilidad de taludes; el desplazamiento es el parámetro a controlar y el aspecto más crítico.
- **Lo simple es mejor.** La certeza de una serie de sistemas es producto de la certeza de sus componentes individuales. Por ejemplo, un mecanismo electrónico complejo o mecánico con una salida telemétrica a una computadora tiene menos oportunidad de ser utilizado en operación, cuando necesitamos dos estacas y una cinta para medir.
- **Precisión en el costo.** El costo de un mecanismo de medición, esta en función directa al nivel de precisión.
- **La redundancia es requerida.** Un solo instrumento o técnica no nos da toda la historia completa. Esto se puede describir de la siguiente manera; un solo extensómetro o un punto topográfico, no nos indica el área que se encuentra inestable y si esto es destruido, la continuidad del registro se pierde.
- **Es esencial un reporte en forma periódica.** Recolección de datos y análisis debe ser lo suficientemente rápido para proporcionar una información a tiempo, para la toma de decisiones.

3.2. PORQUE SE DEBE REALIZAR MEDICIONES

En las siguientes consideraciones se sustentan “porque se deben realizar mediciones” en un proceso de control geotécnico:

- Determinar las propiedades del macizo rocoso y del suelo tales como la deformabilidad, anisotropía y la resistencia mecánica de los materiales, se realiza con la finalidad confirmar y avalar los parámetros de diseño y estándares de operación de labores mineras, asimismo, evaluar sus capacidades de respuestas ante sollicitaciones externas.
- Evaluar el estado de esfuerzos en el macizo rocoso, incluyendo los esfuerzos in situ y redistribución de los esfuerzos, para prever los indicios de inestabilidad antes, durante y después de la apertura, operación y cierre o abandono de una labor minera.
- Dimensionar la capacidad de respuesta estática y dinámica de la roca y el suelo debido a las perturbaciones inducidos durante las operaciones mineras (perforación y voladura) y fenómenos naturales (sismo), con la finalidad de registrar signos de inestabilidad por efectos de las vibraciones por la voladura, sobre carga por efecto gravitacional y fenómenos naturales.
- Dimensionar la reacción de las estructuras (elementos de sostenimiento u otros) frente a las condiciones geológicas y defectos (incidentes de inestabilidad) durante la operación minera, con la finalidad de registrar fenómenos de deterioro de los elementos de sostenimiento (rotura, colapso).
- Identificar los riesgos (mapeo de los peligros), en la etapa construcción, operación, cierre y abandono de una labor minera, con la finalidad de identificar signos de inestabilidad, esfuerzos residuales, estructuras geológicas activas
- Evaluar, control y verificación de la efectividad o ineffectividad de las medidas correctivas, con la finalidad de evaluar el comportamiento técnico, económico de los elementos de sostenimiento o reforzamiento (cuadros, pilares, pemos, shotcrete, relleno, bermas estabilizadoras, etc).
- Evaluación de los factores de seguridad física, con la finalidad de cumplir con factores de seguridad de diseño, construcción y abandono de obras civiles y mineras, establecidas por organismos especializados internacionales y normas gubernamentales con relación a permisos y autorizaciones de funcionamiento, fiscalización por autoridades competente.

3.3. CONSIDERACIONES DEL MEDIO PARA SELECCIONAR UN SISTEMA DE CONTROL

Para la selección de un sistema de control, se debe desarrollar las siguientes consideraciones:

- Diagnóstico y descripción del entorno geológico, geomorfológico e hidrológico de la zona en estudio.
- Historial topográfico de la instalaciones antes del diseño de las labores mineras, ejecutadas y proyectadas para el cierre en la zona de estudio
- Descripción geomecánica de la zona en mención mediante la caracterización del macizo rocoso, determinación de los esfuerzos máximos o mínimos, ya sean estos realizados In - Situ o en laboratorio.
- Historial e inventario de las labores mineras e instalaciones dentro las áreas de influencia directa e indirecta de la zona de estudio.
- Identificación y descripción de los sistemas de sostenimiento utilizados en las labores, registros e informes técnicos.
- Reporte de incidentes de inestabilidad, registros de peligros y riesgos, accidentes, investigaciones de accidentes, manifestaciones e informes
- Historial de sistemas de control de las labores, informes y recomendaciones.

3.4. DEFINICIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL

Un sistema de control consiste en la instalación de un conjunto de equipos de precisión manuales debidamente seleccionados, ubicados en puntos estratégicos dentro de la concepción de la Ingeniería Mecánica de Rocas, con la finalidad de captar, registrar, transmitir información cuantitativa de esfuerzos y deformaciones (desplazamientos) mediante sus componentes. Estas informaciones, pueden ser manual, digital o de transferencia computarizados. La calidad de la información dependerá de las condiciones de mantenimiento, sofisticación del equipo, calibración y agentes externos no previstos, además la capacitación y entrenamiento de los operadores de los mismos.

Los sistemas de control deben garantizar una información con alta confiabilidad, oportuna y facilidades de interpretación..

3.5. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

3.5.1. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE CONTROL

Los componentes de un equipo de control son:

- Un sensor o detector, dispositivo que capta y responde a cambios de variables, las cuales deben ser controladas.
- Un sistema de transmisión, la cual puede estar representada por barras, cables eléctricos, líneas hidráulicas o mecanismos radio telemétricos; estos sistemas transmitirán información desde el sensor de salida a la estación de lectura de datos o unidad de registro.
- Una unidad de registro, en donde se registra o se da lectura los datos, tales como un indicador de muestra, indicador de presión, visualización digital o una cinta magnética, la cual convierte la información en una forma útil y es presentado a la persona encargada del control.

Los equipos de control deben cumplir con las siguientes especificaciones técnicas:

- Fácil instalación, si es necesario bajo condiciones adversas.
- La adecuada sensibilidad, certeza y reproducción en las informaciones (mediciones realizadas).
- Una adecuado sistema de protección, para asegurar una duración de éste durante todo el periodo de trabajo (versatilidad para su manipuleo).
- La información reportada por los equipos, deben ser de fácil comprensión y proporcionar datos inmediatamente (información oportuna) a la persona encargada del control.

3.6. CRITERIOS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN UN EQUIPO DE INSTRUMENTACIÓN

Como todo equipo de medición, para el caso de control geotécnico, debe reunir condiciones y especificaciones técnicas de diseño, fabricación, calibración, operación, mantenimiento y manipuleo, los mismos que deben indicarse en sus especificaciones técnicas y manual de operaciones. Las principales especificaciones describimos a continuación:

3.6.1. CERTEZA (EXACTITUD)

La certeza de un instrumento nos indica la desviación de los resultados o de los registros, con respecto a los datos de entrada. La certeza es usualmente expresada como un porcentaje del total de lecturas tomadas. Por ejemplo un calibrador de presión a 100 MPa tiene una certeza del 1% porque puede variar dentro de un rango de 100 kPa.

3.6.2. PRECISIÓN

La precisión indica la capacidad del instrumento para reproducir una correcta lectura. Puede ser definido como una aproximación más cercana al valor numérico medido (real), que tenga un significado aritmético. La certeza y Precisión son conceptos diferentes. La certeza requiere de precisión mientras que precisión implica un grupo cerrado de resultados, ya sean estos con una gran certeza o no.

3.6.3. SENSIBILIDAD

La sensibilidad de un instrumento o equipo, es distintamente definida como la razón de movimiento en la unidad de registro, debido al cambio en la variable medida en los registros, la razón entre los datos de entrada y salida, o en detectar una pequeña unidad de medición por el instrumento. Otra manera de definir la sensibilidad es mediante la legibilidad de las lecturas (es decir, precisar la escala de trabajo).

3.6.4. ERROR

Es la diferencia entre el valor observado o valor calculado y el verdadero valor (real); estos errores pueden ser sistemáticos o aleatorios.

3.6.5. RANGO

Es una variación (dentro un límite) de la información, la indicación de un adecuado rango en sus especificaciones de un equipo, será tomada en cuenta para su selección del equipo. Los equipos de control geotécnico, no deben ser de un gran rango, para no considerar valores que no representen una condición verdadera (real).

Los parámetros descritos de los equipos de control geotécnico, estarán acompañadas a problemas como a complejidad y adversidad de las condiciones mineras usualmente no prevista, así como los fenómenos naturales y los eventos sísmicos.

Los parámetros de exactitud, precisión, sensibilidad, límite de rango y error de los equipos de control geotécnico, deben asegurar mantener el nivel del factor de seguridad de estabilidad de las labores mineras durante la construcción, operación y cierre de la operación minera, a través de los reportes cuantitativos de las deformaciones de las estructuras geológicas y labores mineras, presiones de agua subterránea y sobre cargas de los elementos de sostenimiento. Caso contrario, el sistema no ha cumplido con su función, reportando resultados no esperados, por consiguiente generaría incidentes graves con la posibilidad de incurrir en costos altos e inconvenientes.

3.7. MÉTODOS DE OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS DE INSTRUMENTACIÓN

La operación de los equipos del sistema de control dependerá de sus componentes; sensores, transmisor y lector que definen como tipo Mecánico, Óptico, Hidráulico, Neumático o Eléctrico.

3.7.1. SISTEMAS MECÁNICOS

Los sistemas mecánicos siempre proporcionan un modelo simple, no muy costoso y con un buen método de detección, transmisión y lectura de datos. El movimiento de los detectores mecánicos usados son las barras de acero o cintas en contacto con la roca en uno de los lados y la otra en la unidad medida. La principal desventaja de los sistemas mecánicos es que no proporcionan un registro continuo de datos.

3.7.2. SISTEMAS ÓPTICOS

Son usados como métodos de reconocimiento rápido, de precisión y fotogramétrico, para el establecimiento de perfiles en excavaciones, miden el movimiento en el borde de una excavación y fracturas (grietas, rajaduras) inducido por el minado.

Estos métodos tienen una amplia aplicación en el control superficial, relacionados a la subsidencia asociada a una excavación subterránea. En esta aplicación, los equipos de medición electro-ópticas son los mayormente utilizados.

En este tipo de instrumentos figura las placas y discos fotoelásticos para medir los cambios de esfuerzo en la roca que circundan una labor minera y en elementos de soporte. Los instrumentos más comunes son los pernos de roca cargada con celdas fotoelásticas. En estas celdas, la carga del perno es transmitida a través del diámetro de los discos de vidrios colocados entre planchas de acero. Para registrar lecturas, los discos son irradiados con luz polarizada y es observado por un polarizador.

3.7.3. SISTEMA HIDRÁULICO Y NEUMÁTICO

Los instrumentos con sistemas hidráulicos y neumáticos se caracterizan por disponer de diafragmas transductores usados para la medición de presiones de agua, de los soportes cargados, de las cargas en los cables de anclaje, de los componentes normales de los esfuerzos y ajustes. En todos estos casos el método de operación es el mismo. La magnitud medida es la presión del fluido, el cual funciona en un lado del diafragma

flexible hecho de metal, plástico o caucho (goma). Dos tubos gemelos conectados a un sistema de lectura de datos o registro (salida) hacia el otro lado del diafragma.

Para realizar lecturas de presión del aire, nitrógeno o aceite hidráulico el mecanismo es abastecido a través de una unidad lectura o registro en uno de los tubos del diafragma. Cuando la presión abastecida es suficiente para balancear la presión debe ser medida. La función del diafragma es como una válvula y permite pasar el flujo a lo largo de la línea de retorno hacia el detector de la unidad de lectura. La presión ha ser balanceada es registrada, usualmente en función a la presión estándar de Bourdon.

3.7.4. SISTEMA ELÉCTRICO

Los mecanismos eléctricos trabajan en función a una fuente de energía (batería). Estos sistemas están emplazados en las unidades de registro de datos. Este sistema trabaja en conjunto con otros sistemas, uno de estos sistemas es el sistema mecánico.

3.7.5. RESISTENCIA ELÉCTRICA DE LOS STRAIN GAUGES

Estos mecanismos, operan bajo el principio de Lord Kelvin, llamado como resistencia de una barra que cambia proporcionalmente con la deformación. En los sistemas de strain gauges o medidores de deformación, están constituidos por una barra delgada o lamina de metal, que van hacer cubiertas por roca, concreto o por una superficie de acero. El cambio de las deformaciones en el material hospedaje es acompañado por cambios en las deformaciones y resistencias de los strain gauges, los cuales utilizan el principio del puente de wheatstone. En la mayoría de celdas cargadas, algunos transductores de presión y en algunos sistemas de inclinómetros se pueden observar este tipo de sistema. Las desventajas de este sistema son:

- Dificultad para obtener y mantener un buen vinculo entre los strain gauges y la roca.
- Las deformaciones son medidas sobre longitudes relativamente cortas.
- El efecto de la temperatura no siempre se puede eliminar.

3.7.6. BARRA VIBRATORIA

El equipo de medición, que posee una barra vibratoria, tiene como característica que sus sensores tienen como principio una función que expresa la frecuencia de vibración f , una longitud de la barra tensionada l_b y una densidad ρ , relacionada con el esfuerzo en la barra σ_b expresada en la relación siguiente:

$$f = \left(\frac{1}{2l_b} \right) \left(\frac{\sigma_b}{\rho} \right)^{1/2}$$

Si la frecuencia es mediante pulsaciones electromagnéticas, la tensión σ_b puede ser determinada. Este valor puede ser utilizado para determinar la presión actuante en el diafragma, el cual está sujeta en la parte final de la barra, o una carga axial en una celda cargada montada en la barra vibratoria. Corresponden a este tipo los sistemas de barras vibratoria en piezómetros, celda de presión para suelo, tensómetros y celdas cargadas.

Los registros de los sensores de la barra vibratoria son frecuencias que oscilan entre voltajes o señales continuas. Esto es una ventaja para que la frecuencia sea fácil de transmitir a grandes distancias sin distorsión de señales análogas.

3.7.7. AUTO INDUCTANCIA (COEFICIENTE DE AUTO INDUCTANCIA)

Estos instrumentos están basados en la inductancia natural solenoides coaxial formando un circuito de frecuencia resonante, basado en la relación.

$$f = \frac{(LC)^{-1/2}}{2\pi}$$

Donde L es la auto-inductancia y C la capacitancia de los solenoides. El desplazamiento relativo d , produce cambios internos y externos en los solenoides de la frecuencia resonante f , tal como:

$$d = K \left(1 - \frac{f_0^2}{f^2} \right)^{1/2}$$

Donde f_0 es la frecuencia calibrada para un punto cero y K es una constante. El investigador Londe, describe una serie de extensómetros e inclinómetros que están basados en este principio. Estos instrumentos usan también a la radio telemetría para la lectura.

CAPITULO IV

CONSIDERACIONES BÁSICAS PARA EL CONTROL GEOTÉCNICO

4.1. RECOLECCIÓN DE DATOS GEOLÓGICOS

Cuando se inicia un estudio relacionado a la ingeniería geotécnica para implementar un sistema de control geotécnico, se debe tener en consideración la data geológica, determinación del tipo de roca, presencia de fallas y fracturas, la geomorfología e hidrogeología del área.

La metodología de la recolección de información geológica, puede utilizar métodos computarizados en donde se puede analizar de una manera más rápida los resultados, siempre acompañado de una evaluación de campo para poder observar las características del terreno in situ.

4.2. CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

A pesar de la eficiencia de los ensayos de laboratorio sobre especímenes rocosos, los resultados no representan las características de todo el macizo rocoso, para ello, se recurren a los sistemas de clasificación especializada:

Uno de los sistemas de clasificación ha sido publicado por Bieniawski,, en el cual, incluye información a cerca de la resistencia de la roca intacta, espaciamiento, número y características de las discontinuidades, esfuerzos in situ, y orientación e inclinación de las discontinuidades dominantes. Y cuando la obra a desarrollar es un túnel, se utiliza el sistema de clasificación Q de Barton.

Los sistemas de clasificación del macizo rocoso han sido probados satisfactoriamente como una herramienta para la ingeniería, no solamente porque proporciona parámetros para diseño, sino también permite al usuario, examinar las propiedades del macizo rocoso de una manera sistemática cuando requiera revisar el proyecto.

4.3. RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO

Uno de los problemas es la identificación de la resistencia del macizo rocoso. El macizo puede ser considerado como una matriz compuesta por un conjunto de bloques. La determinación de la resistencia de la roca In Situ, no son muy prácticos como los ensayos de laboratorio. Por lo tanto la resistencia se puede determinar mediante una observación geológica y su vez por los resultados de ensayos que han sido tomados en áreas pequeñas o por superficies rocosas representativas de la roca matriz. Cuando se desea obtener este parámetro de resistencia en campo se puede recurrir al martillo de Schmidt, el cual mediante un número de rebotes referida a tablas, se puede obtener la resistencia a la compresión aproximada de la roca.

4.4. PRINCIPIOS BÁSICOS PARA DETERMINAR EL ESTADO DE ESFUERZOS EN LA MASA ROCOSA IN SITU

Existe una amplia variedad de instrumentos y métodos para determinar el estado de esfuerzos en la roca In Situ. En las rocas que muestran un comportamiento elástico, la medida de esfuerzos absolutos puede requerir la aplicación de un método de liberación de esfuerzos, en el que el elemento rocoso donde se ha introducido el instrumento de medida descarga los esfuerzos ejercidos por la roca circundante. A continuación se mide la deformación que ha dado lugar la eliminación de esfuerzos y conversión del mismo se hace a partir de las relaciones de esfuerzo - deformación para la roca analizada. Los esfuerzos relativos pueden determinarse midiendo los esfuerzos absolutos al principio y al final de un intervalo de tiempo dado, pero esto no es siempre necesario y mientras sea posible no se utilizan para medir esfuerzos relativos las técnicas de liberación de esfuerzos, que son costosas y no muy rápidas. En términos generales, los instrumentos empleados en ambos tipos de medidas son semejantes pero aunque cualquier instrumento proyectado para la medida de esfuerzos absolutos medirá también esfuerzos relativos, algunos equipos que son sencillos e ideados para medidas relativas, no pueden aplicarse sin sufrir modificaciones para realizar medidas absolutas.

4.5. ELECCIÓN DEL MÉTODO PARA MEDIR ESFUERZOS

La mayor dificultad que se presenta en los métodos para determinar los esfuerzos en rocas se encuentra en el calibrado del equipo y en suponer que la medida obtenida es realmente la magnitud física deseada. En la determinación de esfuerzos absolutos, los medidores de deformación transversal y los de bandas extensométricas se basan fundamentalmente en hipótesis de la elasticidad y miden únicamente las componentes de recuperación elástica. No se tienen en cuenta las deformaciones dependientes del tiempo. Estos métodos, por tanto, son de aplicación limitada y no resultan adecuados para materiales que, como las rocas porosas sedimentarias blandas, que están sometidas a procesos de fluencia. En los materiales que presentan un comportamiento razonablemente aproximado al elástico subsiste el problema de determinar el valor apropiado de E^1 . Existen dificultades para encontrar una correlación entre los ensayos de laboratorio e In Situ. Si se aceptan los ensayos de laboratorio quedan los problemas de normalización del método de ensayo y de hacer las debidas correcciones por anisotropía, heterogeneidad, y variación del estado físico de la muestra entre el terreno y el laboratorio. Una línea de trabajo correcta es el tratamiento estadístico de un gran número de ensayos de muestras representativas.

Algunos investigadores han obviado el problema del calibrado adoptando métodos de compensación indirecta en los que la muestra de roca extraída, conteniendo en su interior el medidor de deformaciones, se somete a carga hasta llevar el instrumento a su lectura inicial. Tenemos por ejemplo el método del gato curvo de Jaeger y Cook el cual amplía aún más este procedimiento, reproduciendo el proceso completo del ensayo "in situ". Evidentemente estos métodos resultan atractivos pero no resuelven la dificultad fundamental de los métodos de compensación cíclica, que es la necesidad de una misma relación tensión - deformación en carga y descarga. Existe también una gran dificultad práctica en la obtención de campos biaxiales controlados, por medio de los cuales se puede compensar la liberación de esfuerzos observada, y existe una considerable incertidumbre en cuanto a la distribución de esfuerzos producidas por placas o gatos en la sección transversal de los testigos de roca, a veces de 15 cm o menos de diámetro. La experiencia con las celdas fotoelásticas biaxiales, en las que la señal observada es una

¹ E: Modulo de Young

clara indicación del estado de deformación de la propia celda, muestra lo peligrosa que puede ser la hipótesis de que la deformación medida en un punto de una muestra de roca esté relacionada directamente con las dimensiones de la muestra y con la magnitud y dirección de las fuerzas exteriores aplicadas a la roca.

Los tensómetros de inclusión son en gran parte independientes de la relación esfuerzo deformación de la roca, ya que tienen una elevada rigidez. El módulo de elasticidad de los diversos instrumentos de este tipo varía de 70 a $84 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$, y aunque en teoría únicamente funcionarán como inclusiones de módulo elevado en rocas con un valor E de hasta 17 a $21 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$, en la práctica se ha encontrado que su empleo puede extenderse con seguridad a sedimentos porosos y evaporitas cristalinas con un módulo de Young de hasta $35 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$. Esto se debe a que muchas rocas con un E nominal inferior a $35 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ presentan unas relaciones de esfuerzo - deformación claramente no lineales. En las condiciones en que se toman las medidas con un tensómetro de inclusión la roca está sometida en la proximidad de la celda a las deformaciones en gran parte originadas por el cierre de los poros o movimientos en las fracturas. En este caso el módulo real operativo E puede ser considerablemente inferior al nominal. La medida de esfuerzos con un tensómetro de inclusión, introduce la pre-compresión inicial como otro factor variable que influye sobre el calibrado si la celda se va a emplear en rocas duras, pero este factor puede eliminarse si sólo se quiere apreciar el desarrollo de esfuerzos, en cuyo caso se puede aplicar el tensómetro de vidrio.

El tensómetro ideal sería uno de muy elevada rigidez, que pudiera colocarse de forma que no se produjera la menor deformación de la roca en torno al taladro destinado a la inserción, y que funcionara como «celda activa». La presión ejercida por la roca circundante estaría contrarrestada en todo momento por la presión medida en la celda.

Hasta el momento ningún tensómetro o técnica de medida permite conseguir esto, en lo que se refiere a los esfuerzos absolutos, por la única razón de que es imposible introducir un tensómetro en un macizo rocoso sin alterar en alguna forma el estado tensional que se quiere observar.

La medida de esfuerzos relativos es mucho más sencilla y frecuentemente puede proporcionar al ingeniero una información mucho más útil. El estado tensional absoluto suele ser de menor importancia práctica que el conocimiento de las direcciones según las cuales actúan los esfuerzos, la localización de zonas muy solicitadas en torno a

excavaciones y una indicación de si existen o no esfuerzos en ciertas zonas que lleguen a valores que puedan afectar a los trabajos de ingeniería o a las estructuras construidas en las excavaciones.

Aunque desde un punto de vista científico es importante la precisión de las medidas, no tiene objeto tomar medidas muy precisas de un parámetro que varía ampliamente tanto en el espacio como en el tiempo. Sería mucho más útil hacer muchas medidas en el espacio y en el tiempo aunque la precisión de estas medidas individuales fuera menor. Resulta igualmente inútil buscar gran precisión en las medidas y emplear una técnica sofisticada ignorando al mismo tiempo la incompatibilidad entre una distribución hipotética de esfuerzos en materiales imaginarios y la situación real en las rocas de la corteza terrestre. En cualquier caso, al elegir el método más apropiado para E un caso dado y en la interpretación de los resultados obtenidos, el ingeniero deber guiarse por conceptos teóricos junto con su experiencia e intuición. Con este fin Hult y otros han resumido los principios de aplicación de diversos métodos de medida de esfuerzos respecto a las características de esfuerzo - deformación de las rocas.

4.6. TIPOS DE MEDICIONES PARA EL CONTROL GEOTÉCNICO IN SITU

4.6.1. MEDICIÓN DE ESFUERZOS IN SITU

Se dispone de muy pocos datos reales que comparen los resultados obtenidos con más de un método de medida de esfuerzos. Durante muchos años los investigadores se han dedicado principalmente a conseguir experiencias con su propio método particular. La experiencia genera confianza y por ello encontramos fuertes preferencias regionales por las técnicas empleadas en determinadas zonas particulares.

Dando como conclusión que los registros obtenidos se consideran propiamente de la zona en donde se implementará un sistema de instrumentación, así mismo se puede decir que los parámetros obtenidos en otras regiones solo pueden ser considerados como referenciales.

En la actualidad se han desarrollado instrumentos para medir esfuerzos In Situ que se indican el Tabla N° 1.

TABLA N°1
INSTRUMENTOS PARA MEDIR ESFUERZOS IN SITU
EN EL MACIZO ROCOSO

| TÉCNICA PARA MEDIR ESFUERZOS | ACCESO A LA MEDICIÓN | MÉTODO DE MEDICIÓN | CAMPO DE MEDICIÓN (DIMENSIÓN) |
|--|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| TÉCNICAS DE DESCARGA DE PRESIÓN | | | |
| Sobreperforación | | | |
| Inclusión rígida | B | S | 2D |
| Inclusión suave | B | S | 3D |
| Inclusión | B | S | 3D |
| Rosetas de strain gauges | B | S | 3D |
| Inclusión Fotoelástica | B | S | 2D |
| Doorstopper | B & F | S | 2D |
| TÉCNICAS DE DESCARGA - CARGA DE PRESIÓN | | | |
| Gato Plano | F | P & D | 1D |
| Gato curvo | F | P & D | 1D/2D |
| TÉCNICAS DE SOBRECARGA DE PRESIÓN | | | |
| Fracturamiento hidráulico | B | P | 2D |
| Fracturamiento por medio de gatos | B | P & D | 2D |
| Rotura dentro del taladro | B | C | O/2D |

F = Cara de la roca, B = Taladro, C = Core (Testigo), E = Expuesto, T =Túnel,
S = deformación, D = Desplazamiento; P = Presión, O = Orientación, 1D = una dimensión, 2D =
Dos dimensiones, 3D = Tres dimensiones

4.6.2. MEDICIÓN DE DEFORMACIONES

Existen dos métodos básicos para determinar estado de deformaciones de los macizos rocosos: los denominados métodos “estáticos” y “dinámicos”.

En los métodos estáticos se aplican cargas estáticas relativamente grandes sobre superficies seleccionadas del macizo rocoso. Se miden las deformaciones resultantes.

En los métodos dinámicos se mide la velocidad de propagación de perturbaciones vibratorias, basados en la teoría de elasticidad, módulo de Young (E) y el módulo de Poisson (ν).

Existen dos variantes del método «estático», que difieren en la forma de aplicar la carga y por tanto en el método de cálculo empleado. Pueden denominarse métodos de carga con placa y de presión en galería, respectivamente. En la Tabla N°2, se presentan la relación de instrumentos para medir deformaciones.

TABLA N°2
INSTRUMENTOS PARA MEDIR DEFORMACIÓN EN
EL MACIZO ROCOSO

| TÉCNICA PARA MEDIR DEFORMACIÓN | ACCESO A LA MEDICIÓN | MÉTODO DE MEDICIÓN | SENSIBILIDAD DE LA MEDICIÓN |
|------------------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------------|
| TÉCNICAS DE OBSERVACIÓN | | | |
| GPS | E | M | M |
| Levantamiento Superficial | E | M | M |
| EDM. | E | A | M |
| TÉCNICAS DE INSTRUMENTACIÓN | | | |
| Indicadores de movimiento | | | L |
| Axial | B,F | O | L |
| Cortante | B,F | O | |
| Indicadores de convergencia | | | |
| Alambre / Cinta (Wire / Tape) | F | M | Me |
| Barra (Barra) | F | M /A | Me |
| Medidores de deformaciones | | | |
| Strain gauges | B | A | H |
| Extensómetros | | | |
| Extensómetros fijos | | | |
| Alambre / Barra | B | M /A | H |
| Punto sensible de referencia | B | M /A | H |
| Deformación sensible | B | A | H |
| Extensómetros portátiles | | | |
| Anclaje magnético | B | M | H |
| Inclinómetros | | | |
| Inclinómetros fijos | B | A | H |
| Inclinómetros portátiles | B | M | H |
| Deflectrómetros | B | A | H |

F = Cara de la roca, B = Taladro, E = Expuesto, M = Manual, A = Automático,
 O = Observación, L = Bajo, Me = Medio, H = Alto

4.6.3. PRUEBAS DINÁMICAS IN SITU

En esta metodología, el módulo elástico se obtiene de la velocidad de propagación de ondas de corte, constituyendo por tanto una derivación del método sísmico de prospección geofísica.

Cuando se aplica un impulso dinámico a la superficie de un sólido semi - infinito, la energía se irradia desde la fuente emisora en forma de dos tipos diferentes de impulsos vibratorios elásticos. El más rápido de estos impulsos solo origina desplazamientos de las partículas del material en dirección de avance de la perturbación y se denomina onda longitudinal o de compresión. La velocidad α de esta onda en un medio elástico isotrópico esta definida por la relación:

$$\alpha^2 = \frac{E (1 - \mu)}{\rho (1 + \mu)(1 - 2\mu)}$$

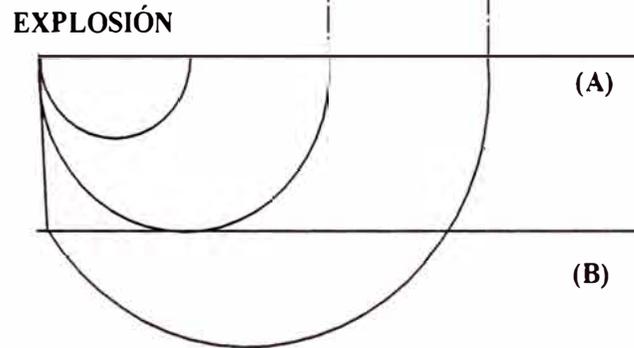
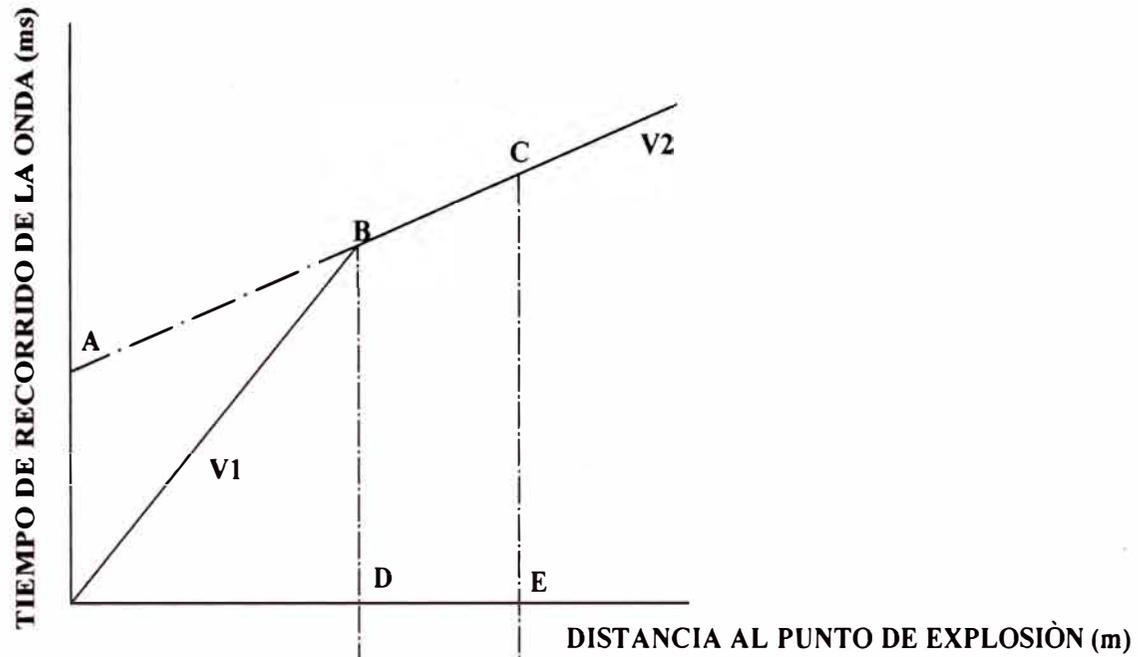
La segunda onda es la transversal o de cizallamiento que da lugar a un desplazamiento de las partículas normales a la dirección del avance. La velocidad β de la onda de cizallamiento, también para el caso de un medio elástico e isotrópico, es:

$$\beta^2 = \frac{E}{2\rho(1 + \mu)}$$

Donde ρ densidad del material.

Para las rocas estas velocidades varían entre 900 y 6000 m /s. El equipo empleado en el método de refracción está formado por una serie de geófonos y un oscilógrafo registrador. Se produce una perturbación mediante una explosión de una carga explosiva, a pequeñas profundidades, golpeando el terreno con una maza, con una disposición semejante a la señalada en la Figura N°1. Un geófono colocado en el punto de la perturbación registra el instante inicial de la onda transmitida al terreno. Los detectores registran a continuación el instante de llegada de las ondas, las cuales aparecen en el oscilógrafo y se registran fotográficamente.

Estos instantes de llegada y la distancia horizontal de los detectores al punto de explosión o impacto (se representan en la forma indicada en la Figura N°1). Las pendientes de la curva resultante (dromocronica) constituyen una medida de las



MEDIDA DE VELOCIDAD SISMICA

| | |
|---|---|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 01 ENSAYO DINAMICO - DOMOCRONICA |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

velocidades a través de las distintas capas del terreno. Normalmente los detectores, se colocan a distancias hasta cuatro veces la profundidad que se quiere investigar.

Prolongando la línea de velocidades, V_2 , hasta cortar el eje y, o hasta el punto A (Figura N° 1), se obtiene una ordenada que corresponde a la profundidad de la capa (A). Teóricamente el punto A es el instante de llegada a un detector colocado en el punto de impacto. En este caso, la distancia de recorrido es el doble de la profundidad del estrato (A). Por tanto, el espesor del estrato se puede calcular por la fórmula:

$$H_1 = V_1 \times \frac{OA}{2}$$

Las relaciones anteriores se basan en la hipótesis de que la trayectoria de la onda sísmica es vertical a partir del punto de impacto, marcha horizontalmente por el segundo y tercer estrato y asciende a continuación en forma vertical hasta el detector. Pueden utilizarse ecuaciones más exactas, aunque las diferencias en los resultados no suelen ser importantes.

La profundidad hasta la cual este método puede dar información útil es limitada, tanto con fines exploratorios como estructurales. Por tanto, la investigación del terreno para obras subterráneas suele ser impracticable por este método. Los emplazamientos de presas y explotaciones mineras a cielo abierto son obras en las que puede ser útil este tipo de reconocimiento.

Además de determinar los espesores de los distintos estratos, la determinación de las velocidades sísmicas *In Situ* proporciona una cierta medida de las características resistentes del macizo rocoso, que se pueden confrontar con las obtenidas en muestras individuales. Por ejemplo, si el material rocoso es duro pero se encuentra en una formación muy diaclasada, con posiblemente cierta meteorización en las diaclasas, la velocidad sísmica *in situ* tenderá a ser baja (Tabla N°3). Esto introduce la ambigüedad de si el material es una roca blanda homogénea o si la formación se compone de un material duro en un conjunto muy diaclasado. Además, si las fisuras de una formación muy diaclasada están rellenas de agua, la velocidad sólo resultará ligeramente afectada por las diaclasas. La tabla N°3 da ciertos valores típicos reales de velocidades sísmicas que aclaran las consideraciones anteriores.

Tabla N°3
Algunas velocidades sísmicas típicas

| Tipo de roca | Velocidad sísmica (m /s) |
|---|--------------------------|
| Pizarra arcillosa | 870-3840 |
| Arenisca | 1410-4200 |
| Granito sano | 5550 |
| Granito parcialmente descompuesto y con algunas vetas | 3150 |
| Granito muy descompuesto y fracturado | 660 |
| Granito muy descompuesto y friable | 450 |
| Caliza | 4920-6060 |

Algunos estudios han demostrado la relación lineal entre la resistencia a compresión simple y el módulo de deformación, semejante a la que se supone existe en el hormigón, donde se suele adoptar una resistencia a compresión simple de aproximadamente 1/1000 del módulo de deformación. Existe también evidencia de que esta relación puede variar para diferentes tipos de rocas, es decir, la resistencia a compresión simple de las rocas ígneas puede ser una fracción de su módulo de deformación mientras que para rocas sedimentarias podría ser otra. Si se pudieran establecer más exactamente estas relaciones, la medida de velocidades sísmicas in situ (que podrían convertirse en módulos de deformación) constituiría un método muy sencillo para determinar las características de resistencia in situ.

Tiene las extraordinarias ventajas de ser relativamente barato y rápido de aplicar, abarcando grandes volúmenes de roca. Sin embargo, los resultados obtenidos no suelen concordar completamente con los ensayos estáticos, siendo más próximos a los obtenidos en ensayos de laboratorio sobre muestras pequeñas. No se ha encontrado una correlación precisa entre los resultados sísmicos y estáticos, aunque Serafim ha advertido una semejanza entre los módulos sísmicos y los módulos tangentes al comienzo de la curva de descarga de los ensayos estáticos.

Esta discrepancia suele ser tan grande que los ensayos sísmicos no pueden sustituir directamente a los estáticos. Se han hecho varios intentos para obtener correlaciones generales, con éxito muy diverso (en gran parte función del tipo de roca y de la fase de degradación).

Se han dado explicaciones de esta discrepancia, pero ninguna parece ser completamente adecuada. Las dos más probables son:

- a) Que la deformabilidad “estática” resulta afectada en gran extensión por la fisuración pero, debido a los pequeños desplazamientos producidos, las pequeñas fisuras no influyen grandemente en los resultados sísmicos, especialmente si están rellenas de agua
- b) Que las velocidades sísmicas dependen solamente de las deformaciones elásticas y no están influenciadas por las deformaciones plásticas que reducen la rigidez encontrada en los ensayos estáticos.

Una diferencia fundamental existirá entre las rocas secas y saturadas que transmiten ondas a diferentes velocidades, mientras que el módulo estático de ambas permanece relativamente constante. Esto señala de nuevo la importancia de la primera explicación dada, ya que la transmisión de velocidad (y energía) de la onda a través de poros rellenos de agua o fisuras es mucho mayor que cuando estos poros contienen aire.

No suele ser posible determinar directamente el módulo de Poisson a partir de ensayos de carga estáticos, aunque se precisa un valor de este módulo en las ecuaciones que sirven para interpretar los ensayos. Sin embargo, se suele suponer, principalmente a partir de medidas de laboratorio, que el valor del módulo de Poisson es menor de 0.2 y cualquier variación dentro de este límite tendrá escaso efecto sobre los cálculos (un error máximo del 4% en el caso de las ecuaciones de Boussinesq). Desde un punto de vista práctico la transmisión de deformación lateral, debido a las deformaciones directas producidas por la carga, estará limitada probablemente por la presencia de fisuras en la roca, justificando así el bajo valor del módulo de Poisson adoptado.

4.6.4. ENSAYOS DE CORTE “IN SITU”

Por razones idénticas a las realizadas en las mediciones de deformaciones, es necesario realizar alguna forma de ensayos de corte *in situ* en el macizo rocoso para intentar determinar su resistencia al esfuerzo cortante.

Aún no se ha desarrollado un ensayo perfectamente adecuado, pero uno muy utilizado es el que se muestra en la Figura N°2. En este caso un bloque aislado de roca, o de hormigón moldeado sobre la superficie rocosa, se «corta» según la superficie de la roca mediante un gato horizontal, mientras un segundo gato aplica simultáneamente una carga perpendicular. Este ensayo permite estimar el ángulo de resistencia al corte de la roca. El bloque suele tener una sección plana de aproximadamente 1 m², pero también se pueden utilizar superficies mayores, mediante la relación de la Ley Coulomb, se obtiene.

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$$

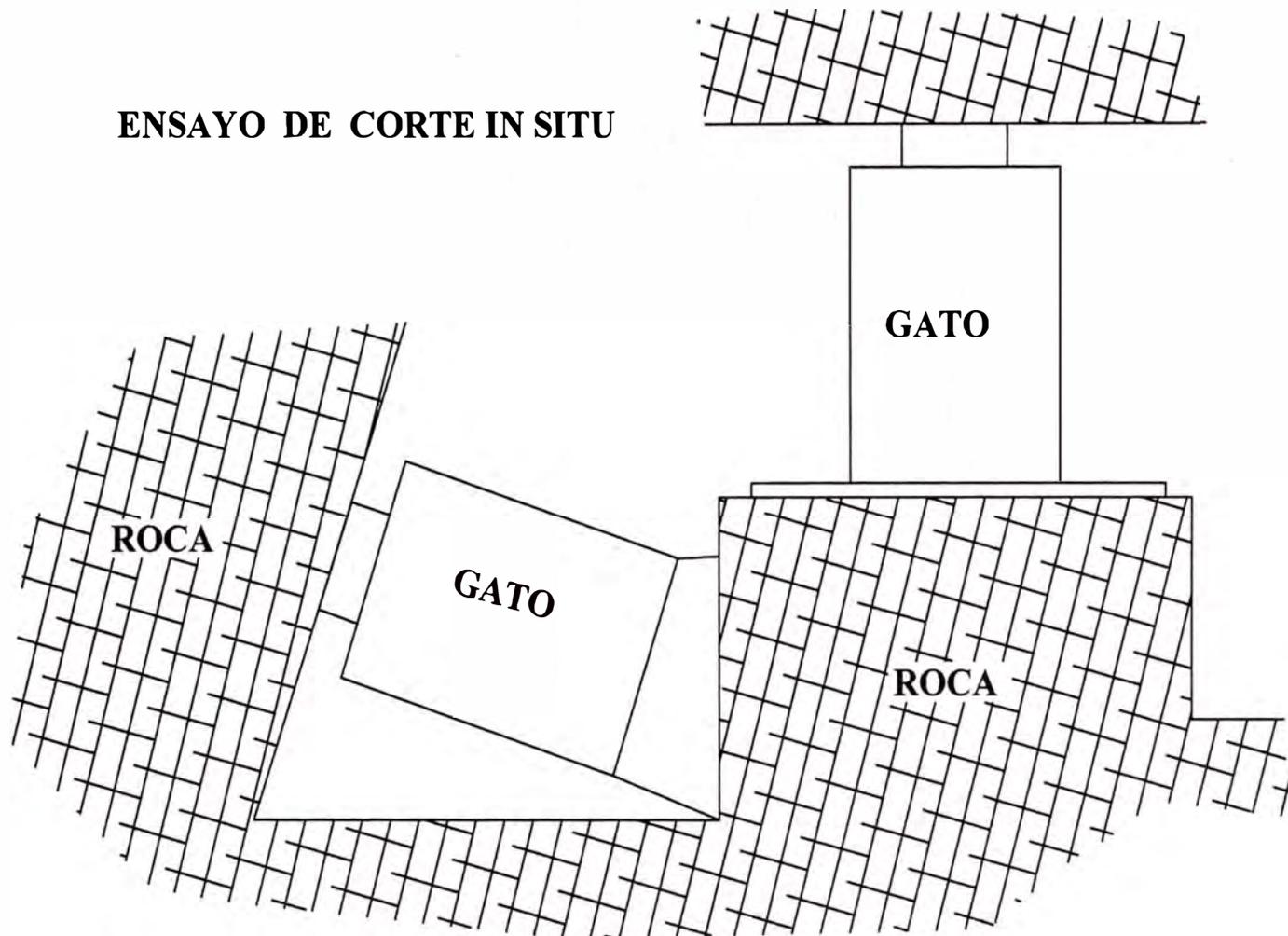
donde τ es la resistencia al corte, c es la cohesión, σ es la tensión normal a la superficie de corte (efectiva) y ϕ es el ángulo de resistencia al corte. A partir de estos ensayos, realizados con distintas cargas normales, se pueden estimar los valores efectivos de c y ϕ . Como estos ensayos se suelen realizar con pequeños bloques (70 mm x 70 mm) los resultados no tienen por qué ser representativos de todo el macizo rocoso. Puede esperarse que la resistencia total sea inferior a lo que obtienen como resultados de estos ensayos (Figura N°3).

En ciertas circunstancias estos ensayos son muy útiles para obtener alguna información sobre las propiedades de resistencia In Situ. Sin embargo, cada ensayo es caro y deberán realizarse una variedad de ensayos para obtener valores medios y conocer las dispersiones, y aún en circunstancias los resultados no constituyen una medida correcta de las propiedades de resistencia In Situ de grandes masas rocosas.

Se han descrito recientemente ensayos de corte a gran escala. Se sugiere que tales ensayos (realizados con bloques de 5.5 x 5.5 x 4.6 m) reducirán la influencia de los procesos de excavación sobre el plano de corte. Sin embargo, al mismo tiempo, el estado tensional real sobre ese plano será más indeterminado.

También se ha tomado en consideración a otros métodos, que determinan la capacidad portante directamente, cargando hasta la rotura una placa colocada sobre la superficie de la roca. Este sistema puede considerarse como la reproducción de una presa descansando sobre su cimentación, un pilar apoyado en el terreno, o el punzón de un ensayo de dureza apoyado sobre la superficie de una muestra de roca.

ENSAYO DE CORTE IN SITU



| | |
|--|---|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA | |
| FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 02 ENSAYO DE CORTE |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |



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

INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS

**TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL
INGENIERO DE MINAS**

**FIGURA N° 03
EQUIPO PARA ENSAYO DE CORTE
IN SITU**

**TESISTA:
RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE**

**FECHA:
DICIEMBRE 2002**

CAPITULO V

CONTROL GEOTÉCNICO EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

5.1. INTRODUCCIÓN.

Para implementar un control geotécnico utilizando instrumentación en la minería subterránea, se deben considerar varios aspectos, tales como, incidentes de inestabilidad en las labores (hundimientos, derrumbes, explosiones de rocas, caída de rocas, deterioro de los elementos de sostenimiento), evidencias de peligros en la zona de trabajo, ampliación de áreas de operación, necesidades de incremento de producción, modificación de método y secuencia en el sistema de minado, todos estos aspectos, se pueden presentar al iniciar, durante o después de abandonar una explotación minera, es decir en las etapas de diseño, construcción, operación y cierre o abandono, para estos casos, es necesario implementar medidas de control geotécnico en cada una de las etapas del proyecto minero.

Antes de iniciar la construcción de cualquier excavación minera, es necesario recabar información para el diseño. Esta información incluye el estado de esfuerzos in situ, resistencia de la roca, como también determinar el comportamiento de la roca frente a las deformaciones, mediante testigos de exploración, métodos de medición de resistencia de rocas con equipo de campo (martillo de Shmidt).

Durante la construcción y cierre de las labores mineras, se debe confirmar la validez e idoneidad de los parámetros de diseño y proporcionar las bases necesarias para soportar posibles modificaciones o ajustes. Teniendo en cuenta, que en estas etapas estarán presentes todas las solicitaciones estáticas y dinámicas, el control de los esfuerzos y desplazamientos serán parámetros importantes para confirmar y controlar el factor de seguridad de una labor minera.

Debemos indicar, para asegurar la ejecución de una explotación subterránea sin incidentes de inestabilidad, dependerá de las investigaciones básica geotécnica en el

diseño, luego ejecutar la construcción de acuerdo las especificaciones técnicas y parámetros de diseño, y durante la operación siguiendo la mejores practicas de ejecución de las operaciones unitarias (perforación, voladura, relleno, explotación racional y una secuencia de minado), y finalmente durante el cierre y abandono, estableciendo un plan de cierre adecuado (relleno y rehabilitación de áreas explotadas). En estas condiciones, el sistema de control implementado paralelamente a las etapas del proyecto, confirmarán el comportamiento geotécnico y los factores de seguridad, sin incidente ni pérdidas económicas.

Cabe mencionar que para desarrollar el presente acápite el autor, ha evaluado la mayor cantidad de instrumentos disponibles para implementar sistemas de control, los mismos que son de procedencia internacional u otros que se pueden adaptar o construir en la mina.

5.2. INSTRUMENTOS DE CONTROL PARA RECABAR DATOS PARA EL DISEÑO

Por la importancia de conocer las magnitudes y direcciones principales de los esfuerzos In Situ, antes del diseño de una excavación en roca, se presentan algunos métodos:

Técnica de rotura Hidráulica, es el método disponible para determinar esfuerzos a más de 50 m desde el punto de acceso. En esta técnica se provocan fracturas en la roca por efecto de la presión hidráulica sobre las paredes internas de un taladro, para estimar los esfuerzos, se basa en dimensionar la presión que se necesita para fracturar y las direcciones de las fracturas. A pesar de la virtud de la técnica, en el proceso de interpretación de los registros, es necesario hacer algunas suposiciones en lo que se refieren a direcciones de los esfuerzos principales y la magnitud de uno de los tres esfuerzos principales, esto limita el uso de esta técnica.

Medición directa de los esfuerzos mediante gatos hidráulicos, considerado uno de los métodos más antiguos en la medición de esfuerzos, donde se tiene como base la medición de la presión, este método consiste en hacer regresar un par de pernos

instalados a cada lado de una ranura a la posición que ocupaban antes de que estos se hicieran. Esta técnica no se puede usar más que donde hay un acceso a un taladro en superficie de exploración o en un túnel piloto, por tanto la técnica no es aplicable en roca muy fisurada o muy dañada por efecto de la voladura.

Medición de esfuerzos por taladros, en la actualidad es el método con mayor difusión para medir los esfuerzos, ya que su estado total puede determinarse a partir de un solo taladro.

5.2.1. DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS “IN SITU” POR ROTURA HIDRÁULICA

Técnica de rotura Hidráulica, es el método disponible para determinar esfuerzos a más de 50 m desde el punto de acceso. En esta técnica se provocan fracturas en la roca por efecto de la presión hidráulica sobre las paredes internas de un taladro, para estimar los esfuerzos, se basa en dimensionar la presión que se necesita para fracturar y las direcciones de las fracturas. A pesar de la virtud de la técnica, en el proceso de interpretación de los registros, es necesario hacer algunas suposiciones en lo que se refieren a direcciones de los esfuerzos principales y la magnitud de uno de los tres esfuerzos principales, esto limita el uso de esta técnica.

El método de rotura hidráulica consiste en taponar una sección de un taladro introduciendo un fluido a presión y aumentando la presión hasta que las paredes del taladro se fracturan. Siendo esta una de las consecuencias de la ampliación de la teoría de rotura frágil al estado de esfuerzos triaxiales, teniendo en cuenta la influencia de la presión intersticial, es que cuando la presión intersticial iguala a la de confinamiento, la capacidad cohesiva de la roca puede quedar reducida a su resistencia de tracción simple.

En la rotura hidráulica las paredes del taladro se rompen cuando el esfuerzo máximo provocado en la zona que esta expuesta a la carga, alcanza la resistencia a tracción en un punto cualquiera de la pared. Es decir, cuando los esfuerzos de tracción provocadas por el fluido a presión superan las esfuerzos de compresión creadas en las paredes del

taladro por la perforación del mismo en el área denominada campo regional de esfuerzos del macizo rocoso.

Al estudiar los conceptos teóricos relativos a la rotura hidráulica. Se ha señalado (Fairhurst) que si el campo regional de esfuerzos, está definido por tres esfuerzos principales ortogonales, una de las cuales se supone que coincide con el eje del taladro, la rotura se producirá en una dirección normal a la máxima tracción inducida cuando ésta alcance la resistencia a tracción de la roca. La rotura se propagará en un plano perpendicular a la compresión principal menor y a la presión del fluido necesaria para propagar la rotura, una vez iniciada, será igual a este esfuerzo. Puede evitarse tener que considerar las pérdidas de presión del fluido por rozamiento, observando la presión registrada cuando se deja de bombear durante la propagación de la rotura (se muestra el procedimiento y alcances de esta metodología en el Apéndice I, Volumen II)..

5.2.2. MEDICIÓN DIRECTA DE LOS ESFUERZOS CON GATOS HIDRÁULICOS

5.2.2.1. CELDAS DE PRESIÓN HIDRÁULICA

Celdas de presión Hidráulica consisten en gatos planos conectados a un transductor de diafragma hidráulico o neumático, el cual es conectado por medio de una tubería flexible hacia una unidad de registro de datos. Los esfuerzos normales transferidos desde la roca circundante, son medidos para balancear la presión del fluido en la celda con una presión aplicada en el otro extremo del diafragma. Las celdas de presión hidráulica son utilizadas para medir esfuerzos totales en materiales tales como rellenos, o interfaces entre materiales como por ejemplo la interfase roca – shotcrete. Si se requiere un esfuerzo efectivo, se debe instalar un piezómetro a largo de la celda de presión.

Los procedimientos para el monitoreo o control de esfuerzos normales con las celdas de presión hidráulica son dadas por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas, Comisión de Estandarización de pruebas de campo y laboratorio (1980). La celda de

presión Hidráulica más utilizada es la celda de Glötzl la cual es descrita por Franklin (1977).

5.2.2.2. TÉCNICA DEL GATO PLANO

El empleo de gatos planos para la medida de esfuerzos en roca procede de Francia. En esta técnica se miden esfuerzos en un estado biaxial de dos ranuras perpendiculares. La longitud de la ranura suele ser de 32-50 cm con una profundidad semejante, y un ancho de 4 cm, para recibir gatos planos cuadrados de 30-45 cm de lado. La ejecución de la ranura produce una liberación local de esfuerzos midiéndose la deformación resultante durante un periodo de tres o cuatro días mediante un extensómetro colocado entre diversas combinaciones de puntos. A continuación se coloca el gato plano en la ranura, cementándolo con mortero, su borde enrasado con la superficie de la roca, dejándole otros tres o cuatro días para el endurecimiento del mortero. Pasado este tiempo se aplica una presión hidráulica al gato, aumentándola por escalones, y tomando medidas entre diversas combinaciones de puntos hasta que se alcanzan los valores originales anteriores a la apertura de la ranura. A continuación se realizan dos a cuatro ciclos de carga y descarga durante un período de varios días determinando la presión media de equilibrio. El ensayo completo dura de dos a tres semanas.

Alexander ha dado fórmulas basadas en la teoría elástica, suponiendo una ranura elíptica y un estado de tensión plano, para el que se deduce (con un módulo de Poisson $\nu = 0.2$):

$$S = aP + bQ$$

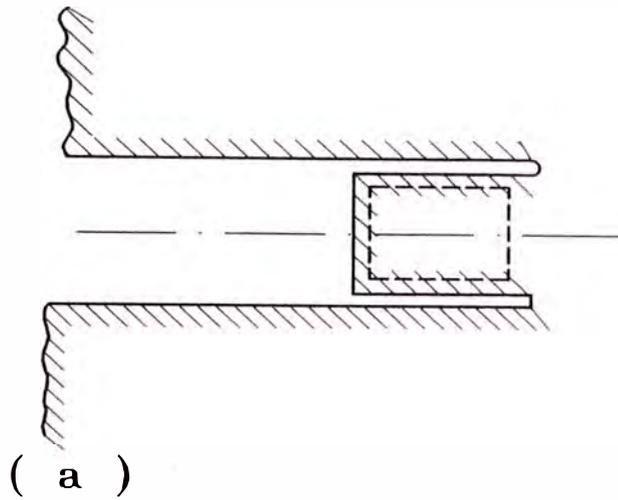
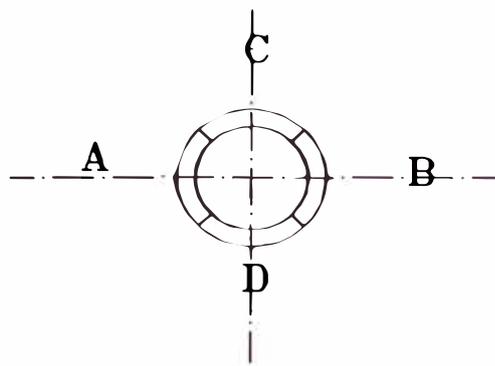
Donde S es el esfuerzo normal al gato producida por la roca, Q es el esfuerzo paralelo al gato, P es la presión media de equilibrio, a y b son constantes que dependen de las dimensiones del gato y de la geometría de los puntos de medida respecto al mismo. Cuando los puntos de medida están alineados según el eje de la ranura y a una distancia L/3 de la misma, siendo L la longitud de la ranura, se supone que la presión de equilibrio es igual al esfuerzo existente en la roca.

En el estudio teórico de Alexander, la presión de equilibrio depende de las dimensiones de la ranura y del gato, del campo de esfuerzos biaxial y del módulo de Poisson. Es independiente del módulo de elasticidad de la roca. En la práctica, aunque sea independiente de la linealidad de la relación esfuerzo - deformación, el éxito del método radica en la existencia de las mismas características de deformación en la descarga y en la carga hasta la presión de equilibrio, esto puede no producirse siempre. Thayer y otros han indicado diferencias apreciables entre distintos puntos de medida, siendo el resultado en función de la distancia de los puntos al gato.

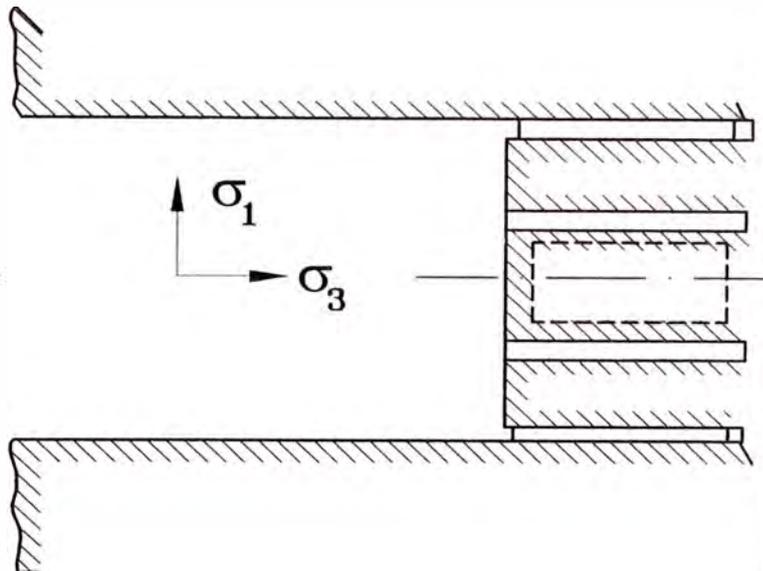
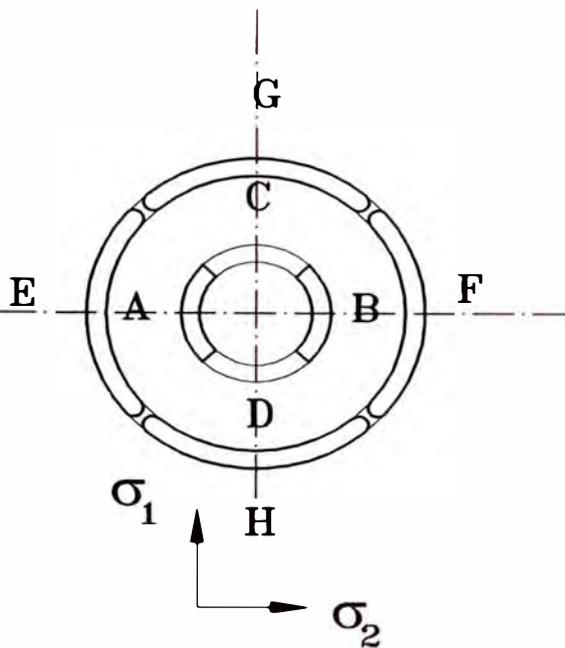
Las objeciones principales al método del gato plano son que las medidas deben hacerse en el borde de la excavación, en una zona sometida a una distribución de esfuerzos irregular y desconocidas, y que puede estar descomprimida (se muestra el procedimiento y alcances de esta metodología en el Apéndice II, Volumen II).

5.2.2.3. TÉCNICA DEL GATO CURVO

Los investigadores Jaeger y Cook, han modificado el método del gato plano para emplear gatos de sección curva colocados en taladros de 10 cm de diámetro y hasta 6 m de profundidad (El método se ilustra en la Figura N°4). De la figura mostrada, se supone que la tensión principal σ_3 coincide con la dirección de los taladros donde están colocados los gatos A y B, en la ranura anular hecha con una corona de diamante. Se aumenta la presión de estos gatos hasta que comienza a romperse la roca situada en los cuadrantes C y D exteriores al anillo. Se supone que estas roturas se producen en la dirección de la tensión principal σ_1 , observándolas y registrando su dirección mediante sobreperforación y rotura de un testigo concéntrico mayor. El taladro de 10 cm y la ranura se prolongan de nuevo colocando los gatos A y B de forma que su presión resultante actúe en dirección normal a σ_1 . Estos gatos forman ahora el elemento sensible y se les comunica presión, registrando el descenso de presión al sobre perforar en torno a los mismos. A continuación se colocan otros dos pares de gatos EF y GH en el anillo de roca sobre perforado aplicándoles presión para restaurar los esfuerzos en AB. Según el estudio teórico de Alexander para el ensayo con gato plano, puede demostrarse que en función de los desplazamientos que se producen al perforar la ranura anular (2W):



(a)



(b)

SE OBSERVA EL PROCEDIMIENTO DESCRITO POR ALEXANDER
PARA LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS, UTILIZANDO GATOS
CURVOS

| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 04 DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS ABSOLUTOS MEDIANTE GATOS CURVOS |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

$$E = \frac{cS - dQ}{W}$$

y para los desplazamientos producidos al aplicar presión a los gatos ($2W_1$):

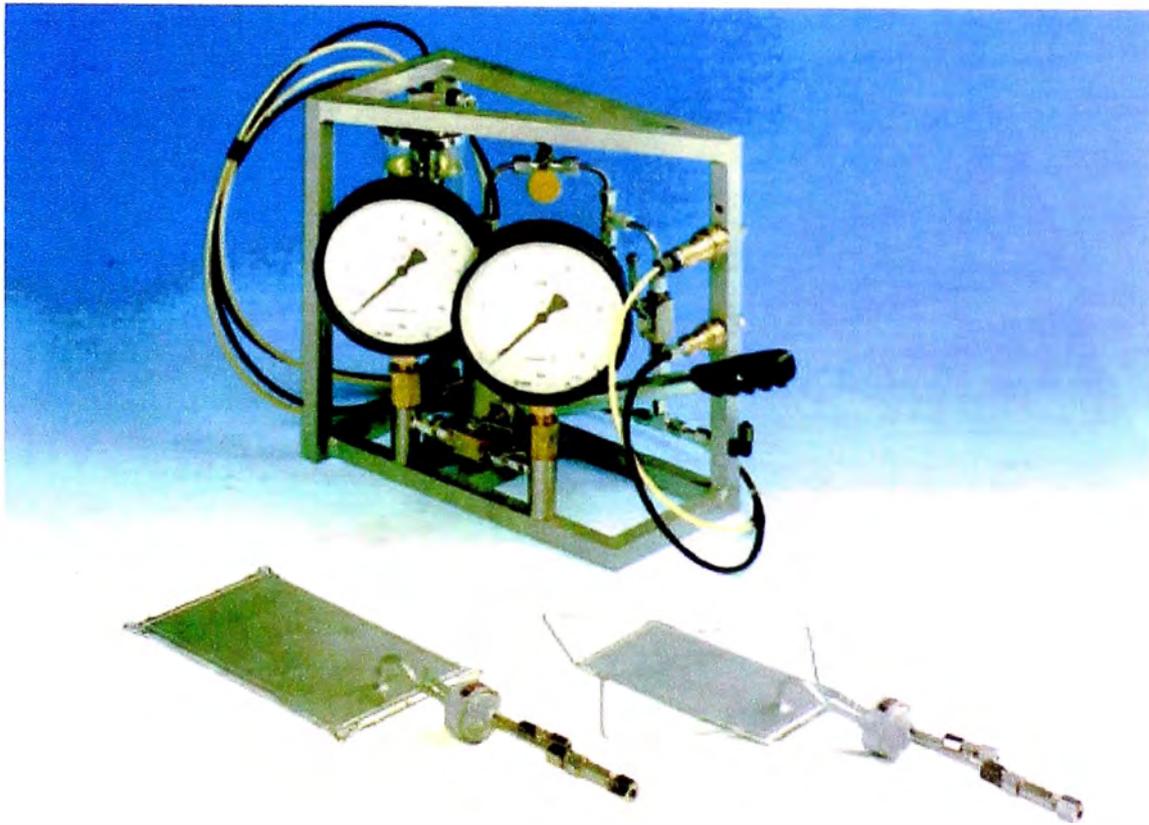
$$E = \frac{fP}{W_1}$$

Donde c , d y f son constantes que dependen de la geometría del ensayo.

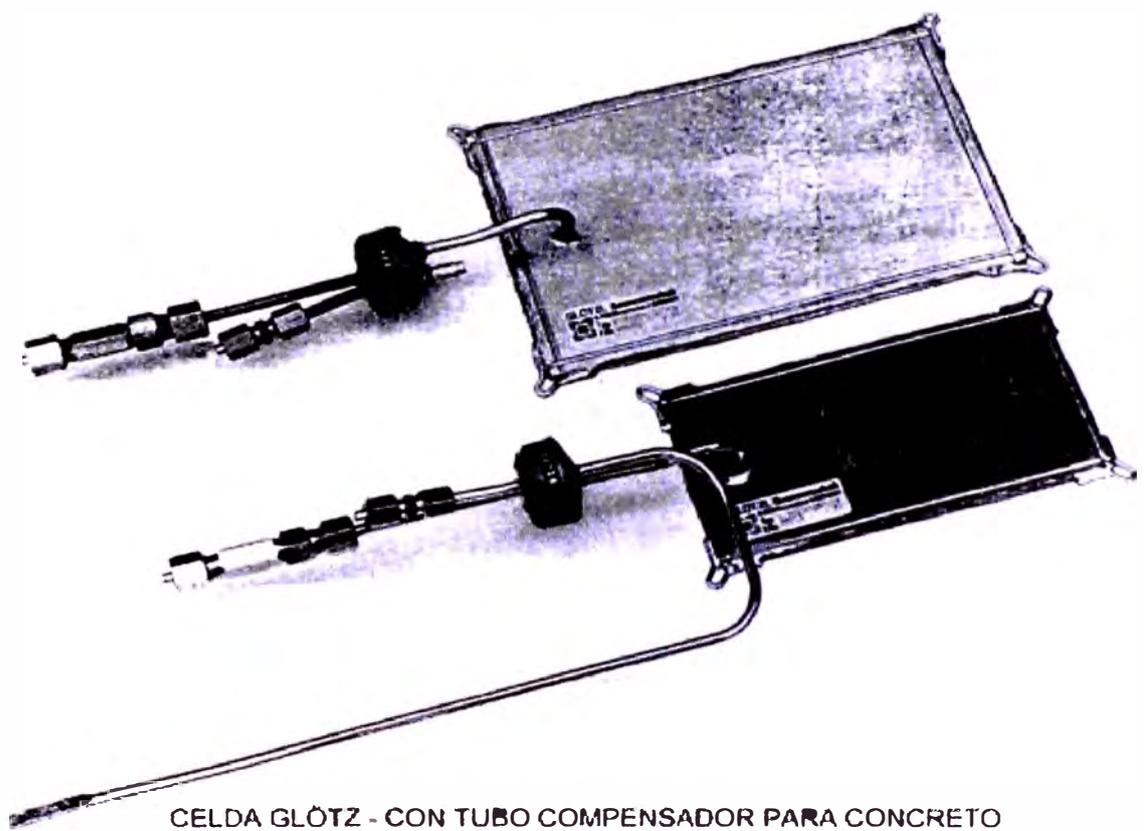
Mediante gatos cilíndricos se puede determinar un módulo de deformación midiendo el corrimiento diametral producido con una cierta presión interior. Mayer ha descrito uno de estos aparatos. Está formado por un cilindro de acero dividido en dos mitades por un corte axial y en cuyo interior se encuentra una celda de presión hidráulica. El aparato se inserta firmemente en el taladro mediante un manguito cónico, análogo al del tensómetro de Potts. Un transductor inductivo mide el desplazamiento relativo de las dos mitades sometidas a presión. Es necesario calibrar el aparato en diversos materiales.

5.2.2.4. CELDA DE “MENÁRD” Y DE “GLÖTZL”

Actualmente varias celdas de presión hidráulica de diferente complejidad son empleadas. Entre ellas encontramos; la “Geocell” de Ménard, formada esencialmente por dos cámaras coaxiales, conectadas a manómetros, en una celda cilíndrica de acero. Otro aparato simple es el del U. S. Bureau of Mines, formado por un gato plano de 25 mm de ancho por 25 cm de longitud, embebido en un cilindro de resina epóxica, micro hormigón u otro material. Esta celda no se emplea para medir presiones absolutas o determinar módulos, sino que nos permite observar las variaciones de presión en rocas relativamente blandas como pequeños pilares de carbón. En contraste con estos aparatos están las celdas de presión de “Glötzl” formadas por gatos planos de tamaño 70 x 140 x 2 mm ó 100 x 200 x 2 mm conectados a una bomba de volumen constante y a una válvula limitadora de presión (Ver Figura N°5 y Figura N°6). Para el registro, después de conectar la bomba, se aumenta la presión en la tubería de unión y en la celda. Cuando la presión en la celda es igual al del material circundante se abre un orificio y la bomba mantiene un estado de equilibrio (Ver Figura N°7).

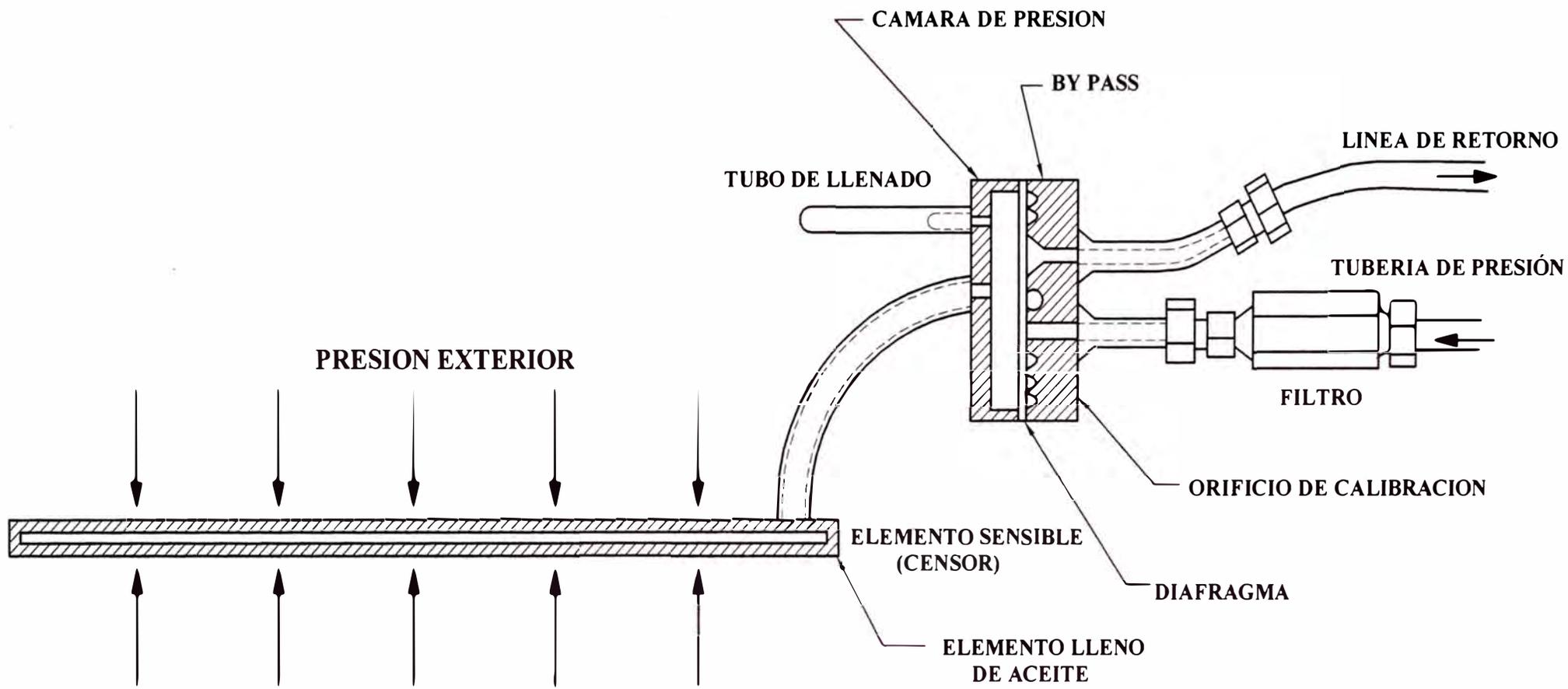


| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 05 CELDA GLÖZTL |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |



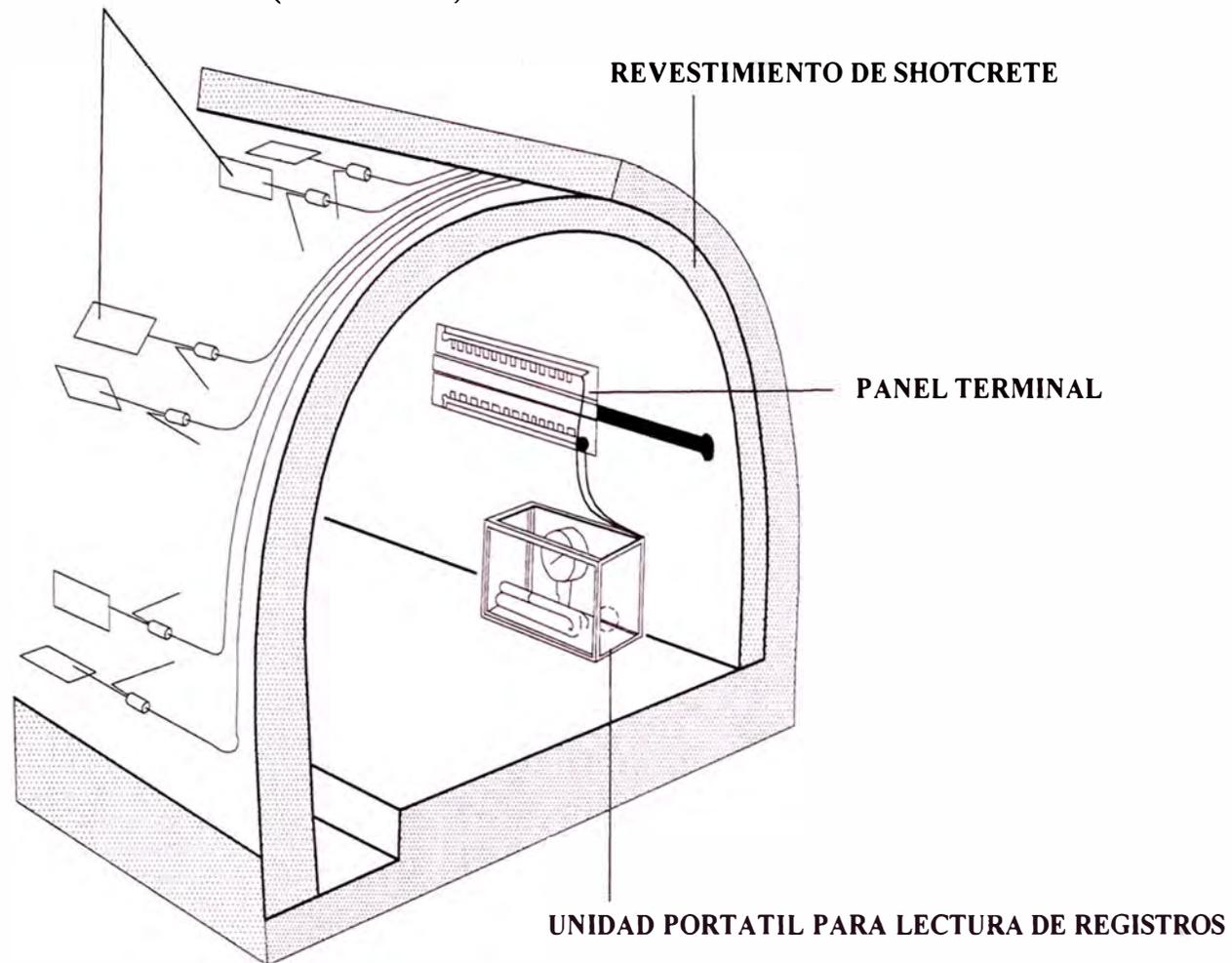
CELDA GLÖTZ - CON TUBO COMPENSADOR PARA CONCRETO

| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 06 CELDA GLÖZTL - MECANISMO UTILIZADO EN LABORES CON CONCRETO |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |



| | |
|---|---|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 07 ESQUEMA DE TRABAJO - CELDA GLÖTZL |
| TESISISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

**CELDA DE PRESIÓN PARA CONCRETO
Y ESFUERZOS PERIFERICOS (CIRCULARES)**



| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 08 CELDA DE GLÖTZL INSTALADAS EN UN REVESTIMIENTO CON SHOTCRETE |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

La instalación de celda de presión de Glötzl, esta referida para medir los esfuerzos circulares en la capa de shotcrete y el esfuerzo normal en la interfase roca – shotcrete (Ver Figura N°8). Para la instalación de este mecanismo en concreto es necesario que este conectado a un gato plano. Como el concreto, esta en contacto y por consiguiente un intervalo de aire es desarrollado a lo largo de la cara del gato plano. Un pequeño volumen de fluido es inyectado por medio de un tubo corto después que sea instalado el gato plano y este en contacto con el concreto. Una pequeña cantidad de presión positiva es almacenada dentro del gato plano, y consecuentemente todas las lecturas medidas estarán referidas a este valor inicial.

El fluido utilizado va ha depender del material en el cual sea instalado el mecanismo. La compresibilidad de la celda debe ser similar al material circundante, si deseamos que las lecturas de los esfuerzos normales sean correctas. La celda debe estar bien pegada al material para poder registrar un posible cambio de esfuerzos. La celda instalada en suelo son usualmente llenadas con aceite hidráulico; si es instalado en roca o concreto es llenado con mercurio.

La presión del fluido es medida por aplicación de aire o aceite hidráulico a uno de los tubos gemelos que conecta al transductor hidráulico con la unidad de registro. Cuando esta presión es suficiente para balancear la presión de la celda, un flujo de retorno de aire o aceite hidráulico será registrado por la unidad de lectura. La presión normal esta expresada como sigue:

$$P = (P_r - P_i - P_h - P_f)E$$

Donde P_r = Presión indicada, P_i = Presión inicial de la celda, P_h = corrección por diferencia entre la elevación de la celda y la unidad de registro, P_f = corrección por fricción en la línea de acción y E = factor (menor a 1.0).

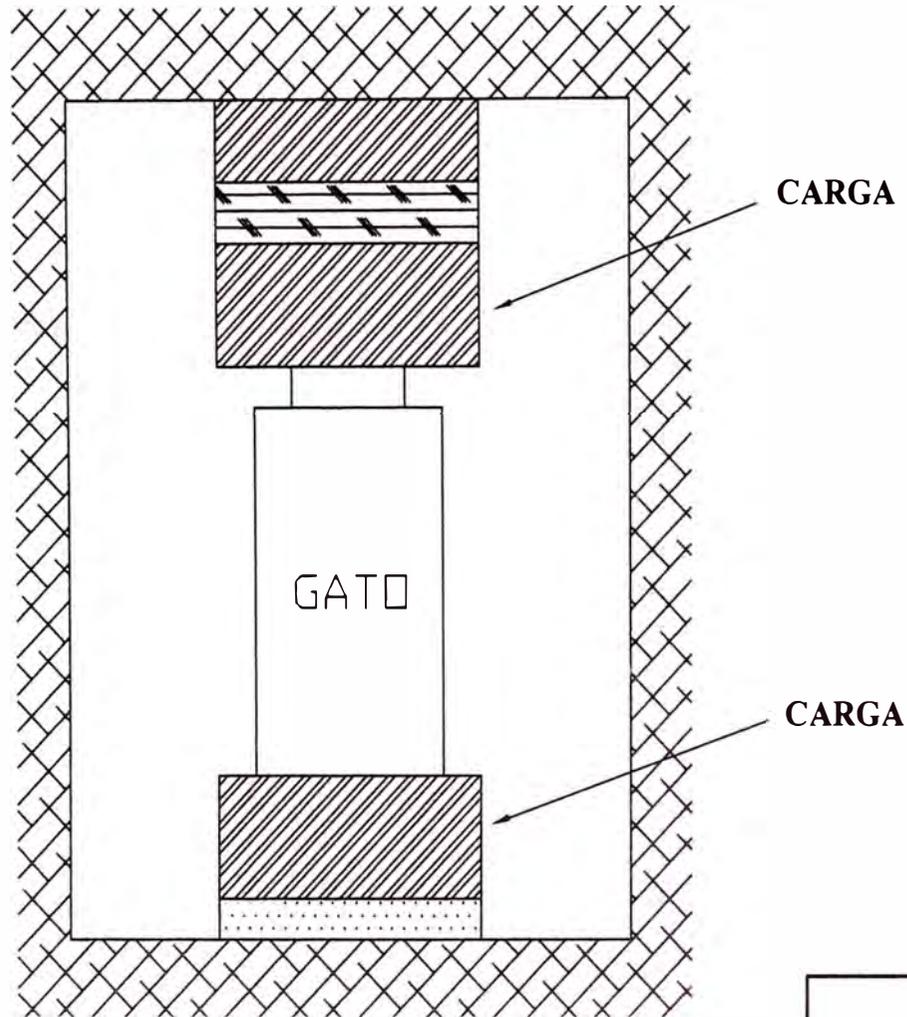
5.2.3. ENSAYO DE CARGA CON PLACA

En este método se aplica una carga sobre una superficie plana de la roca, midiendo la deformación superficial resultante. La base teórica es la conocida solución de Boussinesq para el desplazamiento normal de la superficie de un semi - espacio elástico bajo la acción de una carga puntual normal. Generalmente la carga se aplica mediante un gato a través de un elemento de reparto. Se requiere una carga de varios cientos de toneladas para obtener deformaciones medibles, siendo el problema fundamental conseguir una reacción suficientemente fuerte contra la cual apoyar los gatos. Debido a ello, estos ensayos se suelen realizar en galerías subterráneas excavadas para este fin. En la Figura N°9 se muestra de forma esquemática una disposición de ensayo, donde puede verse que la solera de un túnel se somete a carga a través de un bloque de reparto mediante un gato o gatos apoyados contra la bóveda. El bloque de reparto determina el área de carga y sus características controlan en gran parte la distribución de presiones en la zona cargada (Ver Figura N°10). El método general consiste en aplicar la carga por escalones, descargando después de cada uno de ellos. En el primer ciclo se aplica aproximadamente el 25% de la carga total, en el segundo ciclo, el 50% y así sucesivamente (Se muestra el procedimiento y alcances de esta metodología en el Apéndice III, Volumen II) .

5.2.4. DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE ESFUERZOS POR MEDIO DE TALADROS

5.2.4.1. CELDAS CON BANDAS EXTENSOMÉTRICAS (STRAIN GAUGE CELLS)

Colocando estas celdas en el fondo de un taladro, la sobreperforación puede realizarse con la propia broca empleada para hacer el taladro. Esta metodología amplía considerablemente la gama de medidas en frentes rocosos. Se suelen emplear diferentes técnicas:



| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 09 REPRESENTACIÓN ESQUEMATICA ENSAYO DE CARGA |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |



| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 10 EQUIPO PARA EL ENSAYO DE CARGA |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

5.2.4.2. CELDA TRIAXIAL DE DEFORMACIÓN CSIR (TRIAxIAL STRAIN CELL)

El consejo sudafricano para la investigación científica e industrial (CSIR) ha desarrollado un medidor (calibrador) que puede ser utilizado para obtener esfuerzos totales en un punto del taladro

La celda de deformación Triaxial consiste en tres grupos compuesto por tres medidores de deformación (strain gauges) montados en una circunferencia con un cuerpo tubular. El taladro piloto es de 1½ pulgada de diámetro, siendo el medidor pegado directamente a las paredes del taladro, utilizando un equipo especial para el posicionamiento e instalación. Después que el cemento haya secado, se toma las primeras lecturas del medidor. El equipo utilizado en la instalación es removido del taladro. Después que la sobre perforación es completada, se tomará una nueva lectura. El testigo (core); junto con el medidor, es removido del taladro y es colocado en una cámara biaxial. De donde obtendremos lecturas de esfuerzo – deformación, con la finalidad de obtener las propiedades elásticas. Los cambios en la deformación inducida por la sobre perforación y las propiedades elásticas de la roca son utilizados para determinar el estado completo de esfuerzo In Situ desde la sobre perforación. (Se muestra el procedimiento y alcances de esta metodología en el Apéndice IV, Volumen II)..

5.2.4.3. CELDA LuH

Investigadores de la Universidad de Lulea (LuH) en Suecia han realizado grandes adelantos (Ver Figura N° 11) en diseñar equipos para poder determinar los esfuerzos.

En este equipo los medidores de deformación (strain gauges) son adheridos a pistones movibles que contienen a las celdas. Un cemento de rápida acción es aplicado a los medidores, y la celda es insertada en un taladro piloto de pequeño diámetro. Cuando se obtiene una correcta localización y orientación, se utiliza aire comprimido para forzar a los pistones contra la pared del taladro. Después que el cemento se seque, las lecturas iniciales de deformaciones son tomadas y el equipo de instalación es removido. La



| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 11 CELDA LUII |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

celda es entonces sobre perforada y el testigo resultante es removido del taladro. El equipo de instalación es nuevamente anexado y se toma la lectura final de deformaciones. Los datos obtenidos son ingresados a la computadora en el cual se calculan los esfuerzos debido a los cambios de deformaciones medidos. Las propiedades elásticas son determinadas usando la cámara biaxial.

5.2.4.4. CELDA HUECA DE INCLUSIÓN CSIRO (HOLLOW INCLUSION CELL)

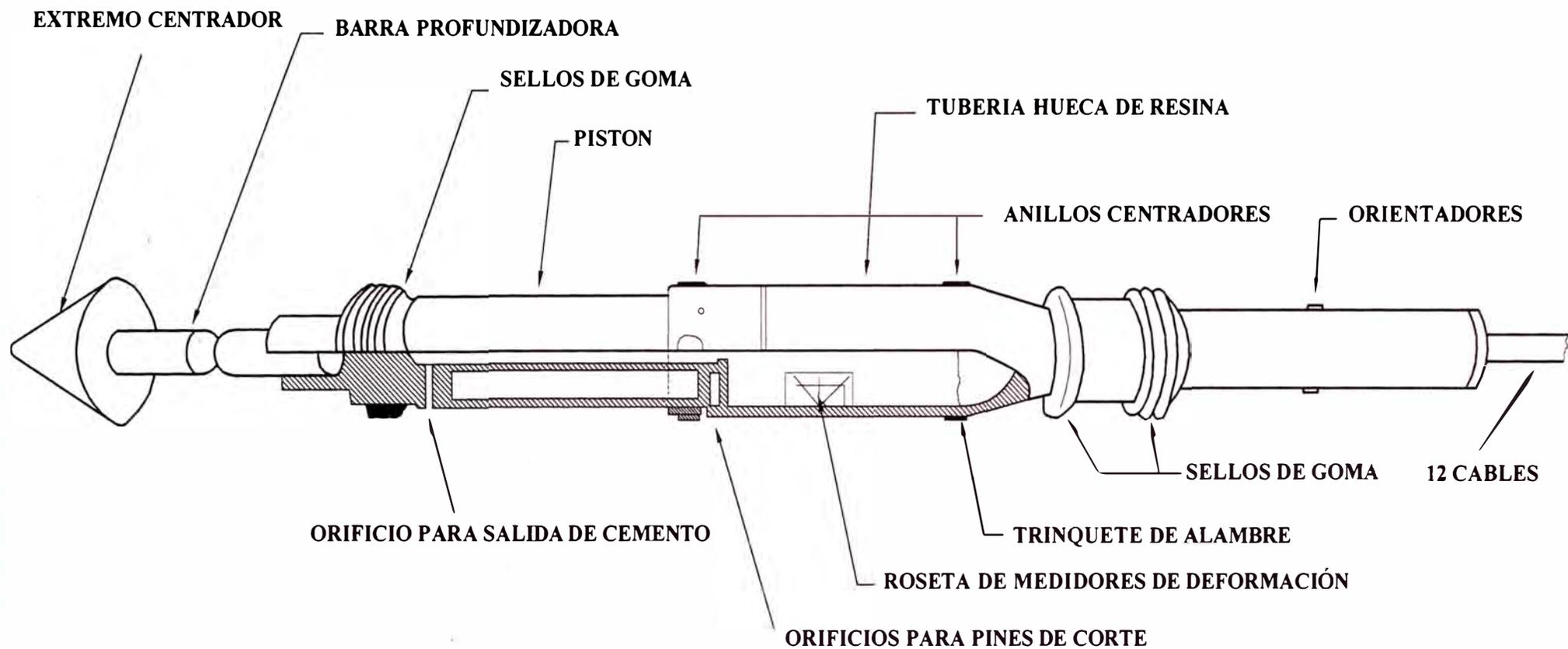
La celda CSIRO incorpora nueve (o doce) medidores de deformación (strain gauges) en tres rosetas encascadas dentro de una cáscara epóxica adherida a 12 cables para registrar los testigos (Ver Figura N°12).

La celda es cementada dentro del taladro, se sobre perforada y extrae el testigo. El testigo recuperado contiene a la celda, la cual es colocada en una cámara biaxial. De las deformaciones obtenidas, las propiedades elásticas pueden ser calculadas. El resultado dado por los medidores de deformación (strain gauges) y las características de la roca son procesadas por la computadora para proporcionarnos los esfuerzos principales, y las orientaciones, principalmente los esfuerzos vertical y horizontal y información estadística relevante.

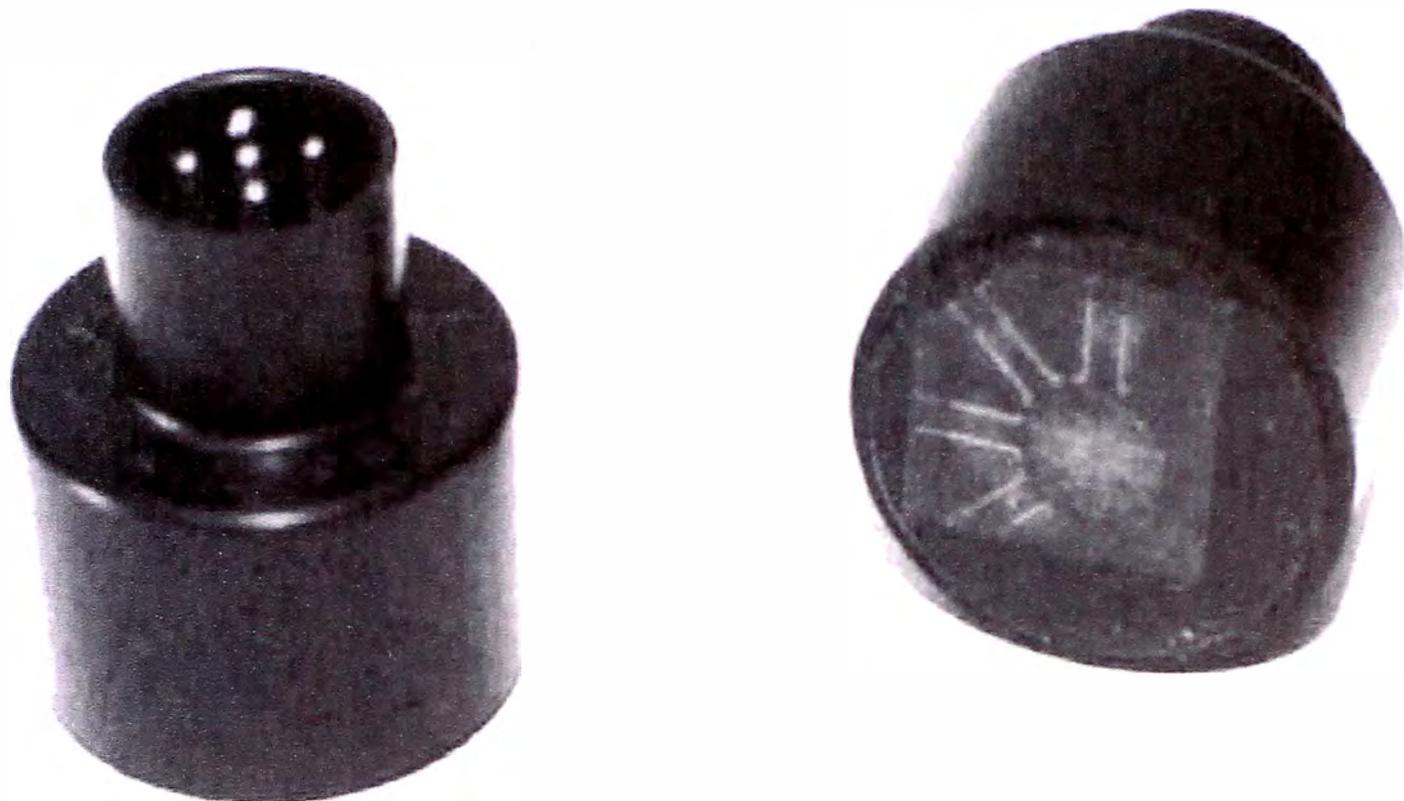
5.2.4.5. DOORSTOPPER (LEEMAN)

Los primeros intentos para sobre perforar aparatos con bandas extensométricas, colocados en el fondo de un taladro tropezaron con problemas, debidos principalmente a la dificultad de aislar las bandas y sus conexiones al sistema eléctrico, del agua introducida en torno a las coronas de perforaciones realizadas en roca dura.

Leeman (Ver Figura N°13) resolvió este problema de manera eficaz empotrando las conexiones eléctricas de las bandas en un taco de caucho o de silicona de 35 mm de diámetro, en cuya cara frontal se monta una roseta rectangular de bandas extensométricas, que en la celda original quedaba protegida por una película de araldita



| | |
|---|---------------------------------------|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 12 CELDA CSIRO HI |
| TESISISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |



| | |
|---|------------------------------------|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 13 EQUIPO DOORSTOPPER |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

de 0.6 mm de espesor (Ver Figura N°14). Los cables procedentes de la roseta están unidos a cuatro bornes de cobre en una ficha de conexión aislada. El equipo puede emplearse en un taladro perforado con el diámetro estándar BX (60 mm).

Puede emplearse un aparato para colocar la celda, orientándola para medir deformaciones en las direcciones vertical, horizontal y a 45°. El aparato introductor se mantiene acoplado hasta que la celda queda fija a la roca, extrayéndole entonces para comenzar la sobreperforación. Si las diferencias de lectura de las bandas extensométricas en las direcciones vertical, a 45° y horizontal (Ver Figura N°15 y Figura N°16), antes y después de la sobre perforación son respectivamente ε_v , ε_{45} y ε_h , las deformaciones principales ε_1 y ε_2 de la roca en el extremo del taladro son:

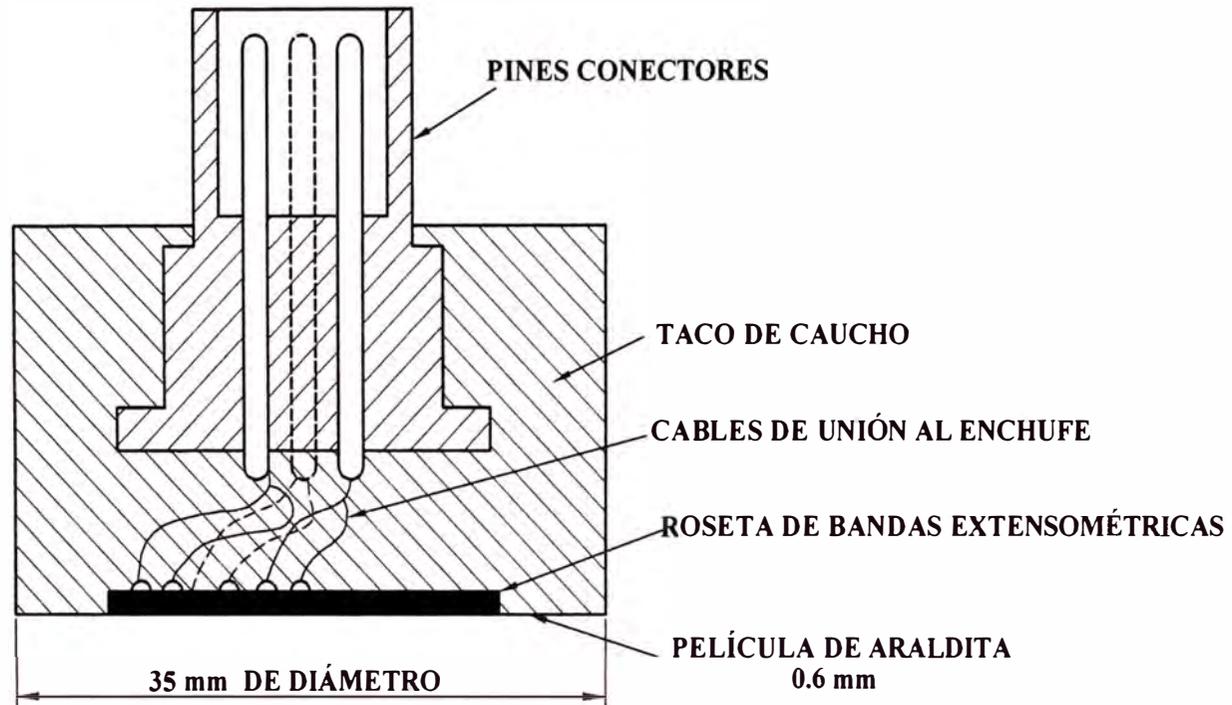
$$\varepsilon_1 \text{ o } \varepsilon_2 = \left\{ (\varepsilon_h + \varepsilon_v) \pm \sqrt{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_h + \varepsilon_v)^2 + (\varepsilon_h - \varepsilon_v)^2} \right\}$$

Las direcciones de ε_1 y ε_2 son θ_1 y θ_2 medidas en sentido contrario a las agujas del reloj respecto a la dirección de ε_h y vienen dadas por:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\theta_1 &= \frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_h)}{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_h + \varepsilon_v)} \\ \operatorname{tg}\theta_2 &= \frac{2(\varepsilon_2 - \varepsilon_h)}{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_h + \varepsilon_v)} \end{aligned}$$

Los esfuerzos principales en la roca en el extremo del taladro son:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2) \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1) \end{aligned}$$



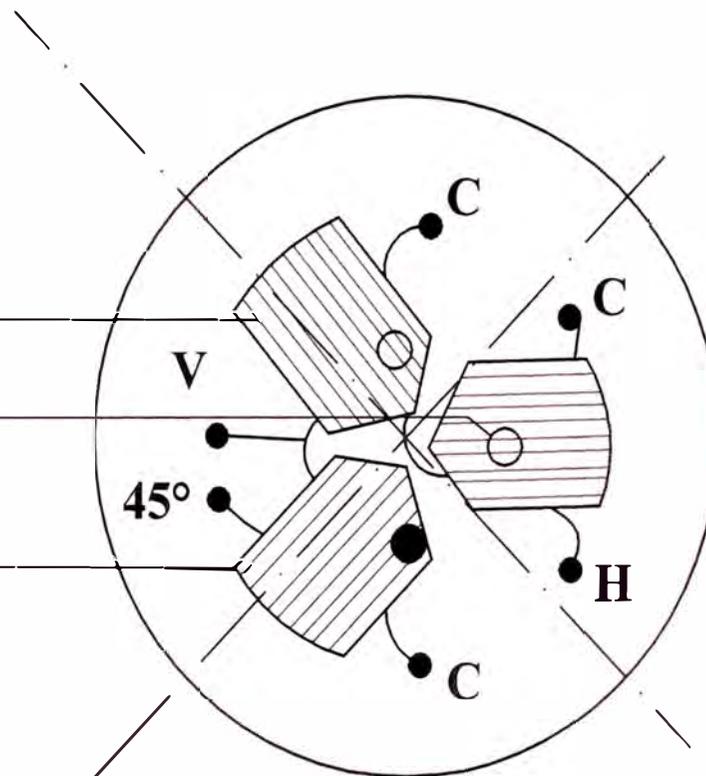
DOORSTOPPER DE LEEMAN

| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 14 REPRESENTACIÓN ESQUEMATICA DEL DOORSTOPPER DE LEEMAN |
| TESISISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

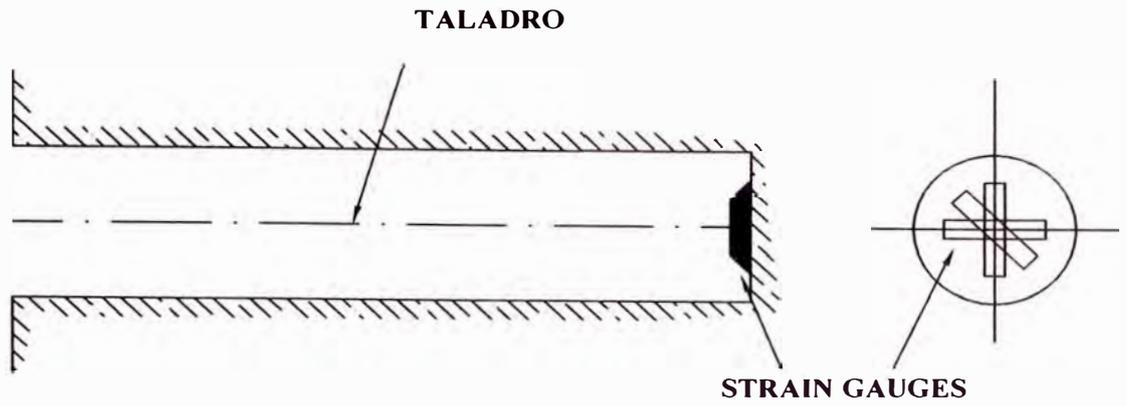
MEDIDOR VERTICAL

MEDIDOR HORIZONTAL

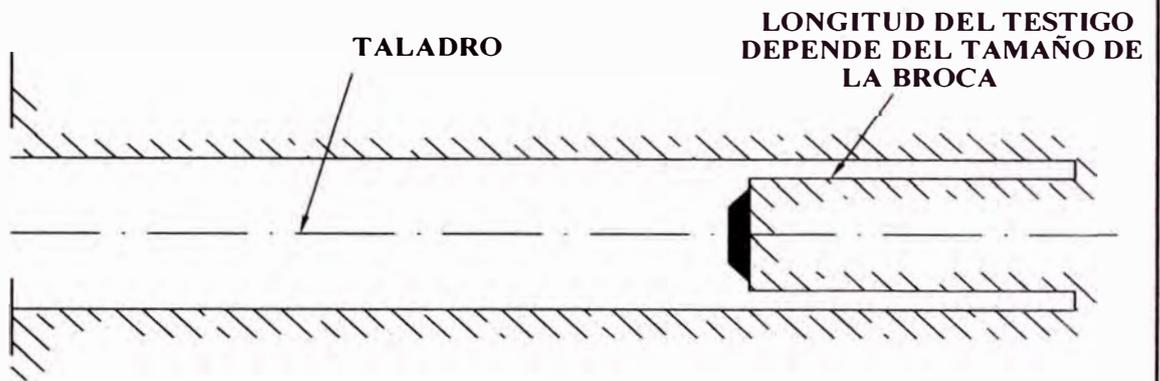
MEDIDOR A 45°



| | |
|---|---|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 15 REPRESENTACIÓN ESQUEMATICA MOSTRANDO LA DISTRIBUCIÓN DE LOS MEDIDORES |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |



(a) ANTES DE LA LIBERACIÓN DE ESFUERZOS



(b) DESPUES DE LA LIBERACIÓN DE ESFUERZOS

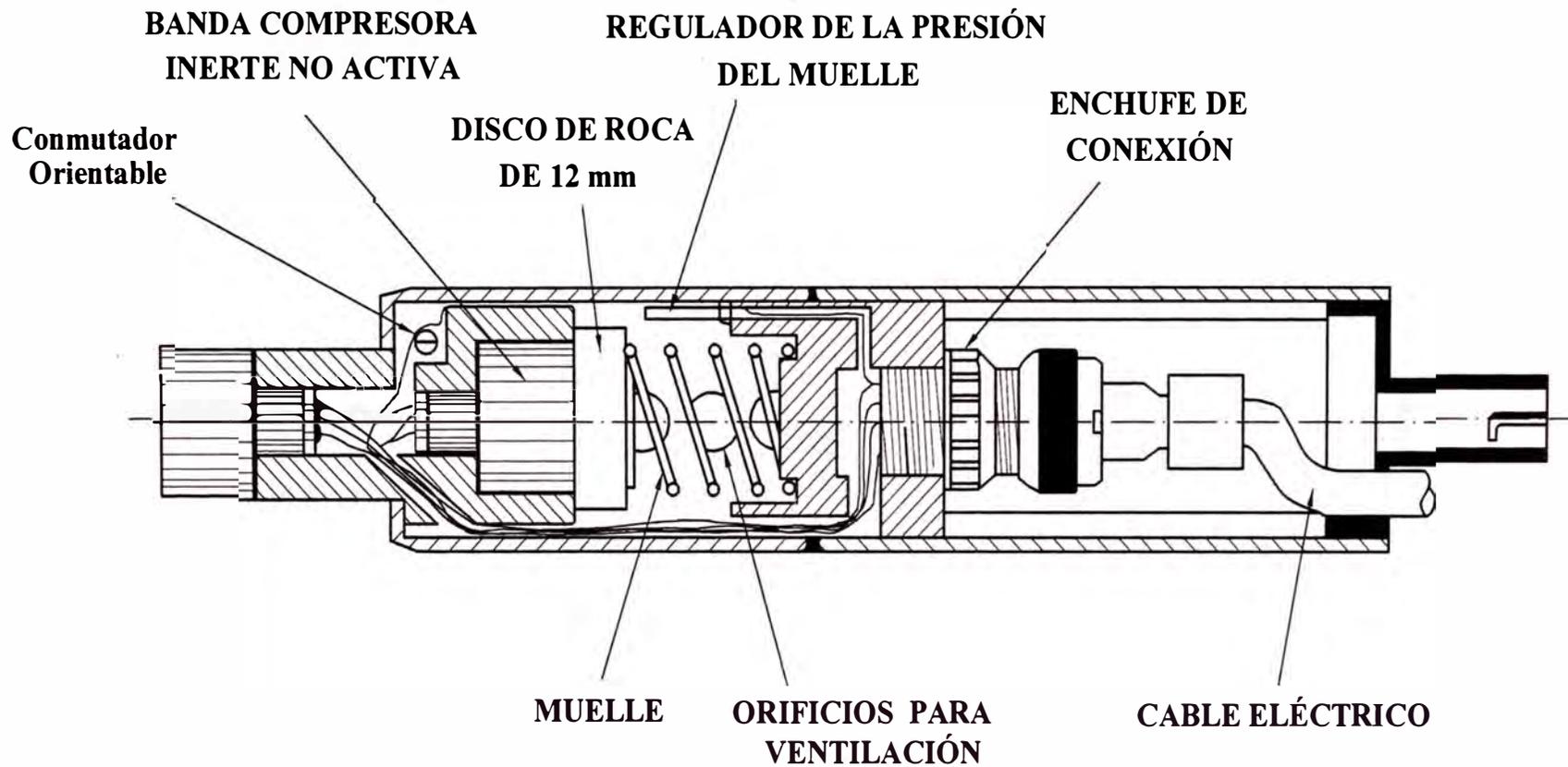
| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA Nº 16 REPRESENTACIÓN ESQUEMATICA DE LA SOBREPUNCIÓN - UTILIZANDO DOORSTOPPER |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

5.2.4.6. CELDA BIAXIAL FOTOELÁSTICA

Los investigadores Kawkes y Moxon han descrito el empleo de una celda fotoelástica biaxial para determinación de esfuerzos absolutos por la técnica de liberación de esfuerzos (Ver Figura N°17). La celda está formada por un cilindro de resina epóxica de 44 mm de diámetro y 3 mm de espesor, con un agujero central. La base de la celda está constituida por una película reflectante que deja un reborde bien diferenciado en el cilindro. Este se adhiere a la roca por el reborde mediante un cemento de fraguado rápido (La secuencia de operaciones se muestra en la Figura N°18). La celda se observa con un polariscopio de reflexión (Ver Figura N°19), cuyas señales ópticas son semejantes a las descritas para el tensómetro de vidrio. Sin embargo, la celda biaxial se calibra en términos de deformación utilizando unas bandas extensométricas colocadas en cruz (Ver Figura N°20).

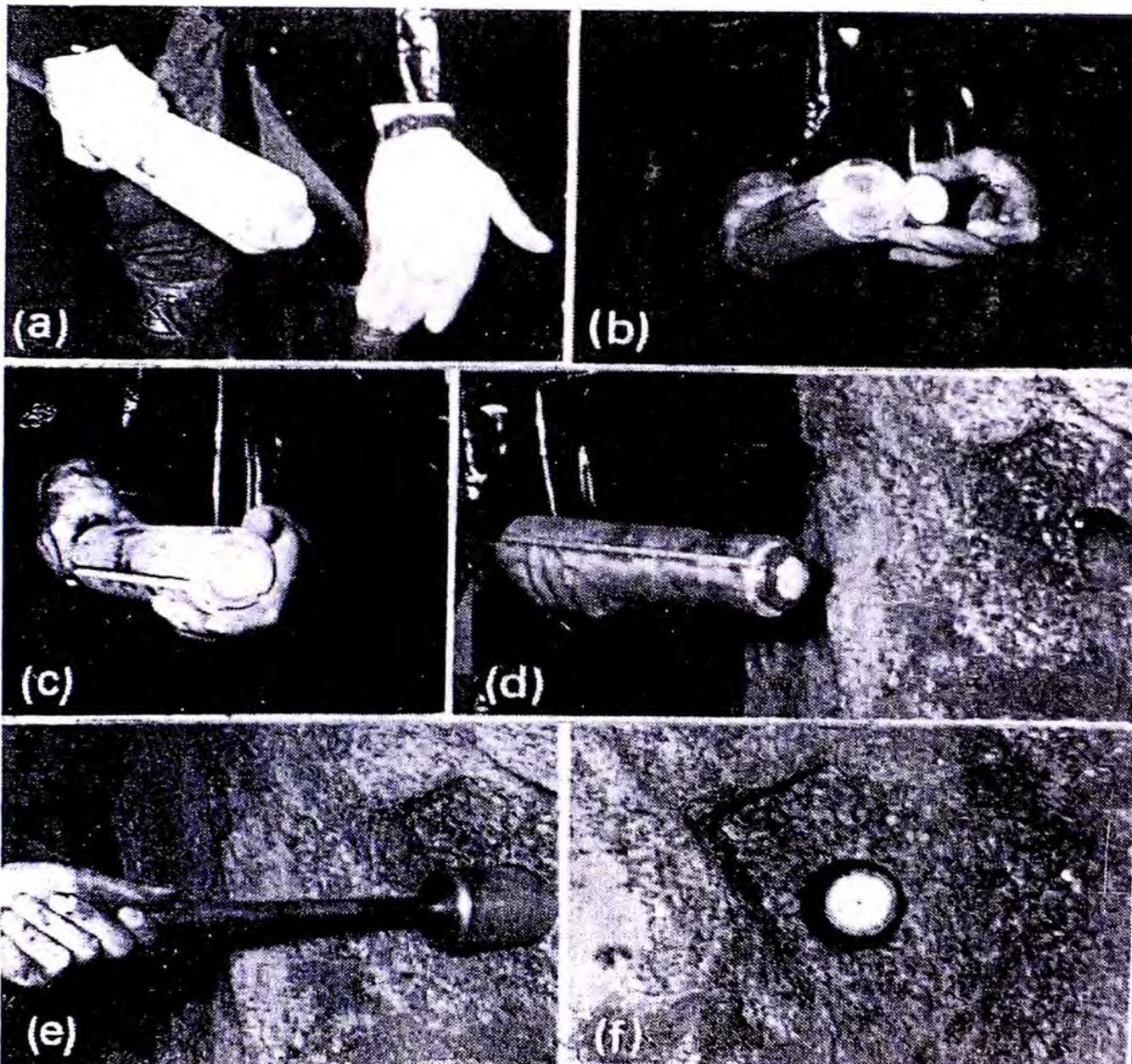
Como en el tensómetro fotoelástico, la dirección de la deformación principal viene dada automáticamente por los ejes de simetría del sistema de franjas observadas y la relación $\varepsilon_1 / \varepsilon_2$ por la medida de la distancia entre puntos isótropos del eje ε_1 . La celda se calibra, de forma que el número de orden de las franjas proporcione directamente ε_1 . La sensibilidad teórica del tipo de celda empleado es de 440×10^{-6} deformaciones por franja. La sensibilidad determinada experimentalmente en estados de esfuerzos biaxiales es de 440 micro deformaciones por franja (Ver Figura N°21). El límite de medida utilizando el analizador manual es del 2 al 3 % de una franja. La medida con números de orden de franja bajas (menores de media franja) requiere cierta habilidad y por tanto la celda fotoelástica es preferible en rocas bajo cargas elevadas que desarrollan una recuperación elástica considerable en el proceso de liberación de esfuerzos.

Realizando una comparación entre la celda fotoelástica biaxial y «Doorstopper» de Leeman tienden a realizar funciones esencialmente análogas, siendo fundamental el asegurar una buena adherencia entre la celda y la roca. Esto puede presentar dificultades en rocas húmedas por lo que Leeman emplea un inyector de aire caliente, para secar el taladro antes de encajar la celda. En la celda fotoelástica se emplea un inyector de acetona para desplazar el agua del fondo del taladro durante el corto periodo de tiempo necesario para el endurecimiento del cemento (15 min.).

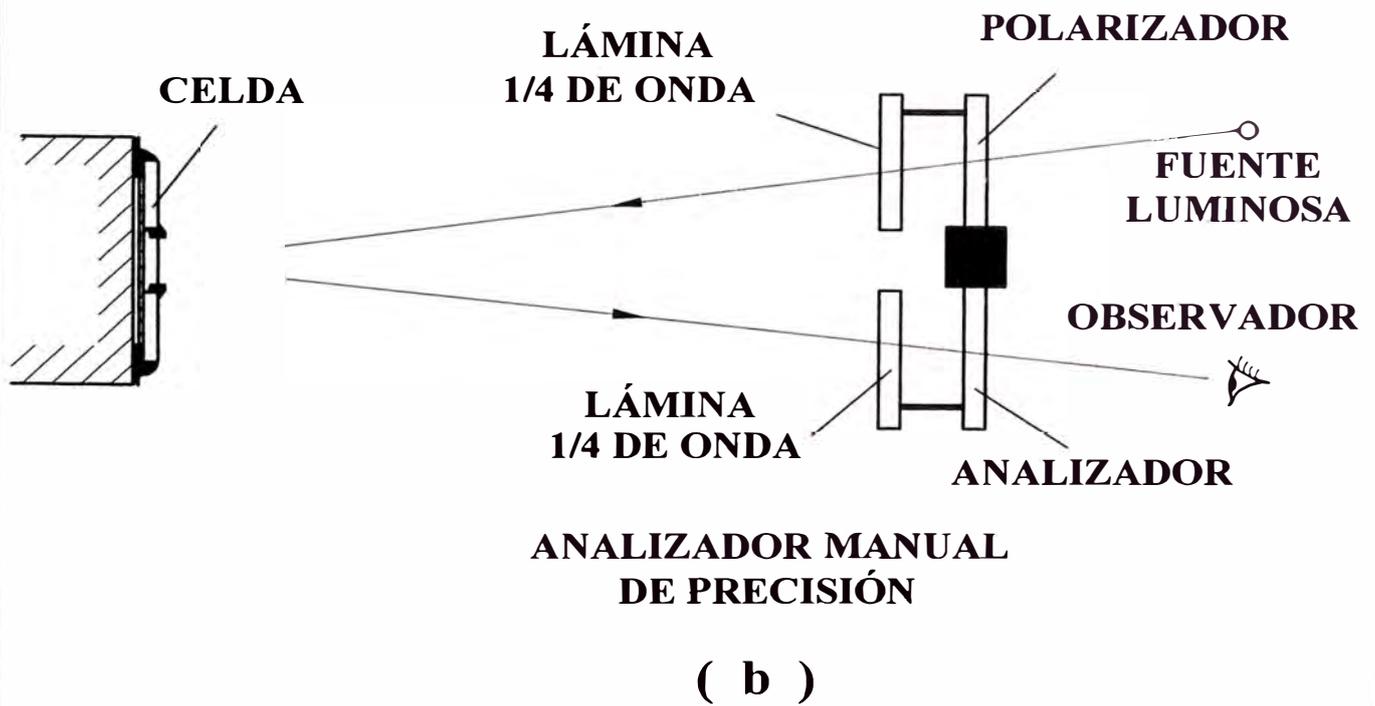
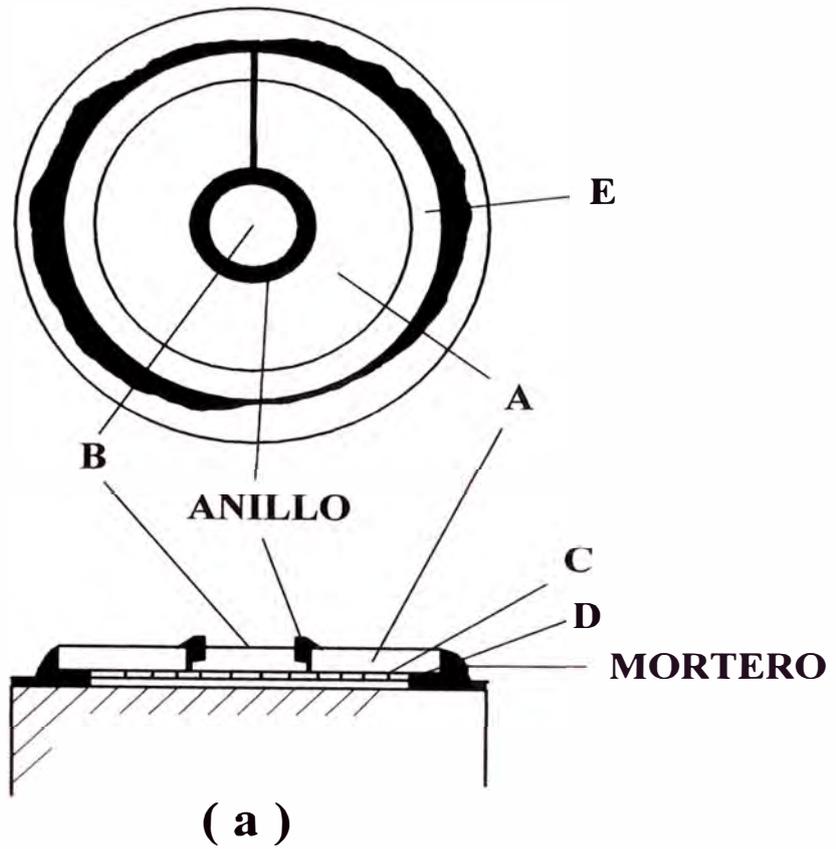


**ELEMENTO DE INSERCIÓN DE LA CELDA LEEMAN
 CELDA EXTENSOMÉTRICA**

| | |
|---|---|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 17 ELEMENTO DE INSERCIÓN DE LA CELDA DE LEEMAN |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

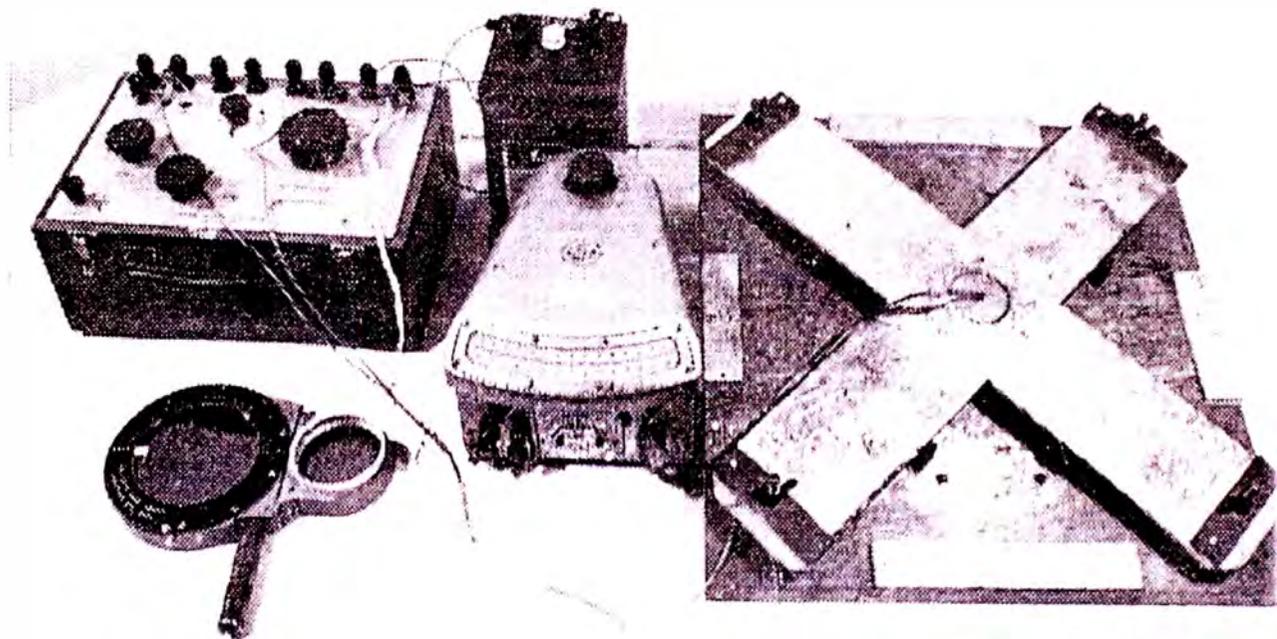


| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 18 FORMA CORRECTA DE COLOCAR UNA CELDA FOTOELÁSTICA BIAxIAL |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

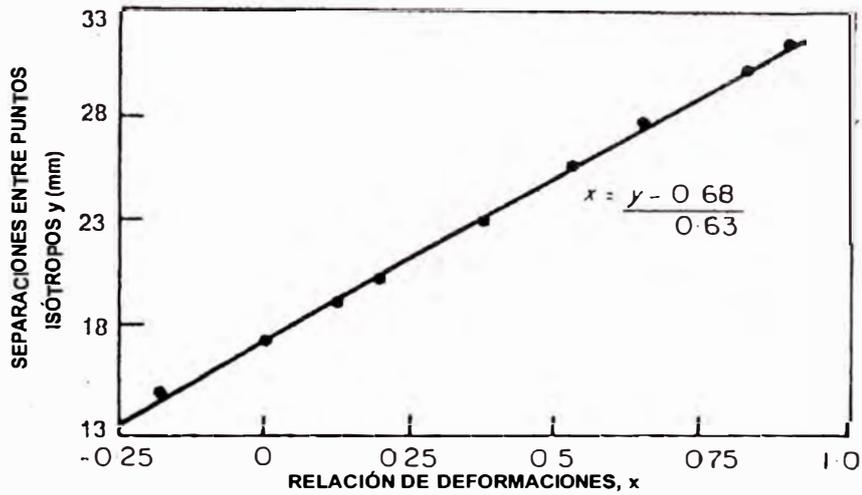
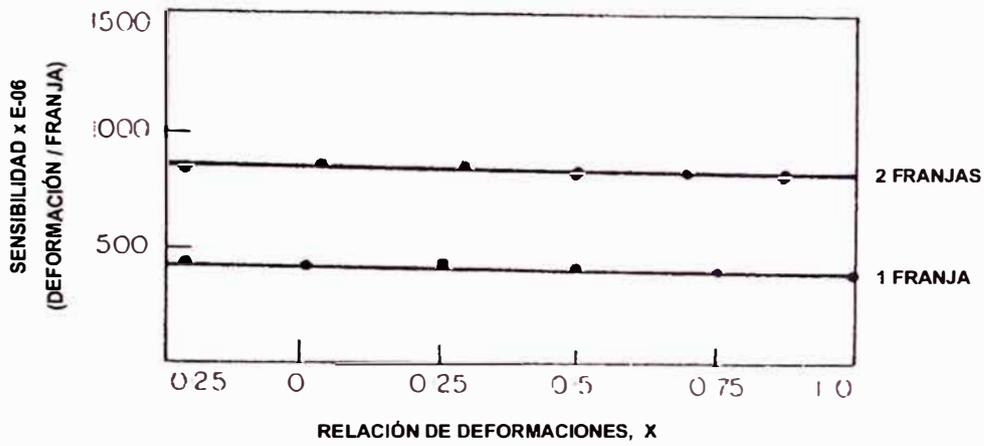
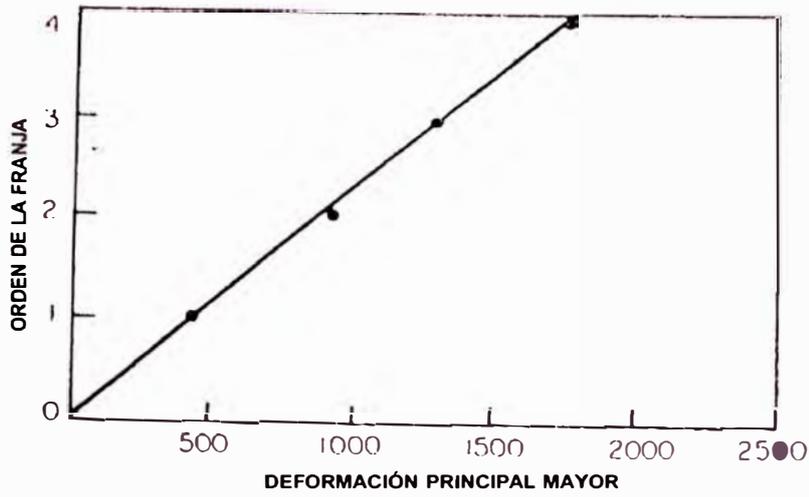


(a) CELDA FOTOELÁSTICA BIAIXAL (b) SISTEMA DE OBSERVACIÓN

| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 19 ANALIZADOR MANUAL DE PRECISIÓN CELDA FOTOELÁSTICA |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |



| | |
|---|---|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 20 EQUIPO DE CALIBRADO DE CELDA CELDA FOTOELÁSTICA BIAJIAL |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |



| | |
|--|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 21 CARACTERISTICAS DE CALIBRADO DE LA CELDA FOTOELÁSTICA BIAIXIAL |
| TESISISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

Con ambos métodos debe prestarse un cuidado en la protección del equipo, frente a los efectos de temperatura. La sensibilidad de la celda fotoelástica no resulta afectada de manera apreciable por temperaturas comprendidas entre 0 y 150 °C, pero las diferencias en el coeficiente de dilatación entre la celda o el sistema celda - cemento y la roca puede dar lugar a errores, si no se adoptan las debidas precauciones. Las lecturas deben tomarse cuando las celdas solidarias de la roca sobreperforada se encuentren a ± 5 °C de la temperatura original en el fondo del taladro. Durante el proceso de perforación es importante emplear agua que no esté a una temperatura muy diferente de la roca. La perforación debe realizarse lentamente, utilizando brocas en buen estado.

5.3. CONTROL DE LAS EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS DURANTE LA OPERACIÓN

Las mediciones que se efectúan durante la construcción deberán proporcionar la información necesaria para verificar la validez del diseño o permitir la terminación del trabajo en curso. Además, esas mediciones deberán proporcionar anticipos sobre los problemas potenciales para que se puedan tomar medidas correctivas antes de que estas se hayan manifestado a tal punto que las medidas correctivas resulten muy caras o imposibles de ejecutar.

Topografía óptica, cuando se dispone de un adecuado acceso y cuando las mediciones pueden referirse a una base estable y alejada, se pueden utilizar técnicas normales de topografía de alta precisión, como son la nivelación y la triangulación, para determinar los desplazamientos absolutos de estaciones topográficas colocados sobre la superficie de las excavaciones subterráneas. La ventaja de esta solución es que el equipo topográfico de precisión indicada se encuentra generalmente en la obra. Las desventajas son las mediciones y cálculos que requieren bastante tiempo. Además, en túneles largos, los resultados pueden no tener una precisión suficiente para los movimientos de una roca dura competente. La llegada de equipos electro - ópticos para medir las distancias han facilitado un poco el trabajo de los topógrafos, ya que para las cavidades subterráneas grandes en las que el acceso es difícil, la medición efectuada a partir de un

instrumento fijo sobre una serie de espejos testigos (puntos de observación) sobre el techo y las paredes, pueden proporcionar información útil.

Mediciones de convergencia, normalmente se llevan a cabo con una cinta o con un extensómetro de varillas entre puntos fijados en las paredes y el techo de una excavación, pudiendo ser una labor minera (galerías, cruceros, tajos) o elementos de sostenimientos (Cerchas o Cimbras, cuadros, etc.).

El Extensómetro, se utiliza para medir el desplazamiento del macizo rocoso que rodea a una excavación subterránea. Estos extensómetros consisten en unas varillas corredizas o alambres tensados, anclados en determinados puntos del taladro.

5.3.1. MEDICIÓN DE LA CONVERGENCIA

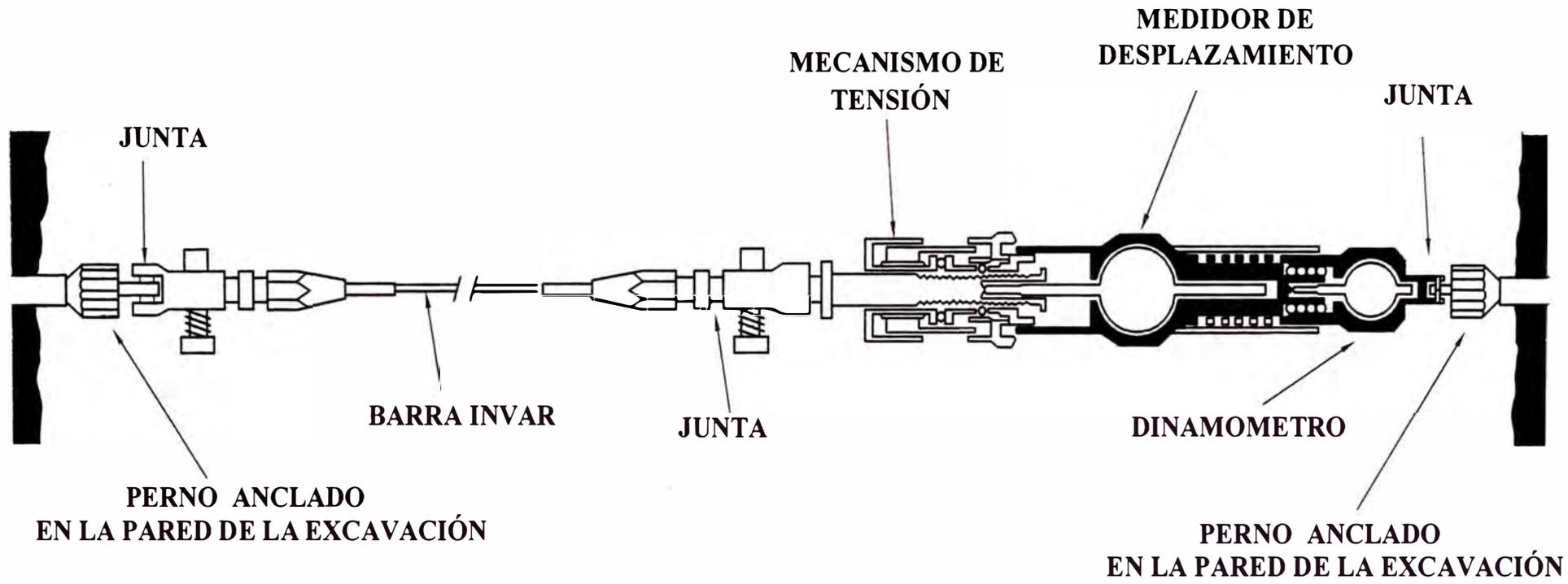
Convergencia o desplazamiento relativo de dos puntos en una excavación, es probablemente la más frecuente medición en la minería subterránea.

La medición es realizada de varias maneras con una barra telescópica, barra invar o una cinta bajo una tensión constante, colocada entre dos puntos firmemente adheridos a la superficie rocosa. Las mediciones están usualmente restringidas a distancias menores a 50m cuando es realizado con cintas y a 10m cuando es realizado mediante una barra.

Para realizar esta medición es necesario contar con un calibrador, un micrómetro o un instrumento eléctrico tal como el LVDT, los cuales son usados para obtener los desplazamientos relativos. Por ejemplo en el esquema de la Figura N°22 se muestra el instrumento, el cual es usado para proveer una tensión constante de 78.5kN a un alambre de invar de 1.0 de diámetro entre un punto de anclaje y el instrumento, que esta conectado a un segundo punto de anclaje en la superficie de la roca.

5.3.1.1. TUBO EXTENSOMÉTRICO (TUBE EXTENSOMETER)

Este equipo consiste en un tubo telescópico, un indicador de posición, y las superficies de contacto en cada extremo, para medir los cambios de distancia entre el techo y piso.



| | |
|---|---|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA | |
| FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 22 MECANISMO PARA MEDIR CONVERGENCIA EN UN LABOR MINERA |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

Una lectura inicial cero es tomada, y así las lecturas son tomadas diariamente, semanalmente o mensualmente (Ver Figura N°23). La diferencia entre estas lecturas y la inicial es la convergencia en un intervalo de tiempo.

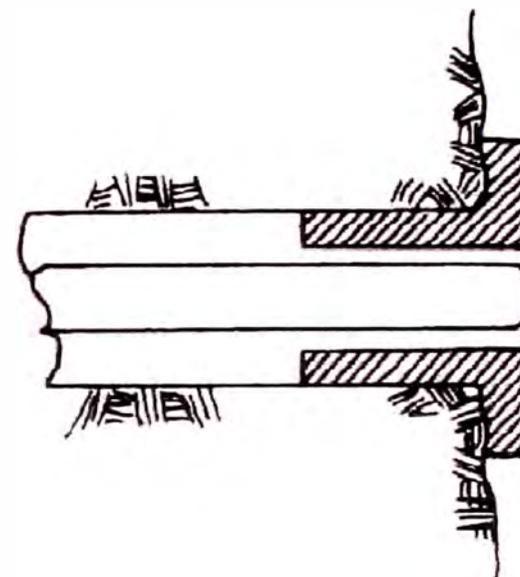
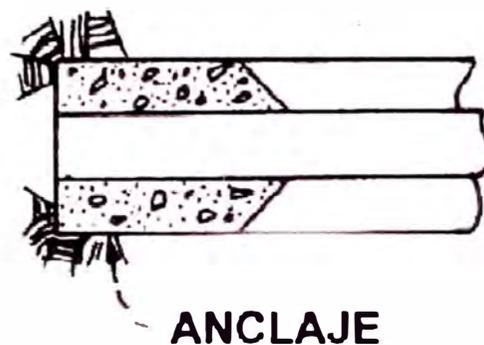
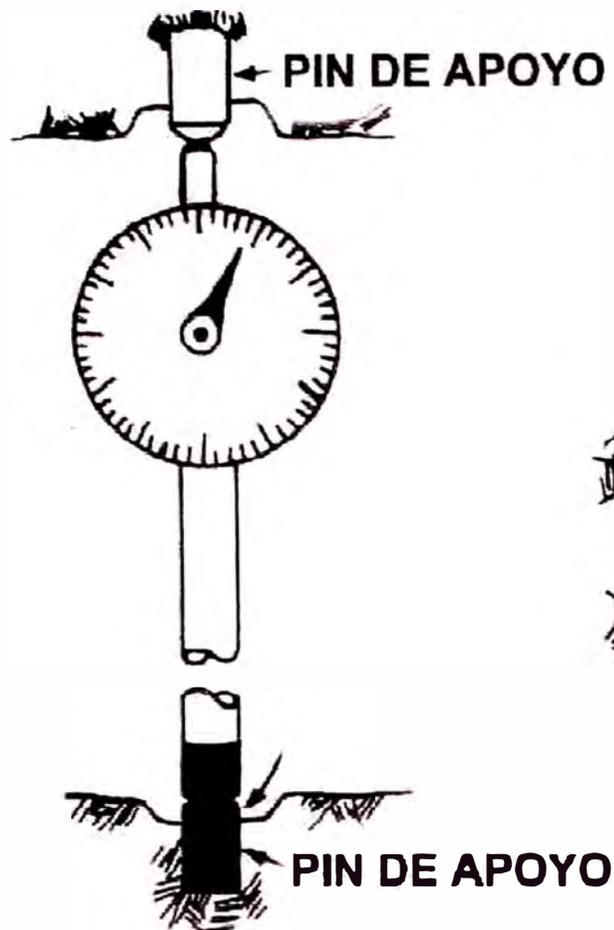
La certeza del indicador es aproximadamente de 0.025 mm (0.001 pulgadas). La longitud del tubo telescópico es ajustada en 0.3 m (1 pie). Los instrumentos tienen una longitud promedio de 0.9 a 1.8 m (3 a 6 ft), 1.8 a 3.4 m (6 a 11 ft), 3.4 a 5.2 m (11 a 17 ft), y de 5.2 a 7.6 m (17 a 25 ft).

Para determinar las zonas de contacto en el techo, se pueden considerar los pernos de roca, siendo estos unas estaciones de control no muy costosas. Las estaciones del techo deben ser protegidas por tuberías para prevenir la roca suelta o colgada en su contacto con los pernos. Los puntos de anclaje del piso deben estar en roca sólida o en algún lugar donde las lecturas no sean afectadas por algún movimiento de este, debido a las vibraciones causadas por voladura y por tránsito de equipo minero cerca del área.

Un accesorio necesario para el tubo extensométrico es una barra maestra. La barra maestra está hecha del mismo material que la del tubo extensométrico y es utilizada como una referencia estándar como contra parte a un extensómetro, siendo controlada periódicamente. Las magnitudes de los errores generados por los lugares de contacto y debido a la calibración del cero en el indicador son fácilmente medidos por la barra maestra. Los errores debido a la temperatura no pueden ser determinadas por la barra maestra, sin embargo. Un termómetro es colocado a un lado del extensómetro, cada vez que se realiza una lectura en mina, se debe señalar que es necesaria una corrección por temperatura.

Las dos principales aplicaciones del tubo extensométrico en minería subterránea son:

1. Para medir la convergencia entre el techo y el piso en función del tiempo (la convergencia nos da una indicación del grado de estabilidad e inestabilidad del techo), y
2. Para medir la separación entre las capas del techo donde han sido anclados los puntos de control



| | |
|---|-------------------------------------|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 23 TUBO EXTENSÓMETRICO |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

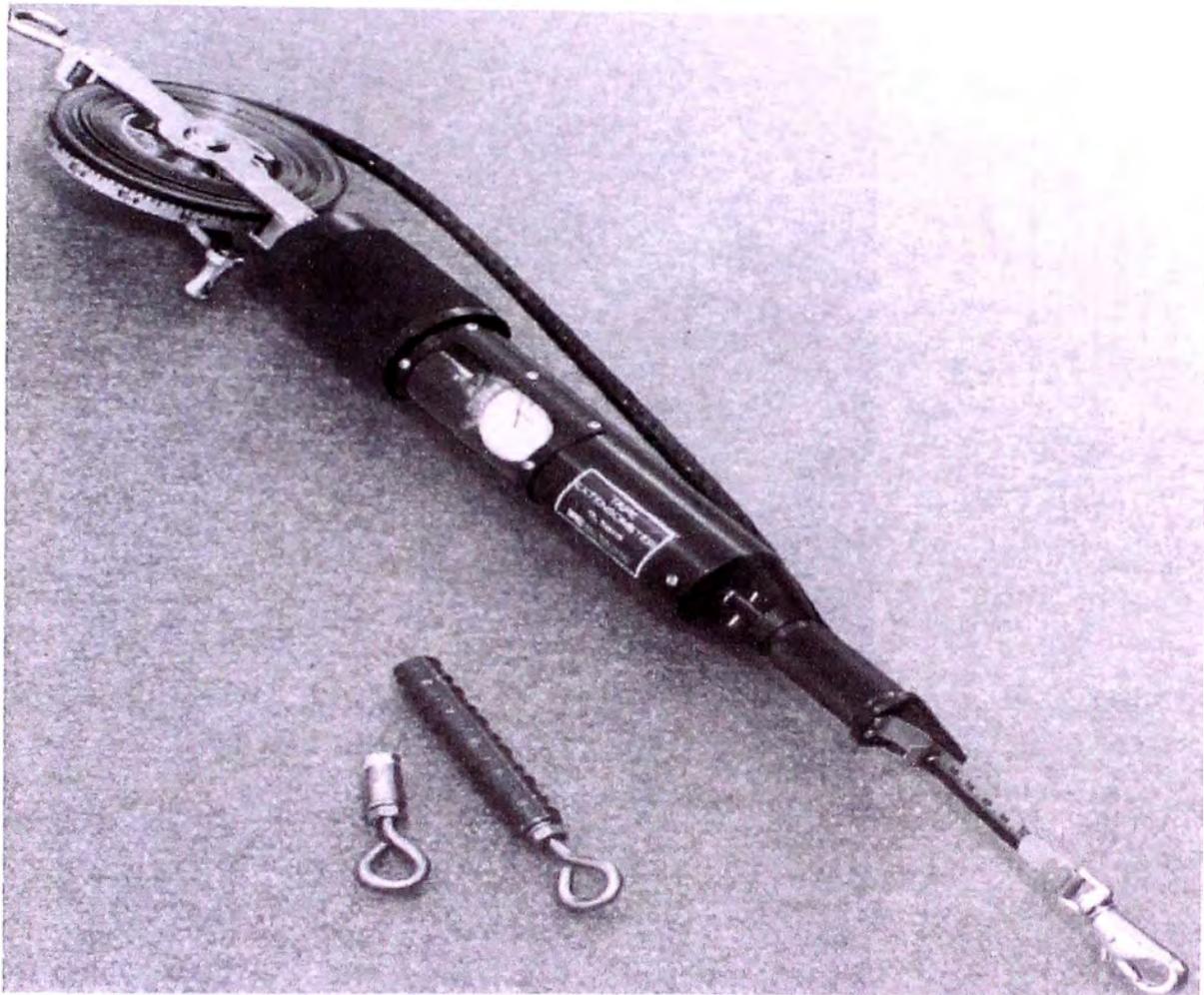
5.3.1.2. CINTA EXTENSOMÉTRICA

Es un instrumento portátil (Ver Figura N°24), con la cual se puede realizar mediciones. Este instrumento utiliza una cinta de acero con un punzón hueco para medir cambios en la distancia entre dos puntos con precisión y rapidez, las mediciones son hechas en cualquier dirección sea horizontal a vertical, es decir donde se localicen los puntos de referencia. El cambio de la distancia entre estos dos puntos en un cierto periodo de tiempo, siendo esta controlada con certeza, exactitud y varias veces. Estos elementos son importantes en un programa de instrumentación para medir una convergencia relativa en túneles, deformación en las excavaciones y estructuras.

La tensión de la cinta es controlada por medio de un resorte de compresión. Para ajustar la tensión en la cinta, un anillo estriador es girado hasta que las líneas trazadas estén precisamente alineadas. Esta alineación causa una fuerza conocida que es ejercida en la cinta. El reloj indicador es usado como una unidad de registro, con una resolución de 0.025 mm (0.001 pulgadas). La alineación o posicionamiento de los puntos de anclaje para la cinta extensométrica no son difíciles de determinar. El instrumento posee un gancho lo cual permite que las lecturas no sean afectadas por el posicionamiento del anclaje o ángulo en la cuál se encuentre los puntos que deben ser controladas.

5.3.2. EXTENSÓMETROS EN MÚLTIPLES PUNTOS DE LA EXCAVACIÓN

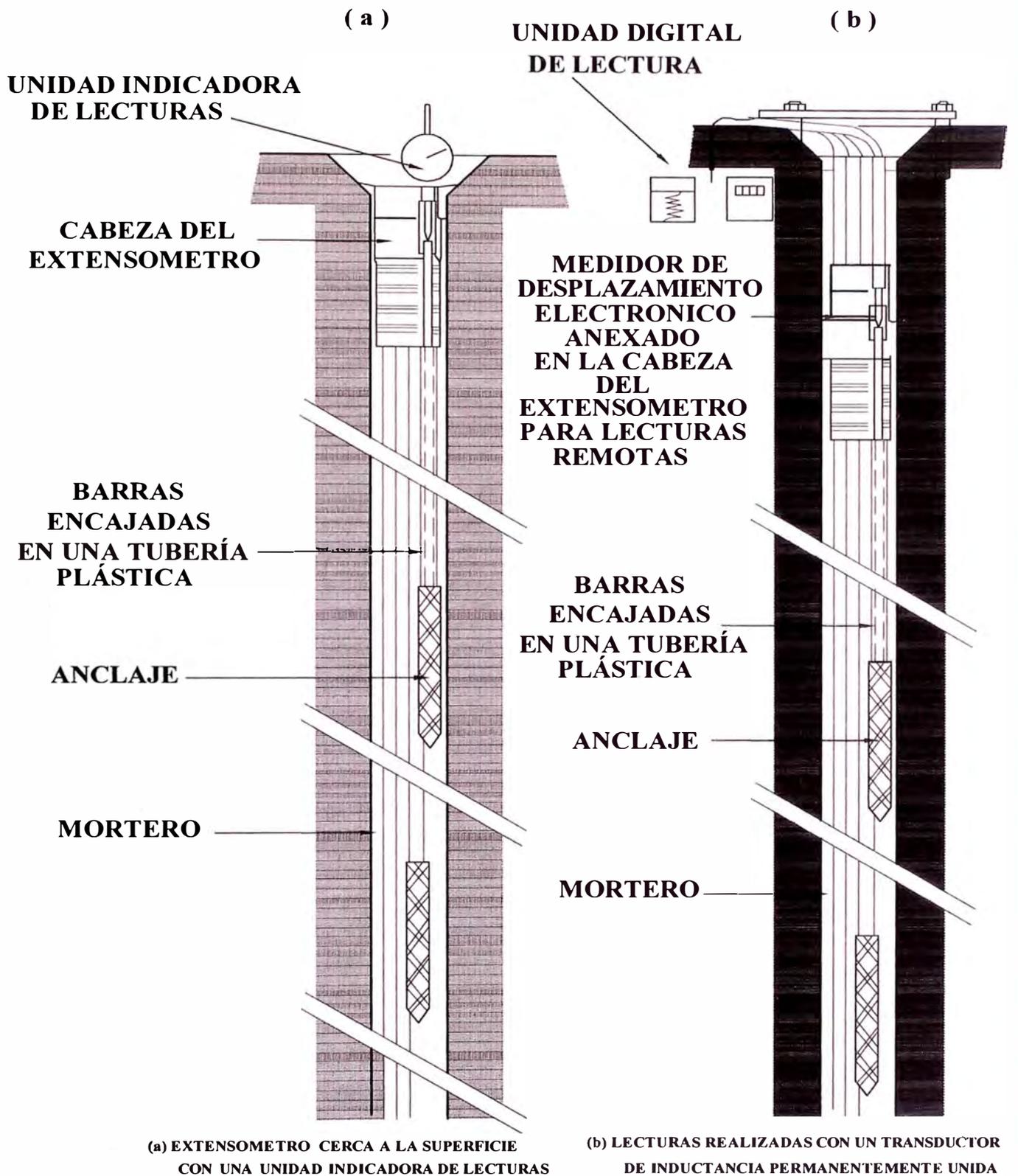
Entre los más útiles métodos para la medición en el macizo rocoso, es el planteando utilizando extensómetros colocados en varios puntos de la excavación (Ver Figura N°25, Figura N°26). Un solo punto de la excavación con extensómetro nos da un desplazamiento relativo entre el punto de anclaje del macizo rocoso y el punto de medición, generalmente localizado en el contorno de la excavación(Ver Figura N°27). En el caso de varios puntos con extensómetros también nos pueden dar desplazamientos relativos en varios puntos a diferentes profundidades de la excavación.



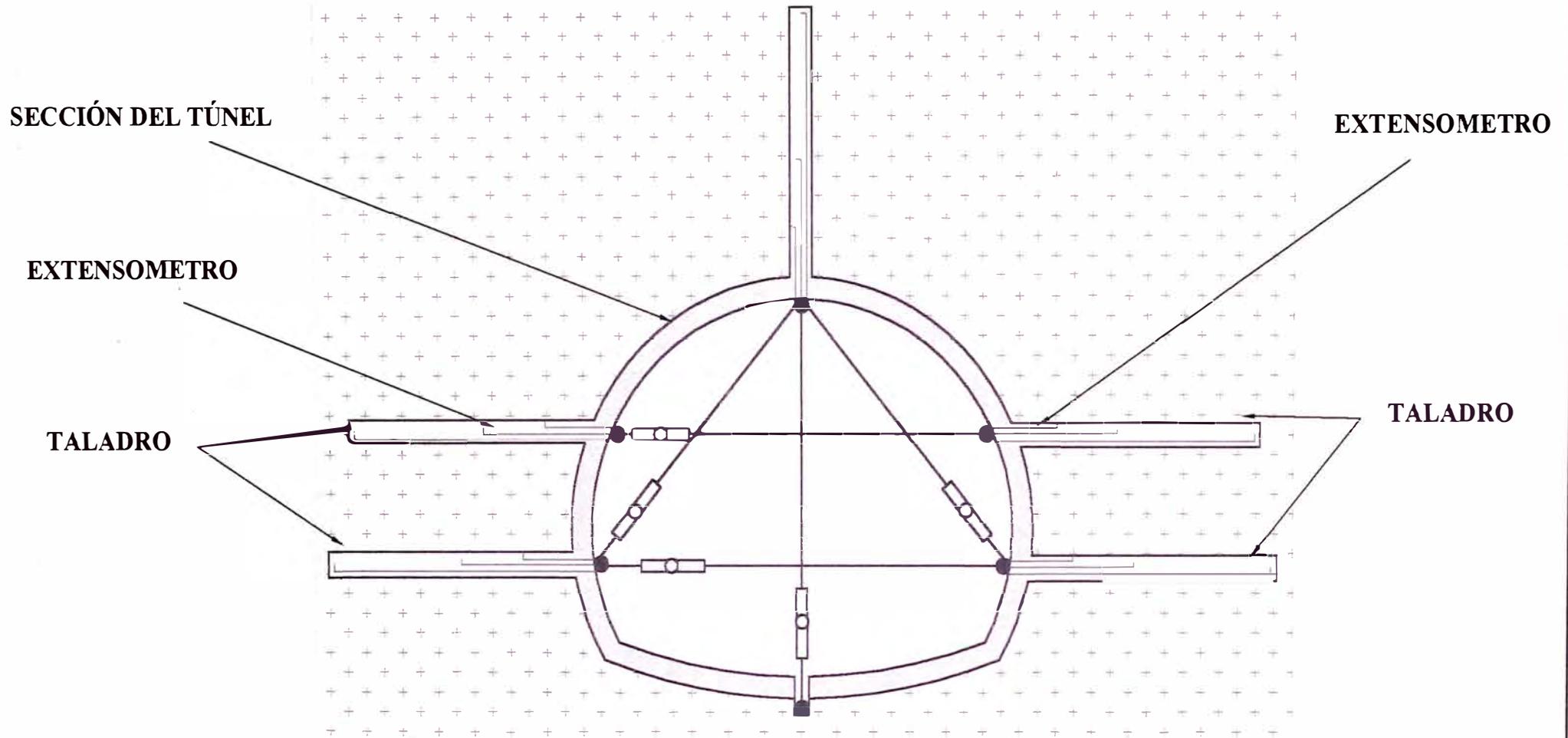
| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 24 CINTA EXTENSÓMETRICA |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |



| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 25 MODELOS DE EXTENSÓMETROS |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |



| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 26 EXTENSOMETRO PARA TALADROS BOREHOLE EXTENSOMETER |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |



| | |
|--|---|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACION PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 27 DISTRIBUCIÓN DE LOS EXTENSOMETROS EN UN TÚNEL |
| TESISISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

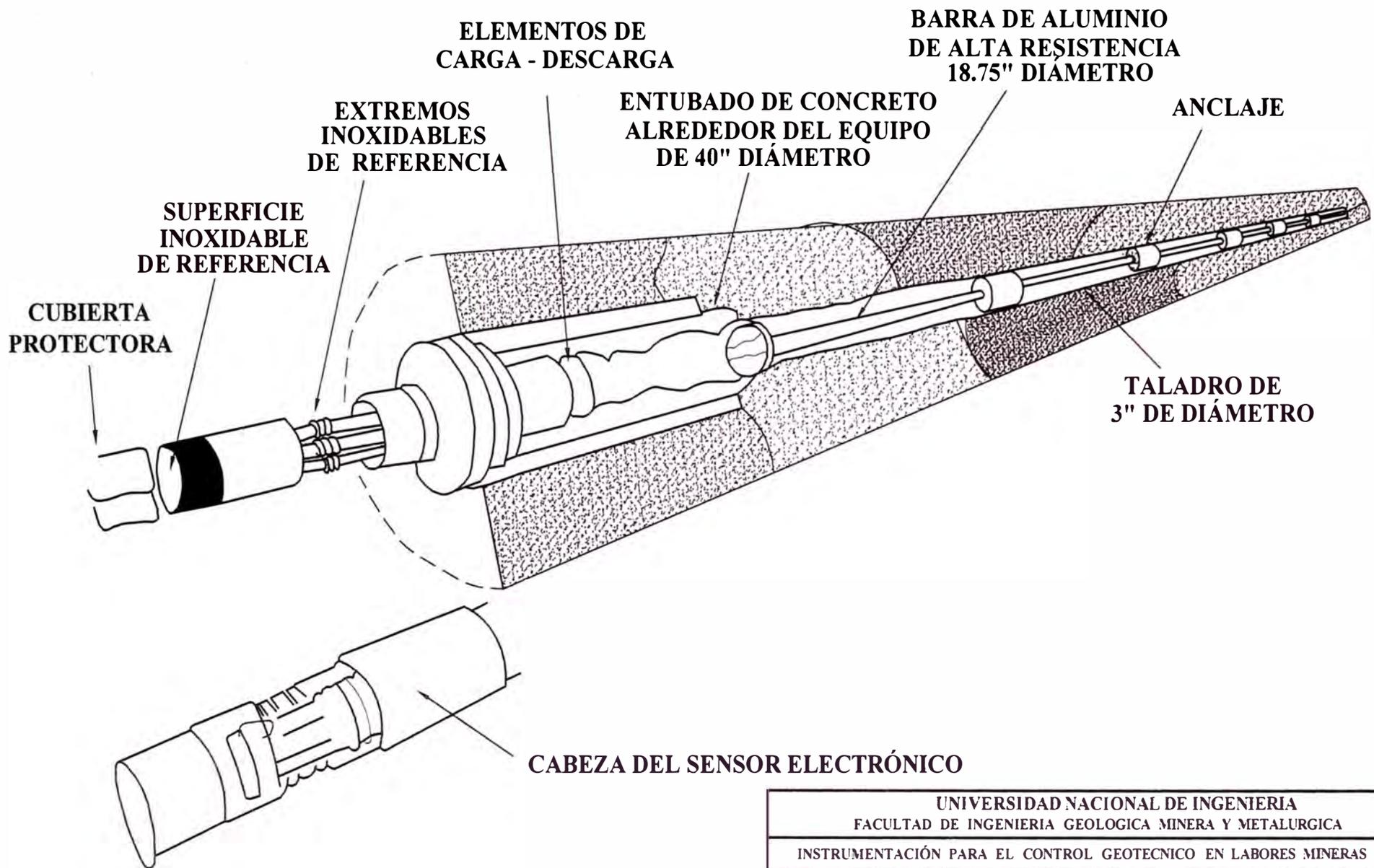
En este sentido la distribución de los desplazamientos que afectan a una gran masa de roca pueden ser guardadas. Estos datos son generalmente mas útiles que los realizados por la convergencia, el cual solamente da desplazamientos relativos en la superficie y pueden ser influenciados por las condiciones de la superficie, en algunos casos las mediciones de convergencia son realizados en la parte superior de los extensómetros (cabeza) instalados. Los métodos indicados para el monitoreo de movimiento de roca usando extensómetros en los taladros son dados por la Sociedad Internacional en su Comisión de Mecánica de Rocas.

Los instrumentos utilizados presentan sensores eléctricos y mecánicos los cuales son descritos y normados para determinadas precisiones, sensibilidades y rangos de medición dadas para cada aplicación. Esto nos indica que en la mayor cantidad de labores subterráneas, el mínimo rango para la medición debe ser 50 mm, la precisión debe de ser del orden de 0.25 - 2.5 mm y la sensibilidad del instrumento ha de estar en el orden de 0.25 - 1.00 mm.

5.3.2.1. EXTENSÓMETRO MECÁNICO

Como hemos mencionado la medición de la deformación de la roca es esencial para la estabilidad y así poder controlar el comportamiento de las excavaciones subterráneas (Ver Figura N°28). La dificultad se presenta en obtener una adecuada distribución de muestras, densidad y orientación, la que puede ser sobre llevada, si utilizamos el sistema de un solo o varios extensómetros en la labor.

Como uno de los instrumentos más simple se presenta al extensómetro mecánico, el cual consiste de una cabeza que va anclada al collar del taladro, y un numero determinado de anclajes dentro del taladro, cada uno de los cuales están localizados en un lugar y a una distancia conocida con respecto al collar. Como la roca adyacente al taladro se deforma, la componente paralela a la dirección del taladro causa un cambio en la distancia entre los anclajes adyacentes tanto como cambia la distancia entre los anclajes individualmente y la cabeza del extensómetro. Estos cambios son medidos por medio de un elemento extensible mecánico (un alambre o barra) hacia la cabeza del



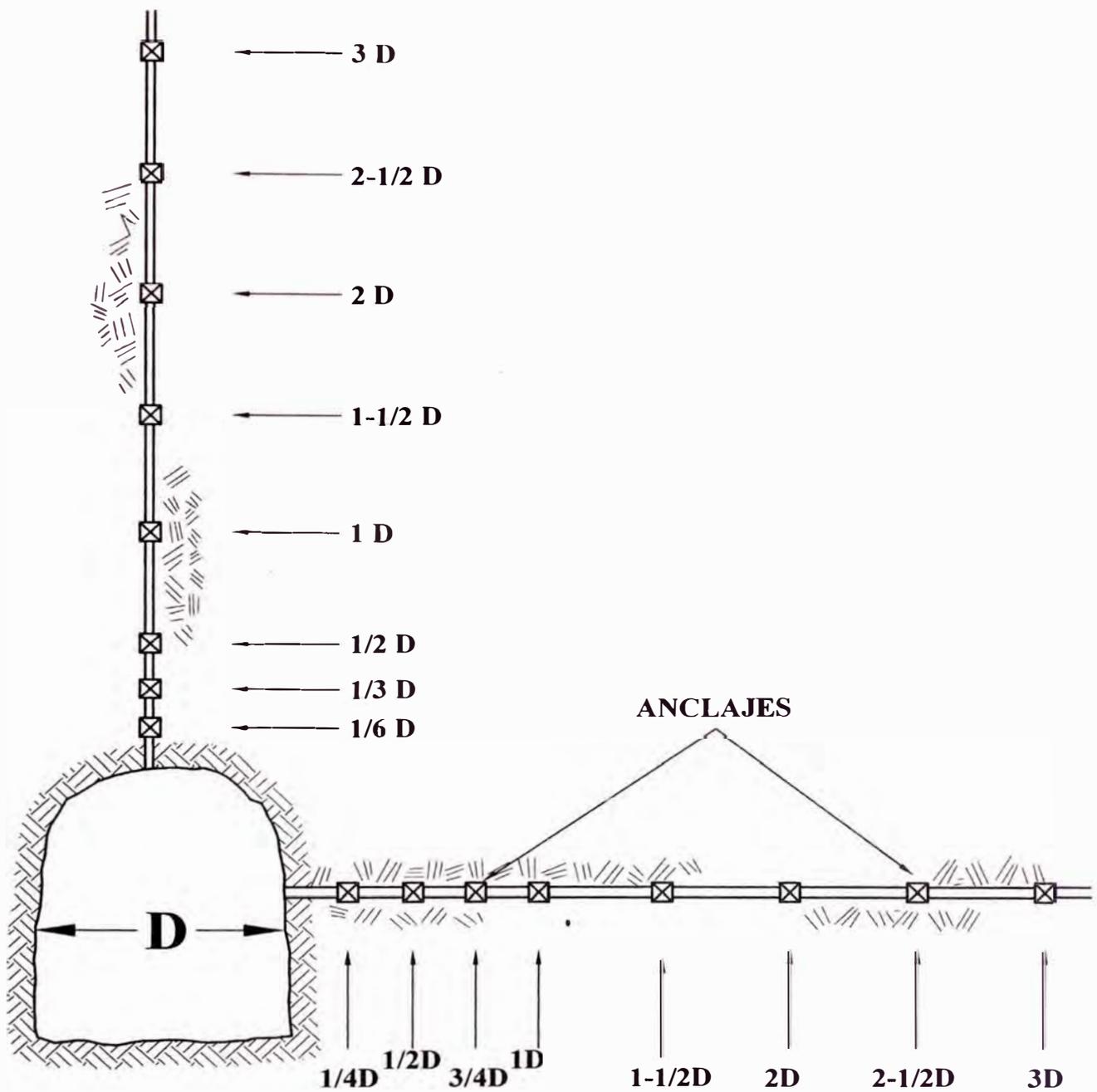
| | |
|---|---|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 28 COMPONENTES DE UN EXTENSÓMETRO PARA TALADROS MOSTRANDO LOS ANCLAJES |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

instrumento desde cualquier anclaje. Los datos resultantes pueden ser utilizados para analizar la distribución, magnitud, porcentaje y aceleración de la deformación en el material que intercepta la taladro.

Los extensómetros están compuestos esencialmente por cinco componentes: cabeza del instrumento, un mecanismo de anclaje en el collar, un sistema de descenso de anclajes en el taladro y barras o alambres, un cable para la señal si la cabeza esta equipada con equipos de registro electrónico, y un equipo de registro, dependiendo si es mecánico o electrónico.

Los extensómetros son diseñados para medir la componente axial de deformación en el taladro instrumentado. Como el taladro tiene deformación axial, la distancia entre los anclajes individualmente y la cabeza del instrumento cambia, como también la distancia entre los anclajes adyacentes. El cambio de distancia medido por extensómetros para taladros en diferentes posiciones, esta reducida a una función del tiempo, profundidad del taladro, posición del anclaje o otros parámetros de importantes para la investigación.

En el orden de establecer de determinar un plano optimo de referencia, los taladros deben ser lo suficientemente largos dentro de la zona rocosa en el cual el campo de esfuerzos sea considerado como un estado sin alteración (Ver Figura N°29). Asumiendo que uno o varios de los anclajes están localizados en zonas estables, la cabeza del instrumento es análogo a un yoyo moviéndose de arriba hacia abajo, y de adentro hacia fuera, hasta que el extremo final de la barra o alambre se quede fijo en un anclaje estable. Para propósitos de interpretación, el anclaje estable ocupa un punto que esta fijo o relativamente fijo, en el espacio y en relación con la cabeza del instrumento es desplazado. Por otro lado los anclajes poco profundos, están localizados en zonas que muestra con grado de inestabilidad, y que están afectadas por un continuo movimiento y en varias direcciones, relativamente con la cabeza del instrumento, el anclaje estable y un anclaje adyacente. Un análisis de los reducidos datos permiten la identificación de zonas que están bajo deformaciones en varios grados y en variedad de direcciones en la relación a la estructura, y el porcentaje de deformación axial medido y magnitudes.



| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 29 DISTRIBUCIÓN DE LOS ANCLAJES EN UN EXTENSÓMETROS PARA TALADROS |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

El procesamiento de datos debe consistir en reducir todos los datos obtenidos a aquellos que indican un desplazamiento en la cabeza del instrumento relativa a cualquiera de los anclajes, el desplazamiento de cada uno de estos anclajes con otro anclaje mas profundo, y la aceleración de deformación entre cualquier anclaje adyacente o entre el anclaje mas profundo y la cabeza del instrumento.

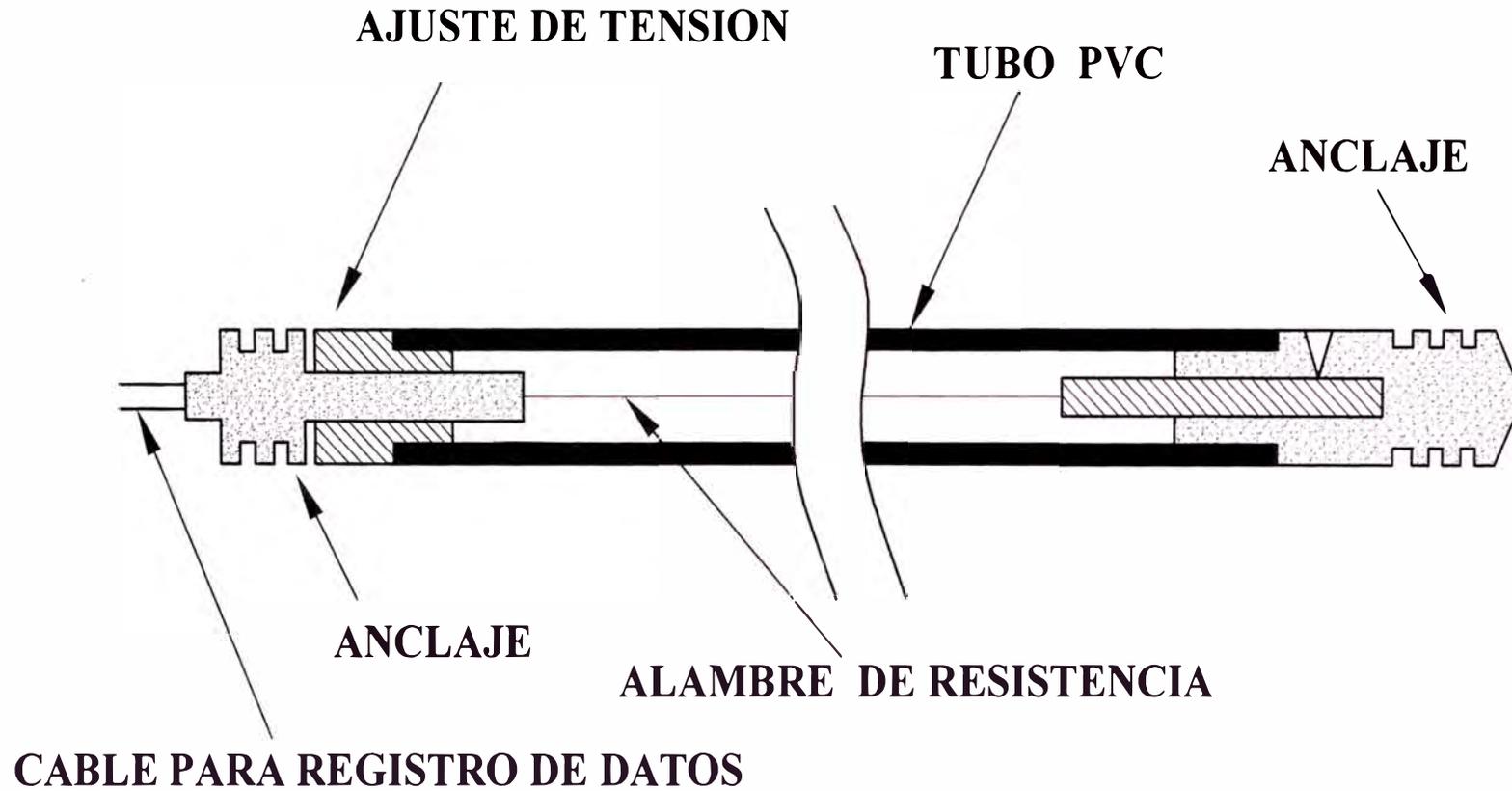
Los pasos intermedios del proceso de calculo involucran el desplazamiento anclaje – anclaje y deformación anclaje – anclaje. Otros parámetros, tales como deformación entre la cabeza del instrumento y anclaje, el porcentaje de deformación entre el anclaje y cabeza del instrumento, aceleración de deformación entre anclaje – cabeza del instrumento, y desplazamiento relativo entre cada anclaje con respecto a la cabeza del instrumento, lo cual debe ser calculado si es requerido.

5.3.2.2. EXTENSÓMETRO DE ALAMBRE RESISTENTE

Es un mecanismo que permite controlar el movimiento de la roca. El cual consiste de un alambre con una longitud de 1 a 2 m (3 a 6 pies), este alambre es el mismo que es usado como resistencia eléctrica y un tubo hueco de PVC. El alambre esta adherido, bajo una tensión moderada, a cada extremo de la tubería y esta configurado para tener una resistencia de 12 ohms. Debido a esta configuración, el extensómetro puede ser controlado con un medidor de resistencia, medidor convencional de deformaciones o una unidad de registro (Ver Figura N°30). No se requiere un transductor de desplazamiento, para convertir un movimiento en el extensómetro en una señal eléctrica. Este extensómetro es instalado con cemento en un taladro perforado.

El alambre resistente es pre tensionado con un tubo hueco que tiene la capacidad de compresión de 0.5% en la deformación que va ser medido. Sin embargo, con una tensión de 18 a 20%, la deformación puede ser medida, con una gran sensibilidad. Debido a su construcción de un tubo hueco, este mecanismo presenta una baja sensibilidad cuando los desplazamientos son moderados a lo largo del taladro.

EXTENSÓMETRO CON ALAMBRE DE RESISTENCIA



| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA | |
| FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 30 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN EXTENSÓMETRO CON ALAMBRE DE RESISTENCIA |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

5.3.2.3. EXTENSÓMETRO MAGNÉTICO

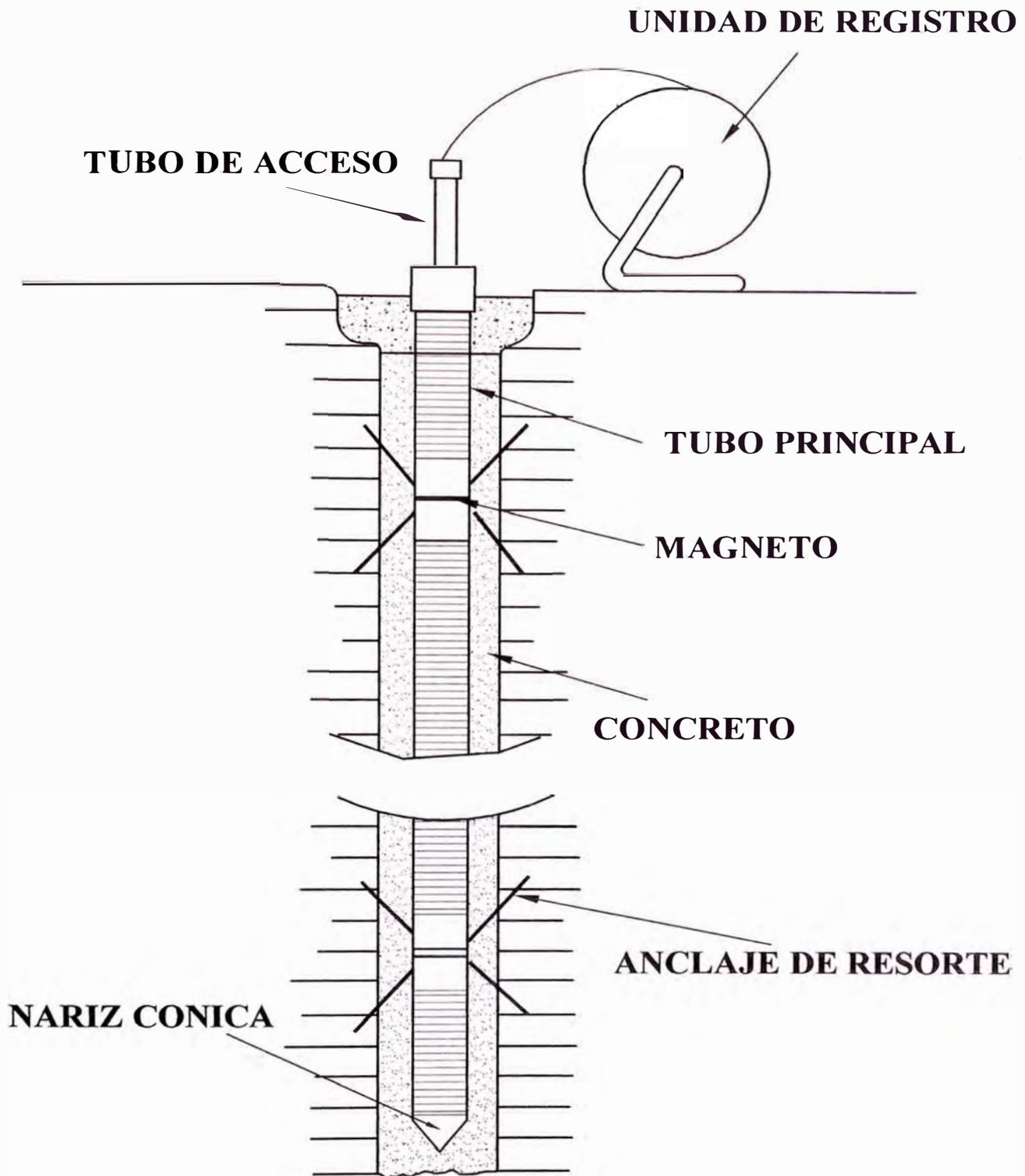
En el diseño de este mecanismo se considera, un anillo de magnetos o imanes que se deslizan a lo largo de la tubería central de acceso y un tubo desarmable externo que es fijado en superficie donde el movimiento va hacer controlado (Ver Figura N°31). Estos imanes o magnetos deben ser instalados en un taladro o colocados consecutivamente durante la operación de la mina. La ubicación de las tarjetas o puntos de control es acompañada por una sonda que pase por la tubería de acceso. Cuando la sonda entra en un campo magnético generado por la tarjeta, una señal audible es emitida en la superficie. Una vez realizada las mediciones con una cinta de acero se pueden localizar el punto donde se emitió la señal. Las tarjetas son diseñadas para moverse independientemente en la tubería de acceso y con una tubería desmontable como protección. La virtud de este sistema recae en:

1. Exactitud, certeza, simple para instalar y leer.
2. No limita un número de puntos que pueden ser localizados en un taladro, con pequeño costo extra.
3. Puede extenderse con facilidad.
4. Una sola sonda es necesaria para varias instalaciones.
5. Económica.

5.3.2.4. EXTENSÓMETRO DE SONDEO SÓNICO

La virtud de una sonda sónica recae en su habilidad para proporcionar un registro electrónico con facilidad a un mínimo costo (Ver Figura N°32). Existe una variedad para la medición de movimiento de roca en las zonas circundantes a la mina y en las excavaciones mineras.

Las sondas sónicas rígidas utilizan una sonda portátil en forma de “vara”. La sonda puede ser introducida en cada cabeza de extensómetro para medir la posición relativa a una serie de magnetos o imanes que están adheridos al final de la barra principal de medición a cada uno de los anclajes en el taladro. Una unidad de registro, cuando se



| | |
|---|---|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 31 REPRESENTACIÓN ESQUEMATICA DE UN EXTENSÓMETRO MAGNETICO |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |



| | |
|---|-------------------------------------|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 32 EXTENSÓMETRO SONICO |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

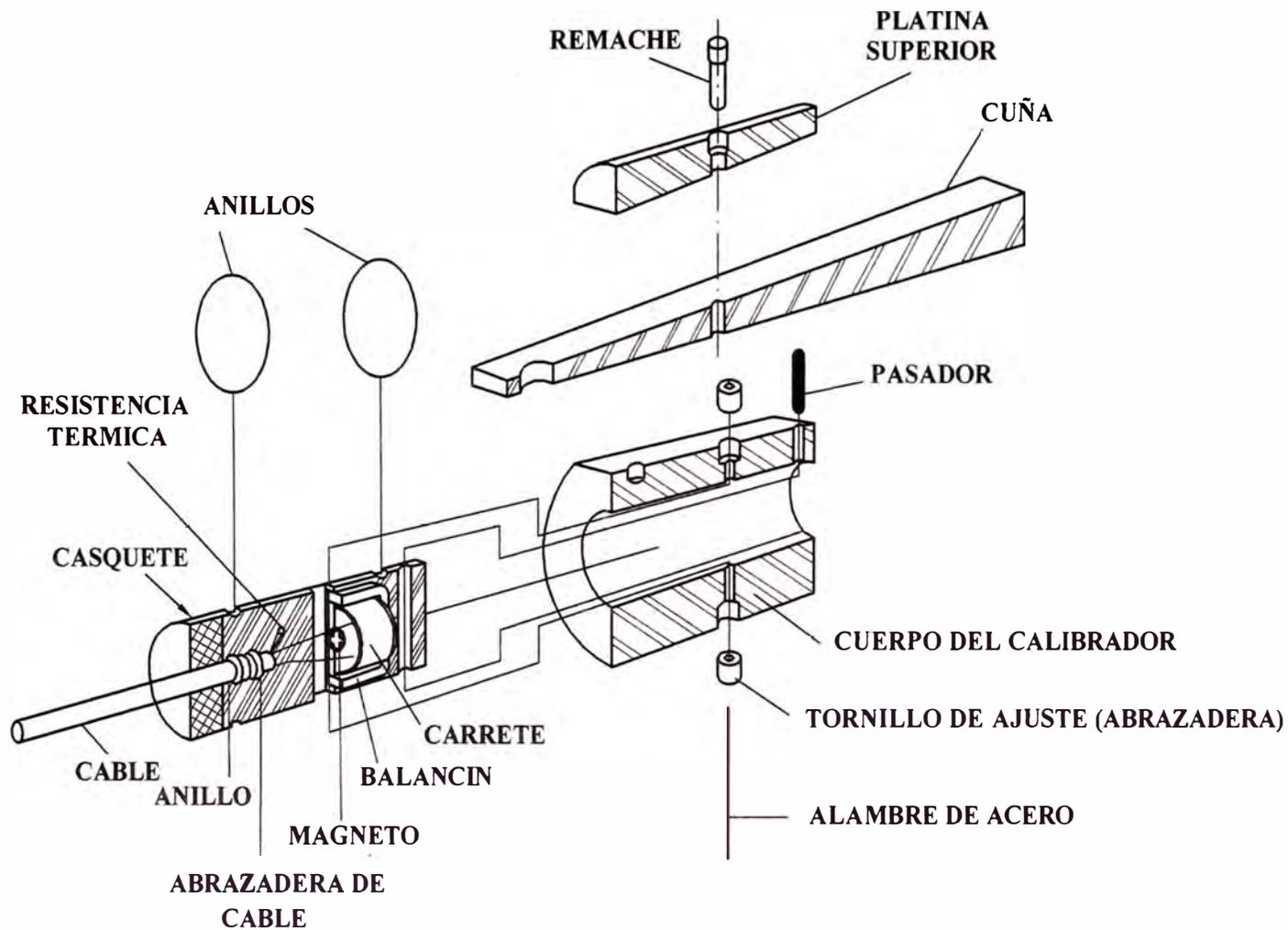
conecta a la sonda, manifiesta el movimiento de magnetos o imanes. La sonda sónica debe dejarse permanentemente en su posición para obtener lecturas remotas.

El principio de la sonda sónica recae en las propiedades de magnéticas del material a analizar. Un pulso eléctrico en la sonda crea un campo magnético que interactúa con el campo magnético que actúa permanentemente en el área en cualquier de los taladros (sonda flexible) o en el extremo de la barra que esta adherida a un anclaje en el taladro (sonda rígida). Los cambios en el campo magnético genera, en el material analizado, un pulso de esfuerzo torsional que viaja a lo largo de la sonda a la velocidad del sonido. El tiempo de llegada de este pulso al extremo final de la sonda, siendo detectado y convertido en una medida de posición magnética. Los cambios de posición pequeños como 0.025 mm (0.001 pulgadas) pueden ser detectadas. Un conmutador determina si el movimiento es medido entre el anclaje y la boca del taladro o entre un par de anclajes consecutivos. La máxima longitud del cable entre la unidad de registro y la sonda no debe exceder de 224m (800 pies). Distancias mayores a esta requieren el uso de un equipo de repetición de señales.

5.3.3. MÉTODO DE LIBERACIÓN DE ESFUERZOS

En este método, el instrumento de medida debe adherirse a la superficie de la roca expuesta en la excavación (Ver Figura N°33). A continuación la zona de roca a la que se ha unido el instrumento se separa del entorno, bien cortando unas ranuras en cuadro mediante una sierra o perforando una corona de taladros secantes en torno de la misma. En otros casos la parte de roca y el instrumento asociado se recortan mediante una broca de perforación hueca de diámetro apropiado. A continuación se miden las deformaciones registradas en la roca independizada.

Entre los instrumentos empleados de esta forma se encuentran los extensómetros se miden la deformación superficial según sus direcciones, las rosetas de extensómetros y los medidores fotoelásticos biaxiales. Los resultados permiten identificar la tensión principal secundaria, en un estado biaxial, en el plano de la pared de la excavación. En este caso la tercera tensión es nula.



| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 33 REPRESENTACIÓN ESQUEMATICA DE UN EQUIPO PARA MEDICIÓN DE ESFUERZOS |
| TESISISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

La determinación del estado de esfuerzos sin disturbar requiere la realización de medidas de más allá de la zona de influencia de la excavación. Esto puede conseguirse perforando en el frente de una excavación y colocando el medidor en el fondo del mismo. A continuación se realiza la sobre perforación en toda la longitud del sondeo original.

También en este caso los resultados proporcionan los esfuerzos principales secundarias en un plano normal al eje del sondeo. Como se quiere estudiar el estado de esfuerzos triaxiales, es necesario medir seis deformaciones principales según tres planos ortogonales, para obtener una solución. Lo más común ha sido realizar medidas en un único sondeo, introduciendo hipótesis simplificadoras sobre la dirección de la tercera tensión principal. Dos hipótesis hecha comúnmente son que una tensión principal es de dirección vertical (en cuyo caso el sondeo se perfora horizontalmente en la pared rocosa) o (si el sondeo no es horizontal) la tercera tensión principal tiene la dirección del eje del sondeo.

Se han empleado tres tipos diferentes de medidores de deformaciones en sondeos. Pueden clasificarse como "Medidores de Deformación Transversal", "Tensómetros de Inclusión" y "Celdas de Deformación".

5.3.3.1. MEDIDORES DE DEFORMACIÓN TRANSVERSAL (BOREHOLE DEFORMATION METERS)

Estos aparatos miden las variaciones en las dimensiones transversales de un taladro realizado en roca, cuando éste se deforma como resultado de la variación de esfuerzos. Los esfuerzos se calculan por la Teoría Elástica.

Uno de los primeros medidores de deformación transversal con éxito en el mundo es la celda de Maihak. En este instrumento el elemento sensible es un medidor de cuerda vibrante conectado a un vástago que se hace salir mediante un mecanismo de tornillo hasta que entra en contacto con las paredes del taladro. Se Requieren diferentes colocaciones sucesivas del aparato para obtener una solución, ya que sólo se registra un corrimiento diametral. Posteriormente se han desarrollado mecanismos que miden

simultáneamente los corrimientos según dos diámetros permitiendo además un registro continuo. De este tipo son los medidores de deformación Marks I y II desarrollados por el C.S.I.R. (África del Sur) que emplea como mecanismo sensible, extensómetros de resistencia eléctrica en anillos que se deforman bajo la acción de vástagos que entran en contacto con las paredes del taladro o transformadores diferenciales lineales conectados directamente a tales vástagos respectivamente.

Uno de los medidores empleados con más éxito en el mundo de habla inglesa es el del U.S. Bureau of Mines, presentando por Merrill. Este mecanismo proyectado para su introducción en un taladro de tamaño EX (1.5 pulgadas de diámetro). El elemento sensible es una chapa en ménsula de cobre - berilio a la que están conectadas cuatro bandas extensométricas formando un puente de Wheatstone. El aparato tiene una sensibilidad de aproximadamente de 20 micrones de centímetros, por centímetro, que corresponde a una precisión en los esfuerzos de aproximadamente 0.95 kg/cm^2 para una roca de $E = 210000 \text{ kg/cm}^2$.

5.3.3.2. TENSÓMETRO DE INCLUSIÓN (BOREHOLE INCLUSION STRESS METERS)

Un tensómetro de inclusión se diferencia de un medidor de deformación transversal en que puede calibrarse directamente en esfuerzos, incluso aunque su respuesta a un esfuerzo sea una deformación medida o algún otro efecto resultante de esa deformación. Los “Tensómetros” (stressmeters) son, de hecho, inclusiones rígidas o casi rígidas mientras que los medidores de deformación pueden ser inclusiones blandas que ofrecen poca resistencia a la deformación del sondeo o simplemente medidores del perfil que no oponen ninguna resistencia.

Estos mecanismos se adhieren firmemente con mortero o se fija por cualquier otro método a las paredes de un sondeo realizado en la roca, las variaciones en los esfuerzos del macizo rocoso darán lugar a variaciones en el tensómetro que estarán poco influenciadas por variaciones en el módulo de elasticidad de la roca. Es decir, no es

necesario tener un conocimiento exacto del módulo de la roca. Cuanto más rígido sea el tensómetro, menor importancia tendrá el conocimiento del módulo del macizo rocoso.

Medidores que utilizan este principio han sido contruidos por Hast, Wilson, Potts, y Hawkes. Todos estos aparatos pueden “pre – comprimirse” después de colocarlos, de forma que posteriormente pueden emplearse para medir esfuerzos absolutos por el método de la sobre perforación o esfuerzos relativos por encima y debajo del nivel inicial de pre - compresión. La diferencia esencial entre estos instrumentos radica principalmente en su forma de “lectura”. El medidor de Hast posee un sistema eléctrico magneto estrictivo, el de Wilson una serie de bandas extensométricas, el de Potts un sistema de presión hidráulica controlado por bandas extensométricas colocadas sobre un diafragma deformable y el de Hawkes un transductor de vidrio fotoelástico accionado por un mecanismo de cuña deslizante. Los tensómetros de inclusión fotoelásticos proyectados por Hiramatsu y Roberts y otros son mucho más sencillos, de una sola utilización y relativamente cómodos, pensados principalmente para medir cualquier modificación de esfuerzos después de su inclusión (Se muestra el procedimiento y alcances de esta metodología en el Apéndice V, Volumen II).

5.4. CONTROL EN EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS CIERRE Y ABANDONO

Una vez terminada la construcción de una excavación subterránea, será necesario controlar su comportamiento geotécnico. Buenos ejemplos de estos controles las cámaras de las hidroeléctricas, cámaras de trituración en minería, instalaciones subterráneas de tuberías de gran presión, Instalaciones en superficie sobre túneles o operaciones mineras. Las técnicas aplicables son las mediciones de convergencia y extensómetros. En las minas que han utilizan cámaras y pilares, hundimiento por bloques, Sherinkage, instalaciones subterráneas sobre todo cuando hay instalaciones en superficie dentro su área de influencia proyectada. En general se utilizan técnicas de control de topografía de alta precisión.

5.5. MEDIDA INDIRECTA DE ESFUERZOS EN ROCAS

5.5.1. MÉTODOS GEOFÍSICOS

Existe varios intentos a través de los años para utilizar la variación de velocidad sísmica para determinar esfuerzos en rocas. Los resultados han sido desalentadores, al igual que en los métodos para encontrar una correlación práctica entre las esfuerzos y la resistividades *in situ*. Un mayor éxito ha alcanzado el empleo de métodos acústico - microsísmicos para la observación de la velocidad de aumento de los esfuerzos en minas susceptibles de desprendimientos, especialmente en Europa.

Por ejemplo. Los ensayos de laboratorio con muestras de roca extraídas de la mina Příbram en La Republica Checa, muestran que aparecen impulsos microsísmicos cuando la presión aplicada alcanza el 80% de la resistencia de la roca en rotura, y con presiones mayores el número de impulsos presenta un notorio aumento.

Como consecuencia, es posible seguir la formación de presiones en el interior de las rocas a partir de varias estaciones que registren los sonidos internos, pudiendo, a partir de la evidencia acumulada, establecer un código de seguridad para la entibación o medidas de seguridad a colocar en las minas según los impulsos registrados por hora.

CAPITULO VI

CONTROL GEOTÉCNICO EN MINERÍA SUPERFICIAL

6.1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de sistemas de instrumentación en Minería Superficial, esta definida en cuatro categorías, correspondiente a las etapas del proyecto minero:

1. **Diseño:** Diseño de taludes.
2. **Planeamiento:** Evaluación del diseño del talud.
3. **Producción:** Monitoreo o control, estabilidad física de (taludes).
4. **Cierre y abandono:** Monitoreo y control de estabilidad.

El control o monitoreo de los taludes en minas a cielo abierto, es la principal aplicación del control instrumental. En este sentido, existen varios sistemas de instrumentación identificados en la presente investigación.

La variabilidad del ángulo del talud es una de las condiciones críticas de un tajo, este parámetro puede afectar en pequeña o gran medida la tasa de recuperación de los minerales y económica de la empresa, genera riesgos de deslizamiento, incidentes o accidentes con pérdidas humanas, equipos y a la propiedad; por consiguiente, se han desarrollado técnicas de control instrumental, los cuales recomiendan mantener sistemas de bancos óptimos, rampas adecuadas y sobre todo un control del ángulo de taludes límite de tajo final. Por consiguiente, el control instrumental en minería superficial, es necesario implementar desde las etapas de diseño, producción y cierre; como a continuación describimos.

6.2. DISEÑO AL INICIO DE LA OPERACIÓN

Generalmente las propiedades geomecánicas de la roca y mineral, son determinadas con información del programa de exploraciones. La exploración, mediante perforación

diamantina y/o rotativa proporcionan información valiosa, referida a los siguientes aspectos:

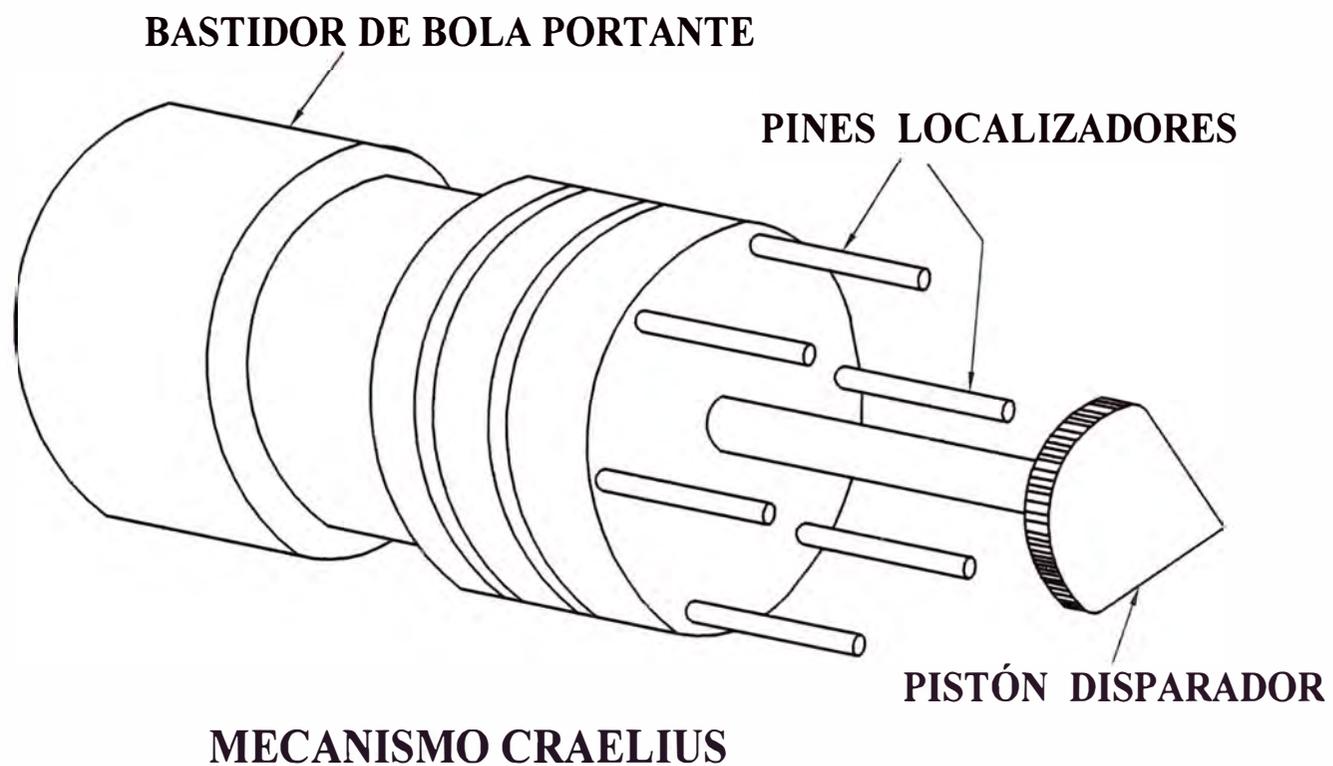
1. Geología características litoestructural de la zona mineralizada.
2. Registro de leyes y tonelaje.
3. Dimensionamiento: Tamaño y forma del depósito.
4. Característica mineralógica y petrográfica del yacimiento.
5. Propiedades física y geomecánica de la roca y la mineralización.
6. Factores que pueden afectar las operaciones de minado a cielo abierto: condiciones del terreno (topografía, relieve), Hidrológica e hidrogeología (presencia de aguas subterráneas y superficial), actividad sísmica, clima (precipitaciones, viento), etc.

Para implementar un sistema de control instrumental, es necesario tener importante de información referente a la estructura de la roca, propiedades geomecánica del macizo rocoso y presencia de agua subterránea y superficial. Por consiguiente, la consideración esencial es cómo extraer tal información durante las etapas de exploración, preparación, desbroce y minado.

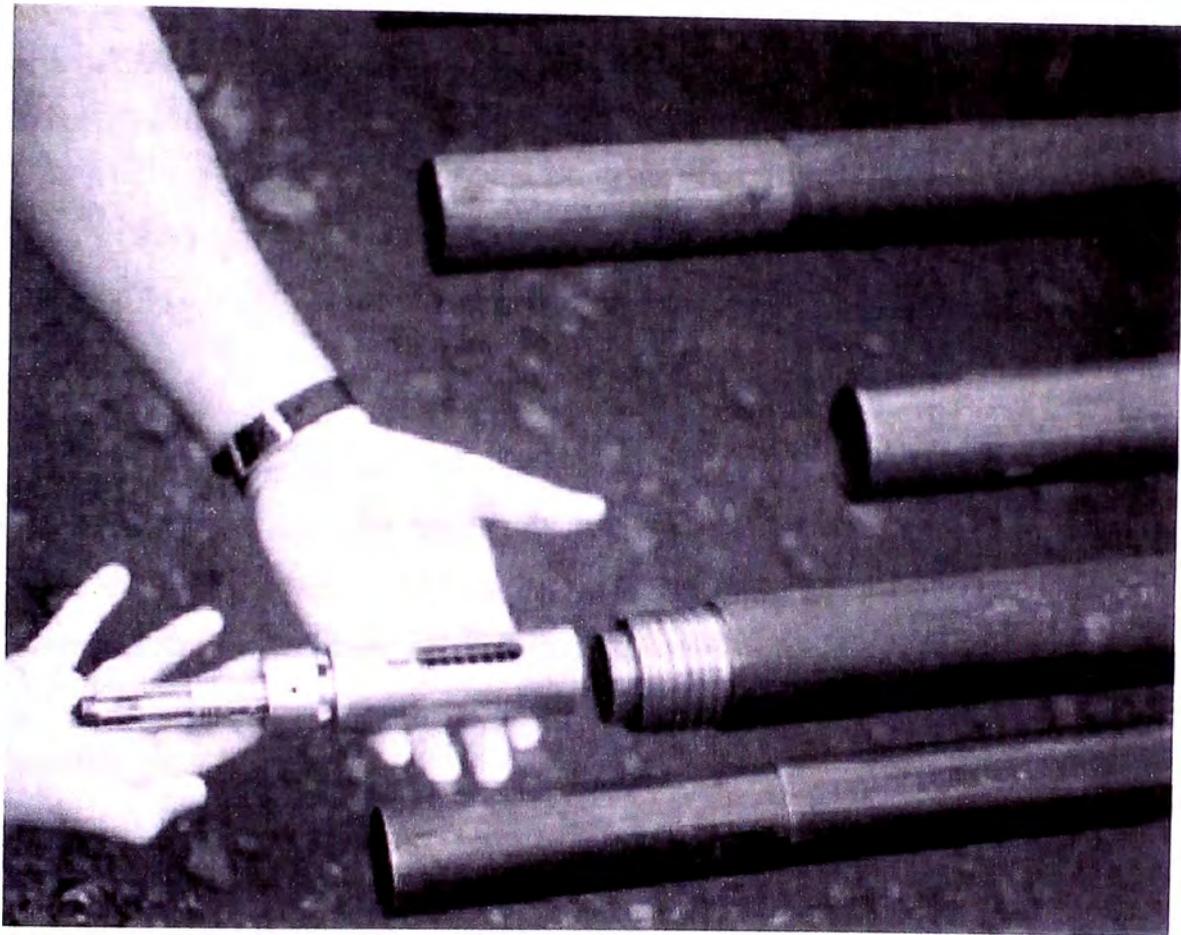
6.2.1. ORIENTACIÓN DE LOS TESTIGOS (CORE ORIENTATION)

La orientación de las estructuras que constituirán las paredes del tajo (Open Pit) son importantes conocer para el diseño, mediante el mecanismo conocido como el orientador de testigos de Craelius (Ver Figura N°34 y Figura N°35) (CCO – Craelius core orienter).

Originalmente, el mecanismo fue propuesto para ir encajado en el tambor del core, que a su vez se encontraba anexado a la barra de perforación. La barra es descendida a través del taladro sin rotación. Los pines del mecanismo (estos pines se observan en la Figura N°34) generan múltiples puntos en la parte inferior de la configuración del equipo. Las huellas suavemente dejadas en el plato de acero indican un plano vertical. El CCO se desliza a través del tambor del core, sin interferir en el proceso de perforación. La perforación no es interrumpida mientras este espacio entre el tambor



| | |
|---|---|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 34 ESQUEMA ISOMETRICO DEL CCO |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |



| | |
|--|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA | |
| FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 35 TUBERÍA PARA ORIENTAR EL CCO |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

del core esta ocupado por el CCO y el Core. La barra debe ser removida del taladro para extraer el registro de la orientación del core. Seegmiller (1990) ha modificado este mecanismo para que opere con una gran variedad de sistemas

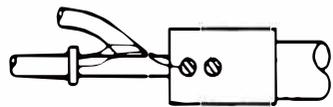
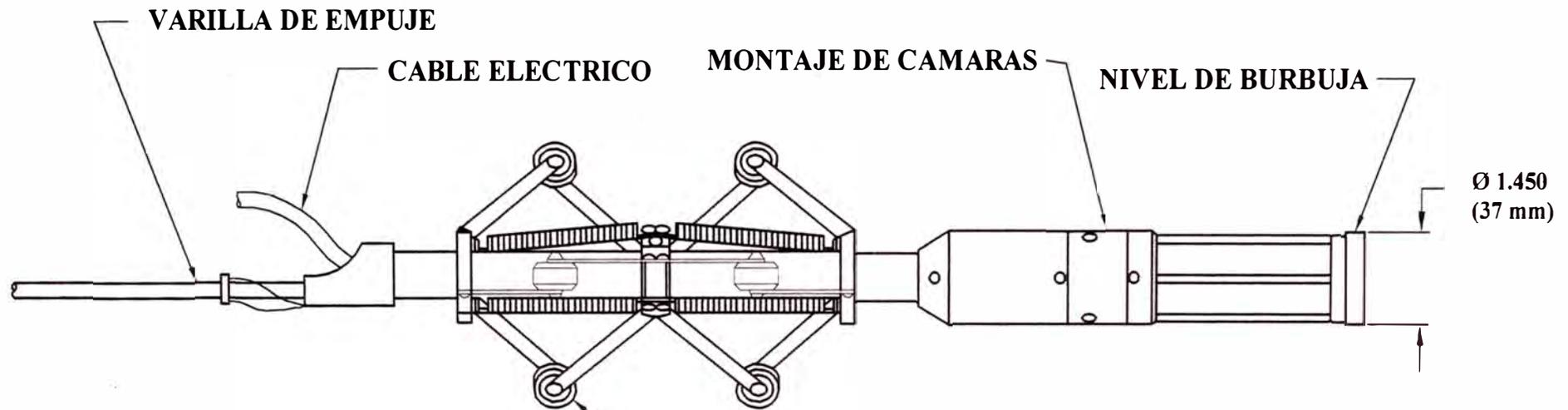
Los orientadores pueden usarse en taladros con buzamiento, con gran inclinación y horizontales sin tener que reorientar la barra de perforación. Las instrucciones para usar los orientadores y el procedimiento para anotar los registros de los cores han sido dadas por Seegmiller (1976).

El CORO, es otro mecanismo para la orientación de los cores, que opera bajo principios similares al CCO, este sistema ha sido desarrollado en Australia y Chile. Call y Al. (1982) han descrito otro sistema para obtener la orientación del Core.

6.2.2. CÁMARAS DE TELEVISIÓN PARA TALADROS (BOREHOLE TELEVISION CAMERAS)

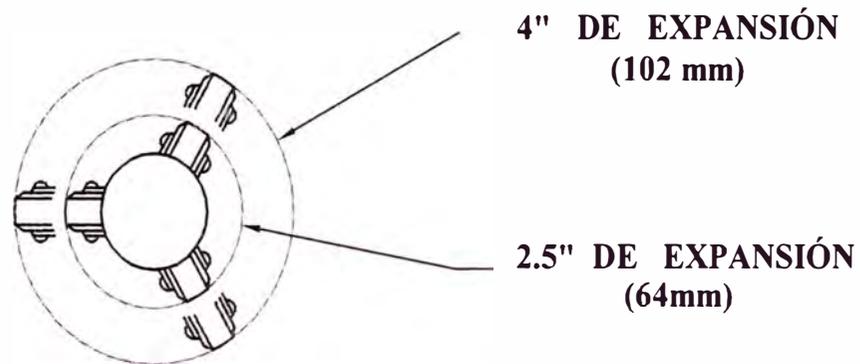
El desarrollo de taladros de diámetros pequeños y cámaras de televisión de alta resolución, han hecho de este conjunto una herramienta práctica para poder observar las paredes de un taladro. Con la determinación de la orientación angular de los taladros se pueden calcular el rumbo y buzamiento de la estructura en estudio (Ver Figura N°36). Así mismo se tiene que la resolución es buena en taladros que están llenos de agua.

Las cámaras de televisión para taladros están diseñadas para poder descender mediante cables en taladros verticales o casi verticales a 300 m (1000 pies) de profundidad. La cámara más pequeña tiene un diámetro de 29 mm (1 1/8 pulgadas) y puede ser usada para longitudes no mayores de 150 m (500 pies). La imagen, se transmite a través del cable que es bajado desde la superficie dónde puede observarse y registrarse las imágenes producidas dentro del taladro. Se usan varias técnicas para posicionar el equipo, según las solicitudes deseadas. Algunos sistemas usan un espejo giratorio o prisma para ver las paredes laterales. En otros, la cámara puede girar. Cámaras de televisión para taladros pueden proporcionarnos imágenes en blanco, negro y a colores.



VISTA INFERIOR

MECANISMO DE RUEDAS EXPANSIBLES



| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 36 ESQUEMA DE LA CAMARA DE TELEVISION UTILIZADO EN UN TALADRO |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

6.2.3. CONSIDERACIONES SÍSMICAS EN UN TALADRO

6.2.3.1. RECONOCIMIENTO SÍSMICO

Puede realizarse estudios de análisis sísmicos en los taladros usando equipos, que están disponibles comercialmente. Debido a que la resistencia de la roca esta en una relación proporcional a la velocidad de corte (esta relación es conocida como la impedancia), la velocidad analizada nos puede proporcionar la resistencia de la pared del talud in situ o los cambios de la resistencia en función al tiempo. En general, la alta velocidad sísmica, la dureza del macizo rocoso o viceversa. Grandes defectos tales como las fallas, discontinuidades u otras anomalías pueden ser localizados por medio de la geofísica, cuando hacemos uso estas técnicas sísmicas.

6.2.3.2. RADAR EN EL TALADRO (BOREHOLE RADAR)

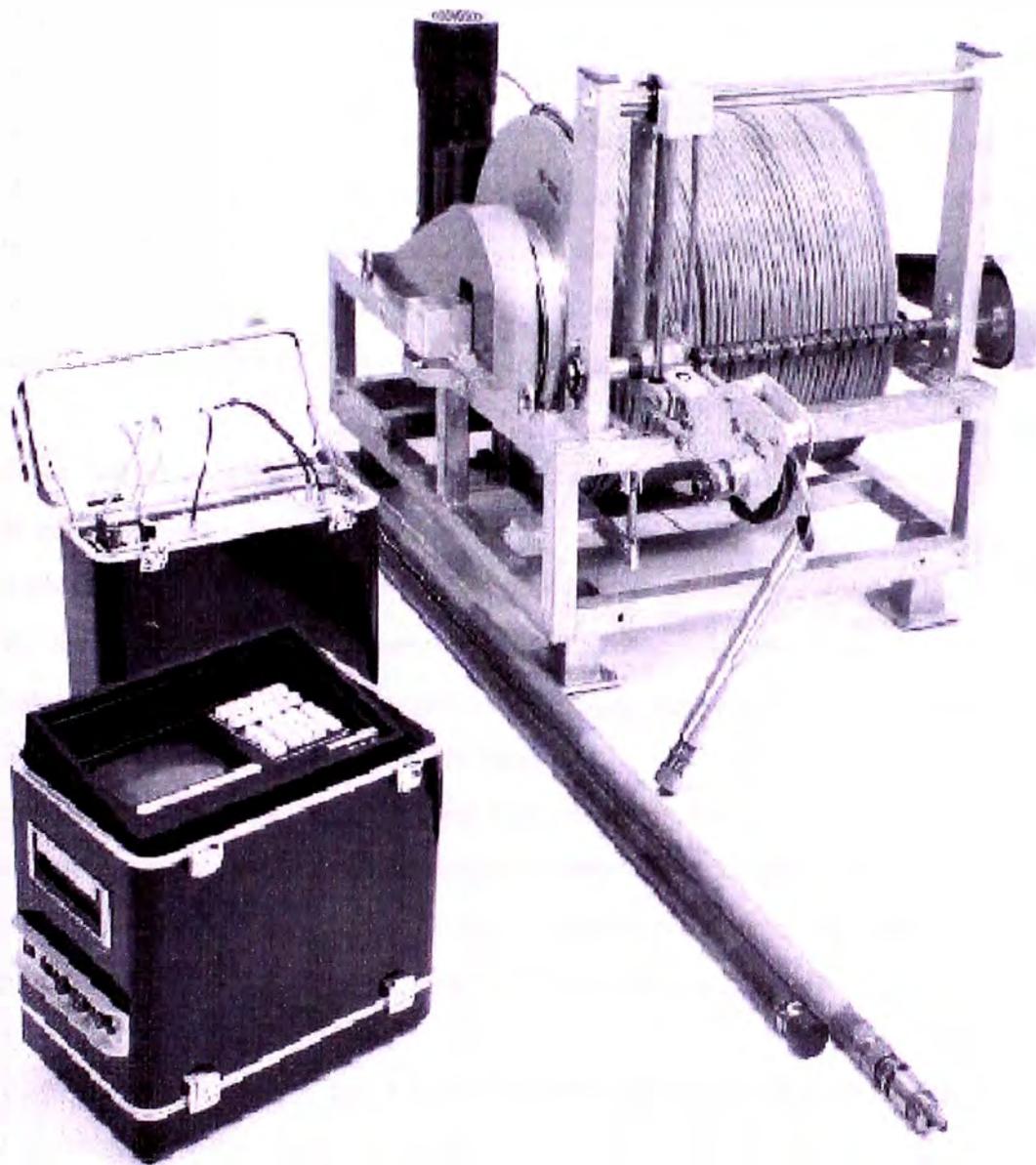
El sistema de Radar en el taladro (RAMAC), ha sido recientemente desarrollado por la corporación Geológica en Suecia, aplicada para la detección de fracturas en la masa rocosa (Ver Figura N°37).

El sistema trabaja, siguiendo el principio descrito a continuación: un corto pulso continuo es alimentado por una antena transmisora, la cual genera un pulso al radar. El pulso, es lo mas corto posible para obtener una alta resolución, propagadas a través de la roca. Esto es recibido por la misma antena, amplificada y registrada como una función de tiempo. Toda la onda es grabada, la señal, la distancia (tiempo de viaje) hacia el reflector, la resistencia a la reflexión y la atenuación; teniendo así que deducir el retardo entre el transmisor y el receptor.

Las fibras ópticas son utilizadas para la transmisión de señales desde el computador hacia la zona de pruebas y para la transmisión de los registros al receptor de la unidad de control.

Las ventajas de las fibras ópticas son:

1. No tienen conductividad eléctrica y no pueden propagar ondas a través del taladro en prueba.



| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 37 RADAR PARA UN TALADRO (BOREHOLE RADAR) |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

2. Estas fibras tampoco captan el sonido producido por el paso de la electricidad.

Desde que la señal es captada en la parte inferior del taladro, las señales no se deterioran a través del cable. La calidad de los resultados será independiente de la longitud del cable.

Las mediciones realizadas por este método se pueden desarrollar como la reflexión en un solo taladro y/o midiendo en los cruces de los taladros.

En la medición de reflexión en un solo taladro, el transmisor y receptor ambos son colocados en el mismo taladro, con una separación que se mantiene constante por una barra de fibra de vidrio. El transmisor - receptor colocado están en continuo movimiento a lo largo del taladro y las mediciones son realizadas por intervalos. Cada medición incluyendo el movimiento al siguiente punto de medición, toma aproximadamente 30 a 50 segundos. Las mediciones son desarrolladas por medio de antenas con un rango de 20 a 80 MHz.

Obteniéndose un gran alcance (300 a 500 pies, o 100 a 150 m) en el taladro combinado con su alta resolución (7 a 16 pies, o 2 a 5 m).

En las mediciones de taladros cruzados, el transmisor y receptor siendo estos colocados en taladros diferentes. Una de las sondas es almacenada en una posición fija en uno de los taladros mientras que la otra sonda es colocada en otro taladro, donde se mueve, registrando en este la medición en intervalos fijos.

En el ploteo de los registros del radar; las fracturas son mostradas como trazas de líneas; cuando la tendencia es localizada aproximadamente a (130 pies) 40 m del taladro, se muestra como una hipérbola, y un par a (2.2 pulgadas) 56 mm del taladro que corta a un taladro ya medido a (0 pies) 0 m, se muestra como líneas reflejadas.

6.2.4. NIVEL DE AGUA EN EL TALADRO (BOREHOLE WATER LEVEL)

La determinación de la presencia de agua es importante para diseñar y evaluación de estabilidad del talud. Uno de los procedimientos con mayor difusión para obtener esta información, es por medio de la observación del nivel de agua en los taladros. Una desventaja de este sistema es que la lectura de la presión en la napa freática puede ser errónea.

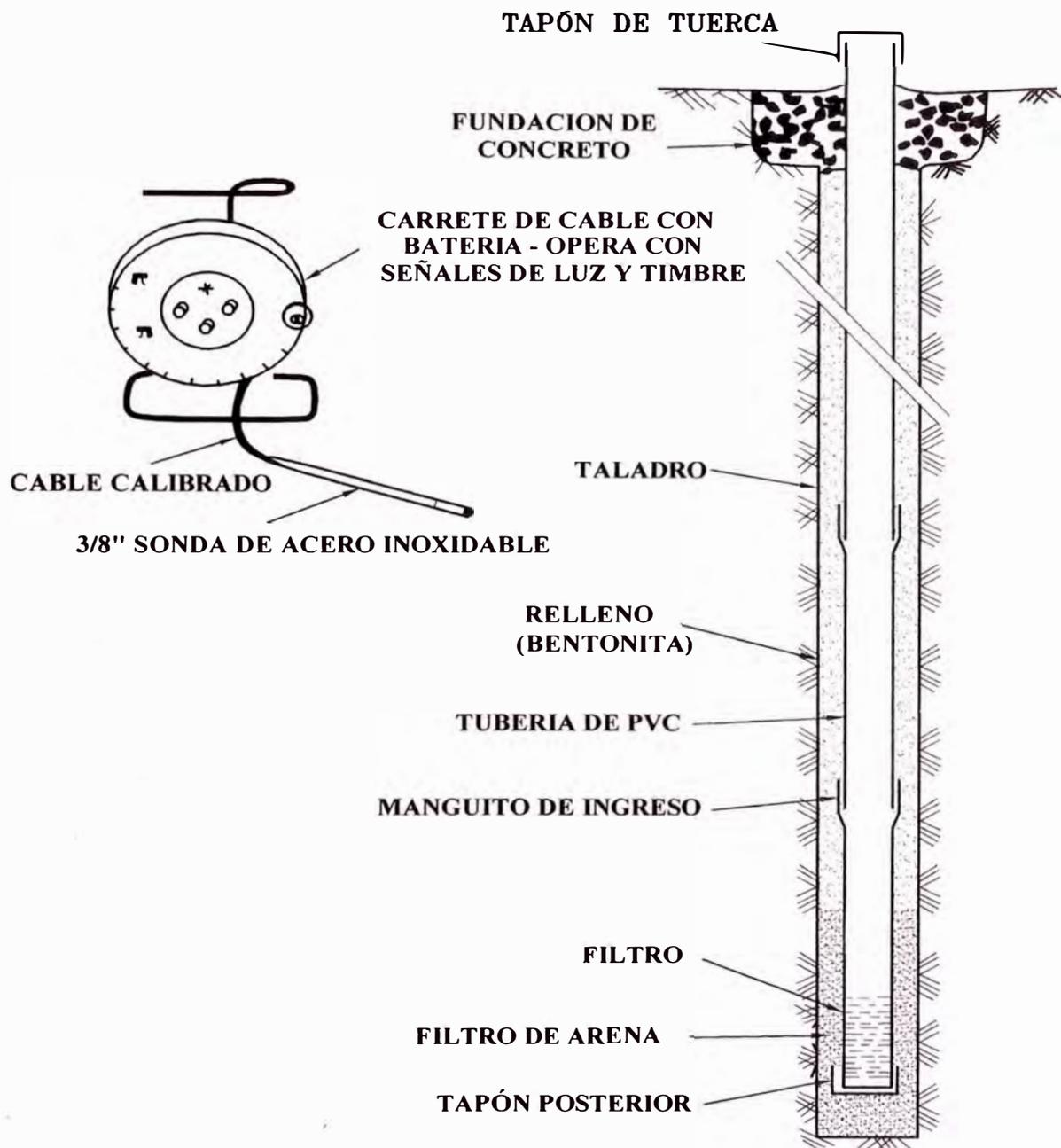
Una técnica para determinar el nivel natural de la napa freática en un taladro es por medio de piezómetros (Ver Figura N°38). Un taladro es perforado hasta la capa de interés, una tubería revestida de PVC con un filtro en la calza de la parte inferior es instalada y el anillo de unión entre la tubería de PVC y las paredes del taladro es rellenado con bentonita para prevenir el flujo del agua hacia el filtro desde otra parte del taladro. Cuando la sonda de prueba, esta en contacto con el agua, el circuito eléctrico se completa y la luz de una lámpara se enciende. La profundidad con respecto a la superficie es tomada desde el rollo de cable. Conociendo la diferencia de elevación entre la superficie y el filtro, la presión en el filtro es calculado. El porcentaje de flujo puede ser determinado por bombeo del nivel de agua en el taladro y observando el tiempo que se demora en volver a llenarse el taladro.

6.2.5. MEDICIÓN DE LA PRESIÓN DE AGUA (WATER PRESSURE MEASUREMENTS)

Cuando la presión de agua es medida directamente, los piezómetros neumáticos e hidráulicos son necesarios, estos mecanismos están compuestos por una calza selladora especial y además de una válvula sensible a la presión (Ver Figura N°39). La válvula tiene la función de abrir o cerrar la conexión entre dos tubos que llevan a la superficie, a la cara del talud o alguna otra localización conveniente a una determinada elevación.

En un piezómetro hidráulico, se usa un fluido hidráulico en lugar de gas, pero los principios básicos son los mismos. Los piezómetros neumáticos tienen las siguientes ventajas: (1) el tiempo de retardo despreciable debido al cambio de volumen pequeño exigido para operar la válvula, (2) simplicidad de funcionamiento, (3) capacidad de purgar las líneas, (4) interferencia mínima con la construcción, y (5) estabilidad a largo plazo. Su desventaja principal es la ausencia de una facilidad de des-ventilación.

Los piezómetros eléctricos presentan un diafragma el cual desvía la presión de poros contra una de las caras. La desviación del diafragma es proporcional a la presión y es medido por medio de los varios transductores eléctricos. Esto es debido a las condiciones del ambiente o al tiempo de vida del equipo, el registro de longevidad de



| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 38 MECANISMO PARA ESTIMAR NIVEL DE AGUA EN EL TALADRO |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |



| | |
|--|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 39 VARIEDADES DE PIEZÓMETROS |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

los piezómetros eléctricos debe ser investigado con anterioridad a la selección para instalaciones en que se requieren las lecturas fiables durante un gran período de tiempo.

6.3. EVALUACIÓN DEL DISEÑO DEL TALUD

6.3.1. INFORMACIÓN DE RUMBO Y BUZAMIENTO

La colección de información del rumbo y buzamiento de las superficies expuestas de la roca siguen siendo una de las tareas más importantes para el geólogo y el geotecnista.

6.3.2. CUADERNO ELECTRÓNICO

Aunque la recolección de datos es generalmente realizada a mano y anotadas en una hoja de papel para luego ser transferidas a la computadora o ser representado en planos, el cuaderno electrónico tiene en promedio una gran ayuda para simplificar este proceso. Estos cuadernos pueden ser programados para recolectar datos en la forma deseada, procesar y transferir el contenido a la memoria de una computadora personal, computadora matriz o ser impreso.

6.4. MONITOREO DEL TALUD

6.4.1. INTRODUCCIÓN

El control de la estabilidad de taludes de un tajo abierto y botaderos de desmonte, son casos importantes en las minas a cielo abierto en las etapas de operación, desbroce y abandono. Existen varias técnicas de medición y control, que pueden ser usadas para este fin. Los objetivos principales para realizar estas mediciones son:

1. Determinar el movimiento relativo, lateral y vertical de una masa de roca y terreno de recubrimiento.
2. Determinar la aceleración y deceleración de desplazamientos del macizo rocoso.

3. Determinar los factores de estabilidad para establecer medidas correctivas.
4. Determinar el volumen y forma del terreno que podría deslizarse.
5. Determinar los movimientos o desplazamientos relativos dentro del talud.
6. Controlar la eficiencia de sistemas de control instalados
7. Controlar los niveles de agua subterránea (napa freática) y presiones de poros, en diferentes niveles (bancos) y/o estratos en el macizo rocoso.

Existen varias razones por las cuales se instalan sistemas de instrumentación. Una es prever la seguridad física del talud. El monitoreo del desplazamiento y el comportamiento de estos, prevé los impactos que pueda provocar un derrumbe o deslizamientos de masa rocosa. Mediante el monitoreo se puede evaluar el comportamiento de los parámetros ángulo de fricción, cohesión, niveles de agua subterránea y presiones de poros. Esto debe permitir un mejor control y manejo de los taludes en los tajos de extracción y botaderos de desmonte.

Los objetivos principales de un programa de monitoreo son:

1. Establecer procedimientos para selección y uso de equipos de control geotécnico. Previendo la seguridad para el equipo y personal.
2. Disponer de una rápida y oportuna información para que los operadores de mina modifiquen sus planes de operación a fin de minimizar los impactos debido al deslizamiento de los taludes.
3. Proporcionar información del comportamiento geotécnico detallado y a tiempo, para prever falla de taludes, proponer medidas de estabilización y/o rediseño de los taludes.
4. Establecer procedimientos de instalación, medición y toma de información para obtener resultados confiables.

6.4.2. SISTEMAS CONVENCIONALES DE INSTRUMENTACIÓN

La medición de desplazamientos en superficie, usando equipos de medición convencional y extensómetros; pueden ser y continuar siendo una técnica confiable por su efectividad frente al costo.

Los sistemas mas utilizados son los instrumentos de estación total EDM o en combinación el EDM con teodolito de alta precisión

Los sistemas de instrumentación convencionales deben tener las siguientes especificaciones:

1. Detectar (medición) parámetros de control geotécnico en la etapa inicial de la inestabilidad en taludes.
2. Proporcionar comportamiento (historia) de los desplazamientos (movimientos), detallado en términos de la dirección y porcentaje de áreas inestables
3. Definir la ubicación e influencia de las áreas inestables.

La metodología de trabajo de los equipos de los mencionados están referidos:

- Estos equipos deben estar emplazados sobre estructuras de metal o concreto sobre bases estables así como también la base de la estación de observación..
- La parte plana del instrumento debe ser fijada a la parte superior de la estructura (base de concreto o metal), la que puede tomarse como plataforma del instrumento.
- Los primeros puntos de observación son utilizados para ajustar las estaciones de observación a la línea base de la malla, las cuales se debe recalcar que deben estar localizadas en un terreno estable, lejos de influencia de la excavación del tajo.
- Los prismas usados como puntos de observación, deben estar ubicados en las caras de los bancos, si fuera posible. Estos emplazamientos deben estar entre 1.8 a 2.4 m (6 a 8 pies) sobre el pie del banco siendo lo recomendable.
- Frente al menor resquebrajamiento, el prisma puede ser cambiado de posición. Si el punto de observación se encuentra cerca al pie, esto puede ser cubierto rápidamente

por escombros de roca, que es el resultado del resquebrajamiento del terreno. En algunas áreas, los reflectores de los prismas pueden ser montados sobre trípodes los cuales son seleccionados como puntos de control.

- Si los datos del reconocimiento presentan una desviación, la cual es resultado de una inadecuada instalación, se debe repetir la toma de mediciones hacia los mismos puntos a fin de obtener una lectura correcta.
- La capacidad de ajuste es necesaria para cada punto cuando se presenta un movimiento en los taludes, debido a que se debe ajustar el alineamiento y así poder mostrar el verdadero desplazamiento del talud o cuando el instrumento haya sido reubicado. El prisma puede tener una tolerancia de desalineamiento de 14° y puede estar con señal hacia el EDM (instrumento electrónico para medición de distancias).

6.4.3. SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN AUTOMATIZADOS EN MINA A CIELO ABIERTO

Un sistema de instrumentación controlado por computadora, puede ser programado para medir distancias, ángulos horizontales y verticales en intervalos predeterminados. Como en el caso de sistemas convencionales los prismas (puntos de control) están localizados en los taludes.

El análisis y comportamiento de las lecturas registradas pueden ser ejecutadas por una computadora y los resultados en términos de desplazamientos, de los puntos fijos (prismas), velocidad y aceleración pueden ser presentadas numéricamente y gráficamente en la pantalla de la computadora o impresas.

Los registros obtenidos también pueden ser transferidos a una computadora central, almacenadas en una hoja de cálculo para luego ser procesadas y retransmitidos a los operadores de mina y departamento geotécnico de la unidad minera.

6.4.4. EXTENSÓMETROS MONTADOS EN SUPERFICIE

Ante la presencia de desplazamientos en un área de trabajo, se debe recurrir a instrumentos para registrar esta anomalía, registrando desplazamientos absolutos (con

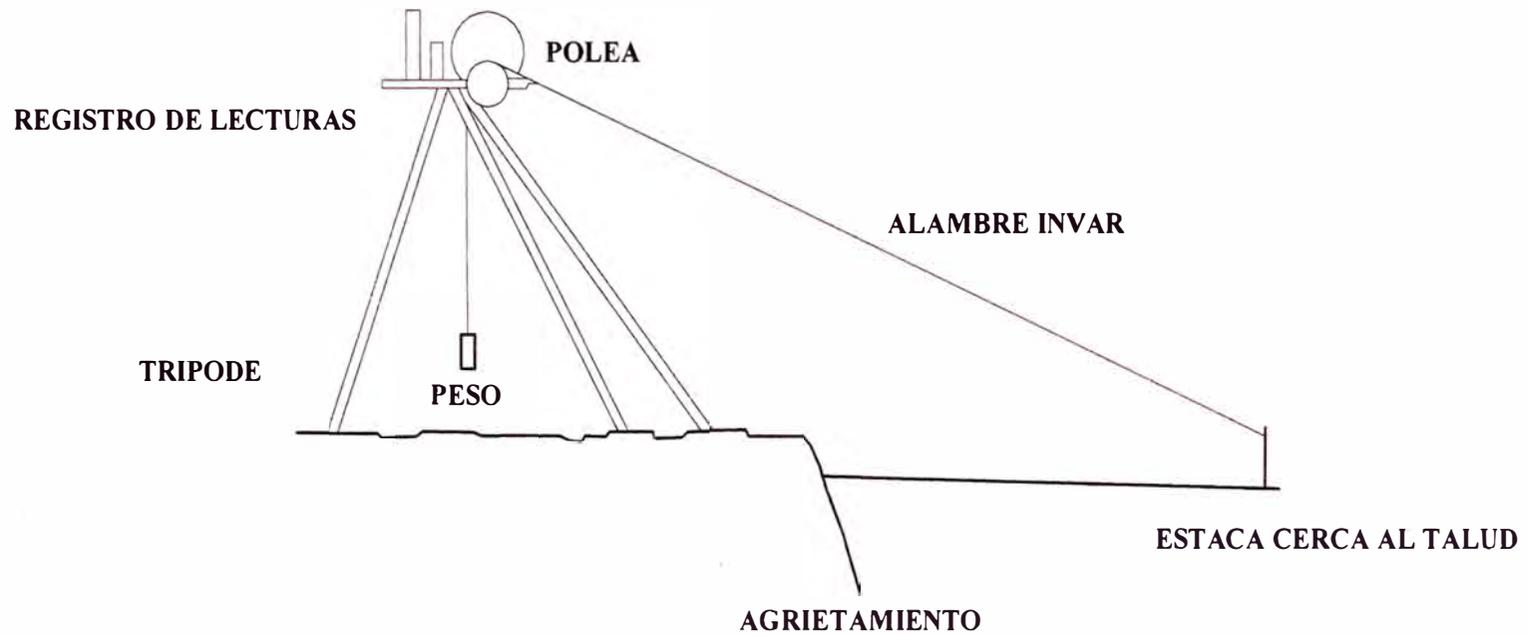
respecto a una referencia ajustada) o desplazamientos relativos. Para este caso, se debe usar extensómetros en superficie, dentro de una gran variedad de equipos existentes, diferenciados por los rangos y calidad de información, precisión y costo.

Estos desplazamientos indican la inestabilidad de los taludes en zonas de extracción y botaderos, los que estarían representados por las grietas. Para lo cual se debe realizar un mapeo sistemático de las grietas ubicadas en las terrazas de las zonas de extracción y botaderos de desmontes, determinando el área inestable.

Durante el control de inestabilidad en las partes extremas de las grietas se puede presumir que posiblemente se deben estar debilitándose por consiguiente; se puede observar nuevas grietas o extenderse las grietas que ya han sido identificadas. El comportamiento de las grietas es siempre usado para establecer un sistema de control. Un sistema de control a pequeña escala es determinando el desplazamiento horizontal y vertical en una franja pintada. Para este caso se utilizan tres barras empotradas en el terreno dando una formación triangular, con lo cual nos permite medir la distancia entre las barras con una cinta, tomando como referencia uno de ellos (punto fijo). De esta manera se puede determinar el desplazamiento relativo y la dirección de la grieta.

Otro instrumento indicativo es el de una cuña de madera dura, introducida ligeramente dentro de una grieta con una marca en ella, estando esta al nivel de la superficie. Si esta junta se abre, entonces la cuña ha de caer a un nivel inferior, sin embargo si la junta se cierra o esta sujeta a movimientos cortantes el instrumento no sería de gran ayuda. En contraste con los instrumentos observados existen sistemas más elaborados denominados extensómetros.

Extensómetro portátil de cable puede ser usado para proporcionar un control en áreas donde hay una gran actividad de inestabilidad y poder proporcionar información rápida a los monitores del sistema de instrumentación, este sistema de control puede ser instalado con gran facilidad debido a su maniobrabilidad. Un extensómetro de cable, puede ser fabricado en los talleres de mina (Ver Figura N°40). Para que los datos sean confiables, el extensómetro debe ser posicionado en un terreno estable detrás de la última línea visible de agrietamiento, el cable debe ser extendido hacia la zona



| | |
|---|---|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 40 EXTENSÓMETRO DE ALAMBRE |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

inestable. El extensómetro de cable debe ser colocado en una zona estratégica en un área de trabajo en la cual se pueda controlar de una forma rápida el movimiento del talud, solo por una inspección del instrumento.

Un extensómetro de cable puede ser montado con un mecanismo de alarma, el cual está unido a un interruptor con varios milímetros de cable para el desplazamiento del contrapeso. Para el uso de las sirenas y luces se puede incorporar una carga de 6 voltios, proporcionada por una pila unida al interruptor, el cual previene el movimiento del talud. También un tambor grabador (mecanismo de registro) continuo adaptado a un extensómetro, que proporciona los registros del movimiento en el talud. Esto puede proporcionar importantes datos para determinar la sensibilidad del talud frente a la voladura, circulación de equipo pesado y precipitación.

La longitud del cable del extensómetro debe estar limitada a unos 60m (200 pies) a causa del pandeamiento del cable, la cual puede ocasionar una inadecuada información. Usualmente, se pone un contrapeso de 17 a 24 Kg (35 a 50 lb.) para este tipo de longitudes, pero esto depende de la resistencia a la tensión del cable. Cables usados en los controles, son cables de avión o cables similares, los cuales son manufacturados para tener un ligero estiramiento, recomendado para este tipo de mecanismo de control. La flexibilidad y durabilidad de un cable de acero, comparado a la rigidez y fragilidad del cable INVAR, sobre todo las grandes propiedades térmicas que posee los cables INVAR. Son recomendados para uso como cable en extensómetros de cable.

6.4.5. DECLINÓMETROS (TILTMETERS)

Los tilmeters proporcionan mediciones de control de los movimientos, usados en áreas donde la falla del macizo rocoso tiene un componente rotacional.

Un modelo de tilmeter (Ver Figura N°41) contiene un interruptor de mercurio, cuando hay presencia de declive, causa que el circuito eléctrico se cierra. Esto es un tipo de mecanismo de encendido y apagado el cual es conectado a un sistema de advertencia



| | |
|--|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA | |
| FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 41 EQUIPO DEL DECLINÓMETRO ESTACIONARIO |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

(en caso de peligro). Esto no proporciona una información respecto al porcentaje de movimiento.

Cuando el desplazamiento de la grieta es vertical, el tilmeter consiste en una barra que cruza la grieta con un péndulo y un protactor, esto puede ser usado para medir el desplazamiento. El interruptor de mercurio que esta en la barra debe ser conectada a luces de alarma.

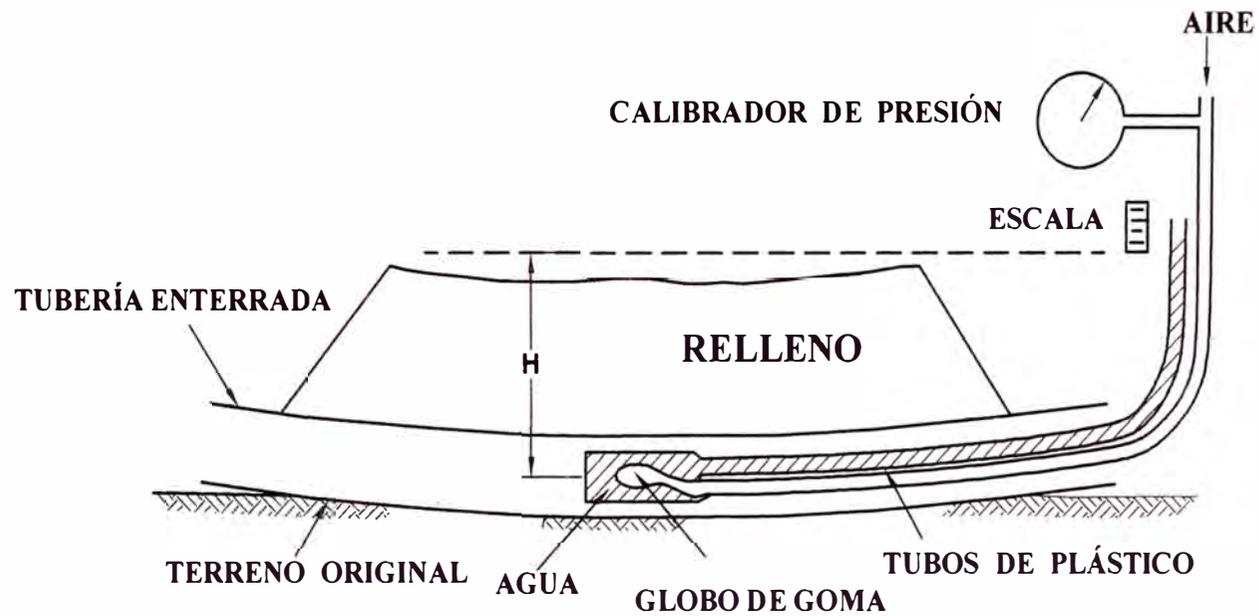
6.4.6. CALIBRADORES DEL DESPLAZAMIENTO DEL NIVEL LIQUIDO

Un desplazamiento vertical del nivel liquido, el calibrador opera en base a un principio físico que el nivel del liquido de dos vasijas unidas por medio de un tubo se encuentran en la misma elevación, proporcionan una presión sobre la superficie del liquido en ambas vasijas (Ver Figura N°42 y Figura N°43). El cambio de elevación entre los dos reservorios puede ser determinado por micrómetros los cuales se encuentran en cada reservorio.

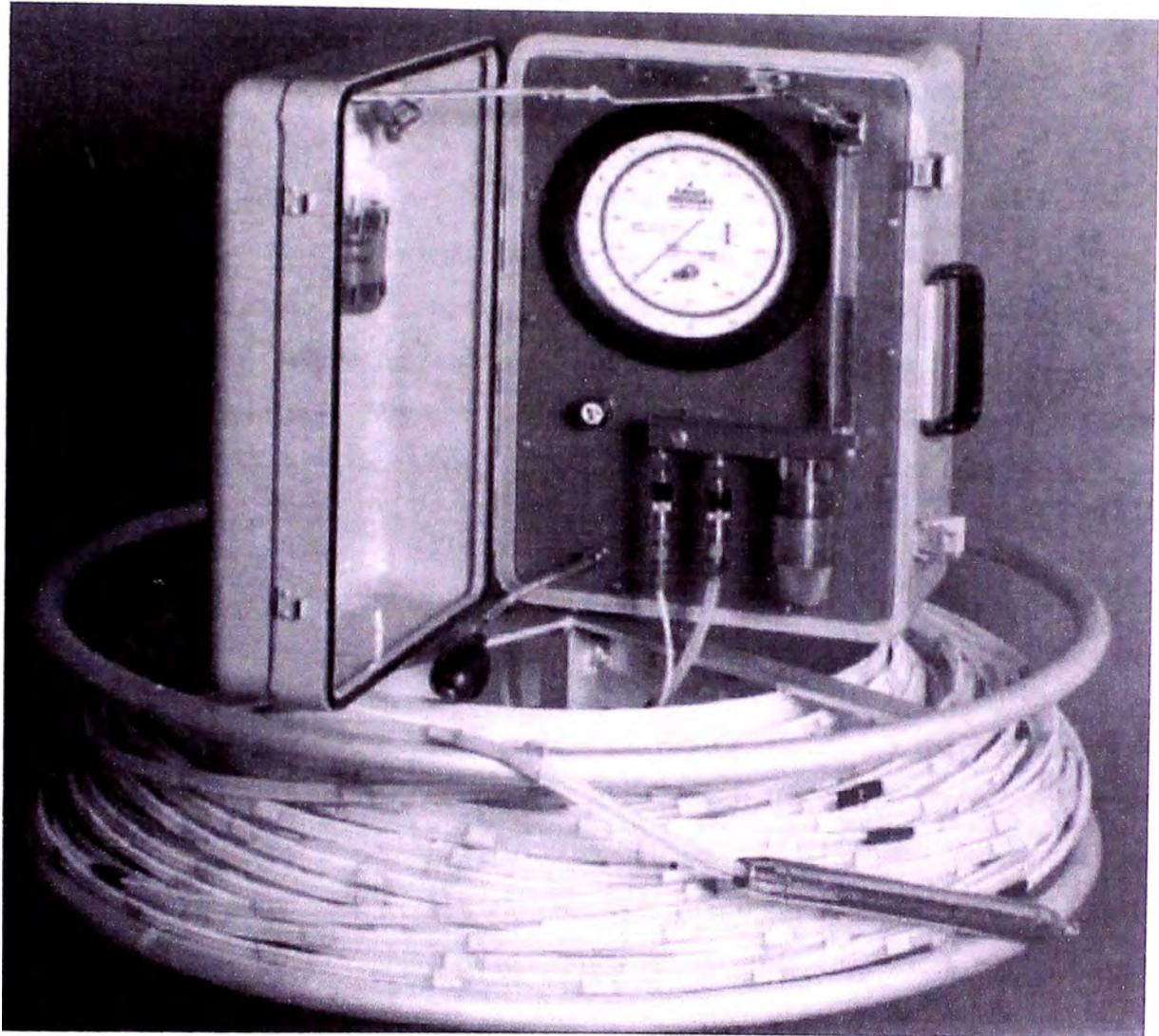
6.4.7. INSTRUMENTACIÓN PARA EL SUBSUELO (SUB-SURFACE INSTRUMENTS)

Aunque es posible realizar inferencias sobre la extensión del subsuelo que esta inestable desde una medición del desplazamiento en superficie. Existen varios casos en donde es necesario tener datos acerca del subsuelo. Para realizar esto es a través de taladros, debido a esto, este procedimiento considera un mayor costo, en este rubro podemos distinguir cuatro tipos de mecanismos:

1. Inclínómetros.
2. Shear strips.
3. Time-domain reflectometry.
4. Extensómetros en taladros (estos equipos han sido explicados en el capítulo anterior)



| | |
|---|---|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 42 ESQUEMA DEL EQUIPO PARA MEDIR NIVEL LIQUIDO |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |



| | |
|---|---|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 43 EQUIPO PARA MEDIR NIVEL LIQUIDO |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

6.4.7.1. INCLINÓMETROS

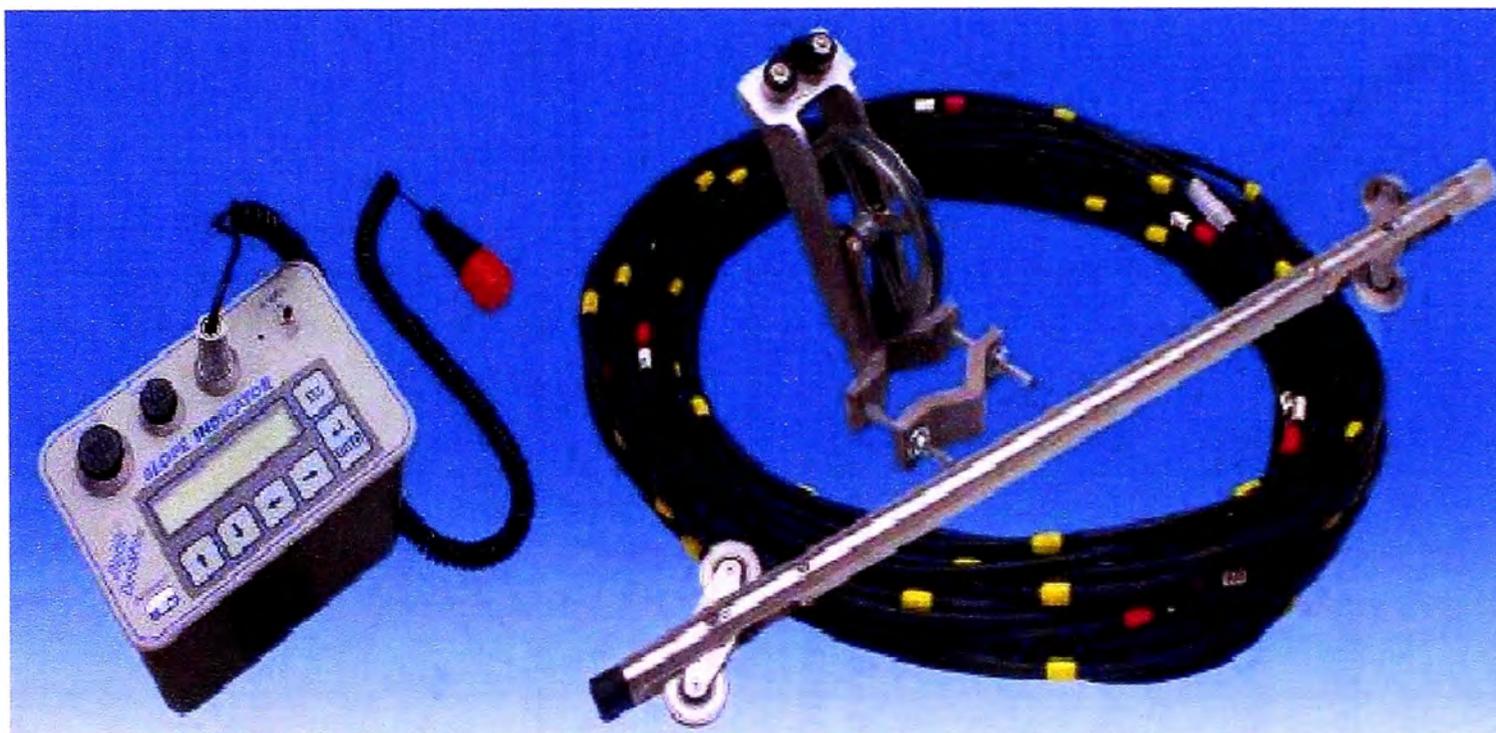
Un inclinómetro mide la variación de la inclinación (o declive) del casing (entubado) en un taladro (Ver Figura N°44 y Figura N°45) y esto nos permite determinar la distribución del movimiento (desplazamiento) lateral en función a la profundidad y en función del tiempo

Aplicación del inclinómetro para deslizamiento, tiene una facilidad de información y permite identificar y definir las superficies que tienden a deslizarse o zonas que presentan movimientos aparentes con respecto a zonas estables.

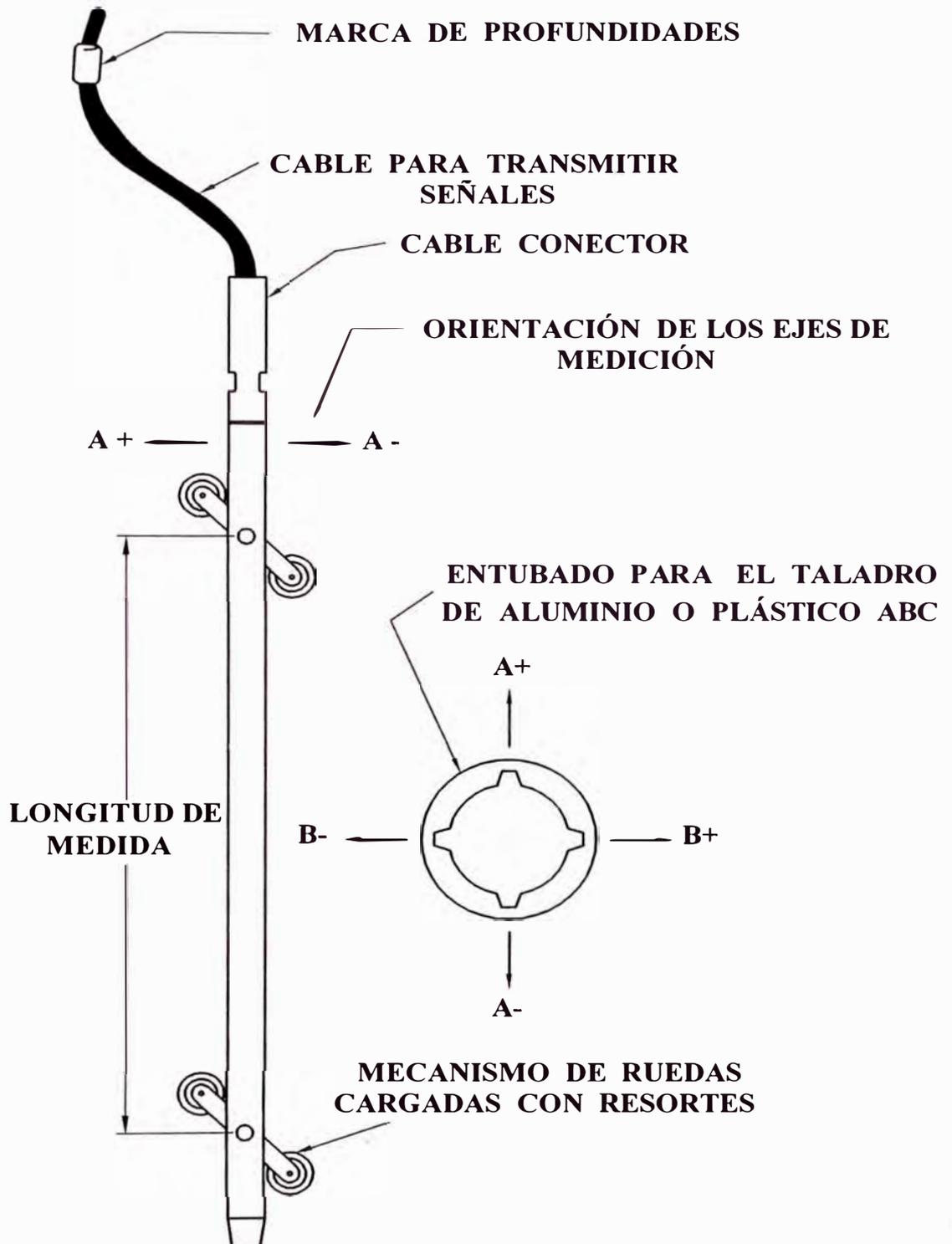
Los inclinómetros tienen un rápido desarrollo, para poder mejorar su exactitud y fiabilidad, reducir el peso y volumen del instrumento, mejorar y reducir el tiempo de toma de datos, mejorar la versatilidad de funcionamiento bajo condiciones adversas.

Los mecanismos de registro automático de datos, carretes de cable de mando y otros elementos son disponibles. Algunos inclinómetros miden la inclinación en dos planos casi - verticales que son mutuamente perpendiculares. Así los componentes del movimiento horizontal, el transversal y paralelo son asumidos con la dirección del deslizamiento, los cuales, pueden ser calculados por las mediciones realizadas por los inclinómetros.

La función del inclinómetro, es detectar la variación de inclinación del casing desde su posición original casi-vertical. Las lecturas tomadas en diferentes profundidades en el casing, permiten observar cambios en el talud en varios puntos en superficie; la interrelación de estos puntos entre cualquier otro punto produce una deflexión relativa entre estos puntos. La repetición de tales mediciones realizadas periódicamente proporciona datos de la localización, magnitud, dirección y rango de desplazamiento del casing. La interrelación es normalmente realizada en el fondo del taladro, donde se asume que tiene mutua relación entre la posición e inclinación



| | |
|---|---|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 44 EQUIPO PARA INCLINÓMETROS |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |



| | |
|--|---|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 45 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL INCLINÓMETRO |
| TESISISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

6.4.7.2. SHEAR STRIPS

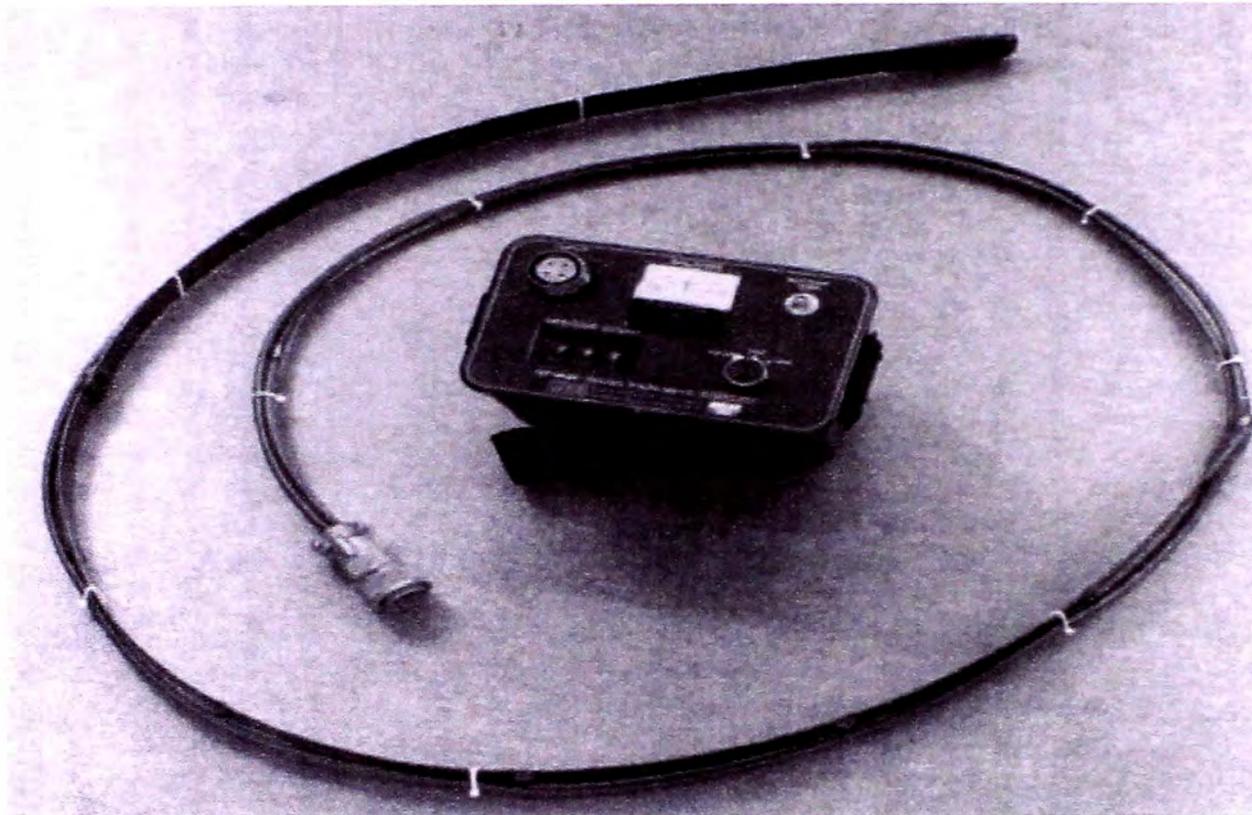
Este mecanismo es utilizado como mecanismo de seguridad, teniendo como función detectar y localizar dos zonas de debilitamiento ya sea en suelo, roca (Ver Figura N°46). Estos pueden ser instalados en taladros de pequeños diámetros de 1 ½ pulgadas, bordeando la superficie, o incluido en hendeduras o trincheras. Consiste en una serie de resistencias montadas en una zona fracturada que esta siendo afectada por movimientos cortantes. El indicador del Shear – Strip es utilizado para realizar estas lecturas.

6.4.7.3. TIME-DOMAIN REFLECTOMETRY

Esta técnica fue inicialmente desarrollada para localizar discontinuidades en cables de transmisión coaxiales. En minería esta siendo empleada para identificar zonas de deformación en el macizo rocoso.

Cuando el terreno se deforma, los cables coaxiales anclados en el taladro también sufren deformación debido a la modificación de la impedancia en el cable. El paso del pulso de voltaje transmitido por el cable experimenta una reflexión parcial en donde existe un cambio de impedancia. Los pulsos de las reflexiones generadas por los cambios producidos por la impedancia a lo largo del cable son superpuestos en el pulso de entrada que conforma serie de señales del TDR. La composición de las señales del TDR observadas en la pantalla del cable verificador consiste en varias reflexiones individuales generadas por deformaciones localizadas a lo largo del cable.

El tiempo de retardo entre un pulso transmitido y la reflexión desde un cable deformado únicamente determina la localización de la falla. El tiempo, señal, longitud y amplitud de cada pulso de reflexión define la localización, tipo y la severidad de la deformación.



| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | FIGURA N° 46 SHEAR STRIPS |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

CAPITULO VII

CASO PRACTICO DE CONTROL GEOTÉCNICO

BOTADERO DE DESMONTE MINA ANTAMINA

7.1. INTRODUCCIÓN

Como se ha mencionado en los capítulos precedentes, para que un sistema control geotécnico sea efectiva y eficiente, debe ser implementado con criterios técnicos de ingeniería. Como una aplicación práctica del presente trabajo de investigación, presentamos el sistema de “Control Geotécnico en Botaderos de Desmontes” de la Compañía Minera Antamina. La mencionada empresa tiene como política de gestión de riesgos, el control de estabilidad física de sus depósitos de desmontes, para lo cual, ha dispuesta la instalación de extensómetros a lo largo de los botaderos para evaluar el comportamiento de estabilidad del área de trabajo.

La metodología y los procedimientos de recolección de datos, la formulación de tablas las cuales serán utilizadas para realizar la caracterización del maciza rocoso de la zona. Ver Tabla N°4)

7.2. LUGARES DE INSTALACIÓN

Los instrumentos se ha instalados en el cuerpo de los botaderos (Ver Foto N°1 y Foto N°2), es decir en el área en el cual se descarga el material desmonte, lado oeste de la mina. La descarga es realizada por camiones CAT. El procedimiento de descarga es establecido en las instrucciones dadas por el departamento de Geotecnia de la Mina.

7.2.1. PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN EN LOS BOTADEROS

La operación del botadero está supeditado por los procedimientos de trabajo, los cuales son; la responsabilidad, dirección del botadero, supervisión, cierre y criterio para poder reabrir el botadero. Se entiende que estos procedimientos garantizan la seguridad de personal y equipo desplegada en la zona adyacente a las Botadero. El plan de operación

*del botadero; dirección, supervisión, decisiones de cierres y/o rehabilitación debe ser ejecutadas de una manera oportuna.

7.3. INSTRUMENTOS PARA EL CONTROL GEOTÉCNICO

La compañía Minera Antamina, cuenta con equipos de monitoreo constituidos por extensómetros mecánicos y electrónicos. Los extensómetros electrónicos son utilizados para confirmar los registros obtenidos por los extensómetros mecánicos. Las características de estos equipos se presentan en el capítulo VI.

7.4. PROCEDIMIENTOS PARA LA INSTALACIÓN Y CONTROL DE EXTENSÓMETROS DE CABLE EN LOS BOTADEROS

7.4.1. INTRODUCCIÓN

El extensómetro indicado en la Foto N°3 mide los desplazamientos entre dos puntos (estaciones de control y referencia) ubicados sobre la superficie del botadero. Estos instrumentos se emplean para controlar áreas expuestas a una evidente inestabilidad activa y para advertir riesgos potenciales a los equipos, personal (que laboran en la zona) y a la propiedad en el área de influencia de los botaderos.

La ventaja de los extensómetros en el botadero:

- Pueden ser instalados rápidamente.
- Pueden ser trasladados rápidamente.
- Son simples de construir y de bajo costo

7.4.2. PROCEDIMIENTOS DE INSTALACIÓN Y CONTROL

1. INTRODUCCIÓN

Los procedimientos de operación de los extensómetros es un documento que detalla paso a paso como realizar las actividades de instalación, lectura de datos, frecuencia de

* NOTA: LAS FOTOS DEL PRESENTE CAPITULO SE ENCUENTRAN EN EL APÉNDICE – VOLUMEN II

medición y notificación para el manejo de la información.

En la Mina Antamina, existe buena supervisión, procedimientos específicos y personal entrenado. La información reportada dependerá, si un botadero permanece activo o inactivo o se reapertura, además, proporcionan seguridad al personal y demuestra que se hayan cumplidos los procedimientos. En las Foto N°4 y Foto N°5) se observa el proceso de instalación y control.

2. ÁREAS DE RESPONSABILIDAD

La instalación y control de extensómetros de cable en los botaderos, son de responsabilidad del siguiente personal.

SUPERVISOR GENERAL DE MINA

El Supervisor General de Mina será responsable de:

Asegurar que las personas encargadas de la instalación y control de los extensómetros, estén adecuadamente entrenados.

Verificar el estado de estabilidad de la cresta de los botaderos para decidir sobre su cierre definitivo, parcial o reapertura.

INGENIERO GEOTÉCNICO

El Ingeniero Geotécnico será responsable de:

- Ubicar los extensómetros de acuerdo a procedimiento de CMA.
- Establecer la frecuencia de control de los extensómetros.
- Inspeccionar diariamente los botaderos con la finalidad de verificar el desarrollo de agrietamientos y programar la instalación de estos instrumentos.

Coordinar con el Supervisor de Mina la ubicación e instalación de los extensómetros.

Controlar diariamente e informar al Supervisor General de Mina, a los

Supervisores de Mina y en la reunión diaria de Ingeniería y Geología sobre el comportamiento del botadero en las últimas dos guardias.

Llevar un libro de registro de todas las inspecciones del botadero, control, programación de nuevos extensómetros y coordinación para la ubicación topográfica de los mismos, detallando las acciones a tomar y las situaciones de riesgo para luego ser comunicadas a otras áreas.

SUPERVISOR DE MINA

El Supervisor de Mina será responsable de:

Verificar que la información entregada por el Ingeniero Geotécnico para la instalación de extensómetros sea de acuerdo a procedimiento de CMA.

- Verificar que la instalación y control estén bien hechas.
- Verificar que las lecturas registradas por los encargados del control sean entregadas inmediatamente a dispatch.

Verificar que el despachador ingrese las lecturas en la base de datos existente, y tener los resultados disponibles para quienes lo soliciten.

Llevar un libro de registro de las inspecciones del botadero, puntos de acción, y las situaciones de riesgo que correspondan al botadero.

DESPACHADOR

El despachador será responsable de:

- Ingresar en la base de datos las lecturas tal y como fueron dictadas por la persona a cargo del control del botadero tan pronto como éstos lo hayan transmitido al despachador.
- Reportar altas velocidades a los Supervisores Generales de Mina.
- Crear en la base de datos de extensómetros de los botaderos, archivos para nuevas instalaciones.

Notificar al Ingeniero Geotécnico sobre cualquier tipo de problema que se presente con el software de extensómetros.

PERSONAL CARGO DE LA INSTALACIÓN Y CONTROL

El personal que se encuentra laborando en los botaderos son los mas indicados para realizar la instalación y control. Para la instalación de los extensómetros los Pit Utility y para el control los operadores de tractor y motoniveladora ya que la toma de lecturas no va a requerir mas de 10 minutos, sin embargo, para adquirir dicha práctica el personal deberá estar adecuadamente preparado.

El personal a cargo de la labor de control deberá actuar de la siguiente manera:

Cumplir con realizar la toma de lecturas en las horas establecidas, cualquier cambio le será previamente notificado.

- Una vez que tome las lecturas llamar a dispatch e informar.
- Ubicar y mantener los extensómetros en el botadero bajo la dirección del Supervisor General de Mina, el Supervisor en Turno y el Ingeniero Geotécnico o su designado.

3. INSTALACIÓN DE EXTENSÓMETROS

Consiste en instalar el instrumento en el lugar donde se desea controlar, este consta de un trípode (cuyas especificaciones técnicas para su diseño obra en el departamento de Mantenimiento – Servicios), una estaca, una pesa (Ver Foto N°5) no menor de 9Kg, un clavo y un cable especial (wire rope) que no se deforma, para mejor referencia ver Foto N°6 y Foto N°7).

El procedimiento consiste en lo siguiente:

Los extensómetros se ubicarán en la cresta del botadero, para ello es necesario (Ver Foto N°8) abrir una ventana en la berma con un ancho no mayor al ancho del lampón (Hoja Topadora) de un tractor, el objetivo es de controlar los abultamientos que se puedan producir en el frente del botadero y al mismo tiempo controlar las partes mas activas (Ver Foto N°9).

En esta ventana clavar una estaca no menor a 1.00 m y asegurar el cable mas o menos a 10 cm del extremo, verificar que la estaca esté estable.

- Luego estirar el cable (wire rope) hasta alcanzar la última grieta existente o desnivel en la plataforma del botadero. Detrás de aquella, instalar el trípode, el alineamiento entre la estaca y el trípode debe ser lo más perpendicular posible a la grieta o al desnivel.
- En la instalación no colocar el trípode a una distancia menor a 15.00 m de la berna. La longitud del extensómetro es variable y depende sobre todo de la posición de las grietas y desniveles.
- Pasar el cable por la polea que se encuentra en el trípode, jamás instalar extensómetros sin polea.
- Asegurar el trípode, para ello las patas cuentan con platinas especialmente adaptadas sobre las cuales se colocarán rocas grandes para evitar su balanceo.
- Asegurar la pesa con el cable mediante un clavo, si se diera el caso que se necesite alargar el cable el procedimiento será más simple. Jamás anudar el cable ya que éste podría soltarse, es recomendable dejar siempre una cantidad prudencial de cable sobrante para ser utilizado si fuera necesario.
- Todas las pesas cuentan con un clavo señalador soldado sobre la superficie de la pesa, la finalidad es que este elemento sea el punto base para la toma de las lecturas. De ninguna manera se deben tomar lecturas con la superficie plana de la pesa ya que los bordes podrían ser redondeados y entonces esto llevaría a confusión.
- Las lecturas deben tomarse sobre la cinta métrica graduada y montada sobre la platina que pende paralelamente a la polea, esta cinta métrica debe colocarse de abajo hacia arriba considerando una numeración (el número menor abajo y el mayor arriba) ascendente. La graduación puede ser expresada en milímetros o centímetros, nunca en pulgadas.
- El cable y la polea deben trabajar libremente. Verificar también que el cable no tenga roturas o uniones mal aseguradas.
- En el caso de que los extensómetros tuvieran una longitud mayor a 20.00 m apoyar el cable en otro trípode que podría ser colocado a la mitad de distancia, la finalidad es evitar la catenaria del cable.
- Los espacios entre los extensómetros activos no deben exceder los 200 metros.
- Si hay necesidad de rellenar y nivelar el botadero retirar el extensómetro y

reinstalarlo si fuera posible en la misma posición, cualquier cambio de posición mayor a 5.00 m de alejamiento deberá ser considerado como una nueva estación de monitoreo.

- Si los rangos de movimiento de los extensómetros son menores a 3 cm/h entonces no hay necesidad de cambiar el extensómetro a otra posición.
- Colocar cintas fosforescentes a lo largo del cable para evitar accidentes, especialmente en la guardia de noche.
- Si el cable que sujeta a la pesa resultara ser demasiado pequeño entonces se debe proceder de la siguiente manera:
 - Primero, registrar la hora y lectura antes de realizar cualquier cambio.
 - Segundo, soltar el cable.
 - Tercero, si fuera el caso que solo tuviera que alargarse la cuerda, asegurar el cable con el clavo y tomar una nueva lectura.
 - Cuarto, si fuera el caso que se tenga que retroceder o adelantar el trípode en la misma dirección, soltar el cable y después del movimiento asegurarlo nuevamente y tomar una nueva lectura.

4. CONTROL

- Para controlar un extensómetro, el procedimiento consiste en aproximar la pesa que se encuentra suspendida del cable y que tiene un clavo guía a la cinta métrica, luego, anotar la lectura que marcó sobre la cinta (Ver Foto N°10, Foto N°11 y Foto N°12).
- La frecuencia de control está definido por la velocidad de desplazamiento. Los despachadores tienen estas indicaciones en las hojas de cálculo, que son las siguientes: (Ver Foto N°13, Foto N°14 y Foto N°15):
 - Menor de 3cm/h: cada cuatro horas
 - De 3cm/h a 5cm/h: cada dos horas
 - De 5cm/h a 10cm/h: cada hora
 - De 10cm/h a 15cm/h: cada 10 minutos

- Los niveles críticos de alarma en los extensómetros son:
 - Menor a 3cm/h aparecerá en la base de datos una llamada de **OK**
 - De 3cm/h a 5cm/h aparecerá en la base de datos una llamada de **WATCH**
 - De 5cm/h a 15cm/h aparecerá en la base de datos una llamada de **WARNING**
 - Mayor a 15cm/h aparecerá en la base de datos una en la de **DANGER**

- Una vez registrada la lectura por los controladores de campo, esta debe ser informada al despachador con la hora exacta a la que se tomó, posteriormente, como ya se indicó anteriormente el despachador deberá ingresar esta información a la base de datos e informar de los resultados al Supervisor General de Mina, Supervisor de Mina e Ingeniero Geotécnico.

5. ENTRENAMIENTO

Con el objetivo de asegurar la estabilidad de los botaderos. Es necesario que las personas encargadas de instalación y control de los extensómetros, cumplan estrictamente los procedimientos de operación y control, con el fin de asegurar la eficiencia del equipo y disponer de información oportuna para tomar medidas correctivas, para lo cual, se les debe entrenar, en los siguientes aspectos:

- Capacitar a los Pit Utility en la instalación rápida de extensómetros.
- Capacitar a los operadores de tractor y motoniveladora para la toma de las lecturas ya que ellos se encuentran constantemente en los botaderos.
- Asegurar que las lecturas sean realizados correctamente.
- Supervisar que las lecturas tomadas en campo sean adecuadamente informadas al despachador
- Verificar en que condiciones se encuentra los taludes del botadero, es decir, que verifique la formación de abultamientos en el pie del talud o en el talud (Ver Foto N°16).
- Capacidad de inspección visual de agrietamientos y asentamientos para ser informados a las personas involucradas con los botaderos (Ver Foto N°17).
- Estén familiarizado con todos los procedimientos de monitoreo del botadero.

7.5. RESULTADOS

Como se ha mencionado en la Compañía Minera, se ha implementado un sistema de control geotécnico mediante extensómetros en sus botaderos de desmontes denominados “Botadero 4553”, “Botadero 4580” y “ Depósitos de Lodos”.

Los registros de los extensómetros son llevados a cabo por el departamento de geotecnia, en colaboración con el área mina. La toma de registros se lleva a cabo varias veces al día dependiendo de la variación de un registro con otro.

Estos registros son presentados en Hojas de Excel en donde se digita la ubicación del extensómetro, fecha y hora de registro. La lectura, es transformada en velocidad de desplazamiento, siendo este el parámetro a controlar, con la finalidad de determinar si se presenta inestabilidad o no (Ver tablas de los registros de datos obtenidos por los extensómetros – Apéndice VII).

Estos registros son graficados (Ver graficas en el Apéndice VII) en donde podemos observar cuando y cuanto fue la velocidad que se registro como una señal de peligro (Cabe señalar que la velocidad para este nivel es de 2.5 cm/h).

Los datos obtenidos por el autor corresponden a los botaderos que se muestra en el cuadro siguiente:

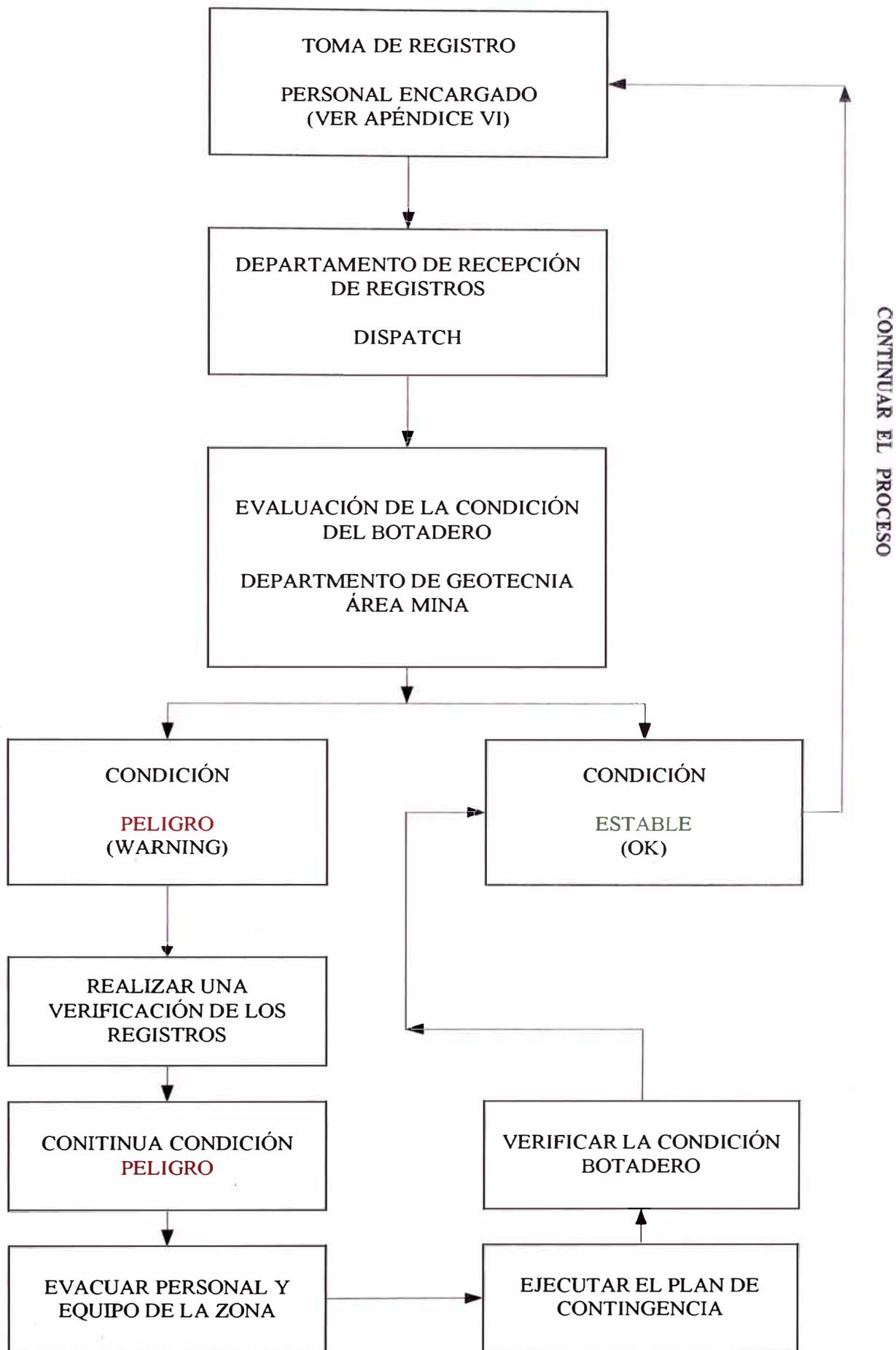
| BOTADEROS | EXTENSÓMETROS |
|---------------|--|
| Botadero 4553 | Extensómetro 4553 – 12 Extensómetro 4553 – 14 |
| Botadero 4580 | Extensómetro 4580 – 16 Extensómetro 4580 – 20 Extensómetro 4580 – 21 Extensómetro 4580 – 22 Extensómetro 4580 – 23 |

Como resultado de las mediciones, se ha realizado la zonificación del área de botaderos (Ver Plano N°1), con el propósito de tener su ubicación y así poder determinar que calidad de material se puede descargar. En el plano se puede observar la dirección de que debe seguir la descarga y a su vez se puede observar las diferentes coloraciones que indican las zonas activas e inactivas.

Todo este proceso se puede observar en el Diagrama N°3.

DIAGRAMA N°3

PROCESO DE CONTROL PARA LOS BOTADEROS
CASO PRÁCTICO



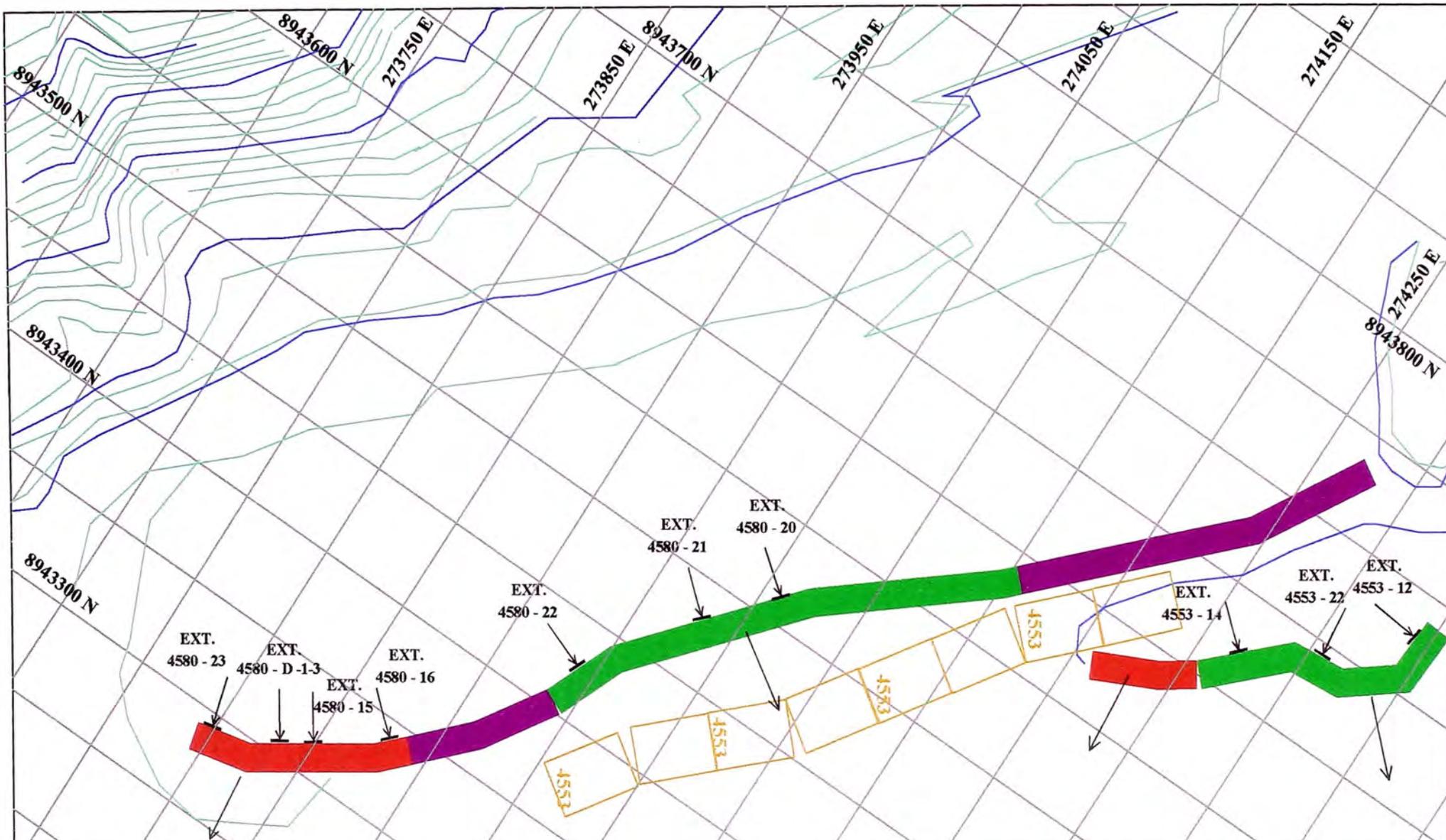
HOJA DE INGRESO DE DATOS DE EXTENSOMETRO

EXTENSOMETRO 4580-23

| NIVELES DE ALARMA | | | | |
|-------------------|---------------|---------|-----------------|---------------------------------|
| <i>cm/hr</i> | 0 | OK | Menor de 1cm/h | Cada 4 horas (tres por guardia) |
| 1 | 2.5 | Watch | De 1 a 2.5 cm/h | Cada 2 horas |
| 2.5 | 5 | Warning | De 2.5 a 5 cm/h | Cada hora |
| | > 5 | Danger | mayor a 5 cm/h | Cada 10 minutos |

| | COORDENADAS | |
|-----------|-------------|-------------|
| | TRIPODE | ESTACA |
| NORTE | 8943443.394 | 8943423.579 |
| ESTE | 273804.664 | 273824.812 |
| ELEVACION | 4586.594 | 4584.212 |

| FECHA (mm/dd/yy) | HORA (hh:mm) | CODIGO FECHA - HORA | LECTURA (cm) | CAMBIO LECTURA (cm) | Desp. cm | Total Desp. cm | Horas time | Horas decimal | Velocidad cm/hr | Tiempo días | Velocidad Total cm/día | Niveles de Alarma | Observaciones |
|---------------------|-----------------|------------------------|-----------------|------------------------|------------------------|-------------------|---------------|------------------|--------------------|----------------|---------------------------|-------------------|---------------|
| 16-Mar-01 | 18:00 | 36966.75000 | 10.70 | | Lectura Inicial | | | | | | | | |
| 16-Mar-01 | 18:15 | 36966.76042 | 10.75 | | 0.050 | 0.050 | 0.010 | 0.250 | 0.200 | 0.010 | 4.800 | OK | |
| 16-Mar-01 | 21:00 | 36966.87500 | 10.60 | | -0.150 | -0.100 | 0.115 | 2.750 | 0.055 | 0.125 | 0.800 | OK | |
| 17-Mar-01 | 00:57 | 36967.03958 | 10.80 | | 0.200 | 0.100 | 0.165 | 3.950 | 0.051 | 0.290 | 0.345 | OK | |
| 17-Mar-01 | 05:00 | 36967.20833 | 11.00 | | 0.200 | 0.300 | 0.169 | 4.050 | 0.049 | 0.458 | 0.655 | OK | |
| 17-Mar-01 | 09:20 | 36967.38889 | 11.40 | | 0.400 | 0.700 | 0.181 | 4.333 | 0.092 | 0.639 | 1.096 | OK | |
| 17-Mar-01 | 13:00 | 36967.54167 | 11.50 | | 0.100 | 0.800 | 0.153 | 3.667 | 0.027 | 0.792 | 1.011 | OK | |
| 17-Mar-01 | 16:23 | 36967.68264 | 11.90 | | 0.400 | 1.200 | 0.141 | 3.383 | 0.118 | 0.933 | 1.287 | OK | |
| 17-Mar-01 | 21:00 | 36967.87500 | 11.60 | | -0.300 | 0.900 | 0.192 | 4.617 | 0.065 | 1.125 | 0.800 | OK | |
| 18-Mar-01 | 01:00 | 36968.04167 | 11.90 | | 0.300 | 1.200 | 0.167 | 4.000 | 0.075 | 1.292 | 0.929 | OK | |
| 18-Mar-01 | 04:00 | 36968.16667 | 11.90 | | 0.000 | 1.200 | 0.125 | 3.000 | 0.000 | 1.417 | 0.847 | OK | |
| 18-Mar-01 | 10:35 | 36968.44097 | 12.70 | | 0.800 | 2.000 | 0.274 | 6.583 | 0.122 | 1.691 | 1.183 | OK | |
| 18-Mar-01 | 13:45 | 36968.57292 | 12.90 | | 0.200 | 2.200 | 0.132 | 3.167 | 0.063 | 1.823 | 1.207 | OK | |
| 18-Mar-01 | 17:11 | 36968.71597 | 12.80 | | -0.100 | 2.100 | 0.143 | 3.433 | 0.029 | 1.966 | 1.068 | OK | |
| 18-Mar-01 | 21:15 | 36968.88542 | 13.00 | | 0.200 | 2.300 | 0.169 | 4.067 | 0.049 | 2.135 | 1.077 | OK | |
| 19-Mar-01 | 01:22 | 36969.05694 | 13.00 | | 0.000 | 2.300 | 0.172 | 4.117 | 0.000 | 2.307 | 0.997 | OK | |
| 19-Mar-01 | 04:45 | 36969.19792 | 13.20 | | 0.200 | 2.500 | 0.141 | 3.383 | 0.059 | 2.448 | 1.021 | OK | |
| 19-Mar-01 | 09:10 | 36969.38194 | 13.50 | | 0.300 | 2.800 | 0.184 | 4.417 | 0.068 | 2.632 | 1.064 | OK | |
| 19-Mar-01 | 13:23 | 36969.55764 | 13.50 | | 0.000 | 2.800 | 0.176 | 4.217 | 0.000 | 2.808 | 0.997 | OK | |
| 19-Mar-01 | | 36969.00000 | | | -13.500 | -10.700 | -0.558 | -13.383 | 1.009 | 2.250 | 4.756 | WATCH | |



| LEYENDA | |
|---|------------------------|
| ABIERTA PARA LA DESCARGA | EXTENSÓMETRO |
| CERRADO PARA LA DESCARGA | DIRECCIÓN DEL BOTADERO |
| ZONA DE MATERIAL ALTA CALIDAD " SOLAMENTE " | |

| | |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA | |
| INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL GEOTECNICO EN LABORES MINERAS | |
| TESIS PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL INGENIERO DE MINAS | PLANO N° 01 ZONIFICACIÓN DE LA ZONA DE BOTADEROS UBICACIÓN DE EXTENSÓMETROS |
| TESISTA: RONALD HERNESTO MACAZANA ERIQUE | FECHA: DICIEMBRE 2002 |

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES

Por principio de la *mecánica de rocas*, cualquier labor de excavación que se realice en un macizo rocoso, producirá inevitablemente un desequilibrio en el mismo, porque al perturbar la masa rocosa, se eliminará el soporte natural circundante, lo que dará lugar a una alteración de las condiciones de equilibrio. Por ello, es indispensable determinar las condiciones de equilibrio pre-existentes para adoptar las medidas de prevención que aseguren su estabilidad.

En el Perú las labores mineras subterráneas son frecuentemente afectadas por fenómenos de derrumbes, explosiones y caída de rocas debido a la liberación de energía generada por la concentración de esfuerzo y los espacios vacíos dejados por las labores de accesos y explotación minera. Además, son frecuentes los incidentes de inestabilidad en depósitos de desmontes y relaves. Estos problemas son previsibles y deben ser evitados por un permanente control del comportamiento de estabilidad física desde el diseño, construcción y operación de las excavaciones mineras; es decir, un continuo registro del comportamiento de las estructuras geológicas (grietas, fallas) o deformaciones de los elementos de sostenimiento u obras de estabilización.

En minería superficial, los problemas más frecuentes se presentan en los tajos y botaderos de desmontes, los mismos que se ven afectados por deslizamientos de taludes y derrumbe de bancos. Mediante un sistema de control instrumental se puede predecir cuando será la ocurrencia de los fenómenos de inestabilidad y eliminar riesgos de pérdidas de maquinarias, vidas humanas, propiedades y evitar impactos al ambiente.

Un sistema de control consiste en la instalación de un conjunto de equipos de precisión debidamente seleccionados, ubicados en puntos estratégicos, con la finalidad de captar, registrar, transmitir información cuantitativa de esfuerzos y deformaciones (desplazamientos) mediante sus componentes. Esta información puede registrarse en forma manual, digital o transferirse mediante un sistema computarizado. La calidad de

la información dependerá de la sofisticación del equipo, su calibración, mantenimiento, y de la influencia de agentes externos no previstos; además, de la capacitación y entrenamiento de los operadores de los mismos. Los sistemas de control deben garantizar una información oportuna, altamente confiable y con facilidades para su interpretación.

Un sistema de Instrumentación de Control Geotécnico, permitirá determinar el comportamiento mecánico y dinámico de la masa rocosa entorno a la labor minera y áreas de influencia, frente a solicitaciones estáticas y dinámicas, para lo cual, será necesario cuantificar los esfuerzos y deformaciones que estarían involucrados en ellas, manifestándose como un problema de estabilidad física, la misma que debe ser evaluada para proponer medidas correctivas mediante la ejecución de obras de estabilización y/o sostenimiento adecuado.

En minería subterránea, se debe implementar el control geotécnico cuando existan presencias de incidentes de inestabilidad (hundimientos, derrumbes, explosiones y caídas de rocas, deterioro de los elementos de sostenimiento), evidencias de peligros en el área de trabajo, ampliación de operación e incremento de producción; modificación de método de minado, depósitos de desmontes y relaves. Estos aspectos se pueden presentaren las etapas de diseño, construcción, operación y cierre o abandono de las operaciones mineras.

Igualmente, en minería superficial, el control instrumental se debe aplicar principalmente en el control de los taludes de tajo, botaderos de desmontes y depósitos de relaves. En caso de no realizarse, se puede propiciar riesgos de deslizamientos, accidentes con pérdidas humanas, de equipos, propiedades, afectándose también la tasa de recuperación económica del yacimiento.

Para la implementar un sistema de instrumentación se recomienda seguir los siguientes pasos:

- Evaluación de las características lito estructurales del área involucrada motivo del control geotécnico.

- Caracterización y zonificación geomecánica e identificación de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso del área.
- Levantamiento topográfico (planta y cortes), inventario de las labores mineras e instalaciones involucradas.
- Evaluación de la problemática de inestabilización y términos de referencia para implementar control geotécnico.
- Selección del tipo de instrumentación aplicable y disponible.
- Diseño e implementación del sistema de instrumentación.
- Ejecución de programa de monitoreo, mediciones y registros de resultados.
- Interpretación de los resultados, evaluación y propuestas de medidas correctivas.

Finalmente, para asegurar la ejecución de una explotación minera, es necesario contar con un sistema de control geotécnico implementado paralelamente a las etapas del proyecto. Por tanto, su concepción y ejecución deben realizarse de acuerdo a las investigaciones básicas realizadas en la etapa de diseño, luego la construcción de acuerdo a las especificaciones técnicas y parámetros de diseño, y durante la operación siguiendo las mejores prácticas de ejecución de las operaciones unitarias y en el cierre y abandono, estableciendo un plan de cierre adecuado. En estas condiciones, con un sistema de control geotécnico implementado paralelamente a las etapas del proyecto, asegurarán los estándares y factores de seguridad minera y protección ambiental, sin accidentes ni pérdidas económicas.

CAPITULO IX RECOMENDACIONES

Difundir la aplicación de los sistemas de Instrumentación para el control geotécnico de labores mineras como un recurso tecnológico y una alternativa técnica, económica y ambiental. Propiciar entre los especialistas en geotecnia y profesionales de la explotación de minas utilizar esta tecnología como elemento de gestión de riesgos de seguridad y para minimizar, mitigar y/o evitar los Impactos Ambientales producidos por la Industria Minera.

Recomendamos a las Universidades de formación en Ingeniería de Minas, incentivar a las nuevas generaciones de Ingenieros de Minas, apliquen la información obtenida a través de la Mecánica de Rocas e implementen sistemas de instrumentación como control geotécnico en la actividad minera.

Las Promociones de Ingenieros de Minas, recomendamos organizar “Cursos Internacionales” en la difusión y transferencia tecnológica de Aplicación de la Instrumentación en Control Geotécnico en labores mineras del Perú.

CAPITULO X BIBLIOGRAFÍA

- STAGG – ZIENKIEWICZ “Mecánica De Rocas En La Ingeniería Practica” – Editorial Blume
- B.H.G. BRADY AND E.T.BROWN “Rock Mechanics For Underground Mining”
- HOEK AND E. T. BROWN “Excavaciones Subterráneas En Roca”
- E. HOEK AND J.W. BRAY “ Rock Slope Engineering”
- SLOPE INDICATOR “Slope Indicator Catalog” – 1999
- SLOPE INDICATOR “Slope Indicator Catalog” – 2000
- SOKOLNIKOFF “Treatise Of Elasticity”
- TSZWEDZICKI “Geotechnical Instrumentation and Monitoring in Open Pit and Underground Mining ”
- JHON A HUDSON “Comprehensive Rock Engineering ” Volumen 3 – Pergamon Press
- ANTAMINA “Infórmes y Reportes”