

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE METALÚRGIA Y MATERIALES

SANTIAGO – CHILE



INSTRUMENTACIÓN GEOMECÁNICA APLICABLE
AL MACIZO ROCOSO PRIMARIO DE LA DIVISIÓN
EL TENIENTE - CODELCO

Presentado por

BENJAMÍN ARTHUR CONTRERAS DIMAS

MEMORIA PARA TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor guía

Ing. RODRIGO ZEPEDA ARAYA

Correferente

PhD. RODRIGO ESTAY HUIDOBRO

MSc. PATRICIO CAVIERES ROJAS

3 de diciembre 2021

Agradecimientos y dedicatoria

Primero que todo agradezco a mi madre por toda la paciencia, el sacrificio que ha hecho por mí a lo largo de toda mi vida.

En segundo lugar, agradezco a mis abuelos por cuidarme, enseñarme valores y costumbres.

A continuación, quisiera agradecer a mis amigos más cercanos que me han ayudado de alguna u otra forma en algún momento de mi etapa como estudiante universitario. Dentro de ellos están: José Miguel Ongaro, Valeria Martínez Zurita, Gonzalo Muñoz Olivares, Matías Barrientos Retamal, María Ignacia Henríquez, Salomón Benavidez Aquino, Felipe Reyes Valenzuela, Brian Jeldres Alegría y Sofía Silva García. Muchas gracias por su apoyo académico, emocional y fraternal durante los diferentes períodos de la vida universitaria.

También, agradezco a las personas que conocí en CODELCO las cuales me han ayudado a crecer como profesional. Dentro de ellos se encuentran: Francisco Castro, Luis González, Militza Luppi, Ernesto Labbé, Iván San Martín, Maikel Gharagoslo, Víctor Gatica, Rodrigo Zepeda, Patricio Cisternas, Franco Villarroel, Edgar Retamal, Jorge Espíndola, Carlos Moraga por sus múltiples enseñanzas y aprendizajes.

Además, debo dar mi enorme gratitud al profesor Patricio Cavieres por gran el apoyo que me ha brindado en todo lo relacionado con este trabajo de título. Me compartió su tiempo que lo aprecio bastante y por lo cual le estoy eternamente agradecido. Espero seguir aprendiendo de grandes profesionales como usted.

Por último, agradezco especialmente al profesor Víctor Encina por su confianza y apoyo. Y al profesor Rodrigo Estay, ya que considero que son los profesores que más horas de trabajo y esfuerzo le han dedicado al desarrollo de nuestra carrera en la UTFSM.

Finalmente, dedico este trabajo a todos los futuros profesionales interesados sobre la instrumentación geomecánica.

Resumen

Este trabajo tiene por objetivo evaluar la aplicabilidad de nuevos instrumentos que permitan a la Unidad de Instrumentación Geomecánica y Data Science (IGDS) de la Superintendencia de Estudios Geomecánicos (SEG) monitorear y prevenir los principales riesgos geomecánicos de la División que son: estallidos de rocas, caídas de cuñas, sobre excavaciones en desarrollos verticales y horizontales, control de la subsidencia, airblast, colapsos de pilares y propagación del caving que afecten directamente la infraestructura y procesos críticos de la DET. Para lograr la evaluación y propuesta de instrumentación se recopiló información de los dispositivos utilizados a lo largo de la historia de la División, se registraron sus costos, ventajas y desventajas, experiencias y aprendizajes, se identificaron las variables críticas como: temperatura de operación, umbrales de medición, el tipo de roca para el cual fue diseñado el instrumento, la resistencia a la corrosividad y/o ambientes altamente abrasivos. Además, también se realizó un benchmarking nacional e internacional para comparar el estado actual de la División con otras operaciones mineras respecto a la instrumentación geomecánica.

Finalmente, en base a todo lo mencionado anteriormente, para el monitoreo de la sismicidad se recomienda mantener el uso de geófonos y acelerómetros tal como se ha hecho hasta la actualidad, Geo4Sight y Cave trackers para el monitoreo del caving, Crab-Robot o BHC para la auscultación de pilares, Zeb Horizon y drones con HOVERMAP para el control de los accesos y túneles principales, tiltmeters para monitorear la Pipa Braden, cables SSTDR o TDR para la subsidencia, para el monitoreo de esfuerzos celdas HI y para la medición de esfuerzos celdas HI, AE y la celda BX CCBO, extensómetros y celdas de carga para el monitoreo del campo cercano de la infraestructura crítica como puntos de vaciado o salas de chancado, pernos con strain gauges o fibra óptica para monitorear la carga y el estado de éstos mismos.

Abstract

The objective of this work is to evaluate the applicability of new instruments that allow the Geomechanical Instrumentation and Data Science Unit (IGDS) of the Superintendence of Geomechanical Studies (SEG) to monitor and prevent the main geomechanical risks of the Division which are: rock bursts, wedge falls, over excavations in vertical and horizontal developments, subsidence control, airblast, pillar collapses and caving propagation that directly affect the infrastructure and critical processes of the DET. To achieve the evaluation and instrumentation proposal, information was gathered on the devices used throughout the history of the division, their costs, advantages and disadvantages, experiences and lessons learned, critical variables were identified, such as: operating temperature, measurement thresholds, the type of rock for which the instrument was designed, resistance to corrosiveness and/or highly abrasive environments. In addition, a national and international benchmarking was also carried out to compare the current state of the division with other mining operations with respect to geomechanical instrumentation.

Finally, based on the above mentioned, for seismicity monitoring it is recommended to maintain the use of geophones and accelerometers as it has been done so far, Geo4Sight and Cave trackers for caving monitoring, Crab-Robot or BHC for pillar auscultation, Zeb Horizon and drones with HOVERMAP for access and main tunnels control, tiltmeters to monitor the Braden Pipe, SSTDR or TDR cables for subsidence, HI cells for stress monitoring and HI cells, AE and BX CCBO cell for stress measurement, strain gauges and load cells for near-field monitoring of critical infrastructure such as pour points or crushing rooms, strain gauges or fiber optic bolts to monitor the load and condition of the bolts.

Keywords: geomechanical instrumentation, División El Teniente Codelco Chile, geomechanical instrumentation and data science unit, remote monitoring.

Glosario

DET: División El Teniente

PNNM: Proyecto nuevo nivel mina

Hanging Wall (HW): A la dirección Oeste o poniente se le denomina “cabeza” es una jerga heredada en la División.

Foot Wall (FW): La dirección Este u oriente se le denomina “patilla”, ya que también es una jerga heredada.

Ristra: Serie larga de cosas, iguales o análogas, que están una tras otra. Para este trabajo la ristra consta de elementos como cable coaxial, cable de nylon, conduit (tuvo PVC) y sensores G4ST.

TDR (time domain reflectometer): Es un instrumento electrónico usado para determinar el movimiento de la roca observando hasta donde llegan las ondas electromagnéticas transmitidas a través del cable.

SSTDR (Spread-spectrum time-domain reflectometry): Es una técnica de medición para identificar fallos, usualmente en corrientes eléctricas, mediante la observación de las señales de ancho espectro reflejadas.

BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry): Respuesta acústica (10 a 12 GHz) que es retro dispersada desde cada segmento de la fibra óptica estimulada con luz monocromática incidente.

SEG: Superintendencia de Estudios Geomecánicos.

SGO: Superintendencia de Geomecánica Operacional.

GRMD: Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo.

Epóxico: Significa que está formado por la resina epoxi, la cual es un compuesto mezclando resina y un catalizador.

Azimut: Es el ángulo que hace la línea de rumbo del plano geológico con el norte, medido siempre en el sentido de horario.

Dip: Es el ángulo entre el plano horizontal y el plano geológico de alguna estructura como fallas.

Cave back: Propagación del caving desde el nivel de hundimiento hasta la superficie.

Precisión: Es la concordancia entre las medidas obtenidas de la misma cantidad, realizadas en condiciones similares.

Exactitud: Es el grado de concordancia entre el valor verdadero y el valor medido.

Sensibilidad: La sensibilidad de un instrumento de medición se relaciona con el valor mínimo de la cantidad de una magnitud, que es capaz de medir. Se admite generalmente que la sensibilidad, de un aparato de medida, es la División más pequeña de su escala de medida.

Transductor: Es un dispositivo que transforma una magnitud física (mecánica, térmica, magnética, eléctrica, óptica, etc.) en otra magnitud, generalmente eléctrica y dicha señal está en volts (V) o milivolts (mV).

Transmisor: Envía una señal en miliamperes (mA).

Sensor: Siempre está en contacto con la magnitud que lo condiciona o la variable de interés.

Potenciómetro: Resistencias especiales que están formadas por una parte fija con resistencia y una móvil en contacto con la misma que, al desplazarse, hace variar la resistencia entre los contactos, es decir, es un resistor al que se le puede variar el valor de su resistencia.

AE: Emisiones acústicas utilizadas para la medición indirecta de esfuerzos basada en el efecto Kaiser.

Índice

1	Introducción	15
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo General.....	15
1.1.2	Objetivos Específicos.....	15
1.2	Alcances	15
1.3	Metodología.....	15
2	Método de explotación y geología.....	16
2.1	Método de explotación	16
2.1.1	Variantes del Panel Caving.....	18
2.1.2	Subsidencia	20
2.2	Formación geológica.....	21
2.3	Propiedades geotécnicas de la roca intacta y del macizo rocoso predominantes en el Teniente.....	22
3	Fundamentos de la instrumentación geomecánica.....	24
3.1	Potenciómetro	24
3.2	Cuerda vibrante (vibrating wire)	24
3.3	Medición directa de deformación mediante strain gauges	25
3.4	Micro ElectroMechanical System (MEMS)	25
3.5	Tecnología TDR, STDR, SSTDR y BOTDR.....	26
3.6	LiDAR.....	30
4	Antiguas tecnologías de instrumentación.....	31
4.1	USBM Overcoring (United State Bureau of Mines).....	31
4.2	Celda CSIR Doorstopper (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)	32
4.3	Celda SISC (uniaxial)	33
4.4	Celda Yoke (biaxial)	33
4.5	Stressmeter (uniaxial)	34
4.6	Jointmeters.....	35
4.7	Argollas de convergencia	35
5	Tecnología actual de la instrumentación	37
5.1	Extensómetros.....	37

5.1.1	Multipunto (Multipoint borehole extensometer o MPBX):.....	37
5.2	Celdas de carga	40
5.2.1	Eléctricas	40
5.2.2	Hidráulicas	41
5.3	Celda Hollow Inclusion (CSIRO HI cell)	42
5.4	Cables coaxiales y fibra óptica	45
5.5	Inclinómetros.....	46
5.5.1	Tubería inclinométrica.....	48
5.5.2	Inclinómetros-extensómetros 3D	49
5.6	Tiltmeters.....	49
5.7	Crackmeters	50
5.8	Borehole Camera (BHC)	52
5.9	Flat jack.....	53
5.10	Scanner 3D.....	55
5.10.1	Scanner Estático	55
5.10.2	Scanner de cavidades	56
5.11	Estación total más prismas topográficos	57
5.12	Geófonos y Acelerómetros	58
5.13	Emisiones Acústicas (AE)	61
5.14	Tomografía.....	62
5.15	Pilarómetro	63
6	Resumen de Instrumentación geomecánica.....	66
7	Clasificación por procesos mineros e infraestructura crítica	69
8	Lecciones aprendidas	71
9	Nuevas tecnologías de instrumentación geomecánica.....	73
9.1	Crab-Robot	73
9.2	Geo4Sight Tilt (Elexon Mining).....	74
9.3	Cave trackers	76
9.4	GPR	79
9.5	ANZI Strain Cell	81

9.6	BX CCBO	83
9.7	Drones	83
9.8	Olympus	85
9.9	HoloLens 2	86
9.10	Pernos	88
9.10.1	MICOMO.....	88
9.10.2	Mining3.....	88
9.10.3	Mine desing technologies.....	89
9.10.4	Geosystems	89
9.11	GyroMaster	91
9.12	Reflex Act III	92
9.13	Smart Monitoring.....	92
9.14	Vine Robot y TRMR	93
9.15	Scanner Zeb Horizon (GeoSlam)	94
10	Análisis	97
10.1	Benchmarking	97
10.2	Comparación entre Celda HI y BX CCBO	99
10.3	Análisis FODA	100
10.4	Comparación entre pernos normales y pernos inteligentes	105
10.5	Transmisión de datos e información y su visualización	105
11	Arquitectura del sistema de manejo, transmisión y almacenamiento de datos.....	106
12	Conclusiones y Recomendaciones	108
13	Bibliografía	111

Índice de ilustraciones

Ilustración 2.1 Ejemplo de los diferentes niveles de la mina Diamante.....	17
Ilustración 2.2 Zonas de relajación, transición y de preminería producto de la actividad minera (Encina, 2019).....	18
Ilustración 2.3 Redistribución de esfuerzos para el hundimiento convencional y su respectiva zona ZT (D1) (Cavieres, 2021).....	18
Ilustración 2.4 Redistribución de esfuerzos para el método de hundimiento previo (Cavieres, 2021).....	19
Ilustración 2.5 Redistribución de esfuerzos para el método de hundimiento avanzado (Cavieres, 2021).....	19
Ilustración 2.6 Fenómeno de subsidencia debido a la explotación mediante métodos de caving.....	20
Ilustración 2.7 Borde cráter del área de subsidencia en DET (Expandemineria, 2021).....	21
Ilustración 2.8 Formación geológica del Teniente junto con los UCL de Esmeralda, Diablo Regimiento y el Sub6.....	22
Ilustración 3.1 Fundamento básico del funcionamiento de la cuerda vibrante presente en varios instrumentos geomecánicos (Hui, 2014).....	24
Ilustración 3.2 Cambio de la resistencia del strain gauge dependiendo de su extensión o compresión (elaboración propia).....	25
Ilustración 3.3 Acelerómetro creado en base de silicio (Level developments, 2020).....	26
Ilustración 3.4 Señal STDR (Wimmer & Ouchterlony, 2008).....	27
Ilustración 3.5 Respuesta de correlación de la señal STDR (Wimmer & Ouchterlony, 2008).....	27
Ilustración 3.6 Señal SSTDR (Wimmer & Ouchterlony, 2008).....	27
Ilustración 3.7 Respuesta de correlación de la señal SSTDR (Wimmer & Ouchterlony, 2008).....	28
Ilustración 3.8 Ejemplo de distribución de deformación a lo largo de la fibra óptica (izquierda) y distribución de frecuencias características en cada posición (derecha) (Centro de Modelamiento Matemático (CMM), 2009).....	29
Ilustración 3.9 Espectro de dispersión Brillouin tri-dimensional, describiendo la distribución de la potencia de luz para distintas frecuencias y posiciones a lo largo de la fibra óptica (Zhang & Wu, 2008).....	30
Ilustración 3.10 Tecnología LiDAR utilizada en minería para la creación de triangulaciones de las excavaciones en minería subterránea (GeoSLAM, 2021).....	30
Ilustración 4.1 Celda medidora de deformaciones desarrollado por U.S Bureau of mines (Dunnicliff, 1998).....	31
Ilustración 4.2 Metodología del overcoring USBM (Cavieres, 1992).....	31
Ilustración 4.3 Gráfico típico de la deformación diametral vs la profundidad del overcoring (ISRM, 1987).....	32
Ilustración 4.4 Metodología del CSIR Doorsttoper (Cavieres, 1992).....	33
Ilustración 4.5 Celda SISC (Madrid, 2005).....	33
Ilustración 4.6 Celda Yoke (Madrid, 2005).....	34
Ilustración 4.7 Medidor de deformaciones de la celda Yoke (Dunnicliff, 1998).....	34
Ilustración 4.8 Sección transversal del stressmeter y Stressmeter (Amadei & Stephansson, 1997).....	35

Ilustración 4.9 Configuración del Jointmeters (Madrid, 2005).....	35
Ilustración 4.10 Triangulación mediante las argollas de convergencia (Valdivia C. , 1998).....	36
Ilustración 5.1 Se muestra el cabezal del instrumento con las varillas (SISGEO, 2020).	37
Ilustración 5.2 En la imagen (a) se observa las partes del extensómetro y en la imagen (b) se observa en sistema de packers (SISGEO, 2020).....	38
Ilustración 5.3 Medición con extensómetro multipunto en la mina esmeralda (SGO, 2019).....	39
Ilustración 5.4 Extensómetro utilizado en la construcción de la sala de chancado de Andes Norte (Valdivia, 2021).	40
Ilustración 5.5 Esquema del circuito Wheatstone (Electronics Coach, 2021).....	40
Ilustración 5.6 Celda de carga y su aplicación sobre un perno (SISGEO, 2020).....	41
Ilustración 5.7 Ejemplo de medición con celdas de carga (Valdivia, 2021).	41
Ilustración 5.8 Celda de carga tipo hidráulica (GEOSENSE, 2021).....	41
Ilustración 5.9 Celda Hollow Inclusion Digital, la cual posee un largo de 50cm aproximadamente (Moraga, 2021).	42
Ilustración 5.10 Dimensiones principales de la celda HID (Moraga, 2021).....	43
Ilustración 5.11 Descripción de la metodología overcoring con la celda CSIRO Hollow Inclusion Digital (Moraga, 2021).....	43
Ilustración 5.12 Ejemplo de monitoreo de esfuerzos mediante la celda HI en el subnivel de ventilación de la mina diablo regimiento (SGO, 2019).	44
Ilustración 5.13 Disposición de los strain gauges en la celda Hollow Inclusion (Child, 2008).	45
Ilustración 5.14 Componentes del cable coaxial y la fibra óptica (McCarthy, 2019).	46
Ilustración 5.15 Ejemplo de medición empleando inclinómetros en DET en Andes Norte (Valdivia, 2021).	46
Ilustración 5.16 Ejemplo de inclinómetro “In-place” (SISGEO, 2020).....	47
Ilustración 5.17 Ranuras de los ejes que se miden con el inclinómetro (Dunnicliff, 1998).	47
Ilustración 5.18 Principio de operación del inclinómetro (Dunnicliff, 1998).....	48
Ilustración 5.19 Tubería inclinométrica (SISGEO, 2020).....	48
Ilustración 5.20 Inclinómetro-extensómetro y sus componentes (SISGEO, 2020).	49
Ilustración 5.21 Tiltmeter MEMS Biaxial eléctrico con señales de output de 4-20[mA] (RST INSTRUMENTS, 2016).....	49
Ilustración 5.22 Ejemplo de utilización de tiltmeter para la Nave de Mantención (Valdivia, 2021).	50
Ilustración 5.23 Ejemplo de medición de la deformación en mina esmeralda (SGO, 2019).....	51
Ilustración 5.24 Instalación típica de la placa de protección (SISGEO, 2020).....	51
Ilustración 5.25 Configuración para una medición 3D (GEOKON, 2021).....	51
Ilustración 5.26 Ejemplo de aplicación de este instrumento en la mina esmeralda (SGO, 2019).	52
Ilustración 5.27 A la izquierda se observa el interior del pozo de auscultación y a la derecha se observa el equipo de comando del BHC (Madrid, 2005).....	52
Ilustración 5.28 Índice de daño en el pilar de acuerdo con el estado del macizo rocoso observable mediante el análisis del interior del tiro de auscultación grabado con la BHC (Varela, 2019).....	53

Ilustración 5.29 Elementos que componen el Flatjack (SISGEO, 2020).....	54
Ilustración 5.30 Ejemplo de aplicación en la mina (SGO, 2019).....	54
Ilustración 5.31 A la izquierda Modelo Focus S350 (Microgeo, 2021) y en la derecha un ejemplo de análisis de sobre excavaciones con el instrumento (SGO, 2019).....	55
Ilustración 5.32 Equipo CMS V500 (Microgeo, 2016).....	56
Ilustración 5.33 C-ALS (Carlson, 2019).....	56
Ilustración 5.34 Escaneo de una cavidad mediante el instrumento C-ALS (Carlson, 2019).....	57
Ilustración 5.35 Miras de prismas (izquierda) y Estación Leica TM30 (derecha) (Madrid, 2005).	58
Ilustración 5.36 Criterio de Triggers realizado mediante la medición con geófonos y acelerómetros en Pilar Norte (Jorquiera, 2019).....	59
Ilustración 5.37 A la izquierda se observan geófonos y a la derecha acelerómetros del Instituto Sismológico de Minas (IMS, 2021).	59
Ilustración 5.38 Vista N-S de la disposición actual de los geófonos y acelerómetros en la DET.	60
Ilustración 5.39 Vista en planta de la disposición actual de los geófonos y acelerómetros de la DET.	60
Ilustración 5.40 Estimación del estado inicial de esfuerzos (Blondel, 2017).....	61
Ilustración 5.41 Metodología para la determinación del campo de esfuerzos mediante emisiones acústicas (modificada de Madrid, 2005).....	62
Ilustración 5.42 Metodología de la tomografía (SGO, 2019).	63
Ilustración 5.43 Resultados de la medición de la onda Vp en cada uno de los pilares analizados (SGO, 2019).....	63
Ilustración 5.44 A la izquierda un dibujo conceptual del procedimiento aplicado a una probeta y a la derecha un ejemplo de cómo afecta el nivel de esfuerzo sobre las ondas sonoras (SGO, 2019).....	64
Ilustración 5.45 Metodología del Pilarómetro (SGO, 2019).	64
Ilustración 5.46 Ejemplo de la ubicación del emisor y receptor en Pilar Norte (SGO, 2019).....	65
Ilustración 5.47 Ejemplo de medición efectuada en pilar norte (SGO, 2019).....	65
Ilustración 6.1 Línea temporal de los métodos de medición de esfuerzos utilizados en la División El Teniente (Blondel, 2017).....	66
Ilustración 7.1 Procesos críticos por instrumentar para el corto y mediano plazo, en rojo y cyan respectivamente.	69
Ilustración 7.2 Ejemplo de instrumentación para la sala de chancado de Andes Norte (Valdivia, 2021)..	69
Ilustración 7.3 Infraestructura crítica por instrumentar para el corto y mediano plazo, en rojo y cyan respectivamente.	70
Ilustración 8.1 Efecto de las tronaduras y del trabajo de obras en el sistema de instrumentación.	71
Ilustración 9.1 Crab-Robot (Maigom, 2019).	73
Ilustración 9.2 El Geo4sight tilt puede medir el rumbo e inclinación y transmite dicha información de forma inalámbrica (ELEXON, 2021).	74
Ilustración 9.3 Esquema de trabajo en los pozos instalados desde el nivel de acarreo de Esmeralda para monitorear la interacción de cavidades sobre Pilar Norte (Cisternas, 2020).....	75
Ilustración 9.4 Elementos utilizados para el sistema de monitoreo del caving con los Geo4Sight Titl.....	75

Ilustración 9.5 Registro de la variación del rumbo e inclinación de cada uno de los dispositivos (Cisternas, 2020).	76
Ilustración 9.6 Beacon de 76mm de diámetro y 325mm de largo (ELEXON, 2021).	77
Ilustración 9.7 Ejemplo de uno de los primeros modelos de detectores creados por Elexon Mining y su disposición en la mina Argyle de diamantes de Rio Tinto (Whiteman, 2016).	78
Ilustración 9.8 De izquierda a derecha se observa un detector, el ITCAM y un beacon con la interfaz inalámbrica del usuario para la activación de los dispositivos (ELEXON, 2021).	78
Ilustración 9.9 Disminución de los registros de los dispositivos (Beacons) por la pérdida de las antenas (CODELCO, 2021).	79
Ilustración 9.10 En la parte izquierda se observa el resultado del uso del GPR en una roca masiva de granito y a la derecha el alcance en profundidad que puede alcanzar esta tecnología dependiendo del material (SENSORS & SOFTWARE, 2021).	80
Ilustración 9.11 Ejemplos de aplicación del GPR en minería a la izquierda para ver roca suelta en el techo y a la derecha para el monitoreo de infiltraciones en el muro de relaves (SENSORS & SOFTWARE, 2021).	80
Ilustración 9.12 Metodología propuesta por especialistas de SENSING&SOFT y su un ejemplo de sus resultados donde se observa un pequeño túnel en la zona roja (SENSORS & SOFTWARE, 2021).	81
Ilustración 9.13 A la izquierda se observa la celda ANZI con un diámetro de 48mm y a la derecha se aprecia la medición de los cambios de la deformación durante el overcoring (SCT , 2021).	81
Ilustración 9.14 Celda ANZI con el dispositivo para la orientación y el data logger incorporado para la captura de datos (SCT , 2021).	82
Ilustración 9.15 Metodología del método de la CCBO (Modificado de Madrid, 2005).	83
Ilustración 9.16 Prueba de drones en un SNV de la DET.	84
Ilustración 9.17 Dron accediendo a una zona inhabilitada para el personal de la mina.	84
Ilustración 9.18 Uso versátil de la tecnología LiDAR y drones (Woolmer, 2020).	85
Ilustración 9.19 Teoría detrás de la técnica del ultrasonido (Jorquiera & Celis, 2018).	85
Ilustración 9.20 Dispositivo Olympus utilizado para la medición del largo de pernos con ultrasonido en la DET (Jorquiera & Celis, 2018).	86
Ilustración 9.21 Hololens 2 (MICROSOFT, 2021).	87
Ilustración 9.22 En (a) se observa una persona realizando un test en la mina subterránea de Grasberg de la herramienta. En (b) se aprecia lo que ve el usuario de la interfaz (Barnett, 2020).	87
Ilustración 9.23 Ejemplos de las herramientas del EasyMineXR MR/VR (Barnett, 2020).	87
Ilustración 9.24 Ejemplo de la aplicación de la MR/VR para la geovisualización. A: Palabora open pit y Block cave mine, de Sudáfrica B: Fels landslide, Alaska (Barnett, 2020).	88
Ilustración 9.25 Pernos instrumentados y esquema de la transmisión de datos (Hoehn, 2020).	88
Ilustración 9.26 Perno cable con extensómetro (MDT, 2021).	89
Ilustración 9.27 En la izquierda se observa una configuración escalonada de los strain gauges y en la derecha una configuración apilada para el Digi-bolt.	89

Ilustración 9.28 A la izquierda se observa el Digi-Bolt y a la derecha la medición de los strain gauges dispuestos en el instrumento (GEOSYSTEMS, 2021).	90
Ilustración 9.29 El Digi-cable y los componentes del Digi-cable (GEOSYSTEMS, 2021).....	90
Ilustración 9.30 A la izquierda se observa el perno con la entrada de conexión con el “optical analyzer” y a la derecha se observan los slots del perno comercializado por GEOSYSTEM e INGEROC (GEOSYSTEMS, 2021).	91
Ilustración 9.31 A la izquierda se ven los pernos instalados en una galería y a la derecha un ejemplo de medición del esfuerzo de cizalle sobre los pernos en un laboratorio (Vlachopoulos & Forbes, 2020).	91
Ilustración 9.32 Instrumento de GyroMaster junto con el dispositivo visualizador de datos (SPT, 2021).	92
Ilustración 9.33 Reflex Act III (IMDEX, 2021).....	92
Ilustración 9.34 Esquema de la aplicación de Machine Learning para la gestión de los múltiples instrumentos geomecánicos (Wang, 2020).	93
Ilustración 9.35 Software Argus para la gestión y reporte de la medición de los instrumentos (SOILINSTRUMENTS, 2021).	93
Ilustración 9.36 Componentes del Vine robot (Coad, 2019).....	94
Ilustración 9.37 Robot multipropósito de reconocimiento táctico (TRMR por sus siglas en inglés) (IBEX Technologies, 2021).....	94
Ilustración 9.38 Dispositivo de GeoSlam el Zeb-Horizon (GeoSLAM, 2021).....	95
Ilustración 9.39 Metodología de trabajo para el Zeb Horizon (elaboración propia).	95
Ilustración 9.40 Captura de nube de puntos en la Calle 57 entre las zanjas 51 y 54 de la mina Esmeralda bloque 2 (elaboración propia).	96
Ilustración 9.41 La medición termina en el punto de partida, es decir, existe un trayecto de ida y uno de retorno (elaboración propia).	96
Ilustración 10.1 Al lado izquierdo se muestra la BX CCBO y sus diferentes componentes utilizados para la medición de esfuerzos y al lado derecho se muestra la celda Hollow Inclusion Digital mostrando también sus diferentes elementos que la conforman.....	99
Ilustración 11.1 Esquema general del sistema de transmisión, manejo y almacenamiento de datos (Cisternas, 2020).....	106
Ilustración 11.2 Esquema de la transmisión, manejo y almacenamiento de datos (Cisternas, 2020).	107
Ilustración 11.3 Ejemplo del sistema de conexión a través de cables coaxiales y fibra óptica para el monitoreo con GEO4SIGHT TILT (Cisternas, 2020).	107

Índice de tablas

Tabla 2.1 Ejemplos de la aplicación de las variantes del método de explotación panel caving en la división El Teniente, Codelco.....	20
Tabla 2.2 Propiedades geotécnicas de la roca intacta (Pereira, 2006).	23
Tabla 2.3 Propiedades geotécnicas del macizo rocoso (Pereira, 2006).	23
Tabla 3.1 Comparación de las tecnologías basadas en la emisión de pulsos eléctricos a través de la fibra óptica.	28
Tabla 6.1 Resumen de las metodologías utilizadas en la DET actualmente para la medición y monitoreo de esfuerzos.	66
Tabla 6.2 Instrumentos utilizados actualmente sobre los sistemas de soporte.	66
Tabla 6.3 Instrumentos utilizados actualmente para medir deformaciones y desplazamientos.	67
Tabla 6.4 Instrumentos utilizados actualmente para el control de la subsidencia y la auscultación de pilares y piques.	67
Tabla 6.5 Instrumentos empleados actualmente para el control de la sismicidad.	67
Tabla 6.6 Resumen de la instrumentación utilizada actualmente en la DET con sus costos.	68
Tabla 9.1 Costos asociados a la implementación de estos dispositivos.	75
Tabla 9.2 Resultados de las mediciones realizadas (Jorquiera & Celis, 2018).....	86
Tabla 10.1 Cantidad de inversión realizada por mina en la DET.....	97
Tabla 10.2 Gastos actuales en dólares de la IGDS en instrumentación.	97
Tabla 10.3 Comparación entre los sistemas de instrumentación en diferentes operaciones mineras tanto nacionales como internacionales (Zepeda, 2020).	98
Tabla 10.4 Comparación entre ambas celdas (elaboración propia).	100
Tabla 10.5 Precio de los elementos de soporte usualmente utilizados en la DET.	105

1 Introducción

Este documento tiene como tema central el sistema de instrumentación geomecánica utilizada por la Superintendencia de Estudios Geomecánicos y el estudio de la incorporación de nuevas tecnologías de instrumentación para la División El Teniente, ya que es fundamental monitorear el macizo rocoso de forma continua y remota los procesos críticos (caving, interacción de cavidades, entre otros) y también en los sectores de infraestructura crítica como son los puntos de vaciado que son de gran importancia para continuar con la explotación de mineral de cobre, ya que al hacer esto junto con un correcto análisis de los datos es posible tomar acciones preventivas que permitan mitigar los riesgos inherentes a las operaciones mineras.

Por todo lo anterior, es crucial contar con una instrumentación geomecánica adecuada al macizo rocoso, analizar sus oportunidades de mejora, destacar las ventajas y desventajas de cada uno de estos instrumentos, sus parámetros técnicos y económicos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

- Evaluar la aplicabilidad de nuevas tecnologías de instrumentación geomecánica para el macizo rocoso primario en la División El Teniente.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar recomendaciones para la implementación de los nuevos instrumentos geomecánicos, destacando sus ventajas y desventajas, comparando sus costos y analizando sus oportunidades de mejora.
- Revisar el estado del arte de la instrumentación utilizada históricamente en la División y en otras faenas.

1.2 Alcances

- La instrumentación geomecánica propuesta permitirá monitorear en forma continua y remota los avances de las cavidades de interés, medir esfuerzos, deformaciones y sismicidad. El estudio está enfocado solamente para la operación subterránea de la División.

1.3 Metodología

- Recopilación de información sobre la instrumentación geomecánica utilizada actualmente en la División El Teniente y en otras faenas con condiciones similares.
- Investigación sobre **nuevas tecnologías** de instrumentación y análisis de su compatibilidad con las condiciones actuales y futuras en las que se realiza la extracción del cobre.
- Definir los **fundamentos** en los cuales están basados los instrumentos geomecánicos y las **variables críticas** para analizar el grado de aplicabilidad.

- Elaboración de una comparación de los instrumentos según sus ventajas y desventajas, precios en el mercado y consideraciones técnicas.
- Realizar un análisis técnico-económico de la implementación de nuevas tecnologías aplicables al macizo rocoso.
- De forma complementaria, elaborar una guía de implementación de la instrumentación geomecánica.

2 Método de explotación y geología

2.1 Método de explotación

Para comprender la importancia del sistema de instrumentación geomecánica es necesario entender el método de explotación que se utiliza actualmente en la división.

En Teniente se utilizó métodos de explotación como Shrinkage Stopping y Pillar Caving en sus inicios (1906), posteriormente y con el paso del tiempo prosiguió el Block Caving, el cual es un método que aprovecha la energía gravitacional para propagar el hundimiento del macizo rocoso mediante un corte basal horizontal lo que comúnmente se le denomina socavación. Esto permite obtener bajos costos, una alta productividad a costa de menor selectividad en comparación a otros métodos. Al principio el Block Caving tuvo un buen desempeño, sin embargo, luego con la profundización del yacimiento y un cambio de la geología de las reservas de **mineral secundario** a **primario** (con menor ley, mayor rigidez y dureza y fragmentación más gruesa que el mineral secundario). Debido a esto aparecieron los estallidos de roca (en Teniente 4 Sur) y con ellos la necesidad de replantear el método de explotación e incorporar nuevas tecnologías como el fracturamiento hidráulico (FH) y el debilitamiento dinámico con explosivos (DDE) para enfrentar este nuevo desafío. Así es como surge el método de explotación Panel Caving, en el cual la incorporación de nuevas áreas es **continua**, mediante paneles a diferencia del Block Caving donde la incorporación es mediante bloques y **discreta**.

Para la ejecución de las operaciones con el método Panel Caving se requiere del nivel de hundimiento (conocido como under cut level o UCL) donde se realiza la socavación con jumbos de perforación radial, nivel de producción (NP) donde se extrae el mineral desde los puntos de extracción con cargadores frontales (LHD¹ o también conocidas como palas) hasta los puntos de vaciado, nivel de transporte intermedio (NTI) donde se transporta el mineral con camiones de bajo perfil desde los buzones hasta piques que llegan hasta el nivel de transporte principal (Teniente 8) y desde allí se extrae el mineral hasta Colón, por último está el subnivel de ventilación (SNV) en donde se inyecta aire fresco a la mina y se extrae el aire contaminado. En la siguiente ilustración se muestra un ejemplo de los diferentes niveles mencionados:

¹ LHD: Load Haul Dump, hay equipos 5, 7, 10, 13, 15 [yd³]. El de mayor predominancia es el de 7[yd³] con 48 equipos.

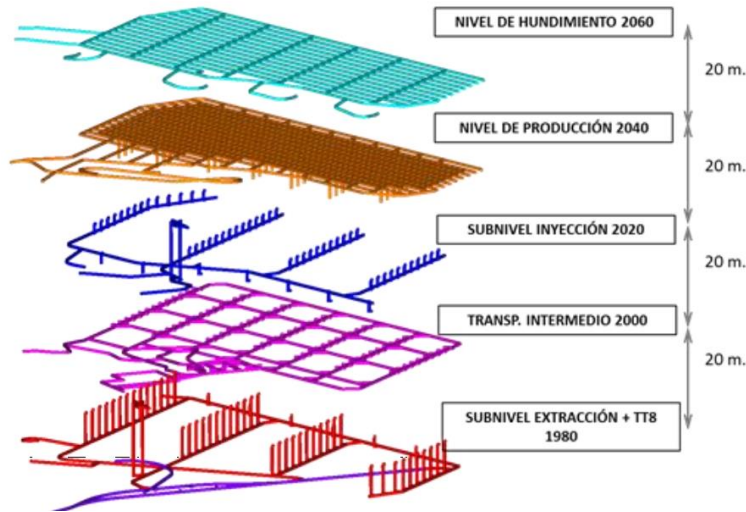


Ilustración 2.1 Ejemplo de los diferentes niveles de la mina Diamante.

La diferencia de altura entre los niveles está determinada por la ingeniería, es decir, el diseño ingenieril basado en el trabajo de geólogos, geomecánicos, entre otros. Continuando con el método Panel Caving se destacan las siguientes zonas: preparación, socavación, propagación, régimen y agotada. En la primera se realizan las obras de desarrollo vertical y horizontal, la segunda es donde se tronó en el UCL para generar la socavación, la tercera es el área con las bateas abiertas y se extrae el repele² para producir la propagación del caving y el esponjamiento del macizo rocoso, luego de una vez concluido con la etapa anterior recién se puede extraer el mineral con una tasa en régimen y es lo que conforma la cuarta zona, finalmente una vez extraído toda la columna de mineral planificada se define a esa área como agotada.

Otros aspectos que se deben controlar en el método Panel Caving son los siguientes: velocidad de extracción, geometría del frente de hundimiento (cóncavo o convexo), ángulos de fracturamiento y desplome, sismicidad, aplicación del hidrofracturamiento, tiempos post-tronadura en el NP y UCL, estrategia de crecimiento respecto a las estructuras principales y las distancias de la zona de transición. Ésta última (la zona de transición) surge, porque el hundimiento modifica el estado de los esfuerzos, generando tres zonas importantes según la distancia desde el frente de socavación:

Zona de Pre-minería: el sector está alejado del frente de socavación, por lo cual los esfuerzos y la condición del macizo rocoso no son afectados por la minería.

Zona de Transición (Abutment Stress): es la zona más afectada, ya que es donde se registran los mayores esfuerzos debido a la redistribución y concentración de éstos. Se le conoce comúnmente como la “ZT”.

² Repele: es la cantidad de macizo rocoso necesario a extraer para generar la propagación del fracturamiento a niveles superiores, esta cantidad actualmente se encuentra alrededor del 20% al 30% de la columna de mineral.

Zona de Relajación (Desconfinamiento): es la zona que queda detrás del frente de socavación. Aquí se registran esfuerzos más bajos en comparación a las zonas anteriores.

Dichas zonas se pueden observar en la siguiente ilustración:

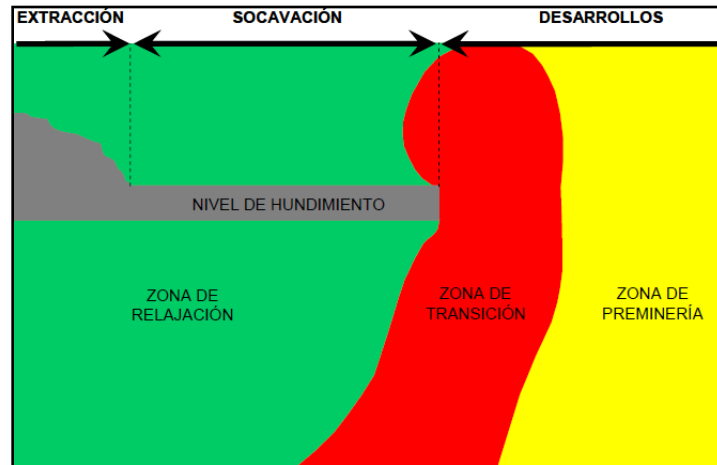


Ilustración 2.2 Zonas de relajación, transición y de preminería producto de la actividad minera (Encina, 2019).

2.1.1 Variantes del Panel Caving

Existen tres tipos de variantes del método Panel Caving:

El hundimiento convencional:

En este tipo de hundimiento los desarrollos tanto en el nivel de producción y de hundimiento ya están hechos y la apertura de bateas genera la redistribución de esfuerzos que se observa en la siguiente ilustración:

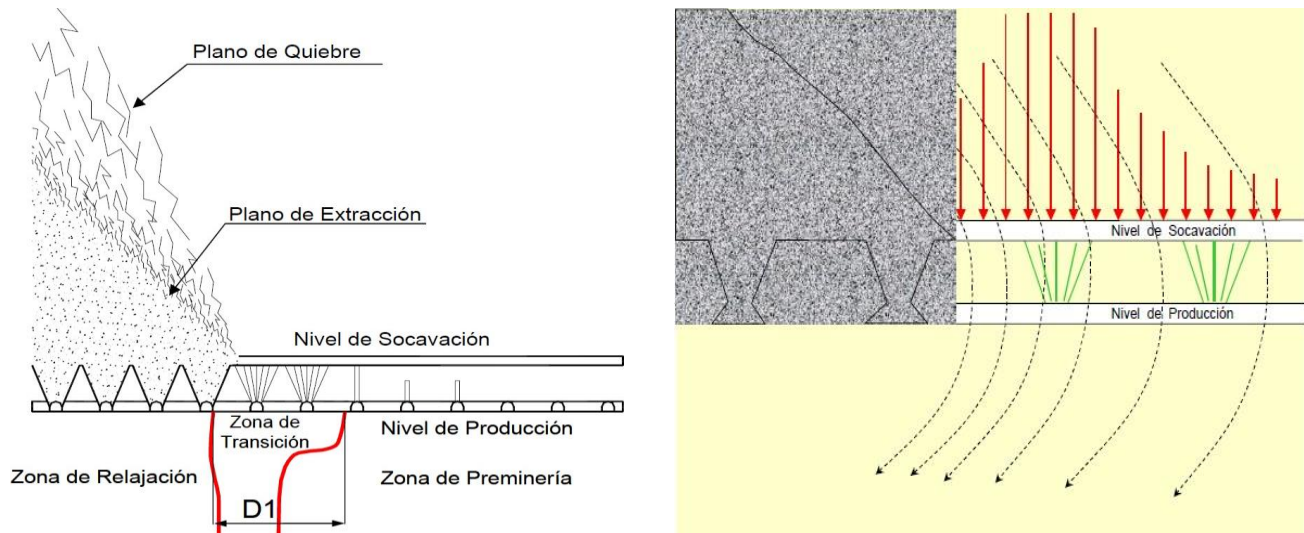


Ilustración 2.3 Redistribución de esfuerzos para el hundimiento convencional y su respectiva zona ZT (D1) (Cavieres, 2021).

Así, por esta redistribución se delimita la ZT en la cual se tendrán los mayores esfuerzos.

El hundimiento previo:

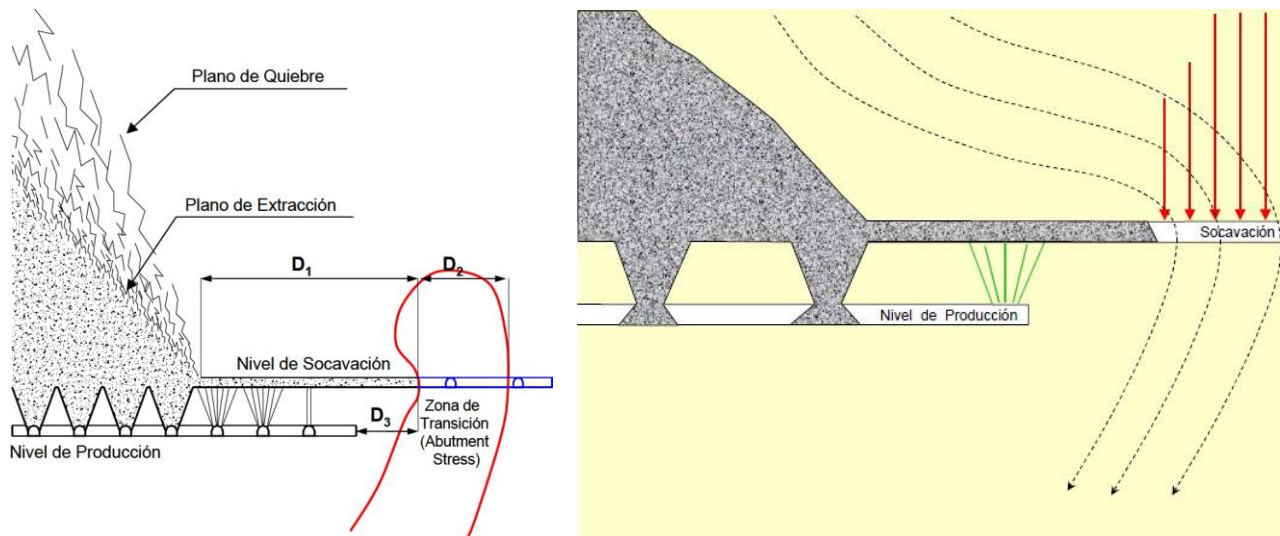


Ilustración 2.4 Redistribución de esfuerzos para el método de hundimiento previo (Cavieres, 2021).

Como podemos observar en el hundimiento previo, el nivel de producción no es afectado aún por la ZT, ya que el hundimiento se realiza con anterioridad para generar una zona de relajación sobre las bateas. Mientras, en paralelo, aún se ejecutan las obras de minería en el nivel de producción y la ZT queda alejada de dichas obras.

El hundimiento avanzado:

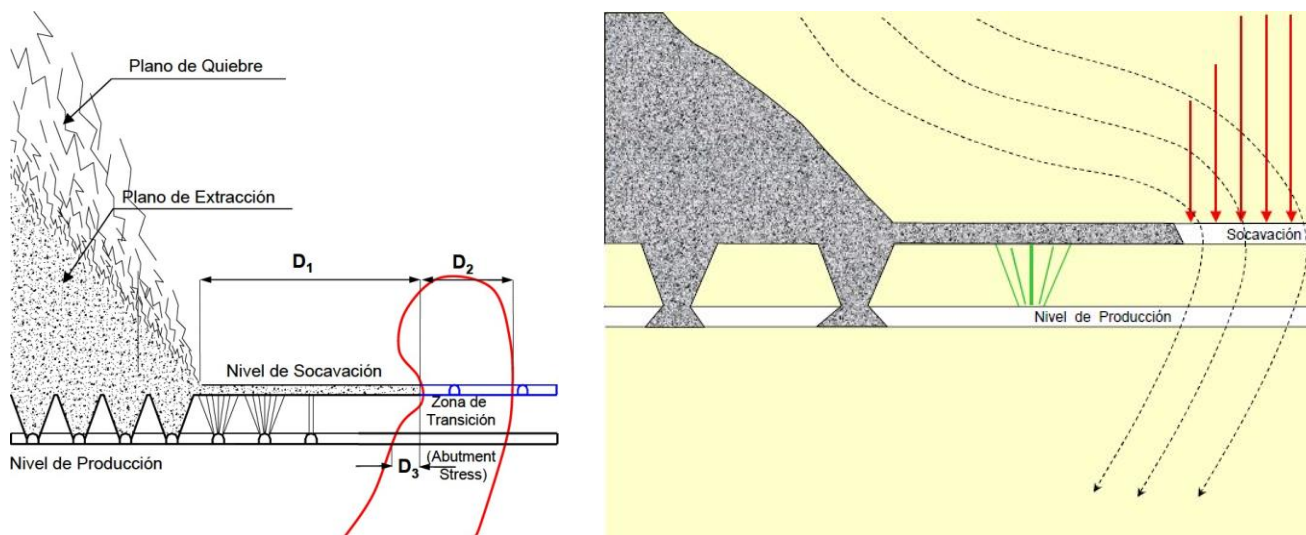


Ilustración 2.5 Redistribución de esfuerzos para el método de hundimiento avanzado (Cavieres, 2021).

En el hundimiento avanzado, a diferencia del hundimiento previo, el nivel de producción ya está desarrollado, por lo que la ZT afecta a las galerías de dicho nivel y por su puesto a los elementos de soporte y obras que se encuentren en desarrollo o ya terminadas.

En la División el Teniente, dependiendo del sector (ver Tabla 2.1), se han ejecutado estos 3 métodos. Los cuales determinan donde y cuando se debe colocar la instrumentación, ya que es importante instalarla antes de que el frente de hundimiento y la zona de transición alcancen los pilares que soportarán dichos esfuerzos. Siguiendo con lo anterior es bueno establecer la política de “pozo hecho, pozo instrumentado”, ya que las deformaciones del macizo rocoso pueden colapsar el pozo y dejarlo inhabilitado para insertar los instrumentos preparados. Por otra parte, respecto a la instrumentación de los elementos de soporte, se recomienda hacerlo posterior a la colocación del soporte definitivo.

Tabla 2.1 Ejemplos de la aplicación de las variantes del método de explotación panel caving en la división El Teniente, Codelco.

Minas	Variante de Panel Caving
Diablo Regimiento	Hundimiento Avanzado
Sub-6 (Dacita, Recursos Norte, otros)	Hundimiento Convencional y Avanzado
Esmeralda	Hundimiento Previo, Convencional y Avanzado
Pilar Norte	Hundimiento Avanzado
Pacífico Superior	Hundimiento Convencional

2.1.2 Subsistencia

Debido a los métodos de hundimiento como Block Caving o Panel Caving en los cuales se aprovecha la gravedad para generar una propagación del fracturamiento del macizo rocoso desde niveles inferiores hasta la superficie, causa lo que se denomina el fenómeno de “subsistencia”, es decir, un hundimiento de la cota de la topografía original debido a la explotación de los recursos minerales subterráneos.

Dicha subsistencia debe ser monitoreada y controlada, es por ello por lo que se utilizan cables SSTDR, inspecciones visuales ya sea desde niveles superiores o desde arriba mediante drones, imágenes satelitales o desde helicópteros. También se puede medir la deformación de la subsistencia mediante tecnologías como LiDAR o fotogrametría.

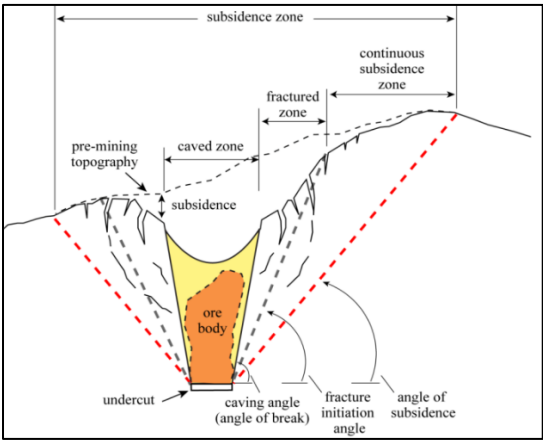


Ilustración 2.6 Fenómeno de subsistencia debido a la explotación mediante métodos de caving.

Por otro lado, la subsidencia de la DET y los sectores productivos se pueden visualizar en la siguiente imagen:

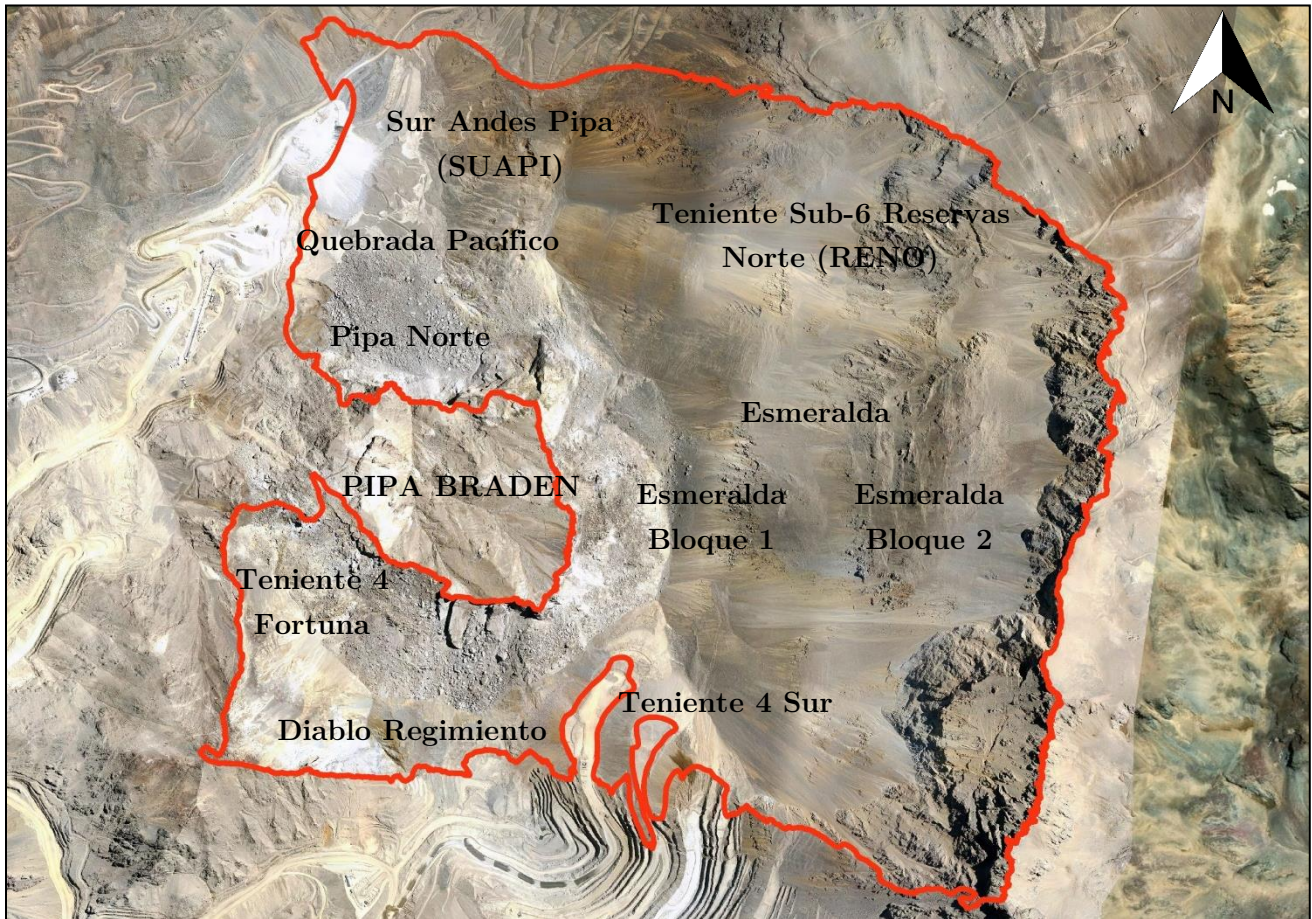


Ilustración 2.7 Borde cráter del área de subsidencia en DET (Expandemineria, 2021).

2.2 Formación geológica

El yacimiento El Teniente es un **megadepósito** tipo **pórfido cuprífero** con leyes económicas de cobre y molibdeno, emplazado en rocas volcánicas de la Formación Farellones. Está constituido por tres grupos de roca, con la siguiente temporalidad: El más antiguo es el Complejo Máfico El Teniente (**CMET**), compuesto por rocas máficas subvolcánicas cuyos componentes son Gabros, Diabasas y Pórfidos Basálticos. Posteriormente, estas rocas son instruidas por el Complejo Félsico, consistentes en un stock de Tonalita y varios Pórfidos de composición Diorítica, Dacítica y Latítica. Finalmente, un complejo de brechas de origen freatomagmático, denominado **Brecha Braden**, se emplaza en la parte central del yacimiento, constituyendo el último evento genético de El Teniente. Su principal mineral de cobre es la calcopirita, que se aloja en un enrejado de vetillas polidireccionales (stockwork), desarrolladas preferentemente en CMET y en menor medida en el Complejo Félsico.

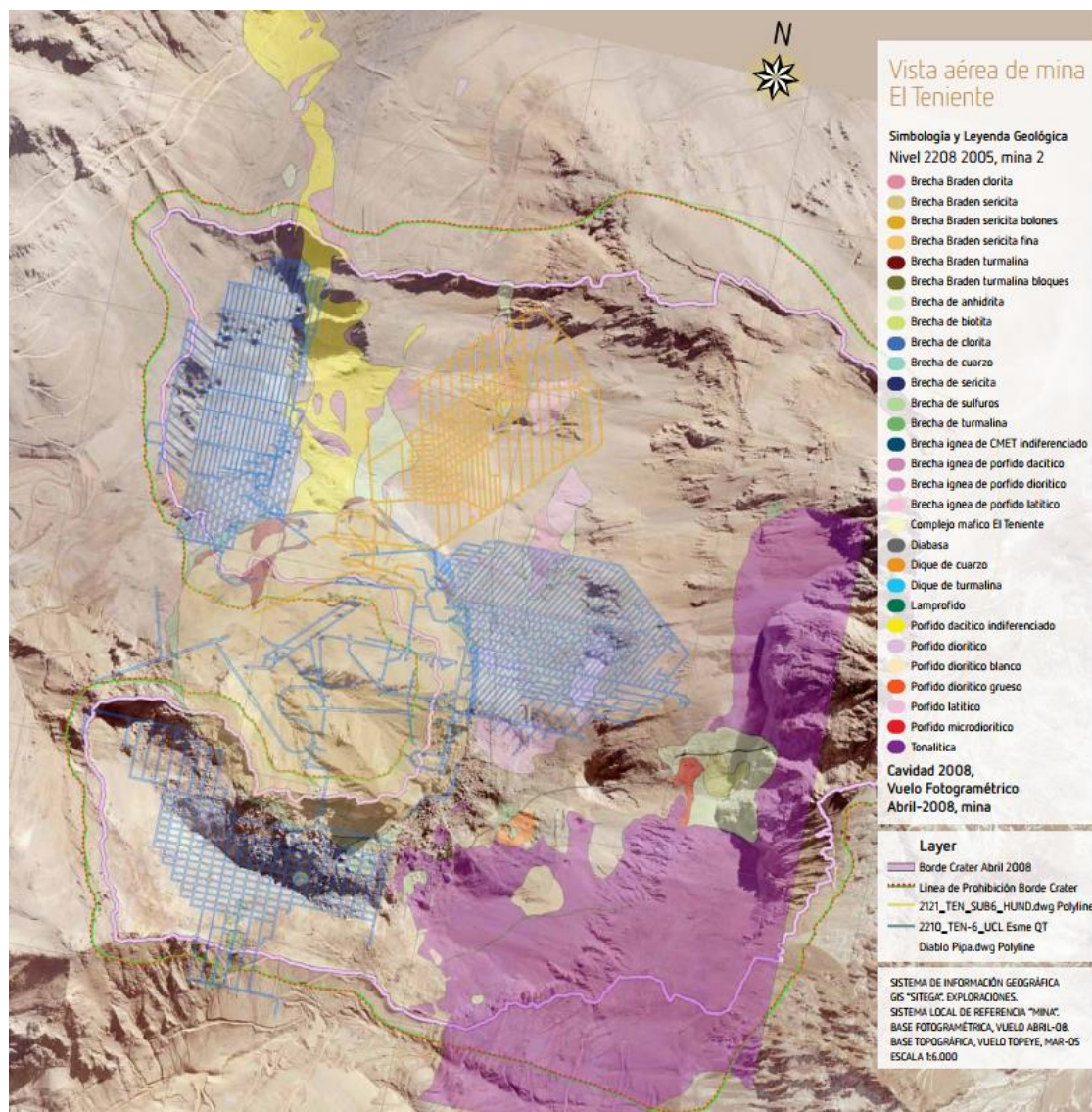


Ilustración 2.8 Formación geológica del Teniente junto con los UCL de Esmeralda, Diablo Regimiento y el Sub6.

2.3 Propiedades geotécnicas de la roca intacta y del macizo rocoso predominantes en el Teniente

Las propiedades de la roca intacta y del macizo rocoso son necesarias para el modelamiento, planificación y el análisis geomecánico. A continuación, se muestran algunos valores registrados de las principales unidades litológicas.

Tabla 2.2 Propiedades geotécnicas de la roca intacta (Pereira, 2006).

Parámetros	CMET	Dacita porfídica	Tonalita y Diorita Porfídica	Brecha Braden
Young's Modulus [GPa]	60	30	45	25
Poisson ratio	0.16	0.18	0.21	0.23
Densidad [ton/m ³]	2.80	2.62	2.73	2.61
Porosidad [%]	4.40	3.00	4.70	7.70
UCS [MPa]	120	110	140	90
T _i [MPa]	14	12	15	6
E/UCS	500	273	321	278
UCS/T _i	8.6	9.2	9.3	15
m _i (Hoek &Brown)	9.1	20.2	9.2	11.6
σ_{ci} [MPa]	118	112	125	72
σ_{ti} [MPa]	13	6	13	6
Cohesión [MPa]	23	19	23	10
Ángulo de fricción [°]	38	48	38	39

Tabla 2.3 Propiedades geotécnicas del macizo rocoso (Pereira, 2006).

Parámetros	CMET	Dacita porfídica	Tonalita y Diorita Porfídica	Brecha Braden
Young's Modulus [GPa]	36	24	36	20
Poisson ratio	0.21	0.20	0.26	0.28
m _b (Hoek &Brown)	4.5	10.8	4.5	8.6
s (Hoek &Brown)	0.10	0.14	0.11	0.43
a (Hoek &Brown)	0.5	0.5	0.5	0.5
σ_{c-rm} [MPa]	49	60	42	50
σ_{t-rm} [MPa]	3	2	2	3
Cohesión [MPa]	9	9	8	9
Ángulo de fricción [°]	37	45	37	41
GSI	70-85	75-90	70-90	85-100

Estos valores obviamente son de referencia, pero son actualizados regularmente a través de los sondajes de diamantina e inspecciones y ensayos realizados por los geólogos.

3 Fundamentos de la instrumentación geomecánica

La tecnología de los instrumentos se basa principalmente en potenciómetros, cuerda vibrante, strain gauges, Micro ElectroMechanical System (MEMS), light detection and ranging (LiDAR) y por último en el Time Domain Reflectometry (TDR), los cuales se describirán a continuación.

3.1 Potenciómetro

Un potenciómetro lineal es un dispositivo con un deslizador móvil, normalmente llamado wiper, que hace contacto eléctrico a lo largo de una tira de resistencia fija. Se aplica una tensión continua regulada a los dos extremos de la tira de resistencia: la tensión entre un extremo de la tira y el punto de contacto entre ésta con el wiper se mide como señal de salida.

La tecnología del potenciómetro lineal suele tener una señal de salida de 4-20[mA]. Cabe mencionar que las señales eléctricas (amperios) son más adecuadas para la transmisión a larga distancia que la señal de tensión (voltios). Por ejemplo, los extensómetros utilizan esta tecnología (el potenciómetro) para medición de desplazamientos.

3.2 Cuerda vibrante (vibrating wire)

Los transductores de cuerda vibrante están esencialmente compuestos por un cable tenso sujeto en sus extremos y se tensa de modo que sea libre para vibrar en su frecuencia natural. La frecuencia de vibración varía con la tensión del alambre y por lo tanto los pequeños movimientos relativos entre las dos grapas de cierre.

Con transductores de cuerda vibrante en lugar de frecuencia se miden los niveles de voltaje, por lo que una lectora de datos dedicada debe ser utilizada para medir la frecuencia de resonancia. Estos excitan el transductor de VW (vibrating wire), se mide la respuesta, realiza algunos cálculos sobre la respuesta, y devuelve el resultado.

Cuando se arranca el alambre se crea una atracción magnética sobre la bobina y el cable comienza a vibrar y provoca una tensión alterna de la misma frecuencia que la natural del alambre; la señal de tensión se transmite en el cable y es leída por el registrador de datos.

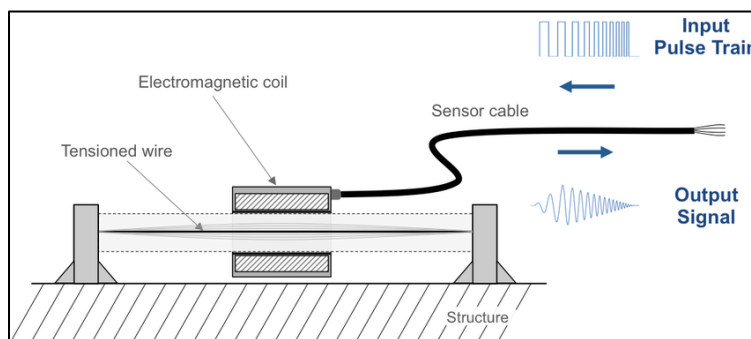


Ilustración 3.1 Fundamento básico del funcionamiento de la cuerda vibrante presente en varios instrumentos geomecánicos (Hui, 2014).

3.3 Medición directa de deformación mediante strain gauges

Los strain gauges son sensores que permiten la medición de los cambios en la longitud (deformación), por ejemplo, de un testigo extraído de un pozo o mediante celdas como la Hollow Inclusion.

Los strain gauges cuando son extendidos (stretched), su resistencia incrementa. En cambio, cuando son comprimidos (compressed) su resistencia decrece.

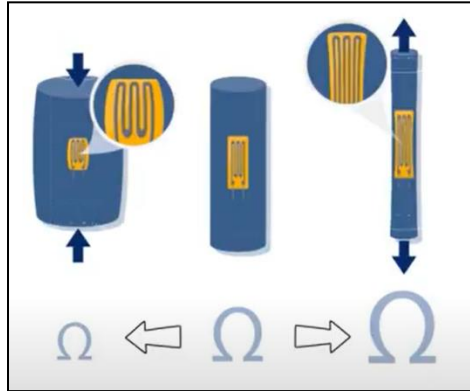


Ilustración 3.2 Cambio de la resistencia del strain gauge dependiendo de su extensión o compresión (elaboración propia).

El cambio en la resistencia permite determinar la deformación sobre el strain gauge mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot \varepsilon$$

Donde ΔR es el cambio en la resistencia del strain gauge (SG) debido a la deformación, R_0 es la resistencia nominal del SG, k es el factor de la galga³ (SG sensibilidad) y ε es la deformación unitaria que se desea medir.

3.4 Micro ElectroMechanical System (MEMS)

El MEMS es un microsistema electro mecanizado, el cual está compuesto por un microprocesador que permite medir la energía eléctrica almacenada dentro de un sensor capacitivo. Este último almacena energía eléctrica dependiendo del movimiento que tenga un acelerómetro. Los elementos básicos que componen el acelerómetro son los resortes (springs), la masa (mass) y las estructuras de soporte circundantes (fixed plates). Es importante mencionar, que estos microsistemas pueden ser acelerómetros, giroscopios u de otros tipos, lo cual permite conocer el movimiento angular y de desplazamiento de diversos dispositivos.

³ Galga: Es la palabra en español para referirse al strain gauge el cual mide la deformación unitaria mediante el cambio de su resistencia.

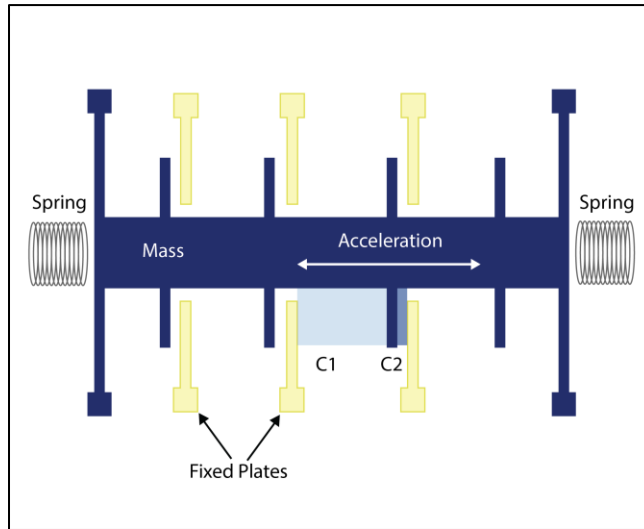


Ilustración 3.3 Acelerómetro creado en base de silicio (Level developments, 2020).

3.5 Tecnología TDR, STDR, SSTDR y BOTDR

El Time-Domain Reflectometry (TDR) es una tecnología usada para detectar la ubicación de un defecto en la línea de transmisión. Un único pulso conocido (un pulso de corta duración) es propagado por un cable el cual es sometido a prueba, de tal forma que cuando llega el pulso al final del cable, parte de la energía del pulso se refleja de vuelta a la fuente. El instrumento TDR mide el tiempo transcurrido de lo mencionado anteriormente. Por otro lado, se conoce la distancia del cable y la velocidad del pulso a través del cable. Como resultante del análisis puede haber dos resultados: la longitud original del cable o la longitud hasta un corte o fallo del cable.

La Sequence Time-Domain Reflectometry Method (STDR) es una tecnología en la cual se propaga una codificación de pseudo ruido como una señal de prueba tal como se muestra en la Ilustración 3.4. Esta señal es muy pequeña y no interfiere con la señal en el cable de corriente. La naturaleza de la señal incidente es inmune a otros ruidos de la misma línea de corriente. La señal recibida, la cual es una combinación de ambas, la señal reflejada e incidente son correlacionadas con una copia de la codificación del pseudo ruido. En el STDR, la correlación de retraso, multiplicada y sumada las señales con el código de pseudo ruido como se muestra en la Ilustración 3.5. La correlación permite que el STDR funcione mejor en un cable de corriente en comparación con algún otro método de reflectometría. La ventaja más significativa de este sistema es la posibilidad de hacerlo funcionar incluso sobre un cable de tensión y también crear y almacenar su propia línea de base dinámica. Una línea de base que interpreta cuando un cable está en buen estado y cuando esta defectuoso. El STDR es capaz de analizar redes ramificadas, pero tiene las mismas limitaciones que el TDR respecto a este último punto.

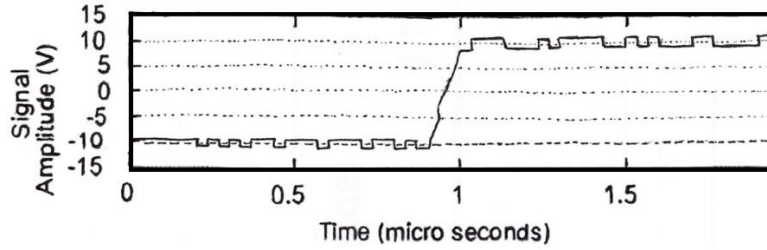


Ilustración 3.4 Señal STDR (Wimmer & Ouchterlony, 2008).

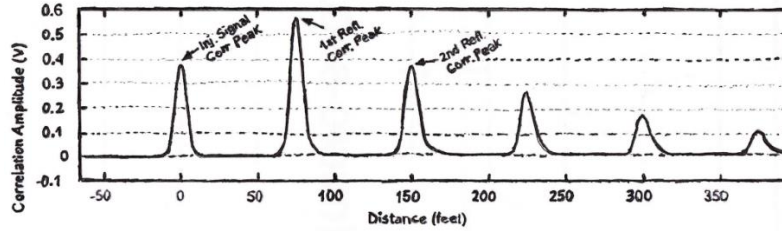


Ilustración 3.5 Respuesta de correlación de la señal STDR (Wimmer & Ouchterlony, 2008).

La Spread Spectrum Time-Domain Reflectometry (SSTDR) es una versión mejorada del STDR para medir los fallos intermitentes en los cables eléctricos usando un código digital. Esto ayuda a eliminar cualquier interferencia durante el curso de la medición. La SSTDR es una combinación de la tecnología de spread-spectrum y el time-domain reflectometry. Este método rompe una única señal de TDR en señales más pequeñas (código de pseudo ruido modulado de onda sinusoidal), cada una con una frecuencia diferente, véase la Ilustración 3.6. Esto hace que las señales de prueba sean inmunes a las perturbaciones eléctricas y al ruido. Las señales individuales reflejadas se correlacionan para producir un resultado preciso, como se muestra en la Ilustración 3.7. Además de producir la inmunidad al ruido eléctrico, también son eficientes y presentan una baja potencia que garantiza la seguridad de los equipos de medición (Hayford, 2016).

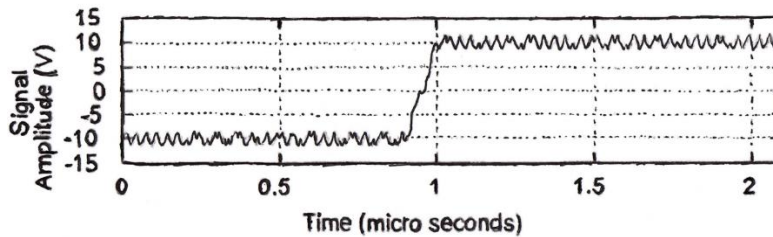


Ilustración 3.6 Señal SSTDR (Wimmer & Ouchterlony, 2008).

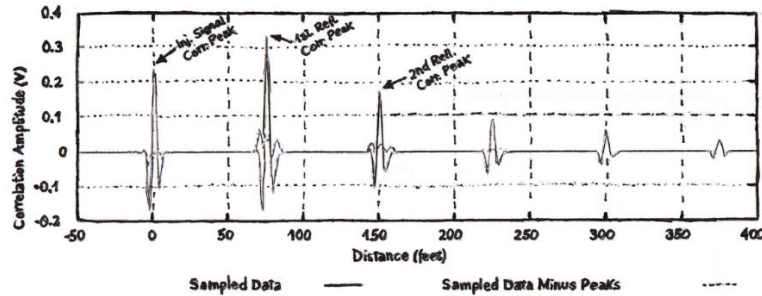


Ilustración 3.7 Respuesta de correlación de la señal SSTDR (Wimmer & Ouchterlony, 2008).

A continuación, en la Tabla 3.1 se muestran las ventajas y desventajas de las tecnologías empleadas en minas tanto de Sublevel Caving como de Panel Caving o Block Caving.

Tabla 3.1 Comparación de las tecnologías basadas en la emisión de pulsos eléctricos a través de la fibra óptica.

Tecnología	Ventajas	Desventajas
TDR	Usa pulsos estrechos o amplios. Simple de usar, ampliamente usado. Es una buena opción para un test de medición de corta distancia en donde se utiliza un factor de corrección para dicha medición. Es bueno para estimar los fallos de cortocircuito y sus ubicaciones.	Utiliza pulsos estrechos que sufren de atenuación a lo largo de la distancia. También usa pulsos amplios, pero sufre de resolución y precisión. Es menos susceptible a las interferencias del ruido del enlace.
STDR	Una pequeña señal que no interfiere con la señal del cable de corriente. Es inmune a otros ruidos en la línea. Funciona mejor en un cable de corriente.	Sufre de atenuación.
SSTDR	La señal de prueba es inmune a interferencias eléctricas. Es eficiente y produce un resultado preciso. Presenta una baja potencia que garantiza la seguridad. Es eficaz en la localización de defectos en un cable de corriente.	Resolución inexacta a larga distancia.

La tecnología BOTDR consiste en emitir una onda de luz transmitida a través de la fibra óptica, la cual es reflejada y dispersada por una interacción no-lineal con ondas acústicas llamadas fonones⁴. Este efecto

⁴ Un **fonón** es una vibración cuantizada o un cuanto, de la energía vibracional de la red cristalina de un sólido, de magnitud $h \cdot f$, donde h es la constante de Planck y f la frecuencia de vibración. La energía vibracional puede ser intercambiada sólo en fonones, análogamente a los fotones o cuantos de luz (RP-Photonics, 2008).

recibe el nombre de dispersión Brillouin. Debido a que los fonones decaen exponencialmente, el espectro de luz Brillouin dispersada tiene una forma semejante a una función Lorentziana.

La frecuencia óptica de la luz dispersada es disminuida en una cantidad equivalente a la frecuencia de los fonones acústicos. Considerando el hecho que el desplazamiento en frecuencia ν_b (Desplazamiento en Frecuencia Brillouin) es proporcional a la deformación aplicada a la fibra óptica, es posible deducir la deformación midiendo este desplazamiento, el cual está dado por la siguiente ecuación:

$$\nu_b = \frac{2n\nu_a}{\lambda}$$

Donde n es el índice de refracción, ν_a es la velocidad de la onda acústica y λ es la longitud de onda de la luz incidente.

En la siguiente ilustración se muestra un ejemplo de distribución de deformación unitaria a lo largo de la fibra óptica.

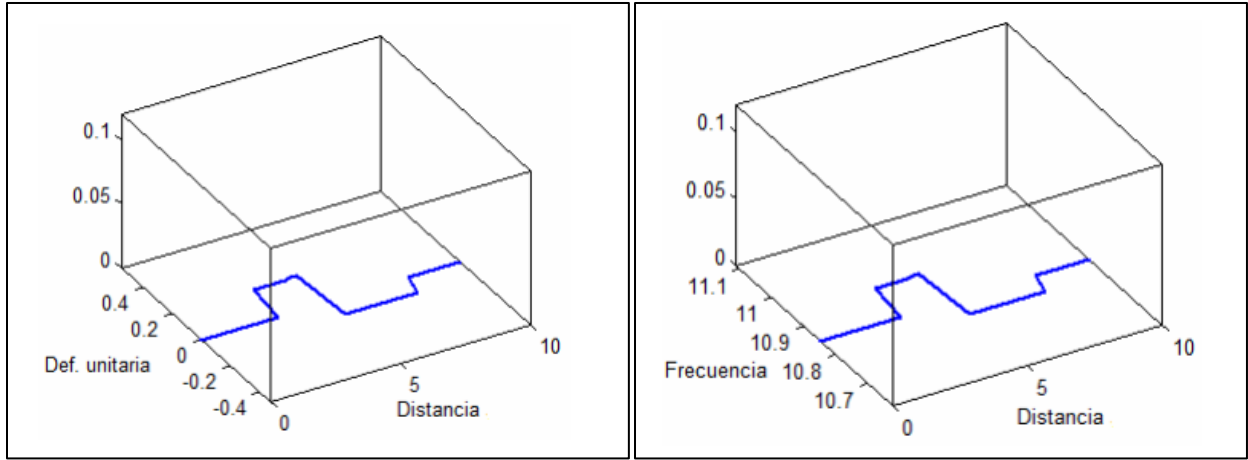


Ilustración 3.8 Ejemplo de distribución de deformación a lo largo de la fibra óptica (izquierda) y distribución de frecuencias características en cada posición (derecha) (Centro de Modelamiento Matemático (CMM), 2009).

En la Ilustración 3.8 se aprecia la distribución de las frecuencias características asociadas a cada posición en la fibra óptica, como resultado de la distribución de la deformación mostrada en la ilustración anterior.

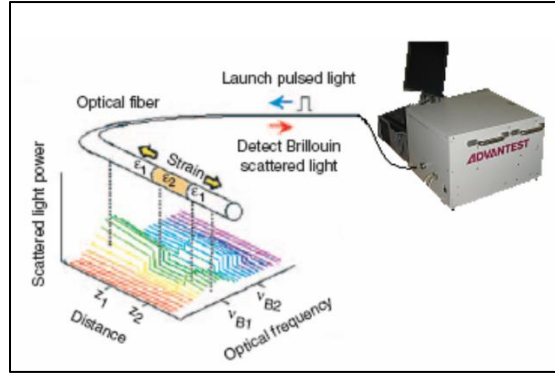


Ilustración 3.9 Espectro de dispersión Brillouin tri-dimensional, describiendo la distribución de la potencia de luz para distintas frecuencias y posiciones a lo largo de la fibra óptica (Zhang & Wu, 2008).

3.6 LiDAR

La tecnología “light detection and ranging” (LiDAR) consiste en un escaneo 3D del ambiente circundante al dispositivo del cual provienen los haces de luces. Se mide el tiempo que demora en volver estos haces al dispositivo y con ello calcular la distancia que viajó el pulso utilizando la velocidad de la luz. Este proceso se repite millones de veces obteniendo una nube de puntos del ambiente por donde se transitó.

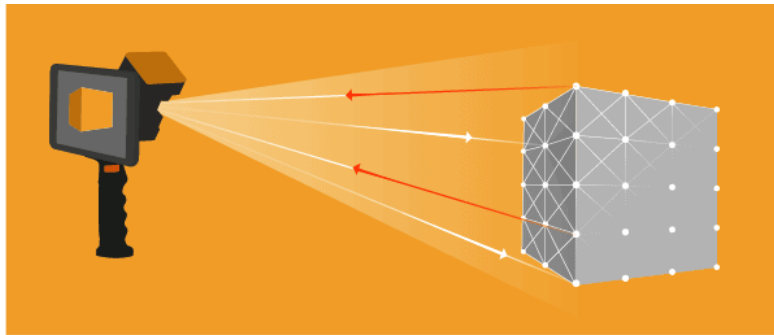


Ilustración 3.10 Tecnología LiDAR utilizada en minería para la creación de triangulaciones de las excavaciones en minería subterránea (GeoSLAM, 2021).

Cabe mencionar que esta tecnología se ha ido mejorando a medida que han transcurrido los años. Una prueba de ello es que actualmente la precisión de algunos instrumentos que ocupan esta tecnología puede llegar al **milímetro** y también se han diseñado algoritmos como el SLAM que permite georreferenciar las mediciones de la nube de puntos.

4 Antiguas tecnologías de instrumentación

4.1 USBM Overcoring (United State Bureau of Mines)

Este instrumento consiste en una celda, la cual utiliza el método overcoring para medir las deformaciones del macizo rocoso con el fin de determinar los esfuerzos (2D) con sólo una perforación. Si se realizan tres perforaciones no colineales en un mismo sitio, se puede estimar el campo de esfuerzos 3D. Además, cabe mencionar que forma parte de los medidores suaves, ya que posee una pequeña rigidez relativa a la roca huésped.

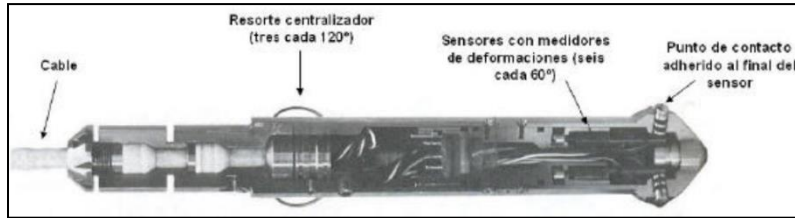


Ilustración 4.1 Celda medidora de deformaciones desarrollado por U.S Bureau of mines (Dunnickiff, 1998).

La metodología overcoring consiste en introducir en un sondaje de 1 ½'' de diámetro, el instrumento (celda) capaz de medir las deformaciones diametrales producidas en un plano perpendicular al eje de la perforación, generadas por la relajación de la roca al efectuar una perforación de 6'' de diámetro (overcoring) concéntrica con la perforación anterior.

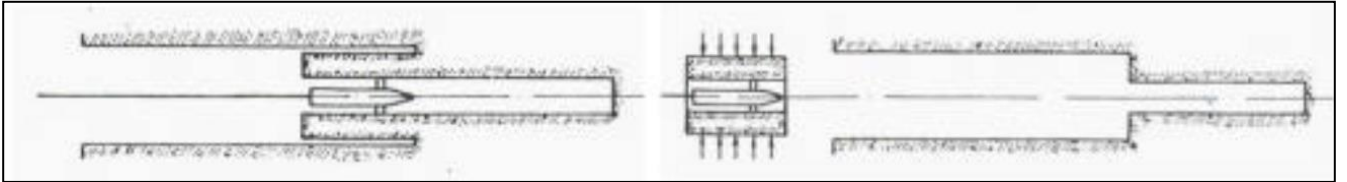


Ilustración 4.2 Metodología del overcoring USBM (Cavieres, 1992).

La celda posee 3 sensores por eje los cuales miden las deformaciones diametrales U_1 , U_2 y U_3 . Con estas deformaciones se pueden calcular el esfuerzo principal menor y el mayor con las siguientes ecuaciones:

$$P = \frac{E}{6d} \left\{ (U_1 + U_2 + U_3) + \frac{\sqrt{2}}{2} [(U_1 - U_2)^2 + (U_2 - U_3)^2 + (U_3 - U_1)^2]^{1/2} \right\}$$

$$Q = \frac{E}{6d} \left\{ (U_1 + U_2 + U_3) - \frac{\sqrt{2}}{2} [(U_1 - U_2)^2 + (U_2 - U_3)^2 + (U_3 - U_1)^2]^{1/2} \right\}$$

$$\theta_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}(U_2 - U_3)}{2U_1 - U_2 - U_3}$$

Donde: P y Q son el esfuerzo principal mayor y menor respectivamente, aplicados al plano perpendicular con el eje del pozo. El diámetro del tiro piloto es d y θ_p es el ángulo medido desde U_1 hasta la dirección de P en sentido antihorario. Además, E es el módulo de Young.

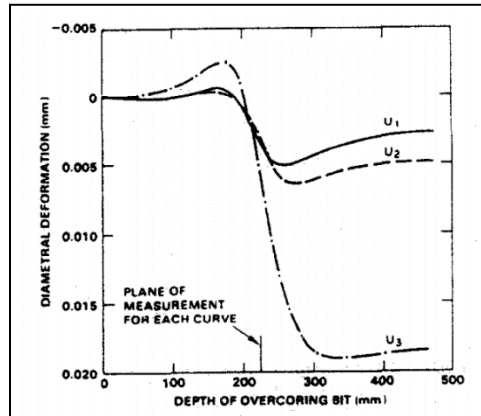


Ilustración 4.3 Gráfico típico de la deformación diametral vs la profundidad del overcoring (ISRM, 1987).

Finalmente, en la ilustración anterior se muestra un ejemplo de medición de estos datos con la USBM y en su bibliografía algunas sugerencias del método presentadas por la ISRM.

4.2 Celda CSIR Doorsttoper (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)

Tal como en el USBM, se inserta la celda hasta que quede pegada al fondo de una perforación, sin embargo, esta vez el diámetro del pozo es de $2 \frac{3}{8}$ " y se toman mediciones de las deformaciones antes y después de sobre perforar. Finalmente se retira la celda junto con los testigos de roca los cuales son utilizados para obtener los módulos de elasticidad (E) y de Poisson (ν). Todo lo anterior es realizado con el objetivo de determinar los esfuerzos (2D) con una sola perforación y, al igual que la USBM se pueden hacer 3 perforaciones no colineales para estimar el campo de esfuerzos en 3D.

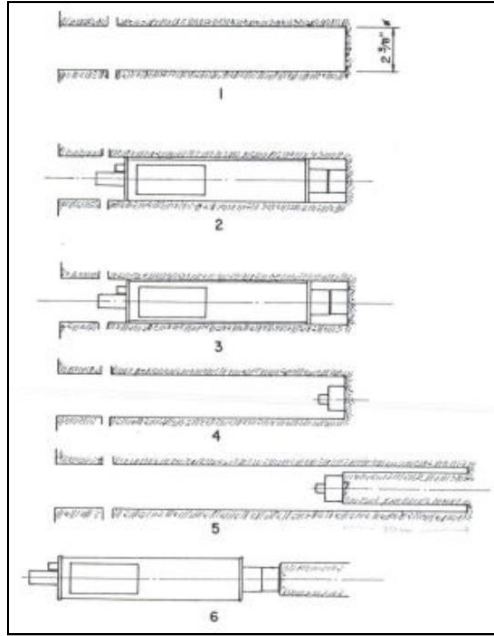


Ilustración 4.4 Metodología del CSIR Doorstopper (Cavieres, 1992).

4.3 Celda SISC (uniaxial)

La celda corresponde a una pre-carga mediante el apriete interior de un largo pozo perforado con diamantina usando un mecanismo de tornillo o un pistón hidráulico y puede ser usado para medir tensión (kPa) o cambios de esfuerzos por compresión. Este mecanismo ha sido usado satisfactoriamente en perforaciones de overcoring de 152 mm de diámetro (perforaciones para medir esfuerzos in situ). Además, existen diferentes modelos para diámetros: NX (76 mm), HQ (96 mm), PQ (122 mm), 6 pulg (152 mm).



Ilustración 4.5 Celda SISC (Madrid, 2005).

4.4 Celda Yoke (biaxial)

La celda Yoke mide variaciones de esfuerzo en un plano normal al eje de la perforación en que se ubica la celda, por lo que es un instrumento bidimensional. Está diseñado fundamentalmente para monitoreo y su respuesta se logra tan pronto el instrumento está instalado y la resina epóxica con que se adhiere a la roca

se encuentra endurecida. El diámetro empleado para la instalación de estas celdas es de 60 [mm] aproximadamente.



Ilustración 4.6 Celda Yoke (Madrid, 2005).

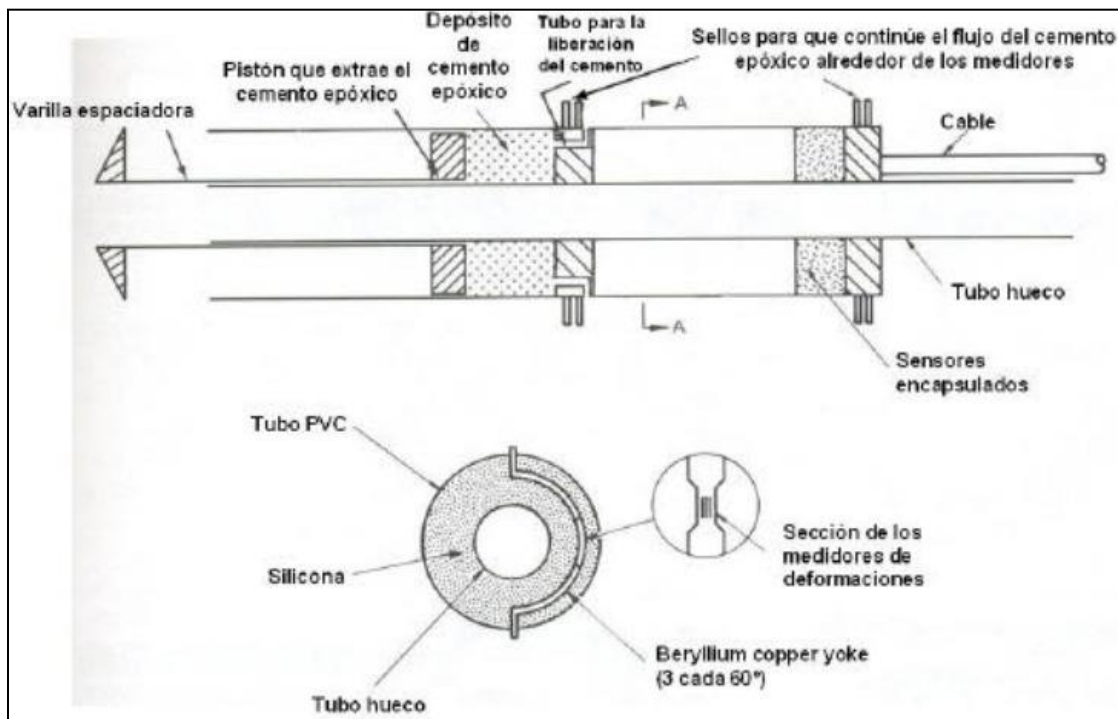


Ilustración 4.7 Medidor de deformaciones de la celda Yoke (Dunnicliff, 1998).

4.5 Stressmeter (uniaxial)

Este instrumento consiste en un cilindro hueco, el cual es precargado diametralmente a las paredes de la perforación, mediante el montaje de una cuña deslizante y una platina.

La tensión conocida de la cuerda decrece cuando el indicador es precargado en la perforación y decrece aún más cuando ocurren cambios en los esfuerzos de compresión de la roca. Una bobina, imán y horquilla van montadas en el interior del stressmeter. La excitación simultánea de estos dispositivos genera un campo

magnético que hace vibrar la cuerda a su frecuencia natural. Registrando el período de la cuerda vibrante de un stressmeter se obtiene una directa y precisa medición de la deformación del cuerpo, la que queda determinada por el cambio en magnitud del esfuerzo en la roca de los alrededores de la perforación en la cual está colocado. Los diámetros del instrumento pueden ser de: EX (36 mm), BX (60 mm), NX (76 mm).

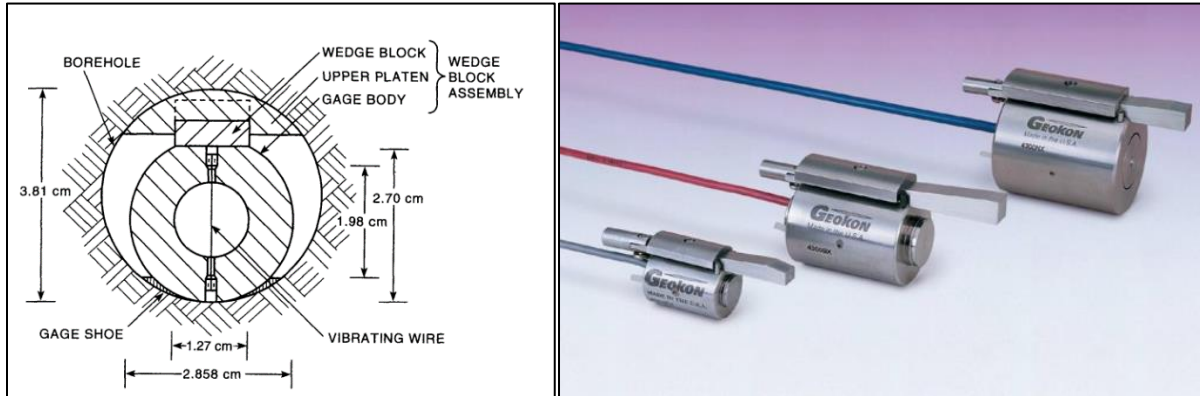


Ilustración 4.8 Sección transversal del stressmeter y Stressmeter (Amadei & Stephansson, 1997).

4.6 Jointmeters

Este tipo de instrumento consiste en un soquete que es empotrado sobre grietas o estructuras de máximo 60 mm de ancho (mediante cemento o pequeños pernos) y unos transductores de cuerda vibrante que son adheridos al soquete con el fin de monitorear movimientos de la estructura en alguna de las tres direcciones (X, Y o Z). Las dos partes del Jointmeters (soquete + transductores) son conectadas a través de un vástago, el cual es insertado en el interior del soquete y monitoreado a través de cajas lectoras.

Mientras la fractura es abierta, el soquete se extiende; en cambio, al ser cerradas, el soquete se contrae. El elemento de la cuerda vibrante (transductor) retorna una señal que es proporcional a la posición del soquete o abertura de la fractura, mostrando a través de una caja lectora la dirección del movimiento percibido.

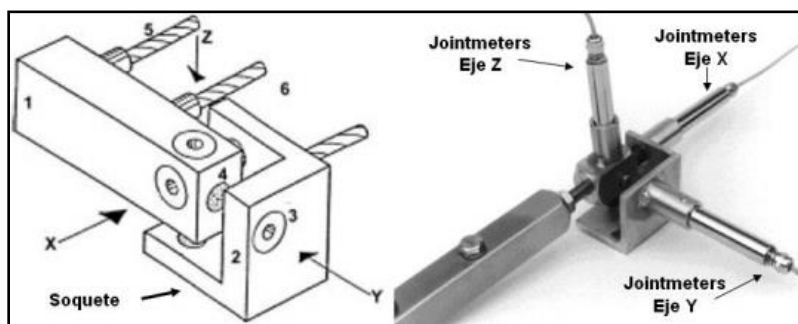


Ilustración 4.9 Configuración del Jointmeters (Madrid, 2005).

4.7 Argollas de convergencia

Este método consiste en colocar 3 argollas de hierro con un vástago de 102[mm] de largo y 13[mm] de diámetro. Estas se colocan a 40[cm] del piso de la galería y en el medio del techo. Con tal de formar un

triángulo equilátero. Luego utilizando un extensómetro de huincha se miden las distancias entre cada argolla, con esto se puede obtener la deformación que está sufriendo la galería producto del esfuerzo que ejerce el macizo rocoso sobre las paredes.

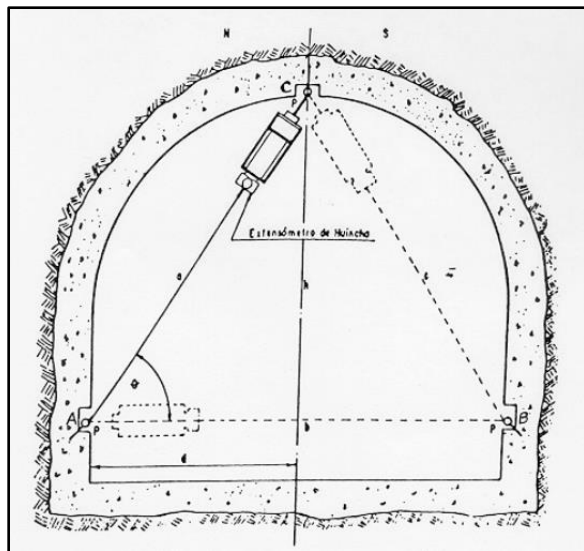


Ilustración 4.10 Triangulación mediante las argollas de convergencia (Valdivia C. , 1998).

5 Tecnología actual de la instrumentación

5.1 Extensómetros

Se han utilizado desde el año 2000 en la DET y su principal objetivo es medir la deformación a lo largo de un pozo. Existen varios tipos de extensómetros dentro de estos se encuentran los simples, magnéticos, incrementales, dinámicos, de diámetro pequeño, huinchas extensométricas y extensómetros multipunto. Este último es uno de los más usados en la División y será detallado a continuación:

5.1.1 Multipunto (Multipoint borehole extensometer o MPBX):

El MPBX, también conocido como extensómetro de varilla multipunto, está diseñado para monitorear los cambios en la distancia entre los anclajes de fondo, cada uno emplazado a una profundidad determinada en el sondaje, y un cabezal de medida en superficie. Las varillas se extienden desde los anclajes hasta la cabeza, donde las mediciones se realizan con cuerda vibrante o transductores de desplazamiento. Por otro lado, las varillas pueden ser de fibra de vidrio como de acero inoxidable (SISGEO, 2020).



Ilustración 5.1 Se muestra el cabezal del instrumento con las varillas (SISGEO, 2020).

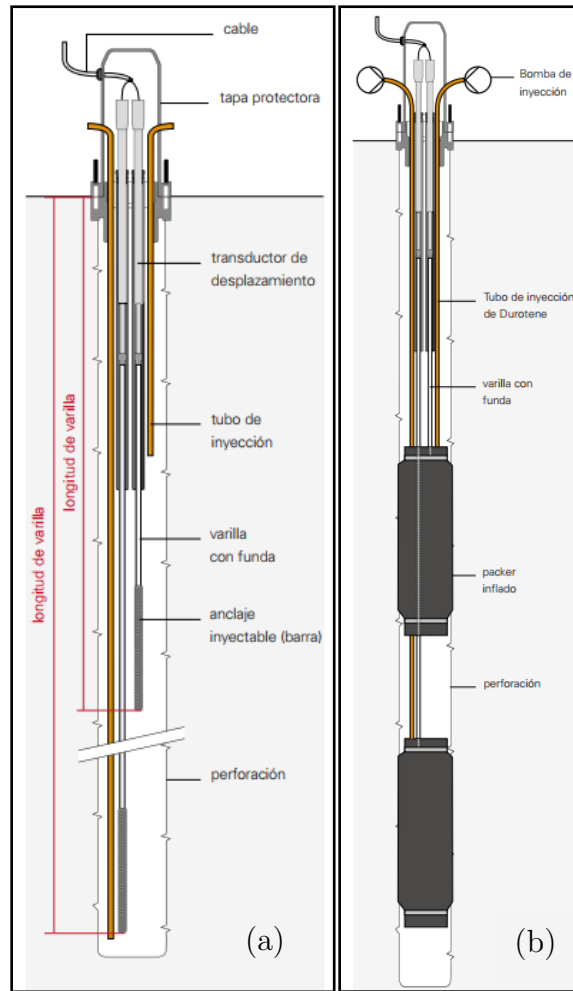


Ilustración 5.2 En la imagen (a) se observa las partes del extensómetro y en la imagen (b) se observa en sistema de packers (SISGEO, 2020).

Este instrumento puede utilizar transductores de desplazamiento de cuerda vibrante como también transductores de desplazamiento eléctricos. Estos dos métodos permiten la medición de la deformación, es decir, el estiramiento o contracción del extensómetro. Tal como se muestra en la siguiente imagen:

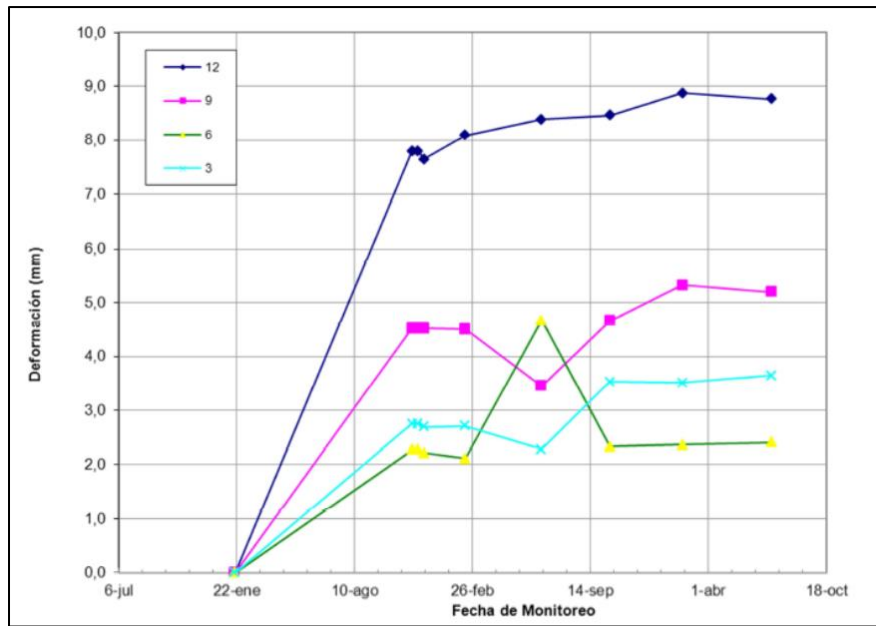


Ilustración 5.3 Medición con extensómetro multipunto en la mina esmeralda (SGO, 2019).

Lo que se observa en el gráfico como 3, 6, 9 y 12 es la distancia en metros desde el cabezal hasta los diferentes anclajes al interior del pozo. Vale mencionar, que en la División se han utilizado tanto extensómetros de 12[m] (con anclajes a los 3, 6, 9 y 12 metros) como también extensómetros de 20[m] (con anclajes a los 4, 8, 12, 16 y 20 metros).

Por otro lado, la máxima deformación medible por los extensómetros depende del fabricante, pero, en general, va desde los 10[mm] hasta los 150[mm] para aquellos que utilizan la tecnología de cuerda vibrante y desde los 25[mm] hasta los 200[mm] para los que emplean transductores eléctricos. Según lo visto en los informes en Pilar Norte, por ejemplo, se instalaron 5 MPBX, con un rango máximo de medición de 100[mm] en el UCL (undercut level) y en el NTI (nivel de transporte intermedio). También es importante mencionar que el diámetro utilizado, generalmente, para instalar extensómetros es de 3,5[pulg].

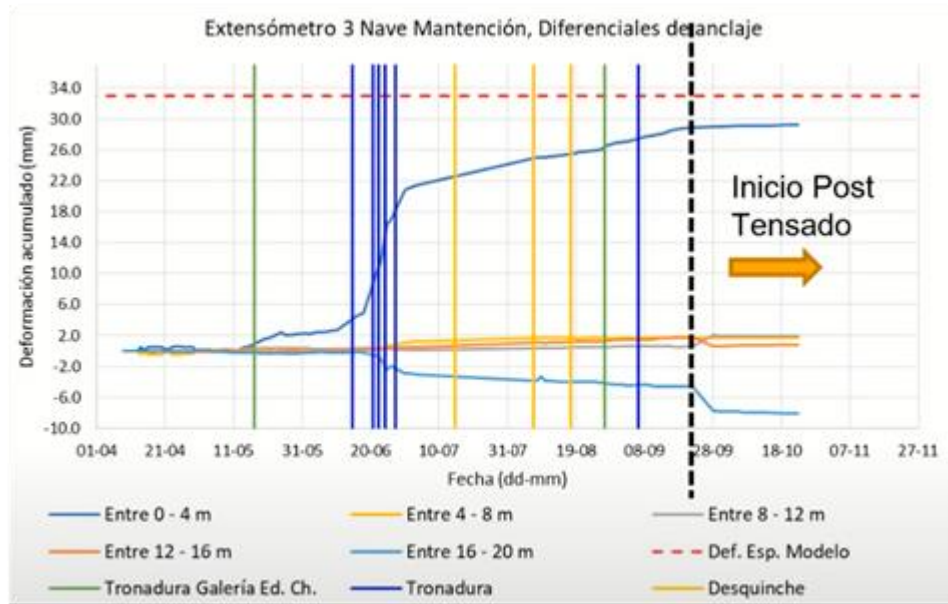


Ilustración 5.4 Extensómetro utilizado en la construcción de la sala de chancado de Andes Norte (Valdivia, 2021).

5.2 Celdas de carga

5.2.1 Eléctricas

Las celdas de carga eléctricas son instrumentos que permiten conocer la cantidad de carga a la cual están siendo sometidos los elementos de soporte como pernos cable u otros tipos de pernos. Su rango de medición va desde los 300 hasta los 2500[kN]. La temperatura a la cual puede operar va desde los -30°C hasta los 70°C . Este anillo hecho de acero tiene incorporado desde 8 hasta 16 strain gauges que varían su resistencia proporcionalmente con la fuerza percibida. Estos sensores (strain gauges) son casi siempre usados en una configuración denominada *Wheatstone bridge*, la cual consiste en 4 brazos resistivos con una excitación de voltaje que es aplicada a través de dicho puente.

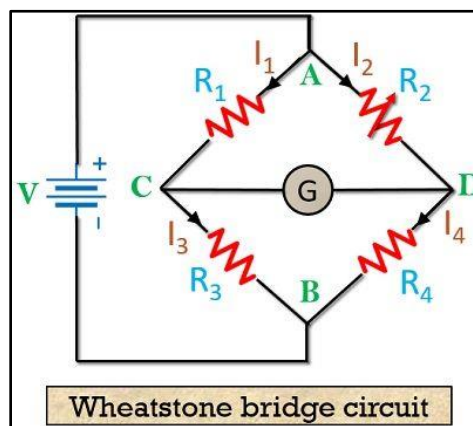


Ilustración 5.5 Esquema del circuito Wheatstone (Electronics Coach, 2021).

Los diámetros internos de las celdas de carga van desde los 40[mm] hasta los 231[mm].

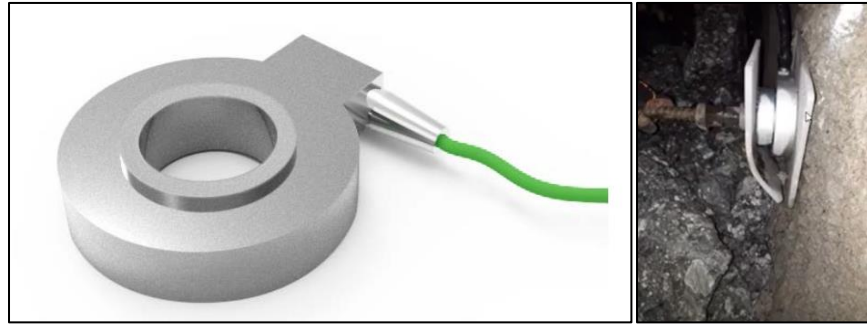


Ilustración 5.6 Celda de carga y su aplicación sobre un perno (SISGEO, 2020).

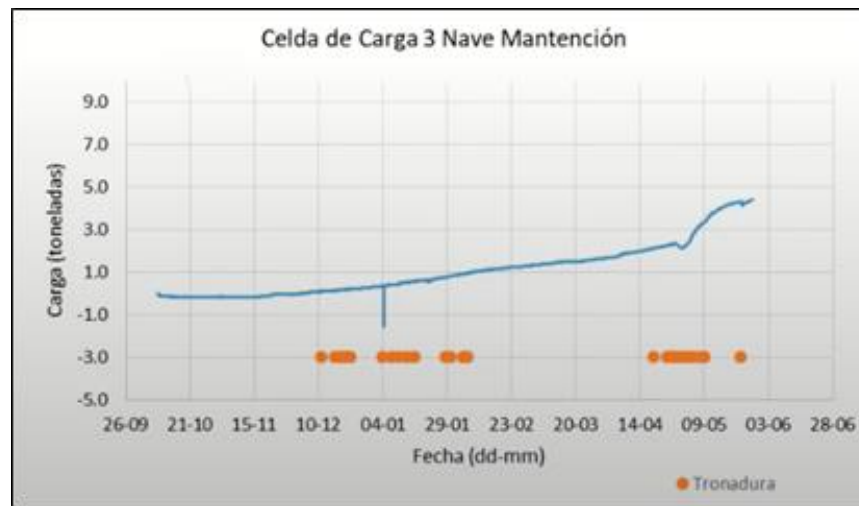


Ilustración 5.7 Ejemplo de medición con celdas de carga (Valdivia, 2021).

5.2.2 Hidráulicas

Las celdas de carga hidráulicas poseen un manómetro, el cual indica la carga sobre el perno.

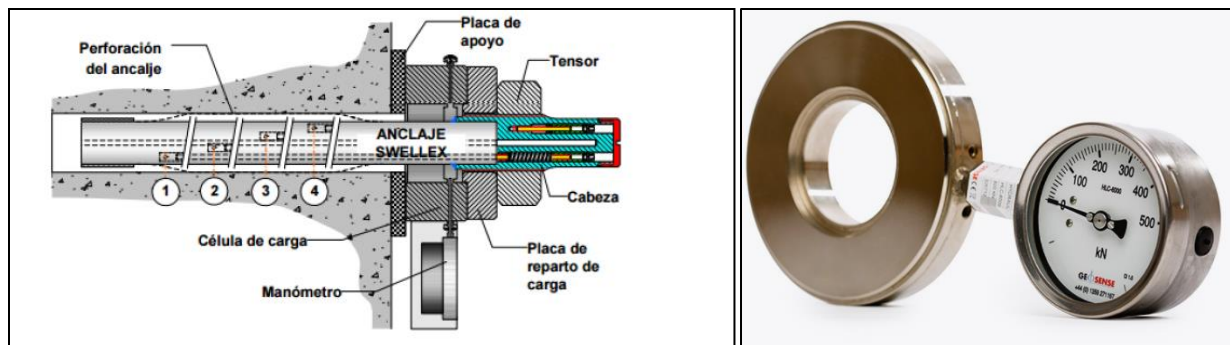


Ilustración 5.8 Celda de carga tipo hidráulica (GEOSENSE, 2021).

La capacidad límite de estas celdas empieza desde los 300[kN] hasta los 1500[kN] con una sobrecarga máxima del 120%. Por otro lado, su temperatura de operativa es desde los -35°C hasta los 60°C. Sus diámetros internos van desde los 71[mm] a los 165[mm].

5.3 Celda Hollow Inclusion (CSIRO HI cell)

Consiste en una celda triaxial, la cual mide o monitorea las deformaciones del macizo rocoso. Cuando se utiliza para medir los esfuerzos se realiza el proceso de sobreperforación (overcoring) y para el monitoreo la celda se deja instalada al interior del pozo. La celda contiene 3 rosetas de 3 ó 4 strain gauges. Dicho dispositivo debe ser instalado fuera del área de influencia de la galería. Las deformaciones registradas en el test biaxial permiten calcular las propiedades de la roca (módulo de Young y razón de poisson) y así determinar el tensor de esfuerzos del sitio en análisis en 3D.

La idea fundamental de esta tecnología se basa técnicamente en dos principios:

- Al sobreperforar un testigo de roca In-situ, éste debiera tender a deformarse (por lo general, relajarse) tratando de recobrar el estado de equilibrio al que estaba sometido antes de efectuarse la sobreperforación (overcoring).
- Al conocer estas deformaciones, además de las propiedades elásticas de la roca (módulo de Young y razón de Poisson), se pueden determinar los esfuerzos in-situ, a través del software Stress90.

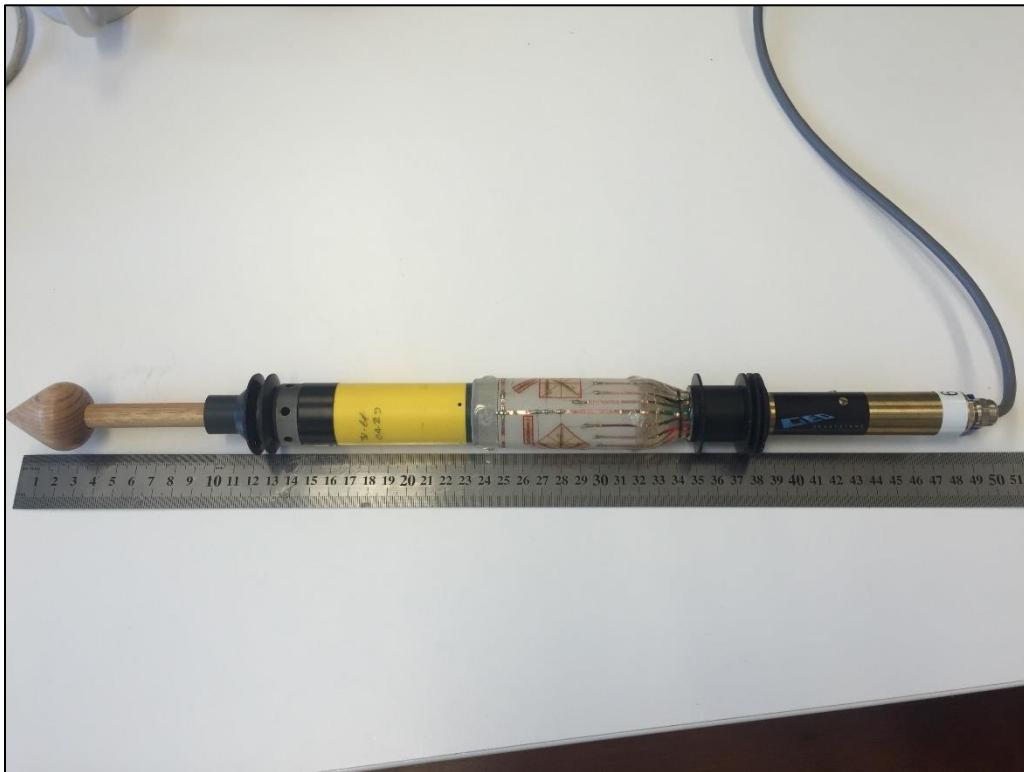


Ilustración 5.9 Celda Hollow Inclusion Digital, la cual posee un largo de 50cm aproximadamente (Moraga, 2021).

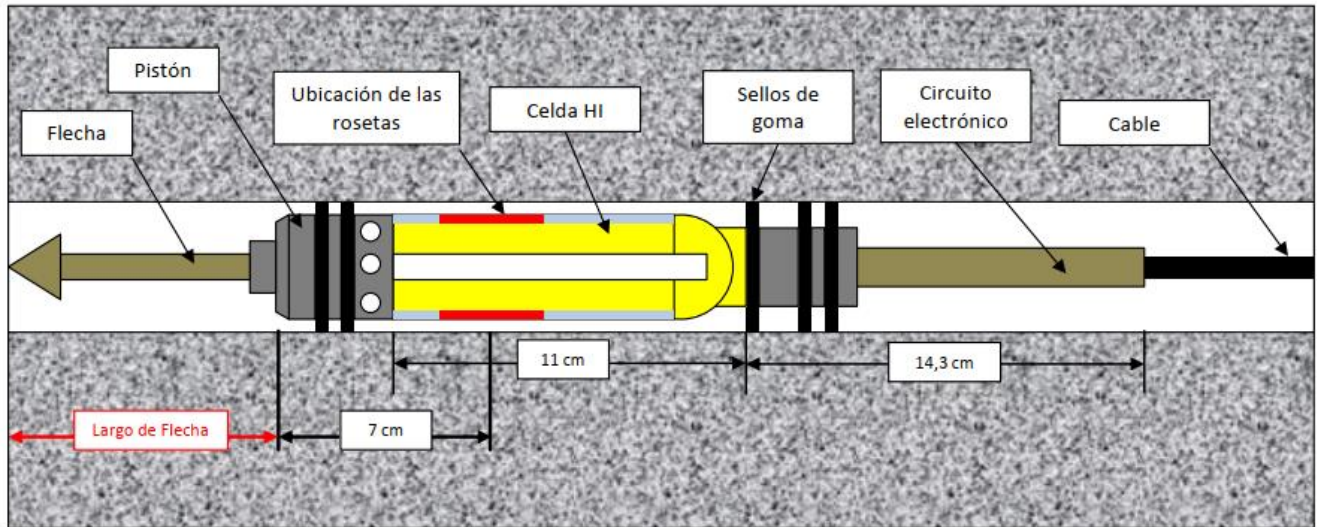


Ilustración 5.10 Dimensiones principales de la celda HID (Moraga, 2021).

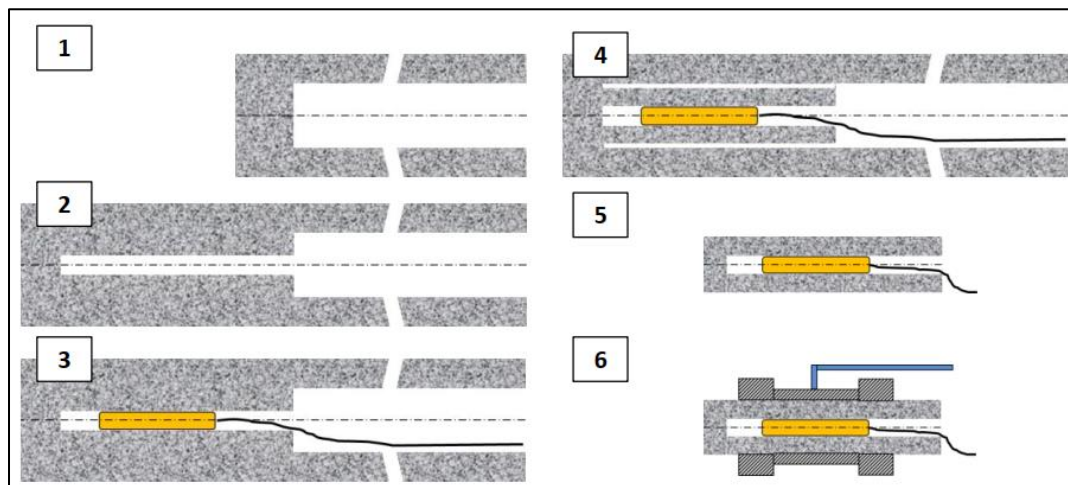


Ilustración 5.11 Descripción de la metodología overcoring con la celda CSIRO Hollow Inclusion Digital (Moraga, 2021).

A continuación, se detalla cada uno de los pasos del overcoring:

1. Perforación en 6" de diámetro de una longitud de 2.5 a 3.0 veces el ancho de la labor.
2. Realizar perforación concéntrica de 38 mm de diámetro y con una longitud de 50 a 60 cm.
3. Instalar celda CSIRO HID en el interior de la perforación de 38 mm.
4. Sobre perforar el macizo rocoso con la celda instalada.
5. Retirar el testigo con la celda.
6. Introducirlo en cámara biaxial para determinar las propiedades elásticas.

Se recomienda usar la celda con 9 strain-gauges para la medición de la variación de esfuerzos en un macizo rocoso isotrópico y con 12 strain-gauges para un macizo rocoso anisotrópico. Éste último es el más utilizado actualmente.

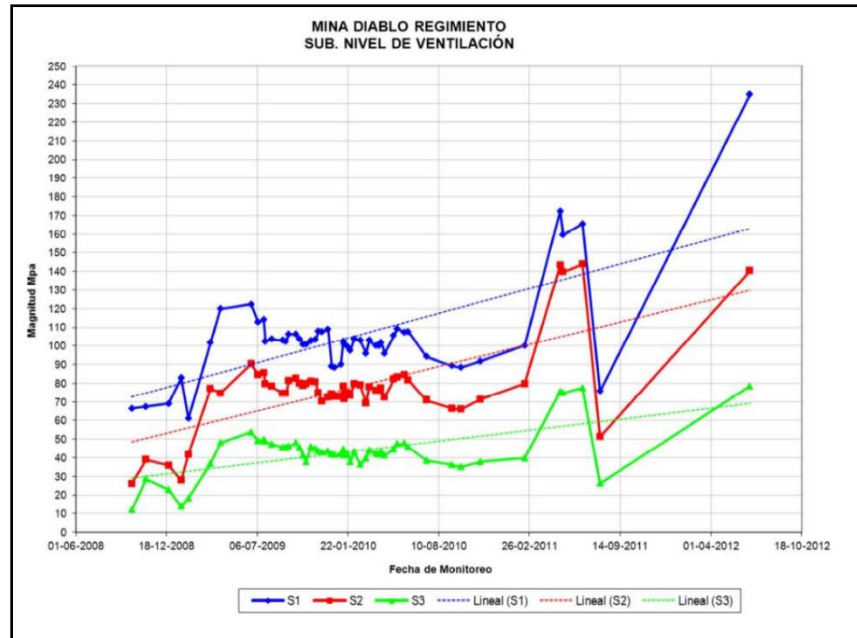


Ilustración 5.12 Ejemplo de monitoreo de esfuerzos mediante la celda HI en el subnivel de ventilación de la mina diablo regimiento (SGO, 2019).

La celda HI se puede dejar al interior de un pozo para monitorear los esfuerzos tal como se muestra en la Ilustración 5.12. Sin embargo, como se observa en el gráfico, los esfuerzos a partir del 26-02-2011 empiezan a tener una variación demasiado grande. Esto se debe en parte, a que la resina epóxica al interior del pozo superó su período de resistencia de aproximadamente 3 años en base a experiencias previas en la DET (su composición química se va deteriorando al pasar el tiempo lo que reduce su resistencia y la adherencia entre los strain gauges con el macizo rocoso). Además, aparecen *breakouts*⁵ en el pozo. Por otro lado, como referencia, según datos del proveedor la celda puede medir la deformación del macizo rocoso hasta los 100[Mpa] (GEOSYSTEMS, 2014) y la resina posee una resistencia a la compresión de 90[Mpa]. Por lo que, una vez superado esos valores la medición deja de ser confiable.

Algunos de estos problemas ya se comentaban por B. Amadei en 1997:

- 1) Rotura del aislamiento eléctrico entre los strain gauges y la roca debido a la exposición prolongada del instrumento y sus conexiones eléctricas a un entorno húmedo y corrosivo.
- 2) Cambios de volumen del cemento epóxico y del cuerpo epóxico de la celda debido a la polimerización continua.
- 3) Absorción de humedad que provoca hinchazón en el cemento epóxico.

⁵ Los *breakouts* son roturas diametralmente opuestas en el macizo rocoso circundante al pozo producidas por los esfuerzos *in situ*. Estas roturas se producen a lo largo de la dirección de la menor componente del tensor de esfuerzos *in situ* (σ_3). Se recomienda ver la Ilustración 5.28

- 4) Deterioro de la adherencia del cemento epóxico por efecto de la humedad o los cambios de temperatura.

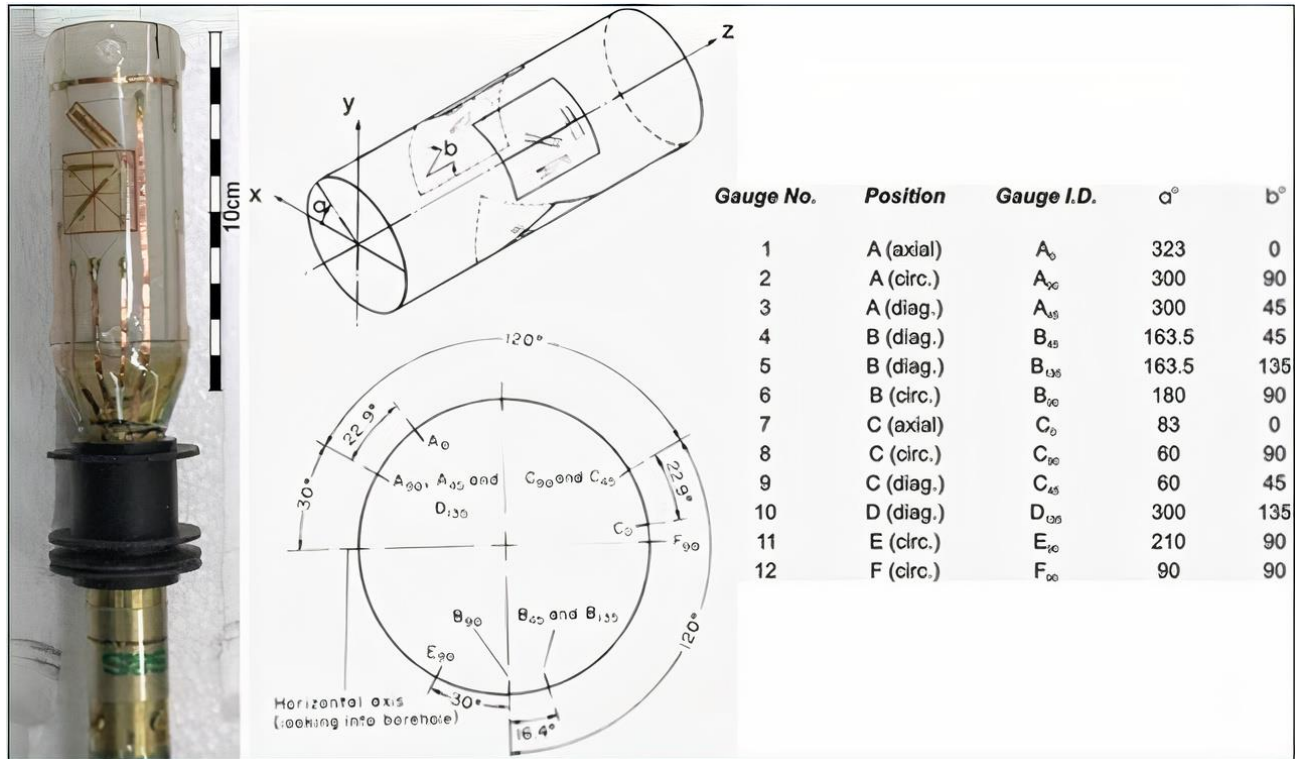


Ilustración 5.13 Disposición de los strain gauges en la celda Hollow Inclusion (Child, 2008).

5.4 Cables coaxiales y fibra óptica

Desde el año 1987 se ha usado el sistema TDR (Time Domain Reflectometer) para el monitoreo de la subsidencia. Este consiste en un cable coaxial que se instala dentro de una perforación, generalmente lechado, orientado hacia el sector en que se esperan los efectos de la subsidencia. Las grietas desarrolladas como producto del avance de la subsidencia producen un corte en el cable, cuya longitud inicial (de instalación) es conocida. Mediante un equipo lector de cable TDR se determina la longitud del cable, en forma discreta a lo largo del tiempo, por lo tanto, se puede inferir la posición de la grieta activa más cercana al sitio en que se instaló el cable (Cavieres & Diaz, 1993). El diámetro utilizado para instalar dichos cables es de 1[pulg].

Posteriormente se fueron incorporando en la División nuevas tecnologías como la STDR, SSTDR y BOTDR. Donde, ya no solamente existe la opción de utilizar cables coaxiales de cobre, sino que también está la fibra óptica, con la cual se pueden hacer circular pulsos eléctricos para determinar el avance de la subsidencia, el caving, medir deformaciones de elementos de soporte como pernos y para la transmisión de datos. Sin dudas la fibra óptica es superior en términos de sensibilidad y transmisión de datos, por el contrario, en términos de flexibilidad el cable coaxial es mejor.

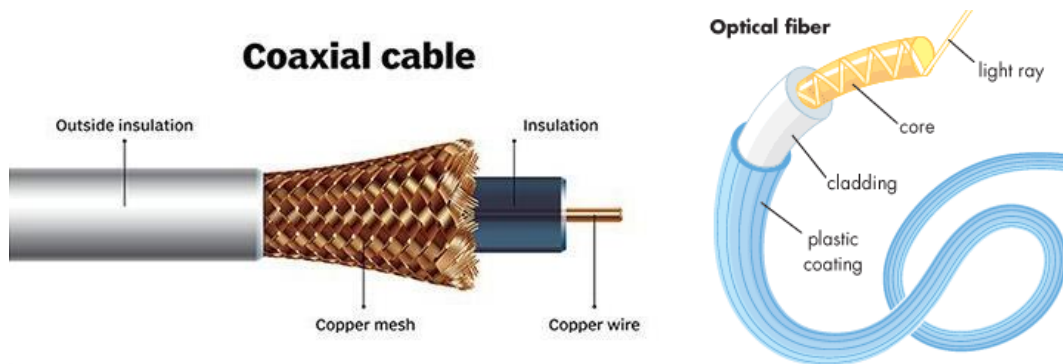


Ilustración 5.14 Componentes del cable coaxial y la fibra óptica (McCarthy, 2019).

5.5 Inclinómetros

Los inclinómetros, son equipos que miden la inclinación (angular) de una perforación, respecto a una línea vertical u horizontal, según sea la posición de esta con el fin de calcular mediante trigonometría el desplazamiento del pozo a través del tiempo. Para ello se toma como punto fijo el fondo del pozo o el collar de éste. En la siguiente ilustración se muestra la variación de la inclinación de los tubos inclinómetros en la pared cabeza (Hw) de la caverna.

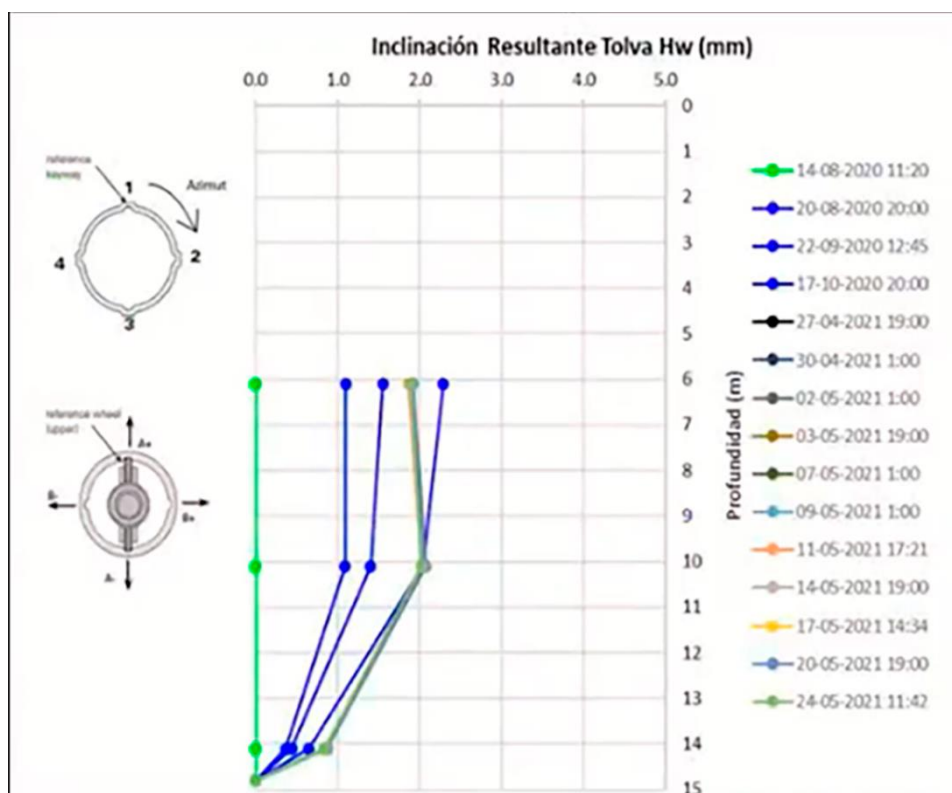


Ilustración 5.15 Ejemplo de medición empleando inclinómetros en DET en Andes Norte (Valdivia, 2021).

Por otro lado, cabe mencionar que existen diferentes tipos de inclinómetros: horizontales o verticales, uniaxiales o biaxiales, extraíbles o fijos. Estos (los fijos) quedan instalados al interior del pozo para monitorear el desplazamiento y se les denominan “in-place”.

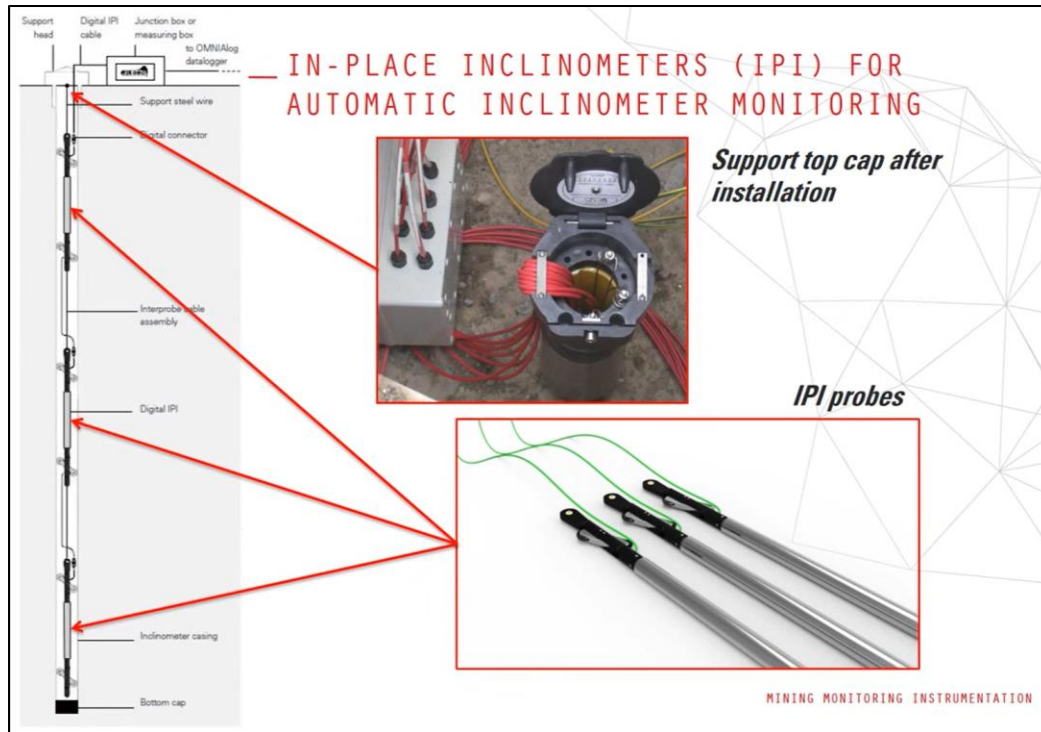


Ilustración 5.16 Ejemplo de inclinómetro “In-place” (SISGEO, 2020).

Todos estos equipos se basan en el uso de MEMS con los cuales se puede obtener la variación angular del pozo. La temperatura de operación de estos dispositivos es desde los -30°C hasta los 70°C y las mediciones pueden ir desde los $\pm 10^{\circ}$ a los $\pm 30^{\circ}$ respecto a los ejes denominados “A” y “B”. Los cuales se pueden ver a continuación:

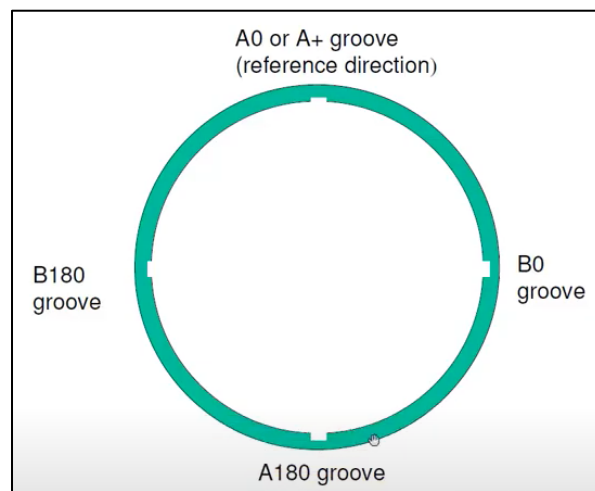


Ilustración 5.17 Ranuras de los ejes que se miden con el inclinómetro (Dunnicliff, 1998).

De todas formas, se puede pedir al proveedor que el inclinómetro esté calibrado y/o diseñado para medir hasta $\pm 90^\circ$, sin embargo, como se mencionó antes, generalmente están calibrados hasta un máximo de $\pm 30^\circ$.

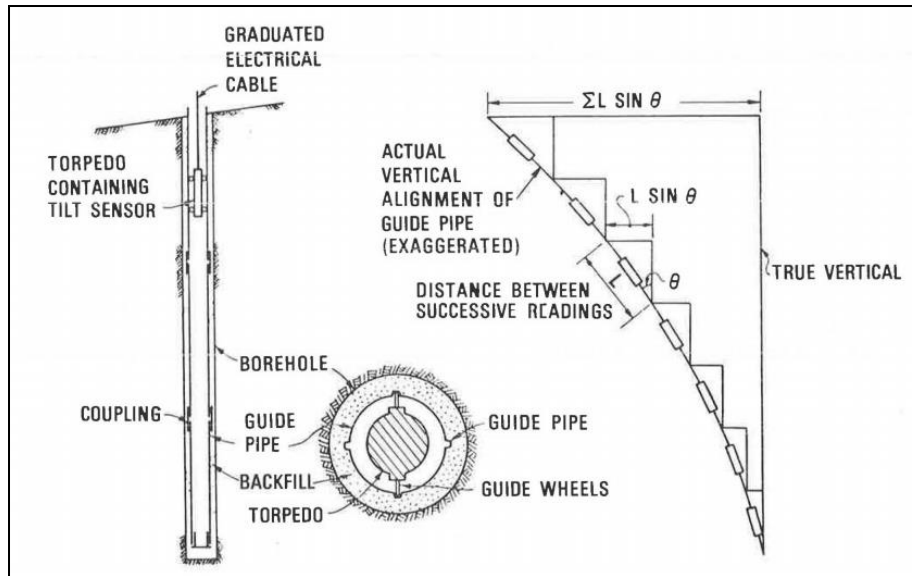


Ilustración 5.18 Principio de operación del inclinómetro (Dunnicliff, 1998).

5.5.1 Tubería inclinométrica

Los inclinómetros van instalados con una tubería inclinométrica de plástico la cual se puede observar a continuación:

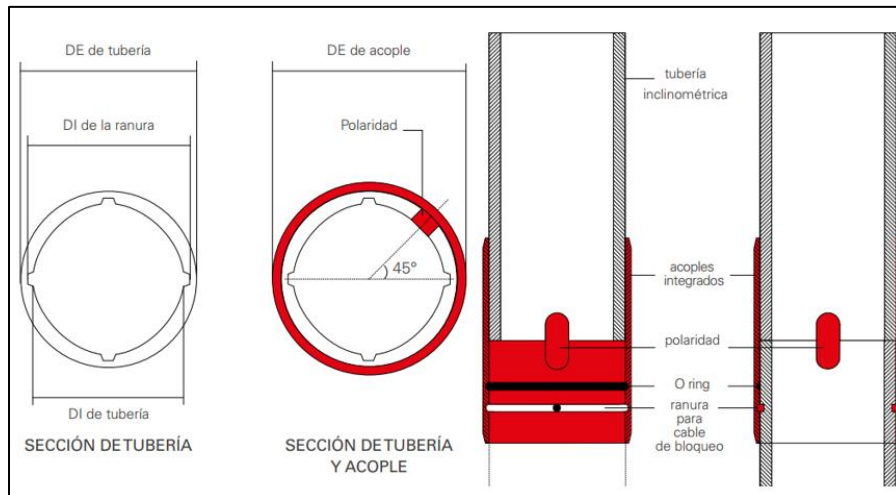


Ilustración 5.19 Tubería inclinométrica (SISGEO, 2020).

Donde se destaca que el diámetro de la **perforación** debe ser mínimo de **101[mm]** (4[in]). Por otro lado, el diámetro exterior de la tubería cambia ligeramente dependiendo de los modelos y empresas, pero en ningún caso superan los **85[mm]** (3,3[in]).

5.5.2 Inclínómetros-extensómetros 3D

Estos inclinómetros a diferencia de los anteriores tienen la característica que vienen incorporados con un extensómetro magnético, lo cual permite analizar la variación de los anclajes a lo largo del pozo. En consecuencia, el trabajo en conjunto de los 2 instrumentos permite obtener el perfil de desplazamiento en los 3 ejes del pozo.

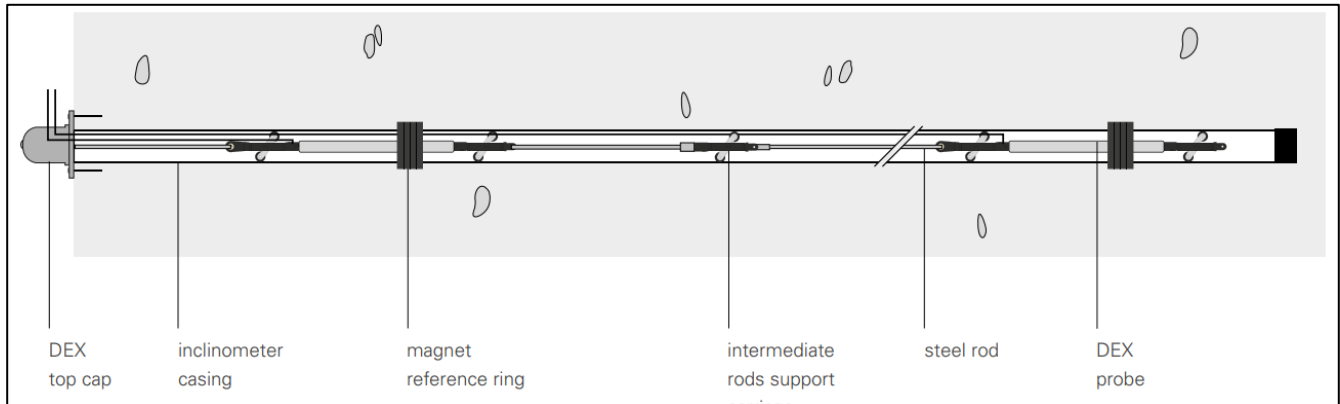


Ilustración 5.20 Inclínómetro-extensómetro y sus componentes (SISGEO, 2020).

5.6 Tiltmeters

Los tiltmeters son dispositivos que sirven para obtener la variación angular de uno o dos planos a los cuales se tiene interés. Generalmente se colocan en las paredes de las excavaciones mineras. El máximo valor de medición de estos dispositivos va desde los $\pm 2^\circ$ hasta los $\pm 15^\circ$.

Al interior de ellos existe un microsistema electromecánico (MEMS) que permite una medición bastante sensible de la variación angular (hasta 1 arco de segundo equivalente a 0,00028 grados sexagesimales). La medición es respecto a los planos definidos durante la instalación y calibración del equipo.



Ilustración 5.21 Tiltmeter MEMS Biaxial eléctrico con señales de output de 4-20[mA] (RST INSTRUMENTS, 2016).

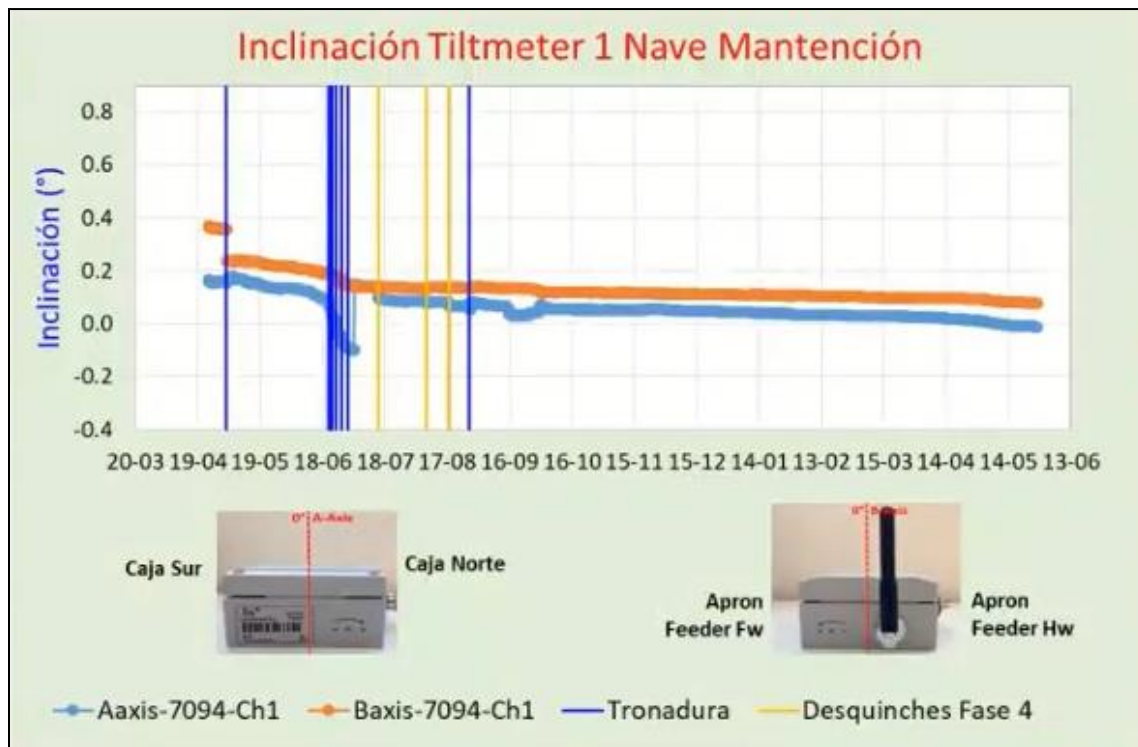


Ilustración 5.22 Ejemplo de utilización de tiltmeter para la Nave de Mantención (Valdivia, 2021).

Cabe mencionar que la calibración es un momento muy importante, ya que en esa etapa se define el eje desde el cual se empezará a medir el movimiento angular.

Por otro lado, el instrumento está basado en un acelerómetro orientado al eje horizontal o vertical dependiendo del caso. Dicho acelerómetro se encuentra al interior del microsistema electromecánico.

5.7 Crackmeters

Los medidores de grietas (crackmeters) de cuerda vibrante están diseñados para medir el desplazamiento entre los lados de una grieta, es decir, entre dos puntos. Este instrumento consiste en una serie de elementos sensibles de cuerda vibrante con un resorte con tratado térmico y libre de tensión, conectado a la cuerda en un extremo y a una varilla de conexión en el otro. La unidad está completamente sellada y opera a presiones de hasta 250 [psi]. Conforme la varilla de conexión sale del cuerpo del medidor, el resorte se alarga provocando un incremento en la tensión, lo cual es percibido por el elemento de cuerda vibrante. El aumento en la tensión (deformación) de la cuerda es directamente proporcional a la extensión del eje.

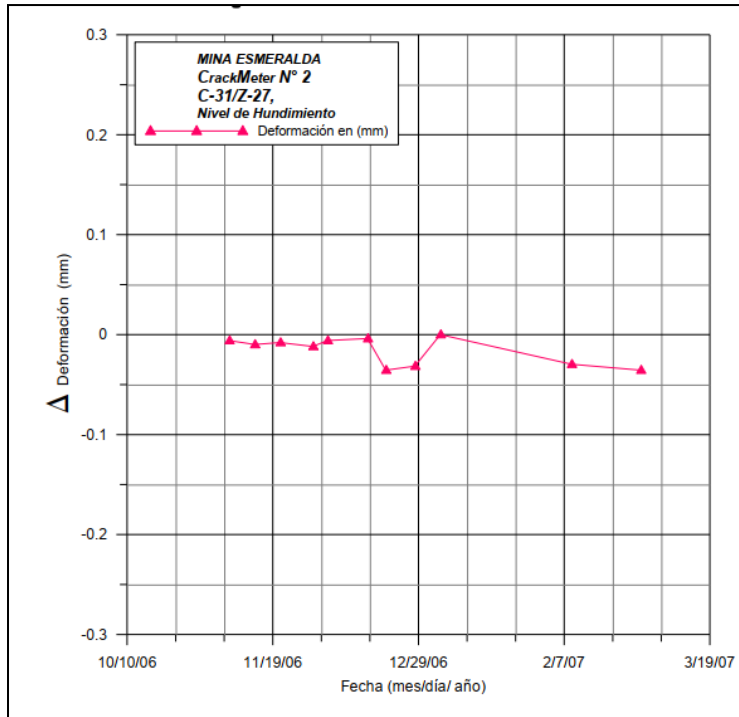


Ilustración 5.23 Ejemplo de medición de la deformación en mina esmeralda (SGO, 2019).

Es importante proteger el crackmeter contra posibles daños. Por ello se le coloca una placa (de acero) de protección estándar lo suficientemente larga para cubrir un crackmeter.

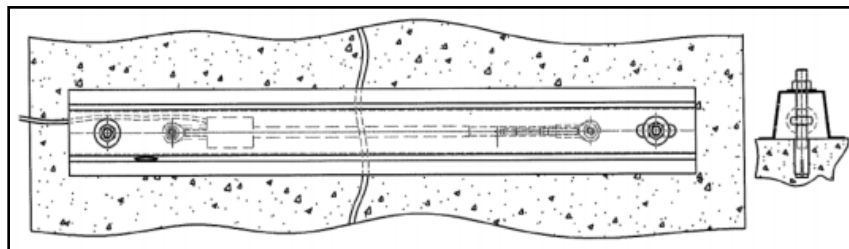


Ilustración 5.24 Instalación típica de la placa de protección (SISGEO, 2020).

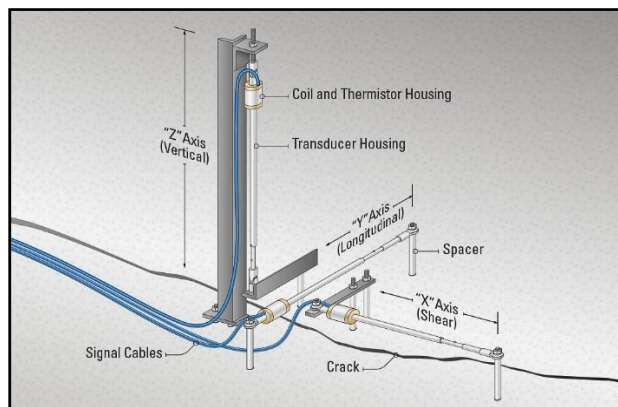


Ilustración 5.25 Configuración para una medición 3D (GEOKON, 2021).

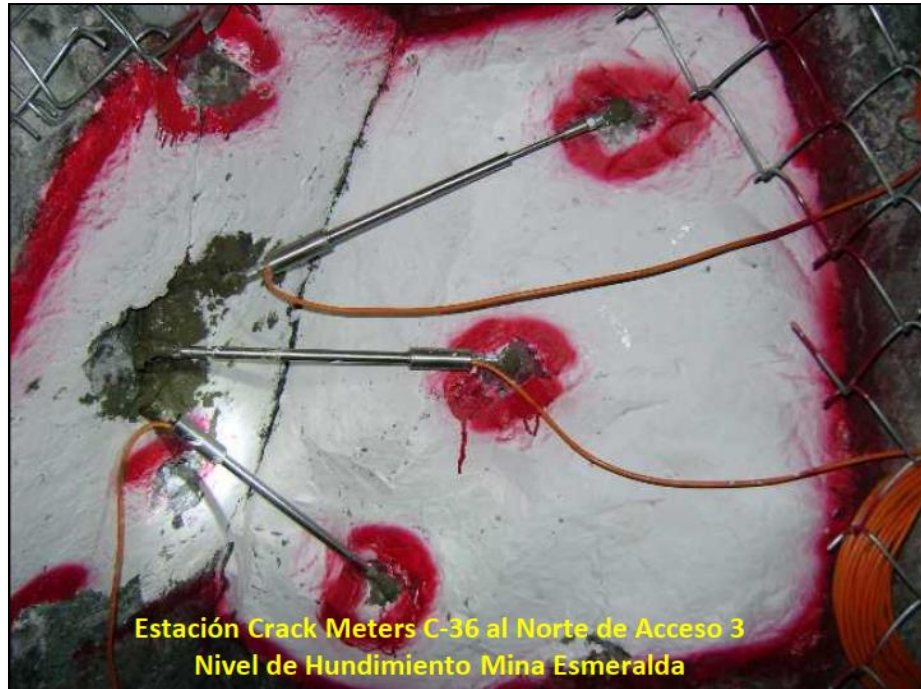


Ilustración 5.26 Ejemplo de aplicación de este instrumento en la mina esmeralda (SGO, 2019).

5.8 Borehole Camera (BHC)

La BHC corresponde a una cámara de bajo perfil, que permite visualizar y generar un vídeo de alta resolución del estado de las paredes de las perforaciones desarrolladas dentro del macizo rocoso, ver Ilustración 5.27. Sus principales aplicaciones se centran en la evaluación de pilares (inspección visual de las paredes del pozo de auscultación) y estimación del Cave Back (verificación de límite de la cavidad en pozos de caveback).

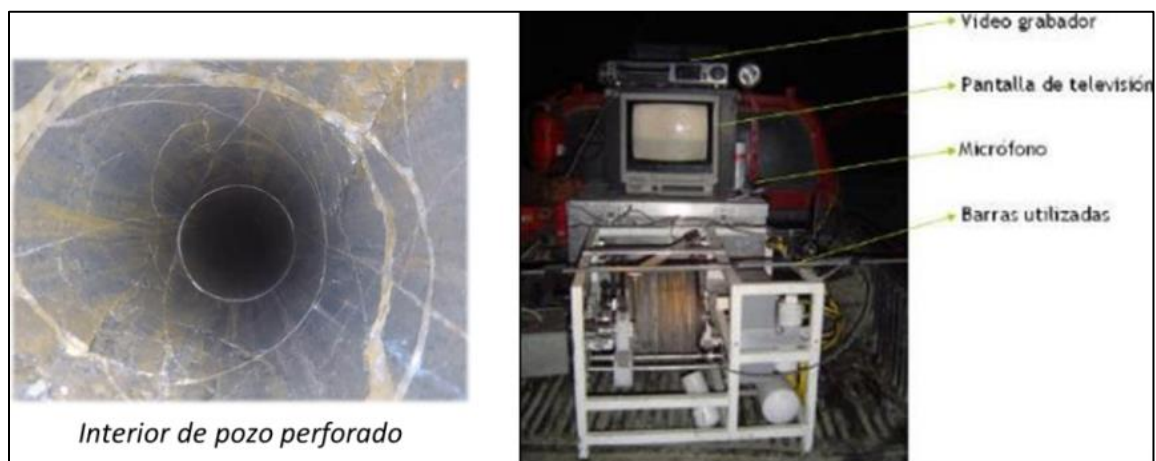


Ilustración 5.27 A la izquierda se observa el interior del pozo de auscultación y a la derecha se observa el equipo de comando del BHC (Madrid, 2005).

Su incorporación a la División es desde 1993 según los registros y su aplicación se puede observar en la siguiente ilustración:

Condición	Estado	Color	Descripción
	Muy Bueno	Verde	Macizo rocoso sano, sin evidencia de grietas. Comportamiento en el rango elástico. Se deduce que el campo de esfuerzos no es suficiente para generar agrietamiento.
	Bueno	Amarillo	Macizo rocoso con la competencia suficiente para tomar esfuerzos (aún no se llega al límite de ruptura), el nivel de esfuerzos y anisotropía de este tramo, son mayores que para el caso I, y son de tal magnitud que el macizo rocoso podría evidenciar grietas. La presencia de un daño pre-existente podría aumentar el efecto de generación de grietas.
	Regular	Azul	Macizo rocoso con la competencia suficiente para tomar esfuerzos (aún no se llega al límite de ruptura), el nivel de esfuerzos y anisotropía de este tramo, son mayores que para el caso II, y son de tal magnitud que el macizo rocoso podría evidenciar grietas, y fallas de corte con su respectiva generación de lascas y sobre excavación. Si el nivel de esfuerzos es considerablemente alto, es posible incluso la evidencia de diskings para este tramo. La presencia de un daño pre-existente podría aumentar el efecto sobre-excavación.
	Malo	Rojo	Macizo rocoso superó su límite de ruptura. Deformación con deslizamiento y acomodo de bloques sueltos. Pérdida de capacidad resistente. Es decir, macizo rocoso con daño fuerte (zona "plastificada").

Ilustración 5.28 Índice de daño en el pilar de acuerdo con el estado del macizo rocoso observable mediante el análisis del interior del tiro de auscultación grabado con la BHC (Varela, 2019).

Así, mediante la tabla se puede calificar la condición en el que se encuentra el pilar.

5.9 Flat jack

El Flat Jack consiste en una almohadilla de presión de acero lleno de aceite equipado con dos tubos de acero, uno para la conexión de la bomba y otro para vincular el pad o para montar un transductor de presión. Con este dispositivo se puede medir el esfuerzo uniaxial sobre las paredes de las galerías.

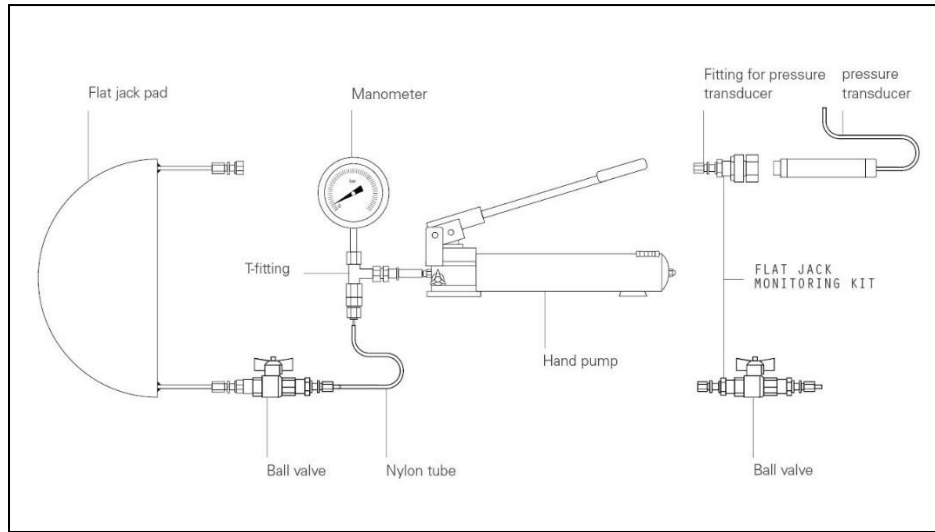


Ilustración 5.29 Elementos que componen el Flatjack (SISGEO, 2020).



Ilustración 5.30 Ejemplo de aplicación en la mina (SGO, 2019).

La temperatura de funcionamiento de estos dispositivos va desde los -20°C a los 80°C . Su rango de medición depende del modelo, en el caso de los FlatJack con vibrating wire van generalmente desde los $0[\text{MPa}]$ hasta los $20[\text{MPa}]$, sin embargo, también se han visto modelos que llegan hasta los $100[\text{MPa}]$. Por otro lado, con un mínimo de 6 ranuras no coplanares se puede estimar el campo de esfuerzos 3D. La ISRM sugiere realizar 9 mediciones (uniaxiales, perpendiculares a las ranuras) para obtener el campo de esfuerzos 3D, utilizando información redundante para ello.

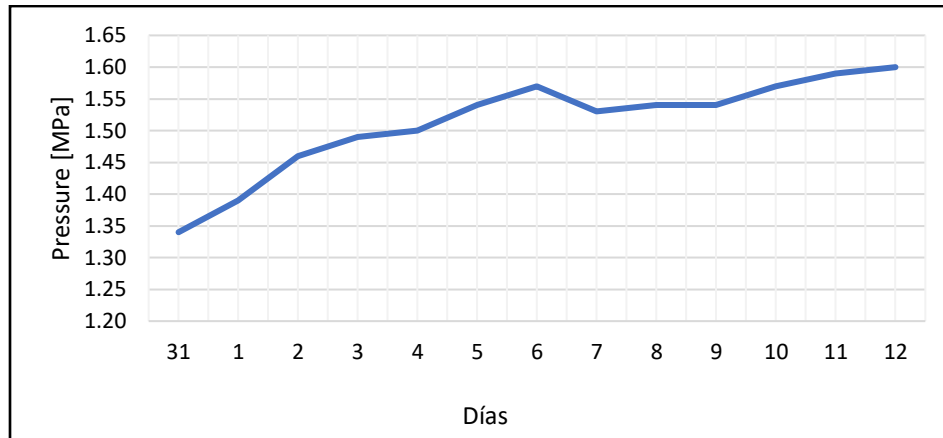


Gráfico 5.1 Ejemplo de mediciones con el Flatjack donde se observa la presión medida a través del tiempo (elaboración propia).

5.10 Scanner 3D

5.10.1 Scanner Estático

El Scanner 3D utiliza la tecnología LiDAR para medir túneles y cavidades. Permite obtener una nube de puntos de las excavaciones, mediante la cual se puede realizar análisis de desplazamientos, deslizamientos, sobreexcavaciones, entre otros.

El modelo empleado es el FARO Focus S350, el cual posee un alcance desde los 0,6[m] hasta los 350[m] con una precisión de hasta ± 1 [mm].

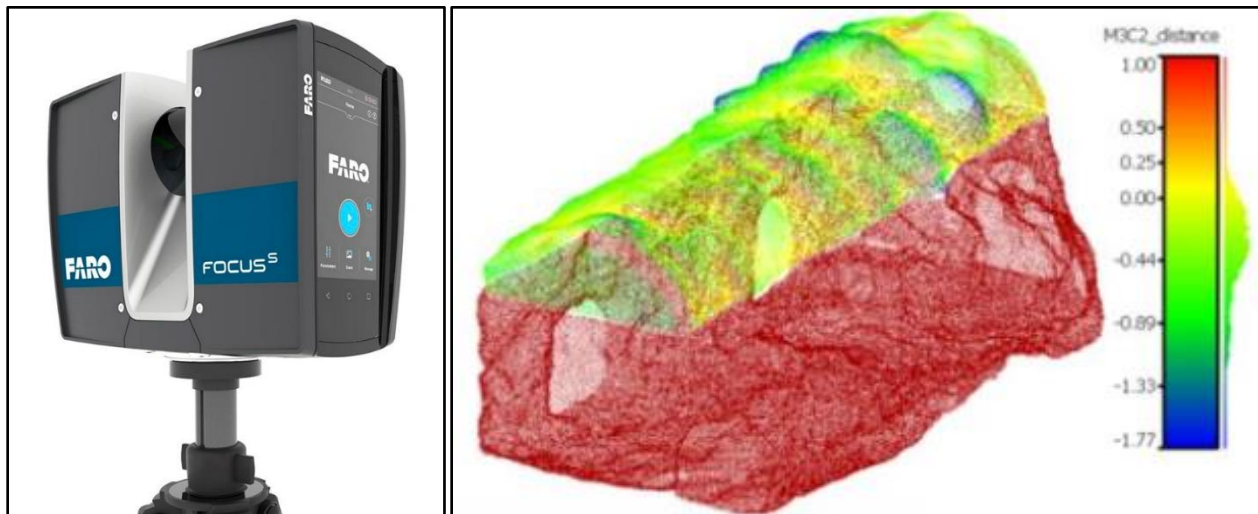


Ilustración 5.31 A la izquierda Modelo Focus S350 (Microgeo, 2021) y en la derecha un ejemplo de análisis de sobre excavaciones con el instrumento (SGO, 2019).

5.10.2 Scanner de cavidades

Equipo Optech

El equipo Optech es un distanciómetro compacto que tiene cierto alcance, está diseñado para dar lecturas de alta exactitud, pudiendo operar en interior mina con o sin presencia de luz. Esta función la desarrolla a través del uso de un diodo láser GaAIAs que genera un pulso óptico que se refleja por el objetivo; a la vez, un contador de alta precisión mide el tiempo de vuelo del pulso láser al objetivo, por lo cual esta medida es convertida en distancia por medio de un microprocesador incluido en el equipo. El diodo láser dispara una proporción alta de repeticiones y emplea un promedio para reducir los errores al azar. El telémetro obtiene una resolución de 1[cm] sobre su alcance, y funciona en un rango que oscila entre los 0,2 [m] a 250[m], aproximadamente.



Ilustración 5.32 Equipo CMS V500 (Microgeo, 2016).

El resultado u output de este equipo es una nube de puntos mediante las cuales se pueden construir sólidos de las excavaciones como piques de traspaso u otros.

C-ALS

El equipo C-ALS fue diseñado para acceder a cavidades de difícil acceso y escanearlas. Esto puede ser útil para realizar análisis de la subsidencia y también para determinar el volumen de air gaps o piques de traspaso, entre otros. Algunas de sus especificaciones técnicas más importantes son:



Ilustración 5.33 C-ALS (Carlson, 2019).

- Alcances de hasta 150m
- Precisión de 5cm
- Mediciones de hasta 200 puntos por segundo
- Escáner en miniatura (5cm de diámetro)
- Cámara de video para evaluar el trayecto del equipo

El equipo fácilmente puede ingresar a través de perforaciones BQ (60mm de diámetro), donde una vez ingresado el instrumento a la cavidad, éste comienza a oscilar en su extremo para realizar la captura del volumen de dicha cavidad tal como se muestra en la siguiente ilustración:

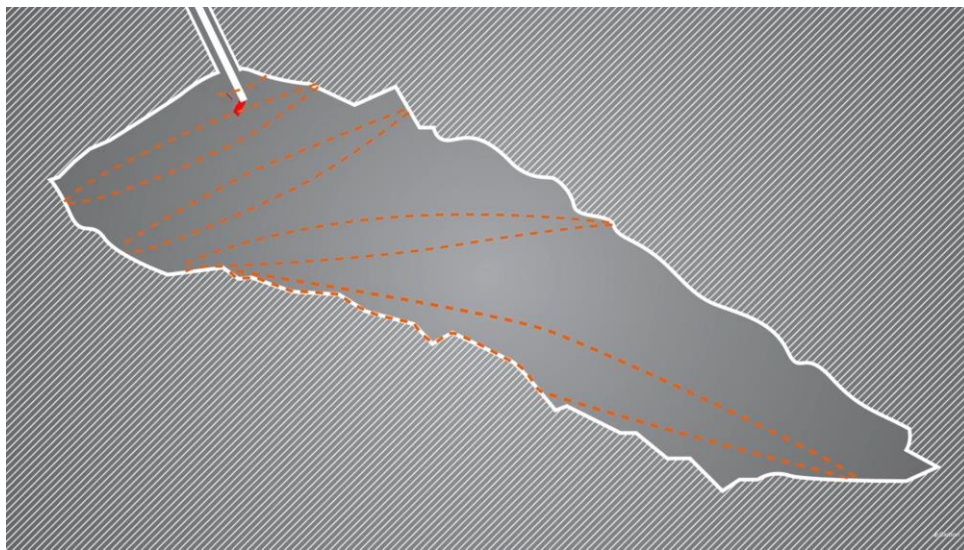


Ilustración 5.34 Escaneo de una cavidad mediante el instrumento C-ALS (Carlson, 2019).

El uso del instrumento mediante un contrato de servicio con terceros donde escanean y entregan la nube de puntos esta evaluado en **\$3.826 dólares** mientras que el valor del instrumento por sí solo es de **\$150.000 dólares**.

5.11 Estación total más prismas topográficos

Los prismas topográficos son un reemplazo de las argollas de convergencia para la triangulación cuando se utilizaba extensómetros de huincha para la medición de la distancia entre las argollas.

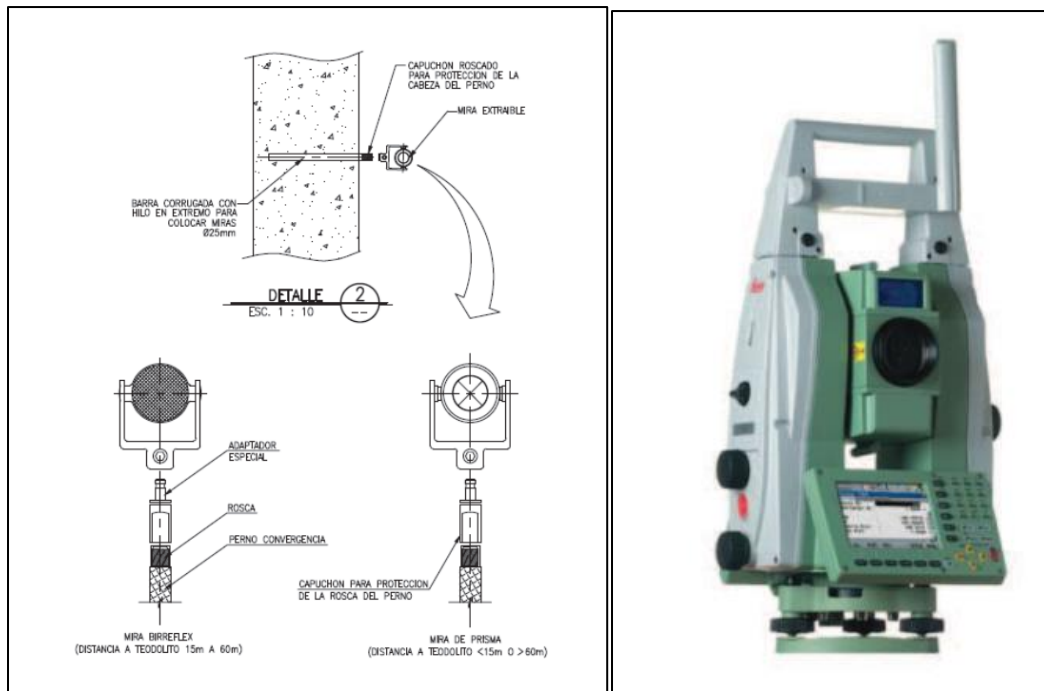


Ilustración 5.35 Miras de prismas (izquierda) y Estación Leica TM30 (derecha) (Madrid, 2005).

Las miras son colocadas en disposición triangular tal como las argollas mencionadas en las secciones anteriores. De tal forma de calcular la distancia y determinar si hubo deformación en las galerías.

5.12 Geófonos y Acelerómetros

Al año 2019 la DET contaba con 71 geófonos triaxiales de 14[Hz], 27 geófonos triaxiales de 4,5[Hz], 4 geófonos uniaxiales de 15[Hz], 6 acelerómetros triaxiales de 2,3[kHz] y 2 acelerómetros triaxiales de 10[kHz]. Estos instrumentos se utilizan para monitorear los eventos sísmicos que se producen por la propagación del caving, el reordenamiento de esfuerzos, entre otros. Mantenerlos controlados es importante para tomar la decisión de restringir el acceso a ciertos sectores dependiendo de la cantidad de eventos registrados y de su intensidad.

Los geófonos permiten medir la **velocidad** del terreno y los acelerómetros permiten medir la **aceleración** del terreno.

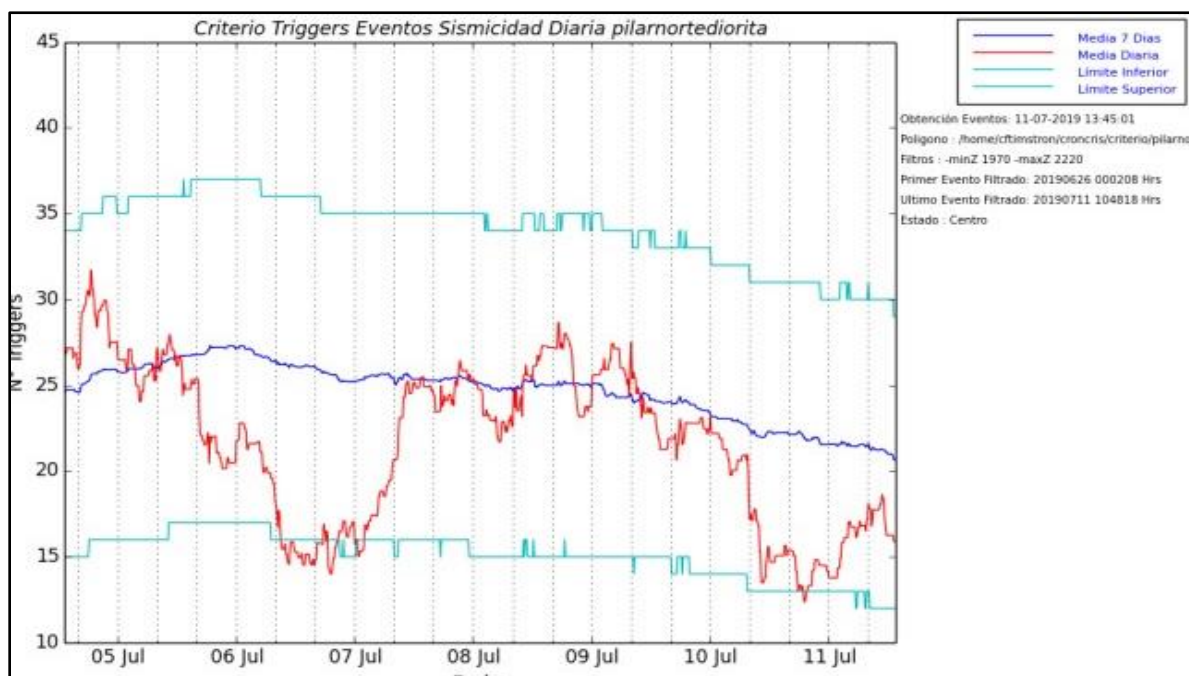


Ilustración 5.36 Criterio de Triggers realizado mediante la medición con geófonos y acelerómetros en Pilar Norte (Jorquiera, 2019).

Los acelerómetros y geófonos conforman la red sísmica, la cual se distribuye generando polígonos con los cuales se evalúan mensualmente de acuerdo con la intensidad de los eventos sísmicos y su periodicidad. Así, se mantienen la seguridad operacional, se delimitan sectores peligrosos de acuerdo con su actividad sísmica. También con esta información se regula la tasa de extracción dependiendo de la respuesta sísmica. Además, un tema muy importante es la obligación de CODELCO de resguardar la seguridad de sus trabajadores según lo estipula el Decreto Supremo N°72, en la cual el SERNAGEOMIN es la entidad de fiscalizar dicho cumplimiento. En ese contexto el sistema sísmico juega un rol protagónico en la División, ya que es ha sido una vital herramienta para prevenir accidentes relacionados con estallidos de rocas provocados por fuertes eventos sísmicos.

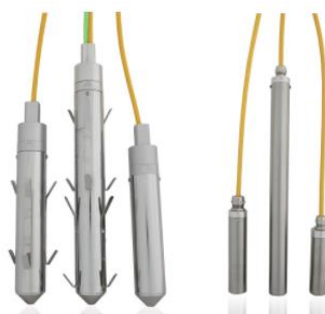


Ilustración 5.37 A la izquierda se observan geófonos y a la derecha acelerómetros del Instituto Sismológico de Minas (IMS, 2021).

Estado Actual de Estaciones DET

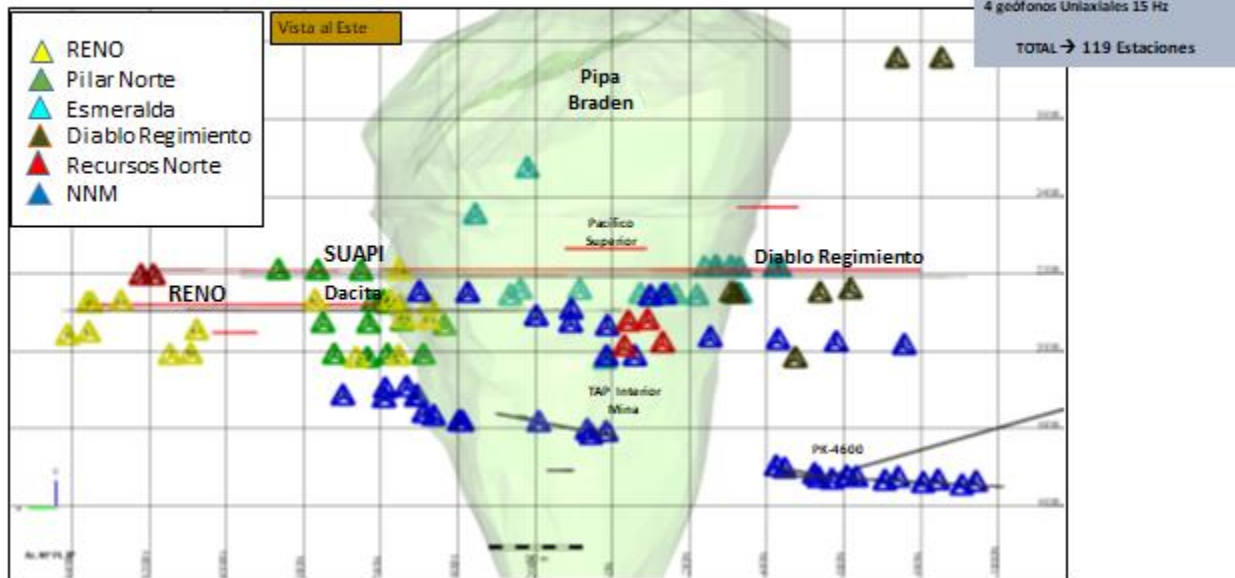


Ilustración 5.38 Vista N-S de la disposición actual de los geófonos y acelerómetros en la DET.

Estado Actual de Estaciones DET

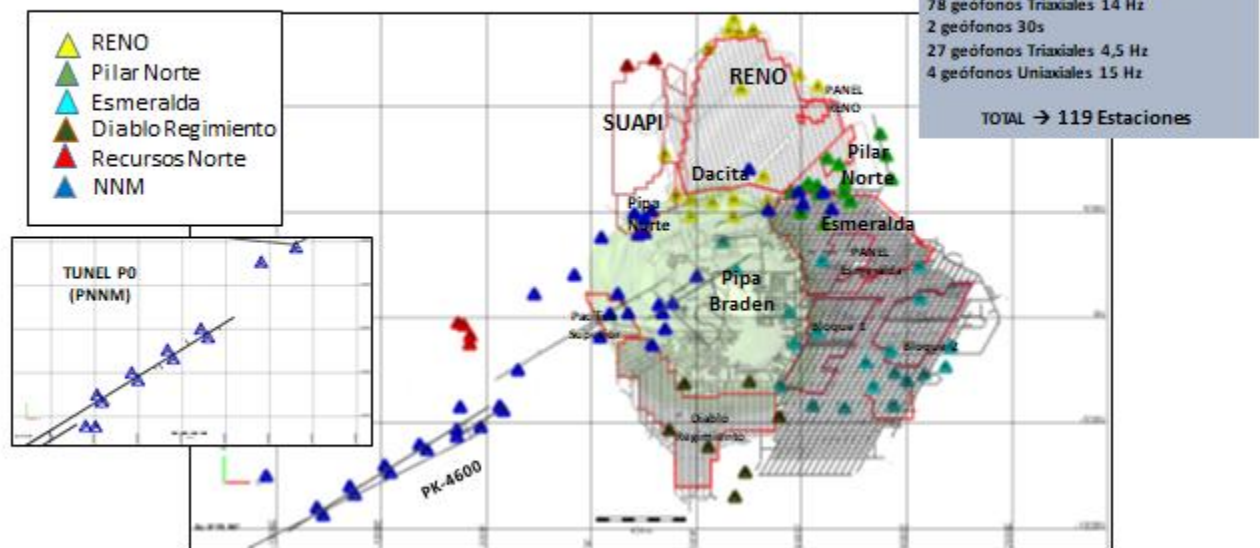


Ilustración 5.39 Vista en planta de la disposición actual de los geófonos y acelerómetros de la DET.

5.13 Emisiones Acústicas (AE)

El método de emisiones acústicas (AE por sus siglas en inglés) tiene múltiples usos en diferentes áreas de ingeniería, uno de ellos es la determinación del estado tensional de esfuerzos del macizo rocoso. Este método se basa en el efecto Kaiser, el cual indica que las emisiones acústicas son registradas a través de los sensores luego de superar la carga previa a la cual estaba sometido el testigo de roca recuperado del lugar de interés.

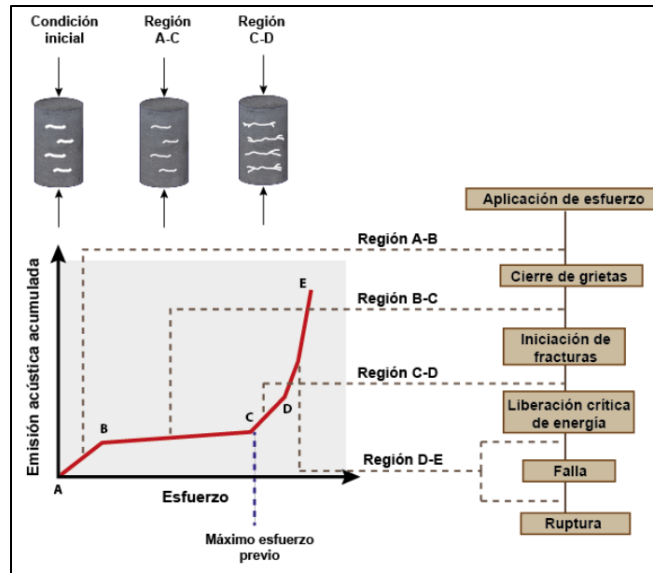


Ilustración 5.40 Estimación del estado inicial de esfuerzos (Blondel, 2017).

Para definir dicho punto de inflexión o despegue de la actividad de la emisión acústica se usan las técnicas del “criterio del máximo esfuerzo previo a AE” detallado por Villaescusa o el “análisis de la razón de deformaciones o DRA” de Yamamoto. El que se detalla a continuación es el criterio del máximo esfuerzo previo a AE:

Para realizar esta técnica es necesario extraer un testigo desde el macizo rocoso del cual se obtendrán subtestigos. Estos últimos se les colocan transductores de AE y medidores de deformaciones (strain gauges) para medir las emisiones sonoras producidas por la generación de nuevas grietas una vez superada la carga previa. Paralelamente se miden las deformaciones que sufre el testigo.

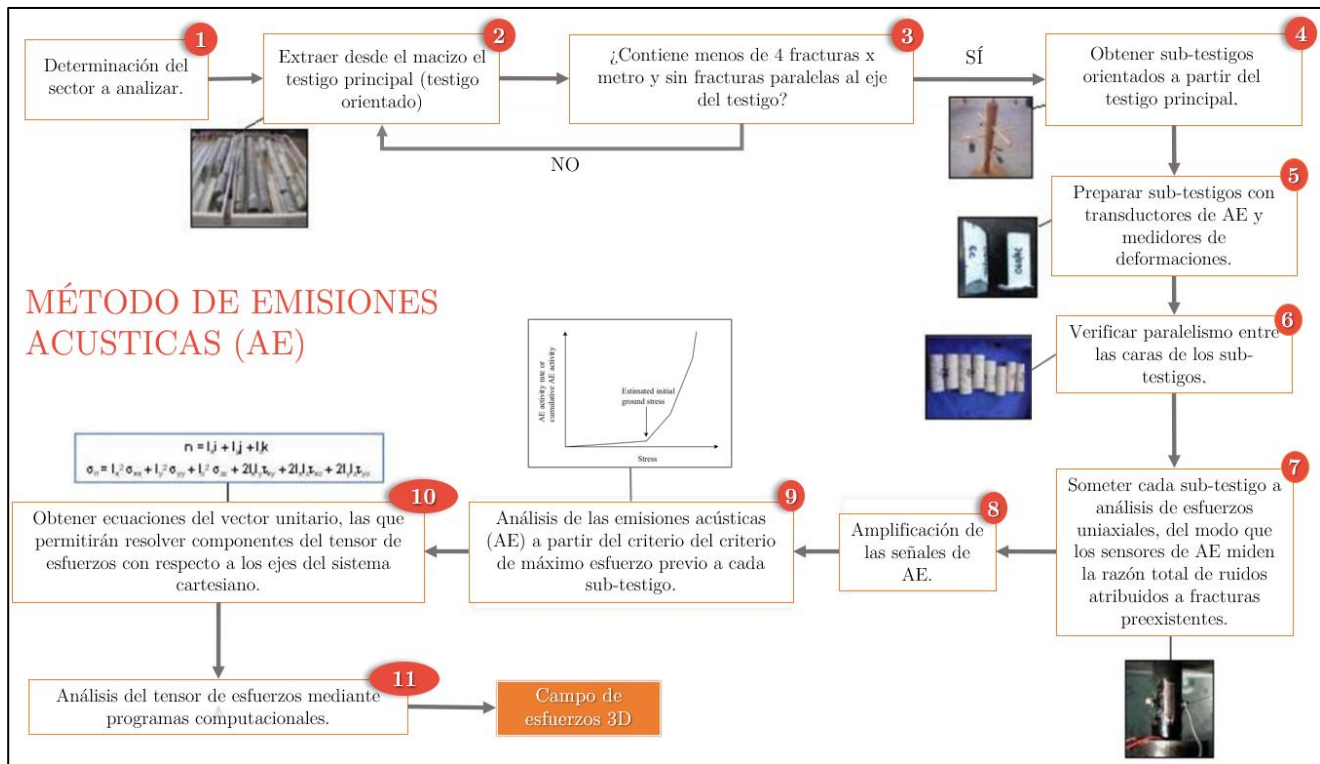


Ilustración 5.41 Metodología para la determinación del campo de esfuerzos mediante emisiones acústicas (modificada de Madrid, 2005).

5.14 Tomografía

La tomografía consiste en un método en donde se aplica una fuente de onda (generalmente un golpe de mazo) sonora a través del pilar. Dicha onda es capturada por los geófonos (receptores) colocados al otro lado del pilar. Esto con el fin de verificar la velocidad de la propagación de la onda (V_p), ya que a menor V_p se asocia a un mayor daño sobre el pilar, por el contrario, una mayor V_p se vincula a un menor daño sobre el pilar.



Ilustración 5.42 Metodología de la tomografía (SGO, 2019).

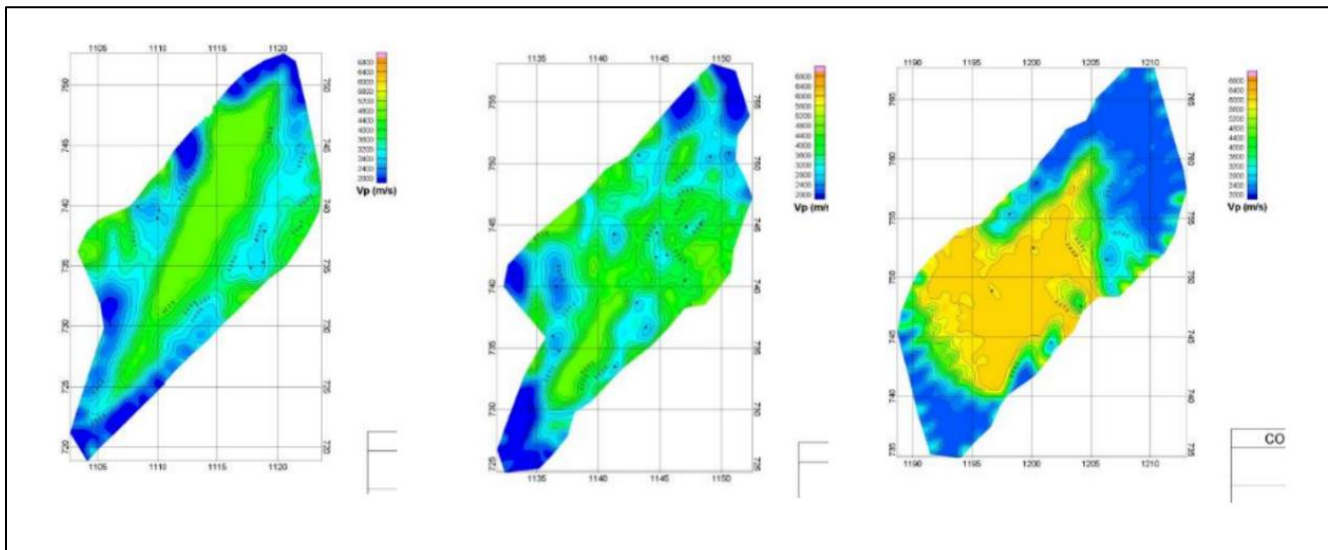


Ilustración 5.43 Resultados de la medición de la onda V_p en cada uno de los pilares analizados (SGO, 2019).

5.15 Pilarómetro

Este proceso se utiliza para conocer la **variación de esfuerzos** sobre un pilar. Donde el aumento de esfuerzos del pilar se traduce en un **desfase** de la onda sonora proveniente del equipo emisor tal como se muestra a continuación:

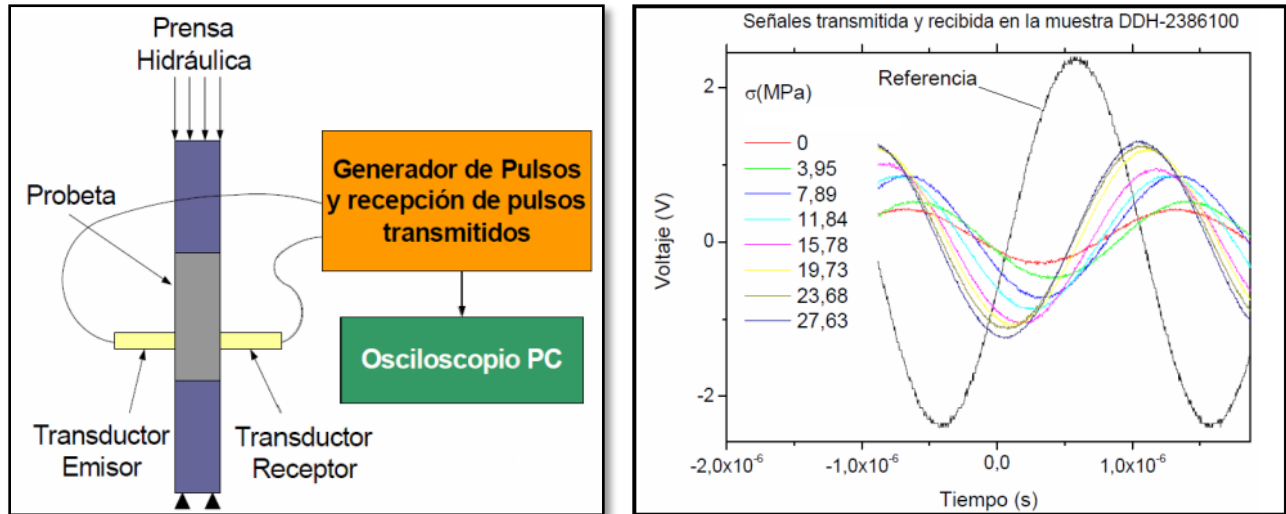


Ilustración 5.44 A la izquierda un dibujo conceptual del procedimiento aplicado a una probeta y a la derecha un ejemplo de cómo afecta el nivel de esfuerzo sobre las ondas sonoras (SGO, 2019).

En otras palabras, el pilarómetro es un método indirecto de la medición de esfuerzos similar a lo observado con las emisiones acústicas, pero bajo principios, escalas y aplicaciones muy diferentes.

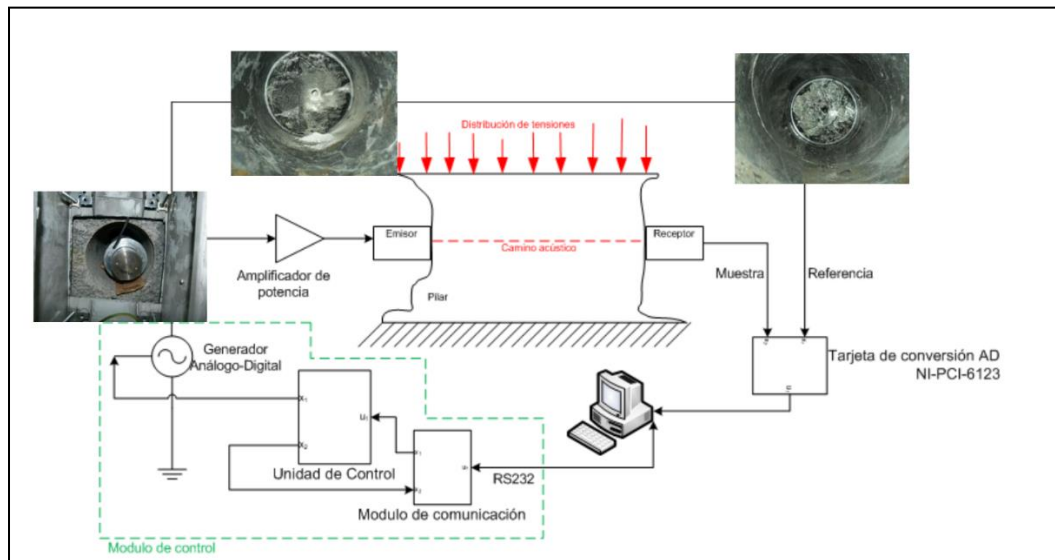


Ilustración 5.45 Metodología del Pilarómetro (SGO, 2019).

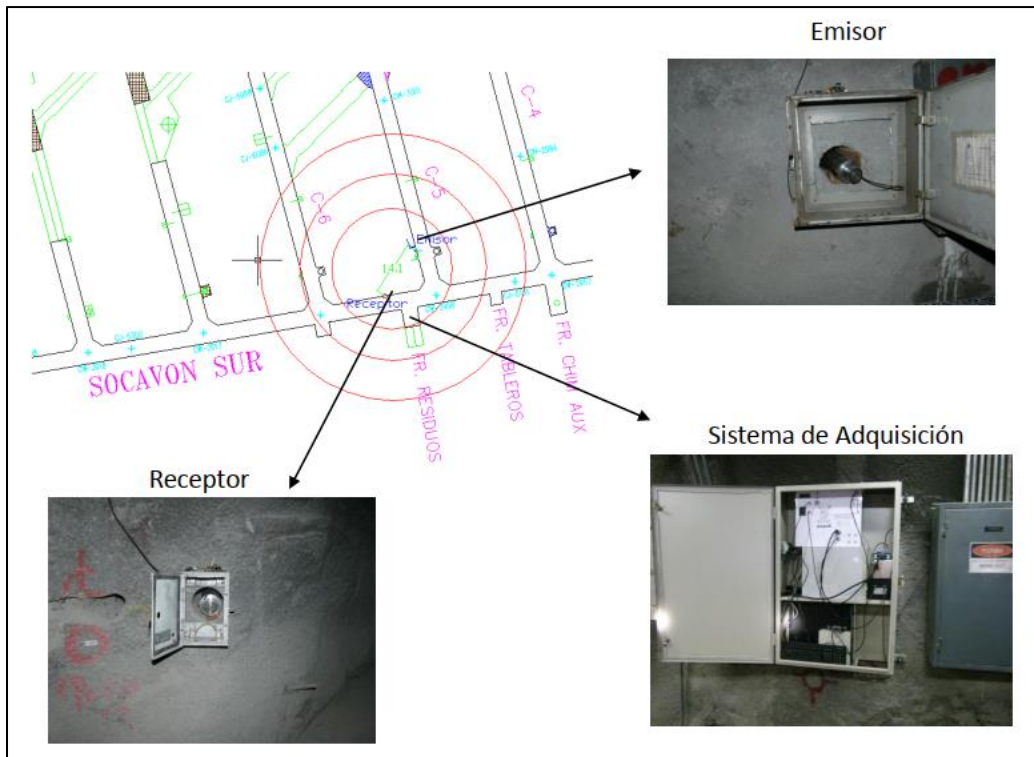


Ilustración 5.46 Ejemplo de la ubicación del emisor y receptor en Pilar Norte (SGO, 2019).

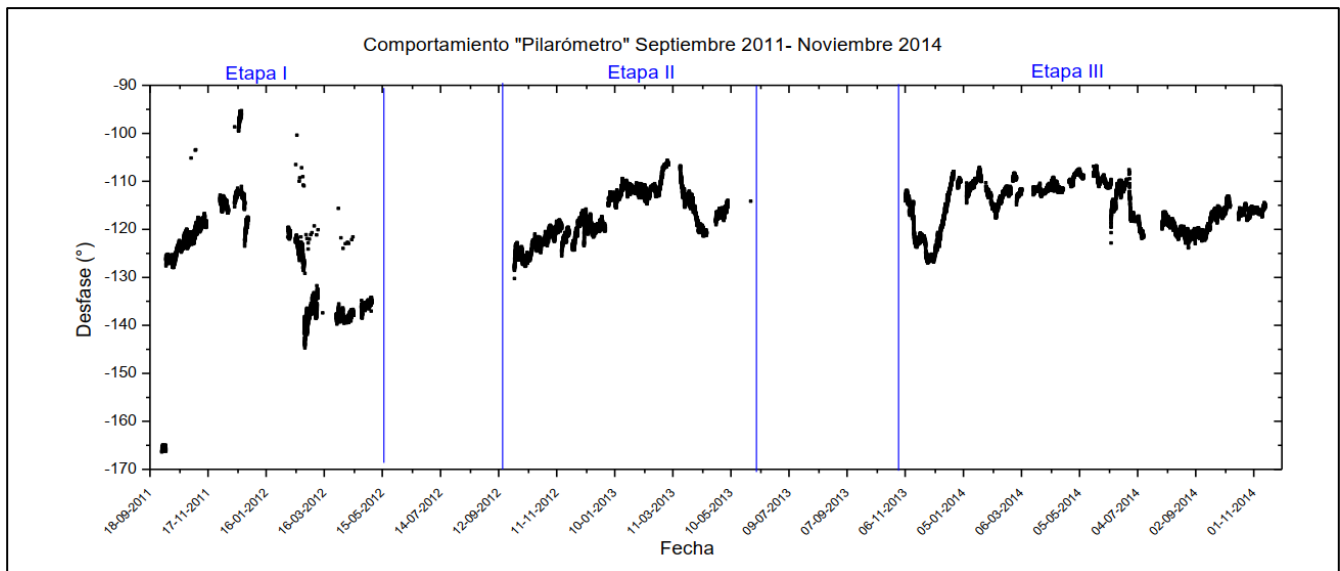


Ilustración 5.47 Ejemplo de medición efectuada en pilar norte (SGO, 2019).

En conclusión, sobre el pilarómetro solamente se ha registrado esta medición que muestra en las ilustraciones anteriores, en pilar norte, y no se ha continuado su uso en otros sectores de la mina.

6 Resumen de Instrumentación geomecánica

A lo largo de la historia de la DET se han utilizado han probado diversas técnicas de medición de esfuerzos tal como se puede observar en la siguiente ilustración:

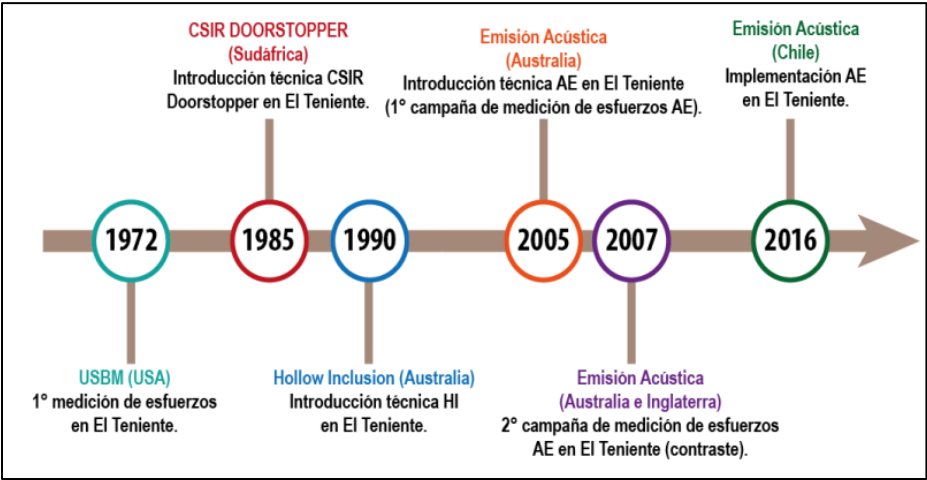


Ilustración 6.1 Línea temporal de los métodos de medición de esfuerzos utilizados en la División El Teniente (Blondel, 2017).

A continuación, se muestra una tabla resumen con cada uno de los instrumentos, sus principales requerimientos, lo que miden, entre otros.

Tabla 6.1 Resumen de las metodologías utilizadas en la DET actualmente para la medición y monitoreo de esfuerzos.

	Misión	D	Metodología	Instrumento	Principales requerimientos
Medición de esfuerzos in-situ	Conocer el campo de tensiones en un punto específico del macizo rocoso fuera de la zona de concentración de tensiones que se originan sobre o cerca de la superficie de toda excavación subterránea. (Esfuerzos primarios, principales y secundarios).	3D	Emisión Acústica	Sensores acústicos y strain gauges	- Perforación principal Ø=63 mm. - Testigo principal de 2 ó 3 m de largo - Subtestigos (Ø=18 mm) del testigo principal con orientación - Transductores de emisiones acústicas y medidores de deformaciones - Análisis de esfuerzos uniaxiales (efecto Kaiser)
			Overcoring	Celda HI	- Sondaje de Ø=38 mm. - Sobreperforado de Ø=100 a 150 mm. - Test biaxial para obtener información sobre módulo de Young y poisson del testigo.
Monitoreo de esfuerzos in-situ			Monitoreo continuo	Celda HID	- Sondaje de Ø=38 mm. - Perforación de Ø=100 a 150 mm. - Test biaxial para obtener información sobre módulo de Young y poisson del testigo.

Tabla 6.2 Instrumentos utilizados actualmente sobre los sistemas de soporte.

	Misión	Instrumento	Principales requerimientos
Monitoreo de esfuerzos y deformación sobre sistemas de soporte	Monitorear esfuerzos y deformaciones sobre los sistemas de soporte instalados.	Flatjack	- Shotcrete como elemento de fortificación - Cable conductor
		Celda de carga en pernos y cables	- Pernos de anclaje o cables de acero como elemento de soporte. - Cilindro de acero de alta resistencia

Tabla 6.3 Instrumentos utilizados actualmente para medir deformaciones y desplazamientos.

	Misión	Metodología	Instrumentos	Principales requerimientos
Deformaciones y desplazamientos	Medir las deformaciones alrededor de las galerías y los desplazamientos de grietas.	Extensómetros	Extensómetros MPBX	- La perforación donde se instalará el instrumento debe alcanzar roca sana. - Punto de referencia para las mediciones y mecanismos de anclajes - Tubo de instalación (PVC)
		Triangulación topográfica	Prismas topográficos	- Puntos de referencia ubicados en posición triangular - Calibrar posiciones al momento de efectuar la lectura
		Instrumentación	Inclinómetros	- Cubierta de PVC para instalar el instrumento - Software de análisis de datos
			Tiltmeters	Calibrar para definir el eje desde donde inicia la medición
			Crackmeters	Puntos fijos de instalación para realizar la medición de la cinemática de la falla.
		LiDAR	Scanner 3D	Equipo estático y su correspondiente calibración

Tabla 6.4 Instrumentos utilizados actualmente para el control de la subsidencia y la auscultación de pilares y piques.

	Misión	Instrumentos	Principales requerimientos
Fenómeno de subsidencia	En la explotación subterránea, el terreno superficial y adyacente está sometido a cambios en las direcciones y magnitudes de las tensiones, generando fracturas y desplazamientos, los que se ven representados en la superficie por la subsidencia.	Inspecciones visuales o satelitales	- Personal capacitado y con experiencia - Altas inversiones en equipos (vuelos aerofotogramétricos, helicóptero, drones, etc.)
		Cables SSTDR	- Perforación de Ø=38 mm cubierta de tubo PVC para introducir cables coaxiales. - Cable coaxial y equipo lector.
Observación de pilares y piques	Auscultación de piques y pilares	Equipo optech	- Equipo Optech - Perforación con Ø=250 mm
		Borehole Camera	- Equipo Borehole Camera. - Perforación de Ø=38 mm - Vehículo de transporte

Tabla 6.5 Instrumentos empleados actualmente para el control de la sismicidad.

	Misión	Instrumentos	Principales requerimientos
Sismicidad	Monitoreo de los eventos sísmicos ocurridos por la propagación del caving y la redistribución de esfuerzos.	Acelerómetros	- Estación de monitoreo - Distancia calculada para formar el polígono que se analizará con los dispositivos circundantes.
		Geófonos	- Estación de monitoreo - Distancia calculada para formar el polígono que se analizará con los dispositivos circundantes.

Tabla 6.6 Resumen de la instrumentación utilizada actualmente en la DET con sus costos.

Instrumento de Medición	Objetivo	Variable (input)	Resultado (Output)	Costo Unitario (\$USD)
Extensómetro MPBX	Deformación, desplazamiento y/o desprendimiento de bloques	Voltajes o frecuencia de cuerda vibrante	Desplazamiento entre anclajes	\$2.526
Celdas de carga	Carga sobre el elemento de soporte	Deformación de strain gauges	Carga (Kg) o Peso (KN)	\$2.000
Celda HI	Variación del estado tensional	Deformación de strain gauges	Tensor de Esfuerzos 3D	\$2.300
Cable SSTDR	Deformación, desplazamiento y/o desprendimiento de bloques que conforman el pilar (escala cm)	Tiempo de retorno de la corriente eléctrica	Distancia del cable	\$21 (por metro)
Inclinómetros	Movimiento / Inclinación 2D o 3D de los pozos	Ángulo de inclinación	Desplazamiento del pozo	\$2.000
Crackmeters	Cinemática de fallas principales	Desplazamiento	Desplazamiento	\$2.500
Flat Jack	Medir esfuerzo uniaxial entorno a las labores mineras	Presión	Presión	\$4.500
Geófonos y Acelerómetros	Medir la energía de los eventos sísmicos	Velocidad y aceleración de ondas sísmicas	Ubicación e intensidad de eventos sísmicos	\$12.000
LiDAR	Medir geometría para detectar deformaciones y sobre excavaciones	Láser	Nube de puntos	Variable dependiendo del requerimiento
AE	Determinar el campo de esfuerzos 3D de un sector	Ondas sonoras	Esfuerzos 3D	\$15.000
BHC	Auscultación de piques y pilares	Luz	Grabación de alta resolución	\$36.050
Escáners (CALS, Optech u otros)	Auscultación de piques, pilares y cavidades	Láser	Sólido 3D de la cavidad	Varía dependiendo del equipo
Tiltmeter	Inclinación de paredes de excavaciones	Aceleración	Variación angular	\$1.100

7 Clasificación por procesos mineros e infraestructura crítica

Los instrumentos destinados para los procesos críticos son aquellos que permitan conocer cómo se va propagando el caving, la interacción de cavidades, la subsidencia, el flujo de material de producción, entre otros. Para lo anterior, están los instrumentos como: cables SSTDR, geófonos, Geo4sight Tilt, etc.

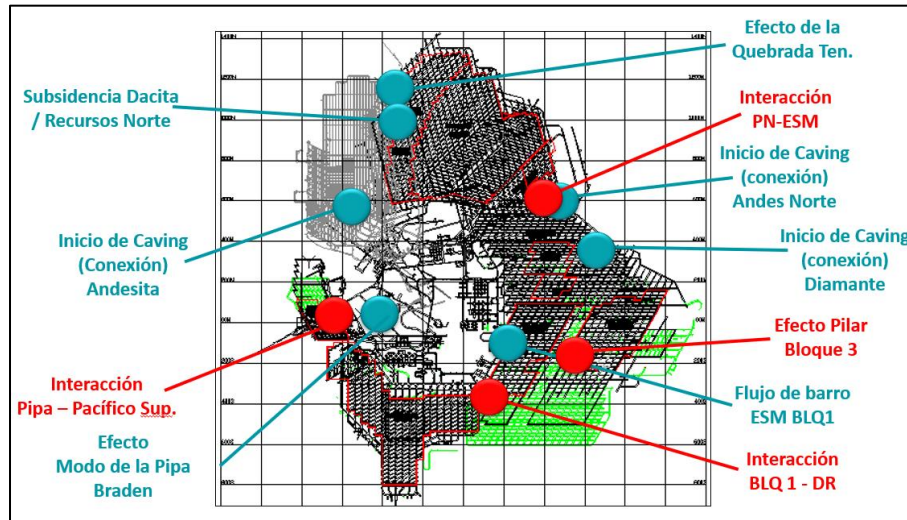


Ilustración 7.1 Procesos críticos por instrumentar para el corto y mediano plazo, en rojo y cian respectivamente.

Para la infraestructura crítica generalmente se utilizan instrumentación que están destinadas a medir la carga sobre los elementos de soporte y el comportamiento del macizo rocoso en el campo cercano, es decir, en las paredes de la excavación y en una distancia de no más de 5 veces el radio de dicha excavación. En ese sentido, los instrumentos más utilizados para dicho fin son: extensómetros, pernos y cables instrumentados, inclinómetros y celdas de carga, tal como se muestra en la siguiente ilustración.



Ilustración 7.2 Ejemplo de instrumentación para la sala de chancado de Andes Norte (Valdivia, 2021).

Cabe mencionar, que la definición de infraestructura crítica se le denomina a toda obra civil o estructuras del macizo rocoso al interior mina que son importantes para la continuidad en el proceso de extracción de

mineral. Algunos de ejemplos de infraestructura crítica son: cavernas, el crown pillar, ore pass (OP), chimeneas, fallas, diques, etc.

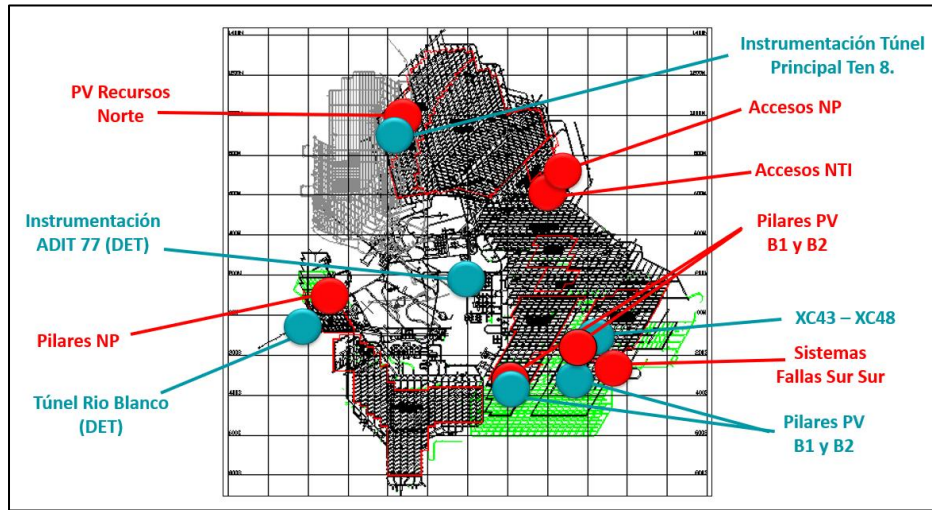


Ilustración 7.3 Infraestructura crítica por instrumentar para el corto y mediano plazo, en rojo y cyan respectivamente.

8 Lecciones aprendidas

En esta sección se pretende presentar las diferentes lecciones aprendidas a través de las experiencias al usar e instalar los instrumentos mencionados en las secciones anteriores.

El tipo de contrato: Según la experiencia, se recomienda que las empresas contratistas encargadas de las obras civiles tengan mediante subcontrato a las empresas que instalan los instrumentos geomecánicos. De tal forma que el cuidado de la instrumentación sea prolijo, es decir, a través de una comunicación fluida entre estas empresas los instrumentos no sean dañados por movimientos de marina, tronaduras, entre otras operaciones que pueden provocar cortes de cables o situaciones similares. Por lo menos, con este tipo de contratación se pudo observar este tipo de comportamiento, ya que quien debía costear la reparación o sustitución de los instrumentos era la misma empresa contratista encargada de las obras.

Otra lección aprendida es instalar las antenas receptoras en sitios estratégicos, es decir, fuera del alcance de equipos o en zonas de hundimiento. De tal forma de mantener funcionando dichas antenas lo máximo posible y también se recomienda poseer circuitos “redundantes”, ya que siempre es mejor tener equipos de respaldo para no perder la captura de datos en caso de cualquier tipo de eventualidad.



Ilustración 8.1 Efecto de las tronaduras y del trabajo de obras en el sistema de instrumentación.

El efecto de las tronaduras sobre sistema de instrumentación que se instaló de manera temprana con el fin de conseguir mediciones lo más temprano posible se puede observar en la Ilustración 8.1. Esto deja como aprendizaje que colocar prematuramente la instrumentación es un error si todavía existe actividades mineras circundantes que puedan dañar el sistema de instrumentación.

Ahora respecto al posicionamiento del sistema de transmisión de datos de todos los instrumentos como nodos, antenas, cables, gateways, se recomienda colocarlos estratégicamente en la mina para evitar su avería o destrucción, ya que son básicamente el medio para la transmisión de datos y sin estas partes los instrumentos se vuelven inservibles. También se recomienda tener redundancia por la eventual caída de alguno de los dispositivos.

En Chuquicamata Subterránea los resultados observados del movimiento de los cave trackers fue: 50% no cambia de punto de extracción, 25% cambia de punto de extracción sin cruzar las calles de producción y 25% cambia de punto de extracción cruzando calles de producción. Estos resultados y los esperados en Teniente pueden ser útiles para robustecer los modelos de entendimiento aplicados hasta la actualidad sobre la zona de movimiento aislada (IMZ por sus siglas en inglés) y la zona de extracción aislada (IEZ). Así, se abre una oportunidad de investigación y desarrollo a escala industrial (o escala mina) sobre este tema.

Finalmente, y para cerrar esta sección, es fundamental decir que todos los algoritmos, mecanismos de funcionamiento de los instrumentos, entre otros aspectos subyacentes deben ser transferidos desde las empresas colaboradoras hacia la empresa mandante (en este caso CODELCO), porque esa transferencia tecnológica permite seguir avanzando en el diseño y creación de nuevos instrumentos aplicables para la minería. Además, posibilita la opción de reafirmar o rectificar los modelos utilizados tanto sobre la comprensión del macizo rocoso como en el funcionamiento de los instrumentos en condiciones hostiles como lo es el ambiente minero por la polución, grandes presiones y corrosión causada por la presencia de agua.

9 Nuevas tecnologías de instrumentación geomecánica

9.1 Crab-Robot

El Crab-robot es un instrumento que permite la auscultación de pozos de perforación de diámetros desde 50[mm] hasta 750[mm]. La longitud máxima del cable de control puede llegar hasta los 450[m], todo lo anterior depende del modelo y las solicitudes que se le realicen al proveedor, ya que en general el cable tiene una longitud que va desde los 20[m] hasta los 60[m]. El cable une el crab-robot con una unidad de control la cual posee una batería con una duración de hasta **7 horas**, luego de transcurridas dichas horas será necesario recargar la unidad de control.

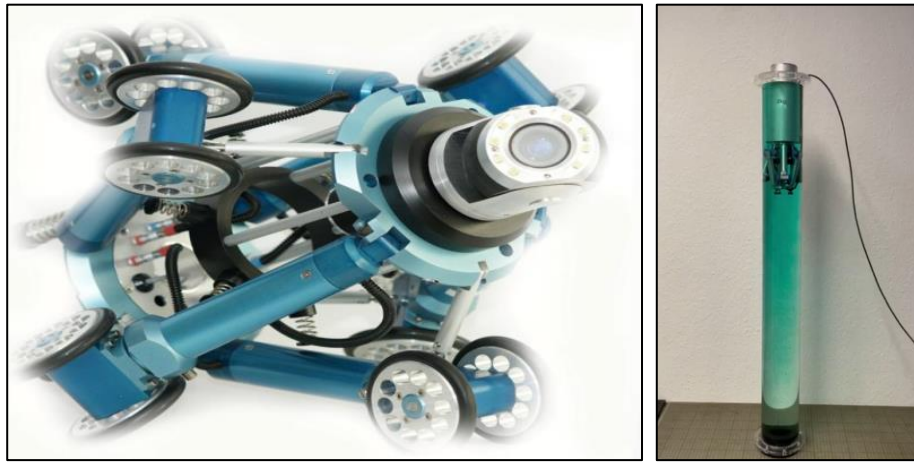


Ilustración 9.1 Crab-Robot (Maigom, 2019).

El dispositivo cuenta con 12 ruedas motrices, las cuales poseen un rango autoajutable que le permite al aparato avanzar a través de paredes irregulares de la perforación y discontinuidades. Además, existen otras versiones con 24 o 36 ruedas. Su rango de operación es desde -10°[C] hasta 50°[C] y su velocidad, en general, es de **4[m/min]**. También es importante mencionar que es un instrumento a prueba de agua.

Respecto a las cámaras, se especifican sus características en los siguientes párrafos de los modelos de crab-robot CRS-80/130 y el CRS-85/150 respectivamente.

CM-35/20F (CRS-80/130):

Es de enfoque fijo (Fix Focus), sensor de imagen SONY SUPER 1/2", resolución de 740 TVL y 484000 pixeles. FOV de 80 grados, con 16 leds integrados de alta iluminación (minina de 2,5Lux/F2,0).

PT-35/20F (CRS-85/150):

Esta cámara tiene la gran ventaja de rotar 360 grados (2 X 175°), sensor de imagen SONY Super HAD CCD, resolución de 740 TVL y 484000 pixeles, FOV de 80 grados, con 16 leds integrados de alta iluminación (minina de 2,5Lux/F2,0).

Su aplicación está destinada para auscultaciones en cualquier tipo de perforación que se realice cuyo diámetro sea adecuado para el crab-robot (entre 80mm-130mm para el modelo CRS-80/130 y 85mm-150mm para el modelo CRS-85/150), es decir, en las perforaciones HQ y PQ de 96mm y 122,6mm respectivamente podría utilizarse el instrumento para observar el estado del macizo rocoso. Finalmente es importante mencionar que su costo oscila entre **139.000[USD]** a **169.000[USD]**.

9.2 Geo4Sight Tilt (Elexon Mining)

Geo4Sight Tilt es un instrumento que se instala solidario al macizo rocoso, que permite registrar el movimiento parcial generado al interior del macizo rocoso. Se caracteriza principalmente por efectuar la transmisión inalámbrica de los datos entre los dispositivos, convirtiéndolo en una innovación respecto a otros dispositivos que utilizan cables para la transmisión de datos.

Las mediciones efectuadas por este instrumento se detallan a continuación:

- Rumbo: Se realiza la medición de la diferencia angular entre el Norte geográfico y el eje del instrumento. Diferencias según medida base.
- Inclinación: Se realiza la medición de la diferencia angular entre una línea vertical y el eje del instrumento (ángulo ascendente).
- Intensidad de la señal: Se mide la fuerza o intensidad de la señal transmitida entre los sensores y/o antena. Entendiendo que a mayor distancia se espera una menor fuerza de la señal. Hasta el corte de la transmisión que señala una distancia de separación mayor de 5 metros.

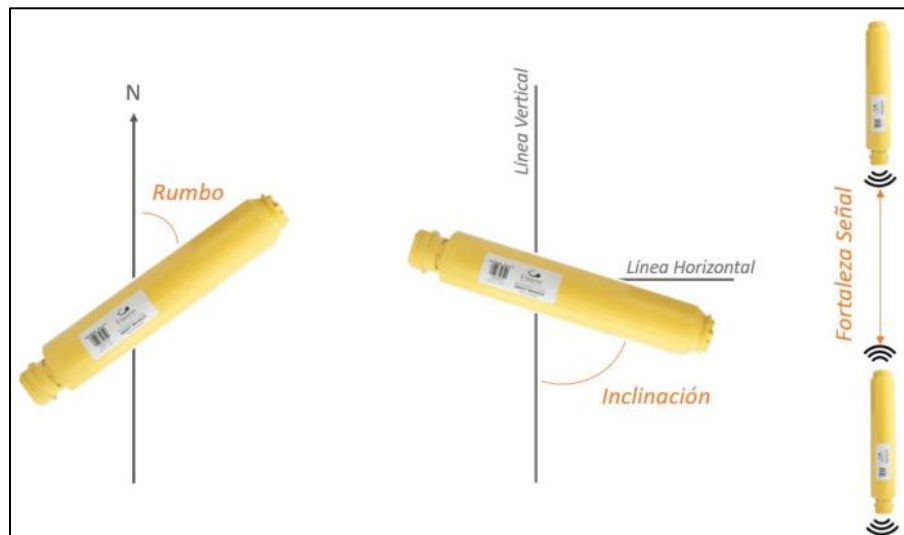


Ilustración 9.2 El Geo4sight tilt puede medir el rumbo e inclinación y transmite dicha información de forma inalámbrica (ELEXON, 2021).

Respecto a su instalación, esta se efectúa en perforaciones de diámetro HQ o PQ, mediante una ristra de dispositivos, posicionados en intervalos regulares de 2 metros. También vale mencionar que cada dispositivo posee 3 acelerómetros y 3 magnetómetros, es decir, uno por cada eje.

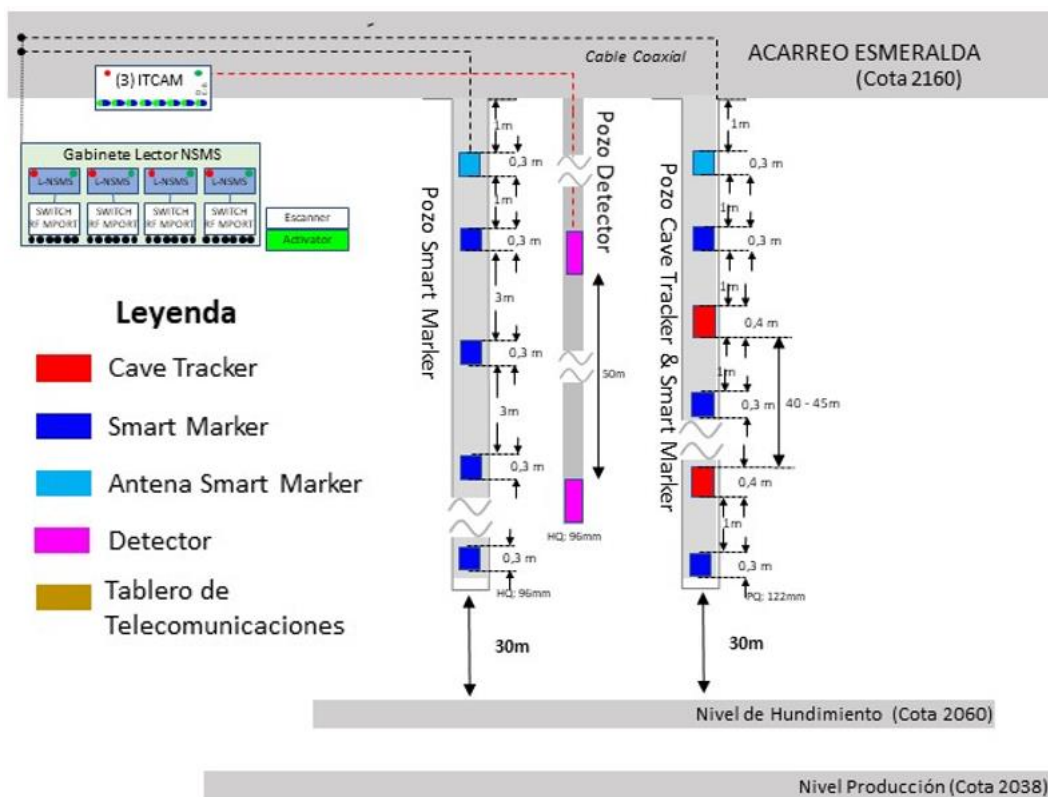


Ilustración 9.3 Esquema de trabajo en los pozos instalados desde el nivel de acarreo de Esmeralda para monitorear la interacción de cavidades sobre Pilar Norte (Cisternas, 2020).

Tabla 9.1 Costos asociados a la implementación de estos dispositivos.

Ítem	P.Unitario (USD)
Geo4Sight Tilt	\$255
Single Reader Cabinet	\$11.283
Geo4Sight Tilt-RG8 Antenna, +10 m cable	\$753
GeoHive (suscripción anual)	\$0

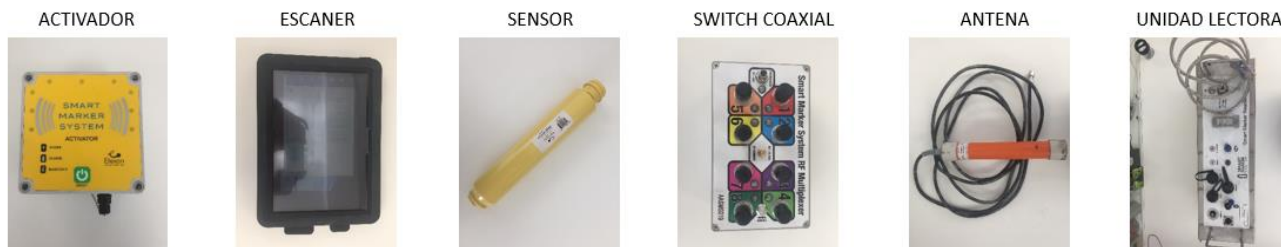


Ilustración 9.4 Elementos utilizados para el sistema de monitoreo del caving con los Geo4Sight Tilt.

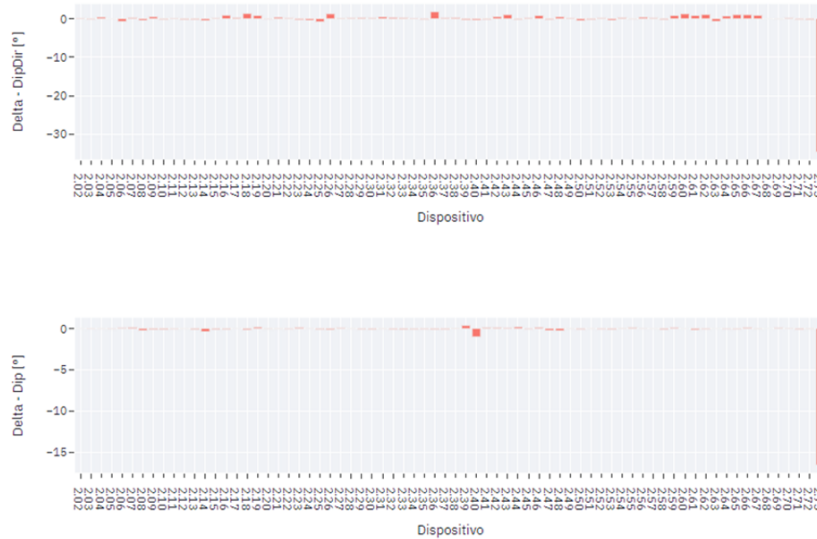


Ilustración 9.5 Registro de la variación del rumbo e inclinación de cada uno de los dispositivos (Cisternas, 2020).

Para analizar el movimiento de los dispositivos Geo4sight se debe realizar a través de grupos, es decir, de 3 o más para poder decir que efectivamente la variación que registra el dispositivo se debe a un movimiento del macizo rocoso producto de la propagación del caving, sismicidad u otro evento. Esto se menciona, ya que pueden existir dispositivos averiados o afectados por ciertas condiciones externas que desencadenan una medición de la variación del rumbo o el dip que no es tal en la realidad. Si no que se debe a un desperfecto del instrumento.

9.3 Cave trackers

El sistema Cave Tracker mide en tiempo real la ubicación de los dispositivos instalados en el macizo rocoso. Esto revela el flujo y propagación del caving, lo cual mitiga algunos riesgos del Panel caving, ya que permite, por ejemplo, detectar la formación de “air gaps” y, por lo tanto, tomar las medidas necesarias para remediarlo. Se puede alcanzar una precisión de $\pm 5\%$ de la distancia del Beacon al detector (dependiendo de las propiedades magnéticas de la mina y de los niveles de ruido). A continuación, se mostrarán los principales componentes de este sistema de Cave tracker.

Beacons:

Estos Beacons son instalados en el macizo rocoso de interés donde se producirá el caving y los detectores se instalan en las galerías donde generalmente se posee acceso.



Ilustración 9.6 Beacon de 76mm de diámetro y 325mm de largo (ELEXON, 2021).

Estos dispositivos cilíndricos contienen fuertes imanes, por lo que es recomendable tener precaución con su manipulación. Además, poseen baterías y circuitos electrónicos componiendo en total una masa de 5Kg cada uno y longitudes variables dependiendo del modelo. El diámetro de perforación utilizado para su instalación es PQ, aunque también podría utilizarse un pozo HQ.

Detectores:

Los detectores son colocados en sectores estratégicos para poder monitorear el movimiento de los beacons. Para ello requieren de cables para acceder a la energía eléctrica y la red de transmisión de datos. Por otro lado, su alcance para medir las señales de los beacons es hasta **180 metros** y el diámetro de perforación utilizado para su instalación es HQ (96mm).

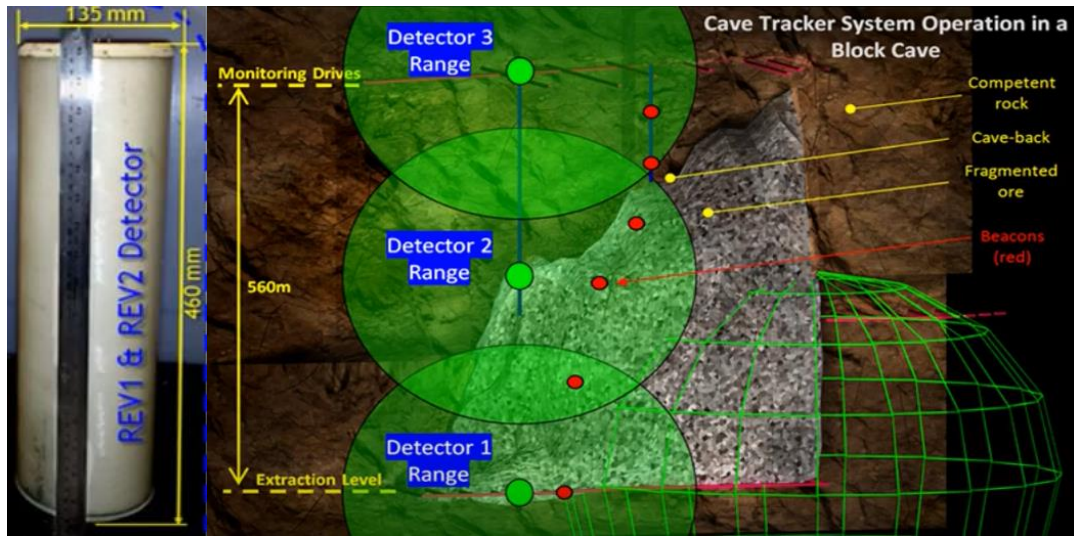


Ilustración 9.7 Ejemplo de uno de los primeros modelos de detectores creados por Elexon Mining y su disposición en la mina Argyle de diamantes de Rio Tinto (Whiteman, 2016).

Módulo Adaptador de Comunicación:

El Communication adapter module (ITCAM) proporciona una alimentación eléctrica (DC) y un enlace de comunicación de datos en serie para los detectores y balizas de calibración. Los mensajes entre el sistema de gestión de Cave Tracker, la interfaz de usuario inalámbrica y las balizas/detectores de calibración se transmiten a través de la ITCAM.

Sistema de manejo de cave trackers:

El cave tracker management system (CTMS) es responsable del almacenamiento de datos de las lecturas de los detectores, convertir los rangos de los detectores recibidos en posiciones de balizas 3D, y gestionar los dispositivos instalados del sistema Cave Tracker.



Ilustración 9.8 De izquierda a derecha se observa un detector, el ITCAM y un beacon con la interfaz inalámbrica del usuario para la activación de los dispositivos (ELEXON, 2021).

Para la aplicación de este sistema en el Teniente es importante considerar la posición de las antenas, detectores, ITCAM y CTMS, debido a lo observado en Chuquicamata subterránea:

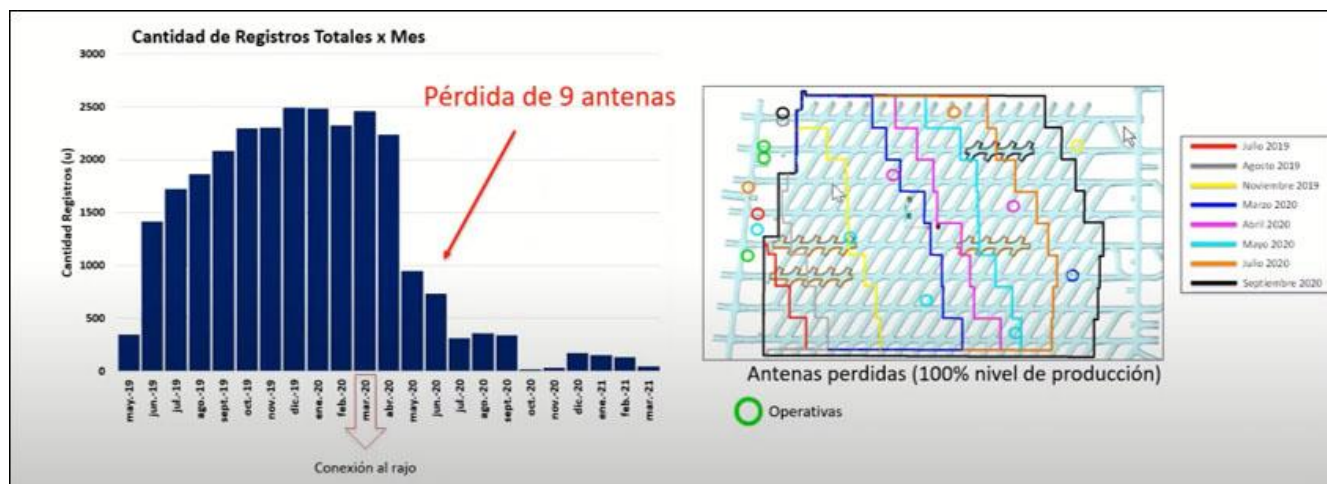


Ilustración 9.9 Disminución de los registros de los dispositivos (Beacons) por la pérdida de las antenas (CODELCO, 2021).

Esto se debió por el sistema de explotación, ya que el nivel de pre-acondicionamiento, en donde estaban las antenas, fue afectado por el hundimiento. Inhabilitando la operatividad. A diferencia de Chuquicamata subte. Teniente posee muchas más galerías por las diferentes minas colindantes. Hay que aprovechar esa ventaja para colocar estratégicamente las antenas y detectores para que no se vean afectados durante el período que se desea medir el movimiento de los Geo4sight y beacons.

Finalmente, cabe mencionar que los componentes de los beacons, Geo4sight tilts y detectores fueron testados por el proveedor y son capaces de soportar hasta una presión de 20MPa.

9.4 GPR

El Ground Penetrating Radar es un instrumento que utiliza las ondas de radio para detectar objetos bajo la superficie de diferentes tipos de materiales. Su alcance depende justamente de la composición del material por el cual se propaga la onda y también por la interferencia electromagnética producida por otras fuentes del mismo tipo de onda.

En el caso de la minería su utilidad se asocia para realizar un mapeo estructural de fallas u otras estructuras de la roca. Además, se puede usar para delimitar cuerpos geológicos e identificar rocas que puedan desprenderse del techo de la galería.

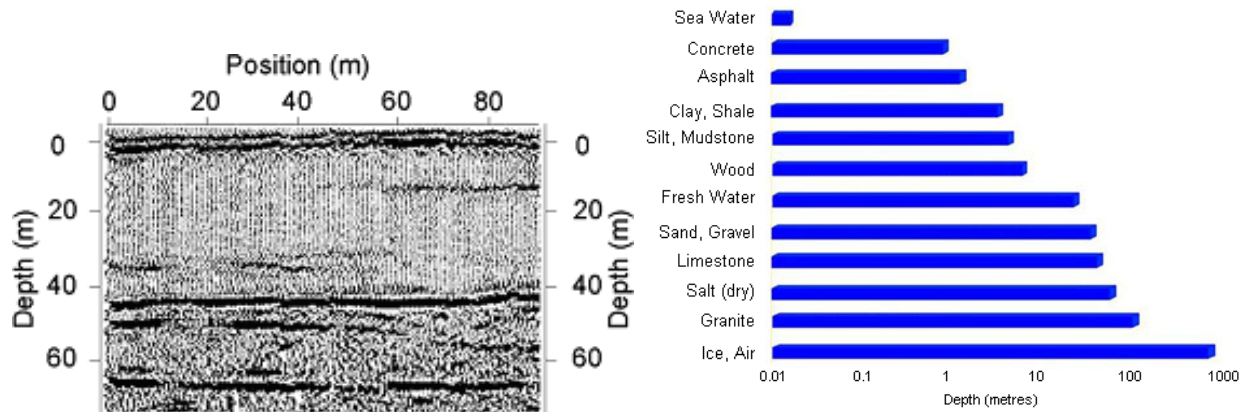


Ilustración 9.10 En la parte izquierda se observa el resultado del uso del GPR en una roca masiva de granito y a la derecha el alcance en profundidad que puede alcanzar esta tecnología dependiendo del material (SENSORS & SOFTWARE, 2021).

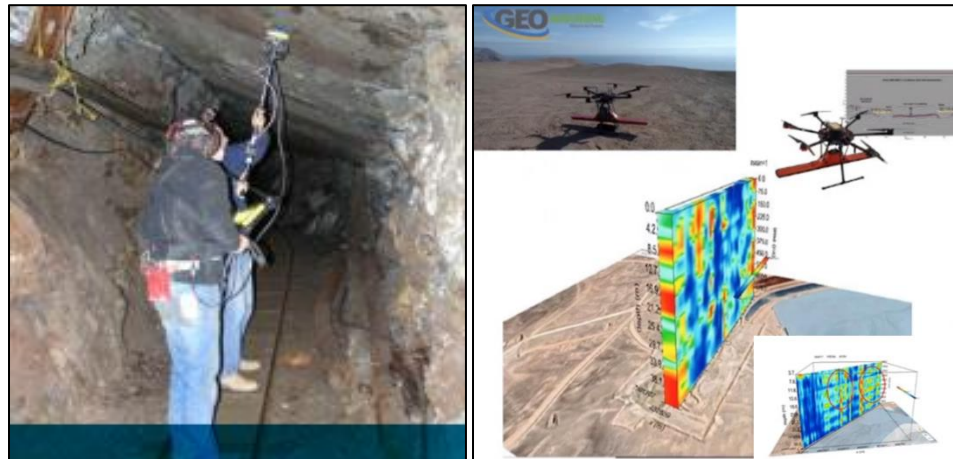


Ilustración 9.11 Ejemplos de aplicación del GPR en minería a la izquierda para ver roca suelta en el techo y a la derecha para el monitoreo de infiltraciones en el muro de relaves (SENSORS & SOFTWARE, 2021).

Algunos de sus parámetros para tener en cuenta son:

- 1) Su alcance como ya se mencionó antes depende del material y del ruido ambiente.
- 2) La interpretación de los resultados requiere de práctica, experiencia y conocimiento. Por lo que no cualquiera puede realizar una correcta interpretación de los datos.
- 3) La frecuencia de onda cambia dependiendo del material. En minería, específicamente en Teniente, como el tipo de roca predominante es el CEMET se recomienda usar una frecuencia de onda entre 200MHz a 1000MHz.

Por otro lado, en reuniones con especialistas de la empresa SENSING&SOFT y sus partners de Chile, se llega a la conclusión que esta tecnología es más adecuada para cielo abierto, por ahora, y su uso para minería subterránea aún está en discusión, ya que habría que diseñar una metodología que evitará el efecto “pantalla” de los elementos de soporte como pernos y mallas. Dentro de esas metodologías se baraja la siguiente:

Realizar perforaciones desde el nivel de hundimiento para colocar el equipo pulseEKKO® en los pozos para realizar la medición de la sección del pilar.



Ilustración 9.12 Metodología propuesta por especialistas de SENSING&SOFT y su un ejemplo de sus resultados donde se observa un pequeño túnel en la zona roja (SENSORS & SOFTWARE, 2021).

El problema de esta metodología es que el nivel de hundimiento esté probablemente, valga la redundancia, hundido sobre los pilares de interés. En otras palabras, no se tendría acceso al UCL para hacer dicha operación, sin embargo, se podría realizar de forma horizontal a través de perforaciones desde el NP. Esto último aún está en evaluación.

9.5 ANZI Strain Cell

La Australian New Zealand Inflatable strain cell es una celda utilizada en Australia, Nueva Zelanda, Reino Unido, China y Japón. Fue desarrollada en los años 80's en la universidad de Auckland con el propósito de determinar el tensor de esfuerzos in situ en 3D en minas de carbón. Actualmente esta celda puede determinar los esfuerzos en todo tipo de roca que presente un modelamiento tipo CHILE, de hecho, fue utilizada en la División Salvador de Codelco para medir el tensor aprovechando un tiro de hidrofracturamiento.

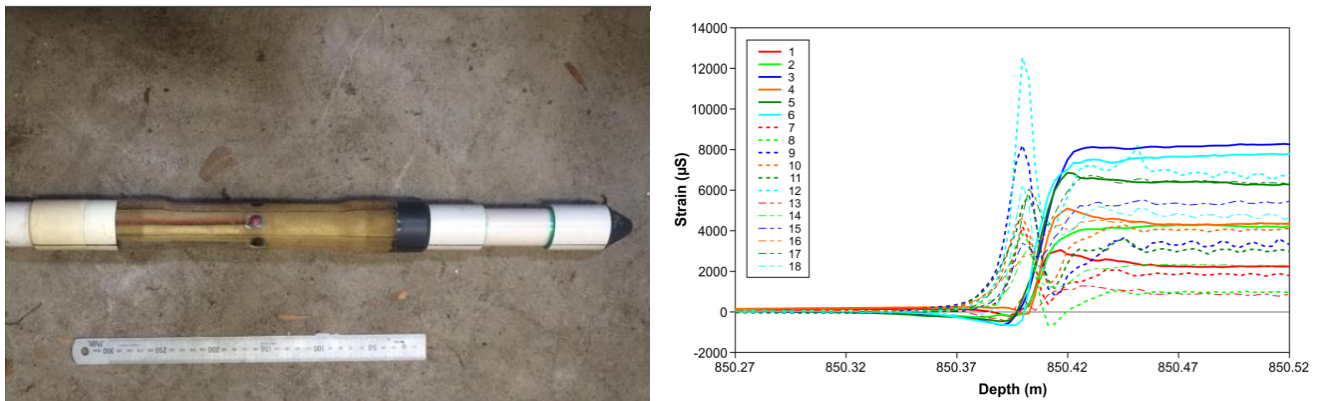


Ilustración 9.13 A la izquierda se observa la celda ANZI con un diámetro de 48mm y a la derecha se aprecia la medición de los cambios de la deformación durante el overcoring (SCT, 2021).

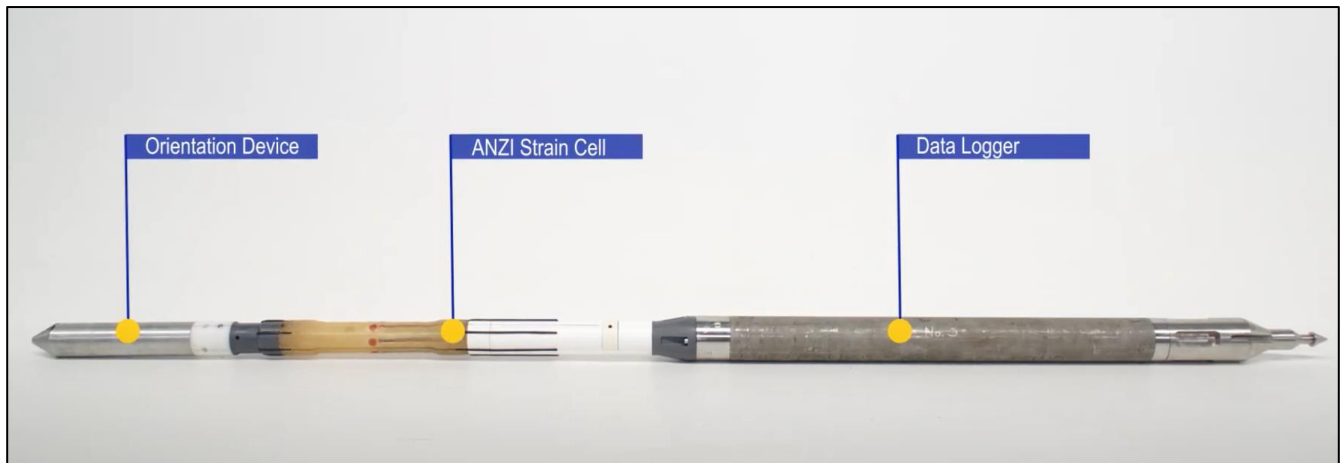


Ilustración 9.14 Celda ANZI con el dispositivo para la orientación y el data logger incorporado para la captura de datos (SCT , 2021).

Esta celda a diferencia de la Hollow Inclusion, posee un data logger incorporado, ya que a perforaciones muy profundas es necesario para no perder las mediciones. Además, la celda ANZI se infla para hacer una medición insitu del comportamiento del macizo rocoso y así deducir sus propiedades elásticas de la roca.

El procedimiento para la medición de esfuerzos con la celda es el siguiente:

- 1) Preparación del pozo
- 2) Instalación
- 3) Test de presión in situ
- 4) El overcoring
- 5) El test de presión biaxial
- 6) El test de laboratorio con el testigo recuperado del tiro piloto

El alcance de la celda ANZI en minería subterránea es de 10 a 30 metros en tiros ascendentes y de 50 a 60 metros en tiros subhorizontales. En contraste, cuando se realiza un tiro desde la superficie se puede llegar hasta los 850 metros según estudios empíricos.

El procedimiento con la celda ANZI determina las propiedades elásticas del macizo rocoso en 3 test separados:

1. In situ con el test de presión realizada antes del overcoring
2. El test de presión biaxial después del overcoring
3. Los test de laboratorio sobre los testigos recuperados del tiro piloto

Finalmente, en una conversación con Ken Mills, comenta que el costo de la medición con la celda ANZI es de unos **\$30.000** dólares, sin embargo, esta suma asciende a **\$100.000** aproximadamente si se considera el viaje de los especialistas, hospedaje y otros.

9.6 BX CCBO

El BX CCBO es el “conical-ended borehole overcoring” con un diámetro BX de overcoring, es decir, de 60mm. Esta modificación en el diámetro con respecto a la versión original fue solicitada por la mina de Moab Khoyong de Sudáfrica para adecuarlo a sus operaciones de perforaciones geológicas que usan también ese mismo diámetro.

La CCBO cuenta con 16 strain gauges. Utiliza el mismo diámetro para la perforación y la sobreperforación. Esta sobreperforación puede ser desde 10cm a 30cm de longitud y ha sido aplicada en diferentes tipos de localidades para la medición del tensor de esfuerzo como: cerca de una falla, al interior de una montaña, alrededor de un túnel y caverna, en una región amplia, y en un sector de altos esfuerzos.

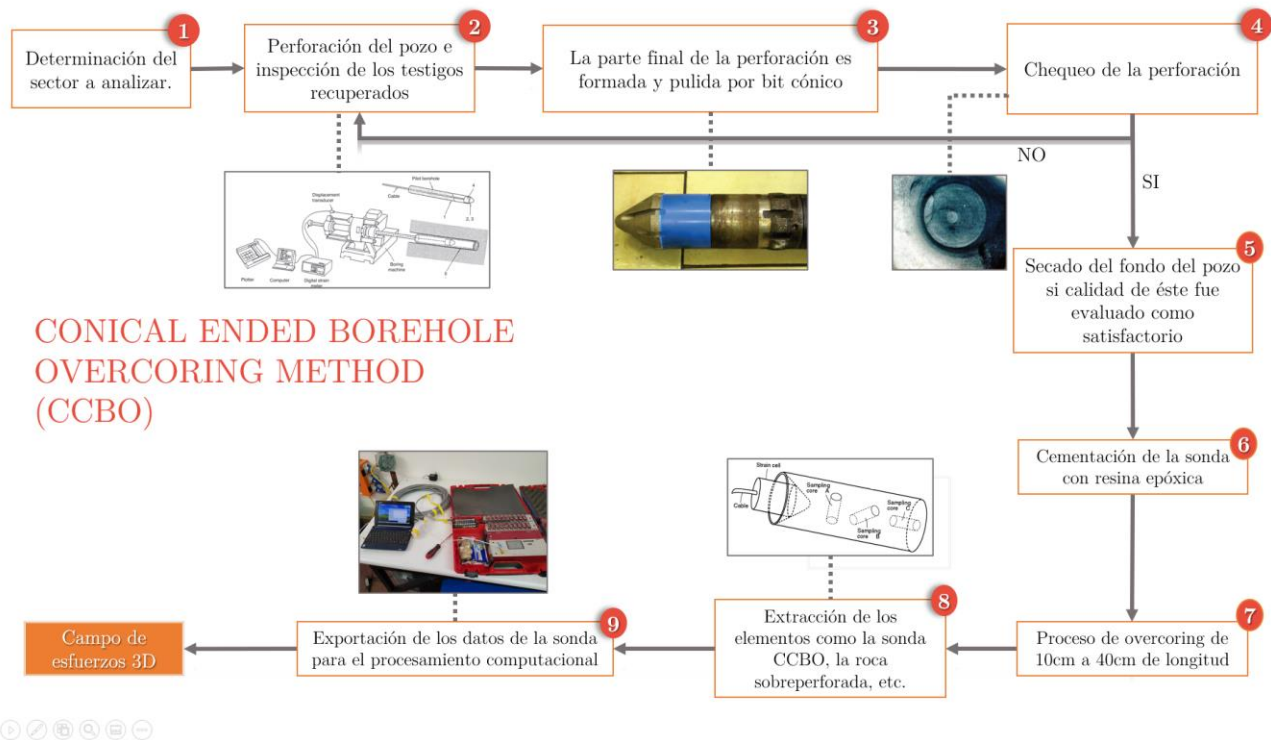


Ilustración 9.15 Metodología del método de la CCBO (Modificado de Madrid, 2005).

Cada celda cuesta **USD\$1.300** aproximadamente, sin embargo, al considerar otros gastos como los viajes de especialistas y sus servicios el proyecto de implementar este método sube a **USD\$114.603** según cotizaciones realizadas previamente por la superintendencia.

9.7 Drones

La incorporación de drones en la DET no ha sido tarea fácil (Ilustración 9.16), ya que la polución y corrientes de aire son factores que dificultan el uso de esta tecnología en la minería subterránea.



Ilustración 9.16 Prueba de drones en un SNV de la DET.

Sin embargo, se puede ocupar en sectores donde dichos factores no están presentes. Además, los drones son especialmente útiles para acceder a lugares prohibidos para el personal.



Ilustración 9.17 Dron accediendo a una zona inhabilitada para el personal de la mina.

Los drones son un instrumento muy versátil, ya que pueden equiparse con diferentes aparatos de tecnología LiDAR o GPR u otra tecnología dependiendo de su objetivo. En la siguiente ilustración se muestra un caso en el Olympic Dam donde utilizaron el HOVERMAP™ de la empresa EMESENT™ montado encima de un LHD y en una grúa.



Ilustración 9.18 Uso versátil de la tecnología LiDAR y drones (Woolmer, 2020).

Los costos relacionados a ambos equipos (al dron y HOVERMAP™) generalmente están alrededor de los **\$150.000** dólares.

9.8 Olympus

Este instrumento electrónico fue utilizado en las minas de Reno y Esmeralda con el fin de obtener el largo de los pernos instalados y así determinar si están cortados o no.

Este equipo funciona enviando un pulso de ultrasonido. Este pulso de ultrasonido se verá reflejado cuando llegue al final del perno tal como se observa en la siguiente ilustración:

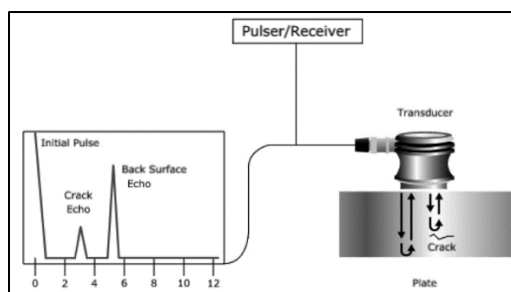


Ilustración 9.19 Teoría detrás de la técnica del ultrasonido (Jorquiera & Celis, 2018).

El precio del instrumento es de **\$9.750USD** aproximadamente según lo conversado con los proveedores.



Ilustración 9.20 Dispositivo Olympus utilizado para la medición del largo de pernos con ultrasonido en la DET (Jorquiera & Celis, 2018).

Por otro lado, cabe mencionar que este equipo requiere una calibración antes de usarse en terreno, es decir, se debe medir el tiempo que demora el pulso de ultrasonido en recorrer un perno con las mismas características de los instalados en terreno y también la frecuencia utilizada para dicha calibración.

Finalmente, el instrumento resultó exitoso con los pernos que se encontraban recientemente instalados y no poseían oxidación ni estaban doblados, sin embargo, el instrumento no fue capaz de medir adecuadamente los pernos doblados y/u oxidados. Dichos resultados se muestran a continuación:

Tabla 9.2 Resultados de las mediciones realizadas (Jorquiera & Celis, 2018).

Sector	Valor conocido	Valor medido	Observaciones
Diablo Regimiento	800mm	802mm	Perno recto
	800mm	100mm	Se mide tramo sobresaliente del perno hacia la galería que se encuentra doblado
Esmeralda	2300mm	No mide	Superficie del perno oxidada
	1700mm	1699mm	Perno de apoyo para moldaje de muro
Dacita	2500mm	2490mm	Perno instalado con planchuela y tuerca
	2900mm	2906mm	Perno en sector de acopio

9.9 HoloLens 2

Estos dispositivos creados por la empresa Microsoft permiten la visualización de una realidad virtual (VR) y una realidad mixta (MR). Lo anterior, aplicado a la minería permitiría visualizar de forma interactiva la mina, analizar las sobre excavaciones, el caving, realizar el mapeo geotécnico, entre otras aplicaciones. Esta visualización y edición de esta mina virtual, permitiría un trabajo más unificado y diferente a lo que se usa actualmente (AutoCAD). Su precio empieza desde los **\$3.500USD** hasta los **\$5.200USD** aproximadamente.



Ilustración 9.21 HoloLens 2 (MICROSOFT, 2021).

En la empresa SRK mining trabaja en el desarrollo de 3 productos (softwares & tools) relacionados con este dispositivo. Uno de estos, el EasyMineXR MR que se puede observar a continuación:

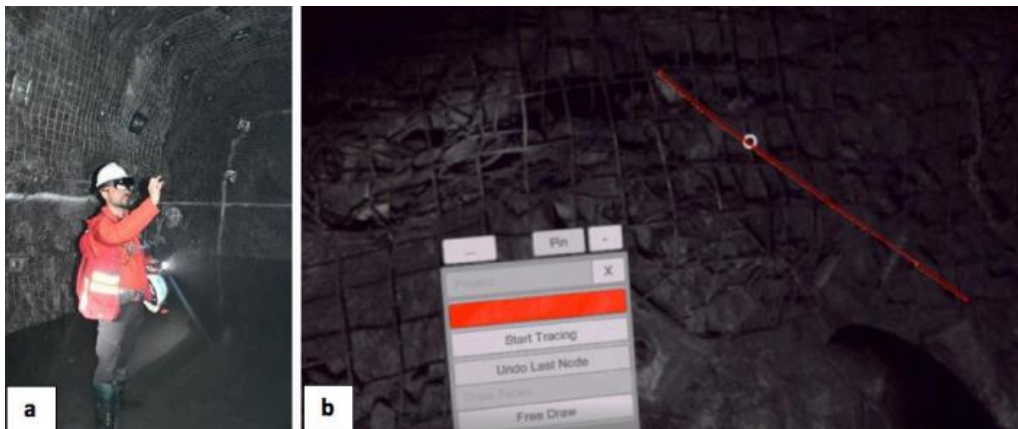


Ilustración 9.22 En (a) se observa una persona realizando un test en la mina subterránea de Grasberg de la herramienta. En (b) se aprecia lo que ve el usuario de la interfaz (Barnett, 2020).

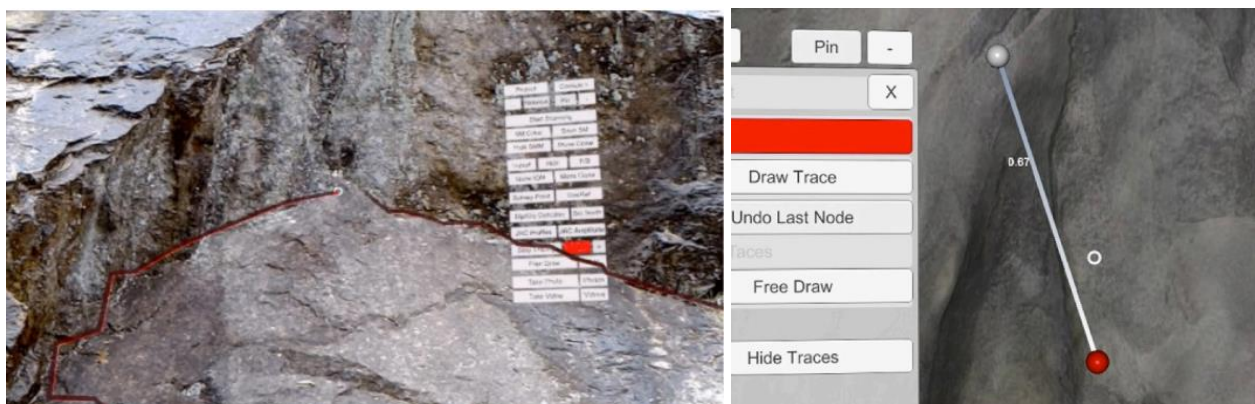


Ilustración 9.23 Ejemplos de las herramientas del EasyMineXR MR/VR (Barnett, 2020).

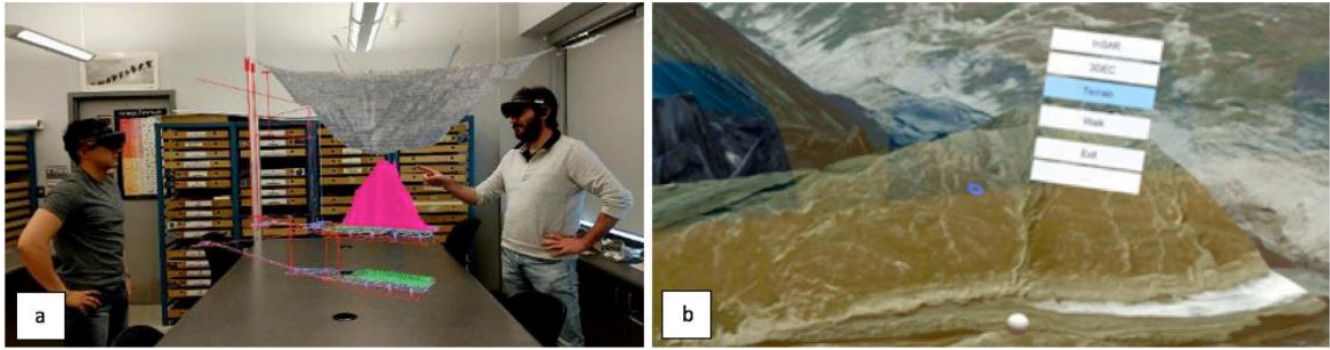


Ilustración 9.24 Ejemplo de la aplicación de la MR/VR para la geovisualización. A: Palabora open pit y Block cave mine, de Sudáfrica B: Fels landslide, Alaska (Barnett, 2020).

9.10 Pernos

9.10.1 MICOMO

Existen pernos que tienen incorporada fibra óptica en su interior con lo cual se puede tener un registro de la deformación de estos elementos de soporte y poder monitorear su estado. De hecho, los estudios se hicieron durante el año 2010 en la DET junto con la empresa MICOMO para ver la aplicación de la tecnología BOTDR en los pernos. En esa investigación se destaca que “el sistema BOTDR sólo permite obtener las deformaciones unitarias axiales promedio en la fibra óptica en tramos de un **metro** de longitud. Su aplicación directa en pernos de anclaje es por tanto **cuestionada**, en particular debido a la gran variación de la deformación tanto en el tiempo, como en la posición a lo largo del perno. La alternativa que se recomienda es modificar la curva del espectro de frecuencias aplicando una determinada función potencia, calcular luego su frecuencia promedio obtenida como centro de gravedad del área de esta curva y asociar esta frecuencia promedio con la deformación de la fibra. Las confirmaciones experimentales permiten trabajar con tramos de hasta aproximadamente 50 cm de longitud.” (Guzmán, 2010).

9.10.2 Mining3

Agregado a lo anterior, también se ha visto un avance tecnológico por parte del centro de investigación MINING3 quienes han adaptado pernos formando “slots” en ellos para poder integrarles la fibra óptica y así monitorear su deformación y movimiento. La principal desventaja de estos pernos son los cables expuestos y la necesidad de un “Fibre interrogator” que cuesta alrededor de **\$100.000** dólares. Lo cual no hace tan rentable esta tecnología y se dificulta su aplicabilidad en la DET.

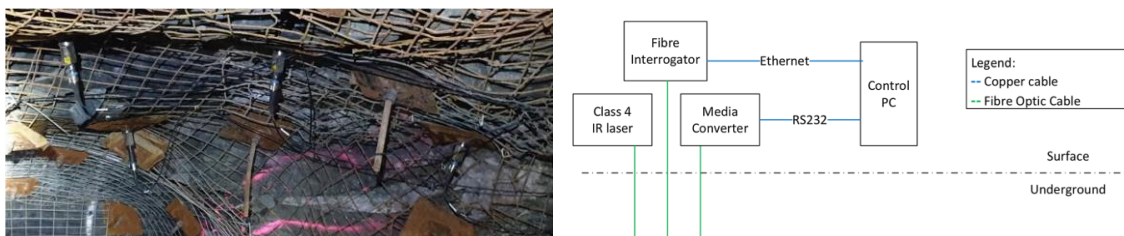


Ilustración 9.25 Pernos instrumentados y esquema de la transmisión de datos (Hoehn, 2020).

9.10.3 Mine desing technologies

Existe en el mercado el perno cable con extensómetro incorporado en su interior con lo cual se puede medir también la deformación de este elemento de soporte a través de potenciómetros y la diferencia entre los 6 puntos de anclaje. Su uso sería a lo que se considera como infraestructura crítica, puesto que mantener la continuidad operacional es vital para proseguir con la extracción del cobre.



Ilustración 9.26 Perno cable con extensómetro (MDT, 2021).

Algunas especificaciones técnicas importantes de señalar de estos instrumentos son:

- Largo hasta 30m
- Diámetro de 33mm
- Peso de 1,35kg/m
- Diámetro mínimo del pozo: 50mm
- Precisión $\pm 2\%$

9.10.4 Geosystems

Digi-bolt

Los pernos como Digi-Bolt creados por la empresa Geosystems es un perno que posee ranuras donde van integradas strain gauges y con éstas se mide la deformación del perno. Así mediante la curva de deformación vs carga de los pernos se puede determinar la carga a la cual están siendo sometidos por el macizo rocoso. Un Digi-bolt de 3 metros cuesta **USD2.600** aproximadamente y la configuración de este instrumento es como se muestra a continuación:

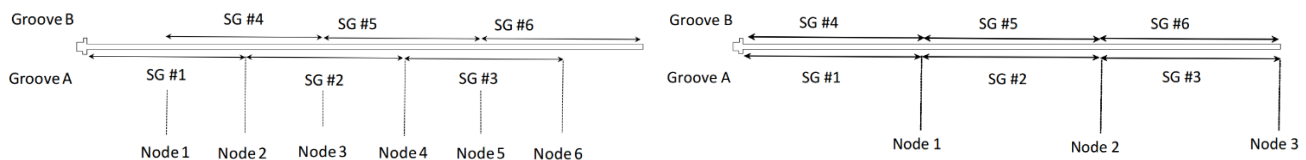


Ilustración 9.27 En la izquierda se observa una configuración escalonada de los strain gauges y en la derecha una configuración apilada para el Digi-bolt.

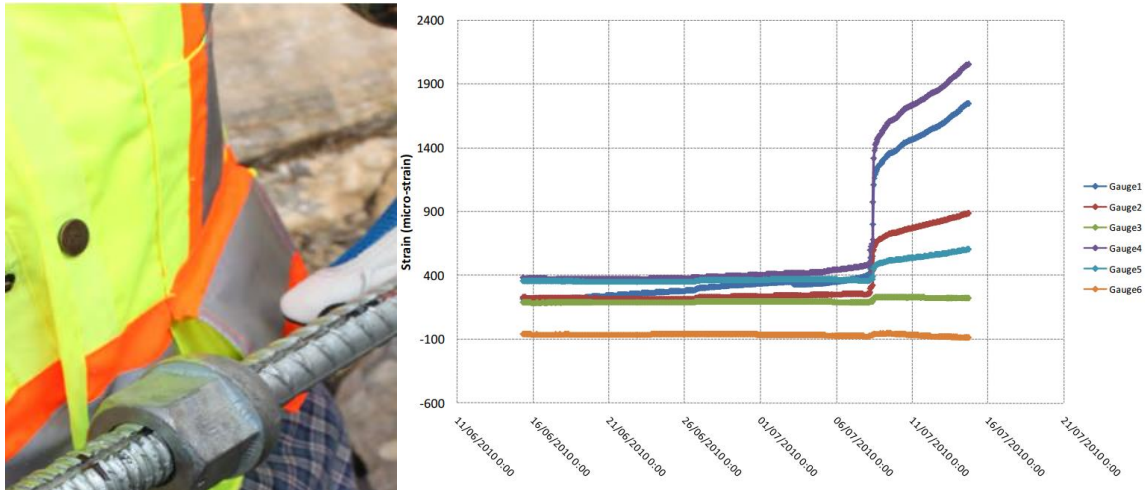


Ilustración 9.28 A la izquierda se observa el Digi-Bolt y a la derecha la medición de los strain gauges dispuestos en el instrumento (GEOSYSTEMS, 2021).

La configuración, es decir, la cantidad (hasta 6) y el lugar donde estarán situados estos strain gauges es elegible.

Digi-Cable

El Digi-Cable es básicamente un perno-cable que tiene incorporado hasta 5 strain gauges con lo cual se repite lo descrito con el Digi-Bolt la única diferencia es el output, es decir, cuando el geomecánico utiliza el digi-reader (el dispositivo lector) mide automáticamente la carga sobre el perno-cable con una resolución de $\pm 0.01(\text{ton})$. Según el proveedor un Digi-cable de 25 metros con 5 strain gauges cuesta **USD3.800** aproximadamente.

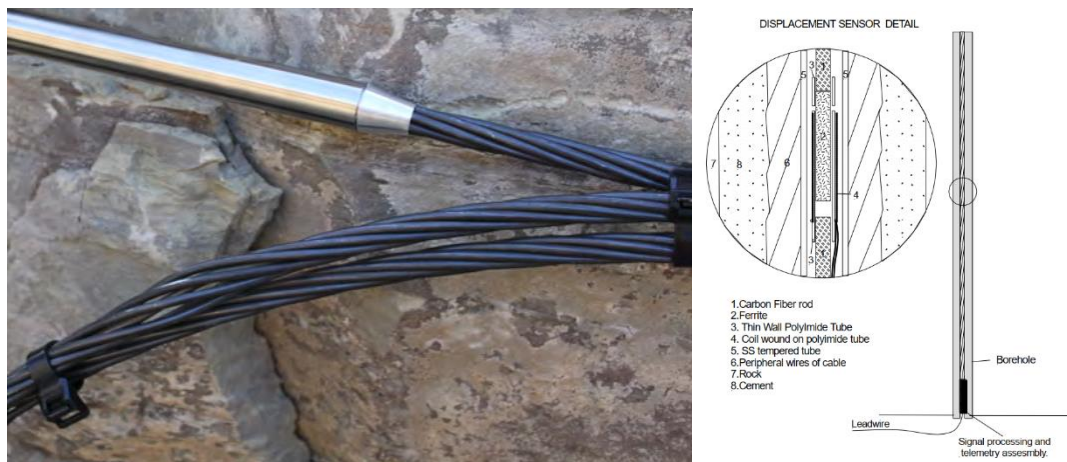


Ilustración 9.29 El Digi-cable y los componentes del Digi-cable (GEOSYSTEMS, 2021).

Fiber Optics Bolts

Los pernos con fibra óptica son pernos que tienen incorporados en “slots” separados entre sí en 120°. A través de esta fibra óptica se puede medir la deformación axial y el esfuerzo de cizalle. Su resolución especial es desde 1mm hasta 5cm y su exactitud operacional es de ± 10 microstrains.



Ilustración 9.30 A la izquierda se observa el perno con la entrada de conexión con el “optical analyzer” y a la derecha se observan los slots del perno comercializado por GEOSYSTEM e INGEROC (GEOSYSTEMS, 2021).

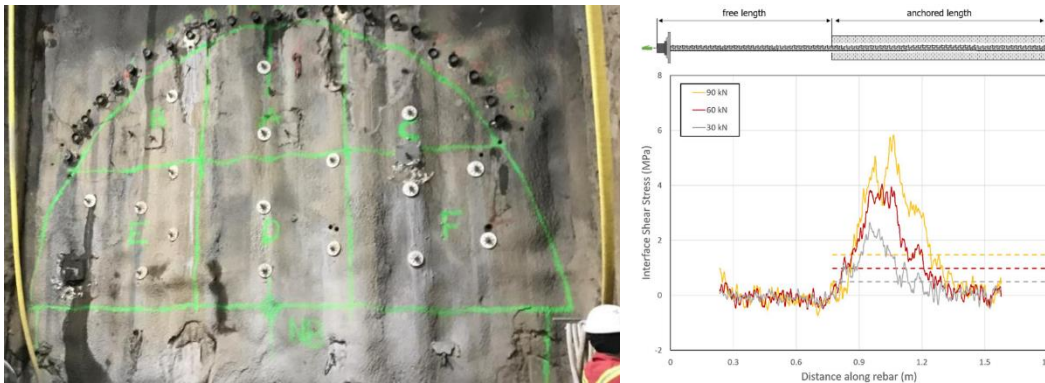


Ilustración 9.31 A la izquierda se ven los pernos instalados en una galería y a la derecha un ejemplo de medición del esfuerzo de cizalle sobre los pernos en un laboratorio (Vlachopoulos & Forbes, 2020).

9.11 GyroMaster

Se sabe que las perforaciones sufren desviaciones producto de las estructuras y la resistencia de la roca a la fuerza de empuje, debido a esto es importante medir dicha desviación en el azimuth e inclinación a través de este instrumento. Dichos datos permiten mejorar la calidad de la determinación de esfuerzos con AE, ya que como se ha descrito en secciones anteriores las coordenadas de los sondajes son relevantes para el cálculo con las emisiones acústicas. Además, cabe mencionar que el uso del dispositivo visualizador de datos es bastante sencillo para cualquier usuario. Por otro lado, según datos otorgados por consultorías el arriendo del gyromaster es de **USD\$7.500/mes** aproximadamente. Su aplicación no sería directamente por CODELCO, si no que se puede establecer como exigencia el uso de este instrumento en los contratos con las empresas colaboradoras que midan mediante AE el tensor de esfuerzos como parte del control de calidad de las mediciones.



Ilustración 9.32 Instrumento de GyroMaster junto con el dispositivo visualizador de datos (SPT, 2021).

9.12 Reflex Act III

Al igual que el Gyromaster, el Reflex Act III es un instrumento complementario para el método de determinación de esfuerzos mediante emisiones acústicas, ya que sirve para mejorar la medición de la orientación del testigo. Así, en consecuencia, se obtiene un mejor resultado en la AE. El costo del reflex act III es de **USD\$6.350/mes.**



Ilustración 9.33 Reflex Act III (IMDEX, 2021).

9.13 Smart Monitoring

Si bien, el monitoreo inteligente no es un instrumento en sí, es de vital importancia para la IGDS contar con una plataforma que permita a cualquier geomecánico poder consultar sobre las mediciones de los instrumentos instalados al interior mina. Sobre esto, proveedores han mostrado softwares como **ARGUS** para la gestión de los instrumentos y para establecer alarmas de acuerdo con los protocolos y estándares de la empresa. También, a través de esta investigación, se ha visto propuestas en China con el objetivo de

usar **Machine Learning** para establecer planes de alarma e interpretar la gran cantidad de datos proveniente de diversos instrumentos geotécnicos instalados alrededor de estaciones de trenes subterráneos.

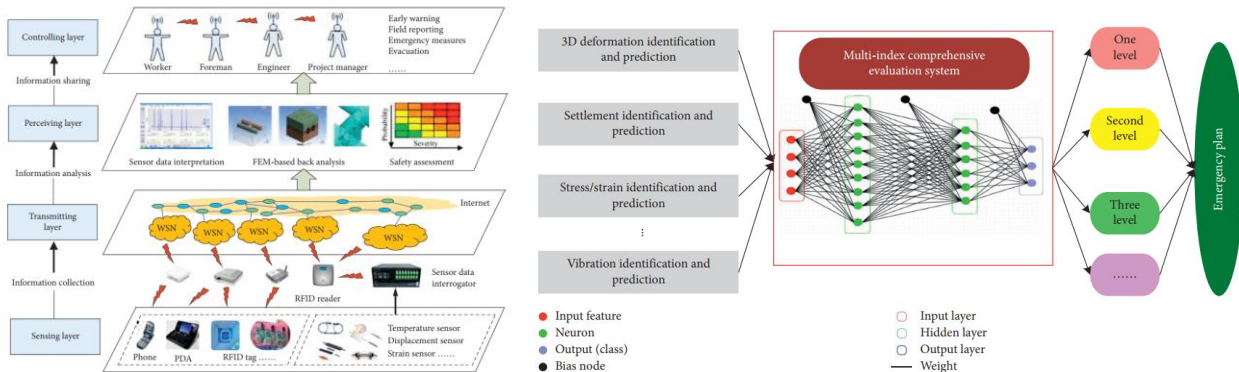


Ilustración 9.34 Esquema de la aplicación de Machine Learning para la gestión de los múltiples instrumentos geomecánicos (Wang, 2020).

Respecto al software ARGUS desarrollado por la empresa SOILINSTRUMENTS, se muestra a continuación como sería su uso con diferentes tipos de instrumentos instalados en una casa.

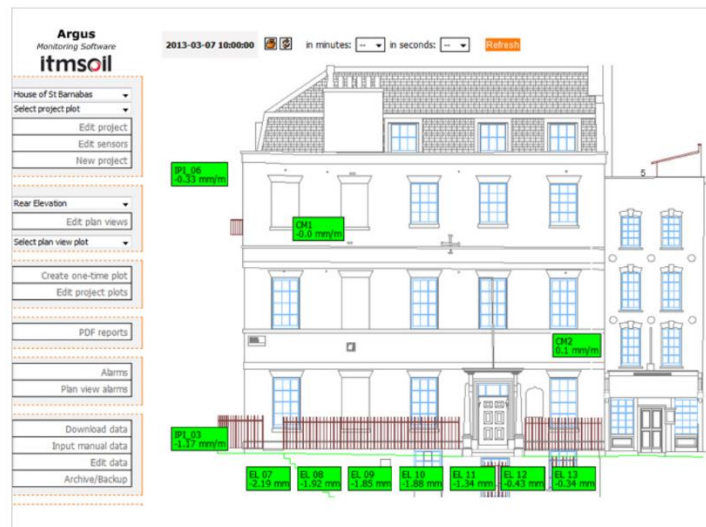


Ilustración 9.35 Software Argus para la gestión y reporte de la medición de los instrumentos (SOILINSTRUMENTS, 2021).

9.14 Vine Robot y TRMR

El vine robot es un dispositivo diseñado por estudiantes de la universidad de Stanford, el cual puede utilizarse para múltiples usos dependiendo de la adaptación. Básicamente consiste en un cuerpo cilíndrico hecho de plástico u otro material (como los fabricados en las impresoras 3D) enrollado y que se va estirando con la presión del aire que se le ingresa al interior.



Ilustración 9.36 Componentes del Vine robot (Coad, 2019).

Lamentablemente, la versión que desarrollan en la universidad no es comercial, por consiguiente, se le consultó a la empresa IBEX TECHNOLOGIES™ sobre su TRMR que es básicamente el vine robot modificado para aspectos militares y de rescate de personas.

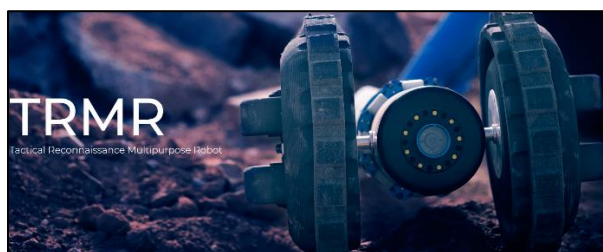


Ilustración 9.37 Robot multipropósito de reconocimiento táctico (TRMR por sus siglas en inglés) (IBEX Technologies, 2021).

En una reunión con la empresa se conversó sobre la posibilidad de adaptar el dispositivo para realizar auscultaciones en perforaciones verticales u horizontales de largo alcance (como las de FH de 300m aprox.). Y para poder efectuar dichas modificaciones se tendrían que invertir una suma de al menos \$100.000 dólares. En conclusión, por ahora este dispositivo no es aplicable para la DET en el ámbito geomecánico, sin embargo, es de posible interés para otras áreas como la de seguridad y rescate de personas atrapadas bajo rocas de gran tamaño.

9.15 Scanner Zeb Horizon (GeoSlam)

Este instrumento viene a superar los equipos estáticos utilizados para el levantamiento de nubes de puntos, porque con el Zeb Horizon la medición se puede realizar mientras se camina por la galería. En su interior el escáner posee un IMU (unidad de movimiento inercial) con el cual se registra el movimiento del sensor a lo largo de la caminata. A su vez, estos movimientos son procesados por el algoritmo SLAM con el cual se le determina un tiempo y espacio a cada uno de los puntos registrados.



Ilustración 9.38 Dispositivo de GeoSlam el Zeb-Horizon (GeoSLAM, 2021).

Algunas especificaciones técnicas para considerar sobre este dispositivo son:

- 1) Tiene un rango de 100[m]
- 2) La masa del scanner y del datalogger es de 1,5[kg] y 1,3[kg] respectivamente
- 3) Su exactitud es va desde 1 a 3 [cm] dependiendo del ambiente en el que se utilice

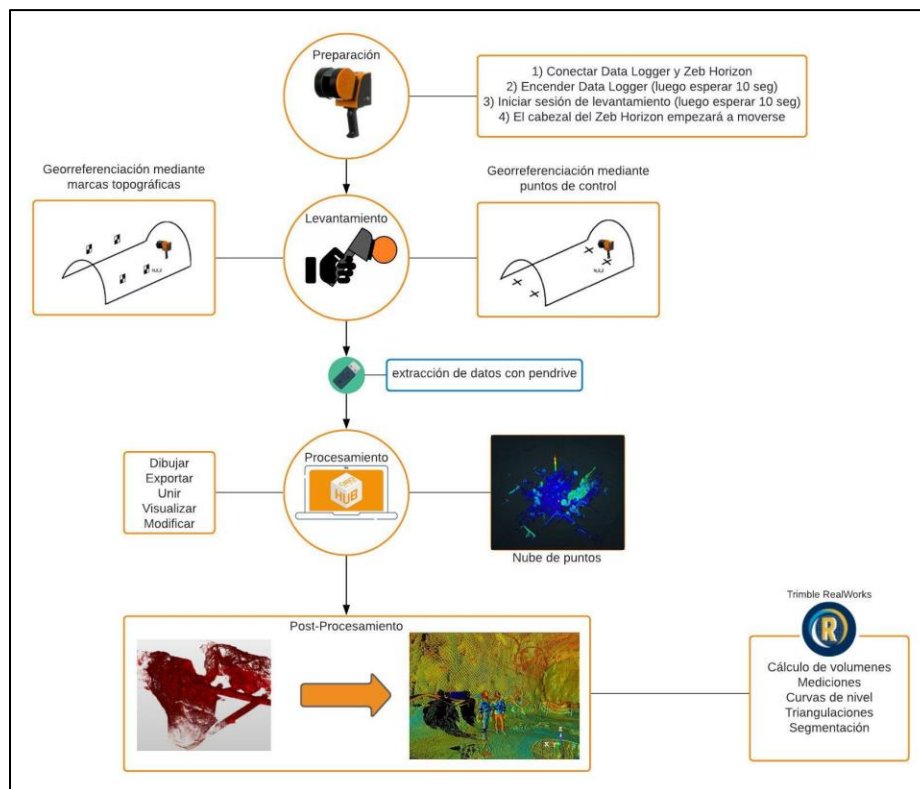


Ilustración 9.39 Metodología de trabajo para el Zeb Horizon (elaboración propia).

Su precio es de **\$83.000USD** incluyendo los accesorios y software de post-procesamiento.

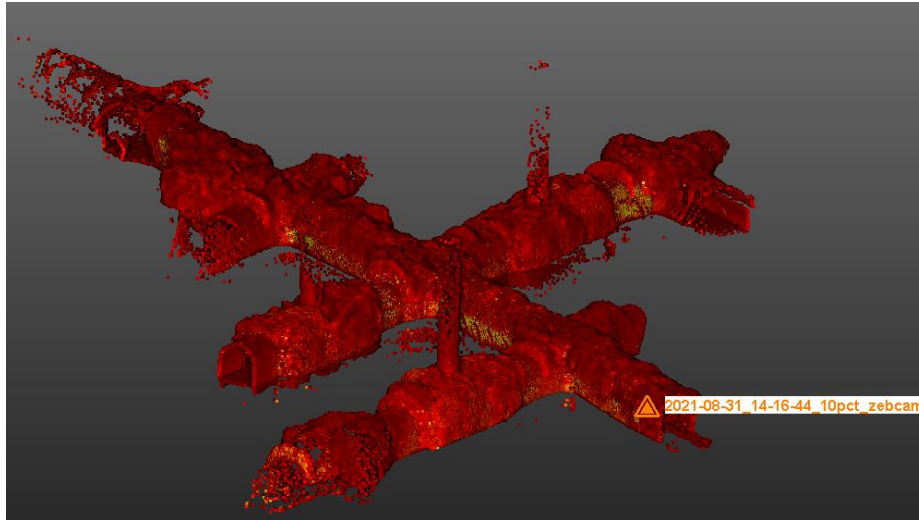


Ilustración 9.40 Captura de nube de puntos en la Calle 57 entre las zanjas 51 y 54 de la mina Esmeralda bloque 2 (elaboración propia).

Para establecer coordenadas a la nube de puntos se necesita de todas formas las coordenadas topográficas de los puntos que se utilizarán para la georreferenciación. Dichos puntos son generalmente muy reflectantes y como ya se dijo, a través del equipo de topografía de la División se puede saber su localización. Para la georreferenciación se requiere un mínimo de 3 puntos, pero se recomienda utilizar 4 o más y elegir los puntos que disminuyan el error asociado a la georreferenciación. También es relevante no sobrepasar más de 300 metros lineales a través de galerías, ya que a partir de dicha distancia se aprecia el fenómeno de divergencia, es decir, una deformación de la galería misma producto de esta larga extensión. Además, mientras se transita por la galería se sugiere hacerlo por un lado (por ejemplo, el lado sur de la galería) y en el trayecto de retorno volver por el lado contrario (lado norte de la galería), esto con el fin de evitar una duplicación de la nube de puntos que se produce por la homogeneidad del sector. Por cierto, se finaliza el trayecto en el mismo punto de inicio tal como se ilustra a continuación:

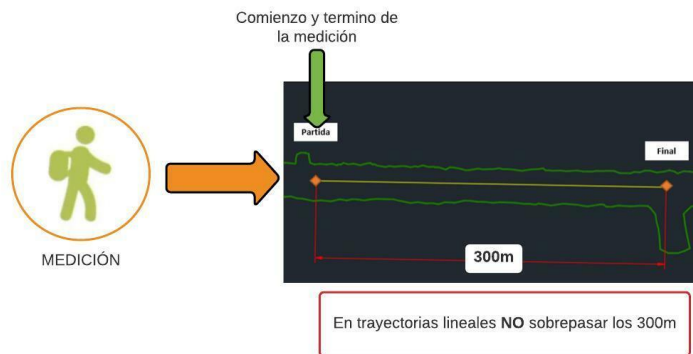


Ilustración 9.41 La medición termina en el punto de partida, es decir, existe un trayecto de ida y uno de retorno (elaboración propia).

10 Análisis

10.1 Benchmarking

Según Karzulovic (2002) el 5% de la inversión del proyecto de minería se debería materializar en la exploración y caracterización del macizo rocoso. En donde la exploración está compuesta por los sondeos y la caracterización por los estudios mediante ensayos de laboratorio y la instrumentación. Esta última representa el 1% de la inversión del proyecto.

En base a lo mencionado anteriormente en la DET se han hecho las siguientes inversiones a nivel nacional:

Tabla 10.1 Cantidad de inversión realizada por mina en la DET.

	Inversión [Millones de USD]	Instrumentación [Millones de USD]	Período [años]	Inversión en instrumentación por año [Miles de USD/año]
Esmeralda	\$1.000	\$10	20	\$500
Reno/Dacita/R.norte	\$1.000	\$10		\$500
Andes Norte	\$1.000	\$10		\$500
Andesita	\$1.000	\$10		\$500
Diamante	\$1.000	\$10		\$500
Diablo Regimiento	\$300	\$3	10	\$300
Pacífico Superior	\$300	\$3		\$300
Pilar Norte	\$300	\$3		\$300

Vale decir que son, obviamente, valores aproximados.

Desglosando los gastos actuales de la DET y el PNNM:

Tabla 10.2 Gastos actuales en dólares de la IGDS en instrumentación.

Licencias de Software	\$20.000/año
Instrumentación	\$80.000/año
Staff	\$372.000/año
Total	\$472.000/año

En el caso de Chuquicamata subterráneo se hizo una inversión aproximadamente de \$5.600[MUSD] donde específicamente en los macrobloques N01-S01 se invirtieron \$300[MUSD] de los cuales \$7[MUSD] fueron destinadas a la instrumentación, es decir, un 2,3% de la inversión.

Por otro lado, en la caverna de la sala de chancado de Andes Norte desarrollada por la vicepresidencia de proyectos tuvo una inversión total de \$175[MUSD], de la cual \$3,5[MUSD] correspondieron a la instrumentación, en este caso fue un 2,0% de la inversión.

En el túnel El Melón se invirtieron \$50[MUSD], el 3% se utilizó para la instrumentación, es decir, \$1,5[MUSD].

Para el ámbito internacional se consultó sobre el sistema de instrumentación de diversas empresas mineras ubicadas en Indonesia, Australia y Mongolia con el fin de robustecer este benchmarking y comparar el nivel de instrumentación geomecánica. El cual se puede mostrar en la siguiente tabla comparativa:

Tabla 10.3 Comparación entre los sistemas de instrumentación en diferentes operaciones mineras tanto nacionales como internacionales (Zepeda, 2020).

INSTRUMENTACIÓN GEOMECÁNICA /MINAS	DET	PCHS	GBC	DOZ	BG	DMLZ	OYU TOLGOI	CADIA EAST	NNM- SCH1	TUNEL EL MELON
Sistema Sísmico	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
Sistema Smart Marker	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	---	---
Sistema Cave Tracker	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	---	---
Extensómetros/MPBX	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	?	✓	✓
Sistema SSTDR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
Pernos FOG/ Conv./C. Carga	X	✓	✓	✓	✓	✓	?	?	X	✓
TiltMeter	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	?	✓	✓
Borehole Camera (BHC)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
Sistema Satelital	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Escaner topográfico	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PRISMA	✓	✓	✓	?	?	?	?	?	✓	✓
TPD [kt]	120	20*	13*	82	20	78	160**	80	---	---
Producción Anual [ktCu]	459	80*	50*	306	77	301	450**	91	---	---

Es así como se puede establecer que la DET a mediados del 2020 estaba atrasada en comparación a otras minas con su plan de instrumentación. Y debido a esto último se definió una unidad encabezada de generar nuevos planes de instrumentaciones para los sectores planificados en el corto y mediano plazo.

Las variables analizadas para determinar la aplicabilidad de los instrumentos detallados en la sección 9 son las siguientes:

- Temperatura de operación de cada instrumento.
- Condiciones para las cuales fueron diseñados (dimensiones, resistencia a la corrosión, tipo de roca).

- Comparación entre ellos analizando sus ventajas y desventajas.
- Experiencias previas con los instrumentos.
- Costos de cada instrumento.

10.2 Comparación entre Celda HI y BX CCBO

La celda Hollow Inclusion utiliza 2 diámetros diferentes para realizar la medición de esfuerzos, uno es la perforación EX que mide 38mm, donde se introduce la celda, y la sobreperforación con un diámetro de 152,4mm. Esta diferencia de diámetros hace necesario un cambio de barrero en la perforadora aumentando el tiempo de los operadores en el lugar, en consecuencia, se incrementan los tiempos de trabajo y exposición. En cambio, la celda BX CCBO posee un único diámetro de 60mm, lo que le da una ventaja significativa en ese aspecto e incluso ya se han realizado sobreperforaciones de aproximadamente 2,5 horas mucho menor que las 4 horas de la celda HI. Además, vale mencionar que el costo de la celda BX CCBO es aproximadamente la mitad que una celda HI. Por otra parte, las longitudes de perforaciones son menores (10cm a 30 cm vs 60cm), lo que reduce la probabilidad de que el fenómeno del “disking⁶” se presente en dichas mediciones. Si bien la celda BX CCBO se ha utilizado para hacer **mediciones** de esfuerzos en esta investigación **no** se encontraron publicaciones en donde se haya empleado la celda para el **monitoreo** de esfuerzos como si se ha hecho con la celda HI en la división el Teniente y en otras faenas alrededor del mundo.

Finalmente, la celda HI (Ilustración 10.1) se utiliza en perforaciones horizontales con una leve inclinación vertical para extraer el agua, en cambio, la BX CCBO (Ilustración 10.1) se puede utilizar en perforaciones verticales u horizontales. También ambas celdas tienen en común que se han utilizado en diferentes tipos de rocas y en diferentes tipos de sectores como lo son: los cercanos a fallas, accesos, con altos esfuerzos, entre otros. Todo lo anterior se puede apreciar de forma resumida en la

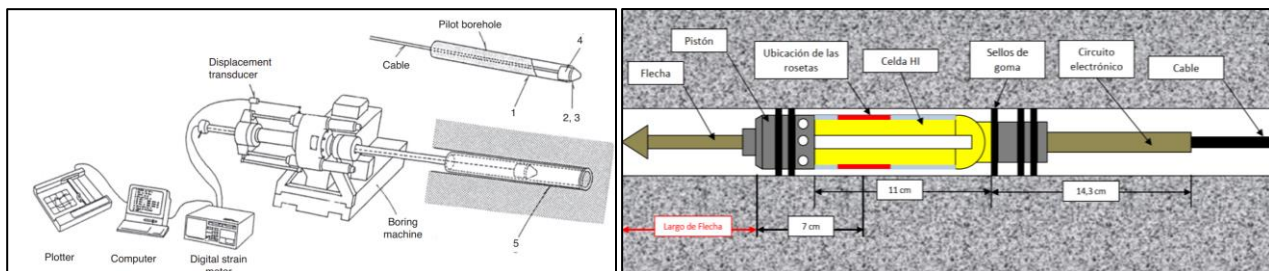


Ilustración 10.1 Al lado izquierdo se muestra la BX CCBO y sus diferentes componentes utilizados para la medición de esfuerzos y al lado derecho se muestra la celda Hollow Inclusion Digital mostrando también sus diferentes elementos que la conforman.

⁶ Disking: Cuando existen grandes esfuerzos sobre el macizo rocoso y se realiza una perforación para medir el tensor se puede observar fenómenos como éste en el cual se observa un testigo quebrado en “discos”, por consiguiente, la medición de esfuerzos se descarta y se debe repetir en otro sector más adecuado.

Tabla 10.4 Comparación entre ambas celdas (elaboración propia).

BX CCBO	HID
$\phi_{\text{único}} = 60mm$	$\phi_{ex} = 38mm$ y $\phi_{overcoring} = 152,4mm$ (6")
Necesita de 10cm a 30cm de overcoring	Son 60cm de overcoring
Mide hasta 100MPa	Mide hasta 100MPa
Posee 16 ó 24 strain gauges	Posee 9 ó 12 strain gauges
Tiempo por overcoring: 2,5 horas	Tiempo por overcoring: 4 horas
Costo unitario de \$1282(USD)	Costo unitario de \$2300(USD)
Origen Japonés 1999	Origen Australiano 1987
Diseñado para perforaciones verticales y horizontales	Diseñado para perforaciones horizontales
Requiere 3 tests uniaxiales	Requiere 1 test biaxial
Ambas han sido en diferentes tipos de rocas, minas y profundidades	

10.3 Análisis FODA

Cada instrumento geomecánico posee sus ventajas y desventajas, ya que cada uno fue diseñado para diferentes fines, por ende en esta sección se muestra un análisis FODA realizado a cada nuevo instrumento que ha sido evaluado en esta memoria.

Instrumento/método	Fortalezas
GPR	El instrumento puede determinar estructuras y cambios del tipo de roca esto permite un ahorro en perforaciones.
ANZI y BX CCBO	Permite la determinación del tensor de esfuerzos en 3D

CRAB ROBOT	Es capaz de realizar auscultaciones en pozos de diámetro desde 50[mm] hasta 750[mm] y se adecua a las paredes del pozo con sus ruedas.
VINE ROBOT	El instrumento permite alcanzar largas distancias, lo cual lo hace ideal para auscultar en perforaciones profundas.
PERNOS	Las deformaciones y cortes de los pernos pueden ser monitoreadas y transmitidas a través de la fibra óptica.
OLYMPUS	Este instrumento puede determinar si el perno está cortado o no sin necesidad de extraer dicho perno.
GEO4SIGHT TILT	Una de las fortalezas del Geo4sight tilt es que no necesitan de un cable para transmitir los datos, sino que lo hacen de forma inalámbrica.
CAVE TRACKERS	Al igual que los Geo4sight tilt permite un monitoreo del caving de forma inalámbrica.
ZEB HORIZON	El levantamiento de puntos puede hacerse mientras el usuario va caminando por los sectores de interés. Lo cual es sumamente práctico.
DRONES	Este equipo permite realizar el levantamiento de puntos o auscultaciones en sectores que son más complejos con respecto a su estabilidad u orientación.
GYROMASTER	Permite indicar las desviaciones de la perforación y mejorar la estimación de esfuerzos mediante AE.
REFLEX ACT III	Ayuda a identificar la orientación de testigos, lo cual mejora la calidad del AE.
MR/VR	Para realizar un análisis geotécnico ya no es necesario estar presencialmente en el sector, sino que se puede hacer con realidades virtuales.
SMART MONITORING	A través de redes neuronales se pueden establecer alarmas automáticas establecidas según los datos en tiempo real que entregan los diferentes instrumentos ubicados en la mina subterránea.

Instrumento	Oportunidades
GPR	Tecnología nueva en la División y en la corporación, por lo que es una importante oportunidad para ser pioneros en la incorporación de este dispositivo, comprobar y demostrar su gran utilidad para los análisis geomecánicos requeridos en la infraestructura crítica y procesos mineros.
ANZI y BX CCBO	Este instrumento representa una oportunidad para la División, ya que incrementaría las opciones para determinar el campo de esfuerzos en 3D.
CRAB ROBOT	Instrumento innovador y posibilita la oportunidad de monitorear lo que sucede al interior de un pozo.
VINE ROBOT	La capacidad de este instrumento de alcanzar largas extensiones permitiría aprovechar la oportunidad de utilizar los pozos de hidrofracturamiento para su auscultación con el vine robot.
PERNOS	Se abre la oportunidad de poder monitorear el sistema de soporte y con ello planificar las reparaciones y mantenimientos según su estado.
OLYMPUS	Tal como el anterior, se abre la posibilidad de conocer el estado de los pernos sin necesidad de su extraerlos.
GEO4SIGHT TILT	Con este instrumento se puede conocer el progreso del caving y como interactúan las diferentes cavidades producidas por el método de explotación.
CAVE TRACKERS	Con este instrumento se puede conocer el progreso del caving y como interactúan las diferentes cavidades producidas por el método de explotación.
ZEB HORIZON	Con este dispositivo se posibilita la recolección de la nube de puntos con mucha más rapidez en comparación como se hacía antes.
DRONES	Los drones son una opción para acceder a sectores restringidos por su nivel de riesgo. Y así poder hacer levantamiento de la geometría.
GYROMASTER	Da la oportunidad de mejorar el nivel de confianza y fiabilidad de los datos obtenidos mediante AE.
REFLEX ACT III	Da la oportunidad de mejorar el nivel de confianza y fiabilidad de los datos obtenidos mediante AE.

MR/VR	Con esta tecnología sería posible la incorporación de un personal con diferentes capacidades para realizar estudios geomecánicos. Además, se reduciría la cantidad de viajes a terreno y por ende los GEI emitidos al medioambiente.
SMART MONITORING	Existe la oportunidad de construir un sistema de alarmas mediante las mediciones obtenidas en tiempo real desde los instrumentos instalados.

Instrumento	Debilidades
GPR	Se requiere de capacitación para la comprensión de los datos obtenidos mediante esta tecnología y la interpretación de estos datos es difícil.
ANZI y BX CCBO	La celda ANZI ha sido probada en División Salvador, pero no en la DET. En el caso de la celda BX CCBO no ha sido probada aún en la DET.
CRAB ROBOT	El control del dispositivo es a través de un cable, lo cual limita el alcance.
VINE ROBOT	Al ir avanzando se requiere de más presión de aire.
PERNOS	Los datos se transmiten a través de la fibra óptica, la cual puede ser dañada por equipos que transiten a través de la galería o roca proyectada de las tronaduras.
OLYMPUS	El pulso solamente va en línea recta.
GEO4SIGHT TILT	La energía de la batería tiene un límite, lo cual limita la cantidad de mediciones emitidas por el dispositivo.
CAVE TRACKERS	Pueden verse afectados por la humedad o movimiento del macizo rocoso.
ZEB HORIZON	Se requieren de puntos de georreferenciación para establecer las coordenadas de la nube de puntos recolectada con el instrumento.
DRONES	Se requiere de experiencia para su buen control y la polución puede afectar los datos que obtenidos.
GYROMASTER	Se requiere experiencia para el uso y aplicación del instrumento en terreno.
REFLEX ACT III	Se requiere experiencia para el uso y aplicación del instrumento en terreno.

MR/VR	Se requiere de nuevos levantamientos continuamente, es decir, es necesario ir a la mina para actualizar el holograma y la realidad virtual.
SMART MONITORING	La diversidad de los tipos de instrumentos y los múltiples fenómenos al interior mina hacen que los modelos de entendimiento necesarios no sean triviales para una correcta interpretación de los datos.

Instrumento	Amenazas
GPR	La heterogeneidad y las anisotropías del macizo rocoso
ANZI y BX CCBO	La celda hollow inclusion de geosystem es la principal amenaza o rival para la celda ANZI y la celda BX CCBO
CRAB ROBOT	Existe el riesgo de que el dispositivo quede atrapado en el pozo o el cable sea cortado por un movimiento del macizo rocoso mientras se realiza la auscultación.
VINE ROBOT	Cualquier desprendimiento del macizo rocoso que pueda dañar u obstruir al instrumento.
PERNOS	La roca proyectada de las tronaduras, estallido de rocas o cualquier otra eventualidad que al ocurrir corte la transmisión de datos.
OLYMPUS	La oxidación y curvatura de los pernos, ya que estás situaciones imposibilidad obtener una correcta medición del largo de los pernos con el instrumento.
GEO4SIGHT TILT	La pérdida de la señal de los dispositivos por alguna eventualidad.
CAVE TRACKERS	La pérdida de la señal de los dispositivos por alguna eventualidad.
ZEB HORIZON	La polución del ambiente u otros objetos que puedan alterar la medición.
DRONES	Las corrientes de viento que pueden desestabilizar al dron y eventualmente causar su caída.
GYROMASTER	La aparición de nuevos dispositivos que reemplacen a éste en su función.
REFLEX ACT III	La aparición de nuevos dispositivos que reemplacen a éste en su función.

MR/VR	Algún ciberataque a la nube con los datos almacenados de la mina.
SMART MONITORING	La caída de los servidores o fuentes de energía que puedan afectar el sistema de monitoreo.

10.4 Comparación entre pernos normales y pernos inteligentes

Según los precios de los pernos de secciones anteriores y comparados con la Tabla 10.5 se puede observar que la diferencia entre los nuevos tipos de pernos y los que se usan habitualmente para la fortificación es de unas 100 veces. En consecuencia, la aplicación de estas nuevas tecnologías debe ser focalizada en los sectores importantes para la continuidad operacional. Un ejemplo de estos sectores son los puntos de vaciado, porque perder un punto de vaciado debido al no monitorear las cargas que estaban sosteniendo los elementos de soporte, según cálculos efectuados por la IGDS, cuesta aproximadamente entre \$4 a \$64 millones de dólares (con el escenario actual de un precio de \$4 dólares la libra de cobre). Dicho monto justifica la instrumentación para salvaguardarlos de eventuales colapsos.

Tabla 10.5 Precio de los elementos de soporte usualmente utilizados en la DET.

Elemento de soporte	Precio CLP	Precio Dólares
Fortificación Pernos D-Bolt	20.747	\$28
Fortificación Cable Tipo 1	12.904	\$17
Fortificación Cable Tipo 2	13.041	\$17
Fortificación Cable Tipo 3	14.751	\$20
Fortificación con Pernos Diám. 22 mm	8.406	\$11
Fortificación con Pernos Diám. 25 mm	8.722	\$12

10.5 Transmisión de datos e información y su visualización

Sobre la transmisión de datos desde los dispositivos hacia dataloggers, nodos, gateways u otros equipos para su visualización, ya sea de forma “pura” o ya transformada en información manejable para el geomecánico. Se debe mencionar lo siguiente a partir de la investigación realizada en este trabajo:

- La mayoría de los dispositivos están migrando a una transmisión de datos inalámbrica, lo cual es beneficioso, por un lado, ya que es más práctico que instalar el cableado. Sin embargo, esto también significa una mayor abundancia de la cantidad de ondas electromagnéticas circulantes lo que debe tomarse en cuenta a la hora de utilizar otros dispositivos sensibles a estas ondas. Además, hay que prestar mucha atención a los límites de esta forma de transmisión de datos, ya que debido a las geometrías al interior de la mina subterránea su propagación no es grande en comparación a un ambiente abierto como en superficie. Otro aspecto que se debe considerar es la capacidad de los servidores para el almacenamiento de datos y también el suministro eléctrico necesario para los instrumentos, éste último es imprescindible para el monitoreo continuo y la transmisión de datos.
- Lo que no se observó hasta ahora en durante la investigación es la tecnología en la instrumentación geomecánica para visualizar los datos a través desde el celular, esto sería bastante práctico para el personal de la SGO o la SEG, para ver en terreno el estado actual de las mediciones en vez de estar empleando diferentes tipos de equipos lectores para cada diferente tipo de instrumento.

11 Arquitectura del sistema de manejo, transmisión y almacenamiento de datos

El sistema para el manejo, transmisión y almacenamiento de datos consta de los siguientes elementos:

- 1) Instrumentos: Son todos los instrumentos capaces de transmitir sus datos a través de cables de conexión hasta llegar al nodo lector.
- 2) Nodos lectores: Son los equipos que permiten el almacenamiento y transmisión de los diversos instrumentos ubicados en un mismo sector.
- 3) Gateways: Son los equipos que captan de forma inalámbrica los datos transmitidos por los nodos lectores.
- 4) Servidores: Son los equipos para almacenar de forma segura y respaldada los datos obtenidos por los instrumentos.
- 5) Sala CIO/computadores: Desde la sala CIO o desde computadores personales se puede acceder a los datos capturados por los instrumentos.

Los cuales se utilizan dispuestos tal como se muestra en la siguiente ilustración:

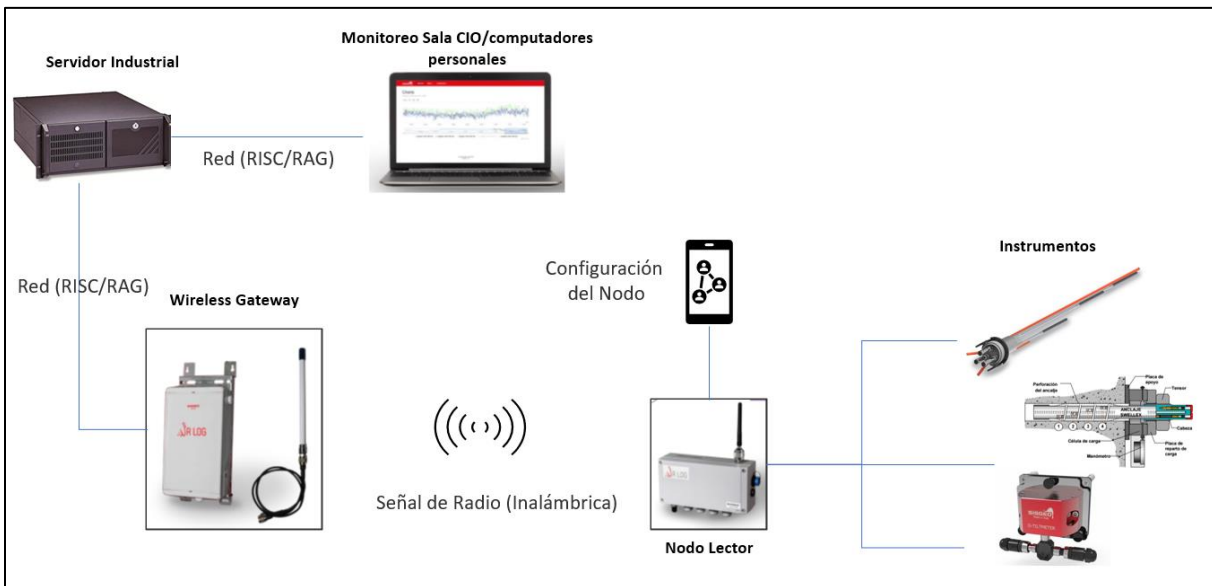


Ilustración 11.1 Esquema general del sistema de transmisión, manejo y almacenamiento de datos (Cisternas, 2020).

De tal forma de poder captar los datos del macizo rocoso a partir de los instrumentos geomecánicos instalados en cada una de las minas como Pilar Norte, Recursos Norte, Esmeralda Bloque 1 y Bloque 2, Panel invariante, Diamante, Andes Norte o Andesita. Así cada mina reporta la información a través de las redes de los sistemas de control (RISC) hasta los servidores y luego dicha información es visualizada por los usuarios (geomecánicos) quienes monitorean el estado de los instrumentos. Ese flujo de la información se puede visualizar en el siguiente esquema:

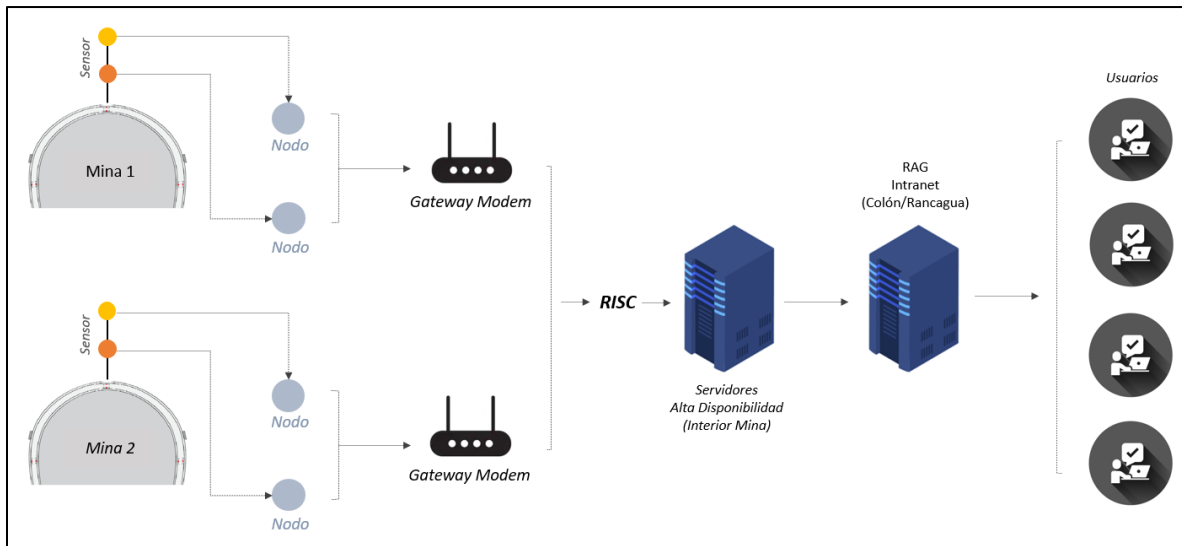


Ilustración 11.2 Esquema de la transmisión, manejo y almacenamiento de datos (Cisternas, 2020).

Por último, en la Ilustración 11.3 se muestra un ejemplo de dicha configuración empleada para la captura de datos de los dispositivos GEO4SIGHT TILT.

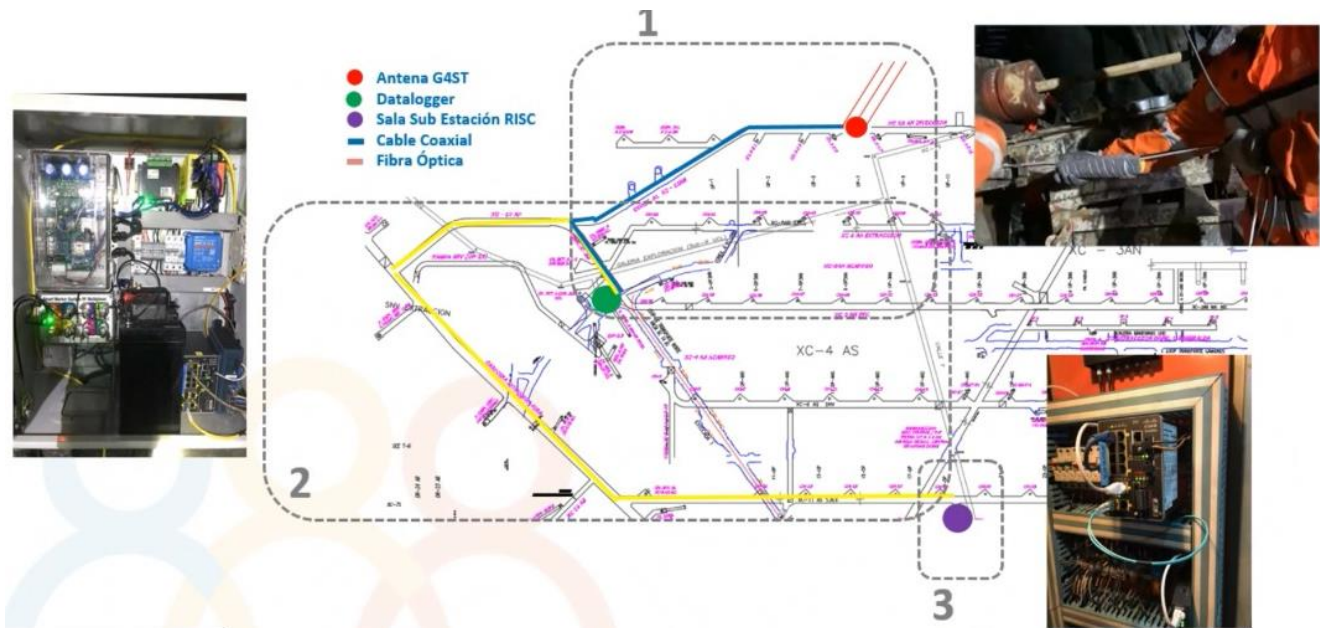


Ilustración 11.3 Ejemplo del sistema de conexión a través de cables coaxiales y fibra óptica para el monitoreo con GEO4SIGHT TILT (Cisternas, 2020).

12 Conclusiones y Recomendaciones

A partir de lo desarrollado en secciones anteriores se llega a la conclusión que:

El GPR por ahora no es aplicable para minería subterránea con el objetivo de ver las discontinuidades y cambios geológicos, ya que se requiere de una superficie más expuesta y sin la interferencia de elementos metálicos como la malla y pernos. Sin embargo, esta tecnología si puede utilizarse, y se ha hecho, en superficie para monitorear el muro del tranque de relave, descubrir si hay permafrost debajo del suelo, entre otros múltiples usos que pueden ser útiles para otras gerencias de la División.

En el año 1991 se introduce la celda HI por primera vez en Sudamérica a través de su uso en la mina El Teniente donde vino un experto para capacitar al personal sobre su metodología y aplicación. La misma historia se puede repetir con la celda BX CCBO, la cual es aplicable en términos técnicos en la DET. Eso sí, se debe considerar el traslado estos especialistas desde el extranjero. Además de requerir de un tiempo necesario para una transferencia de conocimiento efectiva sobre la aplicación del método y, por su puesto, las pruebas de medición con las celdas.

El VINE ROBOT y su versión comercial TRMR no son aplicables debido a sus dimensiones y a que su principal uso está destinado otras funciones. Agregado a lo anterior se debe mencionar que para modificarlo a los requerimientos de la DET se requeriría una gran inversión (señalada en secciones anteriores). A pesar de ello, este instrumento podría ser útil para el rescate de personas que se encuentren debajo de rocas y/o escombros.

El OLYMPUS un instrumento utilizado para inspeccionar el estado de los pernos no es aplicable para cumplir dicha función, ya que solamente sirve con pernos en buen estado, en cambio, cuando los pernos están oxidados o doblados la onda del ultrasonido no registra toda la longitud del perno.

El CRAB ROBOT es aplicable en la DET, ya que se ha adecuado a los diámetros de las perforaciones empleadas para la auscultación de pilares y a través de las solicitudes realizadas a la empresa colaboradora se han detallado, por ejemplo, la cantidad de cable necesario. De todas formas, para el uso del CRAB ROBOT se recomienda utilizar un material como el policarbonato u otro (transparente y resistente) para proteger al instrumento en caso de desprendimiento de roca al interior del pozo que provoque un atrapamiento del dispositivo y, en consecuencia, causar una gran pérdida para la unidad de instrumentación geomecánica y data science. Este consejo surge de las experiencias previas que se ha tenido, por ejemplo, con la borehole cámara donde se ha registrado atrapamiento del dispositivo por la obstrucción de las rocas.

En el caso de los diferentes tipos de pernos (digibolt, digicable, entre otros) se concluye que los pernos creados por la empresa GEOSYSTEM y comercializados por las empresas colaboradoras acá en Chile son aplicables para el monitoreo de la cantidad de carga que están soportando los elementos de soporte y si es que existe un corte en el perno o no, pero su uso debe ser destinado a la infraestructura crítica debido a

gran costo por cada perno. La instrumentación de estos elementos de soporte se sugiere hacerlo posterior a la colocación del soporte definitivo.

Los instrumentos Geo4sight y Cave trackers elaborados por la empresa ELEXON son aplicables para las operaciones en Teniente, de hecho, ya han sido utilizados en minas como Chuquicamata Subterránea y en el caso de Teniente, ya se han instalado dispositivos Geo4sight en 2 pozos para el monitoreo de la interacción de cavidades sobre Pilar Norte, en otras palabras, ya se ha probado su uso y confiabilidad para registrar el avance de las cavidades. Y como se ha dicho, se recomienda tener un especial cuidado con la posición de los elementos de transmisión de datos de estos instrumentos, ya que algún desperfecto podría causar una interrupción total o parcial del registro del movimiento del caving.

Los DRONES también se han utilizado con anterioridad en algunos niveles de El Teniente, siendo bastante importante su uso para futuros planes en donde se tienen contemplado explotar caserones, en los cuales el acceso es restringido para los trabajadores, pero un dron puede ingresar para hacer el levantamiento de puntos que se necesite. Se destaca su versatilidad y adaptabilidad. Combinado con el HOVERMAP y otros dispositivos de la tecnología LiDAR. En el caso de los drones se aconseja emplearlos en sectores sin mucha polución ni fuertes corrientes de viento que puedan desestabilizarlo y provocar la pérdida de una hélice o la destrucción del equipo. Otro dispositivo similar, respecto al objetivo de obtener la geometría de las excavaciones está el ZEB HORIZON, el cual ya se ha utilizado en la División con buenos resultados, por ende, su aplicabilidad está aprobada y algunos consejos respecto a su uso aparecen en su sección correspondiente.

El GYROMASTER y el REFLEX ACT III son instrumentos de apoyo que permiten mejorar la calidad de las mediciones de esfuerzos con emisiones acústicas. Es aplicable y pertinente a las necesidades del Teniente de determinar con altos grados de confianza del tensor de esfuerzos con una buena medición de la orientación del testigo y el rumbo e inclinación real de las perforaciones.

El HOLOLENS es un dispositivo aplicable también aquí en Teniente, de hecho, empresas consultoras como SRK ya lo están utilizando para la visualización de la mina mediante realidad virtual, realidad mixta y hologramas. Su aplicación es variada, una de ellas sería para un análisis geotécnico in-situ.

El concepto SMART MONITORING se refiere al uso de softwares como ARGUS o machine learning para la visualización holística e integrada de todos los instrumentos instalados. Básicamente es el cerebro de la red de instrumentos y es super importante contar con algo así para la IGDS y la SEG. Por lo tanto, no solamente es aplicable, si no que pertinente e imperante.

Con respecto a los instrumentos de sismicidad como geófonos y acelerómetros no se observó alguna innovación importante que sea de interés para la DET. La mayoría de los equipos cumplen con temperaturas de operación similares a las que se encuentran en la División. El gran avance de las nuevas tecnologías de instrumentación está en la transmisión de los datos de forma inalámbrica lo que permite un control remoto y en línea disponible las 24 horas.

Con todo lo anterior se cumple con el objetivo de evaluar la aplicabilidad de estas nuevas tecnologías de instrumentación geomecánica. También se destaca que en el presente documento se cumple con revisar y registrar la instrumentación utilizada actualmente por la División. A continuación, y de acuerdo con lo investigado se propone la siguiente instrumentación para la infraestructura y los procesos críticos:

Infraestructura crítica:

Puntos de vaciado: Pernos con celdas de carga, digi-bolts, digi-cable, fiber optics bolts, extensómetros.

Accesos/túneles principales: Zeb Horizon y drones con Hovermap.

Fallas: Inclínómetros, Geo4sight Tilt, crackmeters.

Pilares: BHC y CrabRobot,

Procesos críticos:

Caving: Geo4sight Tilt, Cave trackers, cables TDR o SSTDR, geófonos y acelerómetros.

Interacciones de cavidades: Geo4sight Tilt

Efecto modo de la pipa Braden: Tiltmeters y geófonos.

Subsidencia: Geo4sight Tilt, Cave trackers, cables TDR o SSTDR y drones.

Medición y monitoreo de esfuerzos: Celda HI y AE. Y equipos de apoyo como el GyroMaster y el Reflex Act III. Además, se sugiere incorporar la celda BX CCBO.

Sismicidad: Geófonos y acelerómetros.

Por su puesto, existen otros instrumentos que pueden utilizarse para el monitoreo del macizo rocoso. Solamente se nombraron los más esenciales.

13 Bibliografía

- Amadei, B., & Stephansson, O. (1997). *Rock and Its measurement*. Springer.
- Barnett, W. (2020). *Inovative mixed reality approach to rock mass mapping in underground mining*. Santiago: MassMin2020.
- Blondel, M. (2017). *Implementación de la técnica de medición de esfuerzos con emisión acústica*. Santiago.
- Bustamante, K. (2020). METODOLOGÍA PARA ESTIMAR EL CAMPO DE ESFUERZO 3D EN CAMPO LEJANO, UTILIZANDO INSTRUMENTACION FLAT JACK. Santiago.
- Carlson. (2019). *GEOCOM*. Obtenido de <https://www.geocom.cl/products/carlson-c-als>
- Cavieres, P. (Agosto de 1992). *Instrumentacion Geomecanica*. Codelco - División El Teniente.
- Cavieres, P. (2021). *El Rol de la Ingeniería Geomecánica en el Diseño Minero del método Panel Caving*. Rancagua.
- Cavieres, P. (Mayo de 2021). Diplomado de Postítulo en Geomecánica aplicada al diseño minero. *Técnicas de medición de esfuerzos*.
- Cavieres, P., & Diaz, J. (1993). *Determinación de los angulos de subsidencia para la mina el Teniente*. Rancagua.
- Centro de Modelamiento Matemático (CMM). (2009). *Informe Interno a CORFO Innova Chile BOTDR*. Universidad de Chile.
- Child, G. (2008). Memoria: Medición de esfuerzos en macizo rocoso mediante celdas del tipo hollow inclusion. Santiago, Chile: Universidad Andrés Bello.
- Cisternas, P. (2020). *Plan de instrumentación Geomecánica*. Rancagua.
- Coad, M. (2019). *Vine Robots*. IEEE ROBOTICS & AUTOMATION MAGAZINE.
- CODELCO. (2021). Taller de instrumentación. Rancagua.
- Dunnicliff, J. (1998). *Geotechnical Instrumentation Reference Manual*. Washington, D.C.: NHI.
- Electronics Coach. (2021). Obtenido de <https://electronicscoach.com/wheatstone-bridge.html>
- ELEXON. (2021). *Training Session*. Rancagua.
- Encina, V. (2019). Clase de minería subterránea. Santiago, Chile.
- Expandemineria. (2021). *expandemineria*. Obtenido de [expandemineria: https://expandemineria.cl/desafio/soluciones-tecnologicas-para-delimitar-la-zona-de-seguridad-en-el-borde-de-crater-de-mina-el-teniente/](https://expandemineria.cl/desafio/soluciones-tecnologicas-para-delimitar-la-zona-de-seguridad-en-el-borde-de-crater-de-mina-el-teniente/)

- GEOKON. (2021). Obtenido de www.geokon.com
- GEOSENSE. (2021). Obtenido de <https://www.geosense.co.uk/>
- GeoSLAM. (Agosto de 2021). Obtenido de www.geoslam.com
- GEOSYSTEMS. (Noviembre de 2014). Obtenido de <http://www.essearch.com/wp-content/uploads/2014/11/HID-CELL.pdf>
- GEOSYSTEMS. (2021). Obtenido de <https://geosystems.com.au/product-category/geotechnical-ground-control-instruments/>
- Guzmán, J. A. (2010). *RESOLUCIÓN ESPACIAL EN LA APLICACIÓN DE FIBRA ÓPTICA (BOTDR) EN PERNOS DE ANCLAJE DE SOPORTE EN TÚNELES*. Santiago: UChile.
- Hayford, V. O. (2016). *MODELLING OF FAULTS IN LOW-VOLTAGE CABLES*. Finlandia.
- Hoehn, K. (2020). *The Design of Improved Optical Fibre Instrumented Rockbolts*. Springer.
- Hui, Z. L. (2014). *The Hight Precision Vibration Signal Data Acquistion System Basen on the STM32, Sensors & Transducers, Vol. 172, Issue 6, June 2014, 98-104.*
- IBEX Technologies. (2021). Obtenido de <http://ibex-robotics.com/>
- IMDEX. (2021). Obtenido de <https://reflexnow.com/product/reflex-act-iii/>
- IMS. (2021). Obtenido de <https://www.imseismology.org/>
- ISRM. (1987). Suggested Methods for Rock Stress Determination.
- Jorquiera, P. (2019). Taller de instrumentación SGO . Rancagua: Codelco División El Teniente.
- Jorquiera, P., & Celis, M. S. (2018). *Medición del largo efectivo de pernos en Mina El Teniente a través de técnicas de ultrasonido*. Santiago: Umining.
- JSNDI. (2016). *Practical Acoustic Emission Testing*. Tokyo: Springer.
- Karzulovic, A. (2002). *Geotechnical Guidelines for a Transition from Open pit to Underground Mining*.
- Level developments. (2020). Obtenido de Sales level developments: <https://www.leveldevelopments.com/2020/10/what-are-inclinometers/mems-accelerometer/>
- Madrid, A. (2005). *Identificación de los diferentes estados del macizo rocos a través de nuevas tecnologías de instrumentación geomecánica, Codelco Chile - División el Teniente*. Santiago: USACH.
- Maigom. (2019). PRESENTACION EJECUTIVA CRABROBOT .
- MassMin. (2020). *MassMin2020*. Santiago.

- McCarthy, E. (Agosto de 2019). *Tech Target Network*. Obtenido de <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/coaxial-cable-illustrated>
- MDT. (2021). *Productos de instrumentación Geomecánica de Mine Desing Technologies*.
- Microgeo. (Septiembre de 2016). *Microgeo Geomatica*. Obtenido de <https://geomatica.microgeo.cl/wp-content/uploads/2016/09/Brochure-Optech-CMS-V500-Espa%C3%B1ol-Microgeo-S.A.-1.pdf>
- Microgeo. (Junio de 2021). Obtenido de <https://geomatica.microgeo.cl/producto/escaner-3d-faro-focus-s350/>
- MICROSOFT. (2021). Obtenido de <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/hardware>
- Moraga, C. (2021). Nota Técnica de Celda CSIRO HI Digital . Rancagua.
- Pereira, J. (2006). *Rock stress tensor measurements at El Teniente Mine, Chile*. London: ISBN.
- RP-Photonics. (2008). *"Encyclopedia of Laser Physics and Technology"*. Obtenido de <http://www.rp-photonics.com>
- RST INSTRUMENTS. (22 de Noviembre de 2016). Obtenido de RST web site: <https://rstinstruments.com/>
- SCT . (2021). Obtenido de www.sct.gs
- SENSORS & SOFTWARE. (2021). Obtenido de <https://www.sensoft.ca/>
- SGO. (1 de Julio de 2019). Taller de Instrumentación . Rancagua, Chile.
- SISGEO. (9 de Enero de 2020). Obtenido de www.sisgeo.com
- SOILINSTRUMENTS. (2021). Obtenido de <https://www.soilinstruments.com/products/monitoring-software/argus-monitoring-software/>
- SPT. (2021). Obtenido de <https://sptab.com/gyromaster/>
- Valdivia. (1 de Junio de 2021). Instrumentación Sala de Chancado Andes Norte. Rancagua, Chile.
- Valdivia, C. (1998). *Instrumentación Geomecánica para la determinación de esfuerzos, deformaciones y daños en el interior del macizo rocoso en mina El Teniente*.
- Varela, J. (2019). *Análisis geológico-geomecánico de pilares de roca mediante perforaciones de auscultación, en los sectores productivos mina esmeralda y mina pilar norte*. Concepción: UdeC.
- Vlachopoulos, N., & Forbes, B. (2020). *Augmenting the in-situ rock bolt pull test with distributed optical fiber strain sensing*. Ontario: Elsevier.
- Wang, L. (2020). *Automatic Monitoring System in Underground Engineering Construction*. Hindawi.

- Whiteman, D. (2016). Cave Tracker Flow Monitoring System Installation at Argyle Diamond Mine. *MassMin2016*.
- Wimmer, M., & Ouchterlony, F. (2008). *Application of time domain reflectometry (TDR) for block and sublevel caving mines*. Lulea.
- Woolmer, D. (2020). *Use of Drone based Lidar technology at Olympic Dam Mine and initial Technical Applications*. Santiago: MassMin2020.
- Zepeda, R. (2020). *Benchmarking nacional e internacional de instrumentación geomecánica*.
- Zhang, & Wu. (2008). *Performance Evaluation of BOTDR-based Distributed Fiber Optic Sensors for Crack Monitoring*. Ibaraki University, Japan.