



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA



**METODOLOGÍA TEÓRICO-PRÁCTICA PARA LA MEDICIÓN DE ESFUERZOS POR
CELDAS HI (HOLLOW INCLUSION) EN MACIZO ROCOSO PRIMARIO, DIVISIÓN EL
TENIENTE.**

POR

Francisco Javier Rivera Sáez

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar
al título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía

René Esteban Gómez Puigpinos

Profesional Supervisor

Rodrigo Aurelio Zepeda Araya

Julio 2023

Concepción (Chile)

© 2023 Francisco Javier Rivera Sáez

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

DEDICATORIA

A mis abuelos, Florinda Contreras Parra y Ricardo Sáez Sáez, por todo el apoyo y el cariño incondicional, además de la confianza que siempre han depositado en mí. Espero abuela que me vea desde el cielo y siempre se sienta orgullosa de lo que gracias a usted soy.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa en la realización de esta memoria. Sus apoyos y consejos fueron fundamentales para culminar este importante proyecto.

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor, Rodrigo Zepeda, por su tiempo y orientación experta en las etapas de este trabajo. Sus conocimientos y disposición para compartir sus ideas fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación. De la misma manera agradecer al equipo con el que trabajé estos meses, Edgar Retamal, Patricio Cisternas, Alejandro Ortiz, Emanuel Quiroz y Luis Avendaño, por todo su apoyo y disposición.

Además, quiero expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas externas al círculo laboral y personal universitario, Patricio Cavieres, Alejandro Hopper y Sergio Gaete, por su valiosa asistencia y orientación en la elaboración de este trabajo. Sus comentarios, sugerencias y guía fueron de gran ayuda para mejorar la calidad de la tesis.

También quiero agradecer a Rene Gómez por su contribución en el análisis y la revisión crítica de este trabajo. Sus comentarios y su experiencia en el campo fueron invaluable para enriquecer el contenido y fortalecer los argumentos presentados.

No puedo pasar por alto agradecer a mis amigos, Verónica Gatica, Olaya Calderón, Laura Mardones, Alex Riveros, Joaquín Nayen, Víctor Gatica, Esteban Bustos y Bastián Valenzuela, quienes me brindaron su apoyo académico, moral y su motivación durante todo este proceso. Además de hacer el paso por la universidad una experiencia inolvidable.

Un agradecimiento especial va dirigido a mi familia, por su amor incondicional, comprensión y constante apoyo. Gracias por estar a mi lado en cada paso del camino y por creer en mí incluso cuando las cosas se volvían difíciles.

A todos y cada uno de ustedes, mi más profundo agradecimiento. Sin su apoyo, este logro no hubiera sido posible. Su generosidad y dedicación han dejado una huella imborrable en mi camino académico y personal.

¡Muchas gracias a todos!

Francisco Rivera Sáez.

RESUMEN

Actualmente en el yacimiento El Teniente se está realizando una campaña de mediciones de esfuerzos para poder obtener datos in situ de la magnitud, orientación y dirección de estos, y así poder tomar las decisiones y validaciones respectivas. En base al contexto anterior, el presente estudio realiza un desglose teórico de la técnica de relajación para medición de esfuerzos a través del instrumento llamado celda Hollow Inclusion (HI), en donde se explica el manejo de los datos obtenidos por el instrumento y como llegar al tensor de esfuerzos. Por otro lado, se estructura un procedimiento práctico, con el cual se busca obtener datos de la mayor calidad posible, creando un checklist operacional y entregando información para la revisión y análisis de los datos.

Adicionalmente se crean dos códigos en el lenguaje de programación Python, el primero grafica los datos obtenidos directamente por la celda, transformando los milivolts a microstrains e ilustrando la evolución de cada uno de los canales de la celda. El otro código recoge la base teórica y realiza la estimación del tensor de esfuerzos en las coordenadas locales de la celda (x,y,z), y en coordenadas totales (E,N,C), además de calcular los esfuerzos principales, las direcciones principales y los parámetros necesarios para la estimación de estos, por ejemplo, los factores de corrección K.

Por otro lado, se realizó un análisis de sensibilidad con un caso de estudio, específicamente en el proyecto Diamante, subnivel de ventilación, cruzado 1, donde se realizó una medición de esfuerzos con celdas HI. En base a los resultados se registró el cambio en las magnitudes de los esfuerzos principales a medida que se variaba la razón de Poisson y el módulo de Young (parámetros de entrada para la estimación de los esfuerzos principales), concluyendo que una variación en el módulo de Young de 2 [GPa] se refleja en una diferencia de esfuerzos de aproximadamente de 2 [MPa]. Por otro lado, un cambio en 0.1 en la razón de Poisson reflejaría una diferencia de 10 [MPa] en el esfuerzo principal mayor.

Se realizó también el análisis estadístico de cada canal, asignándole un error cuantificado producido por la estimación mediante mínimos cuadrados.

Finalmente se agregó al código un gráfico que muestra los puntos asociados a las mediciones y a las estimaciones, además del valor del error o diferencia que hay entre estos puntos.

Se logro contribuir significativamente al entendimiento de la medición de esfuerzos al proporcionar la base y explicación teórica, especificar la metodología práctica y además proporcionar herramientas de análisis para la medición de esfuerzos en macizos rocosos primarios. Los hallazgos y las herramientas desarrolladas tienen el potencial de mejorar la información y toma de datos que se realizan en la actualidad.

ABSTRACT

Nowdays in the deposit El Teniente a campaign of stress measurements has been made to obtain in situ data of the magnitude, orientation and direction of these and so being able to take decisions and their respective validations. In this previous context the present study makes a theoretic breakdown of the relaxation technique for stress measurement through an instrument called Hollow Inclusion (HI), where the handling of the data obtained by the instrument is explained and how to get the stress tensor. On the other hand, a practical procedure is structured, with which it seeks to obtain data of the highest possible quality, creating an operational checklist and delivering information for its review and data analysis.

Additionally, two codes in the Python programming language are created, the first plots the data obtained directly from the cell, transforming the milivolts to microstrains and illustrating the evolution of each one of the channels of the cell. The other code receives the theoretic base and do the stress tensor estimation in the local coordinates of the cell (x, y, z), and in total coordinates (E, N, C), besides of calculating the principal stresses, the main directions and the necessary parameters to estimating these, for example, the correction factors K.

Furthermore, a sensitivity analysis is made with a case study, specifically in the Diamante Project, ventilation sublevel, crosscut 1, where a stress measurement is made with HI cell and based on the results the change of the magnitudes of the main stresses was registered as the Poisson's ratio was changing and the Young's modulus, concluding that a variation of the Young's modulus of 2 [GPa] reflects approximately a difference of stress of 2 [MPa]. On the other side, a change of 0.1 in the Poisson's ratio produces a variance of 10 [MPa] in the major principal stress.

Also, a statistical analysis of each channel is done, assigning a quantized error produced by the estimation through Least Squares.

Finally, it's also added a code of a plot that shows the points associated to the measurements and estimations and the error value or difference that exists between these points.

It was achieved to significantly contribute to the understanding of stress measurement by providing the theoretical base and explanation, specifying the practical methodology and giving analysis tools for the stress measurement in primary rock masses. The findings and tools developed have the potential to improve the information and data collection that are currently done.

TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	OBJETIVOS.....	2
1.1.1.	Objetivo General.....	2
1.1.2.	Objetivos Específicos.....	2
1.2.	ALCANCES Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO	3
2.	ANTECEDENTES.....	4
2.1.	DIVISIÓN EL TENIENTE	4
2.2.	LITOLOGÍA DET.....	5
2.3.	TECNICAS DE MEDICIÓN DE ESFUERZOS EN LA DET	6
2.3.1.	Acoustic Emission (AE).....	6
2.3.2.	Celdas Hollow Inclusion (HI)	9
3.	METODOLOGÍA	12
3.1.	FUNCIONAMIENTO CELDA HI Y TOMA DE DATOS	13
3.2.	CONSTANTES ELASTICAS DE LA ROCA	15
3.3.	FACTORES DE CORRECCIÓN K (K FACTORS)	16
3.4.	MATRIZ PARA ESTIMAR ESFUERZOS, COORDENADAS LOCALES.....	16
3.5.	MATRIZ PARA ESTIMAR ESFUERZOS, COORDENADAS TOTALES.....	19
3.6.	SOLUCIÓN PARA ESTIMACIÓN DEL TENSOR DE ESFUERZOS	23
3.7.	CÁLCULO DE ESFUERZOS PRINCIPALES	26
3.8.	CÁLCULO DE DIRECCIONES PRINCIPALES	28
3.9.	PROCEDIMIENTO MEDICIÓN DE ESFUERZOS CON CELDAS HI	30
3.9.1.	Definición de Sitio de Medición	31
3.9.2.	Parámetros del Pozo.....	32
3.9.3.	Gestión de Recursos y Servicios	33
3.9.4.	Perforación de Pozo de 15.24 [cm] de Diámetro.....	33
3.9.5.	Análisis del Testigo de 15.24 [cm].....	33
3.9.6.	Perforación Concéntrica de 38 [mm] de Diámetro.....	35
3.9.7.	Análisis del Testigo de 38 [mm] y Definición de Ubicación de la Celda	35
3.9.8.	Preparación del Pozo de 38 [mm]	36
3.9.9.	Preparación de Celda HI y Resina.....	36
3.9.10.	Instalación de Celda HI.....	41
3.9.11.	Fraguado de la Resina.....	43
3.9.12.	Overcoring	44
3.9.13.	Ensayo Biaxial	47
3.9.14.	Entrega de Datos e Información	49
3.10.	CHECKLIST OPERACIONAL PARA MEDICIÓN POR CELDAS HI	51
4.	RESULTADOS.....	52
4.1.	SOFTWARE Y CODIGOS DESARROLLADOS.....	52

4.1.1.	Software graficador μ strain vs tiempo	52
4.1.2.	Código para cálculo de tensores y esfuerzos principales	53
5.	ANÁLISIS DE DATOS	54
5.1.	Gráficos μ strain vs tiempo	54
5.2.	Análisis de Sensibilidad	55
5.3.	Análisis del Error en la Estimación	57
6.	CONCLUSIONES	59
7.	REFERENCIAS	60
8.	ANEXOS	62
	ANEXO A. Cálculo de factores de corrección K.....	62
	ANEXO B. Instalación para sistema de medición de avance overcoring	66
	ANEXO C. Procedimiento de instalación y recopilación de información con Celda HID	68
	ANEXO D. Checklist operacional para medición de esfuerzos con celdas HI	71
	ANEXO E. Código programa graficador de datos celda HI	76
	ANEXO F. Códigos para estimación de esfuerzos	83
	ANEXO G. Análisis de gráficos μ strain vs tiempo.....	90
	ANEXO H. Análisis de sensibilidad esfuerzos principales menor e intermedio.....	97

LISTA DE TABLAS

TABLA 3.1: CONEXIONES SEGÚN CANAL Y COLOR A UNIDAD LECTORA.	45
TABLA 5.1: DEFORMACIONES REGISTRADAS CASO DIAMANTE XC1 SNV.	55
TABLA 8.1: CHECKLIST OPERACIONAL ETAPA DE PRE-LABORES.	71
TABLA 8.2: CHECKLIST OPERACIONAL ETAPA DE PRE-OVERCORING.	72
TABLA 8.3: CHECKLIST OPERACIONAL ETAPA DE OVERCORING.	73
TABLA 8.4: CHECKLIST OPERACIONAL ETAPA DE ENSAYO BIAXIAL.	74
TABLA 8.5: CHECKLIST OPERACIONAL ETAPA DE ENTREGA DE INFORMACIÓN.	75

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: UBICACIÓN GEOGRÁFICA MINA EL TENIENTE.....	4
FIGURA 2.2: MODELO GEOLÓGICO DE EL TENIENTE CON UNIDADES LITOLÓGICAS Y SUPERFICIE DE CONTACTO.....	5
FIGURA 2.3: MEDICIÓN DE ESFUERZOS CON EMISIONES ACÚSTICAS. (A) ESQUEMA GENERAL ENSAYO AE. (B) MANIFESTACIÓN DEL EFECTO KAYSER	6
FIGURA 2.4: CURVA TÍPICA DE LOS REGISTROS DE EMISIONES ACÚSTICAS ACUMULADAS.....	8
FIGURA 2.5: ORIENTACIÓN DE LOS STRAIN GAUGES EN LA CELDA	9
FIGURA 2.6: CURVAS DE RESPUESTA OBTENIDAS CON CELDA CSIRO HI	10
FIGURA 2.7: PROCEDIMIENTO GENERAL CELDA HI.....	11
FIGURA 3.1: ESQUEMA DE METODOLOGÍA GENERAL	13
FIGURA 3.2: CIRCUITO BÁSICO PUENTE DE WHEATSTONE.....	14
FIGURA 3.3: REPRESENTACIÓN DE POZO CON SUS COORDENADAS LOCALES, Y SUS PROYECCIONES EN LAS COORDENADAS TOTALES	20
FIGURA 3.4: SOBRE PERFORADO EN POZO DE 15.24 [CM].....	34
FIGURA 3.5: TOLERANCIA EN LA INCLINACIÓN DEL CORTE AL FONDO DEL POZO	34
FIGURA 3.6: ZONA DE INSTALACIÓN CELDA HI.....	35
FIGURA 3.7: PROCESO DE LIMPIEZA DE POZO DE 38 [MM]	36
FIGURA 3.8: DESBASTE DE TOPES DE INSTALACIÓN CELDA HI.....	37
FIGURA 3.9: ESQUEMA DE LONGITUDES CELDA HI	37
FIGURA 3.10: COMPONENTES E INSUMOS DE LA RESINA PARA INSTALACIÓN DE CELDA HI.....	39
FIGURA 3.11: ALTURA CORRESPONDIENTE PARA EL LLENADO DE LA CELDA HI CON RESINA	40
FIGURA 3.12: UNIÓN PISTÓN-CELDA	41
FIGURA 3.13: MARCAJE EN SET DE BARRAS DE LIMPIEZA	41
FIGURA 3.14: CONFIGURACIÓN DE MULTITESTER PARA MEDICIÓN DE CONTINUIDAD	42
FIGURA 3.15: CABLE AL INTERIOR DE LA CELDA QUE INDICA EL LECHADO COMPLETO.....	43
FIGURA 3.16: GRÁFICO DE COMPORTAMIENTO DE RESINA	44
FIGURA 3.17: CONEXIÓN DE CABLES A UNIDAD LECTORA.....	45
FIGURA 3.18: DIMENSIONES DE CÁMARA BIAxIAL Y MUESTRA DE MEMBRANA	47
FIGURA 3.19: MARCAJE EN TESTIGO DE 15.24 [CM] EN UBICACIÓN DE CELDA HI.....	48
FIGURA 3.20: EJEMPLO RESPUESTA ENSAYO BIAxIAL	49
FIGURA 4.1: DATOS OUTPUTS DE CELDA HI.....	52
FIGURA 4.2: INTERFAZ PROGRAMA GRAFICADOR DE DATOS ENTREGADOS POR CELDA HI.....	53
FIGURA 4.3: GRÁFICO OBTENIDO POR SOFTWARE DESARROLLADO.....	53
FIGURA 5.1: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL ESFUERZO PRINCIPAL MAYOR.....	56
FIGURA 5.2: GRÁFICO DE MAGNITUD DE ESFUERZOS EN BASE A CONSTANTES ELÁSTICAS	57
FIGURA 5.3: GRÁFICO DEL AJUSTE DE LA ESTIMACIÓN DEL TENSOR DE ESFUERZOS.....	58
FIGURA 8.1: ADAPTADOR INSTALADO EN PERFORADORA PARA PROCESO DE OVERCORING	66

FIGURA 8.2: LIMPIEZA DE SUPERFICIE E INSTALACIÓN DE IMANES Y REGLA	66
FIGURA 8.3: UBICACIÓN DE REGLA EN RIEL DE AVANCE	67
FIGURA 8.4: CONEXIÓN DE CABLE DE COMUNICACIÓN DE CELDA HID CON INTERFAZ	68
FIGURA 8.5: CELDA HID CONECTADA A INTERFAZ Y A TABLET	69
FIGURA 8.6: SOFTWARE DE RECOPIACIÓN Y VISUALIZACIÓN DE LOS MICRODEFORMACIONES	70
FIGURA 8.7: GRÁFICO DE DEFORMACIONES VS AVANCE DE OVERCORING DE UNA CELDA MAL INSTALADA	90
FIGURA 8.8: DEFORMACIONES CIRCUNFERENCIALES ϵ_{θ} Y AXIALES ϵ_z DURANTE EL OVERCORING; CAMPOS DE ESFUERZOS RADIALES Y AXIALES UNIFORMES. ENSAYOS FEM: RAZÓN DE POISSON DE LA ROCA, $\nu_r=0.25$. DIÁMETRO EXTERIOR DEL TESTIGO = 142 [MM]	91
FIGURA 8.9: CAMBIOS EN LOS ESFUERZOS CIRCUNFERENCIALES σ_{θ} Y AXIALES σ_{ax} EN LA SUPERFICIE DEL POZO PILOTO DURANTE EL OVERCORING. ESFUERZOS RADIALES (UR) Y AXIALES (AX) UNIFORMES EN EL INFINITO. EL DIÁMETRO EXTERIOR DEL TESTIGO = 142 [MM]	91
FIGURA 8.10: DEFORMACIONES OBSERVADAS EN UN ENSAYO HI EN ROCA CON ESFUERZOS PRINCIPALES IN SITU EN LA RELACIÓN 2.1:1.4:1 E INCLINADAS RESPECTO A LA DIRECCIÓN DE PERFORACIÓN RESPECTIVAMENTE A 91°, 89° Y 0°	92
FIGURA 8.11: DEFORMACIONES OBSERVADAS EN UN ENSAYO HI EN ROCA CON ESFUERZOS PRINCIPALES IN SITU EN LA RELACIÓN 5.4:1.9:1 E INCLINADAS RESPECTO A LA DIRECCIÓN DE PERFORACIÓN RESPECTIVAMENTE A 84°, 103° Y 22°	93
FIGURA 8.12: DEFORMACIONES OBSERVADAS EN UN ENSAYO HI EN ROCA CON ESFUERZOS PRINCIPALES IN SITU EN LA RELACIÓN 1.9:1.4:1 E INCLINADAS RESPECTO A LA DIRECCIÓN DE PERFORACIÓN RESPECTIVAMENTE A 20°, 90° Y 70°	93
FIGURA 8.13: DEFORMACIONES OBSERVADAS EN UN ENSAYO HI EN ROCA CON ESFUERZOS PRINCIPALES IN SITU EN LA RELACIÓN 7.4:4.3:1 E INCLINADAS RESPECTO A LA DIRECCIÓN DE PERFORACIÓN RESPECTIVAMENTE A 35°, 103° Y 58°	94
FIGURA 8.14: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL ESFUERZO PRINCIPAL INTERMEDIO	97
FIGURA 8.15: GRÁFICO DE MAGNITUD DE ESFUERZOS EN BASE A CONSTANTES ELÁSTICAS PARA σ_2	97
FIGURA 8.16: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL ESFUERZO PRINCIPAL MENOR	98
FIGURA 8.17: GRÁFICO DE MAGNITUD DE ESFUERZOS EN BASE A CONSTANTES ELÁSTICAS PARA σ_3	98

LISTA DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1: RELACIÓN ENTRE VOLTAJE Y DEFORMACIONES.....	14
ECUACIÓN 2: RAZÓN DE POISSON EN BASE A DEFORMACIONES.	15
ECUACIÓN 3: MÓDULO DE YOUNG DESDE TEST BIAXIAL.....	15
ECUACIÓN 4: FÓRMULAS FACTORES DE CORRECCIÓN K.	16
ECUACIÓN 5: RELACIÓN ENTRE DEFORMACIONES Y ESFUERZOS PARA CELDA HI.	17
ECUACIÓN 6: RELACIÓN ENTRE DEFORMACIONES Y ESFUERZOS PARA CELDA HI COMO MATRIZ.	17
ECUACIÓN 7: DEFORMACIÓN ASOCIADA A DIRECCIÓN DE CADA STRAIN GAUGE.....	17
ECUACIÓN 8: COLUMNAS QUE RELACIONAN CONSTANTES DE LAS ROCAS Y DIRECCIONES DE MEDICIÓN.....	18
ECUACIÓN 9: SISTEMA DE ECUACIONES LINEAL FORMADO CON DEFORMACIONES Y ESFUERZOS	18
ECUACIÓN 10: TENSORES DE ESFUERZOS EN COORDENADAS LOCALES Y TOTALES.....	19
ECUACIÓN 11: MATRIZ CAMBIO DE BASE.....	20
ECUACIÓN 12: COMPONENTES MATRIZ CAMBIO DE BASE	21
ECUACIÓN 13: ÁNGULOS PARA MATRIZ CAMBIO DE BASE	21
ECUACIÓN 14: RELACIÓN ENTRE MATRICES DE DISTINTAS COORDENADAS	21
ECUACIÓN 15: ARREGLO MATRICIAL DE COORDENADAS TOTALES A LOCALES	21
ECUACIÓN 16: DESCOMPOSICIÓN CAMBIO DE BASE	22
ECUACIÓN 17: REESCRITURA DE SISTEMA DE ECUACIONES	22
ECUACIÓN 18: DESCOMPOSICIÓN SISTEMA DE ECUACIONES	22
ECUACIÓN 19: REORDENAMIENTO EN BASE A LOS ESFUERZOS	22
ECUACIÓN 20: DESCOMPOSICIÓN DE SISTEMA DE ECUACIONES REORDENADO	22
ECUACIÓN 21: CONJETURA PARA REFERIRSE A PARÁMETROS.....	23
ECUACIÓN 22: SISTEMAS DE ECUACIONES PARA VALORES U MEDIDOS	23
ECUACIÓN 23:RESIDUO ASOCIADO A ESTIMACIÓN.....	23
ECUACIÓN 24: SUMA DE CUADRADOS DE RESIDUOS	24
ECUACIÓN 25: DESCOMPOSICIÓN SUMA DE CUADRADOS DE LOS RESIDUOS.....	24
ECUACIÓN 26: MINIMIZACIÓN DEL ERROR.....	24
ECUACIÓN 27: SISTEMA DE ECUACIONES CON MINIMIZACIÓN DEL ERROR	24
ECUACIÓN 28: CONJETURA PARA SIMPLIFICAR ESCRITURA MATRICIAL	24
ECUACIÓN 29: SISTEMA DE ECUACIONES ESCRITO DE MANERA SIMPLIFICADA	25
ECUACIÓN 30: SISTEMA DE ECUACIONES DE MANERA MATRICIAL	25
ECUACIÓN 31: SOLUCIÓN AL SISTEMA DE ECUACIONES	25
ECUACIÓN 32: SOLUCIÓN AL SISTEMA DE ECUACIONES DE FORMA SIMPLIFICADA	25
ECUACIÓN 33: CONDICIONES ESFUERZOS Y DIRECCIONES PRINCIPALES	26
ECUACIÓN 34: CONDICIONES DE ESFUERZOS Y DIRECCIONES PRINCIPALES EN FORMA DE ECUACIÓN	26
ECUACIÓN 35: SISTEMA DE ECUACIÓN ASOCIADO A LOS ESFUERZOS Y DIRECCIONES PRINCIPALES	27
ECUACIÓN 36: CONDICIÓN DE VECTOR UNITARIO.....	27

ECUACIÓN 37: CONDICIÓN DE ORTOGONALIDAD ENTRE VECTORES	27
ECUACIÓN 38: SISTEMA DE ECUACIONES PARA ESFUERZOS PRINCIPALES	27
ECUACIÓN 39: CONDICIÓN PARA SOLUCIÓN DEL SISTEMA	28
ECUACIÓN 40: ECUACIÓN CARACTERÍSTICA PARA EL CÁLCULO DE LOS ESFUERZOS PRINCIPALES	28
ECUACIÓN 41: DEFINICIÓN DE INVARIANTES	28
ECUACIÓN 42: SISTEMA PARA DIRECCIÓN PRINCIPAL ASOCIADA A σ_1	29
ECUACIÓN 43: ECUACIONES INDEPENDIENTES DEL SISTEMA	29
ECUACIÓN 44: CÁLCULO DE VECTOR ASOCIADO A OTROS DOS VECTORES, LOS TRES ORTOGONALES ENTRE SI.....	29
ECUACIÓN 45: TENSIONES CIRCUNFERENCIALES Y RADIALES EN UN PUNTO DENTRO DE UN ANILLO	62
ECUACIÓN 46: SOLUCIÓN PARA DEFORMACIONES TANGENCIALES EN CELDA HI	62
ECUACIÓN 47: SOLUCIONES PARA FACTORES DE CORRECCIÓN K1 Y K2	62
ECUACIÓN 48: SIMPLIFICACIÓN SOLUCIÓN K1	63
ECUACIÓN 49: SIMPLIFICACIÓN SOLUCIÓN K2	63
ECUACIÓN 50: SOLUCIÓN GENERAL FACTOR K3	63
ECUACIÓN 51: SIMPLIFICACIÓN SOLUCIÓN K3	63
ECUACIÓN 52: DEFORMACIONES Y TENSIONES AXIALES EN CELDA HI	64
ECUACIÓN 53: CONTRACCIÓN TANGENCIAL EN CELDA HI	64
ECUACIÓN 54: DEFORMACIONES TANGENCIALES ALREDEDOR DE CELDA HI ASOCIADO A ESFUERZO Y RESTRICCIÓN AXIAL	64
ECUACIÓN 55: SOLUCIÓN FACTOR K4	64

NOMENCLATURA

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$: Esfuerzos de corte.

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: Esfuerzos normales o perpendiculares.

μ strains: Micro Deformaciones.

E: Módulo de Young.

ν : Razón de Poisson.

AE: Acoustic Emission.

CHILE: Continua, Homogénea, Isotrópica, Linealmente elástica.

CMET: Complejo Máfico El Teniente.

CODELCO: Corporación Nacional del Cobre, Chile.

DET: División El Teniente.

FH: Fracturamiento hidráulico.

Fw: Foot wall (patilla), punto cardinal Este.

HI: Hollow Inclusion.

Hw: Hanging wall (cabeza) , punto cardinal Oeste.

RQD: Rock Quality Designation.

1. INTRODUCCIÓN

En Chile se encuentra casi el 30% de los recursos cupríferos mundiales, y un tercio de ellos (9% a nivel mundial) son explotados por CODELCO (Corporación Nacional del Cobre, Chile). Dentro de los yacimientos que son propiedad de CODELCO, se encuentra la División El Teniente (DET). Las operaciones del complejo industrial de la División El Teniente son la mina, la concentradora Colón y la Fundición Caletones. La mina El Teniente es la mina de cobre subterránea más grande del mundo, la cual comenzó a ser explotada en el año 1905 y cuenta con más de 4500 [km] de galerías subterráneas [1]. Al ser una de las minas más antiguas y grandes del mundo se enfrenta a variados desafíos para continuar con su producción, tales como la profundización de sus labores, macizo rocoso de alta competencia, zonas con mayor concentración de esfuerzos y mayor actividad sísmica.

En la mina El Teniente, el método de explotación predominante es el Panel Caving. Este método requiere la realización de tronaduras para la socavación del nivel de hundimiento, apertura de bateas y así, generar un desequilibrio en el macizo rocoso, lo que permite la propagación adecuada del caving. El objetivo es hacer que el mineral se hunda y pueda ser extraído desde diferentes puntos de extracción. Estas tronaduras generan liberaciones de energía debido a los cambios en la geometría y el campo de esfuerzos en las cercanías. Además, el inicio del caving provoca la formación de una cavidad dentro del macizo rocoso compuesta por material fragmentado, lo que resulta en una redistribución de esfuerzos [2].

A medida que la mina El Teniente se ha ido profundizando con el tiempo, se ha observado una mejora en la competencia del macizo rocoso. Esto se debe principalmente a la mayor presión litostática a la cual se encuentra sometido y también a que no ha estado expuesto a los procesos de erosión, transporte y meteorización, tanto física como química, que pueden afectar a las rocas expuestas en la superficie y dan lugar a la formación de roca secundaria. En la actualidad, se trabaja a gran profundidad (por ejemplo: Proyecto Andes Norte, cota [1790-1887], aproximadamente una profundidad de 900 [m] con respecto a la superficie), sobre roca primaria, lo que implica condiciones de altos esfuerzos y una mayor complejidad para llevar a cabo el hundimiento. Por lo tanto, se requiere realizar preacondicionamiento mediante fracturamiento hidráulico (FH) con el objetivo de reducir la magnitud de los eventos sísmicos y asistir al proceso de caving.

Basado en la información previa, es de vital importancia llevar a cabo mediciones de esfuerzos in situ para estimar el estado tensional de un sector. Estas mediciones proporcionan información valiosa que alimenta la toma de decisiones en diferentes etapas del proceso de ingeniería. En la etapa de ingeniería de proyecto, estas mediciones pueden determinar aspectos críticos como el diseño del layout o el sistema de soporte. Mientras que, en la etapa de operación de una mina, pueden influir en la modificación de estrategias de incorporación y extracción.

1.1.OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo General

Revisar, documentar y proponer un diseño para una metodología teórico-práctica de medición de esfuerzos a través de celdas HI, que optimicen el proceso para mejorar la calidad del resultado de la medición y que además permita la comprensión de la técnica en el contexto de las condiciones del macizo rocoso de la División El Teniente.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Analizar los distintos métodos utilizados en la actualidad para la medición de esfuerzos en roca primaria en la mina El Teniente.
- Realizar un análisis teórico de los principios y conceptos físicos-matemáticos del funcionamiento de la técnica de medición de esfuerzos a través de celdas HI, considerando parámetros y variables que puedan afectar a la medición de esfuerzos y tomarlos en consideración al momento de efectuar la metodología.
- Realizar visitas a terreno para observar el procedimiento de instalación actual de las celdas dentro del macizo rocoso y analizar los resultados obtenidos en base a las mediciones y al procedimiento.
- Crear un documento de validación y control de la ejecución de la técnica en terreno, capturando los datos directos de la medición, procesando los datos y asignando un nivel de confiabilidad numérica a los resultados obtenidos.

1.2. ALCANCES Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO

El alcance de esta investigación es abordar el procedimiento y manejo de datos necesarios para la instalación del instrumento en terreno, con el objetivo de determinar el tensor de esfuerzos en coordenadas totales, Este, Norte y Cota (E, N, C), y las magnitudes, orientaciones y direcciones de los esfuerzos principales. El enfoque se centra en explicar la teoría detrás del método de medición de esfuerzos in situ utilizando celdas HI, así como en realizar un análisis de los datos obtenidos en terreno. Se ha desarrollado una metodología práctica basada en la información recopilada de las bases teóricas con el fin de mejorar la confiabilidad de las mediciones realizadas. Además, se llevará a cabo un análisis del error en la estimación para obtener información relevante en base a la estimación de los esfuerzos y en la recopilación de datos en terreno.

Es importante tener en cuenta que este estudio se realiza bajo el supuesto de una roca continua, homogénea, isotrópica y linealmente elástica (roca tipo CHILE). La metodología práctica diseñada incluye acciones específicas para asegurar, en la medida de lo posible, el cumplimiento de estos supuestos. Sin embargo, es necesario mencionar que, si los supuestos no se cumplen, la confiabilidad de los datos obtenidos se reducirá.

2. ANTECEDENTES

2.1. DIVISIÓN EL TENIENTE

CODELCO opera ocho centros de trabajo, ubicados entre la región de Antofagasta y la región del Libertador General Bernardo O'Higgins, en esta última se encuentra la División El Teniente (DET), está ubicada en la comuna de Machalí, en plena cordillera de los Andes, entre los 1800 y los 3200 [m.s.n.m], considerando los nuevos proyectos que incorporan una profundización dentro del yacimiento. La Figura 2.1 muestra la ubicación de la mina El Teniente.



Figura 2.1: Ubicación geográfica mina El Teniente [3].

La producción actual de la mina El Teniente es de 136.5 [ktpd] en donde las labores subterráneas se integran por diversas minas y proyectos que utilizan principalmente el método de explotación panel caving, método de explotación minero que consiste en desestabilizar un volumen de macizo rocoso mediante la socavación de su base, a través de un corte transversal, que induce a la

masa de roca a fragmentarse naturalmente por la gravedad, es decir, colapsar bajo su propio peso [4].

2.2. LITOLOGÍA DET

Los diferentes tipos de rocas constituyen la primera subdivisión geotécnica para el yacimiento, ya que poseen características de resistencia, deformabilidad y frecuencia de vetillas blandas que son distintivas de cada una de ellas.

Para la confección de las unidades geotécnicas se considera los principales tipos litológicos del yacimiento: Complejo Máfico El Teniente (CMET Hw y CMET Fw), Intrusivos Félsicos (Dioritas, Dacita y Tonalita), Brecha Braden y distintos cuerpos de Brechas Hidrotermales (Brecha Anhidrita y Brecha Turmalina), Figura 2.2.

El modelo litológico del yacimiento El Teniente se elabora sobre la base de plantas y secciones geológicas, las cuales incorporan información proveniente del mapeo de más de 1,100,000 [m] de sondajes y de más de 500,000 [m] de túneles [5].

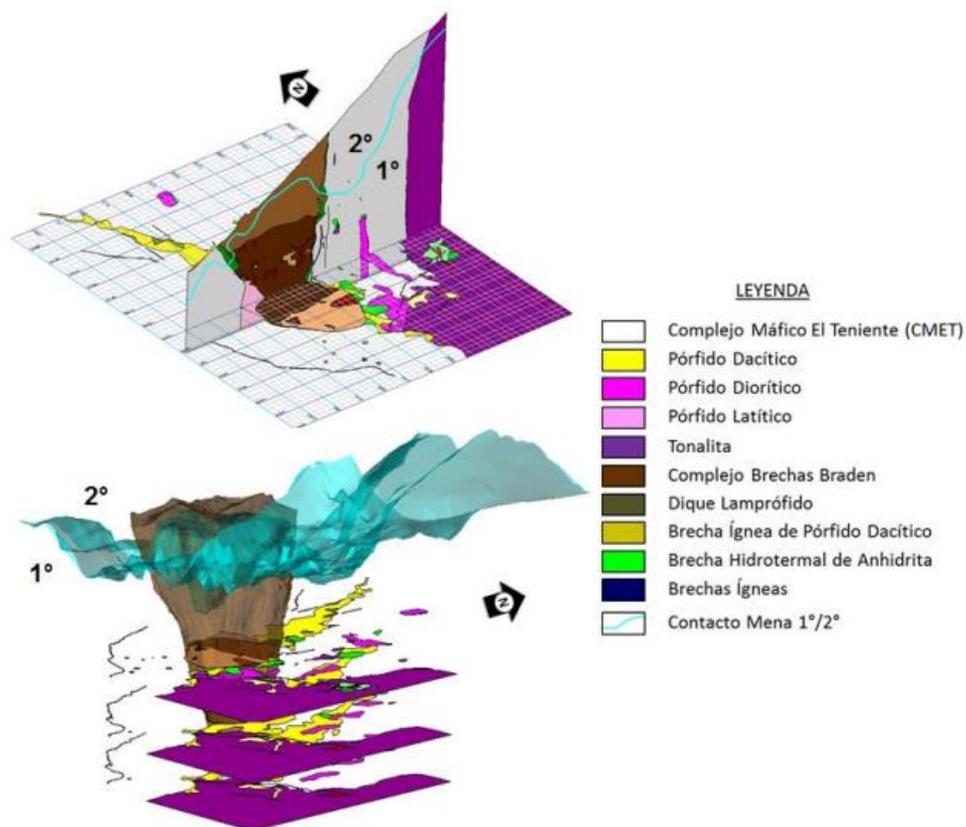


Figura 2.2: Modelo geológico de El Teniente con unidades litológicas y superficie de contacto [5].

2.3.TECNICAS DE MEDICIÓN DE ESFUERZOS EN LA DET

2.3.1. Acoustic Emission (AE)

El método de Acoustic Emission (AE) se basa en el efecto Kaiser (1953) [6], el cual señala que, si un material es sometido a cargas, éste comienza a generar emisión acústica una vez que es sobrepasado el campo de esfuerzos al que estaba previamente sometido. Lo antes señalado hace la diferencia entre las discontinuidades previamente existentes en el macizo rocoso y las nuevas microfracturas generadas por las cargas aplicadas. La generación de emisiones acústicas en la roca (Figura 2.3. (A)), ante la aplicación de esfuerzos compresivos, permite determinar la magnitud del máximo esfuerzo al que estaba sujeta la roca previamente cuando formaba parte del macizo rocoso.

Kaiser, en sus experimentos con metales, madera y rocas, observó un fenómeno por el cual un material sólido generaba emisiones acústicas a medida que se le aplicaba una carga, sin embargo, cuando este volvía a ser cargado, las emisiones acústicas eran cercanas a cero o al nivel de fondo, siempre y cuando los esfuerzos aplicados fuesen menores al máximo esfuerzo previo aplicado. Por el contrario, cuando los esfuerzos superaban al máximo esfuerzo aplicado en el ciclo de carga anterior, la actividad de las emisiones acústicas se incrementaba drásticamente (Figura 2.3. (B)). Este fenómeno, por el cual la roca tendría la capacidad de “memorizar” y retener la información del esfuerzo máximo in situ al que estuvo expuesto cuando formaba parte del macizo rocoso, es el fundamento central de esta metodología de medición de esfuerzos.

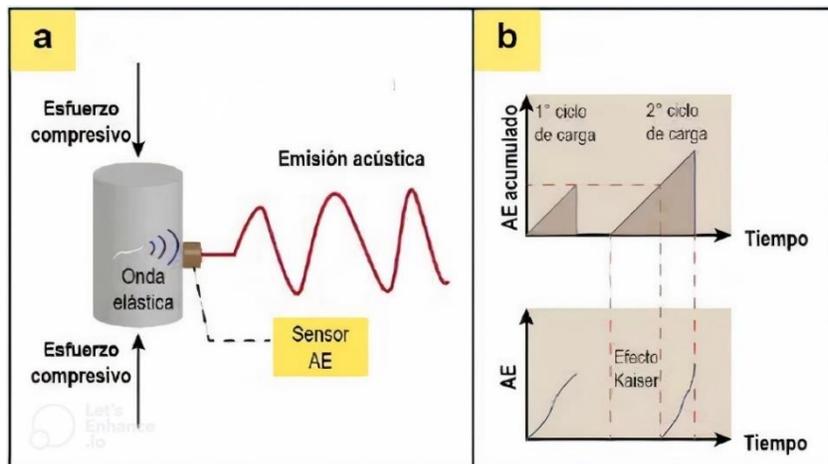


Figura 2.3: Medición de esfuerzos con emisiones acústicas. (A) Esquema general ensayo AE. (B) Manifestación del efecto kaiser [7].

En la DET, desde el año 2005, se utiliza el método llamado Acoustic Emission con testigos orientados, este método consiste en el análisis de testigos orientados de diámetros mayores a 51

[mm], de buena calidad y libre de vetillas, que puedan llevar a la falla a las subprobetas (undercorings) al ser sometidas a cargas. Se requieren 6 subprobetas en direcciones no colineales, las que son extraídas de los testigos orientados de los sondajes, y se desarrollan mediciones de emisiones acústicas en ensayos de compresión uniaxial a cada una de ellas, obteniéndose un esfuerzo para cada uno de los seis eje de las subprobetas extraídas. A partir de dichos esfuerzos, y sus orientaciones, se determina algorítmicamente el tensor de esfuerzos del sector de interés.

De los ensayos de laboratorio se obtiene un gráfico con el conteo acumulado de los eventos de emisiones acústicas en el eje de las ordenadas, y los esfuerzos aplicados en el eje de las abscisas. En la práctica, las curvas acumuladas de emisiones acústicas difieren en sus patrones, presentando desviaciones con respecto a una curva idealizada, denominada curva tipo “Mogi”, que describe el modelo de respuesta de deformación de la roca (Figura 2.4).

En general, la curva acumulada de AE (tipo Mogi) puede descomponerse en 4 regiones. En la primera región de la curva, caracterizada como A-B, el espécimen de roca se acomoda a la placa de la máquina y la compresión inicial provoca el cierre de las fracturas presentes en la roca, lo que, a su vez, genera un registro inicial de emisiones acústicas en la roca. La región B-C corresponde a una región relativamente quieta, en la que existe un bajo nivel de emisiones acústicas debido a que las grietas presentes en la roca continúan acomodándose ante el incremento de los esfuerzos aplicados al espécimen de roca. El inicio de la región C-D se caracteriza por la presencia de un punto de inflexión en la curva, definida por un incremento marcado de las emisiones acústicas generadas en la roca. Este incremento, está asociado principalmente al inicio y propagación de fracturas en la roca y representa el máximo esfuerzo previo al que estaba sujeto la roca, debido al efecto Kaiser. En la región D-E, el inicio y propagación de fracturas continúa, produciéndose coalescencia de fracturas y la ruptura de la roca al momento de alcanzar su resistencia a la compresión (Figura 2.4).

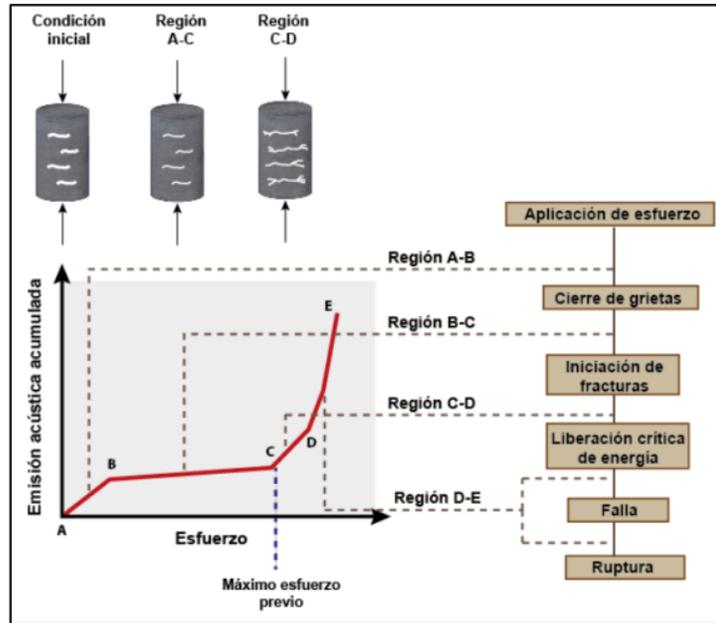


Figura 2.4: Curva típica de los registros de emisiones acústicas acumuladas [7].

A partir de los ensayos de AE realizados a las subprobetas extraídas desde el testigo orientado, se obtienen seis esfuerzos asociados a seis direcciones independientes. Cada uno de estos esfuerzos son asociados a una ecuación lineal, donde el esfuerzo obtenido por AE se describe como el esfuerzo normal que actúa sobre una superficie normal al vector unidad, y que corresponde al primer miembro de dicha ecuación. El segundo miembro de la ecuación corresponde a una combinación lineal que contiene seis incógnitas, que corresponden a los esfuerzos cartesianos del tensor de esfuerzos acompañados cada una por coeficientes asociados a los cosenos directores del eje del que se extrajo la subprobeta. De esta forma, se obtiene un sistema de ecuaciones lineales de 6x6, que se puede resolver al conocer tanto el esfuerzo normal al plano (esfuerzo proveniente de los ensayos de AE), como los coeficientes de los cosenos directores para cada dirección.

La resolución del sistema de ecuaciones permite la obtención de las componentes cartesianas del tensor de esfuerzos, a partir del cual, se pueden determinar los esfuerzos principales, con sus respectivas orientaciones. En este proceso, se debe llevar a cabo la transformación (rotación) de las coordenadas locales, asociadas a las orientaciones en que fueron extraídas las subprobetas en el laboratorio con respecto al testigo orientado, a coordenadas mina, que corresponden a las coordenadas en las que estaba situado el testigo orientado en la mina al momento de su extracción. La rotación de los ejes de las subprobetas puede realizarse al comienzo, previo al cálculo del tensor

de esfuerzos, o directamente al tensor de esfuerzos, ya sea, en sus componentes cartesianas o de esfuerzos principales [7].

2.3.2. Celdas Hollow Inclusion (HI)

La celda HI se desarrolló a principios de los años setenta y fue descrita por primera vez por Worotnicki y Walton [8]. Desde entonces, la celda ha sufrido varias modificaciones, pero su diseño básico sigue siendo esencialmente el mismo, fue diseñada y desarrollada para mejorar la precisión y confiabilidad de la medición de los esfuerzos absolutos usando la técnica de “overcoring”.

La metodología de celdas HI consiste básicamente en instalar una celda medidora de deformaciones dentro del macizo rocoso y posteriormente realizarle una sobreperforación a la roca que lo contiene. Se destaca por requerir sólo de una perforación por las características del dispositivo medidor, que consiste en una celda HI que lleva adosada en su superficie 3 rosetas de 3 o 4 strain gauges, cada roseta está rotada entre sí por 120° . Todos los strain gauges tienen una longitud de 10 [mm], y se encuentran ubicados a 0.5 [mm] por debajo de la superficie exterior de la celda. La Figura 2.5 muestra la orientación de los strain gauges en el tubo de material epóxico.

La celda es instalada fuera del área de influencia de la galería, o de cualquier labor al interior de la mina, y medida en un proceso de Overcoring. Las deformaciones obtenidas junto con la geometría del sondaje y las propiedades de la roca nos permiten determinar los esfuerzos absolutos in situ.

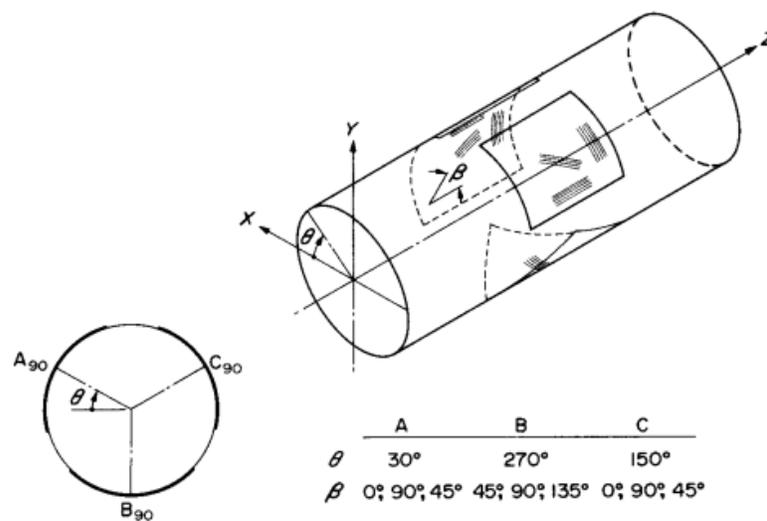


Figura 2.5: Orientación de los Strain Gauges en la celda [8].

Dos strain gauges son paralelos a los ejes de la celda, tres miden las deformaciones tangenciales, y los otros 4 miden las deformaciones a $\pm 45^\circ$. Dado que los strain gauges están totalmente encapsulados en el epoxi, el rendimiento de la celda no se ve afectado por la humedad ni el polvo. También existe la versión con 12 strain gauges, 4 por roseta. Los 3 strain gauges adicionales (dos circunferenciales y uno a 45°) proporcionan una redundancia adicional en la medición de la deformación.

Una de las características principales de las celdas HI es su permanente conexión al cable de lectura, esto permite obtener datos de la relajación de los esfuerzos durante el overcoring, usando un indicador de esfuerzos de múltiples canales.

La Figura 2.6 muestra un conjunto de curvas típicas obtenidas por Worotnicki y Walton (1976). Los ensayos realizados en laboratorios a las celdas HI en condiciones de carga uniaxial y biaxial, considerando un material ideal, dieron resultados muy cercanos a la realidad, con variaciones solamente entre el 4-5 %, además de poca variación de grados en las direcciones de las cargas aplicadas. El rendimiento de la celda HI es muy satisfactorio y fiable en materiales isótropos y homogéneos y aceptable en rocas moderadamente no homogéneas y de grano medio [9].

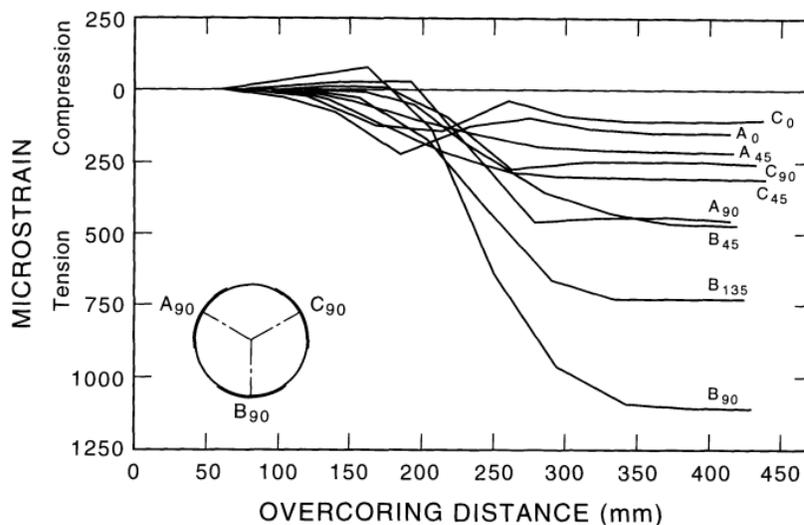


Figura 2.6: Curvas de respuesta obtenidas con celda CSIRO HI [8].

La principal ventaja de la celda HI es que puede utilizarse para determinar el campo de esfuerzos completo en una sola perforación. Dado que se realizan nueve (o 12) mediciones y hay seis incógnitas, se dispone de mediciones redundantes y se puede realizar una estimación por mínimos cuadrados de los componentes del campo de tensiones in situ. Además, la celda

proporciona una supervisión continua durante el overcoring. La celda HI ha demostrado un alto índice de éxito sobre el terreno, en particular en rocas isotrópicas y a temperaturas de roca comprendidas entre 15 y 40 °C, pero sólo un índice de éxito limitado a temperaturas bajas (< 10 °C) y altas (> 40 °C) [9].

Tras el overcoring, tanto el módulo de Young como la razón de Poisson de la roca se determinan mediante ensayos biaxiales, con la muestra recuperada del overcoring, la cual contiene la celda HI.

Los pasos principales para llevar a cabo una medición de esfuerzos con celda HI se resumen en la Figura 2.7.

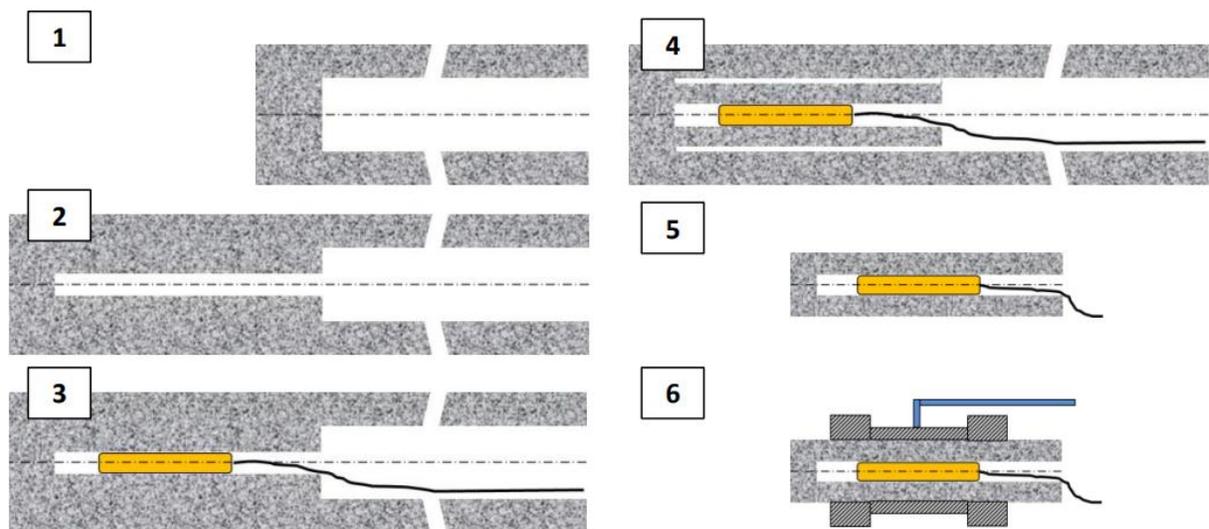


Figura 2.7: Procedimiento general celda HI.

- i. Perforación en 15.24 [cm] de diámetro de una longitud de 2.5 a 3 veces el ancho de la labor.
- ii. Realizar perforación concéntrica de 38 [mm] de diámetro y con una longitud de 50 a 60 [cm].
- iii. Instalar celda HI en el interior de la perforación de 38 [mm].
- iv. Sobre perforar el macizo rocoso con la celda instalada.
- v. Retirar el testigo con la celda.
- vi. Introducirlo en cámara biaxial para determinar las propiedades elásticas.

3. METODOLOGÍA

La metodología contemplada para la realización de la memoria de título se basa en las siguientes fases:

- Recopilación de información y antecedentes: Revisión bibliográfica y análisis de antecedentes con respecto a la medición de esfuerzos con celdas Hollow Inclusion, además de revisión de conceptos y teoría general en base a la toma de datos en macizo rocoso in situ.
- Definición teórica del manejo de datos en Celdas HI: Análisis de la teoría física y matemática en la que se basa la medición de esfuerzos a través de celdas HI, además de las especificaciones teóricas para el manejo de los datos en bruto obtenidos por la celda hasta llegar al valor numérico de los esfuerzos principales.
- Aplicación teórica para definir metodología práctica: En base a las dos fases anteriores es importante poder definir una metodología teórico-práctica, en donde en base a las especificaciones y recomendaciones teóricas se cree o se optimice una metodología práctica y operativa en la DET.
- Desarrollar herramientas para validar mediciones: Actualmente en la división empresas contratistas se encargan del análisis de los datos obtenidos por las celdas HI y del cálculo de los esfuerzos, es de suma importancia poder validar la información entregada por estas empresas y tener una noción preliminar de cuanto debieran ser los valores de los esfuerzos. Además, existen parámetros que al momento de realizar las mediciones implican un error, es importante cuantificar estos errores y ver cómo afectan a la estimación de los esfuerzos, esto se puede lograr evaluando aspectos específicos de la instalación y toma de datos.

Cada uno de estos incisos se puede considerar una fase del proyecto, y se pueden ver resumidos en la Figura 3.1.

FASES DEL PROYECTO



- FASE 1: RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN Y ANTECEDENTES**
Revisión bibliográfica y análisis de antecedentes con respecto a la medición de esfuerzos con celdas Hollow Inclusion, además de revisión de conceptos y teoría general en base a la toma de datos en macizo rocoso in situ.
- FASE 2: DEFINICIÓN TEÓRICA DEL MANEJO DE DATOS EN CELDAS HI**
Análisis de la teoría física y matemática en la que se basa la medición de esfuerzos a través de celdas HI, además de las especificaciones teóricas para el manejo de los datos en bruto obtenidos por la celda hasta llegar al valor numérico de los esfuerzos principales.
- FASE 3: APLICACIÓN TEÓRICA PARA DEFINIR METODOLOGÍA PRÁCTICA**
En base a las dos fases anteriores es importante poder definir una metodología teórico-práctica, en donde en base a las especificaciones y recomendaciones teóricas se cree o se optimice una metodología práctica y operativa en la DET.
- FASE 4: DESARROLLAR HERRAMIENTAS PARA VALIDAR MEDICIONES**
Actualmente en la división empresas contratistas se encargan del análisis de los datos obtenidos por las celdas HI y del cálculo de los esfuerzos, es de suma importancia poder validar la información entregada por estas empresas y tener una noción preliminar de cuanto debieran ser los valores de los esfuerzos. Además, existen parámetros que al momento de realizar las mediciones implican un error, es importante cuantificar estos errores y ver cómo afectan a la estimación de los esfuerzos, esto se puede lograr evaluando aspectos específicos de la instalación y toma de datos.

Figura 3.1: Esquema de Metodología General.

3.1. FUNCIONAMIENTO CELDA HI Y TOMA DE DATOS

La base teórica que define el funcionamiento de la celda HI es medir variaciones de resistencia eléctrica a través de strain gauges (medidores de deformación), en otras palabras, se mide la deformación que ocurre en cada strain gauge, esta deformación o cambio de longitud se traduce en un cambio de resistencia eléctrica.

De forma más profunda la celda HI trabaja bajo el concepto de puente de Wheatstone, esto en palabras simples es un circuito eléctrico que se usa para medir la resistencia eléctrica de un elemento desconocido, en el caso de las celdas HI, el elemento desconocido es el strain gauge.

El circuito más básico se compone de cuatro resistencias eléctricas, conectadas en forma de diamante, y una fuente de alimentación (ver Figura 3.2). El principio de funcionamiento del puente de Wheatstone se basa en la comparación de la resistencia desconocida con una resistencia conocida y ajustable. La idea es que, cuando se ajustan las resistencias del puente, se puede lograr que la corriente eléctrica que fluye por el circuito sea cero. Cuando esto ocurre, se sabe que la resistencia desconocida es igual a la resistencia conocida y ajustable.

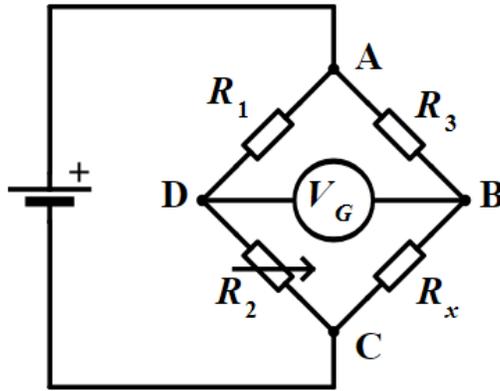


Figura 3.2: Circuito básico Puente de Wheatstone [10].

Para lograr que la corriente eléctrica sea cero, se ajustan las resistencias del puente de tal manera que la caída de voltaje en los dos lados del puente sea igual. Esto se logra variando una de las resistencias del circuito. Una vez que se ha ajustado el puente para que la corriente sea cero, se puede calcular la resistencia desconocida utilizando la ley de Ohm.

De esta manera funciona cada uno de los strain gauges de las celdas HI, y en base a esto se obtienen los cambios de resistencias o en otras palabras las diferencias de voltajes (considerando la diferencia entre el voltaje de entrada y el de salida).

Una vez se obtiene la variación de voltaje para cada uno de los strain gauges en milivolts (mV), se procede a calcular la deformación en microdeformaciones (μ strains) en base a la Ecuación 1.

$$\mu Strains = \frac{4}{GF \cdot V_{ex}} \cdot V_0 \cdot 1000 \quad (1)$$

En donde,

GF : Gauge Factor, es la relación entre el cambio relativo en la resistencia eléctrica R y la deformación mecánica ϵ , en el caso de las celdas HI es dado por el fabricante.

V_{ex} : Voltaje de alimentación o externo.

V_0 : Voltaje de salida o diferencia de voltaje (Voltaje leído).

Una vez teniendo las deformaciones asociadas a cada uno de los canales de la celda se procede a definir la matriz para estimar los esfuerzos.

3.2. CONSTANTES ELASTICAS DE LA ROCA

Para poder llegar al valor de los esfuerzos en base a las deformaciones captadas en la celda HI, es necesario conocer las constantes elásticas de la roca y del plástico en la celda, estas son la razón de Poisson y el módulo de Young. Para el caso del plástico de la celda, estas constantes deberán ser facilitadas por el fabricante, por otro lado, las constantes elásticas de la roca serán estimadas en base a un ensayo biaxial al que será sometido el testigo (producto del overcoring) en terreno.

El valor de la razón de Poisson de la roca (ν_r) se obtiene promediando los valores de los strain gauges dispuestos en la orientación axial de la perforación y se dividen por el promedio de las deformaciones registradas por los strain gauges orientados en dirección tangencial a la generatriz del pozo (ver Ecuación 2), es decir de ψ igual a 90° [9].

$$\nu_r = \frac{\bar{\varepsilon}_z}{\bar{\varepsilon}_\theta} \quad (2)$$

Donde:

$\bar{\varepsilon}_z$: Promedio deformación axial registrada por strain gauges.

$\bar{\varepsilon}_\theta$: Promedio deformación tangencial (ortorradiar) registrada por strain gauges.

Por otro lado, el valor del Módulo de Young de la roca es calculado solo en base a las deformaciones tangenciales [9] a través de la Ecuación 3:

$$E_r = \frac{2P}{\bar{\varepsilon}_\theta} \cdot \frac{D^2}{(D^2 - d^2)} \quad (3)$$

Donde:

P : Presión aplicada.

D : Diámetro del testigo mayor (15.24 [cm]).

d : Diámetro de testigo menor (38 [mm]).

3.3. FACTORES DE CORRECCIÓN K (K FACTORS)

Se definen los factores K, estos factores corrigen los efectos que puedan tener la ubicación de los strain gauges, ya que estos no son instalados directamente en el macizo rocoso, se encuentran a cierta distancia de la superficie de este.

Cada factor K representa la razón entre una deformación particular en la posición de un strain gauge de la celda HI, causada en el overcoring por una componente en particular del campo de esfuerzos in situ, y la deformación que se habría causado por esa componente de esfuerzo en el punto sobre la superficie de la perforación piloto si allí no se hubiera instalado la celda HI.

Las cuatro soluciones dadas para los valores de los factores K se detallan a continuación:

$$K_1 = \frac{(mn + 1 - 2\nu_p)(1 - \nu_p\nu_r)}{e(1 - n) + n + 1 - 2\nu_p} + \nu_p\nu_r$$

$$K_2 = \frac{[(1 - e)d_2 + (\chi_p + e)d_3]}{D}$$

$$K_3 = \frac{1 + nm}{1 + n + e(1 - n)}$$

$$K_4 = 1 - (K_1 - 1) \frac{\nu_p - \nu_r}{\nu_r(1 - \nu_p\nu_r)}$$

(4)

Como se estima cada uno de estos factores y las variables necesarias se puede ver de manera detallada en el ANEXO A. Cálculo de factores de corrección K.

3.4. MATRIZ PARA ESTIMAR ESFUERZOS, COORDENADAS LOCALES

La estimación de esfuerzos a través del método de celdas HI tiene como objetivo principal la determinación del tensor de esfuerzos presente en el macizo rocoso in situ. En base a lo anterior es necesario relacionar los esfuerzos con las deformaciones generadas en el contorno del pozo, y esta relación está dada por las siguientes ecuaciones [8]:

$$\begin{aligned}
E\varepsilon_{\theta\theta} &= (\sigma_x + \sigma_y)K_1 - \nu\sigma_zK_4 - 2(1 - \nu^2)[(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta + 2\sigma_{xy}\sin 2\theta]K_2 \\
E\varepsilon_{zz} &= \sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y) \\
E\varepsilon_{\theta z} &= 4(1 + \nu)[\sigma_{yz}\cos\theta - \sigma_{xz}\sin\theta]K_3
\end{aligned} \tag{5}$$

Estas ecuaciones se reescriben en base a los esfuerzos que se desean obtener para poder llegar a armar el tensor de esfuerzos, por ende, se consideran los esfuerzos $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$. No se debe olvidar que estos esfuerzos provienen del tensor, por ende, también se cumple que: $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}$, así que las incógnitas solo serán 6. Al reescribir las ecuaciones de forma matricial se estructura la Ecuación 6.

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} E\varepsilon_{\theta\theta} \\ E\varepsilon_{zz} \\ E\varepsilon_{\theta z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} K_1 - 2(1 - \nu^2)\cos 2\theta K_2 & K_1 + 2(1 - \nu^2)\cos 2\theta K_2 & -\nu K_4 & & & \\ & -\nu & -\nu & 1 & \dots & \dots \\ & 0 & 0 & 0 & & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} \tag{6} \\
\dots \dots \dots & \begin{bmatrix} -4(1 - \nu^2)\sin 2\theta K_2 & 0 & 0 & & & \\ 0 & 0 & 0 & & & \\ 0 & 4(1 + \nu)\cos\theta K_3 & -4(1 + \nu)\sin\theta K_3 & & & \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Una vez definida esta matriz, la cual es la que relaciona las deformaciones con los esfuerzos en el macizo rocoso, se define la ecuación que define las deformaciones en una dirección, la dirección ψ , esto es necesario definirlo por el uso de strain gauges [8]:

$$\varepsilon_{li} = \sin^2 \psi_i \cdot \varepsilon_{\theta\theta} + \cos^2 \psi_i \cdot \varepsilon_{zz} + \sin \psi_i \cos \psi_i \cdot \varepsilon_{\theta z} \tag{7}$$

Ahora se pueden reemplazar las componentes de la Ecuación 6 en la Ecuación 7, dando como resultado un vector de 1X6, en donde cada columna hace referencia a un esfuerzo, y se describe como sigue:

$$\begin{aligned}
\text{Columna 1} &= \frac{[\sin^2 \psi_i \cdot (K_1 - 2(1 - \nu^2) \cos 2\theta K_2) - \cos^2 \psi_i \cdot \nu]}{E} \\
\text{Columna 2} &= \frac{[\sin^2 \psi_i \cdot (K_1 + 2(1 - \nu^2) \cos 2\theta K_2) - \cos^2 \psi_i \cdot \nu]}{E} \\
\text{Columna 3} &= \frac{[-\sin^2 \psi_i \cdot \nu K_4 + \cos^2 \psi_i]}{E} \\
\text{Columna 4} &= \frac{[\sin^2 \psi_i \cdot (-4(1 - \nu^2) \sin 2\theta K_2)]}{E} \\
\text{Columna 5} &= \frac{[\sin \psi_i \cos \psi_i \cdot (4(1 + \nu) \cos \theta K_3)]}{E} \\
\text{Columna 6} &= \frac{[\sin \psi_i \cos \psi_i \cdot (-4(1 + \nu) \sin \theta K_3)]}{E}
\end{aligned} \tag{8}$$

Una vez considerado este vector, los datos de los strain gauges pueden reemplazarse directamente en cada una de las columnas dando como resultado una matriz de 12 filas que equivalen a los 12 strain gauges, y 6 columnas equivalentes a cada uno de los esfuerzos (12X6). A esta matriz se le llamara f_i , $i = 1,2,3,4,5,6$, y se plantea como el siguiente modelo de regresión múltiple:

$$E\varepsilon_i = f_1\sigma_x + f_2\sigma_y + f_3\sigma_z + f_4\tau_{xy} + f_5\tau_{yz} + f_6\tau_{xz} \tag{9}$$

No se debe olvidar que en base a la Ecuación 5, las deformaciones están multiplicadas por el módulo de Young (E), este parámetro es un escalar, por ende, se puede agregar al final dividiendo las ecuaciones.

Estas expresiones son generales para cualquier dirección que tenga un strain gauge en la superficie de un agujero circular, con respecto a un sistema coordenado local. Los ángulos necesarios para el cálculo (θ, ψ) se pueden observar en la Figura 3.3, por otro lado, la ficha técnica de cada celda debiese indicar esta información.

3.5. MATRIZ PARA ESTIMAR ESFUERZOS, COORDENADAS TOTALES

Es necesario expresar las ecuaciones del inciso anterior en coordenadas totales (Este, Norte, Cota), para poder obtener resultados representativos del lugar en donde se quiera realizar la medición de esfuerzos. Para esto, se definen dos tensores de esfuerzos, cada uno en diferentes coordenadas (locales y totales).

$$T_{xyz} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}; T_{ENC} = \begin{bmatrix} \sigma_E & \tau_{EN} & \tau_{EC} \\ \tau_{EN} & \sigma_N & \tau_{NC} \\ \tau_{EC} & \tau_{NC} & \sigma_C \end{bmatrix} \quad (10)$$

Se debe tener en consideración que el eje z de las coordenadas locales representa al eje axial del pozo, y los ejes x e y son referenciados por el ángulo θ . En la práctica, el ángulo θ orienta su origen mediante el canal B90 de la celda HI, el cual tiene un ángulo $\theta = 180^\circ$. Además, comúnmente se busca que este canal se ubique en la parte inferior del pozo, con el fin de ubicar el eje local y, en el plano E-N (Este-Norte) del sistema de coordenadas totales, es decir, la componente de la dirección y, es 0 respecto a la componente C (Cota). Si la posición de la galga B90 es distinta a la indicada, se dice que la celda esta rotada en una cantidad de grados, que debe ser conocida, para la respectiva corrección. Para realizar la corrección en base al desvío de la galga B90, primero se debe conocer el valor del ángulo de rotación de la galga B90 con respecto a su posición técnicamente correcta (considerando el sentido horario como positivo). Luego se debe sumar el ángulo de rotación en grados sexagesimales al ángulo θ de cada uno de los strain gauges. De esta manera se consigue mantener el origen del ángulo θ en la parte superior y por lo tanto mantener la configuración de ejes. Este cambio en el parámetro θ debe ser realizado previo al cálculo de las componentes, de otra manera el programa de cálculo tendrá una referencia errónea de los ejes x e y, respecto del sistema global de coordenadas (Este, Norte, Cota).

Por otro lado, la relación entre ambos sistemas de coordenadas se consigue a través de dos parámetros asociados al pozo, el Dip y el Bearing.

- **Dip:** Angulo que indica una inclinación desde el plano Este - Norte sobre la Cota. Considera positivo el ángulo sexagesimal medido desde la horizontal (origen) hacia abajo. En un pozo indica la inclinación desde la boca hacia fondo de la perforación.
- **Bearing:** Ángulo que indica una dirección sobre el plano Este - Norte. Considera positiva la medición del ángulo desde el Norte hacia el Este, medido en ángulos

sexagesimales. En un pozo indica la dirección desde la boca hacia el fondo de la perforación.

Lo que se busca realmente es poder definir una matriz de cambio de base que permita traspasar de las coordenadas locales de la celda HI, a coordenadas totales. Utilizando los ángulos Bearing y Dip se establecen las relaciones funcionales que conforman cada componente de la matriz de cambio de base. Prácticamente esta matriz se consigue expresando la dirección de los vectores unitarios de la base local en función de la base total [11].

Para expresar la matriz de cambio de base se deben analizar las proyecciones de las coordenadas locales (x,y,z) en el plano Norte-Este (Y,X), (Figura 3.3).

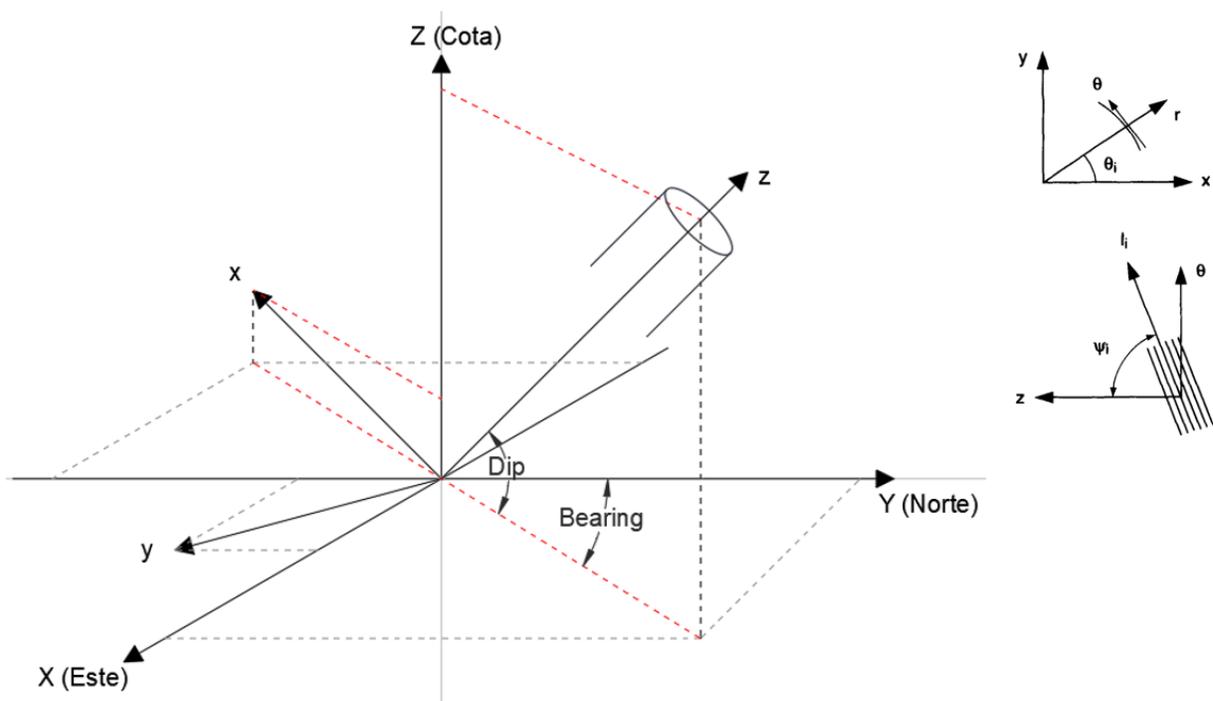


Figura 3.3: Representación de pozo con sus coordenadas locales, y sus proyecciones en las coordenadas totales.

De esta manera la matriz de cambio de base puede expresarse de la siguiente manera:

$$R_{LT} = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x \\ l_y & m_y & n_y \\ l_z & m_z & n_z \end{bmatrix} = [R_{TL}]^T \quad (11)$$

Donde las componentes l_x , m_x y n_x , son las proyecciones del eje local x en los ejes totales X,Y,Z, las componentes l_y , m_y y n_y , son las proyecciones del eje local y en los ejes totales X,Y,Z y las componentes l_z , m_z y n_z , son las proyecciones del eje local z en los ejes totales X,Y,Z.

De esta manera las componentes de la matriz quedan expresados de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 l_x &= \cos(V_x) \cos(H_x) & m_x &= \cos(V_x) \sin(H_x) & n_x &= \sin(V_x) \\
 l_y &= \cos(V_y) \cos(H_y) & m_y &= \cos(V_y) \sin(H_y) & n_y &= \sin(V_y) \\
 l_z &= \cos(V_z) \cos(H_z) & m_z &= \cos(V_z) \sin(H_z) & n_z &= \sin(V_z)
 \end{aligned} \tag{12}$$

Considerando el sentido en que se miden los ángulos y la descomposición en horizontales y verticales, se debe tener en cuenta lo siguiente (donde B = Bearing) :

$$\begin{aligned}
 \text{Horizontal: } & H_x = (270^\circ - B); & H_y &= (360^\circ - B); & H_z &= (90^\circ - B); \\
 \text{Vertical: } & V_x = (90^\circ + Dip); & V_y &= 0; & V_z &= -Dip;
 \end{aligned} \tag{13}$$

De esta manera se definen los ángulos horizontales H_i de origen en el eje Este hacia el Norte y los ángulos verticales V_i de origen horizontal positivo hacia arriba de cada eje local.

Matemáticamente para pasar matricialmente de unas coordenadas a otras se tiene la siguiente expresión [12]:

$$[T]_{ENC} = [R_{LT}]^T [T]_{xyz} [R_{LT}] \tag{14}$$

Como se quieren averiguar las componentes en coordenadas totales podemos expresar la ecuación anterior de la siguiente manera [12]:

$$[T]_{xyz} = [R_{LT}] [T]_{ENC} [R_{LT}]^T \tag{15}$$

Desglosando la expresión anterior se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
[T]_{xyz}(1,1) &= \sigma_x = \sigma_E l_x^2 + \sigma_N m_x^2 + \sigma_C n_x^2 + 2\tau_{EN} l_x m_x + 2\tau_{NC} m_x n_x + 2\tau_{EC} l_x n_x \\
[T]_{xyz}(2,2) &= \sigma_y = \sigma_E l_y^2 + \sigma_N m_y^2 + \sigma_C n_y^2 + 2\tau_{EN} l_y m_y + 2\tau_{NC} m_y n_y + 2\tau_{EC} l_y n_y \\
[T]_{xyz}(3,3) &= \sigma_z = \sigma_E l_z^2 + \sigma_N m_z^2 + \sigma_C n_z^2 + 2\tau_{EN} l_z m_z + 2\tau_{NC} m_z n_z + 2\tau_{EC} l_z n_z \\
[T]_{xyz}(1,2) &= \tau_{xy} = \sigma_E l_x l_y + \sigma_N m_x m_y + \sigma_C n_x n_y + \tau_{EN}(l_x m_y + l_y m_x) + \tau_{NC}(m_x n_y + m_y n_x) + \tau_{EC}(l_x n_y + l_y n_x) \\
[T]_{xyz}(2,3) &= \tau_{yz} = \sigma_E l_y l_z + \sigma_N m_y m_z + \sigma_C n_y n_z + \tau_{EN}(l_y m_z + l_z m_y) + \tau_{NC}(m_y n_z + m_z n_y) + \tau_{EC}(l_y n_z + l_z n_y) \\
[T]_{xyz}(1,3) &= \tau_{xz} = \sigma_E l_x l_z + \sigma_N m_x m_z + \sigma_C n_x n_z + \tau_{EN}(l_x m_z + l_z m_x) + \tau_{NC}(m_x n_z + m_z n_x) + \tau_{EC}(l_x n_z + l_z n_x)
\end{aligned} \tag{16}$$

Luego reemplazando cada uno de estos esfuerzos en la Ecuación 9, se expresa la siguiente ecuación:

$$U = (f_1 \sigma_x + f_2 \sigma_y + f_3 \sigma_z + f_4 \tau_{xy} + f_5 \tau_{yz} + f_6 \tau_{xz}) \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
f_1 \sigma_x &= \sigma_E f_1 l_x^2 + \sigma_N f_1 m_x^2 + \sigma_C f_1 n_x^2 + 2\tau_{EN} f_1 l_x m_x + 2\tau_{NC} f_1 m_x n_x + 2\tau_{EC} f_1 l_x n_x \\
f_2 \sigma_y &= \sigma_E f_2 l_y^2 + \sigma_N f_2 m_y^2 + \sigma_C f_2 n_y^2 + 2\tau_{EN} f_2 l_y m_y + 2\tau_{NC} f_2 m_y n_y + 2\tau_{EC} f_2 l_y n_y \\
f_3 \sigma_z &= \sigma_E f_3 l_z^2 + \sigma_N f_3 m_z^2 + \sigma_C f_3 n_z^2 + 2\tau_{EN} f_3 l_z m_z + 2\tau_{NC} f_3 m_z n_z + 2\tau_{EC} f_3 l_z n_z \\
f_4 \tau_{xy} &= \sigma_E f_4 l_x l_y + \sigma_N f_4 m_x m_y + \sigma_C f_4 n_x n_y + \tau_{EN} f_4 (l_x m_y + l_y m_x) + \tau_{NC} f_4 (m_x n_y + m_y n_x) + \tau_{EC} f_4 (l_x n_y + l_y n_x) \\
f_5 \tau_{yz} &= \sigma_E f_5 l_y l_z + \sigma_N f_5 m_y m_z + \sigma_C f_5 n_y n_z + \tau_{EN} f_5 (l_y m_z + l_z m_y) + \tau_{NC} f_5 (m_y n_z + m_z n_y) + \tau_{EC} f_5 (l_y n_z + l_z n_y) \\
f_6 \tau_{xz} &= \sigma_E f_6 l_x l_z + \sigma_N f_6 m_x m_z + \sigma_C f_6 n_x n_z + \tau_{EN} f_6 (l_x m_z + l_z m_x) + \tau_{NC} f_6 (m_x n_z + m_z n_x) + \tau_{EC} f_6 (l_x n_z + l_z n_x)
\end{aligned} \tag{18}$$

Reordenando las ecuaciones anteriores utilizando como factor común las componentes de esfuerzos del tensor en coordenadas totales, se tiene lo siguiente:

$$U = J_1 \sigma_E + J_2 \sigma_N + J_3 \sigma_C + J_4 \tau_{EN} + J_5 \tau_{NC} + J_6 \tau_{EC} \tag{19}$$

$$J_1 = f_1 l_x^2 + f_2 l_y^2 + f_3 l_z^2 + f_4 l_x l_y + f_5 l_y l_z + f_6 l_x l_z$$

$$J_2 = f_1 m_x^2 + f_2 m_y^2 + f_3 m_z^2 + f_4 m_x m_y + f_5 m_y m_z + f_6 m_x m_z$$

$$J_3 = f_1 n_x^2 + f_2 n_y^2 + f_3 n_z^2 + f_4 n_x n_y + f_5 n_y n_z + f_6 n_x n_z$$

$$J_4 = 2f_1 l_x m_x + 2f_2 l_y m_y + 2f_3 l_z m_z + f_4 (l_x m_y + l_y m_x) + f_5 (l_y m_z + l_z m_y) + f_6 (l_x m_z + l_z m_x) \tag{20}$$

$$J_5 = 2f_1 m_x n_x + 2f_2 m_y n_y + 2\tau_{NC} f_3 m_z n_z + f_4 (m_x n_y + m_y n_x) + f_5 (m_y n_z + m_z n_y) + f_6 (m_x n_z + m_z n_x)$$

$$J_6 = 2f_1 l_x n_x + 2f_2 l_y n_y + 2f_3 l_z n_z + f_4 (l_x n_y + l_y n_x) + f_5 (l_y n_z + l_z n_y) + f_6 (l_x n_z + l_z n_x)$$

De ahora en adelante si se realizan r mediciones se denotará por $\tilde{J} = [J_{ij}]$ a la matriz que contiene a los parámetros $J_1^{(i)}, J_2^{(i)}, \dots, J_6^{(i)}$, de la i – ésima medición, es decir:

$$J_{ij} = J_j^{(i)} \quad (21)$$

Adicionalmente, si no hay lugar a confusión, se escribirá simplemente J_j en lugar de $J_j^{(i)}$.

3.6. SOLUCIÓN PARA ESTIMACIÓN DEL TENSOR DE ESFUERZOS

Se debe tener en cuenta que se tiene un sistema de ecuaciones con seis incógnitas, y en un principio doce ecuaciones, por ende, cuando los doce strain gauges de la celda HI funcionan correctamente durante una medición se podrían obtener datos de deformación redundantes. Se utiliza un procedimiento de regresión de mínimos cuadrados para encontrar la solución que mejor se ajuste a todos los datos de deformación, a partir de los cuales se calculan los componentes del tensor de esfuerzos.

Este método fue propuesto por Panek [13], y se basa en estimar las componentes de esfuerzos minimizando la desviación de los resultados obtenidos al reemplazar estas componentes en las ecuaciones con respecto al valor real medido, en otras palabras, se buscan las incógnitas que reduzcan el error de la estimación en cada una de las ecuaciones.

Se supone que se selecciona aleatoriamente un conjunto de muestras de valores U de una población en la que cada valor medido de U puede ser representado por:

$$U = J_1\beta_1 + J_2\beta_2 + J_3\beta_3 + J_4\beta_4 + J_5\beta_5 + J_6\beta_6 + \epsilon \quad (22)$$

$$U = J_1b_1 + J_2b_2 + J_3b_3 + J_4b_4 + J_5b_5 + J_6b_6 + \varepsilon$$

En donde β_i son los parámetros poblacionales (valores exactos del modelo) y b_i son sus respectivas estimaciones; además ϵ es el error verdadero asociado a cada medición U , y ε es el residuo asociado a la regresión lineal. La solución a través de mínimos cuadrados consiste en encontrar un conjunto de estimaciones mediante el cual se minimiza la suma de cuadrados de los residuos ε . En donde ε puede expresarse de la siguiente manera:

$$\varepsilon = U - (J_1b_1 + J_2b_2 + J_3b_3 + J_4b_4 + J_5b_5 + J_6b_6) \quad (23)$$

Luego,

$$\sum \varepsilon^2 = \sum [U - (J_1 b_1 + J_2 b_2 + J_3 b_3 + J_4 b_4 + J_5 b_5 + J_6 b_6)]^2 \quad (24)$$

$$\sum \varepsilon^2 = \sum \left[\begin{array}{l} U^2 - 2UJ_1 b_1 - 2UJ_2 b_2 - \dots - 2UJ_6 b_6 \\ + J_1 b_1 + J_2 b_2 + \dots + J_6 b_6 \\ + 2J_1 b_1 J_2 b_2 + 2J_1 b_1 J_3 b_3 + \dots + 2J_1 b_1 J_6 b_6 \\ + 2J_2 b_2 J_3 b_3 + 2J_2 b_2 J_4 b_4 + \dots + 2J_2 b_2 J_6 b_6 \\ + 2J_3 b_3 J_4 b_4 + 2J_3 b_3 J_5 b_5 + 2J_3 b_3 J_6 b_6 + 2J_4 b_4 J_5 b_5 \\ + 2J_4 b_4 J_6 b_6 + 2J_5 b_5 J_6 b_6 \end{array} \right] \quad (25)$$

En donde la sumatoria se realiza sobre todas las mediciones U.

Ahora bien, para minimizar $\sum \varepsilon^2$ se realiza la derivada parcial con respecto a b_i y se igualan a cero. Por ejemplo, derivando con respecto a b_1 resulta:

$$\frac{\partial(\sum \varepsilon^2)}{\partial b_1} = 0 = \sum [-UJ_1 + b_1 J_1^2 + b_2 J_1 J_2 + b_3 J_1 J_3 + \dots + b_6 J_1 J_6] \quad (26)$$

Repitiendo el proceso para cada una de las componentes, se llega al siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} b_1 \Sigma J_1^2 + b_2 \Sigma J_1 J_2 + b_3 \Sigma J_1 J_3 + b_4 \Sigma J_1 J_4 + b_5 \Sigma J_1 J_5 + b_6 \Sigma J_1 J_6 &= \Sigma U J_1 \\ b_1 \Sigma J_2 J_1 + b_2 \Sigma J_2^2 + b_3 \Sigma J_2 J_3 + b_4 \Sigma J_2 J_4 + b_5 \Sigma J_2 J_5 + b_6 \Sigma J_2 J_6 &= \Sigma U J_2 \\ b_1 \Sigma J_3 J_1 + b_2 \Sigma J_3 J_2 + b_3 \Sigma J_3^2 + b_4 \Sigma J_3 J_4 + b_5 \Sigma J_3 J_5 + b_6 \Sigma J_3 J_6 &= \Sigma U J_3 \\ b_1 \Sigma J_4 J_1 + b_2 \Sigma J_4 J_2 + b_3 \Sigma J_4 J_3 + b_4 \Sigma J_4^2 + b_5 \Sigma J_4 J_5 + b_6 \Sigma J_4 J_6 &= \Sigma U J_4 \\ b_1 \Sigma J_5 J_1 + b_2 \Sigma J_5 J_2 + b_3 \Sigma J_5 J_3 + b_4 \Sigma J_5 J_4 + b_5 \Sigma J_5^2 + b_6 \Sigma J_5 J_6 &= \Sigma U J_5 \\ b_1 \Sigma J_6 J_1 + b_2 \Sigma J_6 J_2 + b_3 \Sigma J_6 J_3 + b_4 \Sigma J_6 J_4 + b_5 \Sigma J_6 J_5 + b_6 \Sigma J_6^2 &= \Sigma U J_6 \end{aligned} \quad (27)$$

Para efectos prácticos es conveniente definir:

$$a_{ij} = \Sigma J_i J_j ; g_j = \Sigma U J_j ; (i, j = 1, 2, \dots, 6) \quad (28)$$

De esta manera las Ecuación 27 quedan definidas de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 b_1 a_{11} + b_2 a_{12} + b_3 a_{13} + b_4 a_{14} + b_5 a_{15} + b_6 a_{16} &= g_1 \\
 b_1 a_{21} + b_2 a_{22} + b_3 a_{23} + b_4 a_{24} + b_5 a_{25} + b_6 a_{26} &= g_2 \\
 b_1 a_{31} + b_2 a_{32} + b_3 a_{33} + b_4 a_{34} + b_5 a_{35} + b_6 a_{36} &= g_3 \\
 b_1 a_{41} + b_2 a_{42} + b_3 a_{43} + b_4 a_{44} + b_5 a_{45} + b_6 a_{46} &= g_4 \\
 b_1 a_{51} + b_2 a_{52} + b_3 a_{53} + b_4 a_{54} + b_5 a_{55} + b_6 a_{56} &= g_5 \\
 b_1 a_{61} + b_2 a_{62} + b_3 a_{63} + b_4 a_{64} + b_5 a_{65} + b_6 a_{66} &= g_6
 \end{aligned} \tag{29}$$

En donde $a_{ij} = a_{ji}$. De esta manera se simplifican las ecuaciones y se plantean como matrices:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} = A ; \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix} = b ; \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \\ g_6 \end{bmatrix} = g \tag{30}$$

Matemáticamente la matriz A es simétrica y su inversa siempre existe, además estas matrices forman un sistema de ecuaciones lineales que puede ser solucionado matricialmente como sigue [13]:

$$[A][b] = [g] \tag{31}$$

$$[b] = [A]^{-1}[g]$$

Cabe destacar que $[A] = [\tilde{J}]^t[\tilde{J}]$ y además $[g] = [\tilde{J}]^t[U]$, es decir, el sistema se puede reescribir como:

$$[\tilde{J}]^t[\tilde{J}][b] = [\tilde{J}]^t[U] \tag{32}$$

Lo cual se conoce como sistema de ecuaciones normales. De esta manera es posible encontrar las soluciones y por ende las componentes del tensor de esfuerzos a través del método de mínimos cuadrados.

3.7. CÁLCULO DE ESFUERZOS PRINCIPALES

En el apartado anterior se formuló la solución del sistema de ecuaciones y como resultado se obtiene el tensor de esfuerzos en coordenadas totales (E,N,C). El tensor de esfuerzos es una matriz simétrica de orden 3 con coeficientes reales. Se verá que esta forma de la matriz de esfuerzos implica lo siguiente:

En cada punto P del sólido elástico existen al menos tres planos ortogonales entre sí de modo que el vector tensión $\vec{\sigma}$ asociado a ellos tiene componente intrínseca tangencial τ igual a cero. Es decir, según esos planos, el vector tensión sólo tiene componente intrínseca normal: $\vec{\sigma} = \vec{\sigma}_n$.

Las direcciones de las normales a dichos planos $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3$, se llaman direcciones principales, y las componentes intrínsecas normales de los vectores de esfuerzo según esos planos, σ_1, σ_2 y σ_3 se llaman esfuerzos principales. Por convenio ordenaremos los esfuerzos principales de forma que: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.

La deducción de la existencia de los esfuerzos y direcciones principales es como sigue. Las componentes (α, β, γ) de las direcciones principales, si existen, deberán cumplir:

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} \quad (33)$$

$$\vec{\sigma} = [T_{ENC}]\vec{n} = \sigma_n \vec{n} \quad (\text{Lo que implica que la componente tangencial } \tau \text{ sea nula})$$

Es decir, las direcciones principales \vec{n} y los esfuerzos principales σ_n , si existiesen, deben cumplir:

$$\{[T_{ENC}] - \sigma_n [I]\}\vec{n} = 0 \quad (34)$$

Donde $[I]$ es la matriz identidad.

La relación anterior expresa un problema de valores propios para la matriz $[T_{ENC}]$ en el punto P del sólido elástico [12].

Como $[T_{ENC}]$ es una matriz simétrica de orden 3 con coeficientes reales, $[T_{ENC}]$ tiene 3 valores propios reales, que se llamarán σ_1 , σ_2 y σ_3 . Estos valores propios son los esfuerzos principales. En consecuencia, las tensiones principales existen, tal y como se han definido.

Cada valor propio σ_i , $i = 1,2,3$, tiene un vector propio asociado \vec{n}_i , que se obtiene resolviendo el sistema de ecuaciones:

$$\{[T_{ENC}] - \sigma_i[I]\}\vec{n}_i = 0 \quad (35)$$

Con la condición adicional de que si las componentes \vec{n}_i son $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ debe cumplirse que:

$$\alpha_i^2 + \beta_i^2 + \gamma_i^2 = 1 \quad (36)$$

Por ser $[T_{ENC}]$ una matriz simétrica, los vectores propios son ortogonales entre sí cuando los valores propios σ_1 , σ_2 y σ_3 son distintos. Es decir:

$$\begin{aligned} \vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2 &= 0 \\ \vec{n}_1 \cdot \vec{n}_3 &= 0 \\ \vec{n}_2 \cdot \vec{n}_3 &= 0 \end{aligned} \quad (37)$$

De esta forma, las direcciones principales, tal y como las hemos definido, son ortogonales entre sí.

Desdoblado la Ecuación 34 en tres ecuaciones escalares, el problema de valores propios de la matriz $[T_{ENC}]$ se escribe:

$$\begin{bmatrix} \sigma_E - \sigma_n & \tau_{EN} & \tau_{EC} \\ \tau_{EN} & \sigma_N - \sigma_n & \tau_{NC} \\ \tau_{EC} & \tau_{NC} & \sigma_C - \sigma_n \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = 0 \quad (38)$$

Se trata de un sistema de ecuaciones homogéneo, función de un parámetro real σ_n .

Para que este sistema tenga solución distinta de la trivial ($\alpha = \beta = \gamma = 0$), el determinante de la matriz de coeficientes debe ser nulo, esto es:

$$\begin{vmatrix} \sigma_E - \sigma_n & \tau_{EN} & \tau_{EC} \\ \tau_{EN} & \sigma_N - \sigma_n & \tau_{NC} \\ \tau_{EC} & \tau_{NC} & \sigma_C - \sigma_n \end{vmatrix} = 0 \quad (39)$$

La ecuación anterior es una ecuación de tercer grado en σ_n , con tres raíces reales, que son los valores de los esfuerzos principales. Dicha ecuación puede escribirse como:

$$-\sigma_n^3 + I_1\sigma_n^2 - I_2\sigma_n + I_3 = 0 \quad (40)$$

con:

$$I_1 = \sigma_E + \sigma_N + \sigma_C$$

$$I_2 = \sigma_E\sigma_N + \sigma_E\sigma_C + \sigma_N\sigma_C - \tau_{EN}^2 - \tau_{EC}^2 - \tau_{NC}^2 \quad (41)$$

$$I_3 = \det[T_{ENC}]$$

Calculando las raíces de esta última ecuación se obtiene el valor de los esfuerzos principales. Los esfuerzos principales son una característica intrínseca del estado tensional en un punto y, por tanto, independiente del sistema de referencia seleccionado para el tensor de esfuerzos $[T]$.

En consecuencia, los coeficientes I_1 , I_2 , I_3 , deben ser independientes del sistema de referencia. Estos coeficientes se conocen con el nombre de invariantes de esfuerzos, primero, segundo y tercero respectivamente. En otras palabras, el valor de los invariantes en un punto, no cambian al cambiar el sistema de referencia para definir el tensor de esfuerzos $[T]$ [12].

3.8. CÁLCULO DE DIRECCIONES PRINCIPALES

En base al apartado anterior se tienen los valores de los esfuerzos principales, por ende, las direcciones principales se calculan de la siguiente manera.

La dirección principal asociada a σ_1 , $\vec{n}_1 = (\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ se obtiene a partir del sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} \sigma_E - \sigma_{n_1} & \tau_{EN} & \tau_{EC} \\ \tau_{EN} & \sigma_N - \sigma_{n_1} & \tau_{NC} \\ \tau_{EC} & \tau_{NC} & \sigma_C - \sigma_{n_1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} = 0 \quad (42)$$

donde:

σ_{n_1} : Esfuerzo principal 1, asociado a una de las raíces de la Ecuación 40.

Al ser las tensiones principales diferentes (no hay raíces dobles ni triples en la ecuación de tercer grado que hemos resuelto en el punto anterior), sólo hay dos ecuaciones independientes en el sistema. Tomando las dos primeras:

$$(\sigma_E - \sigma_{n_1})\alpha_1 + \tau_{EN}\beta_1 + \tau_{EC}\gamma_1 = 0 \quad (43)$$

$$\tau_{EN}\alpha_1 + (\sigma_N - \sigma_{n_1})\beta_1 + \tau_{NC}\gamma_1 = 0$$

Y teniendo la Ecuación 36, se resuelve el sistema de ecuaciones y se hayan los valores de α_1 , β_1 y γ_1 .

El mismo procedimiento se realiza para la dirección principal asociada a σ_2 , $\vec{n}_2 = (\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$, logrando obtener los valores de α_2 , β_2 y γ_2 .

Finalmente, para calcular la dirección principal asociada a σ_3 , $\vec{n}_3 = (\alpha_3, \beta_3, \gamma_3)$, se usa la condición de que esta sea ortogonal a \vec{n}_1 y a \vec{n}_2 , de la siguiente manera [12]:

$$\vec{n}_3 = \vec{n}_1 \times \vec{n}_2 \quad (44)$$

3.9. PROCEDIMIENTO MEDICIÓN DE ESFUERZOS CON CELDAS HI

La metodología de medición de esfuerzos a través de celdas Hollow Inclusion (HI) consiste a grandes rasgos en la instalación de un instrumento cilíndrico que mide deformaciones dentro del macizo rocoso, esta medición se realiza cuando el instrumento es sobreperforado, en otras palabras, cuando es liberado de los esfuerzos a los que se encontraba sometido, esta liberación o alivio de esfuerzos se registra y es analizada.

En la Figura 2.7 se presentaron de forma esquemática las etapas principales del proceso de medición de esfuerzo mediante celda HI. Una vez realizado el proceso de overcoring (sobreperforado) y recuperado el testigo de 15.24 [cm] de diámetro con la celda HI en su interior, se procede a efectuar el ensayo biaxial para obtener los parámetros elásticos de la roca. Estas etapas principales son un resumen a grande rasgos de todo el proceso de medición de esfuerzos a través de celdas HI, este tiene aún más pasos y consideraciones que tener en cuenta, estos se enumeran a continuación y se detallan más adelante:

1. Definir sitio en donde se realizará la medición (Geología, geomecánica, operaciones y/o proyectos).
2. Definir parámetros del pozo (Largo y orientación del pozo).
3. Gestión de recursos y servicios con operaciones y/o proyectos (Traslado de equipos, equipamiento y factibilidad de servicios, agua, electricidad, entre otras, además de condiciones del sitio).
4. Perforación de pozo de 15.24 [cm] de diámetro.
5. Análisis de testigo extraído de 15.24 [cm].
6. Perforación concéntrica de 38 [mm] de diámetro. Longitud de pozo [40-60][cm].
7. Análisis de testigo extraído de 38 [mm] y definición de ubicación de la celda.
8. Preparación del pozo (Limpieza de este con agua y/o agente para este fin).
9. Preparación de la celda a instalar y de la resina.
10. Instalación de la celda.
11. Fraguado de resina. [16-48][h].
12. Realizar overcoring en 15.24 [cm] de diámetro, con celda instalada y recuperación de testigo.
13. Test cámara biaxial.
14. Realizar ensayo biaxial en el testigo extraído con la celda.

15. Entrega de la información obtenida.

16. Análisis de datos e información.

3.9.1. Definición de Sitio de Medición

Antes de comenzar con el proceso de medición de esfuerzos o de instalar cualquier instrumento, se debe tener bien definido el lugar de medición, es importante recopilar información que pueda ser útil acerca de este y analizar la viabilidad de llevar a cabo las mediciones en el sitio. Por ende, la definición del sitio debe considerar lo siguiente:

- Antecedentes e Información: Revisar litología, condiciones estructurales del sector y cualquier información que permita evaluar preliminarmente si los resultados a obtener serán representativos. Por otro lado, se debe analizar la presencia de obras mineras cercanas, esto se realiza con el fin de evitar interferencia en los datos que serán medidos por la celda, en otras palabras, se debe definir una distancia adecuada para evitar esfuerzos inducidos en la medición.
- Disponibilidad y Espacio Operacional: El lugar en donde se realizarán las mediciones debe tener en cuenta la disponibilidad operacional, en otras palabras, debe procurar no interrumpir trabajos en el sector ni que estos puedan afectar las mediciones que se quieran llevar a cabo, de este modo debe existir el aviso y acuerdo con los entes correspondientes para llevar a cabo la labor. Además, es importante un espacio operacional adecuado, en donde las dimensiones permitan trabajar adecuadamente, generalmente el espacio mínimo requerido viene dado por la maquinaria de perforación posicionada de manera perpendicular al avance de la galería más cierta distancia que permita la maniobrabilidad de ella.
- Seguridad: Se debe asegurar la mínima exposición del personal a riesgos no controlados y una condición ambiental adecuada para realizar labores, considerando los niveles de polución y de ruido. Además, se debe contar con fortificación definitiva e iluminación adecuada. Por otro lado, siempre se deben identificar las vías de evacuación y asegurar que estas se encuentren despejadas, el sector debe contar con sistemas de alarmas contra incendios operativos, y el personal debe contar con comunicación radial.
- Suministros: Se debe asegurar la disponibilidad de los suministros necesarios en la labor, por ejemplo, la disponibilidad de energía eléctrica y agua industrial constante y

sin interrupciones, además de la existencia de red de drenaje adecuado para la correcta evacuación del agua durante todo el tiempo de ejecución de los trabajos.

En base al sitio de medición se definen parámetros importantes que son críticos al momento de efectuar la medición de esfuerzos con celdas HI, estos siempre se deben tener en consideración:

- La distancia en que deberá ser instalada la celda, o en otras palabras la longitud del pozo de 15.24 [cm] debe ser al menos de 5 veces el radio de la labor (considerando una labor circular), o al menos de 2.5 veces el ancho de la labor (considerando geometría típica), esto es para evitar la interferencia de la galería con la medición.
- El ancho mínimo operacional está limitado por la maquinaria de perforación (longitud del equipo), y por la longitud de las barras a utilizar, en general el ancho mínimo estaría dado por la longitud de la barra a utilizar más un metro, considerando que el bastidor (donde se desplaza el chuck) no se apega a la caja.
- Un área mínima ideal para realizar las labores es de 10 [m^2], para considerar una buena distribución de los componentes del equipo e insumos a utilizar (unidad de perforación, unidad de energía, unidad de lodos y accesorios necesarios para la operación).

3.9.2. Parámetros del Pozo

Para llevar a cabo la medición se deben tener claras las características que tendrá el pozo, estas características son el largo y la orientación de este. El largo como se nombró anteriormente está sujeto a la interferencia que pudieran causar labores cercanas al lugar en donde quedará instalada la celda. Por otro lado, la orientación del pozo es un poco más compleja de definir. Cuando se realizan mediciones de esfuerzo con este método, por temas de cálculo se asume que la roca es tipo CHILE, y en la práctica se debe procurar que estas suposiciones se cumplan en el mayor grado posible, por ende, para definir la orientación se procede de la siguiente forma:

- Personal de Geología: Se encarga de definir el sector donde se estima que no existen discontinuidades o contactos litológicos, procurando realizar la instalación de la celda en un material continuo y homogéneo. Para ello, toma como base información de mapeo geológico de labores y sondajes del entorno cercano.
- Personal de Geomecánica: Se encarga de definir la ubicación más adecuada de la celda en términos de profundidad del pozo, asegurando que se encuentre fuera de la

zona de daño o zona plastificada, procurando definir su ubicación en un material en condición elástica. A su vez, se debe privilegiar (en caso de ser posible) orientar el pozo en dirección del esfuerzo principal mayor S_1 , esto con la idea de minimizar problemas de anisotropía de esfuerzo que pudieran afectar las mediciones.

3.9.3. Gestión de Recursos y Servicios

Para poder llevar toda la implementación al lugar de trabajo se necesita realizar un traslado de equipos y equipamiento, gestión que debe realizarse en conjunto por el mandante (el que contrata el servicio) y por el ejecutante (el que ejecuta los trabajos), además en temas de servicios son necesarias las siguientes requerimientos en el sector:

- Energía eléctrica requerida por el equipo de perforación (en la DET generalmente de 600 [V] o 380 [V], considerando para los 600 [V] un transformador).
- Agua industrial, la cual también deberá ser constante y no se debe interrumpir el suministro en ningún momento.
- Red de drenaje, para permitir el desagüe del agua generado durante el proceso de perforación.

Si cualquiera de los dos primeros requerimientos fallara durante el proceso de ensayo del overcoring, resultará una medición fallida, la cual deberá ser descartada.

3.9.4. Perforación de Pozo de 15.24 [cm] de Diámetro

La perforación por lo general siempre debe tener una leve inclinación positiva $\geq 3^\circ$, esto permite que el agua utilizada en el proceso de perforación pueda ser evacuada por completo del pozo y permite retirar los testigos de 15.24 [cm] con mayor facilidad a medida que se avanza en profundidad, incluyendo el testigo con la celda instalada en el fondo cuando finaliza el proceso de overcoring. Y como se nombró anteriormente, la longitud del pozo es de al menos 2.5 veces el ancho de la labor.

3.9.5. Análisis del Testigo de 15.24 [cm]

Antes de comenzar con la perforación del pozo concéntrico de 38 [mm] de diámetro se deben considerar los siguientes puntos, que se basan en el análisis del testigo:

- Sobreperforación en el pozo de 15.24 [cm] (ver Figura 3.4), con la ayuda de la pala recuperadora de testigos se deberá verificar si en el fondo del pozo se encuentra roca

sobre perforada en 15.24 [cm] sin recuperar, y ver la longitud de esta sobreperforación. Lo anterior es importante ya que si queda sobreperforado se perderán datos de las deformaciones en esta zona, debido a que la máquina perforadora avanzará de manera rápida y de golpe hasta tocar el fondo de la perforación en este trayecto. Con el fin de minimizar el efecto de esta sobreperforación en la medición de esfuerzos se admite una tolerancia de 5 [cm] de sobreperforado. Si el sobreperforado fuera superior, se debe realizar otra carrera (avance de la perforación del pozo de 15.24 [cm]).

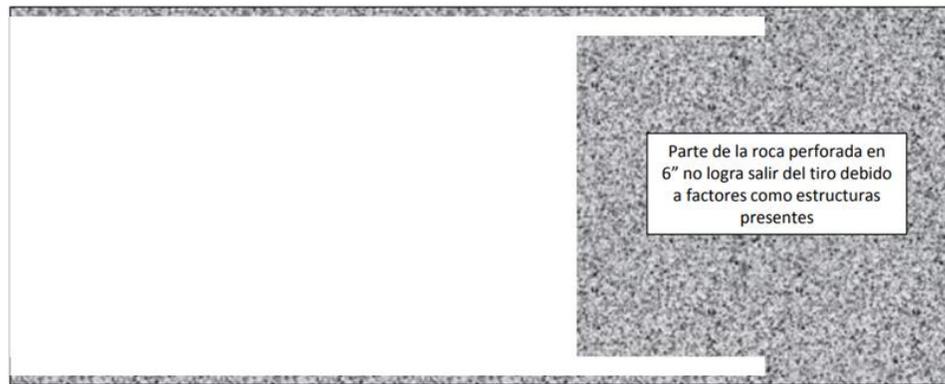


Figura 3.4: Sobre perforado en pozo de 15.24 [cm] [14].

- Otro punto importante tiene relación con en el tipo de corte que se genera en el fondo del pozo de 15.24 [cm] de diámetro, el cual idealmente debe ser perpendicular al eje del pozo (ver Figura 3.5). En caso contrario, de existir algún nivel relevante de inclinación (forma de cuña en el fondo), existe una alta probabilidad de generarse desviación en la perforación del pozo de 38 [mm] de diámetro.

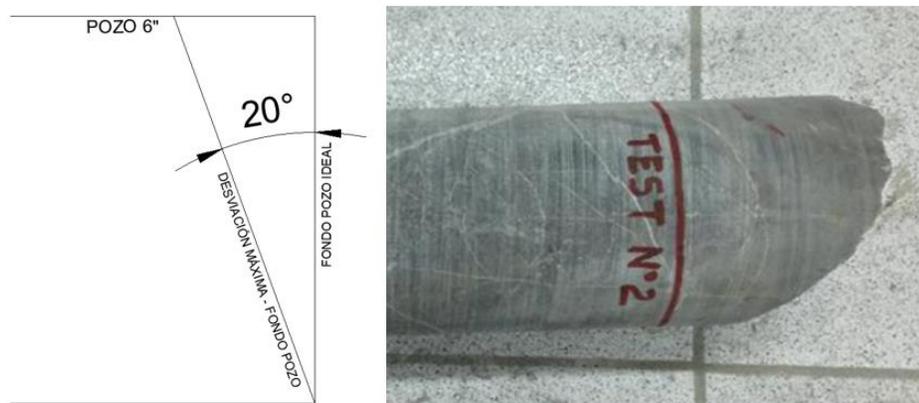


Figura 3.5: Tolerancia en la inclinación del corte al fondo del pozo [14].

Respecto a este punto, y considerando las limitaciones operacionales, se admite una tolerancia de $\pm 20^\circ$ en la desviación de perpendicularidad del fondo respecto al eje del pozo de 15.24 [cm], lo cual debe ser inspeccionado con el testigo extraído. En caso de que no se cumpla esta condición, se debe continuar con la perforación de 15.24 [cm] (realizar una carrera adicional) hasta asegurar el cumplimiento.

3.9.6. Perforación Concéntrica de 38 [mm] de Diámetro

La perforación concéntrica debe tener una longitud entre 50 y 60 [cm], esto puede variar dependiendo de la longitud de la celda y de los diámetros utilizados para ambos pozos. Se debe comprobar que es concéntrica con respecto al pozo de 15.24 [cm].

3.9.7. Análisis del Testigo de 38 [mm] y Definición de Ubicación de la Celda

La longitud nombrada con anterioridad permite tener un campo visual de cómo se distribuyen las estructuras al interior del pozo, permitiendo en este sentido, evaluar y determinar la mejor ubicación para instalar la celda.

Lo anterior es importante ya que si no se realiza esta inspección la celda puede quedar instalada en una zona donde exista la presencia de una estructura con un ancho que abarque la zona de las rosetas con los strain gauges, resultando una medición errónea o poco confiable.

Al extraer el testigo de 38 [mm] se debe efectuar la respectiva revisión de este, corroborando que no existan discontinuidades o contactos litológicos en la zona de instalación de la celda. Esta zona debe encontrarse dentro de un margen de 10 [cm] de cada extremo del testigo extraído, nunca menor a esto. En la Figura 3.6 se presenta un ejemplo de la zona de instalación.



Figura 3.6: Zona de instalación celda HI [14].

Si al inspeccionar la perforación existen dudas de la ubicación ideal de la celda, se deberá sobre perforar el pozo con la corona de 15.24 [cm] y retirar el testigo completo. Luego de esto se perforará nuevamente otro pozo de 38 [mm] en la nueva zona.

De esta manera se debe definir la profundidad a la que se instalará la celda, o en otras palabras en que parte del pozo de 38 [mm] se emplazará.

3.9.8. Preparación del Pozo de 38 [mm]

Se debe realizar una limpieza al pozo de 38 [mm] para optimizar la adherencia de la resina con la roca, esta limpieza se lleva a cabo en los siguientes pasos:

1. Se inyecta agua a presión durante 5 [min] hacia el fondo del pozo, con el fin de limpiar y extraer del pozo de cualquier detritus que haya quedado producto a la perforación de este.
2. Se utiliza la barra de limpieza envuelta por gaza y se le vierte alcohol por toda su extensión y se realiza el procedimiento como sigue: (1) se introduce la barra dentro del pozo, (2) se llega hasta el fondo, (3 y 4) se extrae la barra y se comienza a girar, (5) se vuelve a introducir y se repite el proceso hasta completar unos 10 ciclos (ver Figura 3.7).

Además de limpiar las impurezas superficiales en el contorno del pozo, el alcohol ayudará a secarlo más rápido.

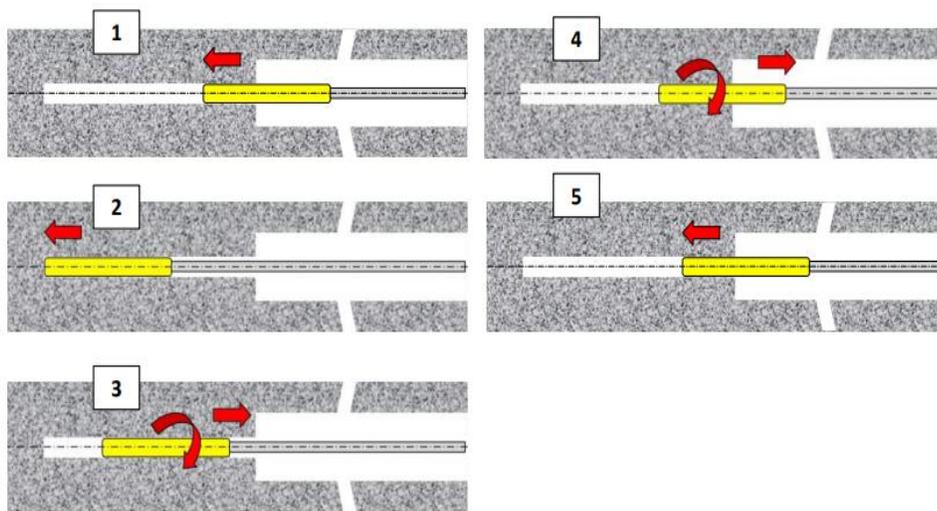


Figura 3.7: Proceso de limpieza de pozo de 38 [mm] [14].

3.9.9. Preparación de Celda HI y Resina

La celda HI antes de ser instalada debe ser preparada. A continuación, se detallan las acciones necesarias para acondicionar la celda:

3.9.9.1. *Topes de Instalación*

Se liman o desbastan los topes de instalación de la celda HI hasta alcanzar el diámetro exterior de la corona de la perforación del pozo de 38 [mm], esto se realiza comparando el diámetro de la corona y el de la celda con los topes con un pie de metro, y así cada vez a medida que se va limando, hasta llegar a una igualdad (ver Figura 3.8). Posteriormente, esta debe ser limpiada con alcohol a fin de quitar todas las impurezas y de esta manera mejorar el contacto resina – celda.

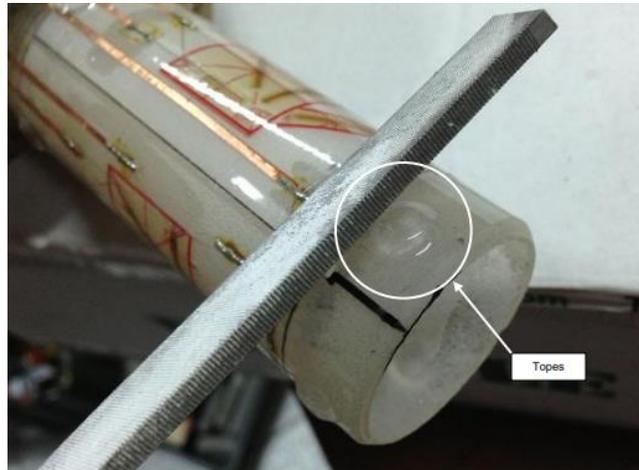


Figura 3.8: Desbaste de topes de instalación celda HI [14].

3.9.9.2. *Definición de Largo de Flecha*

Se debe definir el largo de la flecha, el cual está condicionado por la profundidad a la que se quiere dejar instalada la celda (profundidad definida cuando se analizó el testigo de 38 [mm]), además se debe tener siempre en cuenta que la celda no puede quedar a menos de 10 [cm] de ningún extremo del pozo. La Figura 3.9 muestra un esquema con las longitudes de la celda HI.

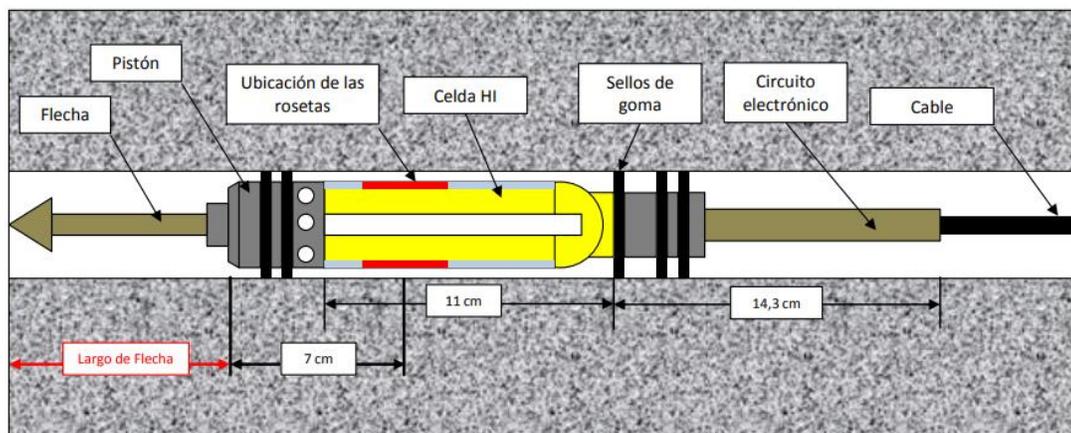


Figura 3.9: Esquema de longitudes celda HI [14].

Por ende, definir la longitud de la flecha no es más que realizar la diferencia entre la distancia deseada entre el fondo del pozo y la posición de las rosetas con los 7 [cm] definidos por la longitud de el pistón hasta las rosetas, esto dependerá claramente del diseño de la celda.

Por ejemplo, si se desea que las rosetas estén a 25 [cm] del fondo del pozo, entonces:

$$\text{Largo de flecha} = 25 \text{ [cm]} - 7 \text{ [cm]} = 18 \text{ [cm]}$$

3.9.9.3. Preparación y Vertido de Resina

Antes de instalar la celda se debe preparar la resina, la cual cementara la celda HI en el pozo de 38 [mm]. Cada resina está formulada especialmente para la temperatura de la roca que albergará la celda HI (dato entregado previamente por el mandante). En la Figura 3.10 se muestran los componentes e insumos de la resina.

Antes de comenzar a preparar la resina, la barra de orientación, la barra de centralizado y una barra de instalación deben estar unidas. Como medida de seguridad, es importante señalar que este proceso de preparación de la resina debe realizarse con guantes de látex (suministrados en la caja de los componentes de la resina) y una mascarilla, ya que la reacción entre ambos componentes genera gases tóxicos. El proceso de preparación de la resina debe asegurar que se elimine cualquier exceso de aire en la resina, evitando la formación de burbujas en el interior de la celda. Para esto, se debe asegurar la continuidad del vaciado de la resina en el interior del cilindro de la celda hasta la marca indicada para este fin, de tal forma de no obstruir los orificios destinados para la instalación de los pines.



Figura 3.10: Componentes e insumos de la resina para instalación de celda HI [14].

El procedimiento para preparar la resina es el siguiente; (1) cortar la parte superior de la botella de plástico, (2) colocar el adaptador blanco en la boquilla de la botella, (3) presionar levemente la botella desde su parte inferior hasta que salga un poco del compuesto blanco, esto con el fin de eliminar la mayor cantidad de aire dentro de la botella, (4) manteniendo presionada la botella, se inserta el pomo gris en la parte superior del adaptador y se gira un par de veces para asegurar que este quede correctamente instalado y no se produzcan derrames, (5) soltar la botella y comenzar a presionar el pomo gris para que el compuesto ingrese dentro de la botella, (6) luego de verter el segundo compuesto dentro de la botella, se retira el pomo gris y el adaptador blanco, (7) se instala el adaptador azul sin su tapa y se presiona la botella suavemente hasta que salga un poco de contenido a través de esta, (8) manteniendo presionada la botella se inserta la tapa al adaptador azul y se aprieta para prevenir derrames o ingreso de aire al proceso posterior, (9) se comienza a amasar la botella por 5 minutos y luego de esto se expulsa un poco de contenido a través de la boquilla azul a fin de verificar que la punta de esta no haya quedado con el compuesto del pomo gris sin mezclar y eliminar el exceso de aire restante, (10) se sigue amasando por otros 5 minutos y se expulsa nuevamente el contenido [14].

NOTA: Los colores especificados son para un mejor entendimiento del procedimiento, los cuales pueden apreciarse en la Figura 3.10, estos colores pueden variar.

Efectuada la preparación de la resina, se procede a verter la resina dentro de la celda HI, hasta la altura indicada (ver Figura 3.11).



Figura 3.11: Altura correspondiente para el llenado de la celda HI con resina [14].

3.9.9.4. Colocación de Pistón en celda

Luego de haber vertido el contenido de la resina dentro de la celda HI, se retira la cinta aisladora negra (o de otro color) de la parte superior del pistón (ver Figura 3.12) y se introduce el pistón dentro de la celda hasta que los 4 orificios que se encuentran en parte superior de la celda HI coincidan con los 4 orificios de la parte inferior del pistón, procurando que coincidan además las marcas de orientación de la celda HI con el pistón (ver Figura 3.12). Posterior a esto, se introducen los pines de estaño dentro de los 4 orificios con el fin de afianzar el sistema celda HI – pistón. El largo sobrante de los pines en los orificios debe ser cortado. Completado este proceso, se instala la flecha en la parte superior del pistón y se procede a instalar celda HI dentro del pozo.

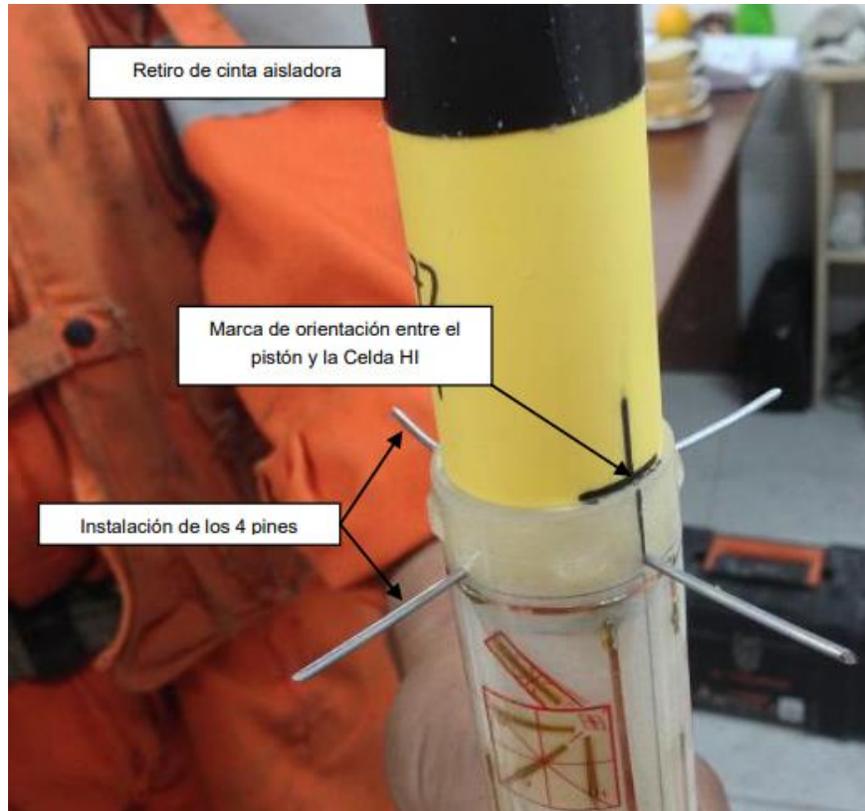


Figura 3.12: Unión pistón-celda [14].

3.9.10. Instalación de Celda HI

Antes de instalar la celda es importante realizar el marcaje del set de barras de limpieza, cuando la barra de limpieza topa en el collar del pozo de 38 [mm] de diámetro (al final del pozo de 6 [in]) y luego cuando topa en el fondo de este. Posterior a esto, se extrae el set completo fuera del pozo y con la ayuda de una huincha métrica, se mide la distancia desde la punta de la barra de limpieza hasta las dos marcas y se anotan los valores (ver Figura 3.13).

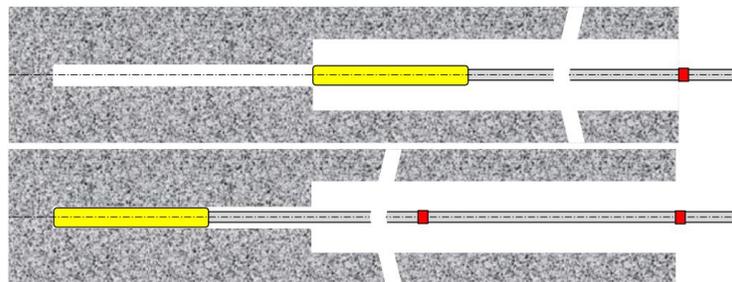


Figura 3.13: Marcaje en set de barras de limpieza [14].

Luego se cambia la barra de limpieza por la celda y su barra de instalación y orientación. Desde la punta de la flecha se miden las dos distancias anteriormente anotadas, y se marca

nuevamente la barra en los dos puntos. La idea de esto es saber en qué momento la celda se encuentra en el collar del pozo de 38 [mm] de diámetro, y con ello tener precaución al momento de introducirla. La celda debe ser instalada lentamente y con energía, hasta llegar a la última marca anotada en la barra. Durante todo este tiempo, la celda debe estar conectada a la unidad lectora digital, ya que se debe verificar que el filamento de medición de temperatura, ubicada al interior de la celda, se haya cortado. Esto será verificado en la pantalla, cuando la temperatura de la celda haya cambiado de 60°C a la temperatura aproximada que tenga la roca. Posteriormente, esta temperatura comenzará a subir debido a la reacción exotérmica generada por la resina epóxica.

En caso de no hacerlo de manera digital, antes de introducir la celda, se debe conectar el cable de la barra de orientación a un multítester con la configuración para medir continuidad (ver Figura 3.14).



Figura 3.14: Configuración de multítester para medición de continuidad [14].

Al colocar la celda HI orientada, la barra de orientación enviará una señal al multítester en forma de un sonido continuo y constante, lo cual será un indicador de que la celda está siendo instalada en forma correcta. Al ir agregando más barras de instalación para alcanzar la longitud deseada, se debe procurar que este sonido siempre permanezca constante, en caso contrario se habrá perdido la orientación. Para recuperar la orientación se deberá girar levemente el set completo de barra en sentido horario o antihorario hasta recuperar el sonido del multítester.

Al llegar al fondo del pozo de 15.24 [cm], se debe instalar la celda HI con un movimiento continuo y con firmeza, jamás se deberá jalar la celda HI hacia afuera durante este proceso ya que podrían producirse burbujas al interior del pozo y tampoco se deberá empujar bruscamente la celda

hacia el fondo del pozo de 38 [mm] para su instalación, esto ayudará a la generación de burbujas y por consiguiente tener lecturas de deformaciones erróneas.

Una forma de verificar que el pistón llegó al fondo del interior de la celda HI y que por consiguiente se lecho completa la celda, es registrar el valor de los canales 13 y 14 antes y después de la instalación. El valor de la resistencia debería ser distinto ya que el cable al interior de la celda HI se tuvo que haber cortado en este proceso (ver Figura 3.15).



Figura 3.15: Cable al interior de la celda que indica el lechado completo [14].

Posterior a esto se deberá dejar el set completo de instalación junto a la celda HI dentro del pozo y esperar el tiempo adecuado para que fragüe la resina.

3.9.11. Fraguado de la Resina

Como se mencionó anteriormente, la resina solicitada debe estar acorde con el rango de temperatura que posee la roca en donde se instalará la celda HI, otro factor muy importante es el fraguado de la resina, es decir, el tiempo adecuado que permita el correcto fragüe de la resina, que generalmente se encuentra entre 16 a 48 [h] aproximadamente (dependerá de las condiciones del sector, por ejemplo: temperatura, humedad, etc.). Es importante asegurar que durante el tiempo de fraguado no se realicen tronaduras en el entorno cercano al sitio de medición.

El tiempo de fragüe es uno de los factores principales a la hora de tener buenos resultados en el proceso de overcoring, por ende, siempre se debe realizar el análisis a los gráficos del fraguado de la resina y asegurar que se le dio el tiempo necesario, esto se ve cuando las curvas se estabilizan (ver Figura 3.16).

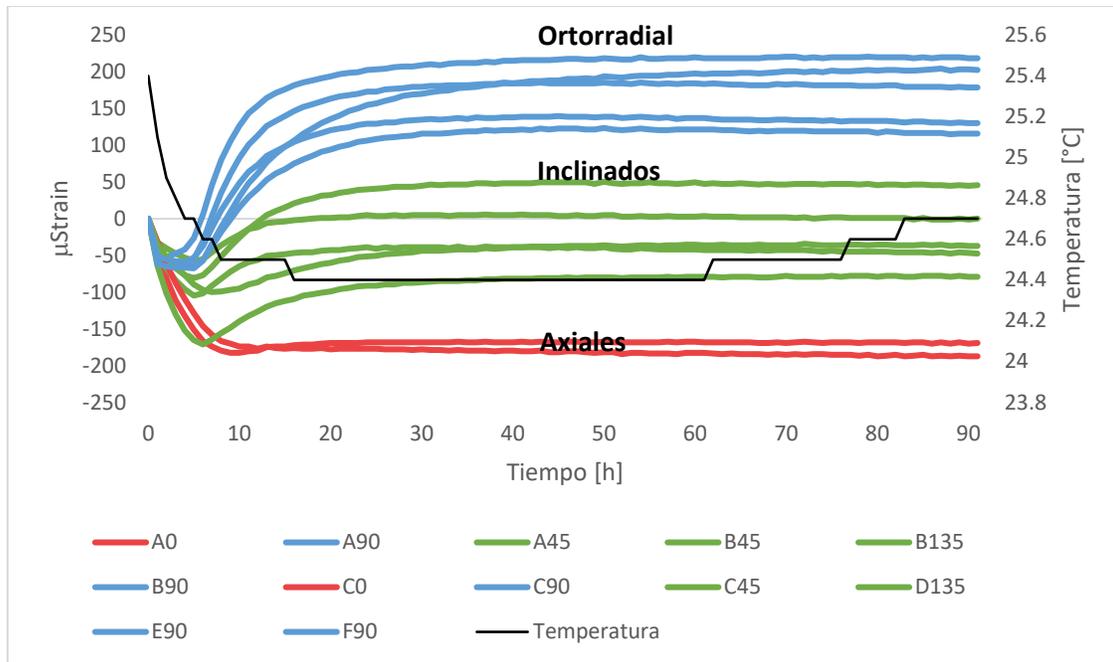


Figura 3.16: Gráfico de comportamiento de resina.

3.9.12. Overcoring

Una vez haya pasado el tiempo de fragüe de la resina se retira el set completo de instalación. Para realizar el proceso de overcoring es necesario instalar a la perforadora un adaptador especialmente diseñado para este proceso, el cual permite que el cable proveniente de la celda HI pueda atravesar por dentro todo el set de barras de perforación. En la Figura 8.1 se muestra el adaptador instalado en la perforadora y el cable de la celda HI a través de este.

Luego de esto se instalará el set de control de avance (si se requiriese) de la perforación, el cual consiste en dos imanes de neodimio y una regla metálica de acero inoxidable graduada al milímetro y hasta 60 [cm] de longitud, el proceso de instalación de este sistema se especifica en el ANEXO B. Instalación para sistema de medición de avance overcoring.

Posterior a esto se limpiarán los cables de la celda HI con alcohol o limpia contactos eléctricos y se conectarán a la unidad lectora SBM, la cual tendrá la configuración indicada en la Figura 3.17 y en Tabla 3.1.



Figura 3.17: Conexión de cables a unidad lectora [14].

Tabla 3.1: Conexiones según canal y color a unidad lectora.

Color de cable	Canal
Blanco	1
Café	2
Negro	3
Rosado	4
Rojo	5
Morado	6
Azul	7
Amarillo	8
Gris	9
Rosado/Gris	10
Blanco/Gris	11
Amarillo/Gris	12
Naranja	13
Verde	14
Azul/Verde	15

Después de asegurarse que los suministros básicos, energía eléctrica, luz y drenaje se encuentran funcionando correctamente, se procede a llevar a cabo el proceso de overcoring.

En caso de tener la celda HID (Hollow Inclusion Digital), el proceso de conexión se realiza de manera diferente, ver ANEXO C. Procedimiento de instalación y recopilación de información con Celda HID.

Ahora se procede a realizar una de las etapas más críticas del proceso de medición de esfuerzos, el cual corresponde a la extracción del testigo de roca circundante a la celda HI (Overcoring). El procedimiento se detalla a continuación:

- i. Previamente se realiza el ingreso del set de barras y estabilizadores de 15.24 [cm] de diámetro, introduciendo el cable de comunicación de la celda HI por el interior de ellas, teniendo la precaución de “no morder” el cable al momento de conectar las barras y/o estabilizadores. Para esto, al momento de realizar el acople, una persona mantiene tensionado, con las manos, el cable por la parte posterior.
- ii. Se debe conectar la celda a la unidad lectora, y comenzar con el registro de datos, el cual se realiza durante todo el proceso de overcoring.
- iii. Se inyecta agua durante 10 [min] con la perforadora (sin rotación).
- iv. Se genera la rotación de la corona durante 30 [s], para luego comenzar el avance del overcoring.
- v. Se debe asegurar un avance lento y constante (de forma ideal 2 [mm/s]) durante todo el proceso de overcoring. Respecto a este punto, se establecen los siguientes requerimientos:
 - a. Minimizar la vibración de la sonda, esto teniendo en cuenta de que el registro de altos niveles de vibración en la sonda da cuenta de una velocidad excesiva para el tipo de roca que se está perforando. En este punto, el operador debe regular la velocidad de rotación y avance según el comportamiento del macizo rocoso.
 - b. En base al punto anterior, y considerando la importancia de medir objetivamente las distintas variables que podrían afectar la calidad del overcoring, se recomienda contar con un sistema de registro digital de vibración de la sonda, así como la velocidad de rotación y avance de la perforación (precisión 1 [mm/s]), permitiendo comparar directa y objetivamente el proceso de perforación con las lecturas realizadas por los strain gauges.
- vi. Finalizando el recorrido de 60 [cm], se detendrá el avance y la rotación de la perforadora, dejando el flujo de agua por 10 [min].
- vii. Si al final del proceso de overcoring, el testigo sobre perforado no fue cortado en el fondo, es necesario cortarlo con la herramienta llamada uñeta y rescatada con la pala de recuperadora de testigos.
- viii. Efectuar la extracción del testigo del overcoring.
- ix. Extraído el testigo del overcoring, se debe verificar lo siguiente:

- a. Largo del testigo.
 - b. Tipo de corte generado en el fondo (recto, inclinado, irregular).
 - c. Ubicación de la celda HI dentro del testigo.
 - d. Inspección visual de la superficie del testigo por posibles fracturas que comprometan el ensayo biaxial posterior.
- x. El testigo del Overcoring debe tener como mínimo una longitud de 22 [cm], esto debido a las dimensiones de la membrana al interior de la cámara biaxial, la cual tiene una longitud de 20 [cm] (se considera 1 [cm] como margen de seguridad). En caso de que el testigo tenga menos de 22 [cm], se estaría generando una zona sin contacto roca-membrana, lo cual provocaría deformación y daño irreparable en la membrana (ver Figura 3.18), teniendo que reemplazarla por completo.

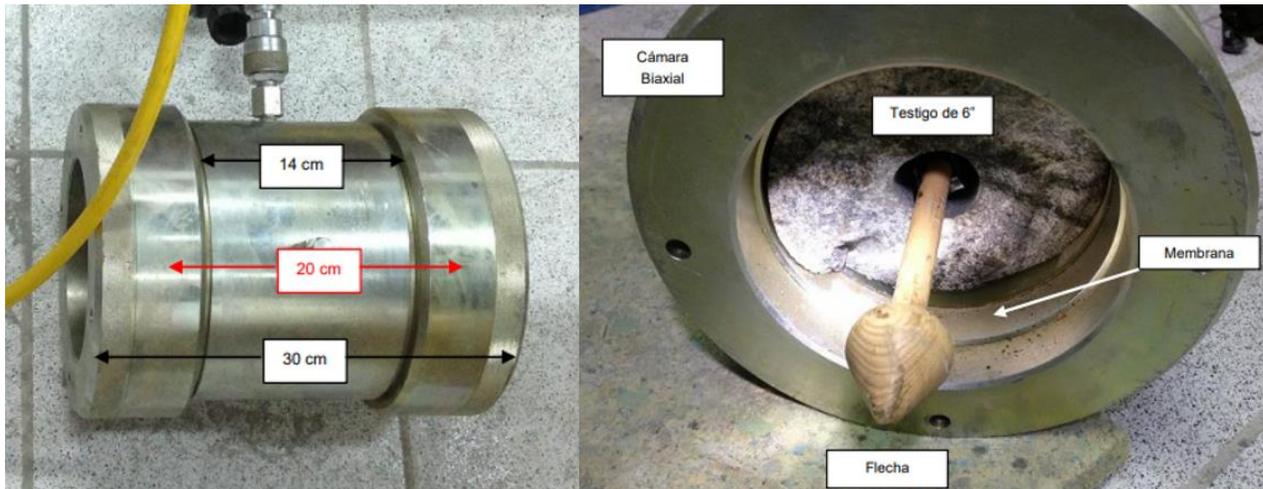


Figura 3.18: Dimensiones de cámara biaxial y muestra de membrana [14].

- xi. En caso de que el testigo no cumpla con las dimensiones requeridas y haya quedado un tramo restante del pozo de 38 [mm], jamás se debe utilizar éste como empate para la perforación, en este caso se debe recorrer una carrera más de 15.24 [cm], asegurando de no generar problemas de desviación en la perforación del pozo de 38 [mm].

3.9.13. Ensayo Biaxial

Una vez efectuada la inspección del testigo y asegurado el cumplimiento de su longitud mínima (22 [cm]), se procede a realizar el ensayo biaxial, el cual tiene por objetivo estimar las propiedades elásticas de la muestra de roca extraída. Es importante señalar que la cámara biaxial debe estar en perfecto estado, esto se puede comprobar realizando ensayos de laboratorios a

muestras de aluminio. Otra manera de saber si la cámara biaxial está en buen estado es dividiendo las deformaciones axiales con las tangenciales en cualquier punto del ensayo, el resultado de esta división debiese ser el valor de las deformaciones inclinadas en dicho punto [15].

El procedimiento para la realización del ensayo biaxial se detalla a continuación:

- i. El ensayo biaxial debe ser realizado inmediatamente posterior al proceso de overcoring, por lo tanto, cuando el testigo de roca con la celda HI es recuperado, el kit para el ensayo biaxial debe estar instalado para el proceso de carga.
- ii. Se deberá verificar que la bomba se encuentre con el aceite suficiente para el ensayo, además verificar si el sistema entre la cámara biaxial y la bomba manual tienen aire en su interior, de ser así se deberá eliminar el aire.
- iii. Limpiar superficialmente el testigo de 15.24 [cm] a fin de eliminar cualquier tipo de impurezas que puedan provocar daños en la membrana interna de la cámara biaxial.
- iv. Realizar marcaje en la parte superficial del testigo de 15.24 [cm] donde se encuentra ubicada la celda HI (ver Figura 3.19), lo cual permitirá asegurar que el testigo quede centrado dentro de la cámara, de forma que la membrana cubra por completo la zona en la que se encuentra la celda.



Figura 3.19: Marcaje en testigo de 15.24 [cm] en ubicación de celda HI [14].

- v. El ensayo biaxial consta de dos fases, carga y descarga de presión. Previo al inicio del proceso, se debe conectar la celda a la unidad lectora, y comenzar con el registro de datos, el cual se realiza durante todo el proceso de carga y descarga de la cámara.
- vi. Se comienza el proceso de carga, incrementando la presión de forma constante, como recomendación en intervalos de 0.5 [MPa] hasta los 8.0 [MPa]. Al llegar a la presión máxima se comenzará a descargar la presión al mismo ritmo e intervalos que durante la carga. En la Figura 3.20 se presenta un ejemplo de los resultados de microdeformación

obtenidos durante el proceso de carga y descarga. Es recomendable contar con un sistema digital para controlar los ciclos de carga y descarga de la cámara, así como para efectuar registro de todos los parámetros involucrados.

Si en el proceso de descarga este posee otro comportamiento con respecto a la carga significaría un daño en el testigo, o en palabras más técnicas significa que se sobrepasó el límite elástico.

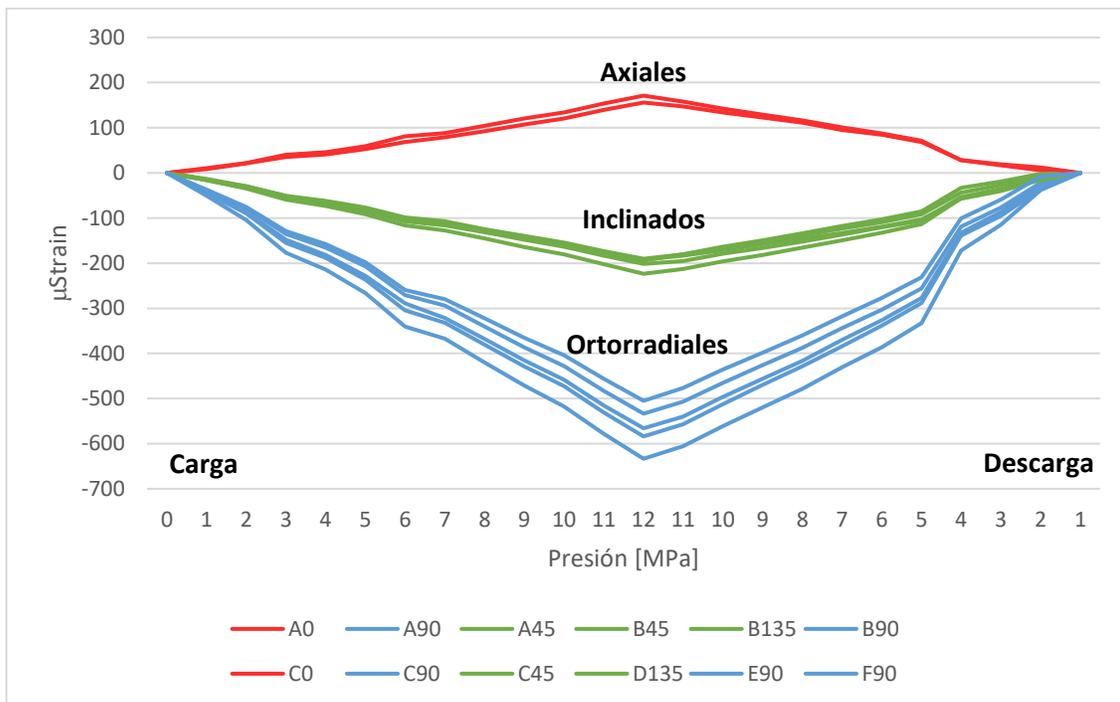


Figura 3.20: Ejemplo respuesta ensayo biaxial.

3.9.14. Entrega de Datos e Información

A continuación, se detalla la información y documentos requeridos por el cliente, para realizar el correcto análisis y confirmación de la medición de esfuerzos a través de celdas HI.

3.9.14.1. Pre-Labores

- i. Ficha técnica de la celda HI a utilizar.
- ii. Convención de signos que se utilizara.

3.9.14.2. Pre-Overcoring

- i. Registro fotográficos de testigos de 15.24 [cm] de diámetro, con énfasis en el último testigo para ver con detalle el corte generado al final del pozo.

- ii. Registro fotográficos de testigos de 38 [mm] de diámetro en conjunto con la celda HI. Lo anterior debe permitir identificar el tramo en el que la celda será instalada dentro del pozo, esto para asegurar que se cumpla con que se instale en un lugar que no posea ni discontinuidades ni contactos litológicos.
- iii. Gráfico de micro strain vs tiempo para el proceso de fraguado de la resina.

3.9.14.3. *Overcoring*

- i. Registro fotográfico de testigo recuperado, incluyendo fotografía frontal donde se vea al agujero concéntrico.
- ii. Información en bruto que entrega la celda sin procesar que incluya lo siguiente: mediciones de cada canal, temperatura, voltaje de entrada, tiempo asociado a cada medición y fecha.
- iii. Registro digital de las mediciones de deformación de los strain gauges y la temperatura de la celda durante el proceso de overcoring, así como el tiempo asociado a cada medición.
- iv. Registro del avance del overcoring (si es requerido), en milímetros correlacionado con el tiempo correspondiente en segundos. El tiempo en este registro también debe relacionarse con el tiempo asociado a la medición de las deformaciones.
- v. Gráfico de micro strains vs tiempo, que incluya además el comportamiento de la temperatura.
- vi. Gráfico de avance en milímetros vs tiempo (si es requerido).

3.9.14.4. *Ensayo Biaxial*

- i. Registro fotográfico de testigo instalado en cámara biaxial antes del ensayo.
- ii. Información en bruto que entrega la celda sin procesar que incluya lo siguiente: mediciones de cada canal, temperatura, voltaje de entrada, tiempo asociado a cada medición y fecha.
- iii. Registro digital de las mediciones de deformación de los strain gauges de la celda durante el proceso de ensayo biaxial, así como el tiempo asociado a cada medición.
- iv. Registro de la presión de la cámara biaxial durante el proceso de carga y descarga, así como el tiempo asociado al proceso, considerando una precisión de 0.1 [MPa] para la presión y de 1 [s] para el tiempo. El tiempo de este registro se debe correlacionar

directamente con el tiempo del registro de deformación, a modo de correlacionar el incremento/decremento de la presión con las deformaciones de los strain gauges.

- v. Gráfico micro strains vs presión, para el proceso de carga y descarga del ensayo.
- vi. Registro fotográfico del testigo post ensayo.
- vii. Registro fotográfico de corte transversal de testigo con celda, esto con el objetivo de evaluar la generación de burbujas en el entorno cercano a la celda.

3.9.14.5. Resultados

Estimación de parámetros elásticos en base a los datos de los ensayos Biaxiales, especificando cálculos realizados:

- i. Módulo de Young (E) [GPa]
- ii. Razón de Poisson (ν)

Estimación de esfuerzos en base a las micro deformaciones obtenidas:

- i. Tensor de esfuerzos en ejes cartesianos X,Y,Z.
- ii. Esfuerzos principales.
- iii. Orientación de los esfuerzos principales y su representación estereográfica.
- iv. Índice de anisotropía de esfuerzos en 360° y su representación gráfica.

Adicionalmente a lo anterior, y como anexo al informe entregado, se recomienda que personal de Geología DET efectuó la caracterización litológica, estructural, levantamiento de RQD y calidad geotécnica de los testigos de 15.24 [cm] y 38[mm] de diámetro.

3.10. CHECKLIST OPERACIONAL PARA MEDICIÓN POR CELDAS HI

En base al procedimiento se definió un checklist del paso a paso para poder llevar a cabo una medición de esfuerzos a través de celdas HI.

Las opciones para marcar que tiene la persona que completara el checklist son: Si, No, No Aplica y Observaciones. Además, el checklist se divide en 5 etapas: Pre-Labores, Pre-Overcoring, Overcoring, Ensayo Biaxial y Entrega de Información.

La finalidad del checklist es asegurar una medición de alta calidad para que no se agregue un error asociado al factor humano u operacional. El checklist se ve en detalle en el ANEXO D. Checklist operacional para medición de esfuerzos con celdas HI.

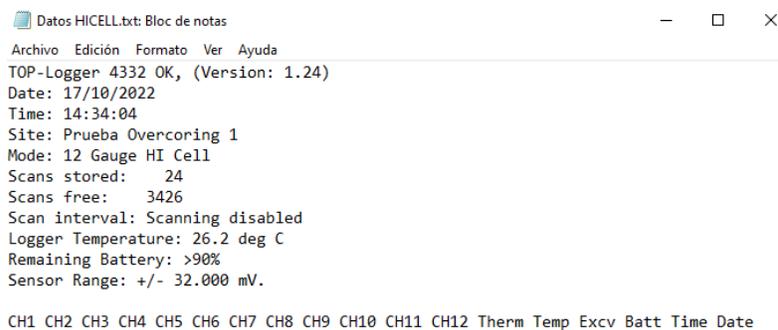
4. RESULTADOS

4.1. SOFTWARE Y CODIGOS DESARROLLADOS

4.1.1. Software graficador μ strain vs tiempo

Como se explicó en el apartado 4.1. la celda HI toma datos, debido a un cambio de longitud en el strain gauge, se genera un cambio de resistencia que se refleja en una variación de voltaje (mV). Por ende, los datos que entrega la celda son variaciones del voltaje a través de periodos de tiempo.

Para poder llegar a un gráfico de μ Strain vs tiempo se debe procesar la información in situ de la celda que para el caso de este estudio se encontrará en un archivo .TXT que contendrá la información aportada por cada uno de los canales, además de la temperatura registrada, los periodos de tiempo en el cual se registraron datos, la fecha, el voltaje de entrada, y otras especificaciones técnicas de la celda (ver Figura 4.1).



```
Datos HICELL.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
TOP-Logger 4332 OK, (Version: 1.24)
Date: 17/10/2022
Time: 14:34:04
Site: Prueba Overcoring 1
Mode: 12 Gauge HI Cell
Scans stored: 24
Scans free: 3426
Scan interval: Scanning disabled
Logger Temperature: 26.2 deg C
Remaining Battery: >90%
Sensor Range: +/- 32.000 mV.

CH1 CH2 CH3 CH4 CH5 CH6 CH7 CH8 CH9 CH10 CH11 CH12 Therm Temp Excv Batt Time Date
```

Figura 4.1: Datos outputs de celda HI.

Para el procesamiento de esta información se generó un código (ANEXO E. Código programa graficador de datos celda HI.) en el lenguaje de programación Python, el cual permite graficar cualquier archivo TXT con el formato de salida que realiza la celda HI, esto incluye ensayos de overcoring, ensayo biaxial, y pruebas a la resina epoxi. Posterior a la creación del código se compilo y se generó un archivo ejecutable (ver Figura 4.2). Se debe tener en cuenta que para poder realizar los gráficos de manera adecuada se debe conocer el Gauge Factor (GF), el cual debe estar en la ficha técnica de cada celda HI.

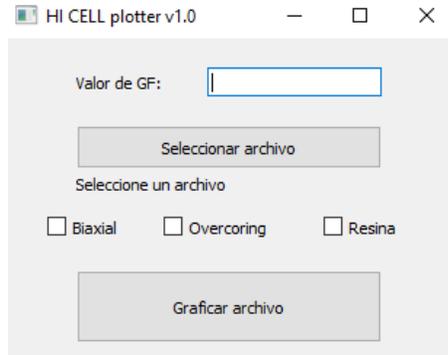


Figura 4.2: Interfaz programa graficador de datos entregados por celda HI.

Los gráficos obtenidos poseen, además del dato de medición de cada uno de los canales a medida que pasa el tiempo de ensayo, el comportamiento de la temperatura durante éste (ver Figura 4.3).

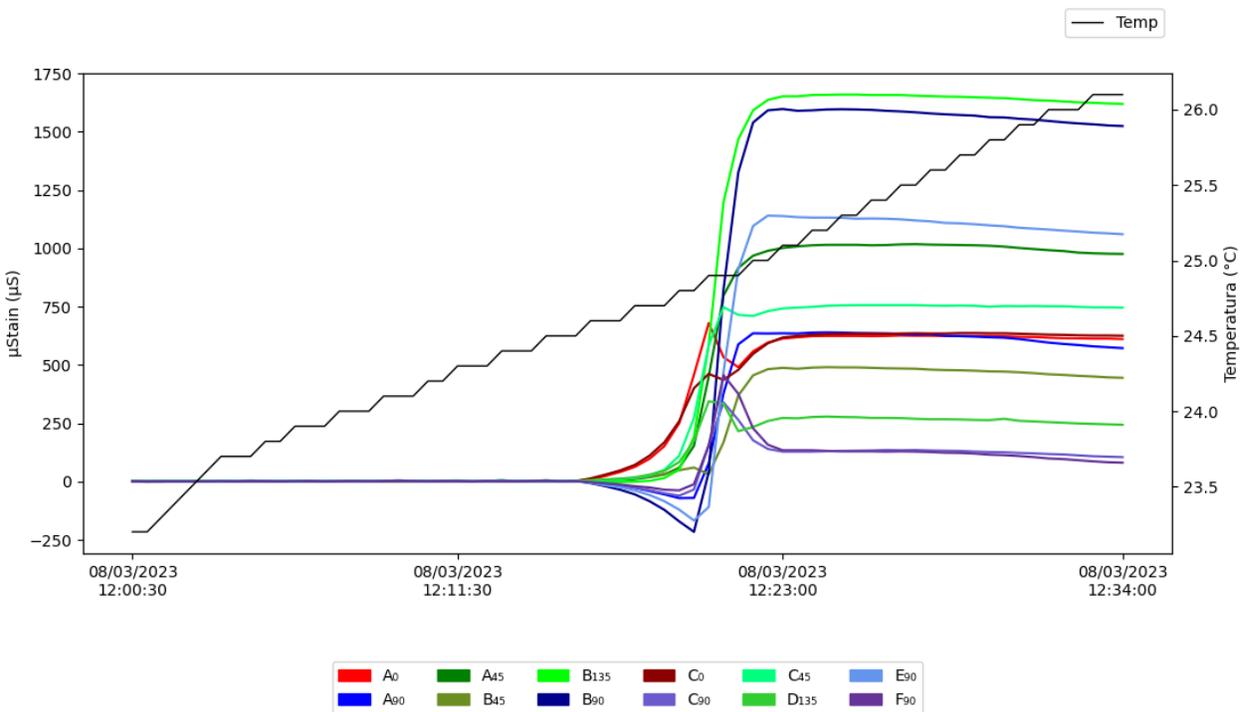


Figura 4.3: Gráfico obtenido por software desarrollado.

4.1.2. Código para cálculo de tensores y esfuerzos principales

La magnitud de los esfuerzos se estimó en base a todo el desarrollo teórico generado en apartados anteriores, de esta manera teniendo los valores de las deformaciones por cada uno de los canales se pueden obtener estas magnitudes y realizar el análisis correspondiente. Además, antes de

la estimación de los esfuerzos se calculan los factores de corrección K. Para ver los códigos y el desarrollo ver ANEXO F. Códigos para estimación de esfuerzos.

5. ANÁLISIS DE DATOS

5.1. Gráficos μ strain vs tiempo

El análisis de los datos a medida que estos se van registrando es importante. Por ende, saber cómo debería ser el comportamiento de las curvas en los gráficos de deformación vs tiempo generados cuando se le realiza el ensayo de overcoring a la celda HI es relevante al momento de evaluar la calidad de una medición de esfuerzos a través de este método. En este apartado se realiza un resumen de las características más importantes del comportamiento de las curvas en este tipo de gráficos. Para ver el análisis completo ver ANEXO G. Análisis de gráficos μ strain vs tiempo.

- Las primeras lecturas debiesen mantenerse en un valor constante cercano a cero y comenzar a sufrir variaciones a medida que el ensayo de overcoring se acerca a la celda HI, específicamente a una distancia igual al diámetro del pozo del overcoring.
- Saltos repentinos en las primeras lecturas de deformación pueden atribuirse a malos contactos eléctricos y corregirse a tiempo. Otra causa de inestabilidad en las lecturas puede deberse a fluctuaciones en la temperatura del agua de perforación.
- Una gran desviación de varios o de todos los strain gauges desde el inicio o durante las primeras etapas de la prueba de overcoring probablemente signifique que la celda no se haya adherido correctamente a la roca y está expuesta al agua de perforación.
- Los saltos repentinos en las lecturas o una inversión repentina en la tendencia de las deformaciones pueden indicar una pérdida de adherencia con la roca; los saltos repentinos también pueden estar asociados con la apertura de una junta y la deformación mecánica de la celda o con la entrada de agua a través de la junta.
- La mayoría de los cambios de deformación tienen lugar dentro de una distancia de aproximadamente $\pm 0.5D$ desde los strain gauges a ambos lados, considerando D como el diámetro del overcoring.
- Cuando el borde de corte del bit se acerca a la ubicación de los strain gauges, se observan protuberancias típicas en las gráficas de las deformaciones axiales y circunferenciales. En el monitoreo de la deformación con lecturas tomadas en intervalos, estas protuberancias aparecen como "picos" o como "valles".

- Estas protuberancias generalmente están ausentes o son mucho menos pronunciadas en las lecturas de los canales de 45°/135°, probablemente debido a la cancelación mutua de las respuestas transitorias en las componentes de deformación axial y circunferencial de las lecturas de estos strain gauges.
- Ambos strain gauges axiales "teóricamente" deberían mostrar cambios de deformación de la misma magnitud si la roca fuera completamente homogénea.
- Por lo general, las deformaciones axiales de overcoring son mucho más pequeñas que las deformaciones circunferenciales. Excepto cuando los esfuerzos axiales en la roca son mucho mayores que los esfuerzos circunferenciales o si el cemento no se ha fraguado adecuadamente.
- Las deformaciones mostradas por diferentes strain gauges de deformación circunferencial pueden tener una magnitud similar, o diferir significativamente cuando hay una gran diferencia entre los esfuerzos principales secundarios en la roca (perpendiculares al eje del pozo).
- Los cambios en las deformaciones circunferenciales, al menos en algunos de los strain gauges, son mayores que las deformaciones axiales o de 45°/135°. Una excepción puede ocurrir cuando las tensiones principales mayor y/o intermedia están dirigidas cerca de 45° con respecto al eje del pozo o paralelas a él.

5.2. Análisis de Sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad considerando un caso ejemplo, específicamente en el proyecto Diamante XC1 (cruzado 1), SNV (subnivel de ventilación), dentro del complejo El Teniente, en donde se registraron las siguientes deformaciones por canal, en μ strains.

Tabla 5.1: Deformaciones registradas caso diamante XC1 SNV.

Canal	Deformaciones
A0	996.6402
A90	305.9154
A45	614.7493
B45	676.1387
B135	893.1766
B90	1003.0655
C0	937.5322
C90	957.1401
C45	1087.6789

D135	694.5434
E90	1227.2776
F90	467.8963

Se realizaron variaciones en el módulo de Young y en la razón de Poisson y se estimaron los resultados de los esfuerzos principales. La Figura 5.1 muestra los distintos resultados.

Un punto importante que cabe destacar es la magnitud en términos de esfuerzo que tendría estimar las constantes elásticas de modo incorrecto, si bien se realiza el ensayo biaxial en terreno y las deformaciones las registra la celda HI, la toma de datos de la presión las realiza una persona, esto se debe a que la presión se ejerce manualmente y se registra con un manómetro análogo, lo cual puede generar un error en la estimación de las constantes elásticas de la roca.

σ_1	Razón de Poisson (ν_r)															
	0.1	0.12	0.14	0.16	0.18	0.2	0.22	0.24	0.26	0.28	0.3	0.32	0.34	0.36	0.38	0.4
22	22.69	23.06	23.45	23.87	24.31	24.78	25.28	25.81	26.37	26.97	27.61	28.29	29.01	29.79	30.62	31.51
24	24.75	25.15	25.58	26.03	26.51	27.02	27.57	28.14	28.76	29.41	30.11	30.85	31.64	32.49	33.39	34.36
26	26.81	27.24	27.70	28.19	28.72	29.27	29.86	30.48	31.15	31.85	32.61	33.41	34.26	35.18	36.16	37.21
28	28.87	29.33	29.83	30.36	30.92	31.52	32.15	32.82	33.54	34.30	35.11	35.97	36.89	37.87	38.93	40.06
30	30.92	31.43	31.96	32.52	33.12	33.76	34.44	35.16	35.92	36.74	37.60	38.53	39.51	40.57	41.70	42.91
32	32.98	33.52	34.09	34.69	35.33	36.01	36.73	37.50	38.31	39.18	40.10	41.09	42.14	43.26	44.47	45.75
34	35.04	35.61	36.21	36.85	37.53	38.25	39.02	39.83	40.70	41.62	42.60	43.65	44.76	45.96	47.23	48.60
36	37.10	37.70	38.34	39.02	39.74	40.50	41.31	42.17	43.09	44.06	45.10	46.21	47.39	48.65	50.00	51.45
38	39.16	39.79	40.47	41.18	41.94	42.75	43.60	44.51	45.48	46.51	47.60	48.77	50.01	51.35	52.77	54.30
40	41.22	41.89	42.60	43.35	44.14	44.99	45.89	46.85	47.87	48.95	50.10	51.33	52.64	54.04	55.54	57.15
42	43.28	43.98	44.72	45.51	46.35	47.24	48.18	49.19	50.25	51.39	52.60	53.89	55.26	56.74	58.31	60.00
44	45.34	46.07	46.85	47.68	48.55	49.48	50.47	51.53	52.64	53.83	55.10	56.45	57.89	59.43	61.08	62.85
46	47.40	48.16	48.98	49.84	50.76	51.73	52.76	53.86	55.03	56.27	57.60	59.01	60.51	62.12	63.85	65.69
48	49.46	50.26	51.11	52.01	52.96	53.98	55.06	56.20	57.42	58.72	60.10	61.57	63.14	64.82	66.62	68.54
50	51.52	52.35	53.23	54.17	55.16	56.22	57.35	58.54	59.81	61.16	62.60	64.13	65.76	67.51	69.38	71.39
52	53.58	54.44	55.36	56.33	57.37	58.47	59.64	60.88	62.20	63.60	65.10	66.69	68.39	70.21	72.15	74.24
54	55.64	56.53	57.49	58.50	59.57	60.71	61.93	63.22	64.59	66.04	67.59	69.25	71.01	72.90	74.92	77.09
56	57.70	58.63	59.61	60.66	61.78	62.96	64.22	65.55	66.97	68.48	70.09	71.81	73.64	75.60	77.69	79.94
58	59.75	60.72	61.74	62.83	63.98	65.21	66.51	67.89	69.36	70.93	72.59	74.37	76.26	78.29	80.46	82.79
60	61.81	62.81	63.87	64.99	66.19	67.45	68.80	70.23	71.75	73.37	75.09	76.93	78.89	80.99	83.23	85.63
62	63.87	64.90	66.00	67.16	68.39	69.70	71.09	72.57	74.14	75.81	77.59	79.49	81.51	83.68	86.00	88.48
64	65.93	66.99	68.12	69.32	70.59	71.95	73.38	74.91	76.53	78.25	80.09	82.05	84.14	86.38	88.77	91.33
66	67.99	69.09	70.25	71.49	72.80	74.19	75.67	77.24	78.92	80.70	82.59	84.61	86.76	89.07	91.54	94.18
68	70.05	71.18	72.38	73.65	75.00	76.44	77.96	79.58	81.31	83.14	85.09	87.17	89.39	91.76	94.30	97.03

Figura 5.1: Resultados del análisis de sensibilidad para el esfuerzo principal mayor.

En base a la información de la Figura 5.1 se generó el gráfico presentado en la Figura 5.2.

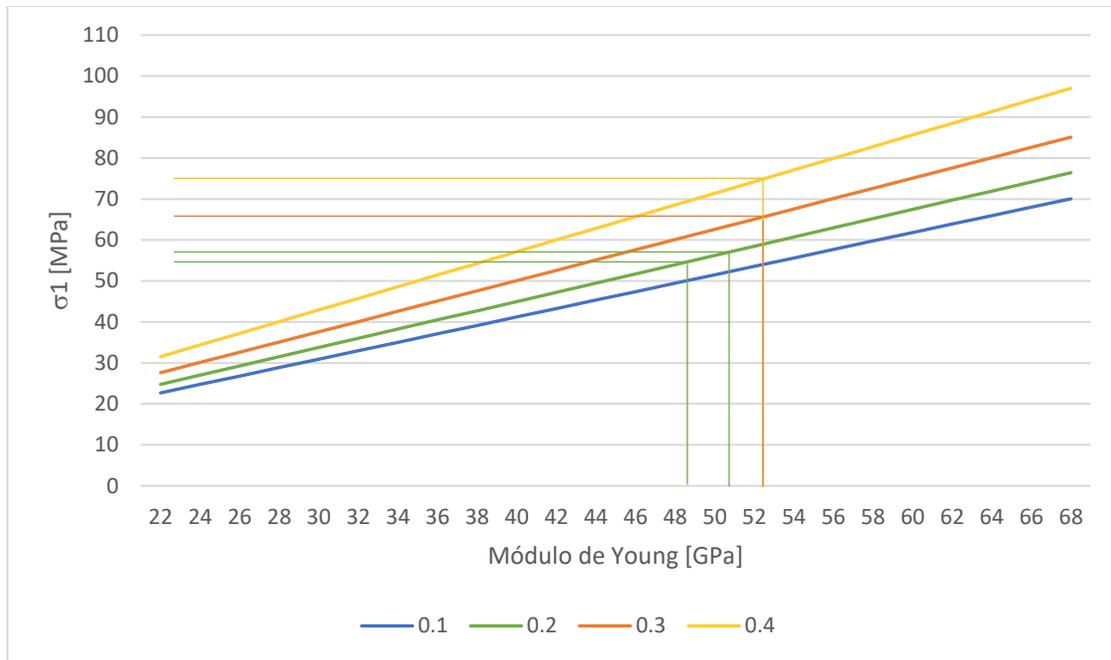


Figura 5.2: Gráfico de magnitud de esfuerzos en base a constantes elásticas.

De lo anterior se puede concluir que una variación en el módulo de Young de 2 [GPa] se refleja en una diferencia de esfuerzos de aproximadamente de 2 [MPa]. Por otro lado, un cambio en 0.1 en la razón de Poisson reflejaría una diferencia de 10 [MPa] en el esfuerzo principal mayor. A mayores magnitudes de las constantes elásticas estas variaciones reflejaran mayores diferencias en la magnitud de los esfuerzos. Este ejercicio se realizó también para los esfuerzos principales menor e intermedio (ver ANEXO H. Análisis de sensibilidad esfuerzos principales menor e intermedio).

5.3. Análisis del Error en la Estimación

Cuando se estima el tensor de esfuerzos en base a las deformaciones medidas por la celda HI, esta estimación intenta ajustarse de la mejor manera posible a todos los datos, de esta forma es importante poder visualizar cuan bueno es el ajuste y realizar el análisis correspondiente.

En base al mismo caso de estudio anterior, Proyecto diamante XC1 SNV, se obtuvo la Figura 5.3. En donde se puede ver el ajuste de los datos, en base a los esfuerzos estimados del tensor, con respecto a las deformaciones medidas en terreno por la celda HI.

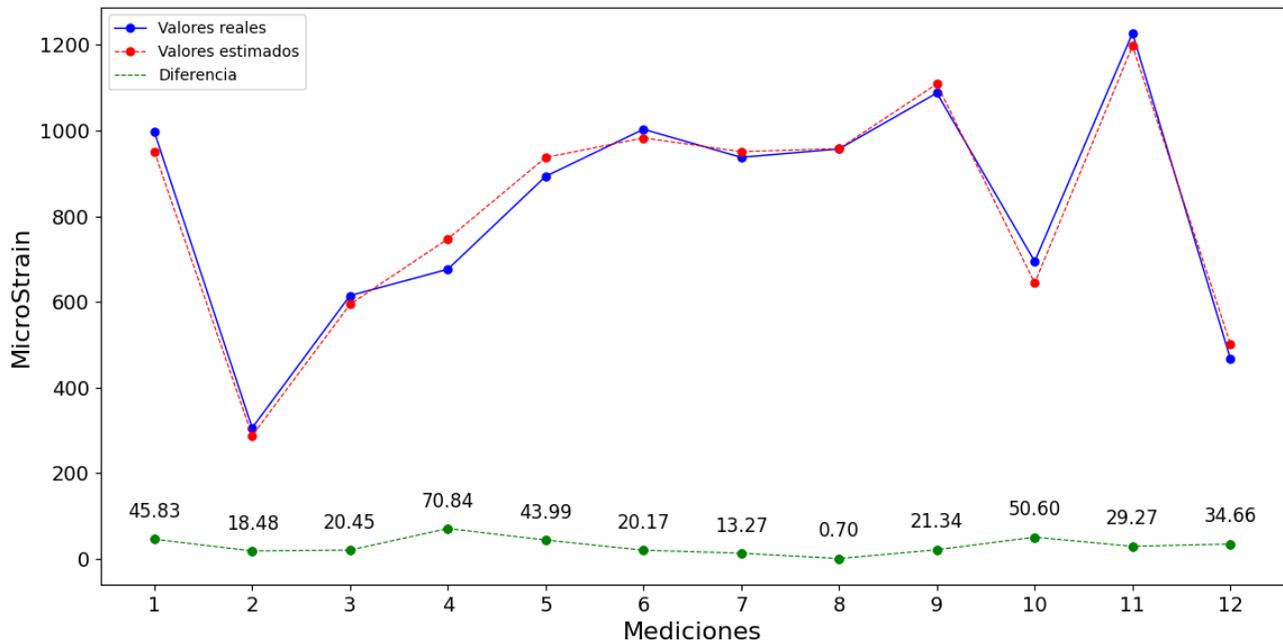


Figura 5.3: Gráfico del ajuste de la estimación del tensor de esfuerzos.

En la Figura 5.3, también se puede observar en la parte inferior, la diferencia en μ strains que se obtiene comparando el ajuste versus las mediciones. Además, se realizó el efecto de esta diferencia en la magnitud de los esfuerzos y para este caso se obtuvo que las diferencias en las deformaciones podrían marcar una diferencia de 0.05 [MPa] en los esfuerzos principales. Por otro lado, se realizó el análisis de cada canal y que magnitudes podrían afectar de manera considerable la magnitud de los esfuerzos, en base a esto se obtuvo lo siguiente:

- La diferencia en los canales axiales son los que más podrían afectar la magnitud de los esfuerzos, considerando el caso específico estudiado, una variación de 100 μ strains podría afectar en 1.8 [MPa].
- La diferencia en los canales tangenciales e inclinados afectan de menor manera a las magnitudes de los esfuerzos, prácticamente una variación de 200 μ strains podrían hacer variar la magnitud de los esfuerzos en 1.5 [MPa].

En base a lo anterior un canal que provoque que el ajuste no sea bueno, podría indicar un canal defectuoso o con alguna influencia, por esta razón quizás sea más conveniente descartar el canal y basar la estimación con los datos de los demás canales.

6. CONCLUSIONES

Se ha abordado de manera exhaustiva la teoría, la metodología y los resultados relacionados con el método de medición de esfuerzos en macizo rocoso primario utilizando la celda HI en la mina El Teniente, Chile. A través de una combinación de análisis teóricos, procedimientos prácticos y desarrollo de software, se ha logrado obtener una comprensión más profunda de la medición de esfuerzos in situ a través de este método permitiendo optimizar el proceso y mejorar la calidad del resultado.

La implementación de un procedimiento práctico y un checklist detallado ha demostrado ser efectiva para minimizar los posibles errores derivados de factores humanos u operativos durante la recolección de datos en terreno. La creación de un software especializado ha facilitado la visualización y el análisis de los resultados obtenidos, permitiendo un mejor entendimiento del comportamiento de los canales de la celda durante los diferentes ensayos realizados.

El desarrollo de códigos en Python ha sido clave para el procesamiento de los datos medidos, permitiendo obtener tensores de esfuerzos en coordenadas locales y coordenadas totales, así como estimar los esfuerzos principales presentes en la roca. Además, la comparación entre las estimaciones obtenidas y las mediciones reales ha proporcionado información valiosa sobre la precisión de los métodos utilizados.

El análisis de sensibilidad llevado a cabo al variar los parámetros elásticos de las rocas ha permitido evaluar la influencia de ellos en términos de magnitud en los esfuerzos principales.

En definitiva, se ha contribuido al entendimiento de la medición de esfuerzos al proporcionar la base y explicación teórica, especificar la metodología práctica y además proporcionar herramientas de análisis para la medición de esfuerzos en macizos rocosos primarios. Los hallazgos y las herramientas desarrolladas tienen el potencial de mejorar la información y toma de datos que se realizan en la actualidad.

7. REFERENCIAS

- [1] Corporación Nacional del Cobre de Chile [CODELCO]. (s.f.). *Presencia Mundial*. <https://www.codelco.com/nosotros/la-corporacion/presencia-mundial>
- [2] Cavieres, P. (1999). *Evolución de los Métodos de Explotación en la Mina El Teniente*.
- [3] Corporación Nacional del Cobre de Chile [CODELCO]. (2011). *El Teniente Minería del Futuro*. https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20140520/asocfile/20140520183026/el_teniente_mineria_de_futuro.pdf
- [4] Corporación Nacional del Cobre de Chile [CODELCO]. (2022). *Plan de Negocios y Desarrollo*.
- [5] Corporación Nacional del Cobre de Chile [CODELCO]. (2018). *Modelo Geotécnico para el Macizo Rocosó y su Aplicación en la Minería de El Teniente*.
- [6] Kaiser, J. (1953). *Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen*. *Archivo de la Industria Siderúrgica*, 24(1-2), 43-45. <https://doi.org/10.1002/srin.195301381>
- [7] Blondel, M. A. (2017). *Implementación de la Técnica de Medición de Esfuerzos con Emisión Acústica (Testigo Orientado), Mina El Teniente - CODELCO Chile*. [Tesis, Universidad de Santiago de Chile].
- [8] Worotnicki, G.; Walton, R. J. (1976). *Triaxial 'hollow inclusion' gauges for determination of rock stress in situ*. Simposio sobre Investigación de Esfuerzos en Roca – Avances en la medición de esfuerzos. Institution of Engineers, Australia. 1-8.
- [9] Amadei, B.; Stephansson, O. (1997). *Rock stress and its measurements*. (1^{ra} ed.). Springer Science+Business Media Dordrecht.
- [10] EngineeringClicks. (2020). *Wheatstone Bridge*. <https://www.engineeringclicks.com/wheatstone-bridge/>
- [11] Sepúlveda, H. G. (2016). *Diseño e Implementación de Herramienta Software para el Cálculo del Estado Tensional In-Situ en Base a la Técnica "Hollow Inclusion"*. [Tesis, Universidad de Santiago de Chile].

- [12] Beltrán, F. (2007). *Elasticidad y Resistencia de Materiales I*. Universidad Politécnica de Madrid. https://www.researchgate.net/publication/263926710_Elasticidad_y_Resistencia_de_Materiales_I
- [13] Panek, L. A. (1966). *Calculation of the Average Ground Stress Components from Measurements of the Diametral Deformation of a Drill Hole*. United States Department of the Interior, Bureau of Mines. https://books.google.cl/books?id=0SXhVhbXKtQC&printsec=frontcover&source=gbs_atb#v=onepage&q&f=false
- [14] Corporación Nacional del Cobre de Chile [CODELCO]. (2014). *Actualización de Metodología para la Medición de Esfuerzos In Situ, utilizando nueva Celda CSIRO HI Digital*.
- [15] Cavieres, P. (2021). *Introducción a Técnicas de Mediciones de Esfuerzos In Situ*. [Diapositiva PowerPoint]. SIMIN 2021, Universidad de Santiago de Chile.
- [16] Savin, G. N. (1961). *Stress Concentration Around Holes*. Pergamon Press, Oxford, 241-296.
- [17] Duncan, M. E.; Pender, M. J. (1980). *Analysis of the Hollow Inclusion Technique for Measuring In Situ Rock Stress*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 17(3), 137-146. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(80\)91360-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(80)91360-1)
- [18] Worotnicki, G. (1993). *CSIRO Triaxial Stress Measurement Cell*. Rock Testing and Site Characterization, 329-394. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042066-0.50020-3>

8. ANEXOS

ANEXO A. Cálculo de factores de corrección K

A1. Alivio de los esfuerzos transversales de la roca $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$

La relación entre las deformaciones circunferenciales y los esfuerzos en la roca perpendiculares a la perforación se obtuvo a partir de la solución de Savin para anillos elásticos isotrópicos soldados en un agujero circular en una placa elástica e isotrópica infinita [16]. Savin demostró que los esfuerzos y deformaciones en el anillo varían a lo largo de su circunferencia de manera similar a la superficie de un agujero circular sin revestimiento. En un campo de esfuerzos uniforme uniaxial σ_1 , las tensiones circunferenciales y radiales en un punto dentro del anillo, pueden presentarse como:

$$\begin{aligned}\sigma_\psi &= \sigma_1(a - 2b \cos 2\psi) \\ \sigma_r &= \sigma_1(c + 2d \cos 2\psi)\end{aligned}\tag{45}$$

Donde ψ es el ángulo entre σ_1 y el radio hacia el punto, y los coeficientes a, b, c y d se obtienen a partir de las ecuaciones de Savin, las cuales son demasiado complejas para ser citadas aquí. Los coeficientes dependen de las dimensiones del anillo, la distancia radial al punto y las propiedades del material de la placa y el anillo. (Para la superficie de un agujero sin revestimiento, $a = b = 1$ y $c = d = 0$). A partir de esto, es fácil derivar una solución para las deformaciones circunferenciales en una celda HI bajo condiciones de deformación plana, asumiendo que la celda y la capa de cemento tienen las mismas propiedades mecánicas. En el sistema de coordenadas locales que muestra la Figura 2.5:

$$E_r \varepsilon_\theta = (1 - \nu_r^2) \{ (\sigma_x + \sigma_y) K'_1 - 2K'_2 [(\sigma_x + \sigma_y) \cos 2\theta + 2\tau_{xy} \sin 2\theta] \}\tag{46}$$

Donde:

$$\begin{aligned}K'_1 &= \frac{G_r}{G_p} \left(a \frac{1 - \nu_p}{1 - \nu_r} - c \frac{\nu_p}{1 - \nu_r} \right) \\ K'_2 &= \frac{G_r}{G_p} \left(b \frac{1 - \nu_p}{1 - \nu_r} - d \frac{\nu_p}{1 - \nu_r} \right)\end{aligned}\tag{47}$$

G_r y G_p son los módulos de corte del material rocoso y plástico, y ν_p es la relación de Poisson del material plástico. Los primas se utilizan para denotar la condición de deformación plana.

Como se muestra más adelante, K'_2 es idéntico a K_2 en la ecuación; K'_1 es el principal componente de K_1 , y en rocas duras es prácticamente idéntico a él.

La solución de tubo grueso utilizada para el análisis de pruebas biaxiales en testigos de roca con celdas HI proporciona de manera independiente una expresión más simple para K'_1 .

$$K'_1 = \frac{mn + 1 - 2\nu_p}{e(1 - n) + n + 1 - 2\nu_p} \quad (48)$$

Por otro lado, el factor K'_2 requiere cálculos más extensos que K'_1 . A partir de la reorganización de la solución de Savin realizada por Duncan Fama y Pender [17], y después de algunas simplificaciones menores se obtiene:

$$K'_2 = D^{-1}[(1 - e)d_2 + (\chi_p + e)d_3] \quad (49)$$

A2. Alivio de los esfuerzos de corte axial-transversal de la roca τ_{yz} y τ_{xz}

La solución general para el factor K_3 fue obtenida por Duncan Fama y Pender [17].

$$K_3 = \frac{R_p^2(1 + R_1^2/R_{sq}^2)}{R_p^2 + R_1^2 + e(R_p^2 - R_1^2)} = \frac{1 + nm}{1 + n + e(1 - n)} \quad (50)$$

Una aproximación precisa, en rocas con $E_r : E_p > 3$, ha sido utilizada por Worotnicki y Walton [8].

$$K_3 \approx 1 + \frac{R_p - R_{sq}}{R_p} \quad (51)$$

A3. Alivio de los esfuerzos axial σ_z y 'restricción axial' $\Delta\sigma_z = -\nu_r(\sigma_x + \sigma_y)$

La modelización por elementos finitos de testigos con celdas HI indicó que las deformaciones axiales son iguales tanto en el material plástico como en la roca (excepto cerca de los extremos de la

sección pegada de la carcasa del extensómetro). Dado que la rigidez axial de las celdas instaladas es insignificante en comparación con la de los testigos de roca.

$$E_r \varepsilon_z = \sigma_z - \nu_r (\sigma_x + \sigma_y) \quad (52)$$

El alivio del esfuerzo axial y la "restricción axial" del testigo, además de los cambios en las deformaciones axiales en la roca y la celda HI, también provoca cambios en las deformaciones circunferenciales e "inclinadas". La expansión axial se acompaña de una contracción circunferencial.

Con la celda unida a la roca, si sus razones de Poisson fueran iguales, la contracción circunferencial en la carcasa sería la misma que en la roca.

$$E_r \varepsilon_\theta = \nu_r [\sigma_z - \nu_r (\sigma_x + \sigma_y)] \quad (53)$$

Como sus razones de Poisson suelen ser diferentes, el material plástico en la celda HI tiende a deformarse lateralmente de manera diferente a la roca, y se desarrollan pequeños esfuerzos radiales uniformes entre la roca y la inclusión plástica. El problema de las deformaciones en la celda HI se vuelve matemáticamente similar al de la celda HI en el testigo de roca bajo una carga biaxial.

Al igualar los desplazamientos axiales y radiales del testigo de roca y la inclusión plástica en su interfaz, y utilizando las soluciones de tubería gruesa de la teoría de la elasticidad, se obtuvo una expresión para las deformaciones circunferenciales en la carcasa HI asociadas al esfuerzo axial y la "restricción axial" [18].

$$E_r \varepsilon_\theta = -\nu_r [\sigma_z - \nu_r (\sigma_x + \sigma_y)] K_4 \quad (54)$$

Donde el factor de corrección K_4 depende de las razones de Poisson de los materiales y de la magnitud de K'_1 .

$$K_4 = 1 - (K'_1 - 1) \left(\frac{\nu_p}{\nu_r} - 1 \right) \quad (55)$$

A4. Parámetros y variables utilizadas en el cálculo de los factores de corrección

Parámetros para el cálculo de cada factor:

$$m = \frac{R_p^2}{R_{sg}^2}$$

$$n = \frac{R_1^2}{R_p^2}$$

ν_p = Razón de Poisson del plástico.

ν_r = Razón de Poisson de la Roca.

E_p = Módulo de Young del plástico.

E_r = Módulo de Young de la roca.

R_p = Radio de la perforación piloto (superficie rocosa).

R_{sg} = Radio en que se posicionan los strain gauges.

R_1 = Radio interno de donde se posicionan las celdas.

$$e = \frac{G_p}{G_r}$$

$$G_p = \frac{E_p}{2(1 + \nu_p)} : \text{Módulo de corte del plástico.}$$

$$G_r = \frac{E_r}{2(1 + \nu_r)} : \text{Módulo de corte de la roca.}$$

$$D = (1 + e\chi_r)[\chi_p + e + (1 - e)n(3 - 6n - 4n^2)] + (\chi_p - e\chi_r)n[(1 - e)n^3 + \chi_p + e]$$

$$\chi_r = 3 - 4\nu_r$$

$$\chi_p = 3 - 4\nu_p$$

$$d_2 = 12 \frac{n}{m} (1 - n)(1 - \nu_p) + n^2[n^2m(3m - 4\nu_p) + 4n - 3]$$

$$d_3 = 1 - 4\nu_p mn + 3m^2n^2$$

ANEXO B. Instalación para sistema de medición de avance overcoring

Para instalar este sistema se deberá, (1) limpiar la parte de la viga donde se desea instalar los imanes de fijación, (2) instalar los imanes, (3) instalar la regla sobre los imanes procurando que el cero quede fijo en el inicio del riel de avance de la perforadora (ver Figura 8.2 y Figura 8.3).



Figura 8.1: Adaptador instalado en perforadora para proceso de overcoring [14].

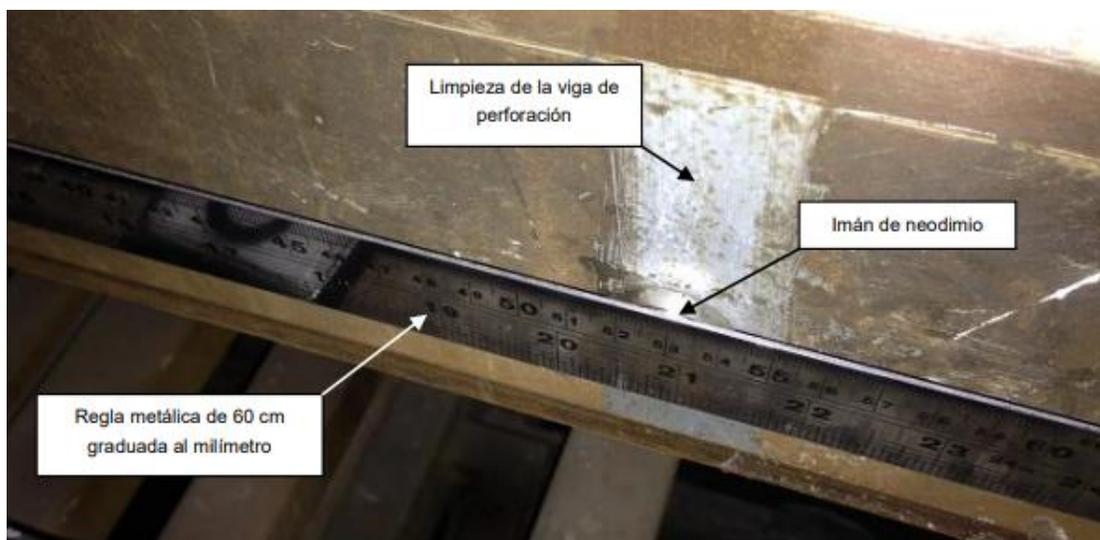


Figura 8.2: Limpieza de superficie e instalación de imanes y regla [14].



Figura 8.3: Ubicación de regla en riel de avance [14].

ANEXO C. Procedimiento de instalación y recopilación de información con Celda HID

Una vez que la celda HID se encuentra instalada en la perforación y haya fraguado el tiempo suficiente, se debe realizar la conexión entre celda HID y unidad lectora. El procedimiento es el siguiente:

- Limpiar el cable de comunicación de la celda HID con alcohol o limpia contactos eléctricos.
- Conectar el cable de comunicación a la interface en el orden mostrado en la Figura 8.4.

Celda HID		Interface
Cable rojo	→	Conector RED (power)
Cable azul	→	Conector BLUE (ground)
Cable blanco o Amarillo	→	Conector WHITE (Tx)
Cable verde	→	Conector GREEN (Rx)



Figura 8.4: Conexión de cable de comunicación de celda HID con Interfaz [14].

- Iniciar Tablet Trimble mediante botón verde ubicado en la parte inferior derecha.
- Iniciado Windows, abrir aplicación Digital HID-Cell Display V2.90, ubicada en el escritorio.
- Conectar cable de comunicación entre Interface y Tablet, el conector USB debe ir a puerto USB de Tablet ubicado en el costado inferior de este, y conector Serial debe conectarse a puerto Serial de Interfaz, ubicado a un costado derecho de este (ver Figura 8.5)

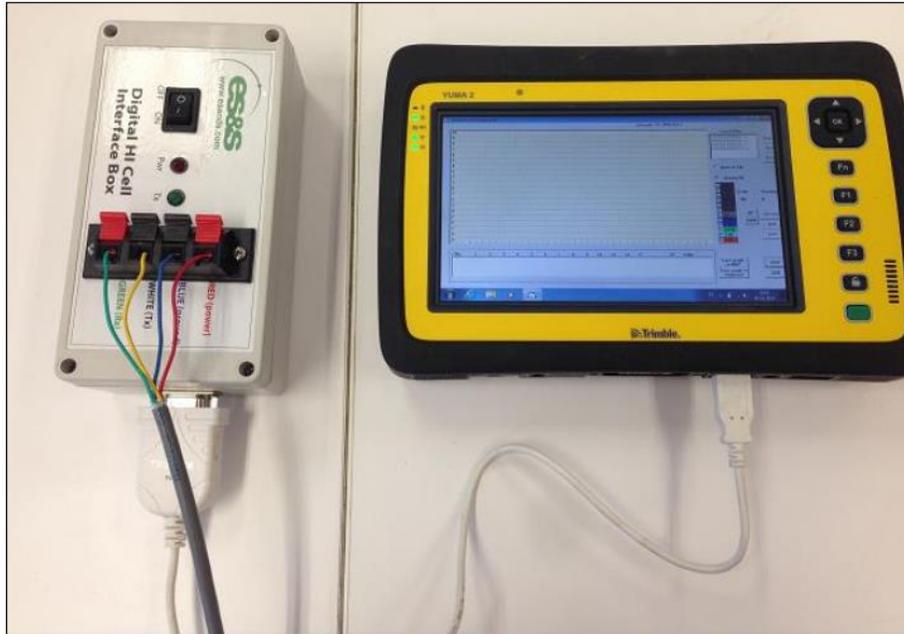


Figura 8.5: Celda HID conectada a interfaz y a tablet [14].

- Encender interface con switch ubicado en la parte frontal hacia posición “ON”. De esta manera la celda HID queda energizada y lista para comenzar a enviar la información de las microdeformaciones hacia Tablet.
- La operación del software se describe en el punto siguiente 5.7, “Utilización de software HID-Cell Display”.
- Una vez terminado el proceso de overcoring, se debe apagar la interface mediante el mismo switch de encendido, hacia la posición “OFF”.
- Desconectar el cable de comunicación entre interface y Tablet, y luego desconectar el cable de comunicación de la celda HID con la interface.
- Apagar Tablet y guardar todos los componentes de la unidad lectora en maletín de seguridad y traslado.
- Proteger terminal de los cables de la celda HID mediante cinta aislante.

C1. Utilización de software HID-Cell Display

Con la interface encendida (ver Figura 8.6), para comenzar a visualizar las microdeformaciones, se debe seleccionar la casilla denominada “Write to File” (1), luego presionar el botón “Start” (2) y por último apretar el botón “Null” (3). Con esto último, se logra llevar a cero las microdeformaciones de cada strain gauge.

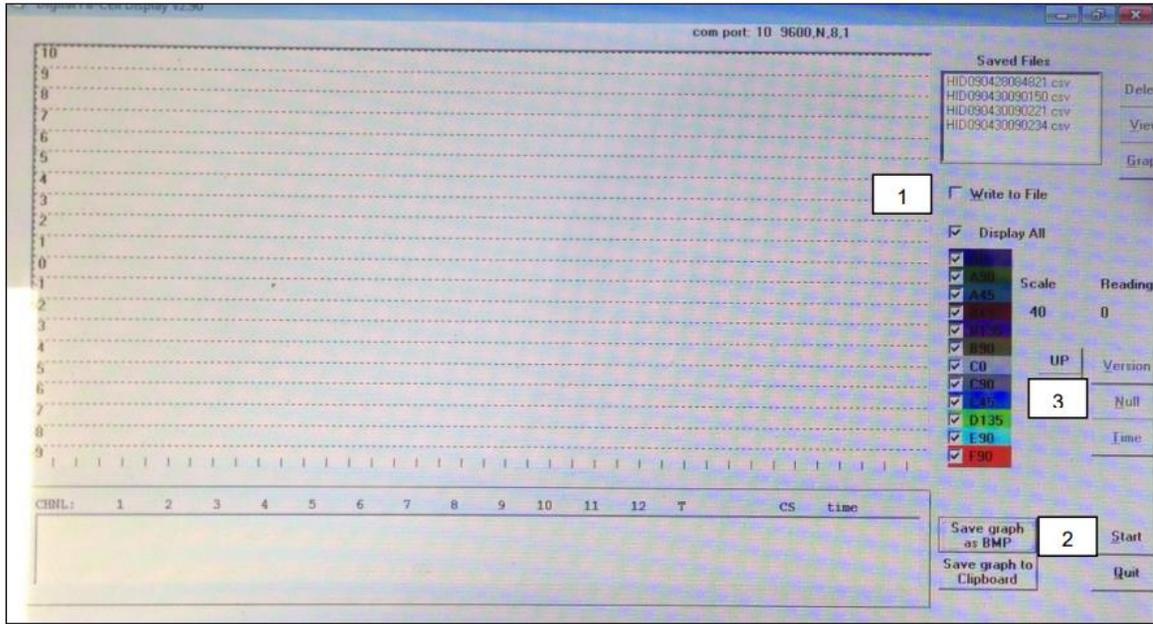


Figura 8.6: Software de recopilación y visualización de los microdeformaciones [14].

Una vez que el proceso de overcoring haya terminado, se debe presionar el botón “Stop” (2) y para finalizar, presionar el botón “Quit”.

ANEXO D. Checklist operacional para medición de esfuerzos con celdas HI

Tabla 8.1: Checklist operacional etapa de Pre-Labores.

Pre-Labores	
Etapa	Descripción
Chequeo de equipos y herramientas de medición	Tablet o computador que captura datos en buen estado.
	El estado de las herramientas a utilizar es el adecuado y poseen el correspondiente código de colores.
	Los estabilizadores se encuentran en buen estado.
	Se realizó la revisión del set de instalación de las celdas (varillas).
	Se verificó el buen estado de celdas HI.
Etapa	Descripción
Chequeo de equipos y herramientas de perforación	Las coronas a utilizar se encuentran en buen estado para realizar la perforación en el macizo rocoso.
	Se verifica el buen estado y funcionamiento de la unidad de perforación.
	Se verifica el buen estado y funcionamiento de la unidad de fuerza.
	Se verifica el buen estado y funcionamiento de la unidad de lodo.
	Se verifica el buen estado de mangueras hidráulicas y de agua.
	Se chequeó el buen estado del estanque de almacenamiento de agua .
	Se verificó el buen estado de cámara biaxial, bomba hidráulica, mangueras y membrana.
	Se verificó el buen estado de cajas portadoras de testigos.
	Las barras son las adecuadas para el trabajo y están en buenas condiciones.
Etapa	Descripción
Revisión de postura y seguridad	El sitio posee ventilación adecuada para llevar a cabo las labores.
	El sitio cumple con los requerimientos para el posicionamiento de equipos y herramientas necesarios.
	El sitio está disponible operacionalmente.
	El sitio cuenta con fortificación definitiva que garantice la seguridad de equipos y personal.
	Los ruidos en el entorno no sobrepasan los límites permitidos por la legislación vigente.
	Se cuenta con iluminación adecuada para llevar a cabo los trabajos.
	El terreno permite realizar las labores sin complicaciones.
	Se conocen las vías de evacuación correspondientes.
	Se cuenta con comunicación radial.
	Se cuenta con sistema de alertas contra incendios.
	Se cuenta con depósitos para desechos según corresponda.
	Se dispone de energía eléctrica necesaria.
	Se dispone de red para suministros hídricos (agua industrial) necesarios.
Se dispone con red de drenaje habilitada.	

Tabla 8.2: Checklist operacional etapa de Pre-Overcoring.

Pre-Overcoring	
Etapa	Descripción
Perforación de pozo de 6" de diámetro	La longitud del pozo inicial es mayor a 3 veces el ancho de la galería (medición no inducida)
	Se conoce el punto a perforar y la orientación del pozo (Marcaje en terreno).
	Se procura realizar el pozo con una inclinación positiva mayor a 3°.
	Se presentan fotografías de testigos de 6".
Etapa	Descripción
Análisis de testigo de 6" de diámetro	Se verificó que en el fondo del pozo el sobreperforado (si existiese) es menor de 5 [cm] (por ejemplo: con la pala recuperadora de testigos).
	Se verifico que el corte generado en el fondo del pozo de 6" posee una inclinación menor a 20°.
Etapa	Descripción
Perforación concéntrica de 38[mm] de diámetro	Se conoce la longitud de la perforación de 38 [mm] (40-60 [cm]).
	Se realiza la perforación minimizando la vibración, con el objetivo de asegurar y recuperar el testigo.
	Se verifica que los accesorios de perforación son los adecuados para garantizar la realización del pozo concéntrico.
	Se verifica la extracción y se fotografía el testigo de 38 [mm] de diámetro.
Etapa	Descripción
Análisis de testigo de 38 [mm] de diámetro y ubicación de celda HI	El testigo es adecuado y no posee estructuras geológicas (Discontinuidades o contactos litológicos) que puedan interferir con los datos a medir.
	Se define el lugar a instalar la celda en base a la inspección del testigo considerando los 10 [cm] mínimos de cada extremo.
	El lugar definido para la instalación de la celda HI a la altura de las rosetas no presenta ningún tipo de estructura geológica que pueda interferir con los datos a medir.
	Se fotografía el testigo de 38 [mm] junto a celda HI, mostrando lugar a instalar.
Etapa	Descripción
Preparación del pozo de 38 [mm] de diámetro	Se realiza una limpieza del pozo con inyección de agua durante 5 minutos.
	Se realiza limpieza del pozo con barra de limpieza envuelta con gaza y empapada con alcohol, completando al menos 10 ciclos de acuerdo con el procedimiento.
Etapa	Descripción
Preparación de celda HI y resina	Se liman los topes de instalación hasta alcanzar el diámetro adecuado (Igual al de la corona de 38 [mm]) medido con pie de metro.
	Se realiza limpieza de topes y zona trabajada con alcohol eliminando impurezas.
	Se define el largo de flecha en base a la ubicación que se desea para la celda HI.
	Se acoplan la barra de orientación, centralizado y una de instalación.

	Se prepara la resina de acuerdo con la metodología (sin presencia de burbujas).
	Se vierte la resina en la celda HI hasta la altura indicada
	Se retira la cinta aisladora de la parte superior del pistón y se introduce dentro de la celda haciendo coincidir los orificios correspondientes y las marcas de orientación.
	Se introducen los pines de estaño en los orificios y se corta el largo sobrante.
	Se instala la flecha en la parte superior del pistón.
	Se realiza el marcaje del set de barras de limpieza y posterior medición para localizar el inicio y el final del pozo de 38 [mm] y así procurar un mayor cuidado al momento de instalar la celda.
	Se cambia el set de barras de limpieza por la celda y su set de barras correspondiente, y se realiza el marcaje midiendo desde la punta de flecha.
Etapa	Descripción
Instalación de celda HI	La celda se encuentra conectada a la unidad de medición.
	Se conecta el cable de la barra de orientación a un dispositivo (por ejemplo: multítester) con el fin de orientar la celda de forma correcta.
	La celda se instala de manera lenta, continua y con energía, hasta llegar a la última marca de la barra, sin jalar nunca hacia atrás la celda HI.
	Siempre se corroboró el dispositivo de orientación (por ejemplo: el sonido del multítester) al ir realizando el avance de la instalación.
	Se verifica que el filamento o resistencia para comprobar que el pistón llegó al fondo de la celda se cortó.
	Se espera el tiempo adecuado para que la resina fragüe, mínimo 16 horas.

Tabla 8.3: Checklist operacional etapa de Overcoring.

Overcoring	
Etapa	Descripción
Preparación para overcoring	Se retira el set completo de instalación.
	Se instala a la perforadora adaptador para permitir el paso del cable de la celda HI por el set de barras.
	Se instala el set de control de avance según metodología.
	Se limpian los terminales de los cables (por ejemplo: limpia contacto) y se conectan a la unidad lectora según corresponda.
Etapa	Descripción
Overcoring	Se ingresa set de barras y estabilizadores controlando y asegurando las uniones y seguridad del proceso.
	Se introduce el cable de comunicación de la celda HI por el interior de las barras, sin morderlo ni dañarlo.
	Se conecta la celda a la unidad lectora y se comienza con la toma de datos.
	Se inyecta agua durante 10 minutos con la perforadora (sin rotación).
	Se genera la rotación de la corona durante 30 segundos, para luego comenzar el avance del overcoring.

	Se realiza la perforación minimizando la vibración, con el objetivo de asegurar y recuperar el testigo.
	Se asegura un avance constante durante todo el proceso de overcoring.
	Una vez alcanzada la longitud deseada, se detiene el avance y rotación, dejando el flujo de agua durante 10 minutos.
	En caso de no poder recuperar el testigo producto del overcoring debido a que no se cortó en el proceso, se utiliza uñeta para el corte y recuperación con pala recuperadora de testigos
	Se verifica la extracción y se fotografía el testigo de forma longitudinal y frontal.
Etapa	Descripción
Análisis de testigo del overcoring	Se verifica el largo del testigo (> 22 [cm]).
	Se verifica el tipo de corte que se generó en el fondo.
	Se ubica la celda HI dentro del testigo y se marca esta ubicación.
	El testigo es adecuado y no posee fracturas que comprometan el posterior ensayo biaxial.

Tabla 8.4: Checklist operacional etapa de Ensayo Biaxial.

Ensayo Biaxial	
Preparación de ensayo biaxial	El kit para realizar el ensayo en terreno se encuentra instalado de manera adecuada (especificar lo "adecuado").
	Se verifica que la bomba se encuentre con aceite suficiente para realizar el ensayo.
	Se verifica que el sistema cámara biaxial y bomba manual no tenga aire en su interior.
	Se limpia el testigo del overcoring para eliminar cualquier tipo de impurezas.
	Se conecta la celda HI a la unidad de medición.
Etapa	Descripción
Ensayo biaxial	El ensayo es realizado inmediatamente después de la extracción del testigo del overcoring.
	Se ubica el testigo en la cámara procurando que la zona en donde se encuentra la celda HI (marcas en el testigo) este cubierta completamente por la membrana (quede centrada).
	Se cuenta con sistema para el control y registro de ciclos de carga, descarga y medición de parámetros asociados (análoga o digital).
	Se realiza el proceso de carga y descarga de presión en intervalos constantes definidos.

Tabla 8.5: Checklist operacional etapa de Entrega de Información.

Entrega de Información	
Etapas	Descripción
Entrega de información e informe	Se entrega ficha técnica de celda HI utilizada.
	Se especifica la convención de signos utilizadas para cálculos correspondientes.
	Se especifican los datos de orientación del pozo (Bearing y Dip).
	Se entregan los resultados de las constantes elásticas y se especifica el procedimiento del cálculo.
	Se especifica software utilizado, sus inputs y outputs (Resultados).
	Se entrega gráfico de deformación vs tiempo para el overcoring y comportamiento de resina.
	Se entrega gráfico de deformación vs presión para ensayo biaxial.
	Se especifican canales descartados si existiesen y criterio utilizado.
	Se entregan registros fotográficos especificados en procedimiento.
	Se entregan datos en bruto obtenidos por la celda HI.
	Se especifica tensor de esfuerzos en coordenadas cartesianas y mina.
	Se especifican los valores de los esfuerzos principales.
	Se especifica la orientación de los esfuerzos principales y su representación estereográfica.
	Se muestra el índice de anisotropía de esfuerzos en 360° y su representación gráfica.
Geología del sitio, geotecnia, geomecánica y geometría, si existiese (interpretación).	

ANEXO E. Código programa graficador de datos celda HI

E1. Código lector y modificador de archivos para lectura:

```
graficar.py parse.py ●
parse.py > parseInput
1 def parseInput(filePath,fileName):
2
3     #open from path
4
5     file = open( filePath, 'r')
6
7     lines = file.readlines()
8
9
10    copy = False
11
12    linesCopy = []
13
14    for line in lines:
15        if line[0:4] != 'CH 1':
16            pass
17        if line[0:4] == 'CH 1':
18            copy = True
19        if line[0:9] == 'Upload OK':
20            copy = False
21
22
23        if copy:
24            linesCopy.append(line)
25
```

```

26 csvName = fileName.split('.')[0] + '.csv'
27 csv = open(csvName, 'w')
28
29
30 firstLine = linesCopy[0]
31 ch_counter = 0
32 i = 0
33 while i < len(firstLine):
34     if ch_counter < 12 :
35         if firstLine[i] == 'C':
36             csv.write(firstLine[i:i+4])
37             csv.write(',')
38             ch_counter += 1
39             i += 4
40     else:
41         if ord(firstLine[i]) >=65 and ord(firstLine[i]) <= 90:
42             read = True
43             while read and i < len(firstLine):
44                 if ord(firstLine[i]) <= 65 or ord(firstLine[i]) >= 122:
45                     read = False
46                     csv.write(',')
47                 else:
48                     csv.write(firstLine[i])
49
50                     i += 1
51
52             i += 1
53
54 csv.write('\n')
55
56 writting = False
57 for line in linesCopy[1:]:
58     i=0
59     for char in line:
60         if ord(char) >= 45 and ord(char) <= 58:
61             writting = True
62             csv.write(char)
63         else:
64             if writting:
65                 csv.write(',')
66                 writting = False
67             i += 1
68     csv.write('\n')
69
70 return csvName

```

E2. Código graficador

```
graficar.py × parse.py ●
graficar.py > parseInput
1 from parse import parseInput
2 import matplotlib as mpl
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import matplotlib.patches as mpatches
5 import numpy as np
6 import pandas as pd
7 import os
8 from scipy.interpolate import interp1d
9
10
11 def plotFile(filePath,fileName,gf,plotMode):
12     csvName = parseInput(filePath, fileName)
13
14     df = pd.read_csv(csvName)
15     # delete csv file
16     os.remove(csvName)
17
18     #remove last column
19     df = df.iloc[:, :-1]
20
21
22     channelsName = df.columns[0:12].to_list()
23
24     excv = df['Excv'].to_list()
25
26     gf = 2.103
27
28     channels = []
29
30     for channelName in channelsName:
31         channels.append(df[channelName].to_list())
32
33
34     toPlot = []
35     i=0
36     for channel in channels:
37         j = 0
38         toPlot.append([])
```

```

39     for value in channel:
40         toPlot[i].append((value - channel[0]) * 4000 / (gf * excv[j]))
41         j += 1
42
43     i += 1
44
45
46     displayNames = ['A0', 'A90', 'A45', 'B45', 'B135', 'B90', 'C0', 'C90', 'C45', 'D135',
47                    'E90', 'F90']
48     colors = ['red', 'blue', 'green', 'olivedrab', 'lime', 'darkblue', 'darkred',
49              'slateblue', 'springgreen', 'limegreen', 'cornflowerblue', 'rebeccapurple']
50
51     x = np.linspace(0, len(toPlot[0]), len(toPlot[0]))
52
53     k=0
54     for plotColumn in toPlot:
55         y = np.array(plotColumn)
56         f = interp1d(x, y, kind='cubic')
57         xnew = np.linspace(0, len(toPlot[0]), 200)
58         #x_smooth = np.linspace(x.min(), x.max(), 200)
59         #y_smooth = interp1d(x, y, x_smooth)
60         #plt.plot(x_smooth, y_smooth, label=displayNames[k], color=colors[k])
61         plt.plot(plotColumn, label=displayNames[k], color=colors[k])
62         k += 1
63
64     legend = []
65     l = 0
66     for display in displayNames:
67         legend.append(mpatches.Patch(color=colors[l], label=display))
68         l += 1
69

```

```

70 plt.ylabel('μStain (μS)')
71 plt.legend(handles=legend, ncol=6, loc='lower center',bbox_to_anchor=(0.5, -0.35))
72
73
74
75 segundo_eje = plt.twinx()
76 segundo_eje.set_ylabel('Temperatura (°C)')
77 segundo_eje.plot(df['Temp'].to_list(), label='Temp',color='k', linewidth=1)
78 segundo_eje.legend(bbox_to_anchor=(1.0, 1.15))
79
80 date = df['Date'].to_list()
81 time = df['Time'].to_list()
82 xticks = []
83
84 for i in range(3):
85     index = int(len(date)/3 * i)
86     tick = date[index] + '\n' + time[index]
87     xticks.append(tick)
88
89 last_tick = date[-1] + '\n' + time[-1]
90 xticks.append(last_tick)
91
92 ticks = [0, int(len(date)/3), int(len(date)/3)*2, len(date)-1]
93
94 plt.xticks(ticks = ticks, labels=xticks, fontsize=8)
95
96 #set more margin in bottom
97 plt.subplots_adjust(bottom=0.25, left=0.15, right=0.85)
98
99 plt.show()

```

E3. Código interfaz programa

```

graficar.py ● Interfazarchivo.py ● parse.py ●
Interfazarchivo.py > MainWindow > __init__
1 import sys
2 from PyQt5.QtWidgets import QMessageBox
3 QPushButton, QCheckBox, QApplication, QMainWindow
4 QPushButton, QFileDialog, QLineEdit, QLabel
5 from graficar import plotFile
6
7
8 class MainWindow(QMainWindow):
9     def __init__(self):
10         super().__init__()

```

```

12     # Crea un campo de texto para ingresar el valor de gf
13     self.gf=''
14     self.gf_label = QLabel("Valor de GF:", self)
15     self.gf_label.setGeometry(50, 20, 100, 20)
16     self.gf_input = QLineEdit(self)
17     self.gf_input.setGeometry(140, 20, 120, 20)
18     # Guardar valor gf cuando este cambie
19     self.gf_input.textChanged.connect(self.setGf)
20
21     # Crea un botón para seleccionar un archivo
22     self.select_file_button = QPushButton("Seleccionar archivo", self)
23     self.select_file_button.setGeometry(50, 60, 210, 30)
24     self.select_file_button.clicked.connect(self.select_file)
25     self.file_name = 'Seleccione un archivo'
26     self.file_name_text = QLabel(self.file_name, self)
27     self.file_name_text.setGeometry(50, 90, 210, 20)
28
29     # Crea un buttongroup
30     self.button_group = QButtonGroup(self)
31     self.button_group.setExclusive(True)
32
33     # Añade botones al buttongroup
34     self.button1 = QCheckBox("Biaxial", self)
35     self.button1.setGeometry(30, 120, 100, 20)
36     self.button_group.addButton(self.button1)
37     self.button2 = QCheckBox("Overcoring", self)
38     self.button2.setGeometry(110, 120, 100, 20)
39     self.button_group.addButton(self.button2)
40     self.button3 = QCheckBox("Resina", self)
41     self.button3.setGeometry(220, 120, 100, 20)
42     self.button_group.addButton(self.button3)
43
44
45
46     # Crea un boton para graficar el archivo
47     self.plot_file_button = QPushButton("Graficar archivo", self)
48     self.plot_file_button.setGeometry(50, 160, 210, 50)
49     self.plot_file_button.clicked.connect(self.plotFile)
50
51
52     # Establece las propiedades de la ventana principal
53     self.setGeometry(100, 100, 300, 230)
54     self.setWindowTitle("HI CELL plotter v1.0")
55     self.show()

```

```

57     def setGf(self):
58         self.gf = self.gf_input.text()
59
60     def select_file(self):
61         # Abre un cuadro de diálogo para seleccionar un archivo
62         path, _ = QFileDialog.getOpenFileName(self,
63         "Seleccionar archivo", "", "Archivos de texto (*.TXT)")
64
65         # Obtiene el nombre del archivo seleccionado
66         file_name = path.split("/")[-1]
67         if file_name:
68             self.path = path
69             self.file_name = file_name
70             self.file_name_text.setText(self.file_name)

```

```

73     def plotFile(self):
74         if self.gf==' ' or self.file_name=='Seleccione un archivo' or
75         or self.button_group.checkedButton()==None:
76             QMessageBox.about(self, "Error", "Debe rellenar todos los campos")
77             return
78
79         plotFile(self.path, self.file_name, self.gf, _
80         self.button_group.checkedButton().text())
81
82     if __name__ == "__main__":
83         app = QApplication(sys.argv)
84         window = MainWindow()
85         sys.exit(app.exec_())

```

ANEXO F. Códigos para estimación de esfuerzos

F1. Código para cálculo de factores de corrección K

```
kfactor.py × local.py total.py estadistica.py establec.py
kfactor.py > ...
1  import numpy as np
2
3  Er = 50.27 #Modulo de young de la roca
4  vr = 0.19 #Razón de Poisson de la roca
5
6  # CALCULO DE K FACTORS
7  Ep = 2.60 #Módulo de young del plastico
8  vp = 0.4 #Razón de poisson del plastico
9  d = 38 #Diametro del pozo piloto
10 r1 = 17.5 #Radio interior de la celda
11 rp = (d/2) #Radio del pozo piloto
12 rsg = 17.55 #Radio interno en donde se posicionan los strain gauges
13 m = (rp*rp)/(rsg*rsg)
14 n = (r1*r1)/(rp*rp)
15 gr = Er/(2*(1+vr)) #Módulo de corte de la roca
16 gp = Ep/(2*(1+vp)) #Módulo de corte del plastico
17 e = gp/gr
18 xr = 3-4*vr
19 xp = 3-4*vp
20 D = (1+xr*e)*(xp+e+(1-e)*n*(3-6*n+(4*n**2)))+(xp-e*xr)*n*((1-e)*(n**3)+xp+e)
21 d2 = 12*(n/m)*(1-n)*(1-vp)+(n**2)*((n**2)*m*(3*m-4*vp)+4*n-3)
22 d3 = 1-4*vp*m*n+3*(m**2)*(n**2)
23
24 def ki(m,n,vp,e,vr,d2,d3,D):
25
26     k=[]
27     k.append( (((m*n+1-2*vp)*(1-vp*vr))/(e*(1-n)+n+1-2*vp))+(vp*vr))
28     k.append(((1-e)*d2+(xp+e)*d3)/D)
29     k.append((1+n*m)/(1+n+e*(1-n)))
30     k.append(1-(k[0]-1)*((vp-vr)/(vr*(1-vp*vr))))
31     return k
32
```

F2. Código para estimación de esfuerzos coordenadas locales

```
kfactor.py local.py total.py estadistica.py establec.py
local.py > ...
1  from kfactor import * #Importo variables de la roca y cálculo de factores K
2
3  #Definición de factores K e impresión#
4  k = (ki(m,n,vp,e,vr,d2,d3,D))
5
6  print("Los factores de corrección K son : ")
7  for i, num in enumerate(k):
8      print(f"Factor K{i+1} = {num:.6f}")
9
10 def ftt(t,vr,Er):
11     fila=np.zeros(6)
12     fila[0]=k[0]-2*(1-vr**2)*np.cos(2*t)*k[1]
13     fila[1]=k[0]+2*(1-vr**2)*np.cos(2*t)*k[1]
14     fila[2]=-vr*k[3]
15     fila[3]=-4*(1-vr**2)*np.sin(2*t)*k[1]
16     fila[4]=0.0
17     fila[5]=0.0
18     return fila/Er
19
20 def fzz(t,vr,Er):
21     fila=np.zeros(6)
22     fila[0]=-vr
```

```

23     fila[1]=-vr
24     fila[2]=1.0
25     fila[3]=0.0
26     fila[4]=0.0
27     fila[5]=0.0
28     return fila/Er
29
30 def ftz(t,vr,Er):
31     fila=np.zeros(6)
32     fila[0]=0.0
33     fila[1]=0.0
34     fila[2]=0.0
35     fila[3]=0.0
36     fila[4]=4*(1+vr)*np.cos(t)*k[2]
37     fila[5]=-4*(1+vr)*np.sin(t)*k[2]
38     return fila/Er
39
40 def strain_gauge_i(t,psi,vr,Er):
41     u=(np.sin(psi)**2)*ftt(t,vr,Er)
42     u+=(np.cos(psi)**2)*fzz(t,vr,Er)
43     u+=(np.sin(psi)*np.cos(psi))*ftz(t,vr,Er)
44
45     return u
46
47 gauge={}
48 gauge[0]=(323 , 0)
49 gauge[1]=(300 , 90)
50 gauge[2]=(300 , 45)
51 gauge[3]=(163.5 , 45)
52 gauge[4]=(163.5 , 135)
53 gauge[5]=(180 , 90)
54 gauge[6]=(83 , 0)
55 gauge[7]=(60 , 90)
56 gauge[8]=(60 , 45)
57 gauge[9]=(300 , 135)
58 gauge[10]=(210 , 90)
59 gauge[11]=(90 , 90)
60
61 for i in range(12):
62     t=(gauge[i][0]/180.0)*np.pi
63     psi=(gauge[i][1]/180.0)*np.pi
64     u=strain_gauge_i(t,psi,vr,Er)

```

```

65 |   filas.append(u)
66
67   F=np.array(filas)
68   print('La matriz F es : ')
69   print('\n'.join([' '.join([f"{a:10.4f}" for a in fila]) for fila in F]))
70
71   strain0=[0.0]*12
72   strain0[0]=996.6402
73   strain0[1]=305.9154
74   strain0[2]=614.7493
75   strain0[3]=676.1387
76   strain0[4]=893.1766
77   strain0[5]=1003.0655
78   strain0[6]=937.5322
79   strain0[7]=957.1401
80   strain0[8]=1087.6789
81   strain0[9]=694.5434
82   strain0[10]=1227.2776
83   strain0[11]=467.8963
84
85   strain0=np.array(strain0)

86
87   S_local=np.zeros((3,3))
88   M0=np.dot(np.transpose(F),F)
89   b0=np.dot(np.transpose(F),(strain0))
90   s0=(np.linalg.solve(M0,b0))/1000
91   S_local[0,0]=s0[0] #Sigma X
92   S_local[1,1]=s0[1] #Sigma Y
93   S_local[2,2]=s0[2] #Sigma Z
94   S_local[0,1]=s0[3] #Tau XY
95   S_local[0,2]=s0[5] #Tau YZ
96   S_local[1,2]=s0[4] #Tau XZ
97   S_local[1,0] = S_local[0,1]
98   S_local[2,0] = S_local[0,2]
99   S_local[2,1] = S_local[1,2]
100
101   print('El tensor de esfuerzos en coordenadas locales es : ')
102   print('\n'.join([' '.join([f"{a:10.4f}" for a in fila]) for fila in S_local]))
103
104   #Invariantes
105   I10 = s0[0] + s0[1] + s0[2]
106   I20 = s0[0]*s0[1] + s0[1]*s0[2] + s0[0]*s0[2] - s0[3]**2 - s0[4]**2 - s0[5]**2

```

```

107 I30 = s0[0]*s0[1]*s0[2] + 2*s0[3]*s0[4]*s0[5] - s0[2]*s0[3]**2 - s0[1]*s0[4]**2 - s0[0]*s0[5]**2
108 p0 = [-1, I10, -I20, I30]
109
110 print("Los invariantes estan dados por:")
111 print(I10,I20,I30)
112
113 pstress = np.roots(p0)
114 print("Los Esfuerzos Principales estan dados por:")
115 print(pstress)

```

F3. Código estimación de esfuerzos coordenadas totales

```

kfactor.py local.py total.py estadistica.py establec.py
total.py > [0] nx
1  from local import *
2
3  #Parámetros del pozo
4  Dip = -(5 + 37/60 + 24/3600) #Duda con el signo
5  B = (342 + 11/60 + 22.2/3600)
6
7  Hx, Hy, Hz = np.radians(270-B), np.radians(360-B), np.radians(90-B)
8  Vx, Vy, Vz = np.radians(90+Dip), 0, np.radians(-Dip)
9
10 #Vectores unitarios de la base local en función de la base total
11 x = [np.cos(Vx)*np.cos(Hx), np.cos(Vx)*np.sin(Hx), np.sin(Vx)]
12 y = [np.cos(Vy)*np.cos(Hy), np.cos(Vy)*np.sin(Hy), np.sin(Vy)]
13 z = [np.cos(Vz)*np.cos(Hz), np.cos(Vz)*np.sin(Hz), np.sin(Vz)]
14
15 lx, ly, lz = x[0], y[0], z[0]
16 mx, my, mz = x[1], y[1], z[1]
17 nx, ny, nz = x[2], y[2], z[2]
18
19 J = [[0.0 for j in range(6)] for i in range(len(F))]
20
21 # Cálculo de las componentes de J

```

```

22 for i in range(len(F)):
23     f = F[i]
24     J[i][0] = f[0]*lx**2 + f[1]*ly**2 + f[2]*lz**2 + f[3]*lx*ly +
25     f[4]*ly*lz + f[5]*lx*lz
26     J[i][1] = f[0]*mx**2 + f[1]*my**2 + f[2]*mz**2 + f[3]*mx*my +
27     f[4]*my*mz + f[5]*mx*mz
28     J[i][2] = f[0]*nx**2 + f[1]*ny**2 + f[2]*nz**2 + f[3]*nx*ny +
29     f[4]*ny*nz + f[5]*nx*nz
30     J[i][3] = (2.0*f[0]*lx*mx + 2.0*f[1]*ly*my + 2.0*f[2]*lz*mz +
31     f[3]*(lx*my + ly*mx) + f[4]*(lz*my + ly*mz) + f[5]*(lx*mz + lz*mx))
32     J[i][4] = (2.0*f[0]*mx*nx + 2.0*f[1]*my*ny + 2.0*f[2]*mz*nz +
33     f[3]*(mx*ny + my*nx) + f[4]*(mz*ny + my*nz) + f[5]*(mx*nz + mz*nx))
34     J[i][5] = (2.0*f[0]*lx*nx + 2.0*f[1]*ly*ny + 2.0*f[2]*lz*nz +
35     f[3]*(lx*ny + ly*nx) + f[4]*(lz*ny + ly*nz) + f[5]*(lx*nz + lz*nx))
36
37     print('La matriz J es : ')
38     print('\n'.join([' '.join([f"{a:10.4f}" for a in fila]) for fila in J]))
39
40 # Soluciones
41 S_total = np.zeros((3,3))
42 M1=np.dot(np.transpose(J),J)
43
44 S_total[0,2]=s1[5] #Tau NC
45 S_total[1,2]=s1[4] #Tau EC
46 S_total[1,0] = S_total[0,1]
47 S_total[2,0] = S_total[0,2]
48 S_total[2,1] = S_total[1,2]
49
50 print('El tensor de esfuerzos en coordenadas totales es : ')
51 print('\n'.join([' '.join([f"{a:10.4f}" for a in fila]) for fila in S_total]))
52
53 #Invariantes
54 I11 = s1[0] + s1[1] + s1[2]
55 I21 = s1[0]*s1[1] + s1[1]*s1[2] + s1[0]*s1[2] - s1[3]**2 - s1[5]**2 - s1[4]**2
56 I31 = s1[0]*s1[1]*s1[2] + 2*s1[3]*s1[5]*s1[4] - s1[2]*s1[3]**2 - s1[1]*s1[5]**2 - s1[0]*s1[4]**2
57 p1 = [-1, I11, -I21, I31]
58
59 print("Los invariantes estan dados por:")
60 print(I11,I21,I31)
61
62 pstress = np.roots(p1)
63 print("Los Esfuerzos Principales estan dados por:")
64 print(pstress)

```

F4. Código ilustrativo del error en base a la estimación

```
kfactor.py local.py total.py estadistica.py x establec.py
estadistica.py > ...
1  from total import *
2  import matplotlib.pyplot as plt
3
4  #####
5  #####Gráfica de diferencias#####
6  #####
7
8  # Crear una lista con los índices de las mediciones
9  indices = list(range(1, len(strain0) + 1))
10
11 # Calcula el vector de estimaciones
12 strain_estimado = np.dot(F, s0) * 1000 # Multiplicamos por 1000 para ajustar la escala
13
14 # Calcula el vector de residuos
15 residuos = strain0 - strain_estimado
16
17 # Configurar el estilo de las líneas
18 estilo_real = 'bo-'
19 estilo_estimado = 'r.--'
20 estilo_diferencia = 'g--'

estadistica.py > ...
22 # Graficar los valores reales, los valores estimados y la diferencia
23 plt.plot(indices, strain0, estilo_real, label='Valores reales', linewidth=1, markersize=3)
24 plt.plot(indices, strain_estimado, estilo_estimado, label='Valores estimados', linewidth=0.8, markersize=3)
25 plt.plot(indices, residuos, estilo_diferencia, label='Diferencia', linewidth=0.8)
26
27 # Marcar los puntos correspondientes en la línea de diferencia
28 for i in range(len(indices)):
29     plt.plot([indices[i], indices[i]], [residuos[i], residuos[i]], 'go-', linewidth=0.8, markersize=3)
30
31     # Agregar el valor numérico de la diferencia ligeramente arriba de la línea
32     plt.text(indices[i], residuos[i] + 40, f'{residuos[i]:.2f}', ha='center', va='bottom', fontsize=8)
33
34 # Configurar la leyenda y las etiquetas de los ejes
35 plt.legend()
36 plt.xlabel('Mediciones')
37 plt.ylabel('MicroStrain')
38
39 # Ajustar el espacio entre las etiquetas en el eje x
40 plt.xticks(indices)
41
42 # Mostrar el gráfico
43 plt.show()
```

ANEXO G. Análisis de gráficos μ strain vs tiempo

Los saltos repentinos en las primeras lecturas de deformación pueden atribuirse a malos contactos eléctricos y corregirse a tiempo. Otra causa de inestabilidad en las lecturas puede deberse a fluctuaciones en la temperatura del agua de perforación. En tales circunstancias, es recomendable retrasar el inicio del overcoring o incluso detener el ensayo en una etapa temprana y rastrear la causa.

Inicialmente las lecturas de todos los canales deberían ser cercanas a cero, con pequeñas fluctuaciones insignificantes. Una gran desviación de varios o de todos los strain gauges desde el inicio o durante las primeras etapas de la prueba de overcoring probablemente signifique que la celda no se haya adherido correctamente a la roca y está expuesta al agua de perforación (Figura 8.7).

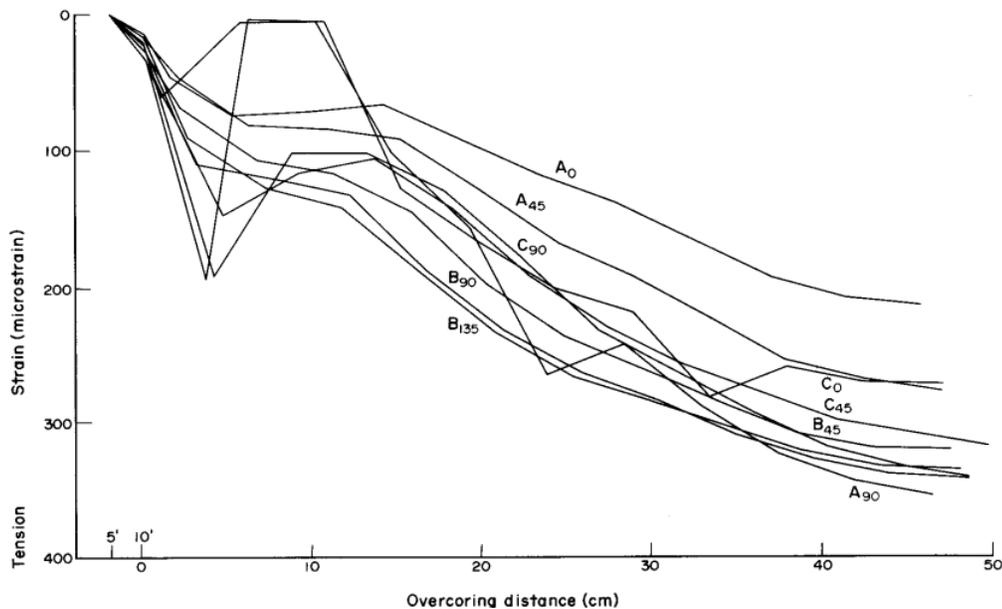


Figura 8.7: Gráfico de deformaciones vs avance de overcoring de una celda mal instalada [18].

Los saltos repentinos en las lecturas o una inversión repentina en la tendencia de las deformaciones pueden indicar una pérdida de adherencia con la roca; los saltos repentinos también pueden estar asociados con la apertura de una junta y la deformación mecánica de la celda o con la entrada de agua a través de la junta.

Para ayudar en la evaluación del progreso y los resultados de la prueba, las Figura 8.8, Figura 8.9, Figura 8.10, Figura 8.11, Figura 8.12, y Figura 8.13 muestran los gráficos de deformación de overcoring para una gama representativa de magnitudes y orientaciones de los esfuerzos principales

en relación con la dirección del pozo. El uso de estos gráficos como guía para la evaluación de las pruebas de overcoring fue iniciado por la Oficina de Minas de Estados Unidos (US Bureau of Mines).

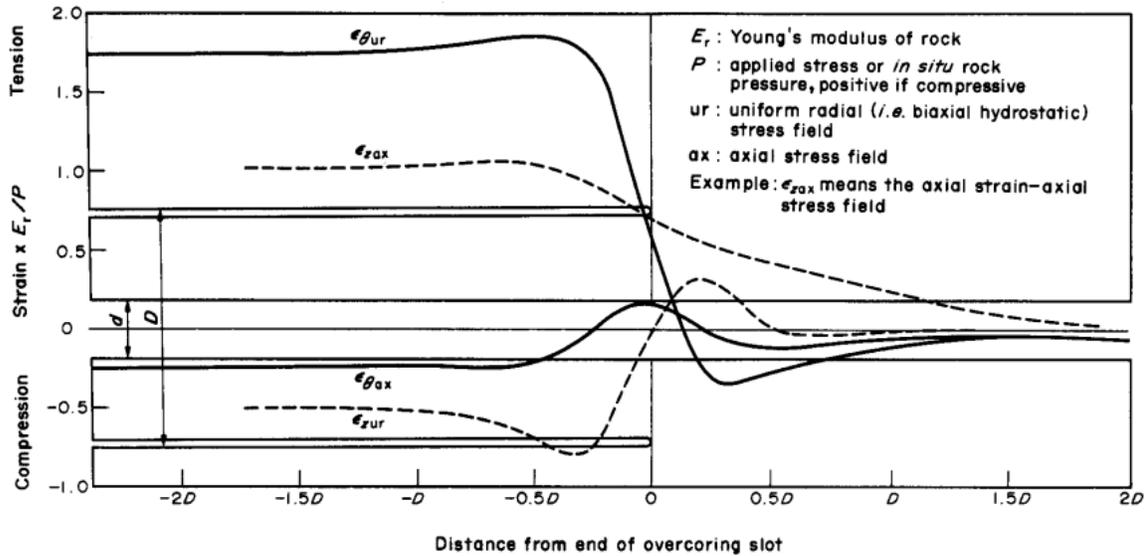


Figura 8.8: Deformaciones circunferenciales ϵ_θ y axiales ϵ_z durante el overcoring; campos de esfuerzos radiales y axiales uniformes. Ensayos FEM: Razón de Poisson de la roca, $\nu_r=0.25$. Diámetro exterior del testigo = 142 [mm] [18].

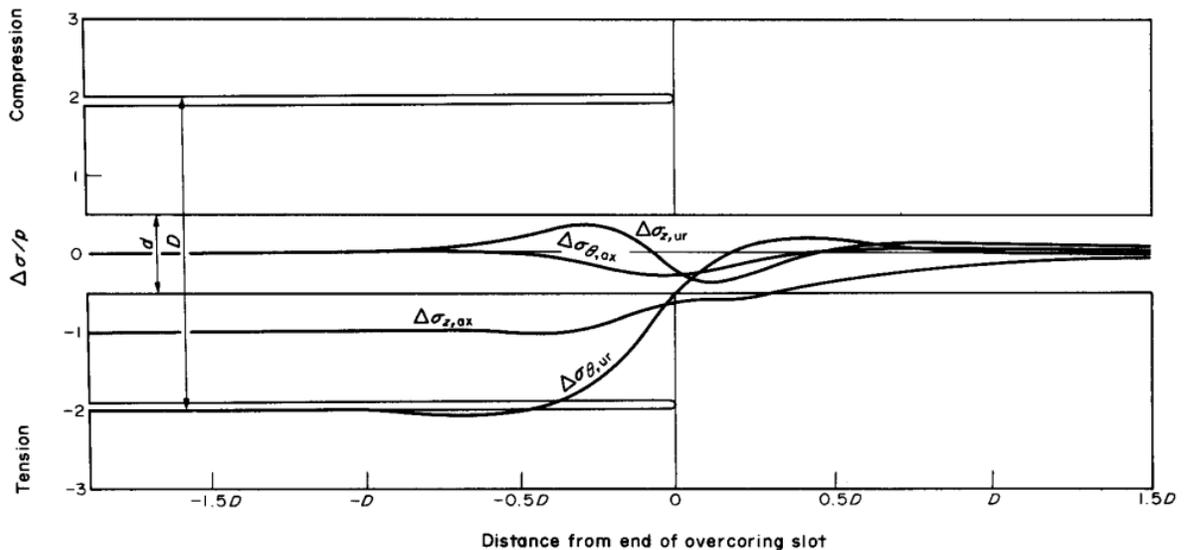


Figura 8.9: Cambios en los esfuerzos circunferenciales σ_θ y axiales σ_{ax} en la superficie del pozo piloto durante el overcoring. Esfuerzos radiales (ur) y axiales (ax) uniformes en el infinito. El diámetro exterior del testigo = 142 [mm] [18].

Las Figura 8.8 y Figura 8.9 son representaciones teóricas de los cambios de deformación y esfuerzo en la superficie del pozo piloto durante el overcoring con bits de perforación de 142 [mm].

Se obtuvieron mediante el método de los elementos finitos para los casos del campo de tensiones biaxiales (hidrostáticas) uniforme, transversal a la dirección de la perforación y al campo de esfuerzos axiales uniforme.

Las Figura 8.10, Figura 8.11, Figura 8.12 y Figura 8.13, muestran los gráficos de overcoring obtenidos a partir de pruebas de medición de tensiones reales utilizando celdas HI para varios casos típicos de esfuerzos principales in situ en la roca, con diferentes magnitudes y orientaciones en relación con la dirección del pozo. Se puede observar en las figuras las formas características de las curvas de overcoring para los grupos de strain gauges axiales, circunferenciales y de 45°/135°, y cómo sus formas y posiciones relativas varían con las condiciones de esfuerzos.

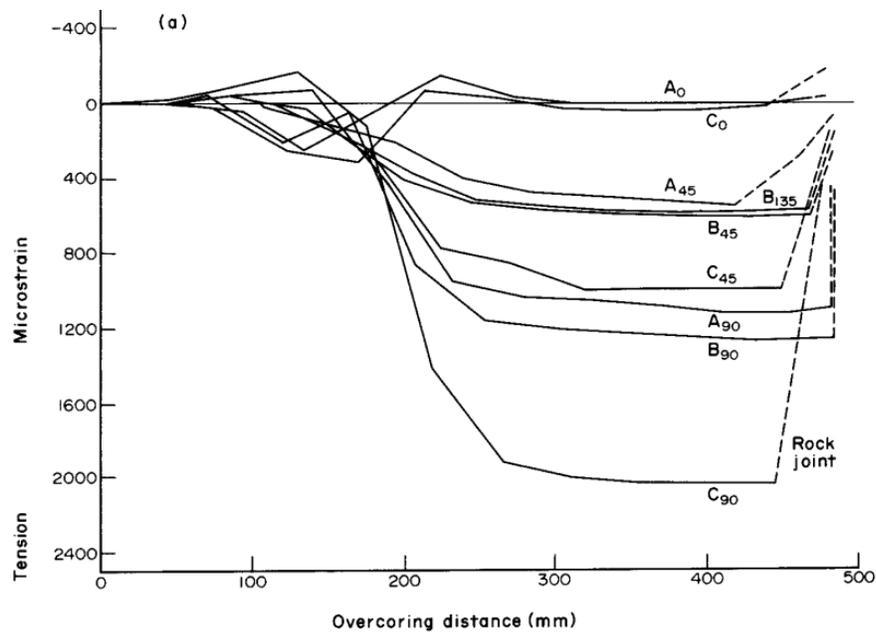


Figura 8.10: Deformaciones observadas en un ensayo HI en roca con esfuerzos principales in situ en la relación 2.1:1.4:1 e inclinadas respecto a la dirección de perforación respectivamente a 91°, 89° y 0° [18].

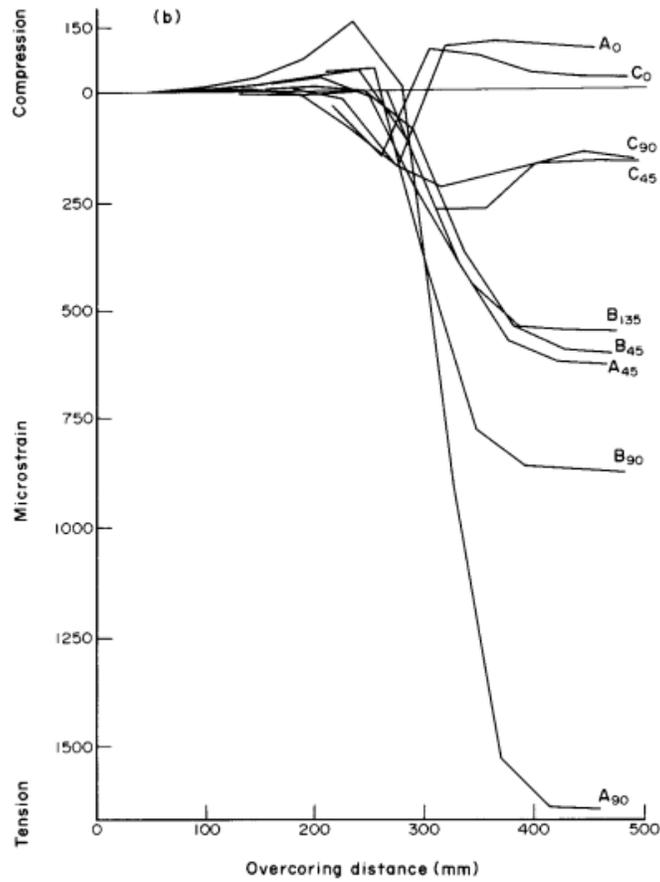


Figura 8.11: Deformaciones observadas en un ensayo HI en roca con esfuerzos principales in situ en la relación 5.4:1.9:1 e inclinadas respecto a la dirección de perforación respectivamente a 84°, 103° y 22° [18].

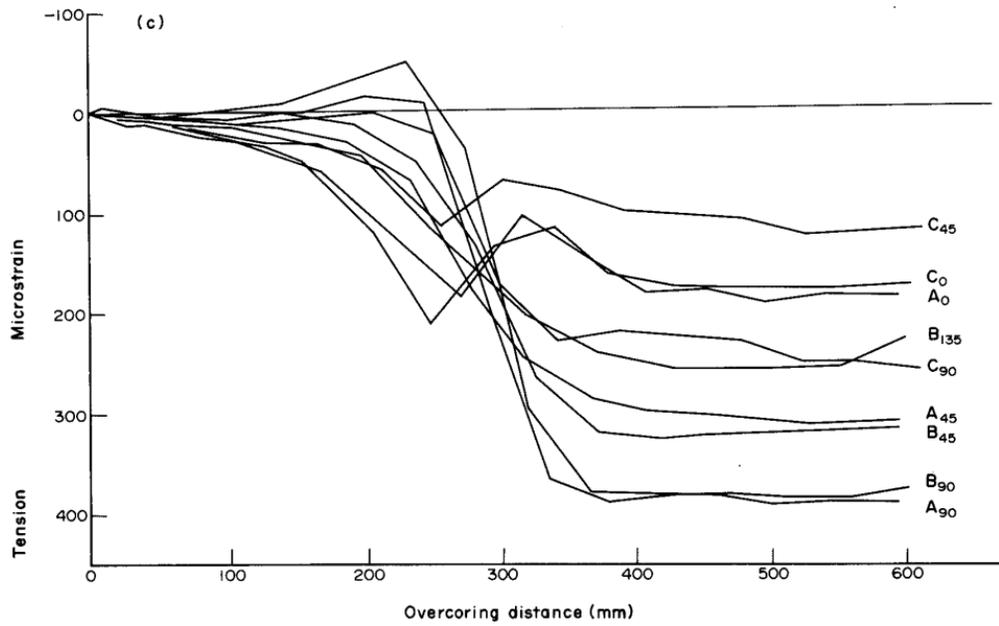


Figura 8.12: Deformaciones observadas en un ensayo HI en roca con esfuerzos principales in situ en la relación 1.9:1.4:1 e inclinadas respecto a la dirección de perforación respectivamente a 20°, 90° y 70° [18].

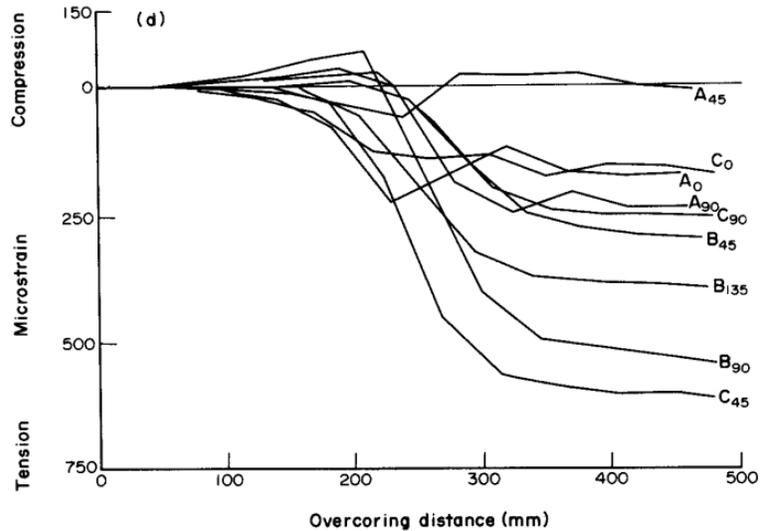


Figura 8.13: Deformaciones observadas en un ensayo HI en roca con esfuerzos principales in situ en la relación 7.4:4.3:1 e inclinadas respecto a la dirección de perforación respectivamente a 35°, 103° y 58° [18].

Normalmente, las primeras indicaciones de alivio de esfuerzos se hacen notables cuando el bit del overcoring de diámetro D avanza hasta estar a una distancia de 1D de los strain gauges, y el alivio de esfuerzos se completa prácticamente dentro de 1D después de los strain gauges. La mayoría de los cambios de deformación tienen lugar dentro de una distancia de aproximadamente $\pm 0.5D$ desde los strain gauges a ambos lados. Es importante que en la etapa de overcoring el avance sea de manera suave, a una velocidad constante y sin interrupciones.

Cuando el bit de perforación avanza y alivia los esfuerzos dentro del testigo, se desarrollan frente al borde de corte en la superficie del pozo piloto zonas transitorias de esfuerzo axial y de incremento del esfuerzo de compresión circunferencial (Figura 8.10). Como resultado, cuando el borde de corte del bit se acerca a la ubicación de los strain gauges, se observan protuberancias típicas en las gráficas de las deformaciones axiales y circunferenciales. En el monitoreo de la deformación con lecturas tomadas en intervalos, estas protuberancias aparecen como "picos".

Los strain gauges axiales muestran un "pico" de esfuerzos (a veces de gran magnitud) antes de alcanzar una meseta estable; los strain gauges circunferenciales generalmente muestran una respuesta compresiva transitoria (Figura 8.10 y Figura 8.11). Esta respuesta transitoria generalmente está ausente o es mucho menos pronunciada en las lecturas de los extensómetros de 45°/135°, probablemente debido a la cancelación mutua de las respuestas transitorias en las componentes de deformación axial y circunferencial de las lecturas de estos strain gauges.

Ambos strain gauges axiales "teóricamente" deberían mostrar cambios de deformación de la misma magnitud si la roca fuera completamente homogénea. Las magnitudes y signos de las deformaciones axiales, como se puede observar en las figuras, dependen de la relación entre las componentes de esfuerzo axial y transversal en el sitio de prueba.

Las Figura 8.10 y Figura 8.11 son típicas de los gráficos en los cuales los esfuerzos transversales tienen una magnitud similar o mayor que los esfuerzos axiales. La secuencia de gráficos Figura 8.11, Figura 8.10, Figura 8.12, Figura 8.13, ilustra el cambio en las deformaciones axiales desde pequeñas deformaciones compresivas a deformaciones de tracción de magnitud creciente a medida que aumenta la magnitud relativa de las componentes de los esfuerzos axiales.

Por lo general, las deformaciones axiales de overcoring son mucho más pequeñas que las deformaciones circunferenciales. Las excepciones se producen cuando los esfuerzos axiales en la roca son muchas veces mayores que los esfuerzos circunferenciales o si el cemento no se ha fraguado adecuadamente.

Los gráficos de las deformaciones circunferenciales casi siempre tienen forma de ojiva. Las deformaciones mostradas por diferentes strain gauges de deformación circunferencial pueden tener una magnitud similar, como se muestra en la Figura 8.10, o diferir significativamente cuando hay una gran diferencia entre los esfuerzos principales secundarios en la roca (perpendiculares al eje del pozo), como se muestra en la Figura 8.11. Por lo general, los cambios en las deformaciones circunferenciales, al menos en algunos de los strain gauges, son mayores que las deformaciones axiales o de 45°/135°. Una excepción puede ocurrir cuando las tensiones principales mayor y/o intermedia están dirigidas cerca de 45° con respecto al eje del pozo, como se muestra en la Figura 8.13, o paralelas a él.

La inclinación de los esfuerzos principales con respecto al eje del pozo determina la magnitud de las componentes de esfuerzo de corte axial/radial τ_{yz} y τ_{zx} , esto afecta la posición relativa y la forma de los gráficos de los strain gauges de 45°/135°. Estas componentes de esfuerzo de corte son cero cuando los esfuerzos principales son normales o paralelos al pozo y alcanzan su máximo cuando los esfuerzos principales están dirigidas a 45° con respecto a él. La Figura 8.10 ilustra el caso en el que las componentes de esfuerzo de corte axial/radial son cercanas a cero, de modo que, según la teoría, las deformaciones inclinadas son aproximadamente iguales a 0.5 x (deformaciones

axiales más deformaciones circunferenciales); sus gráficos tienen forma de ojiva, similar a los gráficos de deformación circunferencial.

La secuencia de los gráficos Figura 8.10, Figura 8.11, Figura 8.12, Figura 8.13, muestra las posiciones relativas y formas de los gráficos de los strain gauges de $45^\circ/135^\circ$ y cómo cambian cuando el esfuerzo principal mayor σ_1 se desvía de ser paralelo o normal al eje del pozo, y las tensiones de corte τ_{yz} y τ_{zx} aumentan en relación con las otras componentes de esfuerzo. Se registró un salto en las lecturas al cruzar una junta transversal al final del overcoring en la prueba de la Figura 8.10 [18].

ANEXO H. Análisis de sensibilidad esfuerzos principales menor e intermedio

σ_2	Razón de Poisson (ν_r)															
	0.1	0.12	0.14	0.16	0.18	0.2	0.22	0.24	0.26	0.28	0.3	0.32	0.34	0.36	0.38	0.4
22	9.87	10.13	10.41	10.70	11.00	11.31	11.64	11.99	12.35	12.73	13.13	13.56	14.00	14.48	14.98	15.52
24	10.74	11.03	11.34	11.65	11.98	12.32	12.68	13.06	13.45	13.87	14.30	14.76	15.25	15.77	16.32	16.90
26	11.62	11.94	12.26	12.60	12.96	13.33	13.72	14.12	14.55	15.00	15.47	15.97	16.50	17.06	17.65	18.28
28	12.50	12.84	13.19	13.56	13.94	14.34	14.75	15.19	15.65	16.13	16.64	17.18	17.75	18.35	18.99	19.67
30	13.38	13.74	14.12	14.51	14.92	15.34	15.79	16.26	16.75	17.27	17.81	18.39	19.00	19.64	20.32	21.05
32	14.25	14.64	15.04	15.46	15.90	16.35	16.83	17.33	17.85	18.40	18.98	19.60	20.24	20.93	21.66	22.43
34	15.13	15.54	15.97	16.41	16.88	17.36	17.87	18.40	18.95	19.54	20.15	20.81	21.49	22.22	23.00	23.82
36	16.01	16.44	16.90	17.37	17.85	18.37	18.90	19.46	20.05	20.67	21.32	22.01	22.74	23.51	24.33	25.20
38	16.89	17.35	17.82	18.32	18.83	19.37	19.94	20.53	21.15	21.81	22.49	23.22	23.99	24.80	25.67	26.59
40	17.77	18.25	18.75	19.27	19.81	20.38	20.98	21.60	22.25	22.94	23.66	24.43	25.24	26.09	27.00	27.97
42	18.64	19.15	19.67	20.22	20.79	21.39	22.01	22.67	23.35	24.07	24.83	25.64	26.49	27.38	28.34	29.35
44	19.52	20.05	20.60	21.17	21.77	22.40	23.05	23.74	24.45	25.21	26.01	26.85	27.73	28.68	29.67	30.74
46	20.40	20.95	21.53	22.13	22.75	23.40	24.09	24.80	25.55	26.34	27.18	28.05	28.98	29.97	31.01	32.12
48	21.28	21.85	22.45	23.08	23.73	24.41	25.12	25.87	26.65	27.48	28.35	29.26	30.23	31.26	32.35	33.50
50	22.15	22.75	23.38	24.03	24.71	25.42	26.16	26.94	27.75	28.61	29.52	30.47	31.48	32.55	33.68	34.89
52	23.03	23.66	24.31	24.98	25.69	26.43	27.20	28.01	28.85	29.75	30.69	31.68	32.73	33.84	35.02	36.27
54	23.91	24.56	25.23	25.94	26.67	27.43	28.24	29.07	29.96	30.88	31.86	32.89	33.98	35.13	36.35	37.66
56	24.79	25.46	26.16	26.89	27.65	28.44	29.27	30.14	31.06	32.02	33.03	34.10	35.22	36.42	37.69	39.04
58	25.67	26.36	27.09	27.84	28.63	29.45	30.31	31.21	32.16	33.15	34.20	35.30	36.47	37.71	39.03	40.42
60	26.54	27.26	28.01	28.79	29.61	30.46	31.35	32.28	33.26	34.28	35.37	36.51	37.72	39.00	40.36	41.81
62	27.42	28.16	28.94	29.75	30.59	31.46	32.38	33.35	34.36	35.42	36.54	37.72	38.97	40.29	41.70	43.19
64	28.30	29.07	29.87	30.70	31.56	32.47	33.42	34.41	35.46	36.55	37.71	38.93	40.22	41.58	43.03	44.57
66	29.18	29.97	30.79	31.65	32.54	33.48	34.46	35.48	36.56	37.69	38.88	40.14	41.47	42.87	44.37	45.96
68	30.06	30.87	31.72	32.60	33.52	34.49	35.49	36.55	37.66	38.82	40.05	41.35	42.71	44.16	45.71	47.34

Figura 8.14: Resultados del análisis de sensibilidad para el esfuerzo principal intermedio.

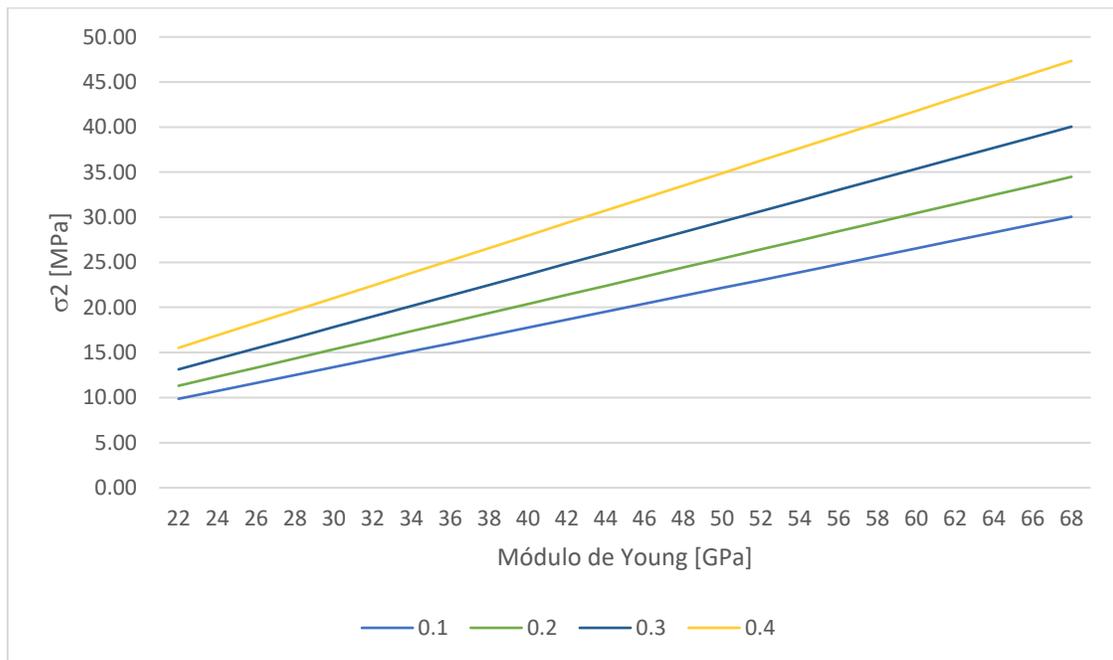


Figura 8.15: Gráfico de magnitud de esfuerzos en base a constantes elásticas para σ_2 .

σ_3	Razón de Poisson (Vr)															
	0.1	0.12	0.14	0.16	0.18	0.2	0.22	0.24	0.26	0.28	0.3	0.32	0.34	0.36	0.38	0.4
22	5.81	6.05	6.30	6.56	6.83	7.10	7.39	7.69	8.00	8.32	8.66	9.02	9.40	9.79	10.21	10.65
24	6.33	6.60	6.87	7.15	7.44	7.74	8.05	8.38	8.72	9.07	9.44	9.83	10.24	10.67	11.13	11.61
26	6.86	7.14	7.43	7.74	8.05	8.38	8.72	9.07	9.43	9.82	10.22	10.64	11.08	11.55	12.04	12.56
28	7.38	7.68	8.00	8.33	8.66	9.01	9.38	9.76	10.15	10.56	10.99	11.45	11.92	12.43	12.96	13.52
30	7.90	8.23	8.57	8.92	9.28	9.65	10.04	10.45	10.87	11.31	11.77	12.26	12.77	13.30	13.87	14.48
32	8.42	8.77	9.13	9.50	9.89	10.29	10.70	11.14	11.59	12.06	12.55	13.07	13.61	14.18	14.79	15.43
34	8.94	9.31	9.70	10.09	10.50	10.93	11.37	11.82	12.30	12.80	13.33	13.87	14.45	15.06	15.70	16.39
36	9.46	9.86	10.26	10.68	11.11	11.56	12.03	12.51	13.02	13.55	14.10	14.68	15.29	15.94	16.62	17.34
38	9.98	10.40	10.83	11.27	11.73	12.20	12.69	13.20	13.74	14.30	14.88	15.49	16.14	16.82	17.54	18.30
40	10.50	10.94	11.39	11.86	12.34	12.84	13.36	13.89	14.46	15.04	15.66	16.30	16.98	17.70	18.45	19.25
42	11.03	11.48	11.96	12.45	12.95	13.47	14.02	14.58	15.17	15.79	16.43	17.11	17.82	18.57	19.37	20.21
44	11.55	12.03	12.52	13.03	13.56	14.11	14.68	15.27	15.89	16.54	17.21	17.92	18.66	19.45	20.28	21.16
46	12.07	12.57	13.09	13.62	14.18	14.75	15.34	15.96	16.61	17.28	17.99	18.73	19.51	20.33	21.20	22.12
48	12.59	13.11	13.65	14.21	14.79	15.39	16.01	16.65	17.33	18.03	18.76	19.54	20.35	21.21	22.11	23.07
50	13.11	13.66	14.22	14.80	15.40	16.02	16.67	17.34	18.04	18.77	19.54	20.35	21.19	22.09	23.03	24.03
52	13.63	14.20	14.79	15.39	16.01	16.66	17.33	18.03	18.76	19.52	20.32	21.16	22.04	22.96	23.94	24.98
54	14.15	14.74	15.35	15.98	16.63	17.30	17.99	18.72	19.48	20.27	21.10	21.96	22.88	23.84	24.86	25.94
56	14.68	15.29	15.92	16.57	17.24	17.93	18.66	19.41	20.19	21.01	21.87	22.77	23.72	24.72	25.78	26.89
58	15.20	15.83	16.48	17.15	17.85	18.57	19.32	20.10	20.91	21.76	22.65	23.58	24.56	25.60	26.69	27.85
60	15.72	16.37	17.05	17.74	18.46	19.21	19.98	20.79	21.63	22.51	23.43	24.39	25.41	26.48	27.61	28.80
62	16.24	16.91	17.61	18.33	19.08	19.85	20.65	21.48	22.35	23.25	24.20	25.20	26.25	27.35	28.52	29.76
64	16.76	17.46	18.18	18.92	19.69	20.48	21.31	22.17	23.06	24.00	24.98	26.01	27.09	28.23	29.44	30.72
66	17.28	18.00	18.74	19.51	20.30	21.12	21.97	22.86	23.78	24.75	25.76	26.82	27.93	29.11	30.35	31.67
68	17.80	18.54	19.31	20.10	20.91	21.76	22.63	23.55	24.50	25.49	26.53	27.63	28.78	29.99	31.27	32.63

Figura 8.16: Resultados del análisis de sensibilidad para el esfuerzo principal menor.

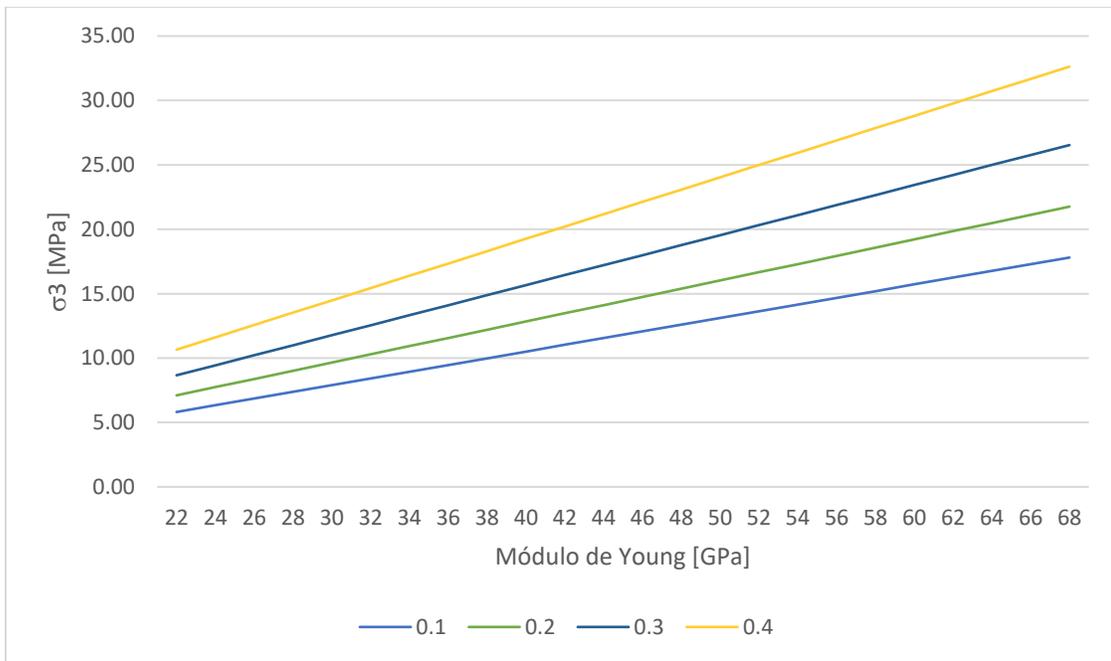


Figura 8.17: Gráfico de magnitud de esfuerzos en base a constantes elásticas para σ_3 .

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Metodología Teórico-Práctica para la Medición de Esfuerzos por Celdas HI (Hollow Inclusion) en Macizo Rocoso Primario, División El Teniente.		
Nombre Memorista: FRANCISCO JAVIER RIVERA SÁEZ		
Modalidad	Proyecto	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	EXCELENTE	 Prof. René Esteban Gómez P.
Calificación	6.9	
Fecha	03.08.2023	
 Prof. René Gómez P.		
		Ingeniero Supervisor: Rodrigo Aurelio Zepeda Araya
		Institución: CODELCO
Comisión (Nombre y Firma)		
 Prof. Roberto Gómez Espina		
Resumen		
<p>Actualmente en el yacimiento El Teniente se está realizando una campaña de mediciones de esfuerzos para poder obtener datos in situ de la magnitud, orientación y dirección de estos, y así poder tomar las decisiones y validaciones respectivas. En base al contexto anterior, el presente estudio realiza un desglose teórico de la técnica de relajación para medición de esfuerzos a través del instrumento llamado celda Hollow Inclusion (HI), en donde se explica el manejo de los datos obtenidos por el instrumento y como llegar al tensor de esfuerzos. Por otro lado, se estructura un procedimiento práctico, con el cual se busca obtener datos de la mayor calidad posible, creando un checklist operacional y entregando información para la revisión y análisis de los datos.</p> <p>Adicionalmente se crean dos códigos en el lenguaje de programación Python, el primero grafica los datos obtenidos directamente por la celda, transformando los milivolts a microstrains e ilustrando la evolución de cada uno de los canales de la celda. El otro código recoge la base teórica y realiza la estimación del tensor de esfuerzos en las coordenadas locales de la celda (x,y,z), y en coordenadas totales (E,N,C), además de calcular los esfuerzos principales, las direcciones principales y los parámetros necesarios para la estimación de estos, por ejemplo, los factores de corrección K.</p> <p>Por otro lado, se realizó un análisis de sensibilidad con un caso de estudio, específicamente en el proyecto Diamante, subnivel de ventilación, cruzado 1, donde se realizó una medición de esfuerzos con celdas HI. En base a los resultados</p>		

se registró el cambio en las magnitudes de los esfuerzos principales a medida que se variaba la razón de Poisson y el módulo de Young (parámetros de entrada para la estimación de los esfuerzos principales), concluyendo que una variación en el módulo de Young de 2 [GPa] se refleja en una diferencia de esfuerzos de aproximadamente de 2 [MPa]. Por otro lado, un cambio en 0.1 en la razón de Poisson reflejaría una diferencia de 10 [MPa] en el esfuerzo principal mayor.

Se realizó también el análisis estadístico de cada canal, asignándole un error cuantificado producido por la estimación mediante mínimos cuadrados.

Finalmente se agregó al código un gráfico que muestra los puntos asociados a las mediciones y a las estimaciones, además del valor del error o diferencia que hay entre estos puntos.

Se logró contribuir significativamente al entendimiento de la medición de esfuerzos al proporcionar la base y explicación teórica, especificar la metodología práctica y además proporcionar herramientas de análisis para la medición de esfuerzos en macizos rocosos primarios. Los hallazgos y las herramientas desarrolladas tienen el potencial de mejorar la información y toma de datos que se realizan en la actualidad.