



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

MONITOREO EN LÍNEA DE DEFORMACIONES EN ESTRUCTURAS CIVILES Y MINERAS MEDIANTE BOTDR

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
ELECTRICISTA

LUIS FELIPE MUJICA TORO

PROFESOR GUÍA:
PABLO ESTÉVEZ VALENCIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PABLO ESTÉVEZ VALENCIA
CLAUDIO PÉREZ FLORES
SERVET MARTÍNEZ AGUILERA

SANTIAGO DE CHILE
2014

“MONITOREO EN LÍNEA DE DEFORMACIONES EN ESTRUCTURAS CIVILES Y MINERAS MEDIANTE BOTDR”

Esta tesis presenta un resumen de las actividades, proyectos necesarios, implementación, resultados y discusión de éstos, para realizar una transferencia tecnológica de un sensor de deformaciones basado en la reflectometría óptica descrita por *L. Brillouin*.

Este desarrollo se realiza en los laboratorios de la Nippon Telephone and Telegraph en los años 2002-2003 y es seleccionado para su transferencia hacia la minería a través de una nueva empresa “Mining Information Communications and Monitoring”, MICOMO S.A. creada para estos fines por la sociedad formada por CODELCO Chile y NTT.

Para incorporar este tipo de tecnologías “no probadas”, ni existentes en el arsenal de las empresas de ingeniería que diseñan las explotaciones y plantas mineras, se hace necesario recorrer el largo camino del innovador, vendiendo los conceptos y realizando pilotos a nivel escritorio, a nivel industrial, contrastando durante largos periodos las mediciones de los nuevos métodos con las mediciones realizadas con instrumentación “probada”. Se hace necesario aclarar y establecer los ámbitos, rangos, operatividad, requerimientos de instalación, mantención y ambiente y, obtener la aprobación de pares cuya prioridad es la producción de cobre o Mega Watts.

Entre los resultados más destacables, cabe mencionar los siguientes:

- Se miden por primera vez, a entender del autor, en la minería mundial deformaciones en línea y distribuidas del macizo rocoso sometido a una operación minera. Con estas mediciones se investigaron las influencias sobre las distintas estructuras instrumentadas de la actividad minera, se correlaciona la medición de deformaciones con la actividad micro-sísmica y se comienzan los estudios para analizar la dinámica actividad minera (extracción) versus deformación de una estructura, túnel, pilar de punto de extracción y la actividad micro-sísmica que precede o antecede al desplazamiento.
- Se logra por primera vez en el mundo medir, establemente, pequeñas deformaciones de 3000 metros de estructura de un túnel de conducción de aguas a 100 metros de presión de agua y con flujos de 2 a 3 metros por segundo.
- Se entrega a la operación minera e hidráulica global una herramienta para medir, alarmar y posteriormente modelar un lazo de control de producción con la variable “salubridad estructural” como condicionante de esa producción.

Dedicatoria

Al Padre, la Madre, que no alcanzaron a gozar este logro.

A los Hijos, Hijas, Nietas, Nietos, que nos siguen...

Agradecimientos

A mi sólida Educación Gratuita.

Al equipo de profesionales que construyen a diario esta pequeña revolución tecnológica:
Dra. Alejandra Alvarez, por su paciencia, cariño y liderazgo ejercido durante nuestra activa colaboración.

Rodrigo Hernández, viga clave del equipo creativo y constructivo de nuevas tecnologías de MICOMO.

María José Riesco, análisis, gráficos, informes, tendencias y su alegría y cariño en nuestro hacer.

Cecilia Gallardo, nuestra paciente organizadora y traductora a los mundos digitales.

A mi mujer, Tamara.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos y Alcances	2
1.2. Motivación	5
1.3. Metodología	6
2. El Contexto	8
2.1. Minería en Chile	9
2.1.1. Minería Subterránea	9
2.2. Fibra Óptica, Sus Bases	13
2.3. Principios Físicos de Operación del Sistema BOTDR	15
2.3.1. Resolución Espacial	17
2.3.2. FBG, Fiber Bragg Gratting	18
2.4. Desarrollos CMM-MICOMO, La Necesidad	20
2.5. La Estabilidad y Futuros Usos de BOTDR	22
2.6. Descripción de Sistemas de Medición de Deformaciones	23
3. Implementaciones y Proyectos Realizados	25
3.1. Proyecto Piloto Industrial - BOTDR El Teniente	26
3.1.1. Sensor de Fibra Óptica	26
3.2. Caso Innova CORFO - División El Teniente	28
3.2.1. Arquitectura Sistema de Medición	28
3.2.2. Aplicación Medición en Falla 1	31
3.2.3. Aplicación Cámara de Chancado, Mina Diablo Regimiento	32
3.2.4. Aplicación Punto de Extracción	34
3.2.5. Aplicación Pilares Mina Esmeralda	35
3.3. Caso Túnel de Servicios Rajo Chuquicamata	36
3.4. Caso túneles de aducción de aguas	38
3.5. Caso Túnel a Presión	38
3.5.1. Experimentos de Ingeniería Básica	40
3.5.2. Operación bajo Presión Hidrostática	40

3.5.3.	Pruebas de Calibración Axial-Radial	42
3.5.4.	Mediciones Strain línea base	44
3.5.5.	Diseño de Monitoreo	45
3.5.6.	Rango de Medición	45
3.5.7.	Tipos de Sensores	47
4.	Presentación de Resultados	52
4.1.	Resultados piloto 2004-2005 División El Teniente (DET)	53
4.1.1.	Registros y Resultados del Período de Medición	53
4.2.	Resultados Campaña BOTDR DET 2007-2010	55
4.2.1.	Monitoreo de Falla Principal N1	56
4.2.2.	Monitoreo Cámara de Chancado	57
4.2.3.	Pilares Esmeralda DET	59
4.3.	Resultados Mediciones Túnel Río Blanco	63
4.4.	Resultados Mediciones Túnel de Servicio Rajo Chuquicamata	64
4.5.	Resultados Túnel a Presión	65
5.	Discusión	70
6.	Conclusiones y Recomendaciones	74
7.	Glosario	77
8.	Bibliografía	81
9.	Anexos	85
9.1.	Anexo 1: Manual Analizador BOTDR	86
9.2.	Anexo 2: Manual Conmutador Óptico	88
9.3.	Anexo 3: Manual Fibra Óptica Sensora IC-LOCK	91
9.4.	Anexo 4: Manual Fibra Óptica Sensora Embebida	95
9.5.	Anexo 5: Sistema de Anclaje Discreto IC-LOCK	96
9.6.	Anexo 6: Comunicado de Prensa, Creación MICOMO S.A	97

Índice de figuras

1.1. Modelo de Ángulos de Subsistencia Pipa Central El Teniente.	4
2.1. Tendencias Operacionales Minería del Cobre.	9
2.2. Representación Operaciones Niveles Mina El Teniente.	10
2.3. Operación Mina Block Caving.	11
2.4. Métodos refuerzos túneles.	11
2.5. Cambio de Turno Mineros.	12
2.6. Evolución seguridad de trabajadores y los necesarios refuerzos estructura- les en los túneles.	12
2.7. El Espectro Electromagnético.	14
2.8. Estructura típica de la Fibra Óptica.	14
2.9. Deformación de la Fibra Óptica.	15
2.10. Efecto Retrodispersión Brioullin.	15
2.11. Espectro de frecuencia-distancia de la luz retrodispersada.	16
2.12. Cambios de frecuencia en luz restrodispersada.	17
2.13. Equipo Analizador BOTDR, NTT Advantest.	17
2.14. Aplicaciones del Sistema BOTDR.	17
2.15. Generación del pattern o rejilla en la fibra.	19
2.16. Efectos ópticos en Red de Bragg.	20
2.17. Arquitectura general de monitoreo BOTDR.	24
3.1. Sistema BOTDR para Medición de deformaciones en El Teniente.	26
3.2. Tensiones esperadas en Túnel de Ventilación BOTDR Piloto.	27
3.3. Montaje de Fibra óptica.	27
3.4. Instalación de pernos, anclajes y fibra óptica sensora en túnel.	27
3.5. Esquema del sistema BOTDR implementado en División El Teniente.	29
3.6. Localización espacial de las aplicaciones BOTDR en la Mina El Teniente.	30
3.7. Sala Monitoreo BOTDR-Microsísmico DET.	31
3.8. Sensor de deformaciones bidireccional “Long Body”.	31
3.9. Anclaje LBS a la roca.	32

3.10. Sensores LBS en techo e IC-Locks en pared.	32
3.11. Sensor Desplazamiento de Falla mediante IC-Locks ortogonales.	33
3.12. Camara Chancado Diablo Regimiento.	33
3.13. Detalle Tiro Sensor Piso.	34
3.14. Instrumentación en piso y pared Cámara Chancado Primario.	34
3.15. Fibra Sensora en arcos de refuerzo.	35
3.16. Vista General Nivel Esmeralda Zona Colapsada.	35
3.17. Modelo isométrico de Rajo Chuquicamata desde una vista hacia el norte.	36
3.18. Diseño de puntos de anclaje IC Locks y detalle de la fibra en shotcrete.	37
3.19. Sensores en Túnel de Servicios Rajo Chuquicamata.	37
3.20. Disposición Tiros Sensores de una estación.	38
3.21. Detalle Colapso Shotcrete.	39
3.22. Corte de fibra submarina para la conexión de las áreas a medir.	40
3.23. Modelación numérica de efectos de presión hidrostática sobre 400 mm de fibra óptica.	41
3.24. Mallaje Modelo Numérico.	41
3.25. Cámara hiperbárica para pruebas de tensión-strain bajo presión.	42
3.26. Deformación medida versus Deformación real.	42
3.27. Ensayo discos shotcrate IDIEM.	43
3.28. Diseño medición strain mediante BOTDR en disco de shotcrete.	43
3.29. Deformación central Disco versus Strain.	43
3.30. Shotcrete proyectado sobre la fibra sensora.	44
3.31. Sección típica sensor embebido.	45
3.32. Interconexión y disposición de fibra sensora - fibra backbone.	45
3.33. Distribución de circuitos de fibra óptica en sectores seleccionados.	46
3.34. Deformaciones radiales según deformaciones longitudinales.	46
3.35. Corte transversal de túnel y ubicación de sensores en cada muralla.	47
3.36. Vista isométrica de instalación de fibra embebida en una sección del túnel.	48
3.37. Vista isométrica de instalación de fibra embebida en una sección del túnel.	49
3.38. Vista isométrica de instalación de fibra IC-LOCK (embebida/expuesta) en una sección del túnel.	49
3.39. Mufas marca 3M (Quante™ BPEO Splice-Protection Closure for Optical Fiber Cables).	50
3.40. Mufa utilizada en túnel a presión 3M.	51
3.41. Mufa union de Back Bone 24 Filamentos a Sensores Pared Derecha e Izquierda Sector A.	51
4.1. BOTDR tunel data.	54

4.2. Strain medido en el Túnel de ventilación.	55
4.3. Detalle Planta Nivel Producción. Ubicación sensores.	56
4.4. Curva de desplazamiento vertical y horizontal de ic-lock en la configuración X en estación de falla. Desplazamiento vertical: desplazamiento del manto, desplazamiento horizontal: bloques despegándose.	57
4.5. Esfuerzos alrededor de una caverna subterránea.	58
4.6. Evolución Temporal Deformación Tiros Sensados.	59
4.7. Perfil deformaciones Tiro T6.	59
4.8. Representación Tiempo-Profundidad-Deformación en pozo instrumentado.	60
4.9. Disposición General pilares Instrumentados Mina Esmeralda.	60
4.10. Sensor tipo tiro horizontal, anclado al fondo con doble fibra sensora para zona plástica.	61
4.11. Superposición de cambios de tendencias de la evolución temporal del pilar 1 con el aumento de la actividad minera.	61
4.12. Deformación Absoluta Zona Núcleo. Radio considerado 100 m.	62
4.13. Perfil deformaciones Núcleo Pilar	63
4.14. Histórico Deformaciones Núcleo Pilar Esmeralda.	63
4.15. Perfiles Deformación radial Estación 1.	64
4.16. Histórico Deformaciones a lo largo del Túnel de Servicios.	64
4.17. Superposición de mapa de estructuras con mediciones de perfil de strain BOTDR.	65
4.18. Esquema General Secciones Túnel.	66
4.19. Vista localización Secciones A, B, C.	66
4.20. Perfil de deformaciones de un sector arco del lazo embebido del sector arco sección A.	67
4.21. Gráficos Strain y Delta Strain vs Distancia Sección A Sensor 1.	67
4.22. Representación Strain-Distancia-Tiempo.	68

Índice de tablas

2.1. Comparación de las tecnologías de sensores de Strain distribuidos	18
3.1. Asignación Tiempos de medición por Aplicación.	29
3.2. Longitud lazos de medición y distancia a sala de equipos.	30
4.1. Disponibilidad y eficiencia de la detección de deformaciones.	54
4.2. Secciones Instrumentadas del Túnel conductor de Aguas.	66
4.3. Strain máximo y tasa mensual de strain hasta el 25 de Feb. de 2014.	69

Capítulo 1

Introducción

1.1. Objetivos y Alcances

Chile es un país de cliché sísmico, “consistente campeón mundial” de terremotos, ubicado sobre una zona de subsidencia de la placa de Nazca, [Beniscelli2010]. Ésta es una franja altamente activa del anillo del Pacífico, y, a la vez, esta situación geofísica, le ha entregado gigantescas reservas de minerales. Los tiempos del cobre nativo superficial fueron generosos con los incas y después con los ingleses que explotaban el nitrato, más embarcaban también cobre nativo. Los tiempos del cobre oxidado ya expiran, también en paralelo con los grandes depósitos superficiales de sulfuros como Chuquicamata. La gran minería se transformará en minería subterránea, provocando aumentos de costos y complejidades operacionales.

Las minas subterráneas en Chile se hacen más profundas y la roca portadora de mineral es más dura. Estas grandes condicionantes técnico-económicas del proceso minero, empujan a crear nuevos métodos de explotación subterránea como la minería continua de Codelco Chile, [Baez2008], en la cual se importan técnicas petroleras para el pre-acondicionamiento, mediante fracturación inducida, del macizo rocoso.

La minería es un proceso de colapso inducido y controlado sobre un macizo, al mismo tiempo, las afloraciones de minerales se encuentran generalmente en fallas geológicas importantes. En este escenario de presente y futuro cercano, el monitoreo en línea de la estabilidad de las estructuras mineras y civiles se convierte en una necesidad estratégica de la operación y seguridad minera.

Una de las variables aun no medidas de manera consistente y en línea es la estabilidad de la estructura que habilita la explotación de mineral. Las técnicas de mediciones de deformaciones o desplazamientos mediante Fibra Óptica son de reciente introducción en la minería y en obras estructurales y civiles y permiten realizar mediciones que habilitan la validación de modelos empíricos o teóricos, la generación de alarmas operacionales, el aprendizaje y la optimización de los diseños de explotación mineras [Araned2003].

El fenómeno físico que permite realizar mediciones de temperaturas y deformaciones mediante fibra óptica fue descrito por Leon Briuollin y se detalla en la Sección 2.2 de esta tesis. La novedad y oportunidad tecnológica que importa este desafío generó una prolífica actividad científica y tecnológica dirigida por el autor y que se resume en esta tesis.

Se presenta en esta tesis la descripción de un proceso de integración y transferencia tecnológica, iniciada por NTT Laboratories, [Naruse2007], [Fujihashi2003], también descrita por [Chai2004], usada primariamente para fines internos del conglomerado Nippon Telephon and Telegraph, en adelante NTT, Japón, para el monitoreo y control de estabilidad de túneles y taludes civiles.

Este desarrollo fue transferido a MICOMO S.A. en el año 2006, para su adaptación y desarrollo de aplicaciones para la minería y servicios estructurales asociados bajo la dirección del autor. Se describen, básicamente, el desafío abordado, la tecnología, los primeros pilotajes en Chile, los desarrollos de sensores ad-hoc para la minería y los cambios requeridos para medir deformaciones de las paredes y techo en un túnel de conducción de aguas a presión.

El objetivo principal de estas actividades de transferencia tecnológica es implementar un sistema de medición en línea de la variable “estabilidad geomecánica” que permita actuar de manera anticipada sobre el proceso que explota una infraestructura, que se mueve y deforma, cerrando y optimizando un complejo lazo de control, seguridad y optimización de procesos.

El monitoreo de la conducta superficial de un yacimiento explotado como rajo o subterráneamente, y de las placas terrestres se obtienen mediante análisis de patrones en imágenes obtenidas con satélite, radar o puntos de GPS, [Dunnicliff2012]. Estas imágenes se usan en línea en la minería y entregan un nivel de seguridad al detectar deslizamientos de manera temprana. Sin embargo, al obtener imágenes o patrones de movimientos superficiales no se logra reconocer la génesis de estos movimientos que nacen desde estructuras bastante más profundas, activadas por la operación minera o tectónica. La tecnología actual de mediciones geomecánicas está basada en Strain-gauges, cuerda vibrante, deformación de un cable coaxial (TDR), distanciómetros laser robotizados, etc., que miden, en un punto del volumen del macizo, ya sea desplazamientos, deformación o tensión. El capítulo 2 de esta tesis contiene una discusión y descripción de estas técnicas.

Las mediciones en un punto no permiten obtener patrones distribuidos al requerir alambrado o comunicaciones con un “data logger” centralizado. Esta arquitectura no es aceptada en una operación minera por las dificultades de mantención y la dinámica de la minería [Dunnicliff2012, Ch 95] [Standing2012, Ch. 94].

A pesar de la complejidad conocida de modelar numéricamente, de manera tridimensional, la conducta geomecánica de una estructura minera heterogénea, los modelos usados actuales, permiten un razonable acercamiento a una tendencia de conducta real, pero sus aproximaciones sólo pueden ser validadas en aquellos puntos donde exista alguna instrumentación.

Al no existir certeza de las predicciones de conductas de estos modelos, las mediciones y sus repeticiones, constituyen un experimento. Este experimento es una pregunta a la madre naturaleza y sus respuestas la convertimos en modelos, [Cherry1957], que el experimentador espera que se acerque, valide y mejore la predicción numérica.

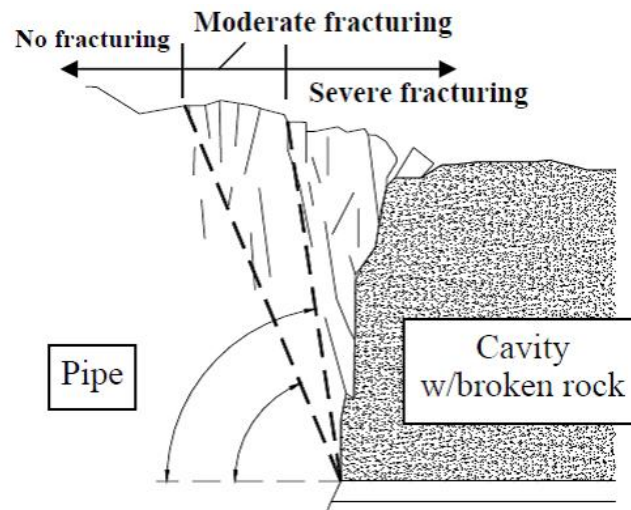


Figura 1.1: Modelo de Ángulos de Subsistencia Pipa Central El Teniente.

La técnica llamada Brillouin Optical Time Domain Reflectometry, en adelante *BOTDR* es una nueva herramienta que la minería y la industria de la construcción recién comienza a usar. La empresa Mining Communications and Monitoring, MICOMO, www.micomo.cl, bajo la dirección de este autor, seleccionó, ha desarrollado y está adaptando esta tecnología para operar en problemas y ambientes mineros, mecánicos civiles, estructurales e hidráulicos.

Dependiendo de los requerimientos de los diversos usuarios, esta técnica puede medir desplazamientos de grandes bloques en las direcciones y sectores que se estimen críticos, sectores específicos de puentes, tranques o estructuras de cañerías o "piping", ya que las distancias de medición distribuida de los equipos hasta ahora disponibles, alcanzan hasta los 50 km de fibra óptica sensora.

El uso de la técnica BOTDR para el monitoreo en línea de deformaciones en minería y estructuras civiles tiene una historia de no más de 8 años. La primera prueba reportada en minería se obtuvo en la mina El Teniente-Codelco, [Naruse2007], la que demostró la viabilidad del uso de esta tecnología en aplicaciones de la industria minera. Durante los años 2007-2009 en el marco de un gran proyecto co-financiado por CORFO se desarrollaron en MICOMO nuevos sensores con esta tecnología [Alvarez2008].

Adicionalmente, a través del referido proyecto CORFO- CODELCO, MICOMO implementa un sistema de información en línea, que incluye alarmas y filtros diseñados para la correcta interpretación de los datos. A partir del año 2008, se monitorea en forma continua el comportamiento de pilares de producción con el objeto de evidenciar y estudiar la influencia del avance del frente de socavación sobre la estabilidad estructural de estos pilares.

Usando y creando SidMil®, que es la plataforma de análisis y representación, desde

el año 2009 hasta el año 2012, se monitorearon continua y simultáneamente: la estructura civil de una de las cámaras de chancado de la mina Esmeralda, la operación a tensión-compresión de pernos de fortificación, comportamiento del macizo rocoso y activación de la falla principal en los niveles de producción y hundimiento en Reservas Norte de El Teniente. A partir de los datos obtenidos en las distintas aplicaciones, se realizó un análisis cuantitativo de las deformaciones y desplazamientos medidos. Como resultado de este análisis, se cuantificó el efecto de la actividad minera sobre las aplicaciones instrumentadas [Alvarez2008].

En el año 2012 se solicitó a MICOMO la realización de un piloto que valida esta tecnología para el monitoreo de deformaciones en la estructura del túnel de abducción de aguas una central hidroeléctrica de pasada. Se instrumentaron 9 secciones del túnel, usando diversas configuraciones de sensores según los requerimientos de geología de la empresa operadora del túnel y central de pasada en Chile. La presión hidrostática en los sectores finales del túnel alcanza las 10 atmósferas.

En esta tesis se presentarán los resultados de experimentos físicos de calibración, modelaciones numéricas para evaluar la sensibilidad de arreglos de sensores, el cálculo del efecto de la presión de agua sobre la fibra sensora y una modelación física que, en conjunto, demostraron la viabilidad de usar este método con sensor de deformaciones estructurales del túnel bajo 100 metros de presión de agua.

Una vez realizados los experimentos a nivel escritorio o, “bench”, se realizaron las ingenierías para la instalación y puesta en marcha de este sistema en el referido túnel. Las mediciones iniciales establecen la línea base de la conducta o “pattern” de deformaciones a Mayo de 2013 y fueron realizadas previamente al llenado y operación del túnel. Se lograron mediciones durante el llenado y se presentan mediciones realizadas con el flujo y presión de agua nominales.

Se concluirá esta tesis con un resumen del estado de validación que ya tiene esta tecnología y los siguientes desafíos, tanto para lograr continuidad de desarrollos y desarrolladores, como para lograr un traspaso a otros innovadores y comercializadores.

1.2. Motivación

Hace 42 años este autor escribió otro resumen como este para aprobar el curso Taller de Título EL 609. En él se describían los fundamentos y actividades, resultados preliminares, bibliografías, así como las especificaciones de los componentes mayores y diseño electrónico para la construcción de un prototipo de un Desfibrilador Cardíaco, desarrollado y construido bajo el alero de un proyecto del Programa para el Desarrollo

de Naciones Unidas (PNUD) 1972-1974, en el grupo de Electro-Medicina del Instituto Tecnológico de CORFO (INTEC).

Agradezco, por primera vez, la generosidad y la paciencia brindada en esas circunstancias por mi Profesor Guía de aquellos tiempos, Juan Loëvel, quien calificó ese trabajo con la nota máxima.

Retomo a ese empeño por titularme, a pesar de mi incuria, como una manera de saldar la deuda con la oportunidad que me concedió el país de aquellos días, para educarme a un gran nivel, de manera gratuita.

El autor ha realizado y dirigido la materialización de muchos proyectos a niveles de ingenierías, de innovación tecnológica, de investigación en mi trabajo de Doctorado [Mujica1984] y desarrollo tecnológico [Mujica1982]. Se ha elegido esta línea de desarrollo tecnológico, sensores basados en fibra óptica, dada la trascendencia de esta y su dinamismo al momento de presentar esta tesis.

Para los efectos de esta memoria se ha seleccionado un conjunto de proyectos, de reciente realización y de alta relevancia económica, que utilizan esta tecnología de frontera para medir la salubridad estructural de una obra civil y/o minera como es un túnel de aducción de agua para una central de generación eléctrica de pasada.

Describiremos, en presente, acciones ya realizadas, se referenciará el trabajo de muchos, y se reconoce el esfuerzo de un equipo de personas del cual estoy muy agradecido y orgulloso de dirigir.

1.3. Metodología

Este trabajo resume un conjunto de proyectos realizados bajo la dirección y con directa participación del autor que, en su conjunto, han incorporado una tecnología de reciente desarrollo comercial a nivel mundial, a las operaciones complejas de la minería y la generación de energía.

Se describirá en el Capítulo 2 de la Tesis propuesta, los antecedentes generales de la industria minera en la cual se implanta primariamente esta tecnología, el estado del arte a la fecha, las distintas tecnologías que compiten, las instalaciones realizadas en Chile, algunos resultados y las técnicas de post procesamiento, filtros, y análisis realizados por, y en conjunto con profesionales del Centro de Modelamiento Matemático (CMM), de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

Una exhaustiva discusión de las ventajas y limitaciones de estas tecnologías se describe en [Puzrin2010]. En este artículo se discuten los métodos que usan la fibra óptica i.e., OTDR, BOTDR, BOTDA, BEDS, como medio de transducción de un fenómeno físico

distribuido o puntual. Finaliza el Capítulo 2 con la conclusión de la vigencia y aplicabilidad de esta tecnología a ambientes industriales agresivos.

El Capítulo 3 de esta memoria presenta cinco casos de aplicaciones exitosas de mediciones de deformaciones en distintas fases de operaciones y estructuras de la minería subterránea en la División El Teniente de Codelco Chile.

En la minería a rajo abierto, en la División Chuquicamata, también de Codelco Chile, se presenta el diseño y las mediciones de las deformaciones de las paredes de un túnel de servicios generales. Este túnel habilita la alimentación de energía, aire y circulación de personas a la cámara de traspaso de mineral transportado por correas hacia la superficie del rajo y plantas concentradoras.

Se describe la instrumentación del Túnel Rio Blanco, que transporta aguas al Molino SAG de la División el Teniente, para medir esfuerzos axiales en 13 estaciones a lo largo del referido túnel. Como caso final y el más contemporáneo, aun en curso, se describen los trabajos para analizar la viabilidad, los experimentos numéricos, en laboratorios y en el túnel; necesarios para la instalación y puesta en marcha de un sistema de mediciones de deformaciones en un túnel de conducción de aguas a presión para la operación de una central hidroeléctrica de pasada.

En cada caso arriba descrito se presentan los resultados en el Capítulo 4, las plataformas desarrolladas para su representación, los análisis de datos, su depuración, filtrajes necesarios para elicitar las tendencias de las deformaciones en sectores críticos de las estructuras instrumentadas.

En el Capítulo 5 se presenta una discusión de resultados obtenidos, y en el Capítulo 6 las conclusiones y recomendaciones finales de esta tesis.

Capítulo 2

El Contexto

2.1. Minería en Chile

La minería tanto en el país como en los otros continentes, agota su riqueza de minerales y las operaciones se hacen aún más difíciles en cuanto a profundidad, dureza, conciencia ambiental. [Morales2010], presenta un resumen condensado de estas dificultades.

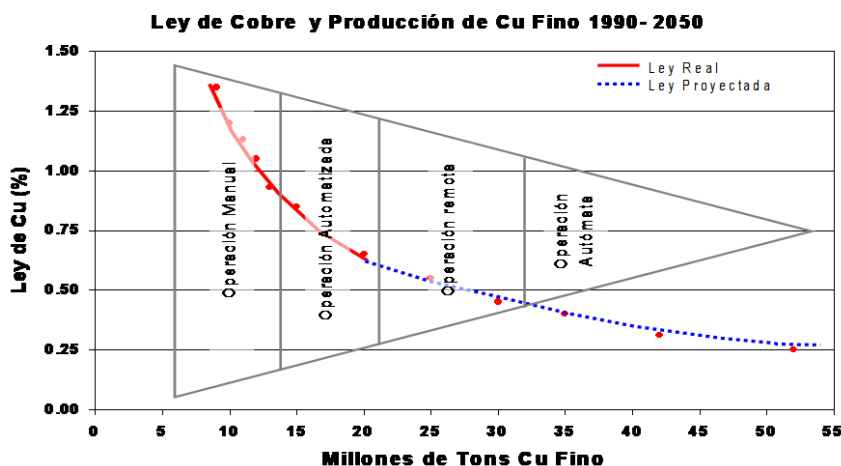


Figura 2.1: Tendencias Operacionales Minería del Cobre.

Se suman a estas tendencias la urbanización profesional, y la resistencia de profesionales a trabajar en condiciones de campamentos remotos y bajo sistemas de turnos extenuantes. Estas tendencias están forzando a los operadores mineros a automatizar y remotizar al máximo sus operaciones y a que esta automatización y remotización presente índices de usabilidad cercanas al 100%. La operación remota, por ende, usa estas tendencias para minimizar los viajes y presencia humana en las operaciones.

La medición remota y distribuida de una variable clave para la operación minera, la integridad mecánica o geomecánica de una estructura, es una oportunidad que Codelco Chile visualizó en sus visitas a los Laboratorios de Investigación y Desarrollo de NTT.

De estas visitas técnicas nace la necesidad de realizar pilotajes de estas tecnologías en faenas, entre ellos la medición en línea de deformaciones de estructuras mineras como túneles, pilares y taludes.

2.1.1. Minería Subterránea

El creciente tránsito de la minería nacional hacia una explotación subterránea, más profunda, extrayendo mineral más duro, a mayor costo, incita a describir en mayor profundidad los métodos e infraestructura necesaria para realizar esta tarea. El desarrollo

ya centenario de la explotación minera en El Teniente es descrito en la figura 2.2. En colores las distintas “Sub Minas” de explotación: Diablo Regimiento, Pilar Norte, Esmeralda, Teniente 4 Sur, Sub Seis, Nuevo Nivel. En cada uno de estos sectores explotados se desarrollan y construyen túneles, piques, oficinas, casinos, casas de cambio, etc.

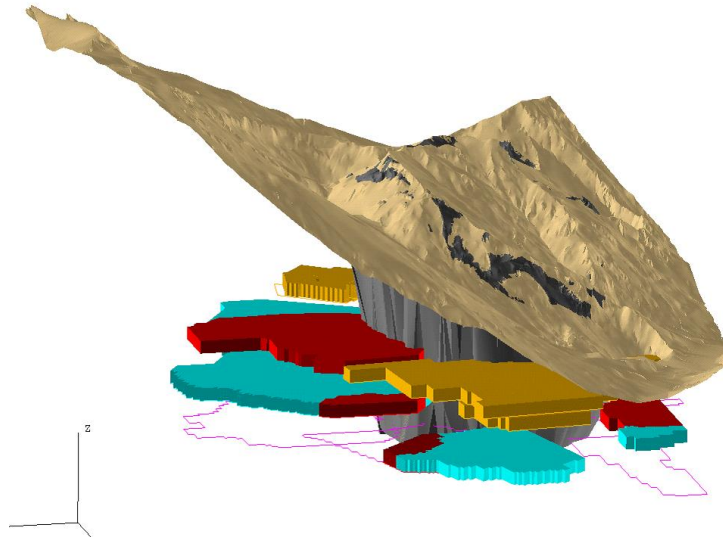


Figura 2.2: Representación Operaciones Niveles Mina El Teniente.

Cada uno de estas minas-niveles requiere de personal, salas de operación, ventilación, casas de cambio, casinos, talleres de mantención, llamado “barrio cívico”, maquinaria de transporte de mineral (palas mecanizadas de bajo perfil o LHDs) que recoge su carga de mineral desde el punto de extracción en el cual el mineral se presenta fracturado por gravedad y/o pre-fracturación, la lleva a un punto de vaciado, que mediante gravedad lo deposita en una parrilla metálica que “filtra” el tamaño hacia el nivel de transporte por ferrocarril o correa transportadora hacia la superficie y plantas de concentración.

La Figuras 2.3 y 2.4 representan el método de extracción de minerales usado mayoritariamente en la minería subterránea en Chile. En esta se observan las distintas estructuras que permiten la fragmentación gravitacional o “caving”, los puntos de extracción, túneles de socavación, ventilación y transporte.

La fracturación de la roca es fundamentalmente debido a la acción de la gravedad y de las grandes presiones al desarrollar las distintas socavaciones que dan inicio a los cambios de tensiones sobre el macizo mineralizado intervenido. Es obvio que la redistribución de tensiones provoca deformaciones en aquellas faenas, túneles, caserones en las cuales trabajan y transitan las máquinas y trabajadores. Los métodos de refuerzos de las distintas labores mineras se describen en un Taller Interno de Codelco [Rojas2009].

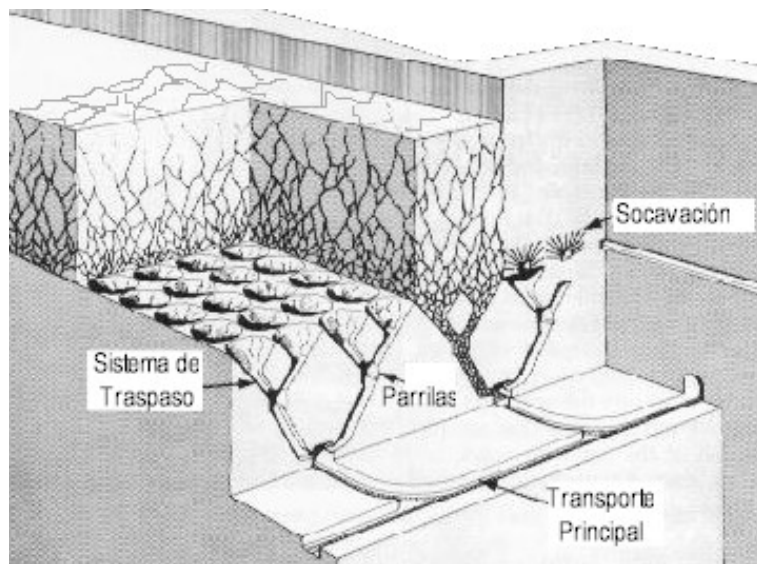


Figura 2.3: Operación Mina Block Caving [Cerutti2004].

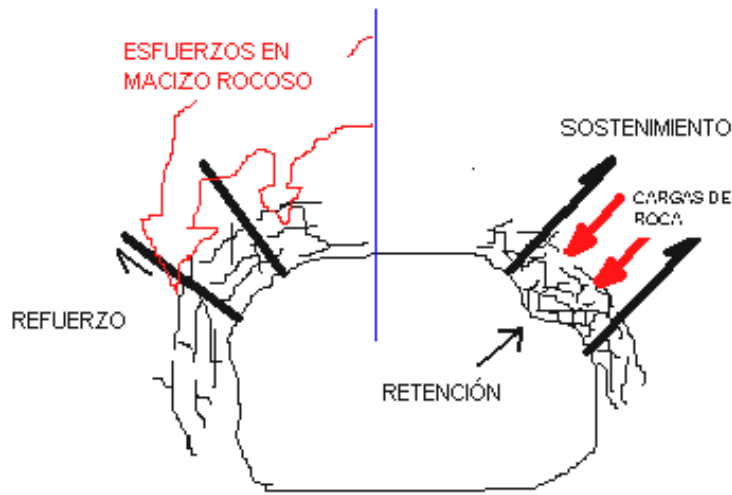


Figura 2.4: Métodos refuerzos túneles [Rojas2009].

La minería en Chile usa hasta la década de los 80 refuerzos de madera para estructurar sus túneles y las más diversas estructuras en la roca. La Figura 2.5 muestra a mineros saliendo del pique o túnel reforzado con postes de eucalipto.

Antes de la explotación de mineral secundario en El Teniente, años 80, los mineros detectaban los crujidos del refuerzo de eucalipto como señal de un cambio en las deformaciones del túnel o pique. Ante un nivel de ruido sólo aprendido por sobrevivientes de trágicas experiencias, evacuaban...



Figura 2.5: Cambio de Turnos Mineros.

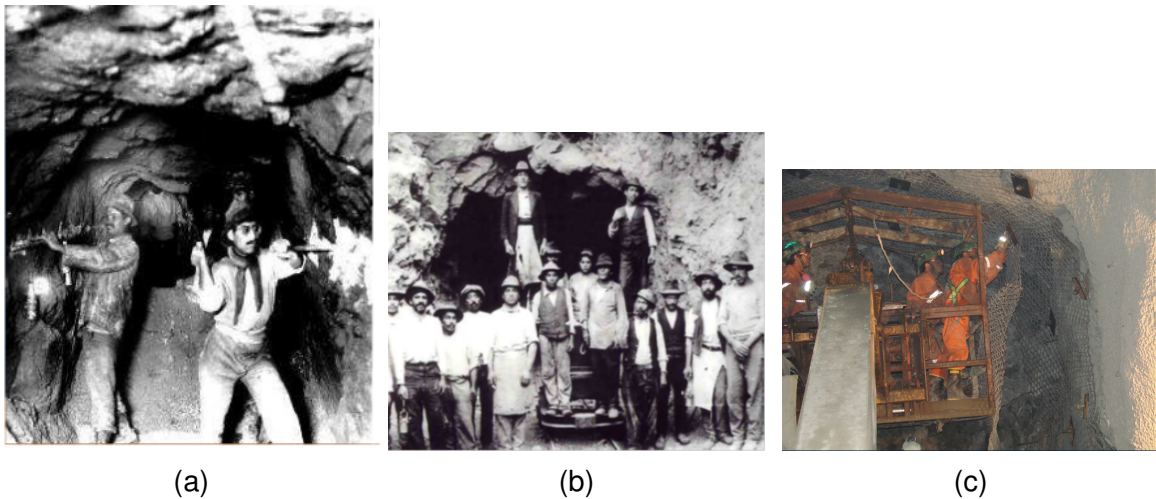


Figura 2.6: Evolución seguridad de trabajadores y los necesarios refuerzos estructurales en los túneles.

Como muestra la secuencia de fotos de la Figura 2.6, a partir de los estallidos de roca en El Teniente, años 80, se refuerzan los sectores de tránsito de personas y máquinas en áreas susceptibles a colapsos mediante arreglos de pernos de retención radial, mallas de acero y *shotcrete* proyectado. Este reforzamiento deja a los operadores sin crujidos ni señales de deformaciones, sin embargo disminuye radicalmente la tasa de explosiones de roca y personal muerto o herido.

Para complementar la seguridad de la operación minera, División El Teniente (DET) implementa un complejo sistema de análisis de micro-sismos centralizada en el nivel -6 o sub seis. Desde este centro se generan alarmas de evacuación mediante reglas no explícitas de intensidad, distribución espacial y tiempo.

La tecnología actual de mediciones de deformaciones geomecánicas está basada en

Strain-Gauges, cuerdas vibrantes, extensómetro, inclinómetros, deformación de un cable coaxial (TDR).

[Katsuki2003] y [Fujihashi2003] comparan el uso de instrumentación eléctrica y su disponibilidad para operar en ambientes húmedos, polvorientos saturados de ruido electro-magnético y visualiza su pronto reemplazo por las tecnologías de fibra óptica.

El desarrollo de distanciómetros laser usados en topografía y su adaptación robotizados a mediciones de rajos, que miden, en una cara del volumen del macizo, ya sea desplazamientos y grandes deformaciones incorpora otra visión que ayuda a comprender la tasa de colapso de una estructura minera.

La medición mediante el *Global Positioning System*, GPS ha alcanzado tal precisión y cobertura que se ha utilizado para medir desplazamientos lentos de grandes superficies. Es una herramienta que ha generado datos a nivel geofísico pero aún no se reporta su uso en operaciones mineras.

La medición de grandes extensiones de superficie terrestre mediante el Satélite SAR (Synthetic Aperture Radar) Interferometry (SInSAR) es una técnica capaz de producir mapas de desplazamientos de la superficie terrestre tanto de día como de noche o a través de nubes, tampoco se encuentran reportes de sus uso en minería [Bozzano2012].

2.2. Fibra Óptica, Sus Bases

Las definiciones y principios básicos para comprender la operación de este medidor de deformaciones se presentan a continuación traducidas desde [Iten2011].

La Luz: La física moderna describe a la luz ya sea como ondas electromagnéticas o partículas llamadas fotones. La luz viaja en el espacio libre a aproximadamente $3 \times 10^8 [m/s]$. La dirección de la onda de luz puede ser modificada ya sea mediante reflexión, refracción, dispersión, etc., sobre superficies o medios conductores de la luz.

El Espectro Electromagnético: Las propiedades de la radiación (fotones u ondas viajando a la velocidad de la luz) pueden ser medidas en frecuencia o longitud de onda o a través de la energía de sus fotones. El espectro electromagnético es la representación gráfica de las frecuencias, longitud de onda y energía, la luz que observa el ojo humano, llamada luz visible es una porción muy pequeña del espectro electromagnético, ver Figura 2.7

Fibra Óptica : La fibra óptica “guía” la señal luminosa a través del tendido del núcleo usualmente de sílice fundido y es canalizada en el centro dada la diferencia de índices de refracción con las capas protectoras que la rodean. Una fibra óptica es un núcleo de vidrio, rodeado por capas de material de índice de refracción muy distinto al núcleo. Un corte de la fibra a sumergir o embeber en concreto se muestra en Figura 2.8. La canalización de

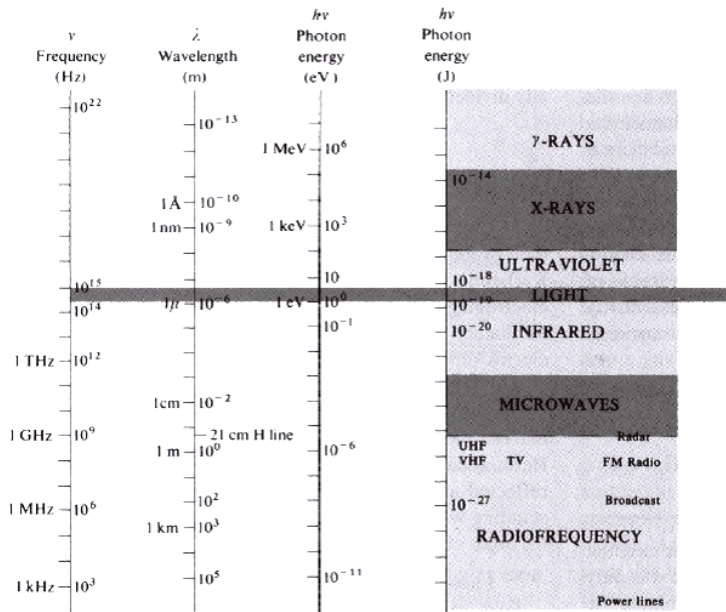


Figura 2.7: El Espectro Electromagnético.

la luz en su interior es más eficiente en la medida que el material del núcleo posea un índice de refracción bastante más alto que la chaqueta protectora. De esta manera la luz es reflejada hacia el núcleo. El mercado ofrece núcleos plásticos para obtener mayores elongaciones y/o menores radios de curvatura.

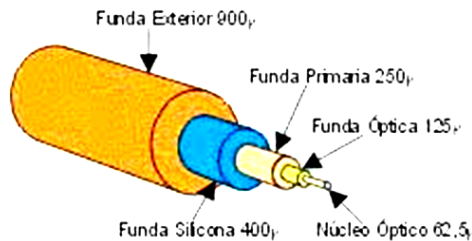


Figura 2.8: Estructura típica de la Fibra Óptica.

Atenuación de Fibra: Efecto de pérdida de intensidad de la señal luminosa a lo largo de la fibra. Esta pérdida se debe mayoritariamente al Raleigh "Scattering" en la fibra. Esta pérdida es proporcional al inverso de la cuarta potencia de la longitud de onda. A mayores longitudes, menores pérdidas. Otras causas de pérdidas en la fibra son absorción, reflexión, difusión, radio de curvatura, pérdidas en las uniones o fusiones o conectores. Una atenuación típica de una fibra mono-modo es de 0.1 [dB/km].

2.3. Principios Físicos de Operación del Sistema BOTDR

El Reflectrómetro Óptico Brillouin es un “lector” en el eje tiempo de un “eco” retro-dispersado que se genera en una fibra óptica, ver Figura 2.9. Si la estructura física de la fibra es homogénea, la frecuencia de este eco es constante, en cambio, esta respuesta es diferente si la fibra está deformada [Fujihashi2003].

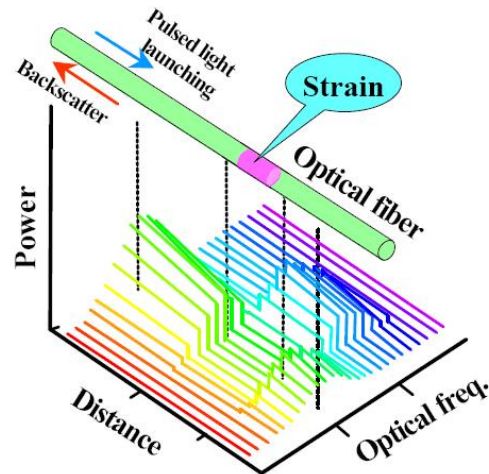


Figura 2.9: Deformación de la Fibra Óptica.

El corrimiento del rango acústico de la retrodispersión es directamente proporcional a la magnitud de la deformación en un punto dado de la fibra. Por lo tanto, el BOTDR mide la posición de la deformación y su magnitud, Figura 2.10.

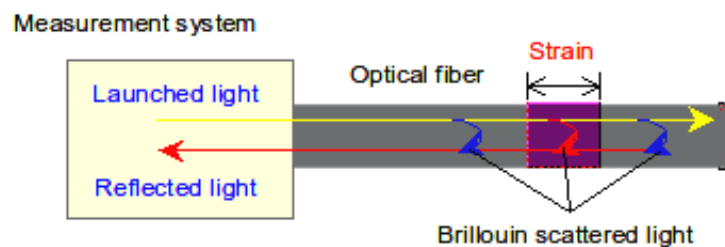


Figura 2.10: Efecto Retrodispersión Brioullin.

La magnitud y posición de la deformación en un punto de la fibra es determinada por el tiempo de respuesta y por la magnitud del corrimiento de la frecuencia. Se pueden recibir entonces, múltiples ecos con distintos corrimientos en frecuencia si la fibra es deformada en distintos puntos, ver Figura 2.11.

El dispositivo emisor-medidor estimula la fibra con N pulsos por segundo de luz monocromática (1550 [nm]), recibe la luz retro-dispersada reflejada en los distintos puntos de deformación de la fibra, realiza análisis del espectro de vuelta al equipo para determinar los tiempos (puntos) y magnitud de las deformaciones inducidas sobre la fibra.

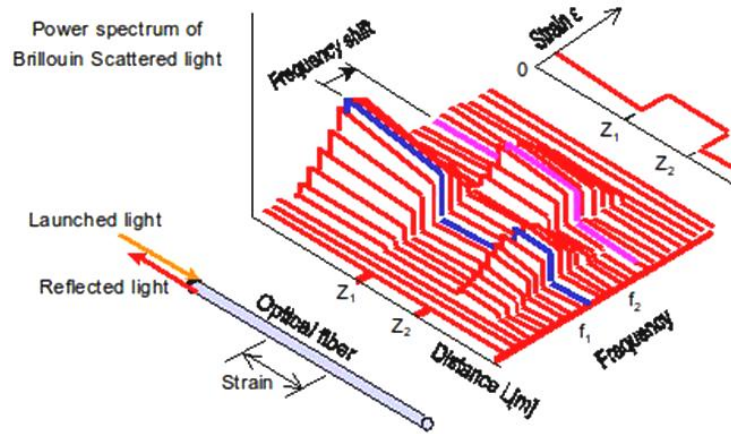


Figura 2.11: Espectro de frecuencia-distancia de la luz retrodispersada.

Métodos de Medición Continua

Se usa la fibra de transporte como sensor. Se mide mediante tiempo de retorno, la respuesta o eco Brillouin para determinar la posición y magnitud de la deformación.

Métodos Discretos

Se debe conocer el punto de medición con antelación. En ese punto se “dibuja” un sensor en la misma fibra y se determina el cambio de características de la respuesta lumínica en ese punto.

La sensibilidad, rangos, y carácter distribuido de las mediciones de deformaciones mediante BOTDR, permiten análisis de tendencias y localización de grietas con mucha precisión y antelación. El sistema de mediciones, mediante el uso del efecto Brillouin en una fibra óptica puede medir en línea las deformaciones de los sectores geológicamente críticos de estos túneles bajo presión de agua.

La figura 2.12 describe el corrimiento en frecuencia de la respuesta de un sector de fibra con deformaciones.

La Figura 2.13 representa un modelo de analizador que fue transformado por [NTT Infranet, Anexo 5], en cuanto a su resistencia y habilidad para operar con mucho polvo conductor en el ambiente minero, incorporando bandejas de filtros, y doble fuente de poder para resistir los más de 4.000 mts de altura de algunas faenas mineras.

NTT Infranet encargó a HITACHI la fabricación de una fibra óptica especial cuyo recubrimiento permite la adhesión a concreto. Con esta fibra se ha logrado medir bajo shotcrete, adherida a estructuras de acero, tubos plásticos, sobrepernos de reforzamiento, etc. Ver ejemplos en Figura 2.14 tomados de [Fujihashi2003].

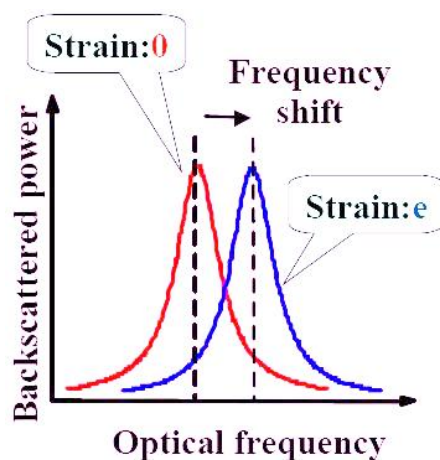


Figura 2.12: Cambios de frecuencia en luz restrodispersada.



Figura 2.13: Equipo Analizador BOTDR, NTT Advantest.

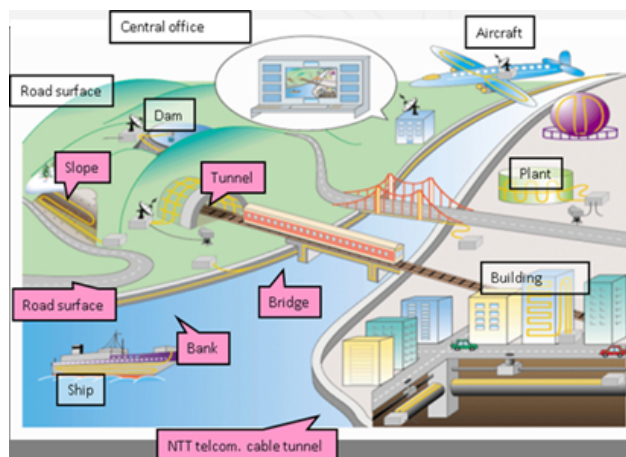


Figura 2.14: Aplicaciones del Sistema BOTDR.

2.3.1. Resolución Espacial

Las dificultades para mejorar la resolución espacial, la localización del segmento a medir, bajo el método BOTDR y discutidas por [Iten2011], se han abordado por medios físicos afinando la estimación mediante estimulación de láseres desde ambos extremos de la fibra, y de esta manera reforzar las emisiones de ondas acústicas desde el sector

Tabla 2.1: Comparación de las tecnologías de sensores de Strain Distribuidos

	BOTDR	BOTDA	BEDS
Presición de la Medición	20 -40 [$\mu\varepsilon$]	2 - 10 [$\mu\varepsilon$]	10-20 [$\mu\varepsilon$]
Resolución Espacial	1 [m]	1 [m]	0.05 [m]
Distancia Máxima	30 [Km]	30 [Km]	more than 5 [Km]
Disponibilidad	Comercial	Comercial	prototipo Lab.
Comentario	1 fibra	Requiere Loop	Requiere Loop

bajo análisis. Una descripción sucinta se encuentra en [Puzrin2010] y se resumen en la Tabla 2.1.

Las unidades de deformación se expresan en micro-strain, [$\mu\varepsilon$], que se define como:

$$\frac{\Delta L}{L_0} \% \quad (2.1)$$

Un análisis más refinado espacialmente en cuanto a sensibilidad del segmento de fibra que está produciendo el corrimiento de frecuencia de ondas reflejadas lo entrega el método *Brillouin Optical Time Domain Analysis*, en adelante **BOTDA**. El segmento de fibra bajo tensión es estimulado con dos estímulos en contracorriente. Estos pulsos de luz son de diferentes frecuencias (*pump and probe*) y estimulan una respuesta Brillouin más localizada. Para estimar la influencia de la temperatura sobre el corrimiento de frecuencias en el tramo bajo análisis, una segunda fibra, sin tensiones, debe tenderse en paralelo a la trayectoria de la fibra sensora de esfuerzos. La resolución espacial es aproximadamente igual al método BOTDR.

Experimentos reportados también por [Puzrin2010] dan cuenta de otro método físico para mejorar la resolución espacial a 5 cm. Usando pulsos de luz extremadamente cortos se obtienen mediciones denominadas *Brillouin Echo Distributed Sensing*, **BEDS**. Se obtiene una “ganancia negativa” creada por una pequeña diferencia de fase del pulso de bombeo o “*pump*” que interfiere negativamente con la luz reflejada.

2.3.2. FBG, Fiber Bragg Grating

Este método es también una medición de deformaciones sobre un pequeño segmento de una fibra óptica, basado en efectos ópticos generados en ese segmento de fibra. En ese punto de la fibra se “dibuja” un pattern físico asociable a una longitud de onda específica. Un pulso de luz emitido a través de la fibra retro-dispersará una frecuencia específica al pattern dibujado en el punto. El espectro de potencia de la luz retro-dispersada por efecto Bragg es una función de la deformación que sufra el segmento de fibra en la cual se ha “tallado” una rejilla o grating. La luz retro-dispersada cambia

su longitud de onda de manera proporcional a la deformación. Es un método muy usado actualmente dada la facilidad para transformar muchas mediciones a pequeñas deformaciones, i.e.: inclinómetros, sensores de nivel, presostatos, temperatura, tensión, etc.

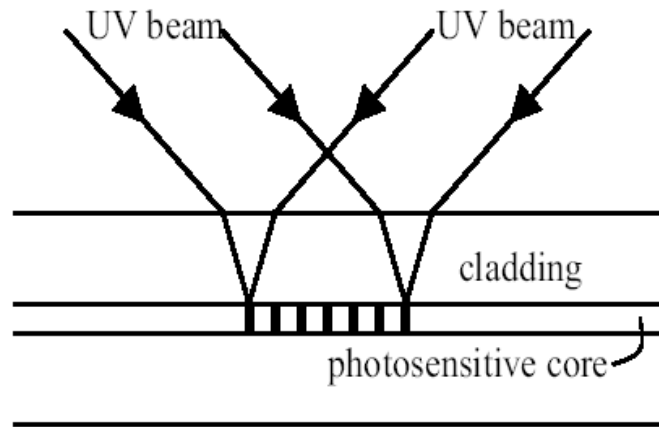


Figura 2.15: Generación del pattern o rejilla en la fibra.

En este método, partes procesadas de la fibra (rejillas) actúan como sensores. Las rejillas o grating se forman mediante radiación con luz UV. Las rejillas tienen una longitud de 1 [cm] . Estas actúan como filtros, reflejando sólo un λ de espectro de longitud de onda (longitud de onda de Bragg). Al igual que en el caso de BOTDR, la tensión y la temperatura afectan el índice de refracción. En este caso provocando una variación en la longitud de onda de Bragg, ver Figura 2.16.

El uso de FBG permite una resolución espacial absoluta ya que es el usuario que define la posición del sensor en la fibra y permite una resolución de deformación cercana a los $10\text{ [}\mu\text{m]}$. La necesidad de conocer, con antelación al montaje de una medición, la posición de una posible deformación es que impide el uso de la tecnología basada en FBG en los primeros intentos por adaptar y transferir la tecnología basada en BOTDR.

La resolución de 1 metro en cuanto a la localización de un evento usando BOTDR es al parecer de algunos usuarios Geomecánicos (División Chuquicamata, Comunicación Interna) insuficiente, ya que se pueden producir eventos contrapuestos en un metro de túnel o estructura minera. Podemos encontrar una grieta que expande o tensiona la fibra y luego una zona de compresión.

En conjunto con investigadores del Centro de Modelamiento Matemático de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, en adelante el CMM, se estudia y resuelve el problema de resolución espacial dado por el análisis básico de estimación de corrimiento de frecuencia realizado por el equipo BOTDR usado en estos proyectos.

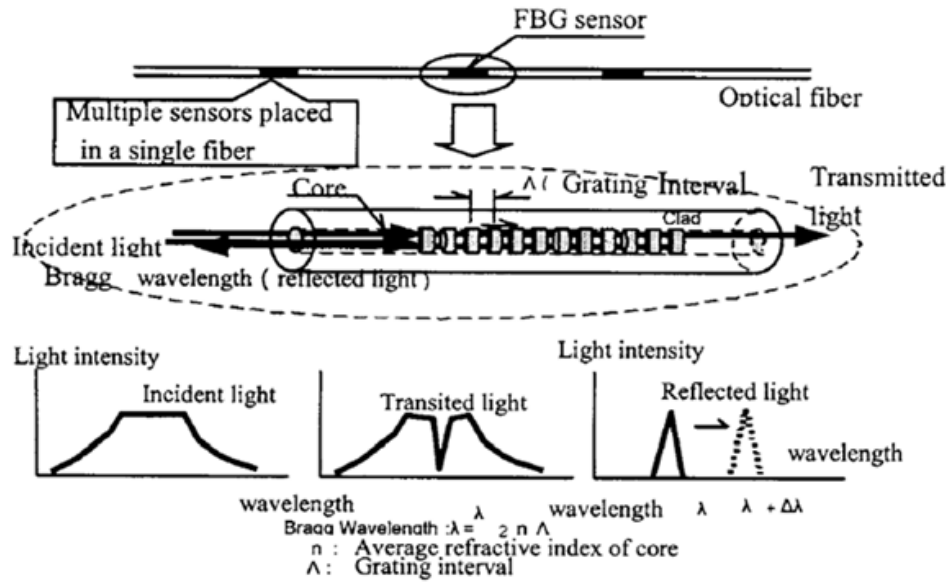


Figura 2.16: Efectos ópticos en Red de Bragg.

2.4. Desarrollos CMM-MICOMO, La Necesidad

El sistema BOTDR no mide directamente la deformación, sino que ésta es extraída indirectamente del espectro de Brillouin asociado a cada punto de la fibra. El espectro contiene información sobre la distribución de frecuencias de los fotones reflejados de acuerdo a la dispersión de Brillouin [Zang2008].

La distribución posee la forma de una curva lorentziana, cuya frecuencia central depende linealmente de la deformación. En consecuencia, si se conoce con precisión dicha frecuencia en cada punto de la fibra, posteriormente se puede estimar el perfil de deformación mediante la relación lineal entre ambas. Entonces, de acuerdo a la teoría, para un punto fijo en la fibra, su espectro como función de la frecuencia producida por la interacción fotón - fonón acústico tiene una forma lorentziana, es decir:

$$g(\nu, \nu_B) = g_0 \frac{(FWHM/2)^2}{(\nu - \nu_B) + (FWHM/2)^2} \quad (2.2)$$

donde **FWHM** es el “full width at half maximum” de la lorentziana (el cual da cuenta de su anchura), ν_B es la frecuencia central o frecuencia de Brillouin, y g_0 es una constante que denota la altura máxima de la lorentziana. El fenómeno físico que permite medir deformación a partir del espectro es que la frecuencia central ν_B depende linealmente de la deformación aplicada ε , mediante la ecuación:

$$\nu_B = \nu_0(1 + C\varepsilon) \quad (2.3)$$

donde C es una constante de proporcionalidad y ν_0 es la frecuencia central asociada a la fibra sin deformación (ambos dependen del tipo de fibra).

En la práctica, debido a las limitaciones intrínsecas de la tecnología BOTDR, la curva del espectro asociada a un punto de la fibra es producida por una mezcla (convolución) de curvas lorentzianas asociadas a los puntos en un tramo de fibra en torno al tramo de largo fijo L , la resolución espacial. Por este motivo, si hay distintas deformaciones dentro del tramo de largo L , el espectro medido no tendrá forma lorentziana. Esto invalida de forma sistemática el procedimiento de obtención de strain del software del equipo AdvantestN8510 provisto por NTT, Anexo 1, el que se basa, justamente, en la estimación de la frecuencia central ajustando curvas lorentzianas, y es por ese motivo que la estimación de strain realizada por dicho software es de baja calidad y con presencia de *outliers*.

De acuerdo a la teoría descrita para un punto fijo en la fibra, el espectro retro-dispersado tiene una forma lorentziana en función de la frecuencia, en cuya frecuencia central (de Brillouin) se localiza el máximo local de la lorentziana.

Sin embargo, lo descrito anteriormente corresponde al caso simple en que la deformación es constante a lo largo de un sector de la fibra. En general, el proceso de la generación del dato, la conducta de estructuras reales mineras y su interpretación son mucho más complejos.

El CMM a solicitud de MICOMO implementó un algoritmo de de-convolución denominado re-estimación de strain o deformación mediante minimización, que constituye una herramienta de pre-procesamiento útil para aminorar significativamente las tres principales falencias inherentes al proceso de medición del BOTDR, tales como los *outliers*, incapacidad de detectar deformaciones en tramos cortos, y el ruido de medición, ver [Cortez2013]; se implementa un método que de manera automática encuentra el mejor acuerdo entre un perfil de formaciones a lo largo de la fibra que el espectro Brillouin genera. Se reportan experimentos que acercan a 15cm la resolución espacial para deformaciones fuertes, en conjunto con una señal más limpia de ruido.

La presencia de puntos de datos de mediciones de deformaciones fuera de la conducta del grupo de datos llamados *outliers*, se torna muy relevante en pequeños sectores bajo medición en minería ya que tienen significados físicos reales y potencialmente peligrosos (grieta, planchón).

La publicación [Soto2013] en proceso de publicación, en Elsevier, a la fecha de entrega de tesis, propone un método para la incorporación de estos puntos, y al mismo tiempo disminuir el ruido mediante filtros de convolución y “suavizado” exponencial. Se reportan disminuciones de 40 [dB] en la relación S/N de señal de deformación. El comportamiento en conjunto del arreglo de puntos de medición distribuidos en la fibra, utilizando el espectro de Fourier del perfil de deformación. Esto crea una representación

del espectrograma tiempo frecuencia espacial (ETFE). Esta representación otorga información sobre los cambios en la forma de onda del perfil de deformaciones a través del tiempo. En otras palabras, detecta las zonas de la fibra que registran variaciones temporales de strain.

El CMM también generó procedimientos de análisis en series de tiempo, tales como la identificación de un modelo auto-regresivo (AR) y el filtraje de partículas (FP), para observar el comportamiento de un sensor o en una pequeña vecindad de sensores. Este último método fue diseñado por el CMM para identificar dos tipos de características intrínsecas en la evolución temporal de la serie de deformación en un punto de medición específico en la fibra: los cambios de pendiente deformación - tiempo y de magnitud. Cabe destacar que el filtro de partículas posee ciertas ventajas comparativas frente a los filtros de convolución clásicos ya que entrega una estimación de la velocidad de la serie robusta al ruido; y además genera información estadística valiosa adicional al simple promedio, como intervalos de confianza y probabilidades de eventos de interés.

2.5. La Estabilidad y Futuros Usos de BOTDR

Dada la precisión espacial lograda mediante el uso de estas herramientas de post procesamiento y la inevitable presencia de grandes máquinas y personas en las faenas mineras sumado a las tronaduras, colapsos, derrumbes, explosiones de rocas se va a cortar inevitablemente ya sea la fibra sensora o las fibras de enlace o comunicaciones con el segmento de fibra sensora. Es por lo tanto clave para la operación de un sistema en minería, la redundancia de vías de acceso al segmento a medir para aumentar la disponibilidad de la medición mediante fibra sensora.

Este requerimiento operacional, de redundancia de vías físicas de estímulo luminoso y su respuesta Brillouin, deja a firme la decisión al día de hoy, de continuar usando el método BOTDR en minería. Tanto el BOTDA como el BEDS usan ambos extremos de un lazo de medición para realizar una medición. Si hay un corte de fibra, ambos sistemas quedan fuera de operación, en tanto con el método BOTDR, se puede seguir midiendo todo el sector bajo análisis. Sólo se pierde la redundancia espacial.

A través de la re-estimación diseñada por el CMM y MICOMO se acerca a los 30 cm de resolución espacial y mediante los algoritmos de auto-correlación, podemos mejorar la sensibilidad unos 20 dB. El método de re-estimación diseñado por el CMM ya está implementado en la plataforma SidMil® y se programan para el 2014 los trabajos de “reconstrucción” de esta plataforma para incorporar los algoritmos de convolución. Por lo tanto la empresa MICOMO cuenta con una tecnología mejorada, apropiada y única a nivel global.

2.6. Descripción de Sistemas de Medición de Deformaciones

La operación de los sensores basados en perturbaciones físicas sobre una fibra óptica se basa en la tracción o compresión o cambios de temperatura de la fibra adherida a una estructura dada. Para esto el segmento sensor de FO debe estar conectado a un analizador BOTDR, aparato que permite determinar la posición y magnitud de la deformación de la fibra.

El BOTDR usado por MICOMO es un prototipo fabricado por la empresa de telecomunicaciones NTT a través de su filial NTT INFRANET y la empresa ADVANTEST. El equipo analizador estimula la fibra óptica mediante un tren de pulsos de laser 1550 nm, detecta y extrae las reflexiones acústicas mediante un receptor súper-heterodino que produce un mapa frecuencia- potencia del sector de estructura de FO bajo análisis. El máximo de corrimiento es determinado por un simple algoritmo que lleva a cabo el procesador (PC - XP).

La gran cantidad de mediciones realizadas cada 10 [cm] de fibra óptica y las grandes cantidades de metros lineales de fibra que se utiliza y por un mejor manejo de datos es que se crean distintos circuitos cerrados o lazos, que empiezan y terminan en el BOTDR, llamados sensores. MICOMO ha adoptado la nomenclatura ISA para denominar los elementos de fibra que actúan como medidores de deformaciones.

Para poder cambiar el canal de medición del BOTDR a los diferentes circuitos de medición se utiliza un conmutador o "Switch óptico" que canaliza las señales de estímulo y respuesta del analizador BOTDR a distintos lazos y sectores que están conectados. El ruido que pueda tener el sensor depende de la calidad del fusionado, limpieza de conectores, distancia y perturbaciones en que toda la extensión de lazo de fibras, pero en general la medida debe tener un mínimo detectable $\pm 0,01\%$ de deformación. Las especificaciones del sistema usado Analizador AdvantestN8510, el conmutador óptico Fujikura, las distintas fibras ópticas como medio sensor empleados en las lecturas de deformaciones se presentan en Anexos 1 al 5. La arquitectura del sistema se puede diferenciar en tres capas, desde los sensores instalados en terreno, el sistema de medición y el sistema de despliegue de información, según Figura 2.17.

Cada lazo o sector es medido de manera redundante. Se estimula un extremo del lazo, se mide durante un período de tiempo adecuado (minutos) y se mide desde el otro extremo (ida y vuelta).

Se programan las potencias a inyectar, mediante el largo del pulso de estímulo, por sector dependiendo de la distancia al analizador y las pérdidas acumuladas en el trayecto por fibra, fusiones, conectores y conmutador óptico. El analizador es conectado

Información en línea

- Visualización de información en línea
- Acceso remoto a información vía VPN: oficina, casa, etc.
- Análisis de la información

Mediciones

- Perfiles de deformación
- Evolución temporal de deformaciones
- Mapas 2D (información de distancia, tiempo y deformación)
- Detección temprana de tendencias en deformación
- Mediciones continuas (sub-milimétricas) y discretas (milimétricas)

Ventajas de sensores

- Mediciones simultáneas en distintos sectores
- Varias mediciones al día de un mismo sector
- Redundancia en mediciones
- No requieren alimentación eléctrica
- Instalación robusta y distribuida
- Buen comportamiento en ambientes adversos

Arquitectura del sistema

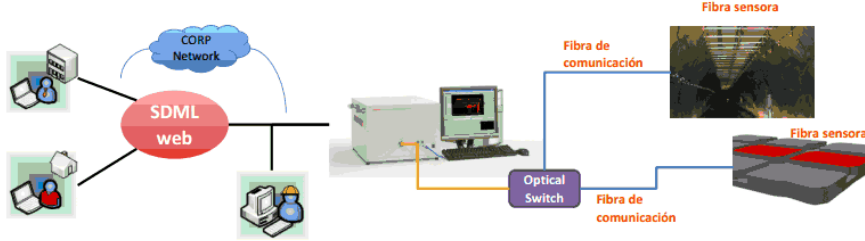


Figura 2.17: Arquitectura general de monitoreo BOTDR.

al conmutador óptico Fujikura de dos vías a 1×32 de manera de alternar secuencialmente la medición en distintos circuitos utilizando el mismo analizador.

La descripción detallada de las componentes del sistema integrado y desarrollado se encuentra en las Anexos 1 al 5.

Capítulo 3

Implementaciones y Proyectos Realizados

3.1. Proyecto Piloto Industrial - BOTDR El Teniente

En una serie de visitas técnicas de personal de los laboratorios de NTT a Chile y de CODELCO y del autor a Japón, se define la realización de un experimento a nivel industrial en un túnel de ventilación de la División el Teniente. La experiencia de este pilotaje realizado en los años 2004-2005 en conjunto entre NTT Laboratories, IM2, y la Gerencia de Innovación Tecnológica de Codelco Chile, [Pardo2006], demuestra la viabilidad de la aplicación de medición mediante BOTDR de deformaciones de un túnel minero influenciado por el avance del colapso gravitacional o caving. En este trabajo, la fibra sensora se ancla a la roca mediante pernos en las paredes (caja) y techo de un túnel de ventilación. Se definen, por lo tanto, 400 sensores o sectores de medición.



Figura 3.1: Sistema BOTDR para Medición de deformaciones en El Teniente.

3.1.1. Sensor de Fibra Óptica

El sensor de deformaciones es en este caso una fibra óptica de cuatro filamentos, ver Anexo 3, y un cable de acero central, anclada mediante dispositivos especiales, IC-Locks, a pernos de anclaje, Anexo 5, a la roca distribuidos regularmente cada 2 metros. Una vez presentados y enlazados a través de los anclajes IC-Lock, la fibra se tensa de manera homogénea en todo el tendido de tal manera que puede medir compresiones y/o tensiones de un tramo dado. Los esfuerzos esperados, el anclaje a la roca implementado y su montaje se describen en las Figuras 3.2, 3.3 y 3.4.

Se logra medir de manera continuada durante 8 meses en los 400 segmentos de 2 metros cada uno, 200 metros en pared y 200 metros en techo del túnel. El análisis y representación de los resultados se realizó desde Tokio.

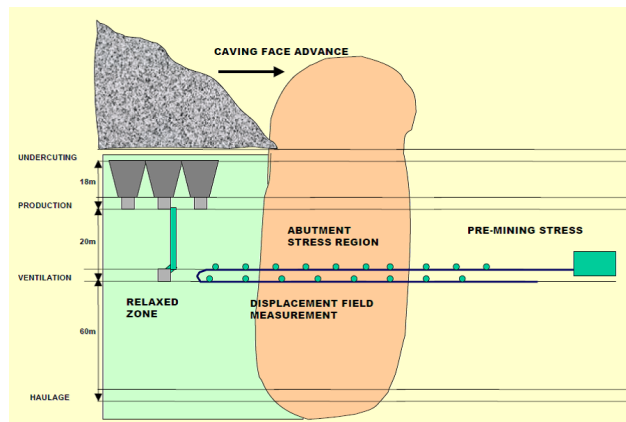


Figura 3.2: Tensiones esperadas en Túnel de Ventilación BOTDR Piloto [Araned2003].

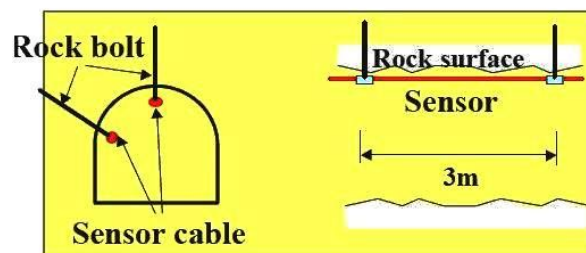


Figura 3.3: Montaje de Fibra óptica.



Figura 3.4: Instalación de pernos, anclajes y fibra óptica sensora en túnel.

Se representa la deformación en milímetros de cada tramo de 2 metros. El seguimiento temporal de cada segmento se realiza en Santiago. Se logra medir la generación de grietas con comportamiento consistente, tracción- compresión de los segmentos vecinos.

3.2. Caso Innova CORFO - División El Teniente

La segunda fase de este extenso pilotaje industrial, realizado en minas de la División El Teniente, entre los años 2007 y 2010 extiende las aplicaciones a otras estructuras mineras como pilares de block caving [Sotomayor2012], pernos de anclaje y en estructuras de refuerzo de conducta conocida como vigas o *rods*. El subsidio otorgado por CORFO-INNOVA para llevar a cabo el proyecto “Sistema Operacional Geomecánico”, código INNOVA 206-5038, estimó un presupuesto total del proyecto que bordeó los tres millones de dólares.

En este presupuesto global se suman los aportes de Horas Persona y uso de infraestructura valorizada desde CODELCO y NTT. El sistema de monitoreo se subdivide en distintas aplicaciones ubicadas en distintos niveles y áreas de la mina El Teniente. Se tienden alrededor de 10 [km] de fibra de comunicaciones y 2.000 metros de fibra sensora en las seis aplicaciones implementadas.

3.2.1. Arquitectura Sistema de Medición

Dado la cantidad de lazos de mediciones, cantidad de aplicaciones, distribución geográfica de ellas, tiempo de medición y traspaso de datos por aplicación es que se requiere implementar un complejo sistema centralizado en una sala especial de instrumentación geomecánica ubicada en el Nivel Sub 5 de la Mina El Teniente. A continuación se presentan en las Tablas 3.1 y 3.2 y en la Figura 3.5 la descripción del sistema instalado.

Tabla 3.1: Asignación Tiempos de medición por Aplicación.

Sitios	Aplicación	Fibra Sensora [m]	Distancia aprox. a sala monitoreo [m]	Frecuencia de medición propuesta
1	Pipa (Ten 3 Level)	1000	3000	1 vez por semana
2	Cámara de Chancado Ch-3	710	2000	Cada 4 Hrs.
	Pilar y Marco en punto de extracción	560	2100	Cada 2 Hrs.
3	Ore Pass	990	1100	Cada 1 Hrs.
	Fallas principales de Reservas Norte Grande	500	950	Cada 4 Hrs.
	Pilar y Marco en punto de extracción (wall)	560	700	Cada 2 Hrs.
	Desplazamientos de pernos de fortificación	360	850	Cada 1 Hrs.
4	Falla principal Mina Esmeralda	280	1800	Cada 4 Hrs.
	Monitoreo desplazamiento en perímetro de excavación	330	2000	Cada 2 Hrs.
TOTAL		5290	14500	

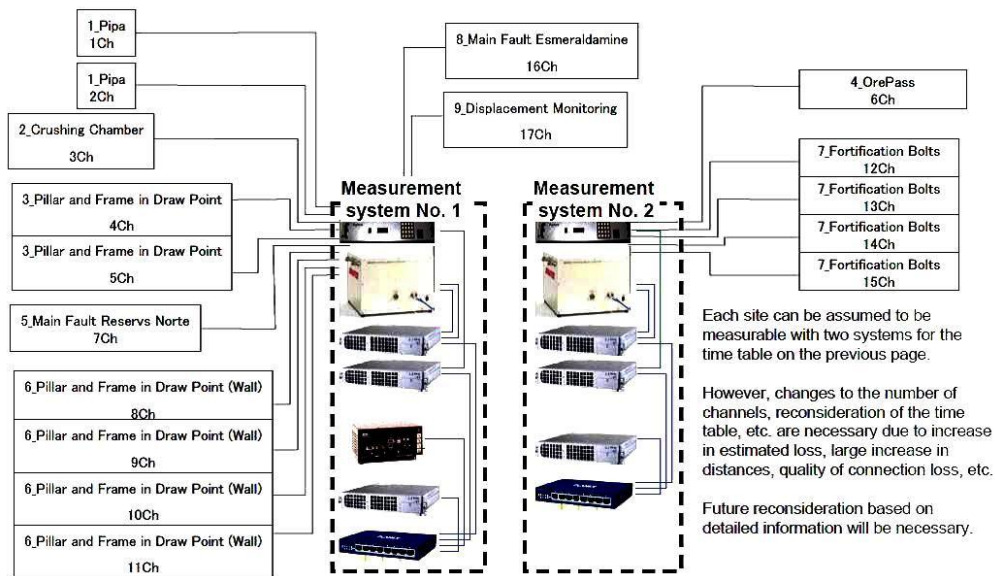


Figura 3.5: Esquema del sistema BOTDR implementado en División El Teniente.

Se requirieron de dos sistemas de monitoreo que operaron en paralelo en la Sala Microsismico de DET. La sala de monitoreo y comunicaciones se equipa con una instalación de aire acondicionado para extraer el calor generado por cada sistema aproximadamente 2 [kW] y de UPS para cada sistema dada la pobre calidad de red 220 VAC de la referida sala, ver Figura 3.7.

Tabla 3.2: Longitud lazos de medición y distancia a sala de equipos.

Frecuencia Medición	Ubicación Medición	Largo Fibra Comunicación [m]	Largo Fibra Sensora [m]	Largo Total Fibra [m]	Pérdidas Totales [dB]	
1 vez por semana	1_Pipa	1ch	1000	1645	2645	1.37
		2ch	1000	1645	2645	1.37
4h	2_Cámara de Chancado	3ch	710	480	1190	0.86
2h	3_Pilar y Marco en punto de extracción	4ch	560	575	1135	1.54
		5ch	560	575	1135	1.54
		6ch	990	640	1630	1.21
4h	5_Falla principal Reservas Norte Grande	7ch	500	190	690	0.65
2h	6_Pilar y Marco en punto de extracción (wall)	8ch	560	890	1450	1.88
		9ch	560	890	1450	1.88
		10ch	560	890	1450	1.88
		11ch	560	890	1450	1.88
		12ch	360	156	516	1.27
1h	7_Pernos de Fortificación	13ch	360	156	516	1.27
		14ch	360	156	516	1.27
		15ch	360	156	516	1.27
		16ch	280	430	710	0.65
4h	8_Falla principal Mina Esmeralda	17ch	330	440	770	0.95

Ver descripción de las distancias y localización de cada aplicación en la Figura 3.6.

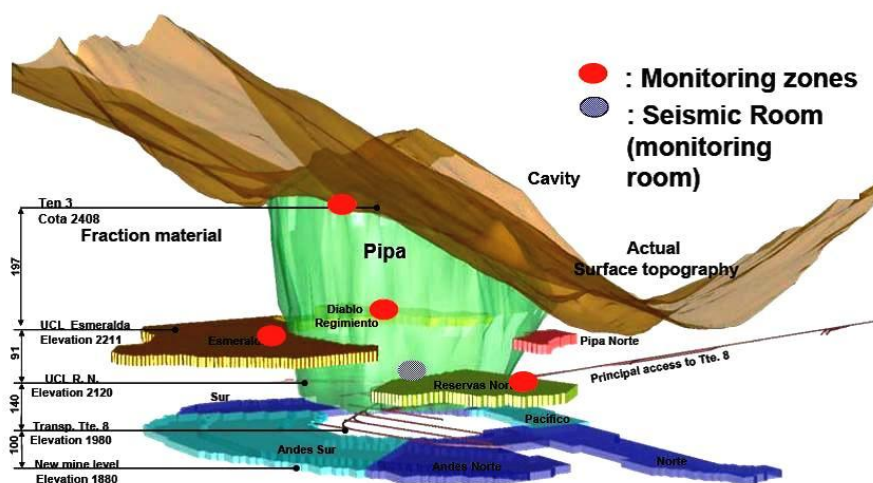


Figura 3.6: Localización espacial de las aplicaciones BOTDR en la Mina El Teniente.



Figura 3.7: Sala Monitoreo BOTDR-Microsísmico DET.

3.2.2. Aplicación Medición en Falla 1

Esta falla recorre verticalmente todo el yacimiento y se expresa como una franja de entre 1 y 2 metros en la cual se observa una evidente intensificación de grietas, distinta granulometría y color. Esta falla opera como “lubricante” para los masivos desplazamientos tectónicos y locales. Los desplazamientos medidos muestran valores esperables, según mecanismo de movimiento de bloques acorde a modelo geomecánico realizado para el entorno de dicha falla.

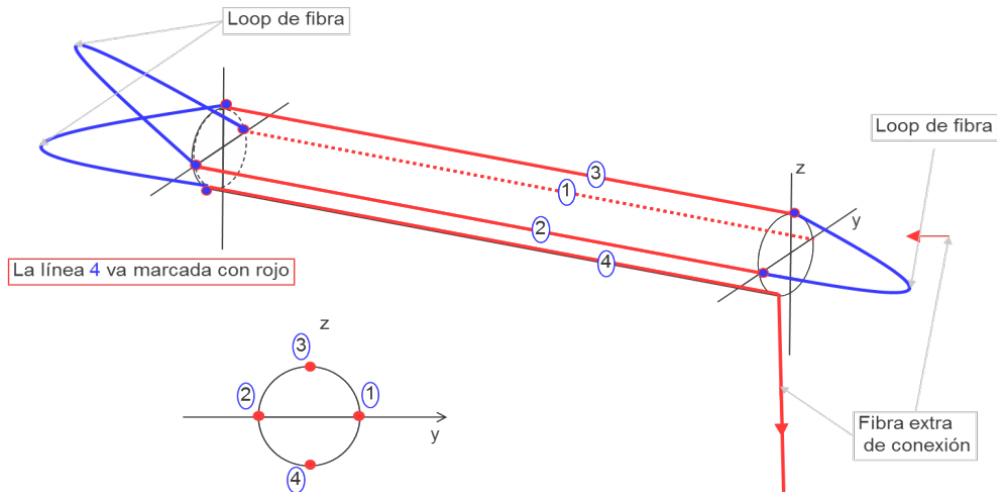


Figura 3.8: Sensor de deformaciones bidireccional “Long Body”.

Este sensor nombrado como “Long Body” Sensor, *LBS*, al ser anclado en sus extremos va a responder deformando las fibras adheridas en su interior, entregando información de deformaciones en los planos x , y y z .

Mediante esta configuración de sensores, mostrados en las Figuras 3.8 y 3.9, se logró medir deformaciones y desplazamientos activados por la falla N1 en los ejes x , y y z , ver detalle en Figura 3.11.

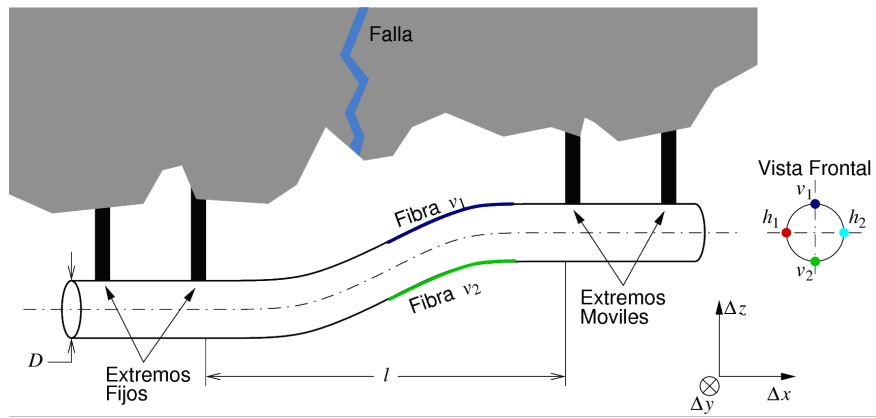


Figura 3.9: Anclaje LBS a la roca.

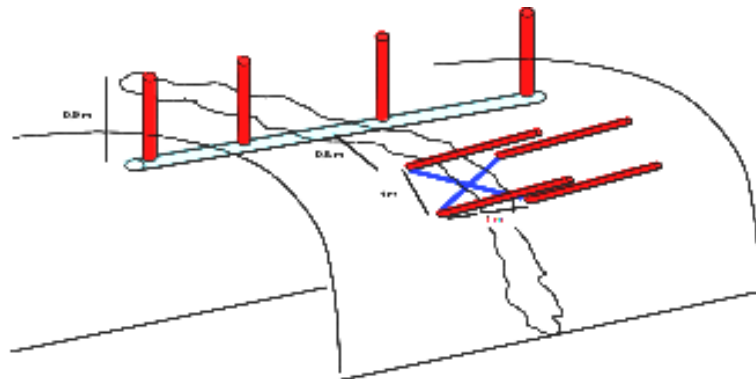


Figura 3.10: Sensores LBS en techo e IC-Locks en pared.

3.2.3. Aplicación Cámara de Chancado, Mina Diablo Regimiento

La cámara de chancado fue instrumentada con fibra BOTDR cuando ya existían evidencias físicas del levantamiento del piso de la cámara y afloramiento de agua en la cara Norte. En el momento de montaje de los elementos sensores diseñados, la cámara ya estaba con el chancador en operación por lo que la instrumentación de fibra se instaló evitando perturbar la fortificación existente y otra instrumentación asociada a la operación del chancador y estructuras auxiliares como puentes grúa, martillos picadores, etc. El diseño final de monitoreo de la cámara se ilustra en las Figuras 3.12, 3.13 y 3.14. Este consiste en tres tiros de 12.5 [m] en el suelo de la cámara y tres tiros en la pared Norte:

- Tiros 1, 2, 6, 8 y 9: largo 12.5 [m].
- Tiro 3: 23 [m].

El tiro 3 se consideró más largo para que midiese posibles deformaciones debido a un cambio de litología en las capas de roca inferiores, que podría inducir desplazamientos.

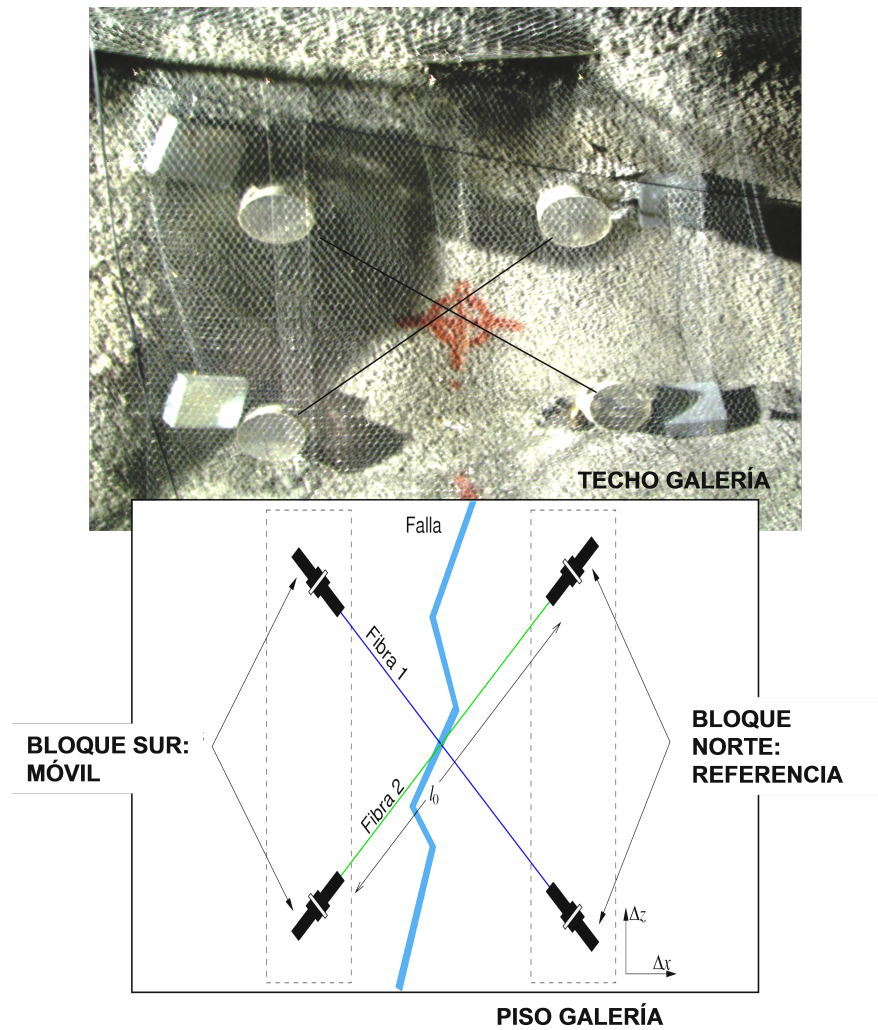


Figura 3.11: Sensor Desplazamiento de Falla mediante IC-Locks ortogonales.

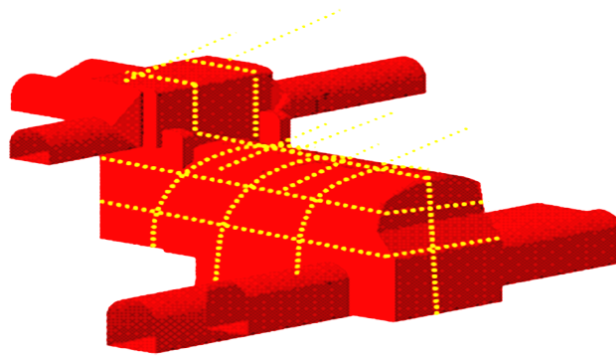


Figura 3.12: Camara Chancado Diablo Regimiento.

Se obtienen mediciones desde los pozos que caracterizan muy bien la generación de zonas de tensión a 4 metros bajo el piso de la estructura o cámara de chancado.

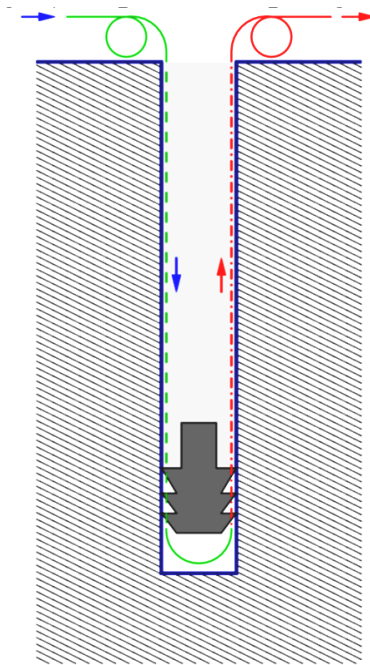


Figura 3.13: Detalle Tiro Sensor Piso.

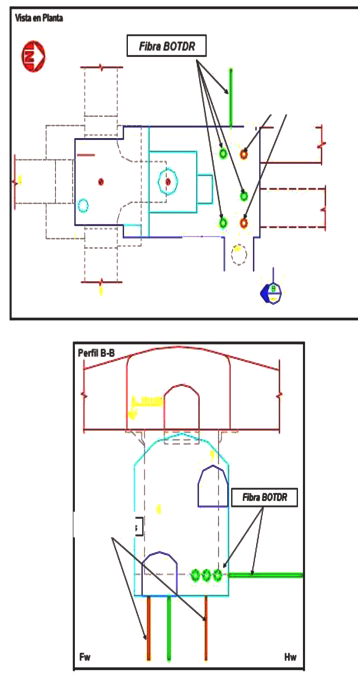


Figura 3.14: Instrumentación en piso y pared Cámara Chancado Primario.

3.2.4. Aplicación Punto de Extracción

El punto de extracción es la estructura en la cual se vacía mediante palas motorizadas de bajo perfil o LHD el mineral fracturado por gravedad en el bloque rocoso superior.

En la Figura 3.15 se observa el punto de extracción. El mineral fragmentado se

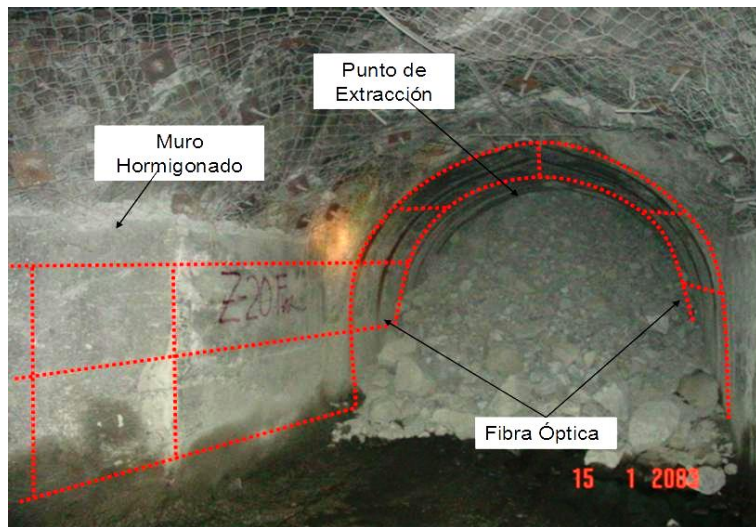


Figura 3.15: Fibra Sensora en arcos de refuerzo.

acumula a medida que es retirado por las palas de bajo perfil y depositado en “ore pass” o ductos verticales que transportan el mineral de manera gravitacional. Este es un sector fuertemente reforzado mediante arcos de acero ya que la extracción de mineral se realiza con operadores y LHD. Es un punto crítico para la producción minera y es susceptible a “colgamientos” cuando la roca saliente (mineral) adquiere estructura de arco deteniendo el flujo. Las mediciones mediante BOTDR no arrojaron grandes novedades dada la extrema seguridad de los refuerzos estructurales implementados en la construcción.

3.2.5. Aplicación Pilares Mina Esmeralda

Se instrumentan tres pilares críticos en cuanto permiten la operación minera del nivel Esmeralda que había colapsado con producción iniciada. Esto significa que la estructura representada como un arreglo de rombos (pilares), Figura 3.16 , se pierde al ceder los pilares de algún sector. El pilar se enancha y disminuye su altura haciendo imposible el tránsito de personas y equipos.

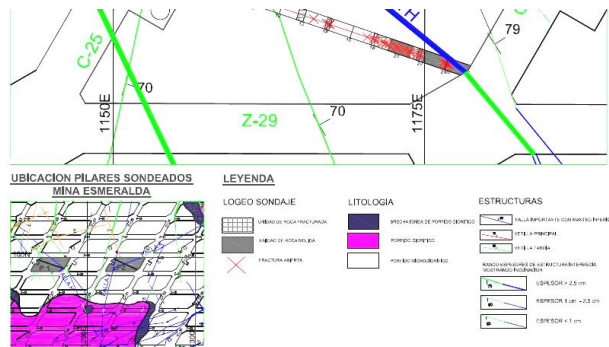


Figura 3.16: Vista General Nivel Esmeralda Zona Colapsada.

Se diseña un sistema de anclajes que permite medir el centro del pilar mediante una perforación o tiro que cruza el pilar de manera diagonal. Se mide al mismo tiempo la zona plástica exterior del pilar mediante un arreglo de anclajes que permiten una medición en una profundidad de 5 metros desde la pared del pilar. Las mediciones son usadas como respaldo de seguridad de entrada al sector y permiten discriminar la conducta elástica (centro) y plástica (paredes).

3.3. Caso Túnel de Servicios Rajo Chuquicamata

El túnel de servicios conecta una rampa del rajo de Chuquicamata, aproximadamente a 200 metros de la superficie, con la cámara de traspaso de la correa principal que eleva el mineral desde el chancador primario K1, ubicado a 400 metros de la superficie. Esta infraestructura es crítica para efectos de mantención y tiene la capacidad para la entrada de maquinaria pesada, personas y energía. Se decide instalar el sistema de monitoreo en línea durante la reconstrucción de la caverna que colapsó en Julio 2006, provocando pérdidas al estado de Chile por más de 100 millones de dólares. Se instrumentan paredes y techo con sensores embebidos en el shotcrete existente y en paralelo, segmentos con IC Locks cada 2 metros, ver Figuras 3.18 y 3.19

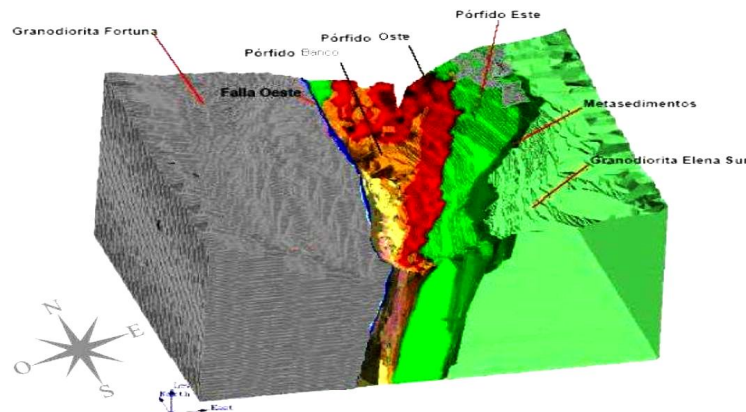


Figura 3.17: Modelo isométrico de Rajo Chuquicamata desde una vista hacia el norte.

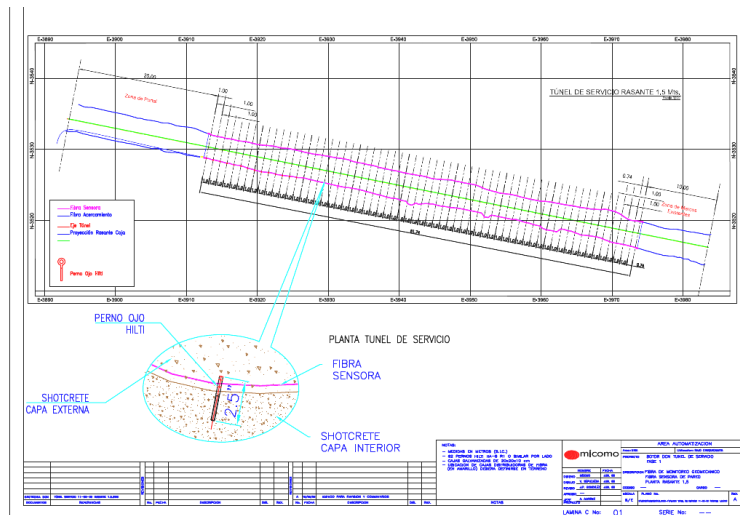


Figura 3.18: Diseño de puntos de anclaje IC Locks y detalle de la fibra en shotcrete.

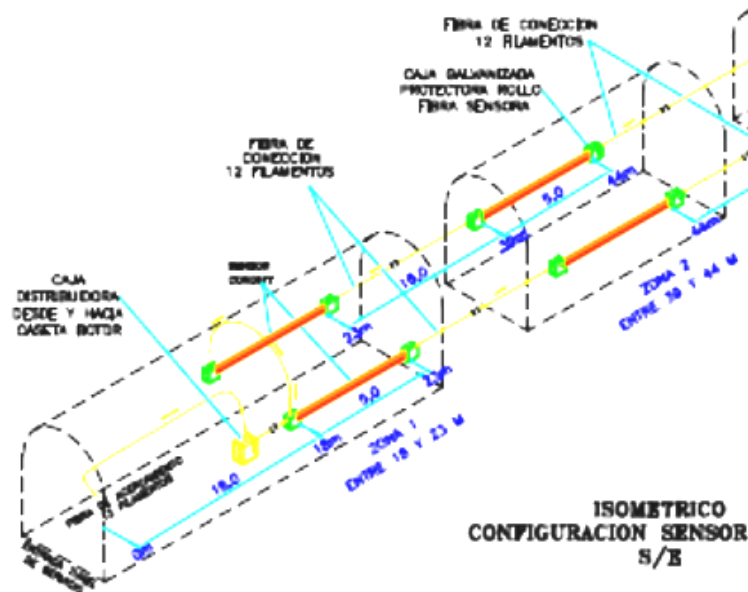


Figura 3.19: Sensores en Túnel de Servicios Rajo Chuquicamata.

Se instala el equipo de monitoreo, Analizador, Switch, PC y un enlace inalámbrico privado en la banda de 26 GHz, asegurando una velocidad a la red corporativa Codelco de 80 MBps en una caseta en la rampa de acceso al túnel y se monitorea durante un año la conducta del túnel ante la profundización del rajo. Se logra detectar, con meses de antelación, la aparición de grietas propias del colapso de los taludes que estructuran el rajo.

3.4. Caso túneles de aducción de aguas

Proyecto realizado en la división El Teniente. Se monitorean techo y paredes del Túnel de Aguas Río Blanco mediante tiros radiales instrumentados con fibra embebida, adherida a las paredes del tiro. Este túnel conduce las agua del río a través de un túnel de 11.4 [km] que a su vez alimenta una tubería de 11.6 [km] a la piscina de seguridad del Molino SAG ubicado en Colón Alto con un flujo de Diseño 1200 [lt/s]. Es imposible, por razones de seguridad, inspeccionar este túnel salvo en el período de mantención en verano. La criticidad y el valor de la producción de los Molinos SAG de DET a razón de 3000 [t/h] de mineral hacen imposible detener la operación de este túnel. Toda la instrumentación tradicional ha fallado por la humedad y agresividad del ambiente de esta operación crítica de la División El Teniente.

Se instrumentan tres tiros de 15 [m] perforados de manera ortogonal, ver Figura 3.20, en los cuales la fibra sensora se ancla a las paredes interiores de los tiros mediante inyección de lechada. Este diseño se repite en las zonas de riesgo geológico en 13 estaciones de medición.

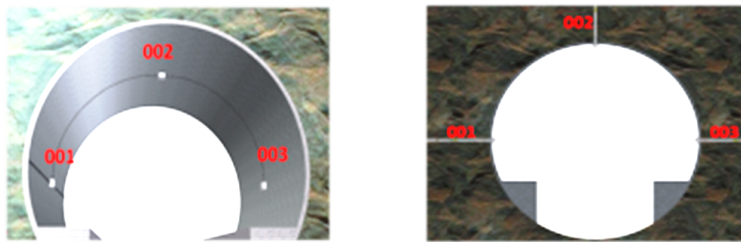


Figura 3.20: Disposición Tiros Sensores de una estación.

En operación normal, el nivel máximo de aguas no sobrepasa la mitad del diámetro del túnel. Se logra medir durante un año.

3.5. Caso Túnel a Presión

Una central de generación eléctrica de paso despacha la energía generada al Sistema Interconectado Central de Chile (SIC), mediante una línea de más de 30 kilómetros de longitud hasta una subestación eléctrica ubicada al sur poniente de San Fernando.

La central suministra 155 [MW] de energía renovable al SIC, operando como una central de punta en el invierno y como central de base en el verano. Sus aguas se originan principalmente en el derretimiento de glaciares y nieve, por lo tanto, las centrales hidroeléctricas de pasada del valle central de Chile tienen una mayor producción en los meses más secos del verano, en comparación a otras hidroeléctricas, lo que la hace competitiva frente a centrales de ciclo combinado.

El aporte energético de las centrales de pasada y sus bajos costos operacionales, así como las características del proyecto que lo sustentan, mediante obras principalmente subterráneas que ocupan terrenos no productivos, ni usa terrenos de comunidades cercanas, lo convierten en una perla energética del sistema nacional.

La urgencia y dificultad del problema para implementar un sistema de medición del estado de “salud estructural” del túnel, información que permita acciones que eviten daños a las maquinarias o colapsos mayores, llevó a las empresas operadoras a realizar una intensa búsqueda a nivel global, de soluciones para el monitoreo y diagnóstico del estado del túnel de conducción de agua.

Las características geológicas de este túnel, requieren de un constante monitoreo geomecánico, que contribuya a asegurar la integridad estructural de este túnel. Este monitoreo se debe realizar en fallas, estructuras y fortificaciones al interior del túnel, considerando que estas mediciones serán realizadas bajo agua a presiones que llegan a 10 [atm] (100 m columna de agua) y con caudales a 2 [m/s]. Las mediciones deben tener una frecuencia y precisión mínimas, tal que entreguen información que permita realizar acciones preventivas a los operadores, y de esta manera evitar suspensiones indeseadas en períodos de producción.

Las deformaciones registradas al interior del túnel y estudios geológicos, indican una expansión del material rocoso (roca de mala calidad) en la caja y corona más cercana al valle en ciertos sectores, ver Figura 3.21. El monitoreo estructural debe detectar deformaciones antes de los 10 [mm] radiales.



Figura 3.21: Detalle Colapso Shotcrete.

La expansión de material rocoso en la estructura del túnel, produce daños en las fortificaciones de shotcrete, arrastrando restos de material hasta las turbinas causando graves daños.

Desechadas las alternativas de instrumentación eléctrica o mecánica, se analizan las alternativas de uso de fibra óptica como elemento sensor de deformaciones. Existen varios métodos que usan fibra óptica para medir alteraciones mecánicas o térmicas del ambiente o estructura al cual se fija la fibra. Las características de durabilidad, inmunidad

al ruido electromagnético, a la humedad y la no generación de éste, la posibilidad de transporte a largas distancias de señales débiles se suman como ventajas al hecho que las mediciones basadas en este método demuestran también la facilidad para medir de manera distribuida, continua a lo largo de la fibra.

3.5.1. Experimentos de Ingeniería Básica

La ingeniería básica se desarrolla una vez determinada y decidida la tecnología para lograr las mediciones de deformaciones deseadas. El carácter experimental de esta instalación y diseño para un sistema de mediciones bajo el agua, la urgencia de implementar una solución a corto plazo, de Julio 2012 a Noviembre 2012, los plazos de importación de equipos y fibras obligaron al equipo técnico MICOMO a usar materiales en bodegas y que permitieran despachar con rapidez. El ítem que a la vez de constituir el elemento sensor, la fibra óptica tipo embebida Anexo 4, sería sometida a arrastres o presiones de 100 metros de agua, no contaba con especificaciones de esfuerzos axiales máximos. Hitachi, fabricantes de la fibra, no se comprometió con una cifra de presión homogénea a pesar de las insistentes comunicaciones.

Para validar el uso del tipo de fibra que se mantenía en stock, el equipo ejecutor debe realizar experimentos numéricos y físicos para constatar la operatividad de esta fibra bajo 100 metros de agua.

3.5.2. Operación bajo Presión Hidrostática

Fibra de Comunicaciones: Para la troncal o “back bone” de comunicaciones se considera una fibra tipo submarina especificada para operar hasta 1000 metros, de 24 pelos y de 11 [mm] de diámetro, la que está conformada como muestra la Figura 3.22.

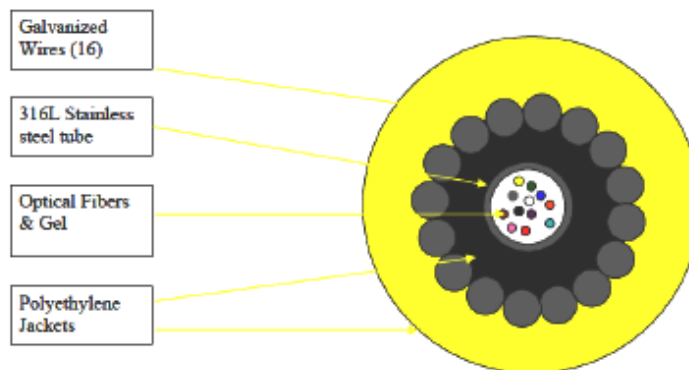


Figura 3.22: Corte de fibra submarina para la conexión de las áreas a medir.

Fibra submarina: Usada para soportar una profundidad de inmersión de 1000 m.

Fibra Sensora: Para el caso de la fibra sensora Hitachi utilizada en el túnel y en contacto con agua a presión y flujo de $2 [m/s]$, el proveedor finalmente afirma que a tensiones exteriores entre un 0, 1 y 0, 2 % máximos, la fibra sensora opera bien midiendo deformaciones bajo $100 [m]$ de columna de agua. Dada las condicionantes operacionales que implicó la respuesta de HITACHI, MICOMO realizó modelaciones numéricas con plataformas comerciales y se observa un efecto de strain causado por la presión de agua homogénea de un 0, 01 % en fibras de $400 [mm]$ de largo.

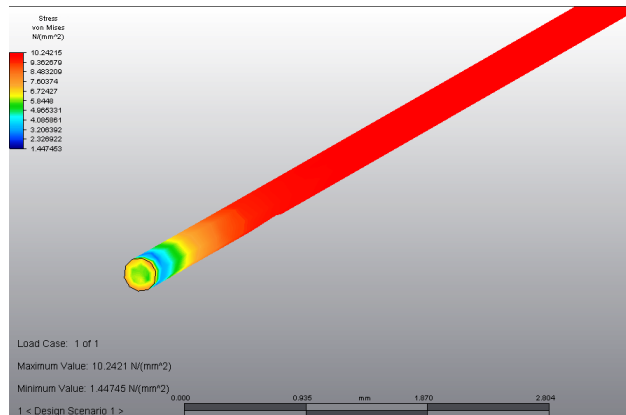


Figura 3.23: Modelación numérica de efectos de presión hidrostática sobre 400 mm de fibra óptica.

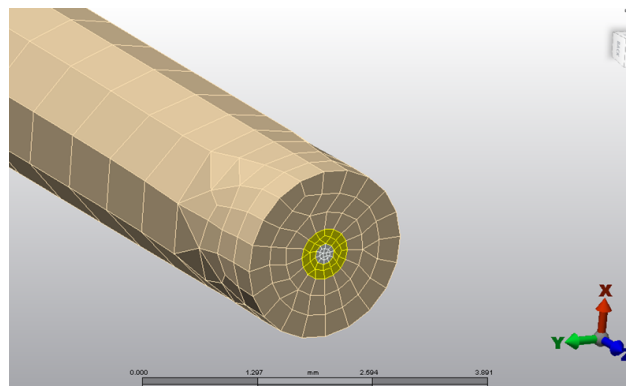


Figura 3.24: Mallaje Modelo Numérico.

Se realizan además de los modelos numéricos, Figuras 3.23 3.24 y mediciones de deformación experimentales, Figura 3.25, utilizando una cámara hiperbárica. Se obtuvieron mediciones de la influencia de la presión agua sobre las deformaciones de la fibra medidas con BOTDR para un caso de influencia de presión atmosférica y otro caso bajo una presión de 8 atmósferas.

Las pruebas demostraron la certeza de los experimentos numéricos, en el sentido que la medición en el tramo central de strain sobre un arreglo tipo IC Lock en la cámara arroja un delta de tensión a la medición de strain.



Figura 3.25: Cámara hiperbárica para pruebas de tensión-strain bajo presión.

3.5.3. Pruebas de Calibración Axial-Radial

La fibra embebida de manera paralela al curso del agua, se deformará de manera longitudinal al ser sometida a un esfuerzo axial. Para calcular la sensibilidad de detección de mediciones cercanas al 0,01 %, en un metro de fibra se usa el siguiente cálculo para estimar el mínimo R .

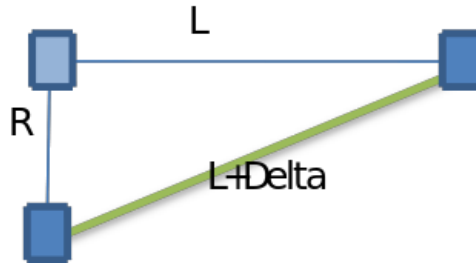


Figura 3.26: Deformación medida versus Deformación real.

Por lo tanto, para poder detectar “hinchamientos” radiales de 20 [mm], del techo o pared de un túnel, sobre un sector de 1 [m], el equipo debe tener una sensibilidad de acuerdo al siguiente cálculo:

$$R = \sqrt{(L_0 + \Delta L)^2 - L_0^2} \quad (3.1)$$

La distancia entre anclajes L_0 ha sido fijada en 1 [m]. El valor S corresponde a la deformación relativa o strain y R es la deformación radial. Lo anterior supone que el desplazamiento de uno de los IC-Lock es perpendicular a la condición inicial.

Para obtener un factor de escalamiento real se realizan pruebas en el IDIEM de la Universidad de Chile. Se instrumentan 10 discos de shotcrete de 10 [cm] de alto y 80 [cm]

de diámetro con fibras embebidas y tipo IC-LOCK. Se someten a esfuerzo centrales entre 10 y 30 [mm] y se mide la respuesta de la fibra al strain, Figura 3.27.

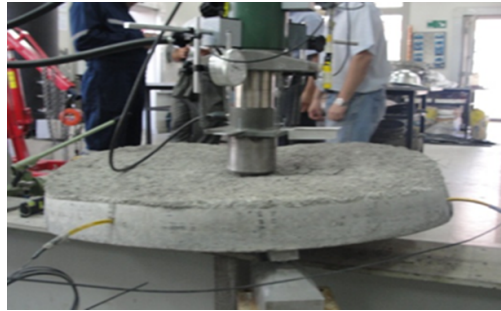


Figura 3.27: Ensayo discos shotcrate IDIEM.

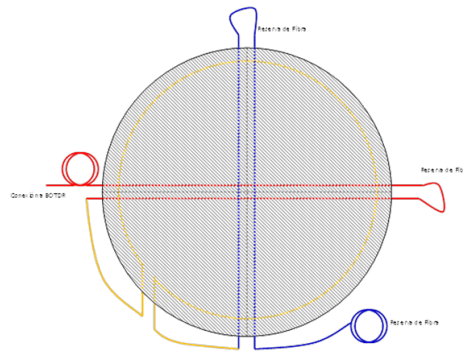


Figura 3.28: Diseño medición strain mediante BOTDR en disco de shotcrete.

Se obtienen curvas razonables en algunos discos y se genera la curva de calibración, ver Figuras 3.28 y 3.29:

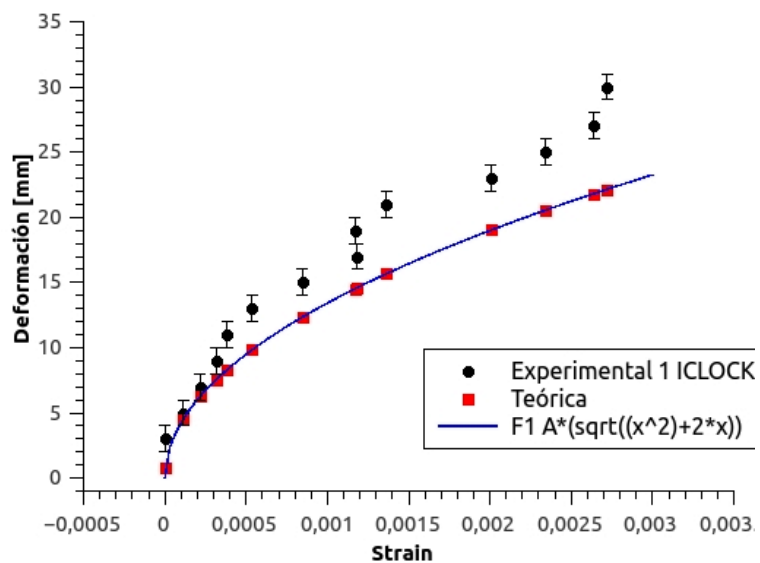


Figura 3.29: Deformación central Disco versus Strain.

Se observa una conducta no lineal de la fibra con deformaciones arriba del 0,3% que equivalen a una deformación central de 20 [mm].

3.5.4. Mediciones Strain línea base

Las mediciones base se realizan para determinar los estados de tensión en que queda la fibra al ser sometida a una capa de al menos 5 [cm] de shotcrete disparado a presión desde el centro del túnel.



Figura 3.30: Shotcrete proyectado sobre la fibra sensora.

La Figura 3.30 presenta las dificultades de “embeber” o cubrir la fibra óptica sensora. La máquina proyectora de shotcrete, mezcla de lechada de concreto y fibras plásticas contiene partículas de gravilla de bajo tamaño que salen proyectadas a presión. Producto de esto, y a pesar de la constante supervisión sobre el operador, se cortó la fibra en tres sectores deshabilitando la medición redundante, más se mantuvo la capacidad de medir en todo el sector.

Se representan las mediciones de cada sensor en el caso base de la evolución temporal en distintas situaciones de llenado, presión y flujo de agua.

Las Figuras 3.31 y 3.32 muestran un esquema de instalación tipo, y las mufas de interconexión entre los distintos tipos de fibra.

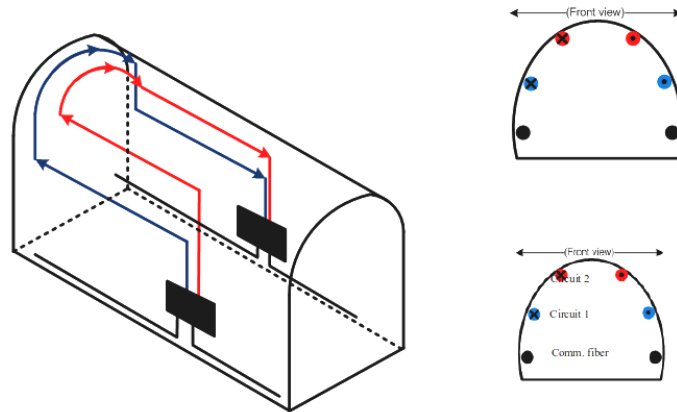


Figura 3.31: Sección típica sensor embebido.

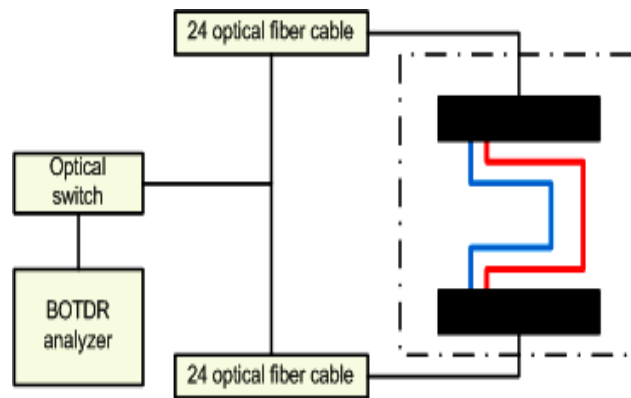


Figura 3.32: Interconexión y disposición de fibra sensora - fibra backbone.

3.5.5. Diseño de Monitoreo

El proyecto consideró inicialmente, por parte del mandante, tres secciones a monitorear para posteriormente aumentar estas secciones a nueve secciones distribuidas a lo largo del túnel, Figura 3.33. En cada una de las secciones se instalan distintos tipos de sensores en paralelo, cada uno con objetivos distintos.

3.5.6. Rango de Medición

Cada tipo de sensor se diseña con rangos de medición que dependen de las características de la fibra y límites de medición y distancia del instrumento y fibra. El instrumento de medición Advantest N8510 tiene límites inferiores dados por la precisión (Jitter) de medición de tiempos de retorno y rango de detección de corrimiento de frecuencias. Es así que Advantest especifica un límite inferior de strain, mayor o igual al 0,01 % de strain. Estos límites son absolutos, y denotan la magnitud de la banda de

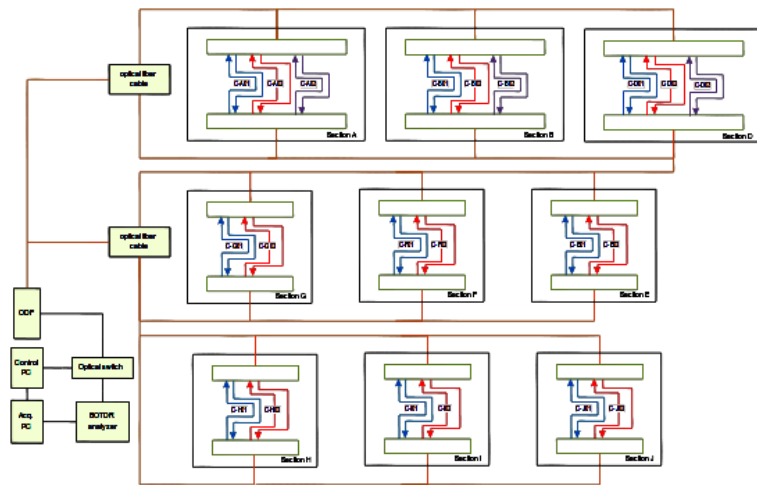


Figura 3.33: Distribución de circuitos de fibra óptica en sectores seleccionados.

ruido. Sin embargo, al promediar mediciones repetitivas desde el mismo punto, tendencias coherentes y se pueden observar y afirmar a partir de un 0,002% de strain. He ahí la importancia de contar con la mayor frecuencia de medición posible. En un sensor de 1 metro de largo esto es equivalente a 0,02 [mm]. El límite superior está dado generalmente por la capacidad de la fibra para responder linealmente a una deformación (estiramiento) y el analizador la limita a un 2% de strain; en un sensor de 1 metro de largo equivale a 20 [mm] de deformación.

En el caso de la fibra embebida al shotcrete, sensor tipo I, se tiene un cálculo aproximado sobre la relación entre la deformación del sensor y la deformación radial. Este es un supuesto teórico que debe ser validado y ajustado experimentalmente.

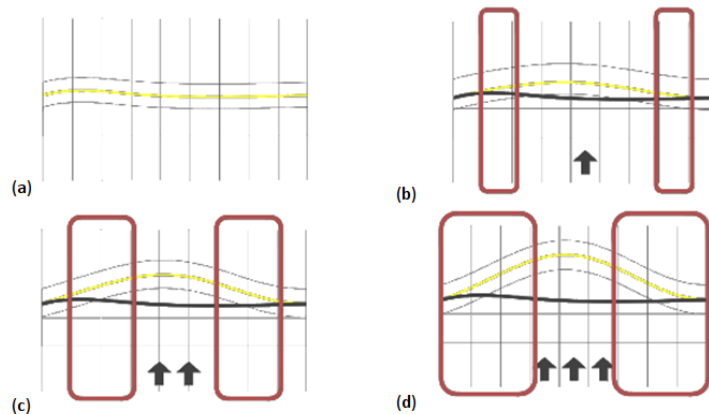


Figura 3.34: Deformaciones radiales según deformaciones longitudinales.

Se representa un tramo de largo 10 [cm] de fibra embebida en un muro con shotcrete. Este tramo es dividido en partes iguales para efectos explicativos (líneas punteadas). En la Figura 3.34 (a) la fibra se encuentra en un estado inicial que será considerado como referencia. Al cargar el muro sobre la fibra, 3.34 (b), ésta se deforma (estira)

principalmente en los extremos, donde se logra observar que se desprende de la referencia, mientras que en el centro la fibra está alejada de la referencia y la deformación ha sido mínima, es decir, no se ha deformado la totalidad del tramo de 10 [cm], que es el muestreo mínimo del analizador BOTDR.

En la Figura 3.34 (c), aumenta la deformación del muro, por lo que aumentan también los sectores (divisiones) donde la fibra se ha deformado; y finalmente en la Figura 3.34 (d) la fibra se ha deformado, longitudinalmente, lo suficiente como para que sea detectable por el instrumento. La totalidad del tramo de 10 [cm] se ha deformado, dato que es detectado por el instrumento.

3.5.7. Tipos de Sensores

A continuación se detallan los tipos de sensores a instalar y sus características principales.

Sensor Embebido. Tipo I

Este sensor, Figuras 3.35 y 3.36, se diseña y se implanta para medir pequeñas deformaciones a lo largo de toda la longitud de la fibra en contacto con la superficie a la que se adhiere (a través de shotcrete). Este sensor mide en un rango entre 0.01 % a 2%, con una resolución de muestreo de 10 [cm] y resolución espacial de hasta 30 [cm], a través de los algoritmos matemáticos descritos que mejoran la resolución espacial del sistema y permite obtener un perfil de deformación en el tramo implementado.

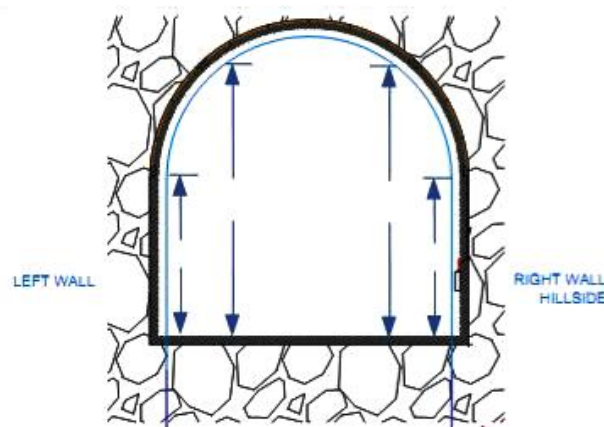


Figura 3.35: Corte transversal de túnel y ubicación de sensores en cada muralla.

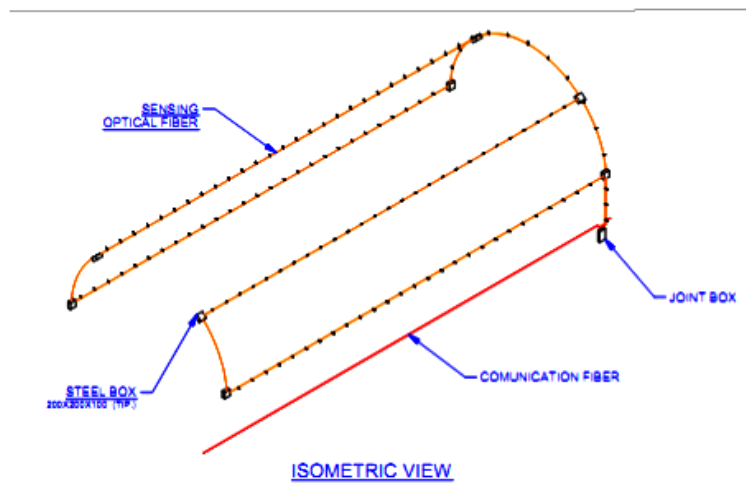


Figura 3.36: Vista isométrica de instalación de fibra embebida en una sección del túnel.

Sensor IC-LOCK. Tipo II (Embebido)

Este sensor, está diseñado para medir desplazamientos relativos en tramos de L metros y está embebido en shotcrete. Mide en una dirección de desplazamiento, es decir en una sola dimensión. Para conocer un valor estimado de movimientos radiales a partir de este sensor, es necesario hacer los cálculos respectivos. Para que el sensor cumpla la función de medir desplazamientos entre dos puntos, la fibra entre los anclajes se protege con una manguera de 6 [mm], de manera que la fibra sensora no entre en contacto directo con el shotcrete, y se traccione o comprima libre dentro de ella. Este tipo de sensor está implementado en ambas paredes del túnel, en pared derecha a 4 [m] y en pared izquierda a 2 [m], ver Figuras 3.37 y 3.38, y posee las siguientes características:

- La fibra sensora es anclada en dos extremos y permite una mayor deformación puesto que el largo de la fibra L es mayor.
- El perfil de deformación muestra la tracción o compresión neta del tramo. Al instalar la fibra entre dos anclajes descritos en Anexo 5, se da una pretensión o tensión inicial, lo que permitirá medir tracción o compresión en el sector.

Considerando un largo de la fibra instalado de $L = 1$ [m], se tiene:

Mínima deformación detectable ($s=0.01$ %).

$$\Delta L = \frac{s \times L}{100} = \frac{0,01 \times 1000}{100} = 0,10mm \quad (3.2)$$

$$\Delta L = \frac{2 \times L}{100} = \frac{0,02 \times 1000}{100} = 20mm \quad (3.3)$$

Para mantener libre el tramo L de fibra en el sensor embebido, ésta fue cubierta por una manguera plástica que impide que la fibra se adhiera al shotcrete. El sensor expuesto al agua no necesita que la fibra sea protegida por una manguera. La manguera a utilizar es de aproximadamente 6 [mm] de diámetro.

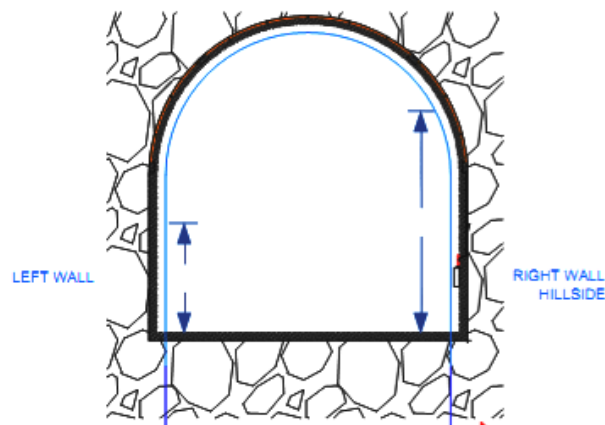


Figura 3.37: Vista isométrica de instalación de fibra embebida en una sección del túnel.

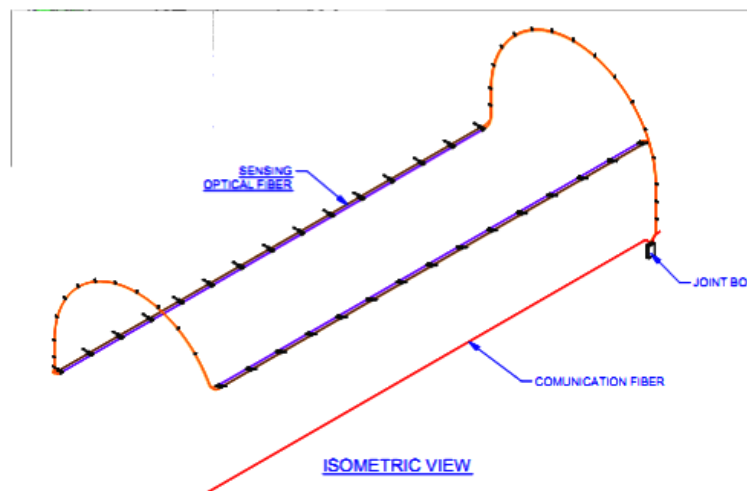


Figura 3.38: Vista isométrica de instalación de fibra IC-LOCK (embebida/expuesta) en una sección del túnel.

Sensor IC-LOCK. Tipo III (Expuesto)

Similar al sensor descrito en sección 3.5.7, pero puede ser reemplazado con facilidad y vuelto a calibrar en caso de corte de fibra por agentes externos o desplazamientos del macizo rocoso, siempre y cuando se tenga acceso físico al punto. Se instalan sensores IC-LOCK embebido y expuestos al agua en paralelo, para comparar las mediciones y decidir en el futuro cuál sensor es más conveniente instalar. En términos económicos de tiempo y dinero, sería conveniente instalar sólo el sensor expuesto.

Mufas o cajas de fusionado

La unión entre la fibra de comunicaciones (fibra de 24 filamentos) y fibra sensora se realiza en mufas o “joint-boxes”, las cuales deben ser selladas para soportar la presión del agua sobre la mufa y así proteger las necesarias fusiones que se deben realizar entre fibras para estructurar los distintos lazos de medición y su conexión óptica al analizador Brillouin. Las mufas a utilizar son marca 3M modelo Quante™ BPEO, Figuras 3.39 y 3.40.

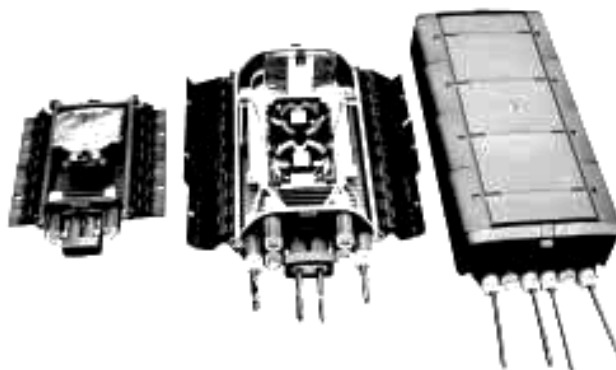


Figura 3.39: Mufas marca 3M (Quante™ BPEO Splice-Protection Closure for Optical Fiber Cables).

Para adaptar esta mufa a las presiones que será sometida dentro del túnel, éstas deben ser rellenas con algún tipo de aceite o resina que no afecte a las fusiones y luego sellada por fuera con algún tipo de resina. En este caso la mufa completa fue rellena con resina marca 3M.

Se realizaron pruebas utilizando resina a fin de comprobar que ésta no afecta la calidad de la fusión.

Las mufas fueron instaladas a razón de una en cada sección para acoplar la fibra del back-bone con la fibra sensora, y dos en la salida del túnel para conectar la fibra de back-bone (submarina) con la fibra de back-bone (normal) que va a lo largo del túnel de acceso hasta la caseta con los instrumentos y energía, ver Figura 3.41.

La instalación fue certificada en cada sección y lazo o loop de medición, mediante OTDR y con BOTDR al instalar, después del shotcrete, y desde la sala de control al unir todos los lazos completando las fusiones, mufas y sellados.

Se dedicó un gran esfuerzo al medir durante el mes de Mayo 2013, el llenado de agua del túnel que duró 5 días y 5 noches. Se detectaron y caracterizaron los cambios de estado de strain por temperatura y se logró obtener mediciones redundantes, sin cortes de fibra en el 70 % del circuito.

El sistema ha operado con una disponibilidad bastante alta, solo con interrupciones derivadas de los cortes de energía y las restricciones para realizar la mantención en terreno que los operadores imponen.

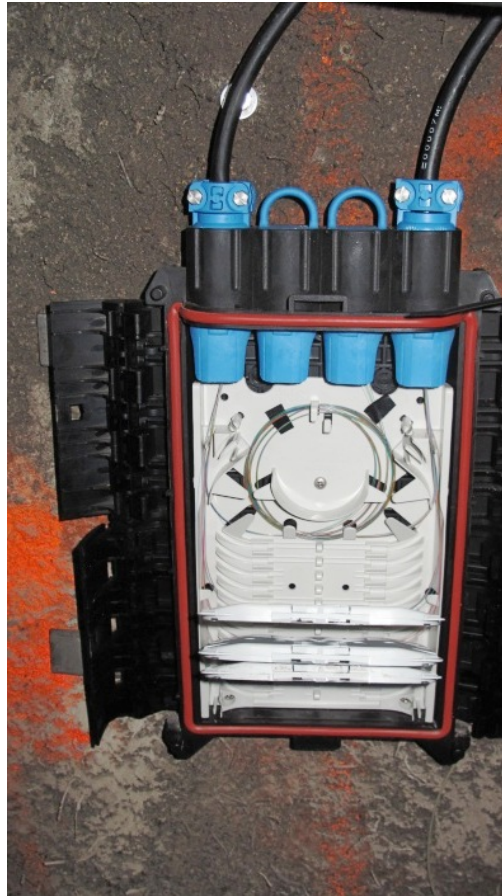


Figura 3.40: Mufa utilizada en túnel a presión 3M.

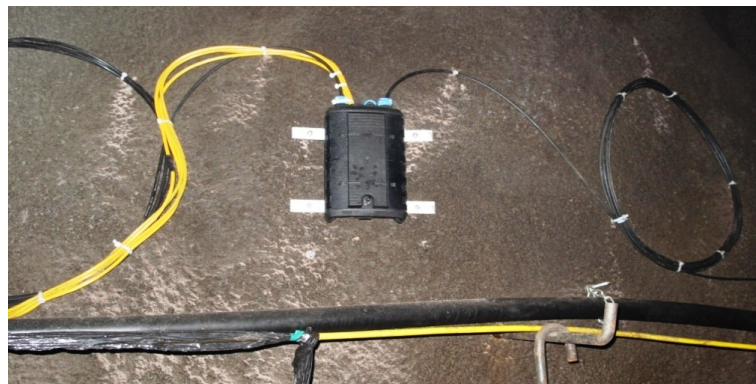


Figura 3.41: Mufa Union de Back Bone 24 Filamentos a Sensores Pared Derecha e Izquierda Sector A.

Capítulo 4

Presentación de Resultados

Se presentan y comentan en este capítulo los resultados obtenidos en los diferentes proyectos y aplicaciones implementadas. En general se grafican datos de deformaciones en unidades porcentuales de strain, salvo en aquellas aplicaciones que el cliente demandó unidades métricas.

Se presentan los resultados como STRAIN- DISTANCIA, representando las deformaciones distribuidas a lo largo de una línea en el eje X o Y de una pared, o en el eje Z de un pozo. El software utilizado y creado por MICOMO: SidMil® realiza una re-estimación usando los algoritmos desarrollados por CMM, mejorando la resolución espacial y filtrando *outliers*.

Se puede elegir un sector o punto de todo el tendido de fibra y desplegar la conducta de ese punto o sector en el tiempo, por lo tanto se obtiene una mirada de la evolución de la deformación en un punto dado STRAIN-TIEMPO.

Se debe hacer notar que tanto los fenómenos de desplazamiento como las deformaciones en la minería son lentos. Se miden cm/día o cm/año. Por lo tanto se programan las mediciones para obtener un cierto número de mediciones por día por sector /sensor. El sistema diseñado para medir 9 sectores con 40 a 50 lazos, puede medir cada 15 minutos por lazo. Se miden por lo tanto deformaciones lentas. No podemos medir sismos. Aunque si se ha medido el estado de tensiones ANTES y DESPUES de un evento sísmico como fue el terremoto 8,7 R del 27 Febrero 2010.

La plataforma de representación y análisis SidMil® también puede producir una representación del STRAIN-DISTANCIA-TIEMPO en el cual sobre el plano distancia tiempo se representa el strain como color AZUL a ROJO.

4.1. Resultados piloto 2004-2005 División El Teniente (DET)

La evaluación de disponibilidad y eficiencia de la detección de deformaciones se entrega en la Tabla 4.1. Esta fue diseñada por el cliente ya que uno de los parámetros mas relevantes en la instrumentación minera es su disponibilidad.

4.1.1. Registros y Resultados del Período de Medición

El sistema BOTDR registró la información de los desplazamientos relativos, en intervalos de dos metros, de los sensores instalados en túnel de extracción. A partir de agosto 2005, el registro se realiza en base a 24 mediciones por día para todos los sectores. Se presentaron conductas que se pueden agrupar en:

Tabla 4.1: Disponibilidad y eficiencia de la detección de deformaciones.

Parámetro	Resultado de la Evaluación
Eficacia en la detección de deformaciones	Deformaciones de pocos <i>mm</i> son detectadas en 4 secciones
Eficacia de la medición de lapsos	100 %
Eficacia global de la medición	100 %
Disponibilidad del Analizador	100 %
Fiabilidad de entorno del sistema BOTDR	Sin problemas
Instalación	Tal como estaba previsto y organizado

- Zonas con mayor nivel de cambios o desplazamientos registrados que sobrepasan los umbrales predefinidos de 2 *mm* que es la elongación máxima en modo lineal de la fibra .
- Sensores con deformaciones sobredimensionadas por efecto de agentes externos no relacionados con la actividad minera.
- El registro de datos del sistema instalado en el techo, evidencia mayor nivel de cambio y más variedad en el tipo de desplazamiento (tensión y compresión).
- Se logra medir formación de grietas antes que éstas se presenten en la pared del túnel.

La Figura 4.1 representa la variación de la deformación en *mm*, de un sector de 2 metros de la pared del túnel. Se observa una tendencia hacia la compresión ya que de los dos metros iniciales el sector se “encogió” cerca de 0,5 *mm*.

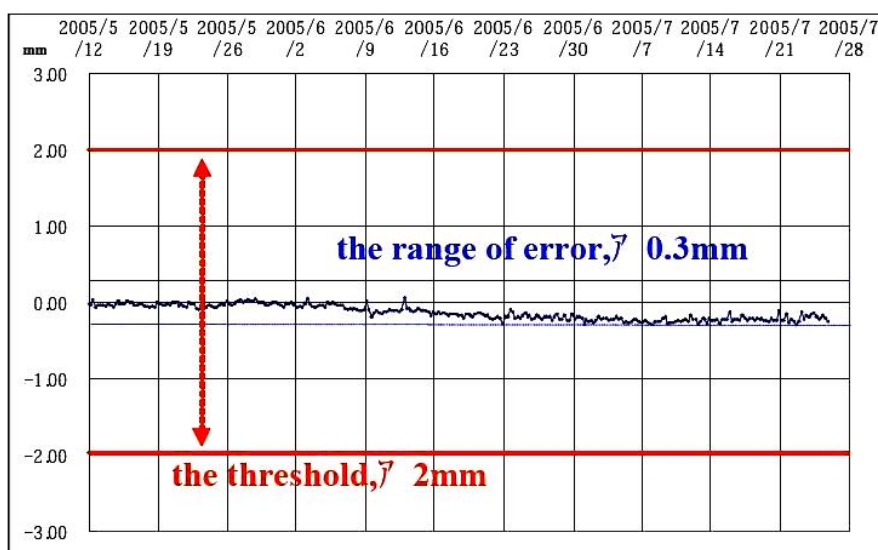


Figura 4.1: BOTDR tunnel data.

La Figura 4.2 representa el estado de tensión-compresión de un sector de 65 metros de túnel. La curva en realidad debe ser representada como una serie de escalones ya que la tensión de cada sector de 2 metros es la integral de todo tramo de 2 metros y debe ser constante en todo el tramo. La curva se suaviza por la manera que el equipo entrega los datos, como un promedio móvil de un metro.

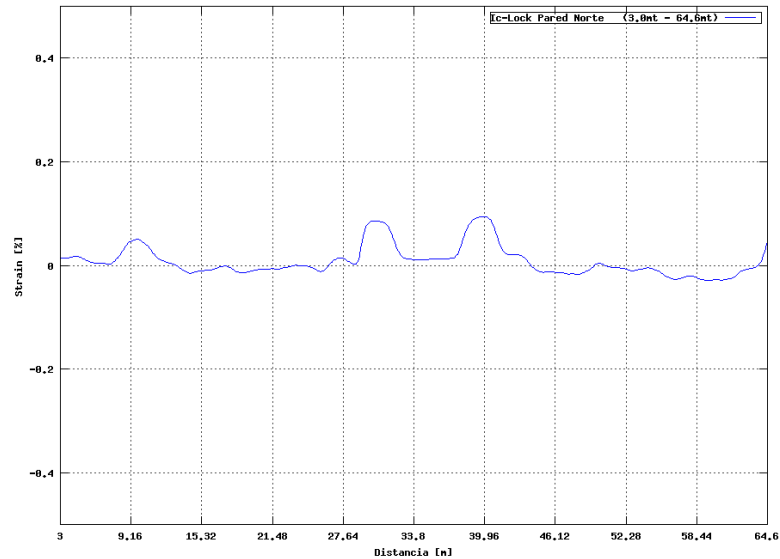


Figura 4.2: Strain medido en el Túnel de ventilación.

La representación de los resultados que presenta NTT-AT no es en realidad la correcta. las mediciones de tensión (eje y positivo) corresponden al valor máximo o central del tramo de 2 metros. Se observa que la mayoría de los sectores del túnel se encuentran sometidos a tensiones, y sectores intermedios a la compresión. Se presentan dos sectores con máximos altos que fueron objeto de un seguimiento temporal exhaustivo ya que presentaron grietas de hasta 8 mm al final de la campaña de mediciones (de 10 meses de duración).

El éxito de la adaptación de tecnologías en cuanto a anclajes, red de comunicaciones, disponibilidad es un factor decisivo para que Codelco decidiera implementar una filial tecnológica en asociación con NTT de Japón para que replicara a través de venta de servicios este tipo de mediciones en todas las divisiones operativas de CODELCO Chile, Ver ANEXO 6.

4.2. Resultados Campaña BOTDR DET 2007-2010

Este proyecto de largo alcance contó con un co-financiamiento de CORFO INNOVA por 1,2 millones de dólares y fue asignado al consorcio MICOMO mediante concurso público de Diciembre 2005. El diseño y la descripción general del sistema instalado se

describe en Capítulo 3. Para lograr estos objetivos se estructuró un equipo humano en MICOMO dirigido por el autor y el que contó con dos Doctores, uno en Fluidodinámica y otro en Física, un Ingeniero de Minas, dos Ingenieros Civiles, dos técnicos eléctricos y subcontratos con el Departamento de Ingeniería Civil de la FCFM, con el CMM de la misma facultad, una oficina de abogados y subcontratistas para la fabricación y apoyo en terreno para el montaje del sistema. Se debe sumar a este esfuerzo, al equipo de Asesores de NTT, creadores del sistema y cuatro profesionales geomecánicos y gerenciales de Codelco Chile.

4.2.1. Monitoreo de Falla Principal N1

Para monitorear esta falla, DET propuso montar sensores a través de los distintos niveles verticales que atraviesan la Falla N1:

- Desde Nivel de Hundimiento, se realiza desde sensores instalados en Calle 11, 12, 13, 14 y 17. Ver Figura 4.3, sitios emplazados en Falla N1.
- Desde Nivel de Producción, se realiza desde sensores instalados en Calle 12, 13 y 14.
- Desde Sub-Nivel de Ventilación de Extracción, se realiza desde sensores instalados en intersección de Socavón Central y XC-Z13/14N.

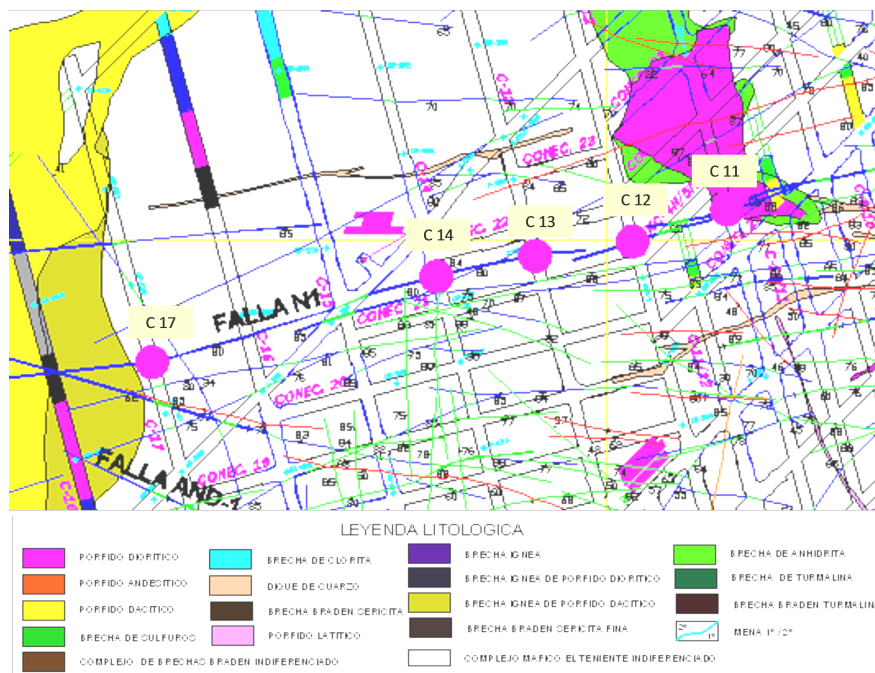


Figura 4.3: Detalle Planta Nivel Producción. Ubicación sensores.

Monitoreo de falla N1 muestra desplazamientos de los bloques de la mencionada falla, de acuerdo a sitios implementados con fibra BOTDR y sensores utilizados. Sin embargo, las mediciones realizadas por sitios dispuestos en diferentes niveles (NH, NP y SNV) no muestran un comportamiento en común, vale decir que el monitoreo es de tipo local, por ende no es extrapolable la información de un nivel a otro. Lo que se puede concluir es que la falla presenta desplazamientos distintos en los distintos niveles en la cual fue medida, que se observan desplazamientos asociables a la actividad minera y también al desplazamiento de placas, ver Figura 4.4.

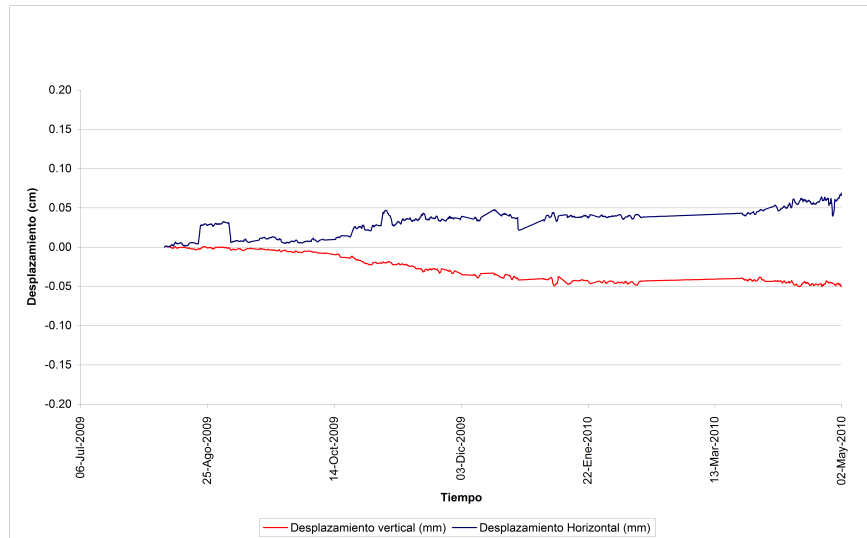


Figura 4.4: Curva de desplazamiento vertical y horizontal de ic-lock en la configuración X en estación de falla. Desplazamiento vertical: desplazamiento del manto, desplazamiento horizontal: bloques despegándose.

4.2.2. Monitoreo Cámara de Chancado

La cámara de chancado es una estructura de concreto y acero construida para alojar a las correas, puente grúa, chancador, sistemas eléctricos y facilidades para el personal al interior de la mina. De esta manera se reduce el tamaño del mineral a transportar a planta con los beneficios de mayor eficiencia en el transporte de éstas. Una excavación como la descrita en capítulo 3, “redistribuye” los esfuerzos y tensiones que la carga geostática impone sobre este volumen del yacimiento. La Figura 4.5 de HOEK1990 describe la redistribución de los esfuerzos mayores de una caverna.

Este modelo explica la tendencia a “levantar” los pisos de este tipo de estructuras subterráneas y es precisamente el perfil de deformaciones que midieron los sensores instalados hasta 12 metros en vertical bajo el piso de la cámara. En las Figuras 4.6a y 4.6b se observa que la deformación total registrada va en aumento a medida que transcurre el

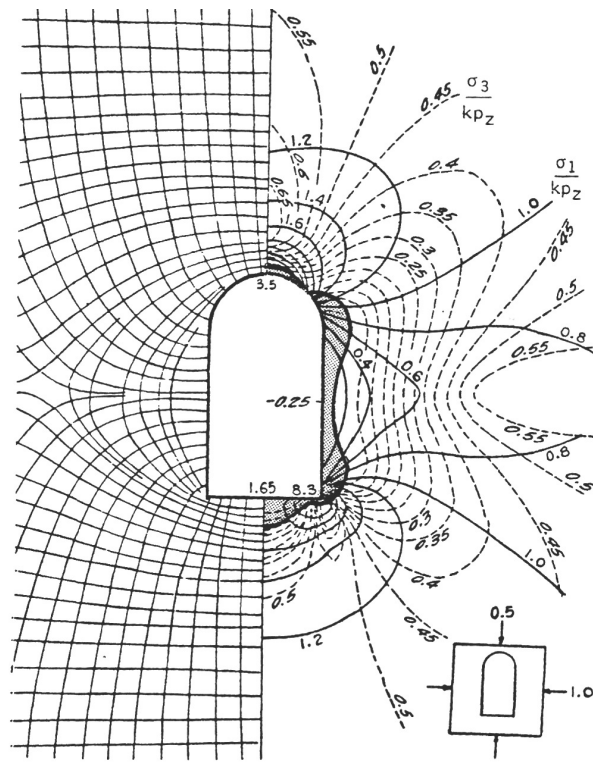
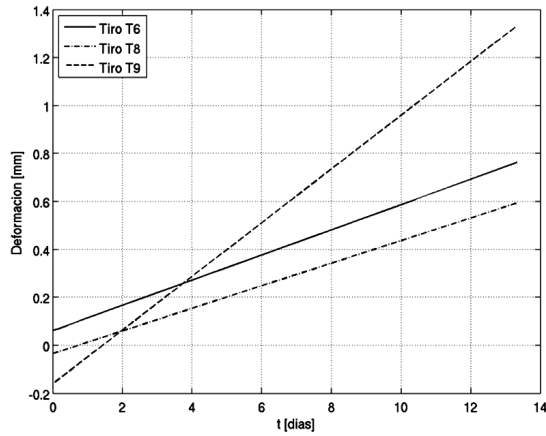


Figura 4.5: Esfuerzos alrededor de una caverna subterránea.

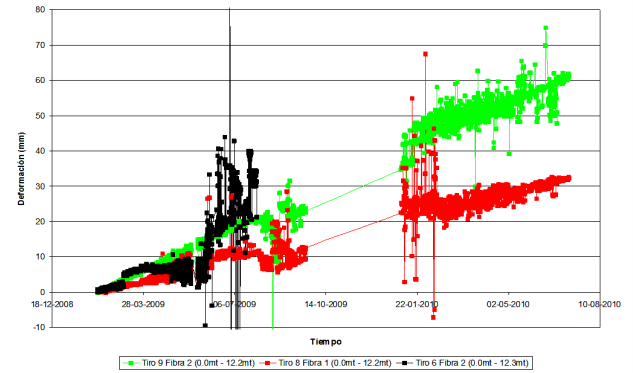
tiempo desde el instante en que los tiros implementados con fibra BOTDR se encuentran activos. La mayor deformación es registrada por fibra 2 de tiro 9 y la menor deformación es registrada por fibra 1 de tiro 6, que corresponde aproximadamente a 3.66 [mm] y 1.5 [mm] respectivamente, ambas tendencias indican que la sala de chancado registró deformación de tipo tracción. Por otra parte, se observa en la Figura 4.6 un corte de fibra de tiro 6 y un cambio brusco de tendencia de tipo compresión en cada una fibras de los diferentes tiros, sin embargo, esta última situación no perdura en el tiempo al expandir fuera del rango de elasticidad de la fibra.

La Figura 4.7 muestra la evolución temporal total acumulada de los tiros del piso, observándose una clara tendencia a la tracción de estos en una zona a partir de los 3 metros bajo el piso. Esta tendencia es confirmada por la evidencia física durante el período de monitoreo al constatarse un visible aumento en el “levantamiento” del piso de la cámara.

El gráfico de la Figura 4.8 representa el perfil de esfuerzos a los cuales está sometida la roca debajo de la cámara de chancado. El eje Y representa la profundidad en metros y el eje X el tiempo, Abril 2009 a Mayo 2010. La zona centrada a los cuatro metros de profundidad se expande produciendo el levantamiento del piso en la cámara. Se observa que a partir del gran terremoto del 2010 esta zona aumenta su longitud de tensión. La cámara de chancado actúa como un gigantesco sismógrafo, detectando el BOTDR el



(a)



(b)

Figura 4.6: Evolución Temporal Deformación Tiros Sensados.

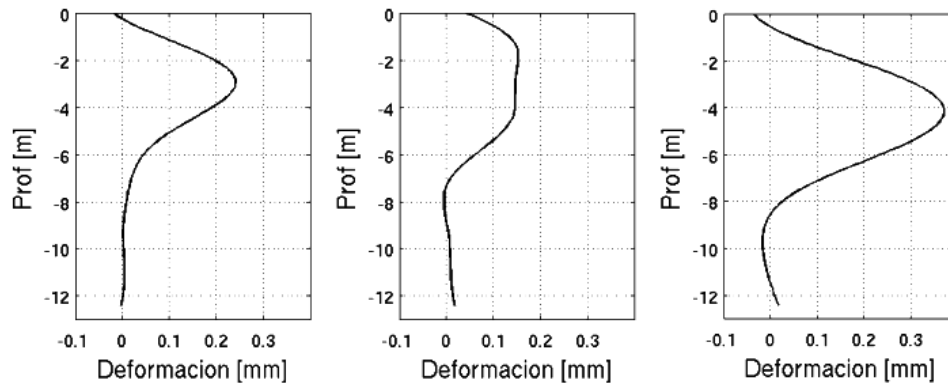


Figura 4.7: Perfil deformaciones Tiro T6.

aumento de la plasticidad de la roca debajo del piso de la cámara.

4.2.3. Pilares Esmeralda DET

La campaña de medición de deformaciones internas de pilares mineros se realiza durante el periodo 2008-2010 bajo el alero del proyectos INNOVA y posteriormente, a solicitud de DET, se realiza una nueva campaña en un sector minero de alta complejidad, tal como lo es Mina Esmeralda, ya que se intentaba extraer producción en un sector vecino a un área colapsada. Se instrumentan pilares en una calle crítica de tránsito de personal y maquinaria, ver Figura 4.9.

El monitoreo BOTDR de los pilares juega un doble papel:

- Alarmar posibles emergencias de colapso.
- Medir el efecto del avance minero y zona colapsada sobre la estructura interna de

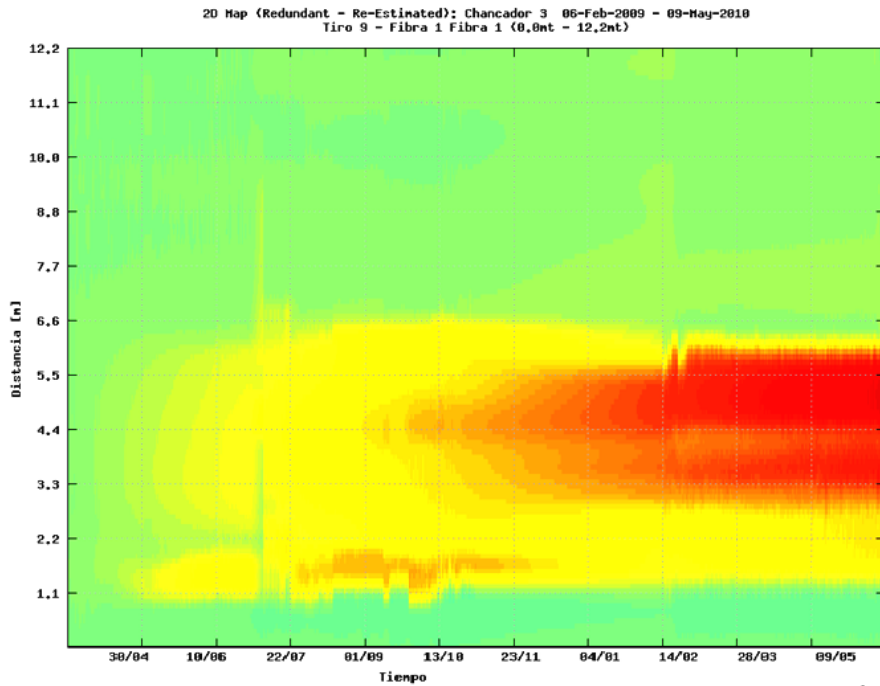


Figura 4.8: Representación Tiempo-Profundidad-Deformación en pozo instrumentado.

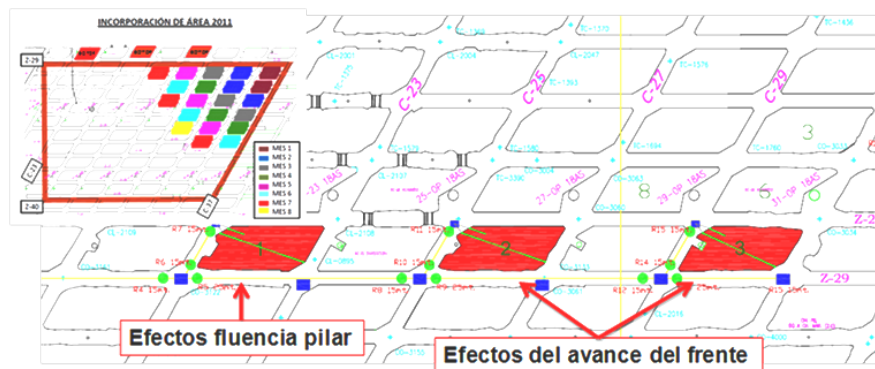


Figura 4.9: Disposición General pilares Instrumentados Mina Esmeralda.

estos pilares.

Mediante los diseños de sensores específicos para las distintas conductas (zonas plástica y elástica) del pilar minero se logra el monitoreo del avance del frente de socavación sobre el volumen plástico del pilar. Se obtiene una sólida consistencia en la medición de deformaciones mayores, por el efecto del avance del frente de socavación y efectos de la zona quebrada (colapsada) al norte de éstos. Se mide la integral de deformación de la zona plástica mediante una fibra anclada a los 5 metros desde la pared al centro del pilar, la que es protegida por una carcasa telescópica. Simultáneamente en otro tiro horizontal, que atraviesa todo el pilar (30 metros) se ancla la fibra de manera continua mediante lechada de concreto y se mide de manera continua la conducta de los

15 metros centrales del pilar.

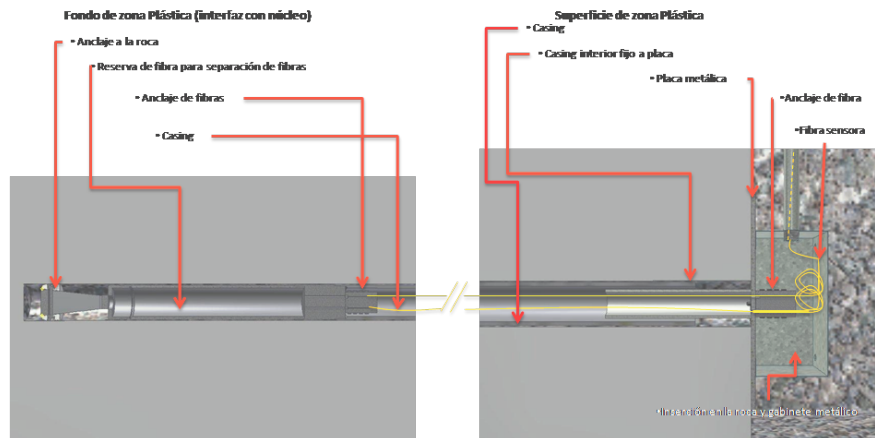


Figura 4.10: Sensor tipo tiro horizontal, anclado al fondo con doble fibra sensora para zona plástica.

Mediante el desarrollo realizado MICOMO, de estimadores numéricos se obtiene gran consistencia en la medición de deformaciones pequeñas en el núcleo por el efecto del avance del frente de socavación y efectos de la zona quebrada al norte.

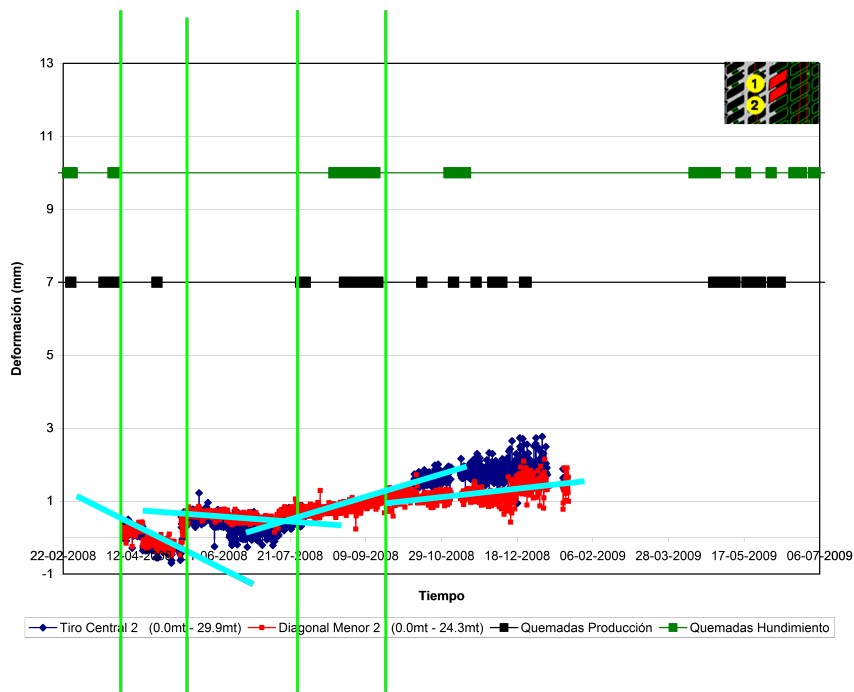


Figura 4.11: Superposición de cambios de tendencias de la evolución temporal del pilar 1 con el aumento de la actividad minera.

Se miden deformaciones pequeñas en el núcleo del pilar por el efecto gravitacional de la roca quebrada de esa área. Se contrastan las mediciones BOTDR con celdas de esfuerzo ancladas a la pared del pilar, correlacionando esfuerzos-deformaciones para la

detección temprana de cambios de comportamiento del macizo.

El monitoreo de pilares mostró deformaciones claramente asociadas a la microsismicidad que se presentó en la zona, la que a su vez se encuentra ligada a la actividad minera ya sea *ex ante* con cambios de pendientes antes de un evento o a *posteriori* del evento, ver Figuras 4.10, 4.11 y 4.12.

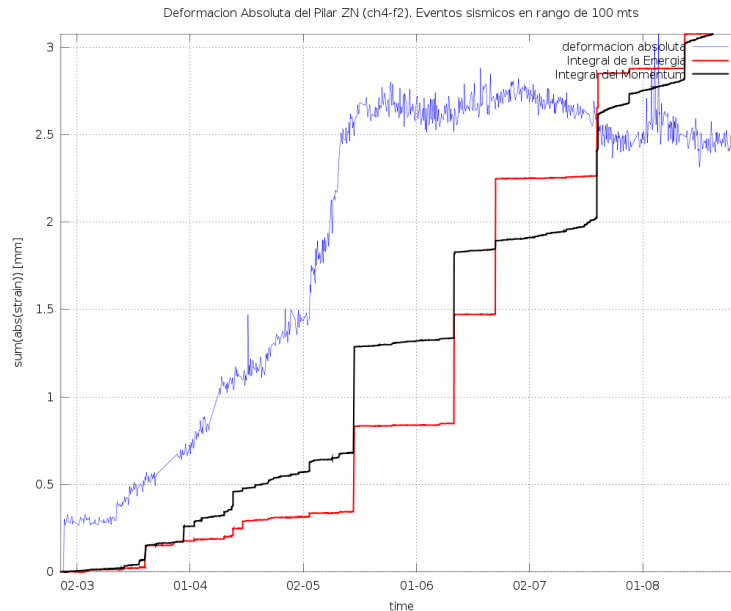


Figura 4.12: Deformación Absoluta Zona Núcleo. Radio considerado 100 m. Para este Radio, los eventos sísmicos importantes no se reflejan en la deformación del pilar.

El sensor longitudinal embebido en ambas caras del tiro en el núcleo del pilar, por ser el más sensible comienza a señalar deformaciones antes de completar un mes de monitoreo.

Las zonas con mayor deformación antes del mes, que exceden el límite mínimo absoluto de detectabilidad del instrumento igual a 0.01 % en strain. La tendencia que muestra la curvas de deformación es coherente en su conducta a la compresión o tracción en rangos 10 veces menores que el limite de medición del equipo.

Los sensores embebidos en el núcleo del pilar y el sensor discreto en la zona plástica del pilar muestran coherencia con las características observadas en la pared y análisis del video de las paredes del tiro que cruza el túnel. Estos sensores muestran una mayor deformación alrededor en las zonas más cercanas a la pared del pilar.

La zona del núcleo muestra una conducta de compresión expansión coherente con la cinética de avance de la minería.

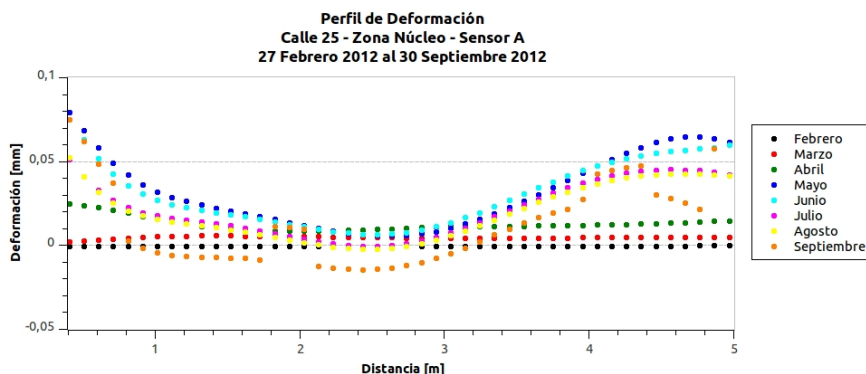


Figura 4.13: Perfil deformaciones Núcleo Pilar

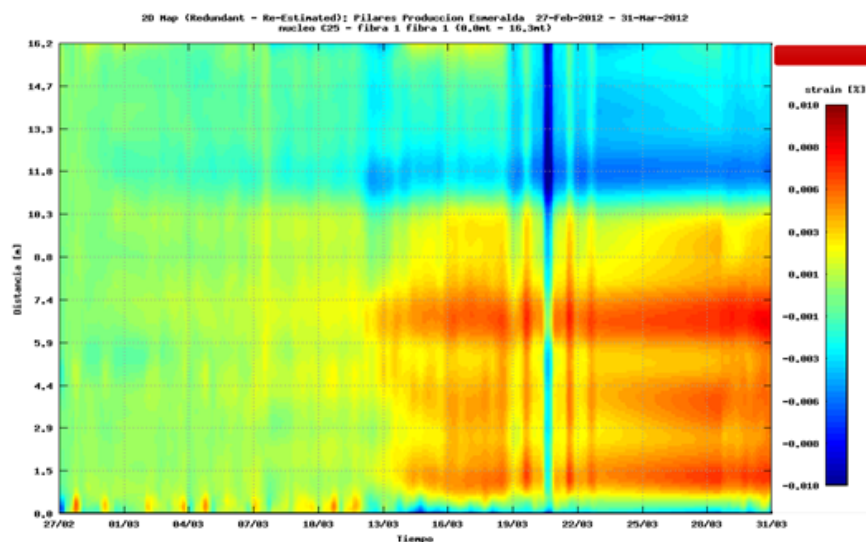


Figura 4.14: Histórico Deformaciones Núcleo Pilar Esmeralda.

4.3. Resultados Mediciones Túnel Río Blanco

Las mediciones realizadas a Febrero 2013 se destacan en rectángulos azules, ver Figura 4.14, y se procesan los datos para evaluar deformaciones y las tasas de éstos.

Se observan deformaciones significativas en los tiros sensores axiales horizontales y en el tiro vertical. El pico negativo es indicador de un segmento de fibra sin tensión que se deja a la entrada del tiro para separar la medición de strain de la fibra de comunicaciones.

Está en curso un análisis más profundo de estas mediciones en todas las estaciones dada la criticidad de este túnel para la producción de la división El Teniente. Se destaca que este sistema y MICOMO es responsable de emitir las mediciones y sus tendencias y un profesional del cliente debe inferir las posibles consecuencias operacionales de esta medición.

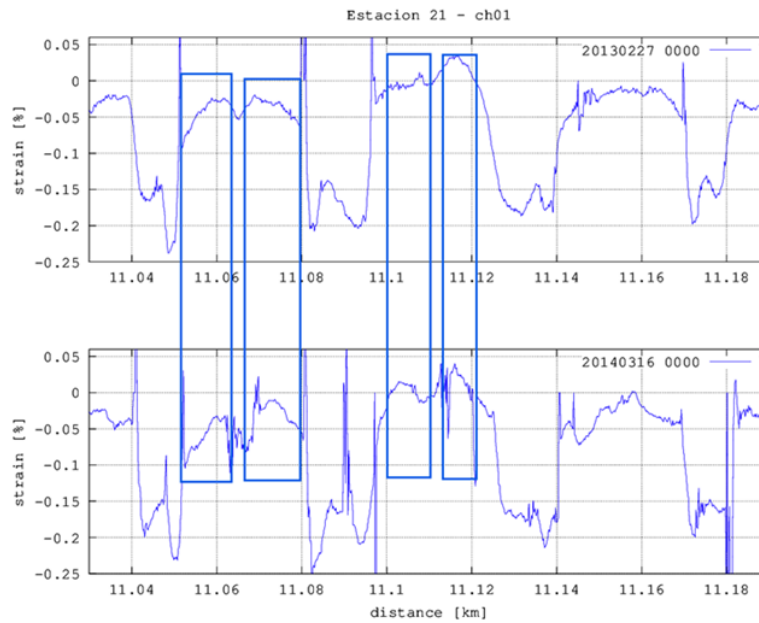


Figura 4.15: Perfiles Deformación radial Estación 1.

4.4. Resultados Mediciones Túnel de Servicio Rajo Chuquicamata

La campaña de mediciones en el túnel de servicios del chancador primario en el rajo de Chuquicamata demostró la capacidad para anunciar fenómenos incipientes que afectan la salubridad estructural de infraestructura minera. La Figura 4.16 es un histórico de más de un año de mediciones en el cual se puede apreciar el nacimiento de grietas. La grieta más cercana al rajo (10 [m]) midió 8 [mm] en la pared del túnel al término de la campaña de mediciones.

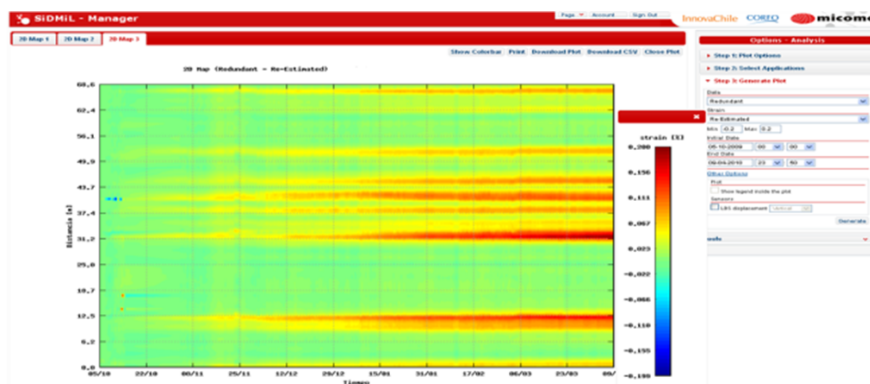


Figura 4.16: Histórico Deformaciones a lo largo del Túnel de Servicios.

La Figura 4.17 es una representación del perfil de deformaciones a lo largo del túnel. La línea roja representa el sensor embebido, continuo pared Norte, línea azul sensor

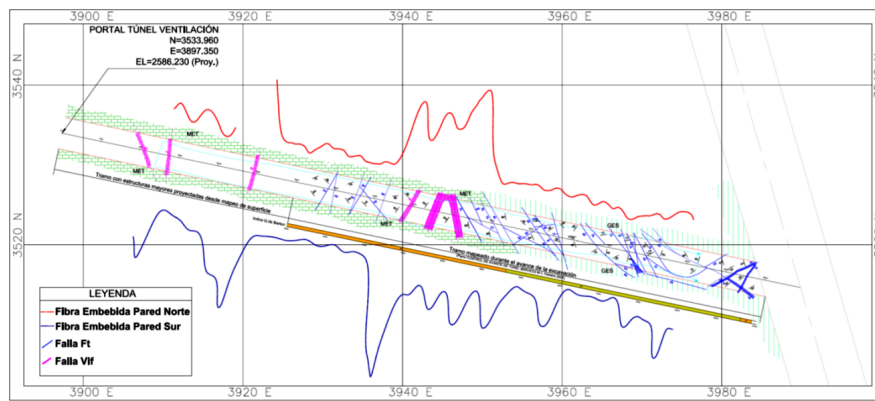


Figura 4.17: Superposición de mapa de estructuras con mediciones de perfil de strain BOTDR.

embebido, continuo pared Sur . La correlación entre áreas o volúmenes que presentan grietas o formaciones preexistentes (antes del túnel) es evidente.

4.5. Resultados Túnel a Presión

Las implicancias económicas de la sustentabilidad de la medición de deformación son de alto impacto. El hecho de contar con un monitoreo en línea de las deformaciones habilita la operación de la planta generadora debido a las exigencias de la empresa de seguros. El sistema de mediciones descrito en capítulo 3 se ha mantenido midiendo regularmente desde Mayo 2013 y se presentan en esta sección los resultados más relevantes.

Es de interés obtener un conjunto de mediciones que establezcan el caso base con el túnel sin agua. Se mide también el estado de deformaciones del túnel con especial cuidado durante el proceso de llenado de agua hasta alcanzar el régimen operacional de presiones y caudales y se establece el caso base a presión con el túnel a régimen. De esta manera se puede estimar el efecto de cambios de temperatura y aislar este efecto de los cambios estructurales ante el aumento de la presión del agua.

En Octubre 2012 se consideró instrumentar tres secciones del túnel denominadas A, B y C- ubicadas aguas arriba del túnel de acceso 1 llamado ADIT 2. Esta sección se refuerza y se decide implementar otras 7 secciones del túnel con instrumentación BOTDR. Las secciones a instrumentar y su distancia interna en el túnel son las referenciadas en la Tabla 4.2:

Los sectores A,B, D se instrumentan con tres tipos de sensores descritos en capítulo 3. El resto de las secciones cuentan con dos tipos de lazos sensores embebidos, ver Figuras 4.17 y 4.18.

MICOMO emite de manera mensual el informe con los gráficos de perfil a fecha de

Tabla 4.2: Secciones Instrumentadas del Túnel conductor de Aguas.

Sector	Pk
A	9.370 - 9.444
B	9.445 - 9.480
C	9.480 - 9.540
D	9.585 - 9.600
E	9.950 - 9.995
F	10.240 - 10.300
G	10.405 - 10.440
H	11.975 - 12.050
I	12.078 - 12.120
J	12.121 - 12.165

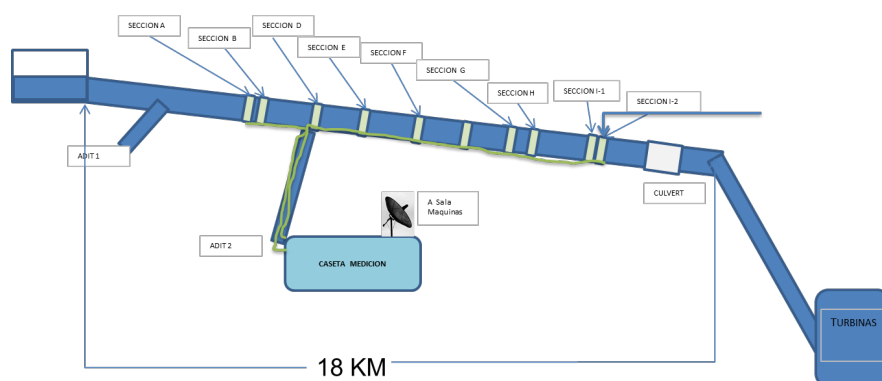


Figura 4.18: Esquema General Secciones Túnel.

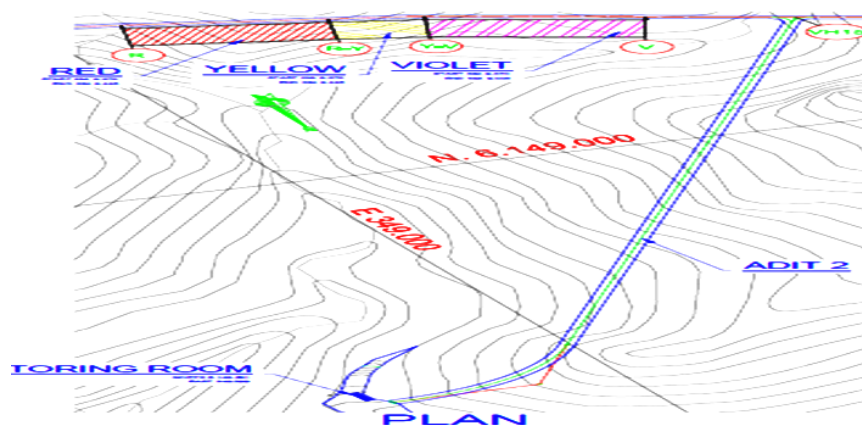


Figura 4.19: Vista localización Secciones A, B, C.

cada sector de mediciones. La pared sur de cada sector tiene dos líneas de medición con fibra embebida a 3 y 5 metros de altura, dos líneas de sensores tipo Ic- Lock cada metro. Cada sector sensor que mide un perfil de deformaciones se la ha asignado un código de instrumento o código TAG de acuerdo a la nomenclatura ISA. Ver Tabla 4.3. Este informe es distribuido a personal de operaciones y asesores geomecánicos en Suecia.

La Figura 4.20 describe el perfil de deformaciones de un sector arco del lazo embebido del sector arco sección A. La línea azul es el caso base perfil de deformaciones de este sensor a Mayo 2013 y la línea roja el estado a Marzo 2014.

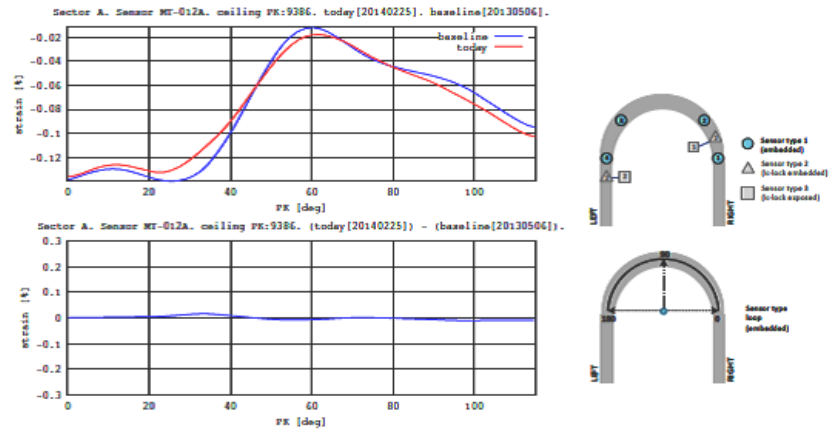


Figura 4.20: Perfil de deformaciones de un sector arco del lazo embebido del sector arco sección A.

Se aprecia que son los sensores ubicados en el arco del túnel los que a 9 meses de instalados empiezan a mostrar una tendencia a la tracción. Esta tendencia es indicativa de presiones radiales ejercidas desde la roca y podría indicar un “hinchamiento” del shotcrete por expansión de material arcilloso.

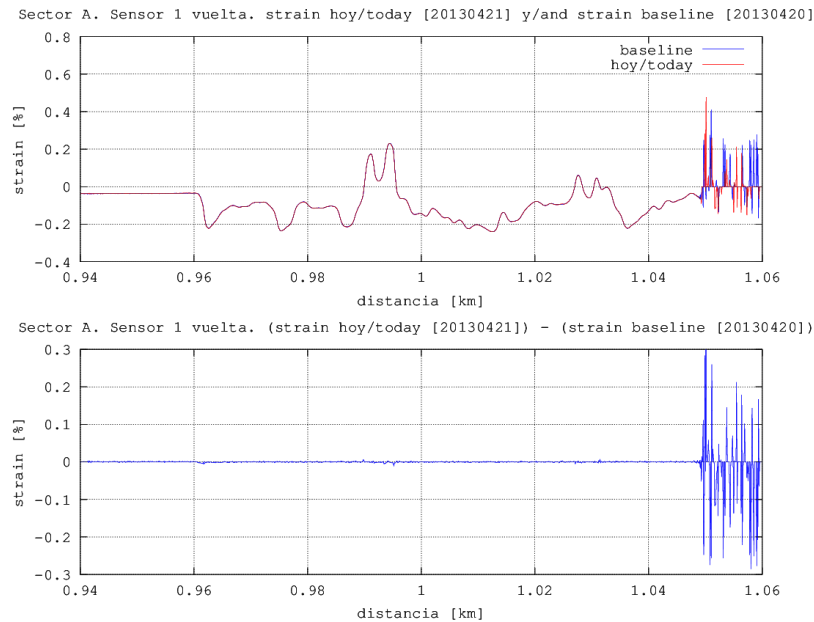


Figura 4.21: Gráficos Strain y Delta Strain vs Distancia Sección A Sensor 1.

La Figura 4.21 representa la medición de deformaciones en % de strain a lo largo de

una sección del túnel. Al parecer la tensión presenta un máximo en Junio para bajar en Julio del año 2013.

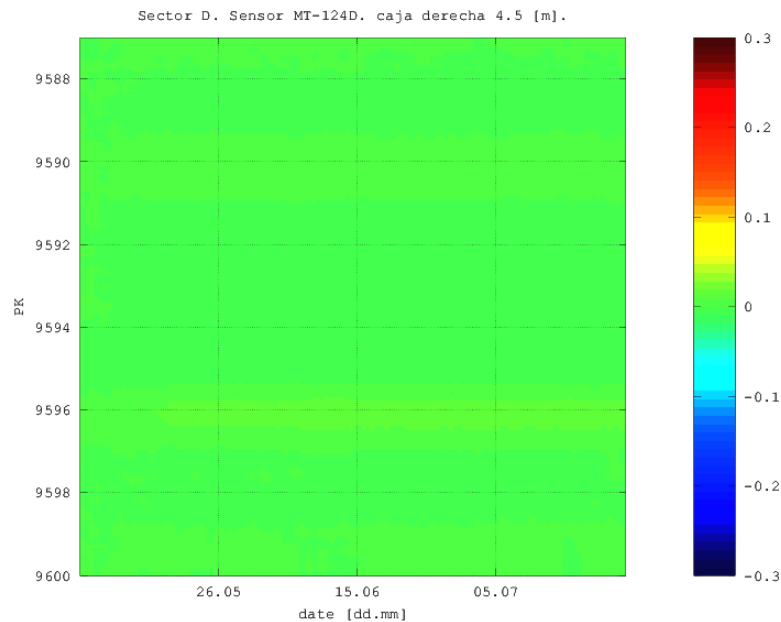


Figura 4.22: Representación Strain-Distancia-Tiempo.

La Figura 4.22 es una representación de deformación tiempo distancia de un sensor del sector D. No se alcanza a apreciar en color amarillo una leve tendencia a la tracción en la cota 9596 metros.

La instalación ha operado con mínimas perturbaciones desde su instalación, sobrepasando la disponibilidad de otro tipo de sensores instalados simultáneamente por el dueño. Toda la instrumentación tradicional, extensómetros, cuerda vibrante, presóstatos, etc ya no operan por infiltración de agua.

Los refuerzos en las zonas adecuadas y el monitoreo continuo demuestran que la reconstrucción de este túnel ha asegurado la operación sin interrupciones de la de la central de paso, asegurando los 150 [MW] de energía al SIC.

Ni las deformaciones recién medidas ni sus tendencias no constituyen riesgos según análisis del dueño.

Esta infraestructura es el primer túnel de conducción de aguas bajo presión en el mundo, según lo asegura el dueño, que cuenta con un sistema de monitoreo de salud estructural en línea.

Se prepara el vaciado del túnel para mediados del año 2014 y se ha solicitado realizar reparaciones de cortes de sensores expuestos al agua y medición intensa del proceso de vaciado.

Tabla 4.3: Strain máximo y tasa mensual de strain hasta el 25 de Feb. de 2014.

sensor ID	Pk [m]/[deg]	max. strain [%]	strain rate [%/month]
MT-124H i	[12007 - 12009]	0.0061	0.0006
MT-124H v	[12022 - 12024]	0.0078	0.0008
MT-222H v	[11974 - 11976]	-0.0022	-0.0002
MT-113I i	[12092 - 12094]	-0.0155	-0.0016
MT-115I i	[12092 - 12094]	0.0076	0.0008
MT-215I i	[12082 - 12084]	0.0080	0.0008
MT-213I i	[12085 - 12087]	-0.0129	-0.0013
MT-213I v	[12077 - 12079]	-0.0030	-0.0003
MT-124I i	[12118 - 12120]	-0.0111	-0.0011
MT-222I i	[12118 - 12120]	-0.0455	-0.0046
MT-124I v	[12118 - 12120]	-0.0224	-0.0023
MT-222I v	[12100 - 12102]	0.0479	0.0049
MT-113J i	[12125 - 12127]	0.0280	0.0029
MT-115J i	[12136 - 12138]	-0.0068	-0.0007
MT-215J i	[12135 - 12137]	0.0167	0.0017
MT-213J i	[12136 - 12138]	-0.0119	-0.0012
MT-113J v	[12123 - 12125]	0.0127	0.0013
MT-115J v	[12149 - 12151]	-0.0064	-0.0007
MT-215J v	[12137 - 12139]	0.0573	0.0058
MT-213J v	[12136 - 12138]	-0.0124	-0.0013
MT-124J i	[12120 - 12122]	-0.0105	-0.0011
MT-222J i	[12120 - 12122]	-0.0020	-0.0002
MT-124J v	[12120 - 12122]	0.0034	0.0003
MT-222J v	[12124 - 12126]	-0.0066	-0.0007

Capítulo 5

Discusión

Los resultados del piloto industrial realizado en un túnel de ventilación en El Teniente dieron paso a la formación de MICOMO, Ver Anexo 6.

La calidad y significancia de las mediciones obtenidas durante un año y más de trabajo en el piloto 2005-2006 en terreno, cambia algunos supuestos operacionales de la minería subterránea, i.e.: Distancia influencia “abutment stress”, ver glosario, sobre estructuras mineras. Se logra también detectar en el año 2007 un rápido cambio de pendiente Strain-Tiempo en un sector de 2 metros del túnel de ventilación instrumentado que se mide previo a un fuerte estallido de rocas en las vecindades de este sector.

Al medir la tasa de crecimiento de una grieta en un sector de dos metros, y al contar con el estado de deformaciones de toda la serie en los 200 metros de túneles se puede cuantificar la cantidad de energía para mover estos grandes bloques, 8mm (tamaño de la grieta) en la dirección de túnel.

Se logran medir las dinámicas de las deformaciones de rocas bajo estructuras civiles como la cámara de chancado primario en la mina subterránea. Esta medición es bastante coherente con la frecuente “levantada de piso” que sufren estructuras de cierto tamaño en minería subterránea.

Del resultado de la extensa campaña de piloto tecnológico, re-diseño, adaptación y monitoreo realizado en División El Teniente se destaca, en acuerdo con los actores relevantes de Codelco:

- 1 La tecnología BOTDR cuenta con capacidad para monitoreo de infraestructura civil y cavernas mineras. Es una herramienta de alta precisión para este tipo de aplicaciones, con magnitudes en torno a los *mm*.
- 2 Es una herramienta de control al comportamiento del macizo rocoso.
- 3 El sistema (BOTDR) posee gran cobertura (opciones de instalación puntual, lineal, área o volumen).
- 4 Cuenta con sistemas de información de apoyo y gestión para el monitoreo: SidMil®.
- 5 El desempeño de los sensores en las distintas aplicaciones monitoreadas (falla N1, sala de Chancado 3, Tiros, pernos) fue evaluado positivamente bajo los siguientes criterios:
 - Operacional: basado principalmente en la disponibilidad en la toma de datos y de los sensores. Presenta valores en general bastante altos para la mayoría de las aplicaciones.
 - Monitoreo (deformación): Criterio adoptado por DET consiste en evaluar la detectabilidad de deformaciones según BOTDR (sobre error medición 0.01 %),

versus avance del frente de hundimiento. Según este criterio, detectabilidad de los sensores varía entre 45 y 100 metros de distancia con respecto al frente.

Con respecto a las mediciones en pilares se ha consensuado con personal de DET que este sistema apoyó a la seguridad de la operación al acusar precisamente los eventos mineros que influyen la estructura del pilar i.e. Avance de la minería o caving, tronaduras cercanas y correlación con la energía liberada medida a través de microsismos. Si bien esta aplicación fue interrumpida en forma anticipada el año 2010, mostró deformaciones claramente asociadas a la micro-sismicidad presente en la zona, la que a su vez se encuentra ligada a la actividad minera en la zona.

A solicitud y contrato ad-hoc desde DET, se repite la campaña de mediciones en pilares de la mina Esmeralda de División El Teniente el año 2012 con excelentes resultados de mediciones y alarmas operacionales. Se logra medir de manera separada la zona plástica de la zona elástica, centro, del pilar. El monitoreo de la estructura interna de los pilares de la Mina Esmeralda de División El Teniente habilitó, entre otras medidas, la producción en un nivel que había sido abandonado por los problemas de estabilidad geomecánica.

En la aplicación de mediciones de deformaciones axiales en Rio Blanco no se presentan resultados concluyentes dado el hecho que la División ha congelado el uso del sistema de monitoreo por falta de profesionales propios calificados y la salida de CODELCO de la propiedad de MICOMO (2012). Sin embargo la medición realizada en Marzo 2014 arroja significativas deformaciones en la estación analizada.

La continua y certera operación del sistema instalado en el túnel de conducción de agua a presión, ha revelado el buen desempeño del refuerzo realizado en este túnel. El sistema opera con un 80% de la cobertura espacial dados cortes de fibra durante la instalación y recientes cortes de los sensores expuestos a flujo de agua. Se asume que material flotante se infiltró en el túnel, arrastrando sensores de techo perpendiculares al flujo.

Como resultado de estas extensas campañas de validación y operación se han obtenido los siguiente derechos intelectuales:

- Software SidMil® inscrito en el DIBAM, registro de propiedad intelectual, inscripción Número: 199871, Año 2008.
- Patentes:
 - Publicación, el día 24 de diciembre 2010, en el diario oficial, del extracto de la solicitud de Patente Chilena No. 896-2010 Solicitante: MICOMO S.A. N/Ref.: PAT 1847/2009 "Sensor de deformaciones lineales en una estructura sólida".

- Publicación, el día 24 de diciembre 2010, en el diario oficial, del extracto de la solicitud de Patente Chilena No 906-2010 Solicitante: MICOMO S.A. N/Ref.: PAT 1848/2009 “Pernos de fortificación que comprenden fibras óptica para detección de deformaciones mediante reflectometría de dominio temporal óptico de Brillouin”. Aceptada a tramite con observaciones.
- Enviada a Elsevier: Procedimiento para determinar la deformación distribuida de un cable de fibra óptica en base a información espectral BOTDR.
- Se preparan y se arbitran publicaciones para congresos internacionales relacionados con generación de energía, operación de túneles y aplicaciones matemáticas.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

La tecnología BOTDR es una técnica industrial nueva, que ha requerido de grandes tiempos de desarrollo para bajar del laboratorio limpio a lograr monitorear la deformación en túneles mineros y sus tendencias hacia inestabilidades geomecánicas. Esta permite una excelente solución costo-efectiva en tiempo y resolución espacial para el monitoreo geomecánico de fibras de kilómetros de largo. Los resultados preliminares de laboratorio y de campo han mostrado la factibilidad y el uso potencial en muchas aplicaciones, tales como anclaje y reforzamiento de pernos y perforaciones incluso bajo presión de agua y en contacto con flujos lentos.

Las validaciones de estas aplicaciones se obtuvieron por primera vez en mayo de 2007, posteriormente se han realizado tesis de ingeniería civil y se ha implementado una constatación de trabajo con el Departamento de Ingeniería Civil y el CMM de la FCFM.

Las mediciones iniciales de mayo de 2013 a la fecha, en el túnel a presión de agua muestran fenómenos coherentes con la situación base. La resiliencia del sistema de mediciones bajo agua deja al sistema diseñado por MICOMO, bajo la dirección del autor, como el único sistema en el mundo que ha continuado operando en un túnel instrumentado y operativo desde Mayo 2013.

A la fecha, MICOMO continúa los trabajos para “independizar” la tecnología de los proveedores originales NTT, mediante la reformulación de drivers para operar con equipamiento europeo y canadiense y sistema operativo LINUX. De esta manera se logrará “empaquetar” el sistema, asegurando una comercialización menos particular para cada usuario. Se diseña un nuevo contrato con CMM para poder asegurar las mejoras continuas sobre este sistema y ya se opera con tecnologías de conmutadores ópticos canadienses.

Se propone que una innovación de sistemas de medición de una variable compleja como la salubridad estructural, debe conducir a una innovación en la operación de la minería, centrales eléctricas o carreteras. El valor agregado para el operador solo será demostrado en operaciones de largo plazo. De esta manera la innovación original sobrevivirá y sobrepasará en el tiempo y dominio tecnológico, a sus creadores.

La mayor aceptación del método de medición y sistema desarrollado a lo largo de 7 años, ha demostrado operar de manera bastante certera en su dimensión de aplicación de seguridad operacional y al mismo tiempo generar conocimiento para mejorar los diseños de pilares, pernos de fortificación, determinan la influencia de la minería sobre las estructuras habilitantes de ella.

- Mediciones originales de fallas, pilares y estructuras de soporte, túneles.
- Mediciones de deformaciones distribuidas en las cuales se determina la tasa de fracturación de un macizo: El túnel de servicios del Rajo Chuquicamata actuó como

un gran sensor de fracturación y crecimiento de estructuras pre-existentes al túnel.

- Desarrollo de variados tipos de sensores embebidos continuos, embebidos discretos, expuesto al proceso.
- Establecimiento de técnicas para la compensación por cambios de temperatura.

Los buenos resultados obtenidos en distintas aplicaciones mineras y civiles han catalizado la actividad de MICOMO con su nuevo dueño, Fundación Chile; y ya se cotizan aplicaciones como servicios para el monitoreo de estabilidad de taludes e impactos geomecánicos de la reapertura de una antigua mina en el norte de Suecia.

Dado el prestigio ganado en este túnel, MICOMO actualmente se encuentra desarrollando una propuesta de servicio para el mayor proyecto de generación hidroeléctrica de pasada en Chile, Alto Maipo. Se negocia la extensión del contrato de MICOMO para tareas de mantención del sistema y mediciones especiales durante el próximo vaciado, reparación y llenado del túnel de Tinguiririca.

Capítulo 7

Glosario

- **Abuttement stress:** Es el campo de esfuerzos o tensiones que se genera en las vecindades de un colapso generado por minería.
- **Aplicaciones:** Conjunto de circuitos de fibra óptica sensora asociados a un diseño en particular, que representan una sección o sector dentro de la mina o equipo.
- **AR:** Modelo auto-regresivo; la variables de salida depende linealmente de sus valores anteriores.
- **Back-Bone:** Se adopta este término para describir una vía de comunicaciones articuladora de otras subredes.
- **BOTDR:** *Brillouin Optical Time Domain Reflectometry*. Respuesta acústica (10-12 GHz) que es retrodispersada desde cada segmento de la fibra óptica estimulada con luz monocromática incidente.
- **BEDS:** *Brillouin Echo Distributed Sensing*. Se mide el echo Brillouin desde la fibra estimulada con una portadora que cambia su fase sumada a la luz incidente desde el otro extremo de la fibra.
- **BOTDA:** *Brillouin Optical Time Domain Analysis*. Se incrementa la respuesta acústica desde ambos extremos de la fibra inyectando una señal que actúa como estimuladora.
- **Circuitos:** Conjunto de sensores asociados a una aplicación, que representa una instalación de fibra óptica.
- **Cliente:** Empresa, división o grupo de trabajo independiente dentro del sistema, compuesto por una serie de aplicaciones y usuarios.
- **CMM:** Centro de Modelación Matemática, de la FCFM Universidad de Chile.
- **Dato strain:** Valor de strain entregado por el sistema BOTDR. Según contexto, puede referirse al strain obtenido en una medición particular o en varias mediciones consecutivas; puede referirse también al strain asociado a un punto específico de la fibra o bien a varios puntos dentro de un tramo de interés en la fibra.
- **Deformación o strain:** Se refiere al valor que indica el valor que una tensión o compresión de una estructura que en la mayoría de los casos será inducido por una estructura, roca, tubería al cable de fibra óptica adosada a ésta. El strain se expresa como la diferencia porcentual entre los largos de la fibra en una condición final y una inicial. De acuerdo al contexto, el strain puede referirse a la medición obtenida con el BOTDR o al valor real de estiramiento de la fibra.

- **Espectro:** Curva de potencia de la luz en función de la frecuencia. De acuerdo al contexto, puede referirse a la curva asociada a un punto de emisión o a una retrodispersión.
- **FCFM:** Facultad de Ciencias Física y Matemáticas de la Universidad de Chile.
- **Fibra de comunicación o acercamiento:** Corresponde a los tramos de fibra que no están adheridos a estructuras de interés, y cuya finalidad es simplemente actuar de comunicación óptica y acústica entre el analizador y la fibra sensora o entre tramos distintos de fibra sensora. Usualmente la fibra de comunicación se tiende sin tensión, por lo cual es, en principio, un referente a los cambios de temperatura en el medio a medir.
- **Fibra de Mono-Modo:** El centro de esta fibra es más delgado que la fibra multimodo y permite la propagación de solo la componente fundamental de la luz. Puede transmitir información a mayores velocidades y alcanzar mayores distancias.
- **Fibra sensora:** Corresponde a los tramos de fibra adheridos a estructuras que interesa monitorear.
- **FP:** Filtraje de partículas.
- **Hundimiento de Bloques o Caving (Block Caving):** Método de explotación subterránea aplicado a grandes yacimientos como los pórfidos cupríferos. A medida que los bloques diseñados van siendo hundidos y sus rocas mineralizadas extraídas, y el proceso progresa hacia niveles más profundos, se va formando un cráter de subsidencia en la superficie de la explotación, Se trata de un método de importante utilización, que puede ser empleado como método único, El Teniente Chile, o en combinación con explotaciones a cielo abierto como en El Salvador.
- **ISA:** *Instrument Society Of America*, parte de la AMERICAN NATIONAL STANDARD que normaliza la denominación de instrumentos según ANSI/ISA-5.1-2009.
- **LHD:** Pala mecanizada de reducido perfil de uso en minería subterránea.
- **Mediciones:** Resultados obtenidos a través del monitoreo BOTDR para los circuitos de fibra óptica instalados en las aplicaciones.
- **Molino SAG:** Molino Semi -Autógeno. Es un elemento clave de la molienda moderna que al operar con grandes diámetros genera mecanismos de ruptura de roca contra roca. Al incorporar una carga de medios de molienda como bolas de acero en su interior, se denomina Semi-Autógeno.

- **OFS:** Optical Fiber Sensing, sensaje de una variable física, temperatura, presión, deformaciones, vibraciones del medio en el cual se usan las propiedades y cambios de las características de propagación o retrodispersión de una fibra óptica.
- **Perfil:** Es la curva completa de strain vs. Distancia obtenida en una medición particular, donde la distancia se mide desde el extremo de la fibra en que se encuentra el analizador BOTDR.
- **Piping:** Sistemas de tuberías en cualquier instalación industrial.
- **Pre-fracturación:** Método de producción de grietas en un bloque de macizo rocoso inducidas a través de grandes presiones hidráulicas.
- **Presión Litoestática:** Presión ejercida por la columna de rocas situada sobre el nivel considerado.
- **Scattering:** Es un proceso físico en el cual una onda como la luz, es forzada a desviarse de una trayectoria recta por un medio no uniforme presente en su trayectoria.
- **Sensores:** Elemento compuesto uno o varios segmentos de fibra óptica, configurado para medir algún tipo de movimiento (deformación).
- **Shotcrete:** Mezcla de lechada de concreto y fibras plásticas, contiene partículas de gravilla de bajo tamaño que es proyectada a presión sobre la roca reforzada por mallas metálicas. mineral secundario.
- **SidMil®** Sistema de Información de Deformaciones Mineras en Línea. Sistema Integrado de algoritmos computacionales que interactúa con las rutinas del Analizador BOTDR , captura datos desde crudos de deformaciones, realiza filtrajes, selecciona tramos de orígenes de datos, realiza una re-estimación de los máximos de corrimiento de frecuencia Brillouin y representa la variable strain en función de una longitud de tramo de fibra, el strain de un sector dado , ie 30 cm , en función del tiempo y una representación integral de las deformaciones en las dimensiones de distancia y tiempo.
- **Usuarios:** Personas registradas en el sistema asociadas a un cliente, los cuales pueden acceder a las herramientas que el sistema posee.

Capítulo 8

Bibliografía

Bibliografía

- [Alvarez2008] ALEJANDRA V. ALVAREZ, *Mining Safety through on line Monitoring with the Brillouin Optical Time Reflectometry, I Internacional Congress on Automation in the Mining Industry Proceedings Automining*, 2008.
- [Araned2003] O. ARANEDA, *BOTDR Project, Kinugawa, Tokyo*, November 2003.
- [Araned2008] O. ARANEDA, *Lessons learned in cave mining at the El Teniente mine over the period 1999-2007, 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Lulea Sweden 9-11, June 2008*.
- [Baez2008] F. BAEZ, *Quiebres Tecnológicos en Codelco Minería Subterránea Continua, Seminario Corporativo Interdivisional*, 2008.
- [Beniscelli2010] J. BENISCELLI, *Probabilistic Stability Analysis of Mine Waste Slopes, MININ 2010 Proceedings*, 2010.
- [Bozzano2012] FRANCESCA BOZZANO, *Remote monitoring of deformation using Satellite SAR Interferometry, Geotechnical Instrumentation News*, 2012.
- [Cerutti2004] CARLO CERUTTI, *Visualización Tetra Dimensional Evolutiva de la Minería Subterránea, Minin*, 2004.
- [Chai2004] CHAI, J., WEI, S.M., CHANG, X.T. and LIU, J.X., *Monitoring deformation and damage on rock structures with distributed fiber optical sensing, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 41(2):413, Apr2004.
- [Cortez2013] R. CORTEZ, *Spatial resolution improvement of BOTDR strain measurements using spectral similarity, CMM*, 2013.
- [Cherry1957] COLIN CHERRY *On Human Communication. A Review a Survey and a Criticism J.Willey and Sons* 1957.
- [Dunnicliff2012] JOHN DUNNICLIFF *Types of geotechnical instrumentation and their usage ICE Manual of Geotechnical Engineering. Institution of Civil Engineers Ch 95* 2012.

- [E.Hoek1990] E.HOEK ,E.T. BROWN *Underground Excavations in Rock Institution of Mining and Metalurgy* 1990.
- [Fujihashi2003] K. FUJIHASHI *Development of a Road Disaster Monitoring System Using Optical Fiber Sensing Technology NTT TECHNICAL REVIEW*, 1(9) 2003.
- [Iten2011] MICHAEL ITEN *Novel Applications of Distributed Fiber Optic Sensing in Geotechnical Engineering (PhD)*, ETH Zurich 2011.
- [Katsuki2003] F. KATSUKI *The Experimental Research on the Health Monitoring of the Concrete Structures Using Optical Fiber Sensor International Symposium (NDT-CE 2003) Non-Destructive Testing in Civil Engineering* 2003.
- [MICOMOPat] MICOMO S.A, *Sensor de Deforcaciones Lineales en una Estructura Sólida*, PCT/IB2011/53699, Solicitud chilena NÂ°896-2010, 2009.
- [Morales2010] PEDRO A. MORALES, *Visión y Estado de la Automatización en la Industria Minera*, Proceedings Automining, 2010.
- [Mujica1982] LUIS FELIPE MUJICA, *A 1249 Lines HiFi Colour TV Projector*, Society for Information Displays, 1982.
- [Mujica1984] LUIS FELIPE MUJICA, *Experimental Study of Aural Discrimination of Speech and Non Speech (PhD Thesis)* Imperial College, London 1984.
- [Naruse2007] NARUSE, *Application of a distributed fibre optic strain sensing system to monitoring, changes in the state of an underground mine*, Measurement Science and Technology, 2007.
- [Pardo2006] CÉSAR PARDO, *Implementación Sistema BOTDR en Minería Subterránea*, Proceeding, MININ, 2006.
- [Puzrin2010] PUZRIN *Advanced Geotechnical Applications of Fiber Optics Sensing Geotechnical Instrumentation News* Dec2010.
- [Ravet2008] FAVIEN RAVET and XIAOYI BAO, *A Photonic Path to Structural Monitoring, La Physique au Canada*, 2008.
- [Rojas2009] EDUARDO ROJAS, *Evolución de la Fortificación y sus Desafós en Mina El Teniente, Taller Sostenimiento y Fortificación Minera Nuevas Tendencias Para Minería Profunda*, 2009.

- [Soto2013] G. SOTO, *An online two-stage method for Brillouin gain spectrum denoising and outliers removal in strain time series*, SUBMITTED TO ELSEVIER, 2013.
- [Sotomayor2012] JAVIER SOTOMAYOR, *Plataforma Computacional para el Aálisis de un Sensor de Desplazamientos en Túneles (Tesis Magíster)*, Facultad de Cienias Físicas y Matemáticas ,Departamante de Ingeniería Civil ,Universidad de Chile, 2012.
- [Standing2012] JAMIE STANDING, *Principles of geotechnical monitoring* ICE Manual of Geotechnical Engineering . Institution of Civil Engineers Ch 94 2012
- [Zang2008] H. ZANG *Performance Evaluation of BOTDR-based Distributed Fiber Optic Sensors for Crack Monitoring*, Structural Health Monitoring, 7(2):143-156, 2008

Capítulo 9

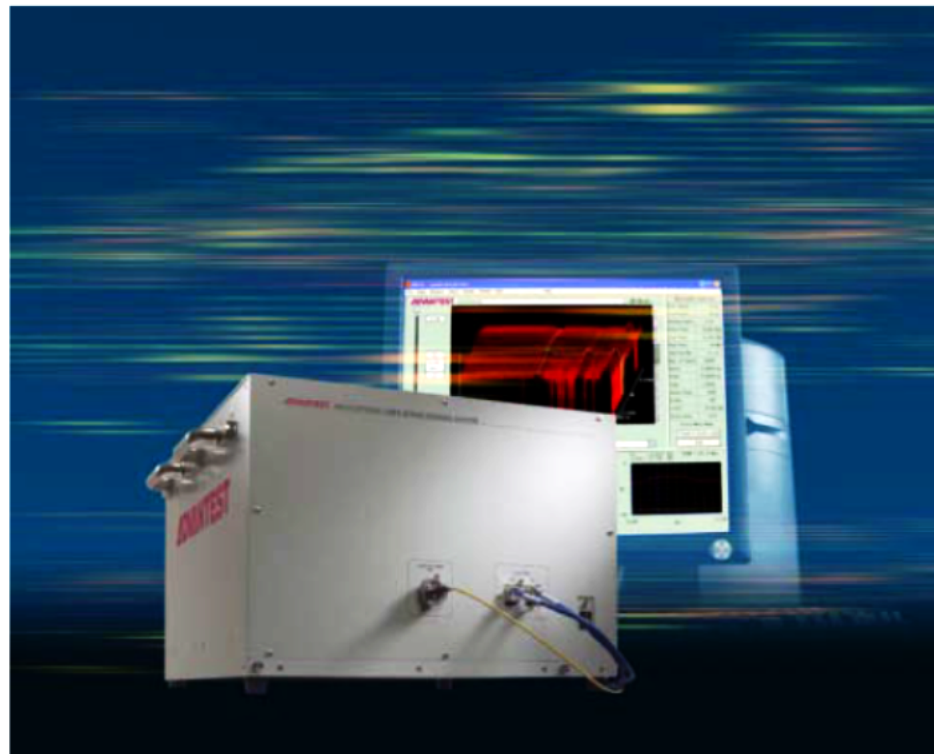
Anexos

9.1. Anexo 1: Manual Analizador BOTDR

ADVANTEST[®] Optical Fiber Strain Sensing System

N8510

Higher Performance, Lower Cost New N8510 Optical Fiber Strain Sensing System



N8510 is co-developed with NTT-INFRANET

Features

- * With its wide dynamic range, the N8510 offers 2-4 times the duplicability of previous systems.
- * With its wide dynamic range, the N8510 offers up to twice the monitoring range of previous systems
- * With its wide dynamic range, the N8510 offers measurements approximately 75% faster than previous systems, with no loss of duplicability.
- * The elimination of moving parts puts the N8510 at lower risk of mechanical failures and makes it highly reliable.
- * With a large capacity for data storage, the N8510 can make up to 100,000 simultaneous measurements-five times the capacity of previous systems.

Specification

Measurement	Strain distance distributions, Brillouin scattering spectrum, Brillouin scattering loss distribution				
Sampling	Max 100,000 points				
Measurement frequency span	1, 2, 5, 10, 20, 50MHz				
Average time setting	2 ⁻¹⁰ ~2 ⁻²⁴				
Strain unit	μ ε, %				
Wavelength	1.55 μ m band				
Strain measurement range*1)	100 μ ε ~ 15000 μ ε				
Repeatability*2)	< ± 100 μ ε				
Linearity *3)	± 4 × 10 ⁻³				
Pulse width	10ns	20ns	50ns	100ns	200ns
Dynamic range*4)	3.5dB	7.5dB	11.5dB	14.5dB	16.5dB
Distance accuracy	± (5.0X10 ⁻⁵)XDistance(m)+0.2m-2Xreading resolution(m)) Without refraction ratio setting error.				
Optical connector	FC/ Angled PC (ex factory) (With FC-SC conversion connector)				
Laser class	Class1 (IEC60825-1:2001)				
AC Power input	AC100V-AC120V, 50Hz/60Hz, AC220V-AC240V, 50Hz/60Hz (Universal)				
Dimensions	Approx. 430(W)X310(H)X500(D)mm				
Mass	Approx. 29kg or less				
Operation conditions	temperature +10~+40°C humidity 85% or less (no condensation)				
Storage conditions	temperature 0~+50°C humidity 85% or less (no condensation)				

*1) At SMF1.3 μ m (ITU-T G.652)

*2) Average times: 2⁻¹⁴, frequency step: 5MHz, SMF(ITU-T G.652) 10 consecutive data measurement strain of the standard deviation(2σ)

*3) Average times: 2⁻¹⁴, frequency step: 5MHz, SMF(ITU-T G.652) measurement linearity strain (Without optical-fiber character change)

*4) Average times: 2⁻¹⁴, frequency step: 5MHz, SMF(ITU-T G.652) Strain measurement Repeatability < ± 100 μ ε optical fiber loss

Structure of N8510

N8510	N8510 N8510 Control software
Personal computer*5)	OS: Windows XP Professional SP2 CPU: Pentium4 1.5Ghz and more (Recommendation over Pentium4 2.8Ghz) memory: 768MB and more (Recommendation over 1GB) HDD: install Disk space 10MB and more (Recommendation data disk space 50GB and more) Display: XGA and more Drive: CD-ROM drive others: mouse key-board
Star Fabric Board*5)	Adpci1553 (Manufactured by Advanet Inc)
Star Fabric cable* 5)	5m or less (Recommendation CAT5E and more)

*5) Without N8510

A

9.2. Anexo 2: Manual Conmutador Óptico



DATE: Nov. 14. 2006

NO. PNJSE-0009-53-01

Messrs. _____

SPECIFICATION

FOR

FSS-0050-E

Order : _____

Project : _____

Reference: _____

Prepared by M Tanaka

Technical Group
Production Managing Department
Fiber Optics Components & System Division

Approved by T. Arikawa
Manager.

Technical Group
Production Managing Department
Fiber Optics Components & System Division

Fujikura Ltd.

1. Abstract

This is the specification for the optical switch type, FSS-0050-E. FSS-0050-E is suitable for use in the automatic and efficient optical measurement of optical components. It is also suitable for use in the surveillance of optical fiber cable network.

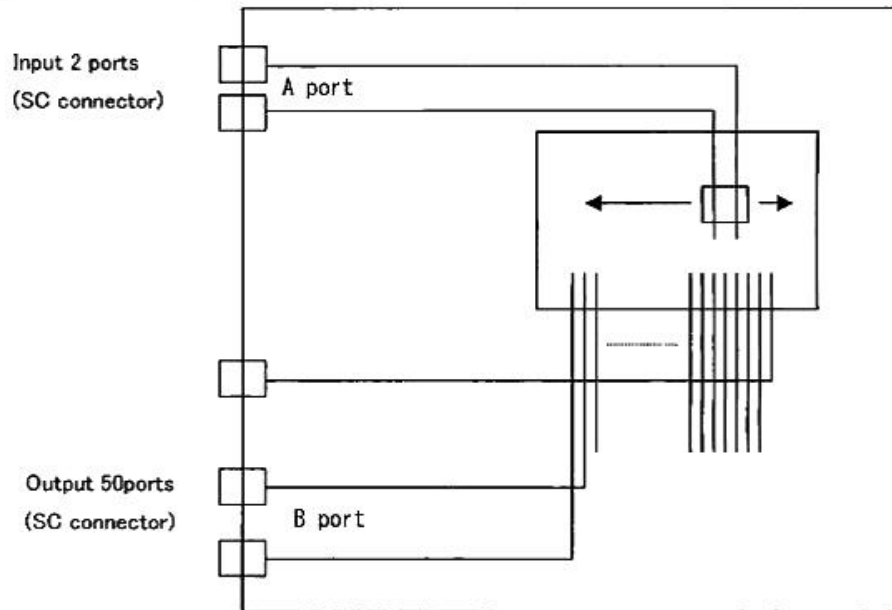
FSS-0050-E is a low connection loss, high reflection loss optical switch with the capability of switching between 2 input ports and 50 output ports. FSS-0050-E is characterized by its small fiber misalignment. SC connectors (one touch detachable) are used for the input/output connectors. Customer can also specify other types of connectors.

FSS-0050-E can be operated by the following 2 ways:

- a) Manual control by using the touch panel.
- b) Remote control by using computer through RS-232C or GP-1B communication system.
For remote control, software can be developed for automatic measurement and recording of data by interfacing with multiple measurement equipment.
(Please contact us regarding the software application.)

2. Specification

Figure 1 shows the optical connection of the FSS-0050-E.



<Figure 1>

Table 1 shows the optical characteristics and operating conditions of FSS-0050-E.

<Table 1>

	Item	Characteristic etc.	Remarks
Optical characteristic	Insertion loss (A→B)	≤ 1.2dB	@1310,1550nm
	Return loss (A)	≥ 45dB	@1310,1550nm
	Internal return loss of optical switch (Excluding connector)	≥ 55dB	@1310,1550nm (Figure 1 shaded area).
Environmental conditions	Temperature	0 to +55 C	
	Relative humidity	20 to 95%	
Power supply	Power supply	100 to 240V.AC	
	Power consumption	Max 40W	
Communication system		RS-232C / GP-IB	
Package size		Can be installed to 19 inch rack	2U(EIA rack standards)
Reference drawing sheet		Figure 2	

9.3. Anexo 3: Manual Fibra Óptica Sensora IC-LOCK

JBT-02853 1/4



DATE Nov.6,2006

NO. JBT-02853

Messrs. _____

SPECIFICATION

FOR

OPTICAL FIBER SENSOR CABLE

SM-10/125-05 x 4C

Project : _____

Prepared by K. Tabe
K. TABE
Design Engineering Section
Telecommunication Engineering Department
Optical Fiber and Cable System Division

Approved by K. Hosokawa
K. HOSOKAWA
Design Engineering Section
Telecommunication Engineering Department
Optical Fiber and Cable System Division

Fujikura Ltd.

1. GENERAL :

This specification covers the requirements for the optical fiber cable.

The cable contains 4 singlemode optical fibers, referred to Japanese Industrial Standard* and Fujikura Standard.

- * JIS C 6820 General rules of optical fibers
- JIS C 6823 Measuring methods for attenuation of optical fibers
- JIS C 6825 Test methods for structural parameters of single-mode optical fibers
- JIS C 6835 Silica glass single-mode optical fiber
- JIS C 6838 Fiber ribbons

2. DESIGNATION OF CABLES :

OPTICAL FIBER SENSOR CABLE SM·10/125·05 × 4C

3. TEMPERATURE AND HUMIDITY :

The cable shall retain the optical properties, detailed in the present specification, over the following condition.

Temperature : -20°C to +60°C
Humidity: 0 to +100%

4. CABLE STRUCTURE :**4.1 Optical fiber**

Item		Unit	Construction
Type		-	Singlemode optical fiber
Material	Core	-	Silica glass doped with Germanium
	Cladding	-	Silica glass
Mode field diameter		μm	9.5 ± 1
Cladding diameter		μm	125 ± 2
Concentricity error		μm	≤ 1
Noncircularity of fiber		%	≤ 2
Cut-off wavelength (λ _c)		μm	1.10 ~ 1.35
Primary coating	Material	-	UV curable material
	Diameter	μm	250 ± 15
Ribbon jacketing	Material	-	UV curable material
	Structure	-	Consist of 4-fiber cores as shown in Figure 1
	Size	mm	1.1 ± 0.12 × 0.3+0.08, -0.065

4.2 Cable

Item		Unit	Construction
No. of core		-	4
Optical fiber		-	cf. Clause 4.1
Strength member	Material	-	Stainless wire
	Size	No./mm	1/0.3
	No.	-	2
Stranding		-	cf. Figure 2
sheath	Material	-	Nylon
	Color	-	Black
Cable diameter (approx.)		mm	5.0W × 1.3H
Weight (approx.)		kg/km	8

※ Suitable fillers may be included if necessary

5. OPTICAL CHARACTERISTICS :

Item	Terms of measurement	Characteristics
Attenuation	$\lambda=1550\text{nm}$	$\leq 0.3\text{dB/km}$

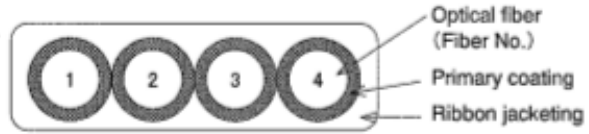
6. MECHANICAL CHARACTERISTICS :

Item	Characteristics
Permissible tensile force	Max.70N
Permissible bending radius	Min.30mm

7. PACKING :

Each factory length of the cable shall be coiled on a suitable reel.

After completion of the tests, both ends of the cable shall be sealed by a suitable method. The cable ends shall be fastened so as not to protrude beyond any portion of the reel and to prevent the cable from becoming loose in transport.



Not to scale

Figure 1 Cross-section of optical 4-fiber ribbon

Not to scale

Table 1 Color scheme of fiber ribbon

Ribbon No.	Coloring
1	Blue – White – Brown – Gray

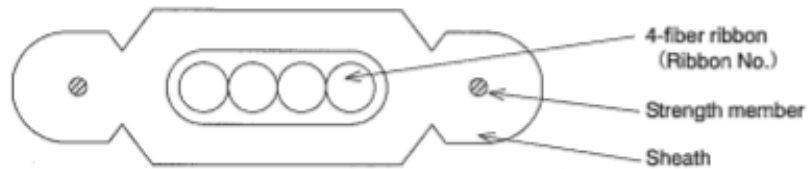


Figure 2 Cross-section of optical fiber cable

Not to scale

-END OF SPECIFICATION-

9.4. Anexo 4: Manual Fibra Óptica Sensora Embebida

Specification of optical fiber cable for measuring the strain

1. Structure

1.1 Optical fiber

item		specifications
Attribute		Single mode fiber (ITU T G.652)
Mode field diameter		$9.2 \pm 0.7 \mu\text{m}$ (@1310nm)
Cladding diameter		$125 \pm 1 \mu\text{m}$
Cladding non-circularity		Less than 2%
Core concentricity error		Less than $0.8 \mu\text{m}$
Cut-off wavelength		Under 1,350nm
Jacket	material	UV cured acrylic resin
	diameter	$0.25 \pm 0.10\text{mm}$

1.2 Cable

item		specifications	
		Type A	Type B
FRP jacket	material	Aramid fiber FRP	Aramid fiber FRP
	diameter	$0.6 \pm 0.1\text{mm}$	$1.6 \pm 0.1\text{mm}$
Polyethylene jacket	diameter	$2.0 \pm 0.3\text{mm}$	$6.0 \pm 0.3\text{mm}$
	depth of emboss	$0.3 \pm 0.1\text{mm}$	$0.6 \pm 0.2\text{mm}$
	pitch of emboss	$6 \pm 1\text{mm}$	$6 \pm 1\text{mm}$
Weight		Approx. 3g/m	Approx. 23g/m

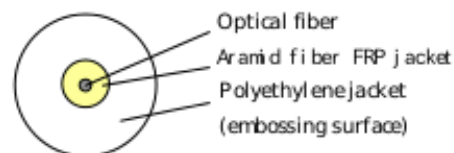
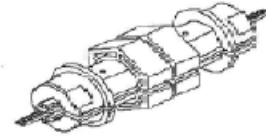
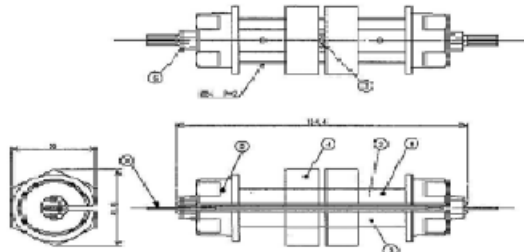


Fig Structure of optical fiber cable

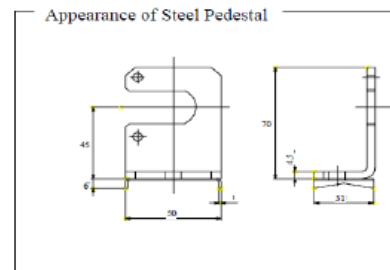
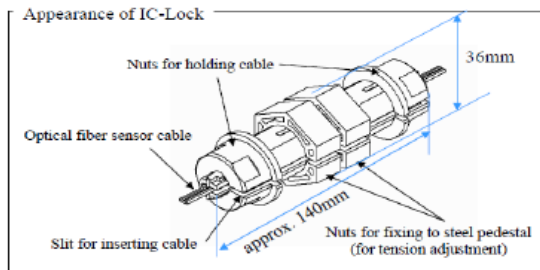
2. Optical characteristic

Attenuation coefficient	Less than 1.0dB/km at 1550nm
-------------------------	------------------------------

9.5. Anexo 5: Sistema de Anclaje Discreto IC-LOCK



No.	Part name	Quantity
(B)	Bolt	1
(C)	Glass Bar (The upper side)	1
(D)	Glass Bar (The lower side)	1
(E)	Washer (size 4)	2
(F)	Washer (size 1)	2
(G)	Taper block	2
(H)	Slipper screw	2
(I)	Optical fiber sensor cable	—
Product Name		IC Lock
File No.		MC-C007-000



9.6. Anexo 6: Comunicado de Prensa, Creación MICOMO S.A



Corporación Nacional del Cobre de Chile
Casa Matriz
Huérfanos 1270
Casilla 150-D
Santiago, Chile

Fax: 690 30 59
www.codelco.com

Fax: 690 30 59
www.codelco.com

COMUNICADO DE PRENSA

Codelco y líder tecnológico japonés NTT crean MiCoMo, una nueva empresa conjunta para la aplicación de Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) avanzadas en los procesos mineros

Con la creación de este joint venture inaugurado hoy en Santiago en un acto presidido por el Presidente Ejecutivo de Codelco, José Pablo Arellano, y el Presidente Ejecutivo de NTT, Norio Wada, se busca incorporar y aplicar las tecnologías de frontera desarrolladas y aplicadas por Nippon Telegraph and Telephone Corporation, NTT, y adaptarlas para los requerimientos de los procesos mineros de las grandes operaciones productivas de Codelco y de la industria minera mundial.

Santiago, 10 de abril de 2006.- Codelco, el mayor productor de cobre del mundo, y la empresa japonesa líder en telecomunicaciones Nippon Telegraph and Telephone Corporation, NTT, celebraron hoy el acto inaugural de la empresa conjunta *MiCoMo, Mining Information Communications and Monitoring S.A.*, cuyo objetivo es adaptar e incorporar tecnologías de información y comunicación desarrolladas por el gigante nipón a las necesidades de los procesos mineros de Codelco para incrementar la eficiencia y seguridad de sus operaciones productivas.

Esta asociación forma parte del modelo de innovación de Codelco, mediante el cual establece alianzas con empresas líderes a nivel mundial, y que son complementarias a sus capacidades, con el fin de desarrollar tecnologías adaptadas a las necesidades de la minería, compartiendo los riesgos y oportunidades que ello conlleva.

Luego de la inauguración de esta empresa -que culmina una etapa de exitosa colaboración iniciada el 2004 para desarrollar proyectos pilotos-, José Pablo Arellano, Presidente Ejecutivo de Codelco, señaló que "hemos iniciado con NTT una alianza que permitirá la incorporación de tecnologías avanzadas de información y comunicación adaptadas a nuestros procesos, que posibilitará un mayor uso de nuestra infraestructura TIC para incrementar la eficiencia y seguridad de nuestras operaciones mineras y hacer viable nuestro desarrollo

minero futuro". En tanto, el Presidente Ejecutivo Norio Wada, expresó que: "NTT está tremendamente entusiasmado por el potencial impacto que tendrá la transferencia directa de las más avanzadas tecnologías de sus laboratorios, a este nuevo nicho de mercado que es la industria minera. Estimo que MiCoMo nos abre a un mundo de nuevas aplicaciones para las tecnologías de NTT y sus consecuentes oportunidades junto a Codelco".

Nuevos Servicios TIC para la Minería

Codelco y NTT han trabajado en cuatro proyectos piloto durante dos años, que son los siguientes:

- El sistema de control remoto de la operación minera vía red fotónica se está aplicando experimentalmente en la División Andina de Codelco con mucho éxito, ya que permite transmitir gran cantidad de información a través de una fibra óptica, incluyendo: imágenes de alta definición, audio y data sin interrupciones, con un mínimo de atraso de las señales sin interferencia. En Diciembre 2005, se realizó por primera vez en la historia de la minería mundial, una demostración en la cual un trabajador de la División Andina operó en línea desde Tokio los martillos picadores de rocas que están al interior de la mina subterránea en Chile.
- Otro proyecto experimental que ha generado muy buenos resultados es el sensor de desplazamientos mecánicos por fibra óptica que utiliza la tecnología BOTDR (*Brillouin Optical Time Domain Reflectometry*) y que se aplica en División El Teniente para evaluar las alteraciones o deformaciones que puede sufrir un túnel debido a las excavaciones normales de la explotación minera. El propósito es contar con un sistema adicional que permita incrementar la seguridad de los túneles de minas subterráneas.
- Una iniciativa muy importante para mejorar el resguardo del medio ambiente y la salud de las personas, es la que se está aplicando en forma experimental en la mina Chuquicamata de la División Codelco Norte. NTT creó un sensor para medir la cantidad de polen en el ambiente, y un sistema de predicción de hasta 48 horas de su concentración, el que se utiliza en Japón para advertir a la gente de riesgo alérgico. En Codelco este sistema se adaptó a la faena minera para medir el material particulado que se genera como consecuencia de la tronadura, el rompimiento de rocas y el movimiento de materiales en grandes camiones y palas.
- En esta misma mina, también se está aplicando tecnología inalámbrica en un rango de frecuencia superior al comercial (26 GHz), que permite la vigilancia visual remota de los movimientos dentro de la excavación para mejorar la eficiencia y seguridad de la operación, además de establecer una red vía WIPAS (*Wireless IP Access System*) que se caracteriza por tener una alta velocidad de transmisión de data (velocidad máxima de hasta 80Mbps) y que facilita el manejo de información en línea.

Alianza Tecnológica Estratégica

La creación de *MiCoMo* se realiza con un capital inicial de tres millones de dólares de los cuales el 66% es aportado por Codelco mientras que el 34% restante es aportado por el Grupo NTT a través de sus empresas subsidiarias NTT Advanced Technology Corporation y NTT Leasing Co. Ltd. en partes iguales (17% cada uno).

MiCoMo permitirá a NTT expandir la aplicación de sus tecnologías de información y comunicaciones más avanzadas a la minería, un sector ajeno a su quehacer principal. En tanto que para Codelco le permitirá contar con nuevas soluciones tecnológicas inexistentes hoy día en el mercado para el mejoramiento continuo de su eficiencia operacional, contribuyendo así a consolidar su liderazgo mundial en el sector minero.

MiCoMo nace con la visión de potenciar la minería masiva remota en el mundo, para un mejor cuidado y calidad de vida de las personas y una mayor eficiencia productiva en la explotación de los recursos naturales.

NTT, el Gigante Nipón

Nippon Telegraph and Telephone Corporation, NTT, es una empresa líder en el sector de las telecomunicaciones en Japón. NTT fue establecida como una corporación estatal en 1952. En 1985, el Estado japonés decidió abrir al mercado el 40% de la propiedad de la empresa, manteniendo el 60% restante. En 1999, las operaciones de NTT fueron reorganizadas en un grupo de empresas transfiriendo su negocio principal a tres subsidiarias 100% propias: NTT East, NTT West y NTT Communications.

Actualmente, el Grupo NTT es un holding con 430 empresas, con más de 200,000 empleados y ventas anuales sobre los 100 billones de dólares, tomando en cuenta estas tres empresas así como NTT DoCoMo (operador inalámbrico) y NTT Data (integrador de sistemas). Cabe destacar que en los laboratorios de NTT trabajan cerca de tres mil investigadores con un presupuesto anual de 3 billones de dólares.

Dirección de Comunicaciones