



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

**PLATAFORMA COMPUTACIONAL PARA EL ANÁLISIS DE UN SENSOR DE
DESPLAZAMIENTO EN TÚNELES**

JAVIER SOTOMAYOR MIQUELES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL.

PROFESOR GUÍA:

FELIPE BELTRÁN MORALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RICARDO MOFFAT COVARRUBIAS

ALEJANDRA ALVAREZ VALLEJOS

SANTIAGO DE CHILE

2013

Resumen

Un sistema de detección basado en un tubo de PVC de diámetro 40 mm y largo 5 metros, instrumentado con fibra óptica que está conectada a un aparato Brillouin Optical Time Domain Reflectometer (BOTDR) se utiliza para monitorear deformaciones en túneles.

El sensor denominado Tube Sensor (TS) está anclado a la roca en cuatro puntos y se espera que al momento de un desplazamiento del macizo rocoso a causa de la actividad minera, los soportes del TS se muevan generando una deformación en el tubo la cual es detectada por la fibra óptica.

Se propone en el presente trabajo a través de resolver un problema inverso, un algoritmo iterativo que permita estimar el desplazamiento relativo de los apoyos del sensor TS para cada configuración de deformación axial detectada en el sensor usando teoría lineal-elástica de resistencia de materiales y designando diferentes condiciones de borde al problema. Para validar el modelo se utilizaron datos experimentales para luego pasar a datos de terreno, correspondientes a un periodo de tres meses.

Los datos de terrenos corresponden a tres niveles, hundimiento, producción y ventilación de los cuales solo se utilizaron los datos de hundimiento ya que los de ventilación no presentaban lecturas y los datos de producción no mostraban lecturas confiables. Se detectó, gracias al algoritmo, una tendencia al hundimiento hacia la zona donde se encuentran las socavaciones, con un desplazamiento máximo de 3 centímetros.

Los resultados entregados por el algoritmo en este trabajo indican que la solución en varios casos no es única y por tanto se debe usar el criterio del ingeniero para establecer el movimiento más probable de acuerdo a los antecedentes que se tienen, sin embargo a medida que la deformación detectada por la fibra es mayor, la solución tiende a ser única.

Agradecimientos

La ardua labor realizada en este trabajo cierra una larga etapa de estudios universitarios que no podría haber finalizado sin la ayuda de varias personas.

En primer lugar quisiera agradecer a mi familia, partiendo con mi madre, cuyo sueño inconcluso es haber estudiado una carrera universitaria, pero por circunstancias de la vida nunca tuvo la oportunidad y dado por su constante persistencia y carácter que me entregó en momentos difíciles logré obtener la fuerza para salir adelante. A mi padre que me entregó la sabiduría y comprensión, junto con una sonrisa en la cara para entregarme consejos. Ambos han sido un apoyo importante por eso y mucho más es que los quiero mucho. A mi hermano y su familia que siempre me entregaron su apoyo y cariño en especial en esta última etapa universitaria.

Un agradecimiento especial para mis amigos, que sin ellos no podría haber llegado donde estoy, recordando las muchas horas de estudio que gastamos juntos, donde el apoyo entre nosotros resultó vital para avanzar y aprender las distintas material a las que nos enfrentamos. Para ellos solo debo decir muchas gracias por su amistad.

Finalmente quisiera agradecer a los profesores Felipe Beltrán, Ricardo Moffat y a Alejandra Alvarez por confiarme este proyecto junto a su ayuda y apoyo, ya que muchas veces se volvió difícil y confuso, pero gracias a sus consejos y aclaraciones se logró terminar un trabajo que me llena de orgullo haber participado. Incluyo también a los agradecimientos a MICOMO S.A. y a las personas que trabajan en ella.

Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Mina “El Teniente”.....	2
1.3	Tecnología BOTDR.....	4
1.4	Objetivos.....	6
1.5	Metodología.....	6
1.6	Organización del trabajo.....	7
2	ANTECEDENTES GENERALES.....	9
2.1	Discusión Bibliográfica de sensores BOTDR.....	9
2.2	Datos generales.....	11
2.3	Descripción del sensor.....	13
2.4	Instalación en terreno.....	16
2.5	Funcionamiento del sensor.....	17
2.6	Descripción de los datos de laboratorio.....	19
2.7	Descripción de los datos en terreno.....	20
2.8	Ubicación de los sensores.....	23
3	MODELACIÓN ESTRUCTURAL DE UN SENSOR DE DESPLAZAMIENTO.....	26
3.1	Generalidades.....	26
3.2	Bases para el modelo teórico.....	26
3.3	Desarrollo del problema.....	28
3.4	Datos de entrada.....	29
3.5	Descripción de la plataforma computacional.....	31
3.5.1	Trazado de regresiones.....	32
3.5.2	Diagrama axial.....	32
3.5.3	Diagrama Momento y de Corte.....	33
3.5.4	Desplazamientos Nodales.....	34
3.5.5	Diagrama de momento Teórico.....	37
3.5.6	Elección de Desplazamiento de Apoyos.....	39
3.5.7	Diagrama del algoritmo.....	39
4	IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA Y APLICACIONES.....	41

4.1	Datos disponibles.....	41
4.1.1	Datos de laboratorio.....	41
4.1.2	Datos de terreno.....	42
4.2	Validación del modelo.....	46
4.2.1	Validación con datos de laboratorio.....	47
5	RESULTADOS PARA DATOS DE TERRENO.....	56
5.1	Observaciones sobre mediciones en Terreno.....	56
5.2	Resultados Datos Terreno.....	58
5.2.1	Resultados sensor TS12, hundimiento.....	59
5.2.2	Resultados sensor TS13, hundimiento.....	69
5.2.3	Resultados sensor TS14, hundimiento.....	81
5.3	Sensibilidad del sensor TS14.....	88
5.4	Análisis de Resultados.....	90
6	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES.....	92
7	BIBLIOGRAFÍA.....	94
	ANEXOS.....	96
A.	ANEXO A Resultados de la validación del algoritmo para todos los tipos de movimientos ejecutados.....	96
B.	ANEXO B Resultados del algoritmo para datos de terreno del nivel Producción.....	100
C.	ANEXO C Registro fotográfico de los sensores TS en la mina “El Teniente”.....	118

Índice de Figuras.

Figura 1-1: Secuencia de hundimiento avanzado (Jofré et al., 2000) [21].	3
Figura 1-2: Vista isométrica del panel caving con hundimiento avanzado (Valdés 2009) [21].	4
Figura 1-3: Principio de funcionamiento de la señal BOTDR (http://www.picoloop.jp/category/1747073.html).	5
Figura 1-4: Esquema de conexión del analizador a una aplicación minera.	5
Figura 2-1: (a) Método de detección coherente (b) Método de onda retropropagada (Heriguchi et al. (1995)).	10
Figura 2-2: Plano Reserva Norte (RENO) con frente de socavación.	12
Figura 2-3: Plano RENO con sus principales fallas geológicas.	13
Figura 2-4: Componentes de un TS	14
Figura 2-5: Enroscado y fijado del tubo.	14
Figura 2-6: Marcado del tubo	15
Figura 2-7: Pegado de la fibra óptica.	16
Figura 2-8: Fotos de sensores TS en la mina (MICOMO).	17
Figura 2-9: Montaje del ensayo en el laboratorio.	19
Figura 2-10: Esquema del sensor TS en laboratorio.	19
Figura 2-11: Ubicación de los sensores TS nivel hundimiento.	23
Figura 2-12: Ubicación de los sensores TS nivel Producción	24
. Figura 2-13: Ubicación de los sensores TS nivel Ventilación	24
Figura 2-14: Orientación del sensor TS11, nivel hundimiento.	25
Figura 2-15: Orientación del sensor TS12, nivel hundimiento.	25
Figura 2-16: Orientación del sensor TS13, nivel hundimiento.	25
Figura 2-17: Orientación del sensor TS14, nivel hundimiento.	25
Figura 3-1: Modelo del sensor TS con sus grados de libertad.	27
Figura 3-2: Diagrama de tensión, sección transversal.	33
Figura 3-3: Deformación longitudinal fibra superior e inferior.	34
Figura 3-4: Diagrama de cuerpo libre de un tramo del TS	34

Figura 3-5: Grados de libertad y fuerzas nodales del elemento i	35
Figura 3-6: Equilibrio en el Nodo i	35
Figura 3-7: Grados de libertad y reacciones del ejemplo.	36
Figura 3-8: Diagrama del algoritmo.	40
Figura 5-1: Desplazamiento de apoyos TS12 Eje Z, Octubre.	61
Figura 5-2: Desplazamiento de apoyos TS12 Eje Y, Octubre.....	62
Figura 5-3: Desplazamiento de apoyos TS12 Eje Z, Noviembre.	64
Figura 5-4: Desplazamiento de apoyos TS12 Eje Y, Noviembre.....	65
Figura 5-5: Desplazamiento de apoyos TS12 Eje Z, Diciembre.	67
Figura 5-6: Desplazamiento de apoyos TS12 Eje Y, Diciembre.....	68
Figura 5-7: Desplazamiento de apoyos TS13 Eje Z, Octubre.	71
Figura 5-8: Desplazamiento de apoyos TS13 Eje Y, Octubre.....	72
Figura 5-9: Desplazamiento de apoyos TS13 Eje Z, Noviembre (antes 13/11).....	74
Figura 5-10: Desplazamiento de apoyos TS13 Eje Y, Noviembre (antes 13/11).....	75
Figura 5-11: Condiciones de borde para TS13 Eje Z, Noviembre (después 13/11).....	77
Figura 5-12: Condiciones de borde para TS13 Eje Y, Noviembre (después 13/11).	78
Figura 5-13: Condiciones de borde para TS13 Eje Z, Diciembre.	80
Figura 5-14: Condiciones de borde para TS13 Eje Y, Diciembre.....	81
Figura 5-15: Condiciones de borde para TS14 Eje Z, Octubre.	83
Figura 5-16: Condiciones de borde para TS14 Eje Z, Noviembre.	85
Figura 5-17: Condiciones de borde para TS14 Eje Z, Diciembre.	87
Figura 5-18: Deformación del sensor TS14.	87

Índice de Gráficos.

Gráfico 2-1: Redundancia de lectura IC-LOCK.....	22
Gráfico 2-2: Pérdida de Intensidad de los Peaks para 11/25 01:40 CH9 Hundimiento.	22
Gráfico 3-1: Zonas eliminadas y regresiones en las lecturas del sensor.	32
Gráfico 4-1: Resultados de Laboratorio para desplazamiento Tipo I.....	42
Gráfico 4-2: Cambio para dos meses de medición del TS calle 14, canal 9, nivel hundimiento ..	43
Gráfico 4-3: Deformación neto TS calle 14, canal 9, zona hundimiento	44
Gráfico 4-4: Deformación neto TS calle 13, canal 9, zona hundimiento	44
Gráfico 4-5: Deformación neto TS calle 12, canal 9, zona hundimiento	45
Gráfico 4-6: Deformación neto TS calle 11, canal 9, zona hundimiento	45
Gráfico 4-7: Zonas excluidas del análisis, Eje Z, zona superior Tipo IV.....	47
Gráfico 4-8: Comparación de diagramas de momento tipo I, eje Z.	48
Gráfico 4-9: Comparación de diagramas de momento tipo II, eje Y.	48
Gráfico 4-10: Comparación de diagramas de momento tipo II, eje Z.....	49
Gráfico 4-11: Comparación de diagramas de momento tipo III, eje Y.	49
Gráfico 4-12: Comparación de diagramas de momento tipo tipo IV, eje Z.	49
Gráfico 4-13: Diagrama de momento calculado con R0, tipo I.	51
Gráfico 4-14: Regresión R1, tipo I.	51
Gráfico 4-15: Regresión R2, tipo I.	51
Gráfico 4-16: Regresión R3, tipo I.	52
Gráfico 4-17: Todas las regresiones para tipo I.....	52
Gráfico 4-18: Resultado para R0, movimiento tipo IV.	53
Gráfico 4-19: Resultado para R1, movimiento tipo IV.	53
Gráfico 4-20: Resultado para R2, movimiento tipo IV.	53
Gráfico 4-21: Resultado para R3, movimiento tipo IV.	54
Gráfico 5-1: Deformación del sensor TS13 debido a mantención.	56
Gráfico 5-2: Deformación del sensor TS11 en seis días, zona hundimiento.....	57

Gráfico 5-3: Deformación sensor TS12 para 6 días.	59
Gráfico 5-4: Deformación del sensor TS12 a finales de Octubre.....	59
Gráfico 5-5: Condiciones de borde para TS12 Eje Z, Octubre.	60
Gráfico 5-6: Distribución de Condición de Borde TS12 Eje Z (Octubre).....	60
Gráfico 5-7: Condiciones de borde para TS12 Eje Y, Octubre.	61
Gráfico 5-8: Distribución de Condición de Borde TS12 Eje Y (Octubre).	62
Gráfico 5-9: Deformación del sensor TS12 a finales de Noviembre.	63
Gráfico 5-10: Condiciones de borde para TS12 Eje Z, Noviembre.	63
Gráfico 5-11: Distribución de Condición de Borde TS12 Eje Z (Noviembre).	63
Gráfico 5-12: Condiciones de borde para TS12 Eje Y, Noviembre.	64
Gráfico 5-13: Distribución de Condición de Borde TS12 Eje Y (Noviembre).	65
Gráfico 5-14: Deformación del sensor TS12 a finales de Diciembre.....	66
Gráfico 5-15: Condiciones de borde para TS12 Eje Z, Diciembre.	66
Gráfico 5-16: Distribución de Condición de Borde TS12 Eje Z (Diciembre).....	66
Gráfico 5-17: Condiciones de borde para TS12 Eje Y, Diciembre.	67
Gráfico 5-18: Distribución de Condición de Borde TS12 Eje Y (Diciembre).	68
Gráfico 5-19: Deformación del sensor TS13 para 6 días.	69
Gráfico 5-20: Deformación del sensor TS13 a finales de Octubre.....	69
Gráfico 5-21: Condiciones de borde para TS13 Eje Z, Octubre.	70
Gráfico 5-22: Distribución de Condición de Borde TS13 Eje Z (Octubre).....	70
Gráfico 5-23: Condiciones de borde para TS13 Eje Y, Octubre.	71
Gráfico 5-24: Distribución de Condición de Borde TS13 Eje Y (Octubre).	71
Gráfico 5-25: Deformación del sensor TS12 antes de mantención, Noviembre.	72
Gráfico 5-26: Condiciones de borde para TS13 Eje Z, Noviembre (antes 13/11).	73
Gráfico 5-27: Distribución de Condición de Borde TS13 Eje Z (Noviembre antes 13/11).	73
Gráfico 5-28: Condiciones de borde para TS13 Eje Y, Noviembre (antes 13/11).....	74
Gráfico 5-29: Distribución de Condición de Borde TS13 Eje Y (Noviembre antes 13/11).....	74
Gráfico 5-30: Deformación del sensor TS12 a finales de Noviembre (reseteado 13/11).....	75

Gráfico 5-31: Condiciones de borde para TS13 Eje Z, Noviembre.	76
Gráfico 5-32: Distribución de Condición de Borde TS13 Eje Z (Noviembre después 13/11).	76
Gráfico 5-33: Condiciones de borde para TS13 Eje Y, Noviembre (después 13/11).	77
Gráfico 5-34: Distribución de Condición de Borde TS13 Eje Y (Noviembre después 13/11).	77
Gráfico 5-35: Deformación del sensor TS13 a finales de Diciembre.	78
Gráfico 5-36: Condiciones de borde para TS13 Eje Z, Diciembre.	79
Gráfico 5-37: Distribución de Condición de Borde TS13 Eje Z (Diciembre).	79
Gráfico 5-38: Condiciones de borde para TS13 Eje Y, Diciembre.	80
Gráfico 5-39: Distribución de Condición de Borde TS13 Eje Y (Diciembre).	80
Gráfico 5-40: Deformación del sensor TS14 para 6 días.	81
Gráfico 5-41: Deformación del sensor TS14 a finales de Octubre.	82
Gráfico 5-42: Condiciones de borde para TS14 Eje Z, Octubre.	82
Gráfico 5-43: Distribución de Condición de Borde TS14 Eje Z (Octubre).	83
Gráfico 5-44: Deformación del sensor TS14 a finales de Noviembre.	84
Gráfico 5-45: Condiciones de borde para TS14 Eje Z, Noviembre.	84
Gráfico 5-46: Distribución de Condición de Borde TS14 Eje Z (Noviembre).	85
Gráfico 5-47: Deformación del sensor TS14 a finales de Diciembre.	86
Gráfico 5-48: Condiciones de borde para TS14 Eje Z, Diciembre.	86
Gráfico 5-49: Distribución de Condición de Borde TS14 Eje Z (Diciembre).	87
Gráfico 5-50: Comparación datos terreno TS14 y datos de laboratorio Tipo I (35mm)	88
Gráfico 5-51: Posición de apoyos para desfase -5.	89
Gráfico 5-52: Posición de apoyos para desfase 5.	89
Gráfico A-1: Resultado para movimiento Tipo I.	96
Gráfico A-2: Resultado para movimiento Tipo II vertical.	97
Gráfico A-3: Resultado para movimiento Tipo II horizontal.	97
Gráfico A-4: Resultado para movimiento Tipo III.	98
Gráfico A-5: Resultado para movimiento Tipo 4, apoyo A.	99
Gráfico A-6: Resultado para movimiento Tipo IV, apoyo P1.	99

Gráfico B-1: Deformación del sensor TS12 a finales de Octubre, nivel producción.	100
Gráfico B-2: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS12 Eje Z (Octubre), nivel producción.	101
Gráfico B-3: Condiciones de borde para TS12 Eje Z (Octubre), nivel producción.	101
Gráfico B-4: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS12 Eje Y (Octubre), nivel producción.	102
Gráfico B-5: Condiciones de borde para TS12 Eje Y (Octubre), nivel producción.....	102
Gráfico B-6: Deformación del sensor TS12 a finales de Noviembre, nivel producción.....	103
Gráfico B-7: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS12 Eje Z (Noviembre), nivel producción.	103
Gráfico B-8: Condiciones de borde para TS12 Eje Z (Noviembre), nivel producción.	104
Gráfico B-9: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS12 Eje Y (Noviembre), nivel producción.	104
Gráfico B-10: Condiciones de borde para TS12 Eje Y (Noviembre), nivel producción.....	105
Gráfico B-11: Deformación del sensor TS13 a finales de Octubre, nivel producción.....	106
Gráfico B-12: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS13 Eje Z (Octubre), nivel producción.	106
Gráfico B-13: Condiciones de borde para TS13 Eje Z (Octubre), nivel producción.	106
Gráfico B-14: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS13 Eje Y (Octubre), nivel producción.	107
Gráfico B-15: Condiciones de borde para TS13 Eje Y (Octubre), nivel producción.....	107
Gráfico B-16: Deformación del sensor TS13 a finales de Noviembre, nivel producción.....	108
Gráfico B-17: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS13 Eje Z (Noviembre), nivel producción.	108
Gráfico B-18: Condiciones de borde para TS13 Eje Z (Noviembre), nivel producción.	109
Gráfico B-19: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS13 Eje Y (Noviembre), nivel producción.	109
Gráfico B-20: Condiciones de borde para TS13 Eje Y (Noviembre), nivel producción.....	110
Gráfico B-21: Deformación del sensor TS14 a finales de Octubre, nivel producción.....	110
Gráfico B-22: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS14 Eje Z (Octubre), nivel producción.	111

Gráfico B-23: Condiciones de borde para TS14 Eje Z (Octubre), nivel producción.	111
Gráfico B-24: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS14 Eje Y (Octubre), nivel producción.	112
Gráfico B-25: Condiciones de borde para TS14 Eje Y (Octubre), nivel producción.....	112
Gráfico B-26: Deformación del sensor TS14 a finales de Noviembre, nivel producción.....	113
Gráfico B-27: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS14 Eje Z (Noviembre), nivel producción.	113
Gráfico B-28: Condiciones de borde para TS14 Eje Z (Noviembre), nivel producción.	114
Gráfico B-29: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS14 Eje Y (Noviembre), nivel producción.	114
Gráfico B-30: Condiciones de borde para TS14 Eje Y (Noviembre), nivel producción.....	115
Gráfico B-31: Deformación del sensor TS14 a finales de Diciembre, nivel producción.....	115
Gráfico B-32: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS14 Eje Z (Diciembre), nivel producción.	116
Gráfico B-33: Condiciones de borde para TS14 Eje Z (Diciembre), nivel producción.	116
Gráfico B-34: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS14 Eje Y (Diciembre), nivel producción.	117
Gráfico B-35: Condiciones de borde para TS14 Eje Y (Diciembre), nivel producción.....	117

Índice de Tablas.

Tabla 2-1: Analizador BOTDR N8510, utilizado en terreno	18
Tabla 2-2: Parámetros del analizador BOTDR utilizado en laboratorio.	20
Tabla 2-3: Fechas de registro de datos (año 2009).....	21
Tabla 3-1: Definición de grados de libertad.	27
Tabla 3-2: Propiedades mecánicas PVC [17].	30
Tabla 3-3: Distancia entre apoyos de cada TS.	31
Tabla 3-4: Propiedades sección transversal.....	31
Tabla 3-5: Condiciones de borde utilizadas por la plataforma computacional.	36
Tabla 4-1: Tipos de desplazamiento en apoyos para datos de laboratorio.	41
Tabla 4-2: Orden de calles que pasa la fibra óptica en las distintas mediciones en terreno.....	42
Tabla 4-3: Tabla resumen de índices de error para cada regresión.	54
Tabla 5-1: Fibras utilizadas en el algoritmo para cada sensor.....	58
Tabla 5-2: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS12 Eje Z (Octubre).	61
Tabla 5-3: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS12 Eje Y (Octubre).	62
Tabla 5-4: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS12 Eje Z (Noviembre).	64
Tabla 5-5: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS12 Eje Y (Noviembre).....	65
Tabla 5-6: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS12 Eje Z (Diciembre)	67
Tabla 5-7: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS12 Eje Y (Diciembre).....	68
Tabla 5-8: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS13 Eje Z (Octubre).	70
Tabla 5-9: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS13 Eje Y (Octubre).....	72
Tabla 5-10: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS13 Eje Z (Noviembre antes 13/11).....	73
Tabla 5-11: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS13 Eje Y (Noviembre antes 13/11).....	75
Tabla 5-12: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS13 Eje Z (Noviembre después 13/11).	76

Tabla 5-13: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS13 Eje Y (Noviembre después 13/11).	78
Tabla 5-14: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS13 Eje Z (Diciembre).	79
Tabla 5-15: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS13 Eje Y (Diciembre).	81
Tabla 5-16: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS14 Eje Z (Octubre).	83
Tabla 5-17: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS14 Eje Z (Noviembre).	85
Tabla 5-18: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS14 Eje Z (Diciembre).	87
Tabla 5-19: Resumen de desplazamientos de sensores en hundimiento.	88
Tabla 5-20: Resumen de Sensibilidad para TS14, Condición de Borde 1.	89
Tabla A-1: Índices de errores mínimos y CB para distintos tipos de regresiones, Tipo I.	96
Tabla A-2: Índices de errores mínimos y CB para distintos tipos de regresiones, Tipo II V.	97
Tabla A-3: Índices de errores mínimos y CB para distintos tipos de regresiones, Tipo II H.	98
Tabla A-4: Índices de errores mínimos y CB para distintos tipos de regresiones, Tipo III.	98
Tabla A-5: Índices de errores mínimos y CB para distintos tipos de regresiones, Tipo IV.	99
Tabla B-1: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS12 Eje Z (Octubre), nivel producción	101
Tabla B-2: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS12 Eje Y (Octubre), nivel producción	102
Tabla B-3: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS12 Eje Z (Noviembre), nivel producción	104
Tabla B-4: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS12 Eje Y (Noviembre), nivel producción	105
Tabla B-5: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS13 Eje Z (Octubre), nivel producción	107
Tabla B-6: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS13 Eje Y (Octubre), nivel producción	108
Tabla B-7: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS13 Eje Z (Noviembre), nivel producción	109
Tabla B-8: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS13 Eje Y (Noviembre), nivel producción	110

Tabla B-9: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS14 Eje Z (Octubre), nivel producción	111
Tabla B-10: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS14 Eje Y (Octubre), nivel producción	112
Tabla B-11: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS14 Eje Z (Noviembre), nivel producción	114
Tabla B-12: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS14 Eje Y (Noviembre), nivel producción	115
Tabla B-13: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS14 Eje Z (Diciembre), nivel producción	116
Tabla B-14: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS14 Eje Y (Diciembre), nivel producción	117

1 INTRODUCCIÓN.

1.1 Motivación.

La minería es una de las actividades más importantes y atractivas en Chile, generando grandes inversiones para aumentar la producción, debido a la creciente demanda a nivel mundial. Ante esto, es crucial mantener la producción sin pausa o poder controlar los tiempos muertos para realizar las mantenciones correspondientes. Sin embargo, debido a imprevistos o accidentes en obra se debe detener la faena perjudicando tanto a la empresa como a los que trabajan en ella.

Por lo antes señalado, las empresas mineras invierten grandes cantidades de recursos en diseñar e implementar formas para mantener la operación segura, reduciendo el riesgo que tienen los trabajadores mineros al estar en el interior de una mina. Estos recursos se distribuyen, tanto en equipos de seguridad como monitoreo de las actividades, utilizando los últimos adelantos tecnológicos para reducir el grado de incertidumbre que involucra la minería. De todos los posibles accidentes que pueden ocurrir, uno de los más catastróficos es el derrumbamiento de túneles, principalmente por la fatalidad que puede llegar a tener para los trabajadores, por lo que es muy importante mantener un constante monitoreo de éstos.

Dentro de todo este margen de seguridad existen empresas que prestan servicios tecnológicos para solucionar diferentes problemas que se pueden presentar en los trabajos mineros. Una de estas empresas es MICOMO (Mining Information Communication and Monitoring), fundada en conjunto por Codelco Chile y la empresa japonesa NTT para presentar soluciones a las dificultades comunicacionales y de monitoreo en las minas ya sea a nivel nacional e internacional. Dentro de los servicios que destaca MICOMO se encuentran la creación de un sistema de comunicaciones inalámbricas IP de alta velocidad, WIPAS; implementación de tecnología fotónica AWG Star; monitoreo estructural BOTDR; Pronóstico y Monitoreo ambiental (PM10 y SO₂) [www.micomo.cl].

Con el objetivo de conocer el desplazamiento que tiene una falla ubicada en la mina “El Teniente” (situada en la comuna de Machalí, en la región Libertador Bernardo O’Higgins), se ha solicitado a MICOMO la construcción de sensores, su implementación y detección de los desplazamientos de roca al interior de la mina. Debido a la gran longitud y las características que tienen los túneles de la mina “El Teniente” se optó por innovar e implementar sensores de gran tamaño que permiten medir desplazamientos en grandes tramos a diferencia de varios sensores como los “strain gage” los cuales detectan deformaciones de corto tramo y que económicamente resultan inviables para el proyecto.

El conocimiento de los desplazamientos de la roca en un túnel es de gran importancia para conocer los sectores que presentan desplazamientos peligrosos y diseñar refuerzos acorde al riesgo asociado.

1.2 Mina “El Teniente”.

La división El Teniente, a ochenta kilómetros al sur de Santiago y a 2.500 metros sobre el nivel del mar, centra sus operaciones en la explotación de la mina subterránea de cobre más grande del mundo.

Esta mina que comenzó a ser explotada en 1904 posee 2.400 kilómetros de galerías subterráneas. El Teniente produce aproximadamente 403.000 toneladas métricas finas anuales de cobre en la forma de lingotes refinados a fuego (RAF), y cátodos de cobre al año. Como resultado del procesamiento del mineral también se obtienen alrededor de 5.000 toneladas métricas de molibdeno [16].

La mina “El Teniente” utiliza el método de explotación denominado hundimiento avanzado para la extracción de minerales. Este método permite un proceso continuo y controlado a través de puntos de extracción ubicados estratégicamente a lo largo de la mina. La remoción de material provoca vacíos que permitirán la subsidencia o colapso del material sobre ellos. A medida que se va extrayendo dicho material se van creando nuevos puntos de extracción, haciendo una propagación del efecto tanto vertical como horizontal.

El método consiste en una alteración a la roca intacta a través de tronaduras que se realizan desde las perforaciones sobre el nivel de extracción parcialmente desarrollado. Detrás de las zonas de relajación se desarrollan con anterioridad puntos de extracción, los cuales colectan el material. El proceso es esquematizado, según la Figura 1 mostrada a continuación:

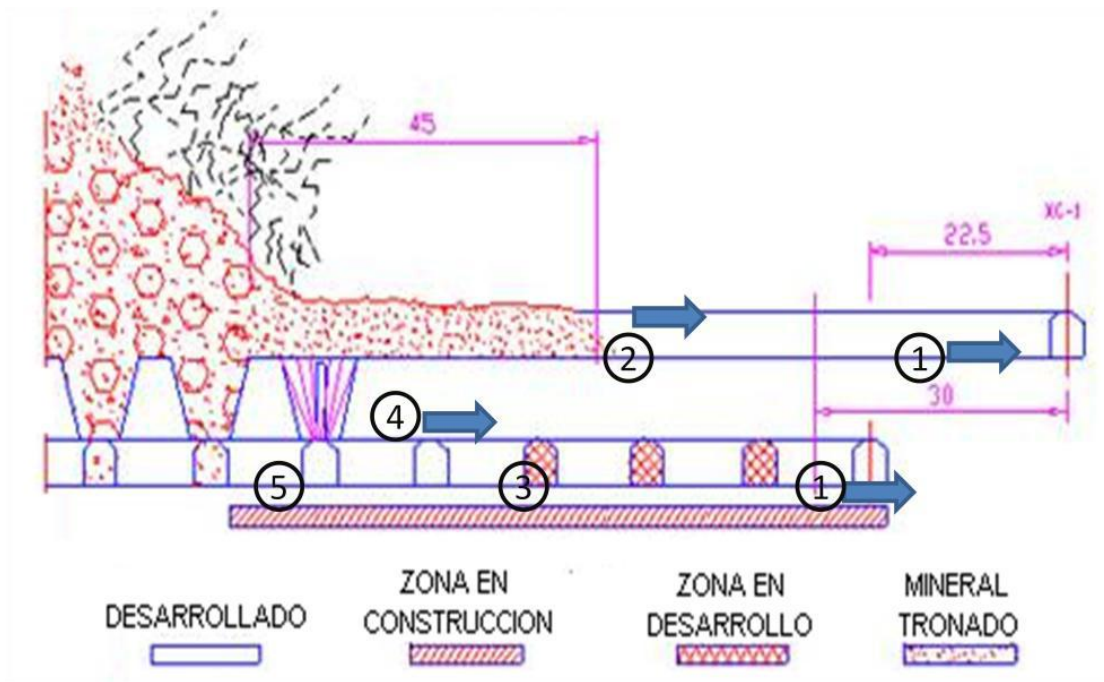


Figura 1-1: Secuencia de hundimiento avanzado (Jofré et al., 2000) [21].

El método empieza con la construcción de las calles de hundimiento y producción (1) de manera de preparar las tronaduras de socavación en la zona de hundimiento (2) hasta completar una cierta distancia con el futuro frente de extracción. Luego se prepara las calles del nivel de producción (3) para abrir ductos que conectan con el nivel de hundimiento llamados bateas (4) e iniciar la extracción del material (5).

Con el avance del frente se produce el desconfinamiento del macizo rocoso produciendo material quebrado (ver Figura 1-2) el cual es extraído por las bateas, que se encuentra rodeado del material a extraer. Como consecuencia, los esfuerzos, inicialmente en equilibrio, son conducidos alrededor de la cuña y de la losa hacia profundidades mayores

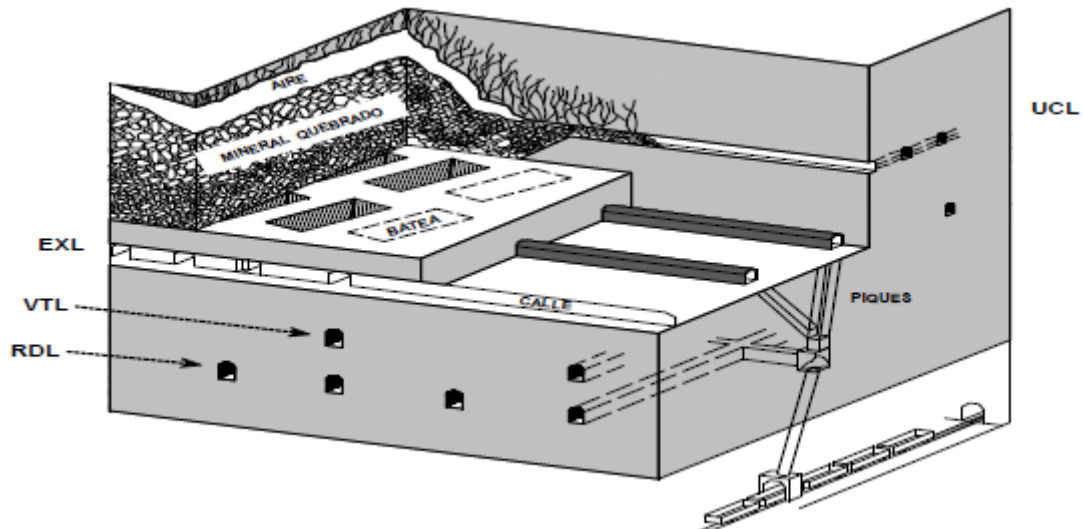


Figura 1-2: Vista isométrica del panel caving con hundimiento avanzado (Valdés 2009) [21].

Para tener éxito con la implementación del método es necesario tener controlados los desplazamientos que se producen como consecuencia del hundimiento, es por este motivo que se requiere constantemente estar monitoreando las distancias entre niveles, los puntos de extracción, direcciones del avance, tasas y geometría del hundimiento en todas direcciones.

1.3 Tecnología BOTDR.

El sistema BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) de medición de deformaciones se basa en la medición del corrimiento de la frecuencia característica Brillouin, retro-dispersada en el interior de una fibra óptica (ver Figura 1-3). El corrimiento de la frecuencia, en el límite elástico-lineal, es proporcional a la deformación experimentada en el punto donde se produce la dispersión al interior de la fibra. La fibra óptica puede ser deformada no solamente por la acción mecánica sobre ella, sino también por efectos de temperatura.

La deformación de la fibra ocurre solo en una dimensión y viene dado por la contracción o estiramiento que tenga la fibra óptica dependiendo de la fuerza aplicada y siguiendo la ley constitutiva de los materiales. El corrimiento de frecuencia ocurrido como consecuencia de la deformación es detectada por el analizador BOTDR, transformando la señal en una deformación axial.

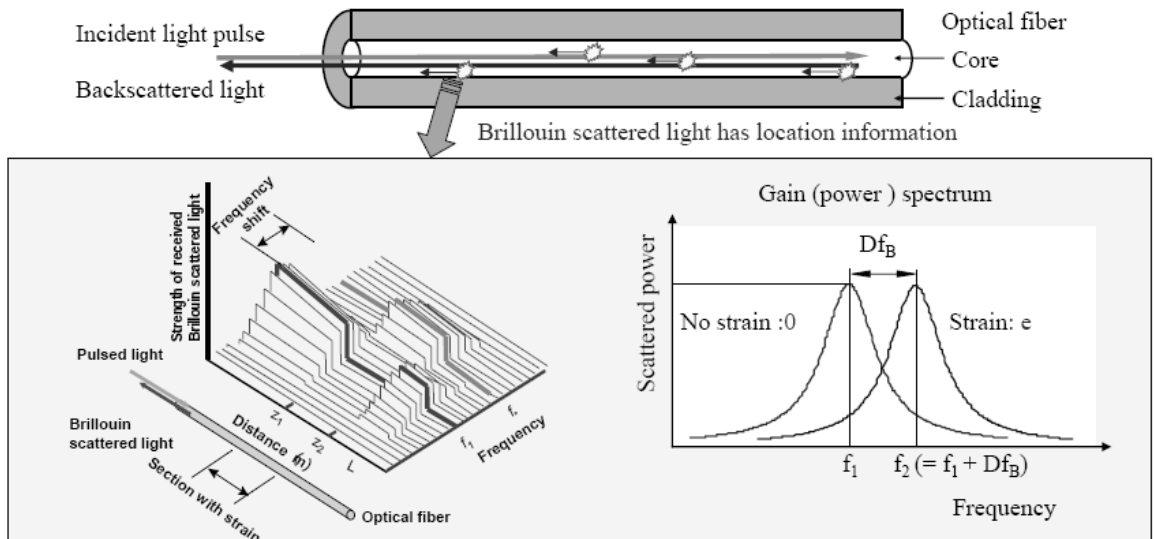


Figura 1-3: Principio de funcionamiento de la señal BOTDR (<http://www.picoloop.jp/category/1747073.html>).

El analizador BOTDR es un instrumento que envía un pulso de luz a través de una fibra monomodo, diseñada especialmente para el monitoreo de deformaciones. La señal Brillouin retrodispersada al interior de la fibra es recogida y analizada por el instrumento. Este instrumento es capaz de determinar la posición dónde se produce la dispersión midiendo el tiempo entre el envío del pulso de luz y el instante que recibe el pulso de vuelta. La resolución espacial del instrumento viene dado por el ancho del pulso (10 ns corresponde a un pulso de 1 metro de largo). Por otro lado, este instrumento puede almacenar la información cada 5, 10, 20, 50 cm según se requiera.

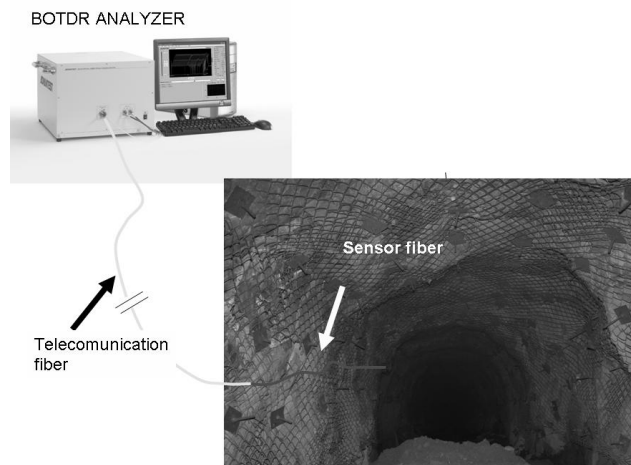


Figura 1-4: Esquema de conexión del analizador a una aplicación minera.

Hay ocasiones que la deformación de la fibra ocurre en tramos más cortos que la resolución espacial lo que provoca una diferencia considerable en la medición por parte del analizador. A estas deformaciones en tramos cortos se les llamará a lo largo del trabajo como deformaciones “bruscas” y que pueden generar errores adicionales en su medición. En los datos de terreno se trabajó con una resolución espacial de 1 metro.

1.4 Objetivos.

Los objetivos que se tienen para esta memoria se presentan a continuación:

Objetivo General

Desarrollar una plataforma computacional que permita estimar los desplazamientos del macizo rocoso mediante la utilización de deformaciones medidas por sensores fabricados a partir de fibra óptica.

Objetivos Específicos

- Modelación estructural de un sensor de desplazamiento compuesto por un tubo de PVC y fibra óptica.
- Generación de una base de datos con mediciones de deformaciones registradas por sensores de desplazamientos actualmente operativos en la mina El Teniente.
- Utilización de registros de la mina El Teniente y datos de laboratorio para validar el algoritmo computacional-estructural desarrollado para estimar desplazamientos a partir de registros de deformación.
- Poder estimar desplazamientos del túnel a partir del análisis de deformación del sensor.

1.5 Metodología.

Se realizó las siguientes etapas para cumplir con los objetivos propuestos:

1. Revisión bibliográfica

Se hizo una revisión bibliográfica de los siguientes temas:

- Funcionamiento de la detección de deformación a partir de señales BOTDR en la fibra óptica.
- Monitoreo de desplazamiento en diferentes estructuras.

2. Modelación estructural de sensor de desplazamiento

El sensor de desplazamiento es modelado como una viga continua de comportamiento elástico-lineal. El dato conocido son las deformaciones a lo largo de la viga en cuatro puntos de la sección transversal y a partir de esta información se estiman los desplazamientos en los apoyos de la viga que indujeron las deformaciones medidas. Este planteamiento genera un problema inverso ya que las condiciones de apoyo de la viga son desconocidas y la solución de éste se realiza mediante un proceso iterativo donde, con los mismos datos de deformación, se estiman los desplazamientos de los apoyos considerando diferentes condiciones de borde. Una vez que los desplazamientos de los apoyos de sensor son estimados, éstos se utilizan para calcular las deformaciones que inducen en el sensor considerándolo como una viga. Estas deformaciones se comparan con las deformaciones medidas en terreno. Las deformaciones estimadas que generen un menor error con las deformaciones medidas en terreno corresponde a la condición de borde más probable experimentada por el sensor.

3. Recolección de datos de la mina El Teniente

Datos serán obtenidos de la empresa MICOMO.

4. Utilización de un algoritmo computacional desarrollado datos del laboratorio para su validación.

El algoritmo computacional será validado con datos teóricos y de laboratorio. Con este algoritmo computacional se completa uno de los principales objetivos propuestos para la memoria.

5. Resultado de la aplicación de los datos de la mina “El Teniente” y movimiento detectado por el sensor en la falla.

Se utiliza datos de deformaciones medidas en terreno (punto 3) en el algoritmo computacional y se observará si los resultados obtenidos son coincidentes con lo observado en la mina (Falla N1).

1.6 Organización del trabajo.

En el capítulo uno se incluye una introducción de la minería en Chile, junto con los objetivos que se han propuesto en este trabajo además de la metodología que se utilizó para la creación de la presente memoria.

En el capítulo dos se recogen los antecedentes generales de la tecnología de fibra óptica, del sensor que se ha estado utilizando para la recolección de datos en la mina y su funcionamiento. Además se describe los datos que se obtuvieron tanto en terreno como en el laboratorio.

En el capítulo tres se explica la modelación estructural del sensor de desplazamiento, junto con el desarrollo de la plataforma numérica para la estimación de desplazamientos. Para el análisis se utilizan rutinas escritas en lenguaje MATLAB.

En el capítulo cuatro se describen los datos de deformación que se introducen en el algoritmo y la implementación numérica del modelo, tanto para datos teóricos como de laboratorio para su validación.

El capítulo cinco se muestran los resultados obtenidos al introducir los datos de terreno con un análisis del desplazamiento de la falla N1.

Finalmente en el capítulo seis se da a conocer las conclusiones en base a los objetivos trazados y comentarios finales que se llega considerando los resultados expuestos a lo largo de todos los capítulos. Además se plantean posibles mejoras y propuestas para futuras investigaciones.

2 ANTECEDENTES GENERALES.

2.1 Discusión Bibliográfica de sensores BOTDR.

Es importante obtener mediciones de deformaciones en estructuras, sin embargo esta tarea no es fácil ya que el sensor debe cumplir con diferentes exigencias de sensibilidad, transmisión de datos y viabilidad al instalarse en terreno. El sensor más utilizado para medir deformaciones puntuales en un elemento estructural es el “strain gage” que consiste en una variación de voltaje que cambia según la deformación que detecte el sensor. A medida que avanza la tecnología, se requiere de nuevos sensores que permitan detectar deformaciones en tiempo real y a lo largo de kilómetros de manera continua [11]. Los sensores de fibra óptica son una alternativa válida con grandes ventajas en el monitoreo de deformaciones en estructuras como lo explicaron varios autores ([2], [3], [8], [9], [11]). Estos autores verifican las ventajas de usar fibra óptica, en especial una dispersión “Brillouin”, Kim (2002) llegó a la conclusión que estos sensores son adecuados para la medición de estructuras largas [8], asunto planteado anteriormente por Bao (1995) al detectar deformaciones con un sensor distribuido “Brillouin” a 51 kilómetros de distancia [1]. Esta tecnología de fibra óptica ya se venía estudiando desde algún tiempo y se ha ido minimizando el error con trabajos como el de Kim (2002) donde propone un método de compensación para el rango final de la medición lo que ayuda a obtener una medida más certera [8] siendo cada vez una opción real al “strain-gage”, además concluyó que para obtener un error bajo de medición se debe tener un espectro de resolución mayor que el rango de medición con dispersión “Brillouin”. Una conclusión similar llega Bernini (2007) quien asegura que los sensores que utilizan la señal BOTDR pueden detectar la magnitud de las deformaciones como también la ubicación de la dislocación del haz de luz, validando además su uso para grandes distancias [3].

Existen dos técnicas de medición “Brillouin” que Heriguchi (1989) presenta en su trabajo, el sistema BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer), utilizado en todas las mediciones, y el sistema BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) [5]. La Figura 2-1 (a) corresponde al modo de detección coherente, en donde un pulso de luz recorre la fibra generando una señal retrodispersada a causa de la deformación de la fibra, la cual es recogida por un receptor, esto permite una mayor sensibilidad solo limitada por el ruido. En cambio el método (b) muestra un pulso de luz y una onda continua (cw) ubicados en los extremos de la fibra óptica, de esta manera cuando la diferencia de frecuencia que se produce entre el pulso y cw es sincronizado con el cambio de frecuencia Brillouin de la fibra hace que se estimule el proceso de retrodispersión generando una mayor intensidad [5].

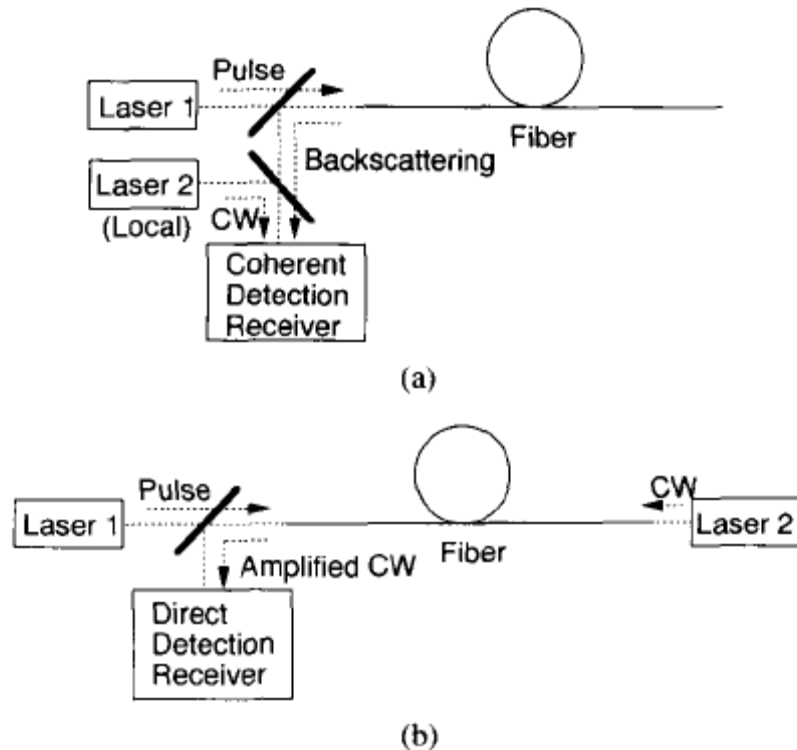


Figura 2-1: (a) Método de detección coherente (b) Método de onda retropropagada (Heriguchi et al. (1995)).

Con una deformación de la fibra (ε), se produce un corrimiento del espectro de frecuencia Brillouin (v_B):

$$v_B = \frac{2nV_a}{\lambda}$$

Donde n es el índice de refracción, V_a la velocidad del sonido y λ la longitud de onda de la luz. Se ha encontrado que v_B varía linealmente con pequeñas deformaciones, es decir, menores al 2% (Heriguchi et al. (1995)):

$$v_B(\varepsilon) = v_B(0)[1 + C_s * \varepsilon]$$

$$v_B(t) = v_B(t_r)[1 + C_t * (t - t_r)]$$

Donde ε es la deformación axial, t es temperatura y t_r es temperatura referencial. Las constantes fueron determinadas y calculadas como $C_s = 4.6$ y $C_t = 9.4 * 10^{-5} \text{ K}$. (Heriguchi et al. (1989))

Una de las ventajas que tiene la dispersión Brillouin es lograr transmitir mediciones simultáneas en un solo canal de transmisión, mencionado por Kim (2002), pudiendo medir una deformación de aproximadamente $20 \mu\varepsilon^\circ\text{C}^{-1}$ [8]. Bao (1995 y 2001) también realizó mediciones de temperatura y logró modelar un comportamiento básico del sistema [1] [2], pero no pudo calibrar

bien los parámetros de su modelo. Pozzi (2008) llega a un coeficiente térmico del sensor de $2\mu\epsilon^{\circ}\text{C}^{-1}$ considerándolo despreciable [10].

En los túneles, es muy importante conocer los desplazamientos de roca para la seguridad de las faenas que se realizan en su interior y para esto se propone el analizador BOTDR. Bao (2001) describe un método de detección continua que emplea un impulso de luz como señal de bombeo (BOTDR), consiguiendo una medida distribuida a lo largo de la fibra y demostró que al utilizar mediciones continuas y de trayectos grandes [2]. Con esta investigación se abrió una amplia gama de aplicaciones además del área estructural que ya se venía haciendo por parte de DeMerchant (1999) monitoreando el comportamiento de una viga cantiléver [4].

El uso de BOTDR presenta características especiales para determinar deformaciones en tuberías, por esta razón que diferentes autores tuvieron resultados esperados [8] [11] [13]. Ravet (2006), quien usó por primera vez el sistema BOTDR para monitorear las deformaciones que se producían en un tubo de acero y en columnas, pudiendo detectar el pandeo antes que su manifestación visual [11]. También se logra llevar un monitoreo de la deformación de los tubos para detectar los elementos críticos que podrían disminuir el rendimiento del BOTDR y aplicando un mejoramiento, capturaron datos a 110 Km de distancia [13], casi el doble del que había detectado Bao (1995) en su momento [1].

A pesar de todas las ventajas que presentan los diferentes autores, se concluye que la fibra óptica no es precisa al momento de detectar deformaciones abruptas y conlleva a errores altos en medición y ubicación [8], además de ser muy dependiente de la temperatura [1] lo que lo hace limitado en ciertas circunstancias. Bernini (2007) detectó una pérdida de lectura de deformación desde un tubo a la fibra, atribuyéndoselo a la pérdida de rigidez por parte del pegamento empleado y al grosor de la silicona que protege la fibra [3]. A pesar de las complicaciones que tiene trabajar con fibra óptica, aún es una tecnología que requiere de mucha investigación la que irá perfeccionando los métodos de detección de deformaciones.

2.2 Datos generales

Codelco en su afán de incrementar la seguridad de su personal que opera en minería subterránea ha probado con nuevas tecnologías instalando a lo largo de varios sectores de la mina “El Teniente” kilómetros de fibra óptica con el objetivo de establecer la viabilidad de su uso como sensor de deformaciones en minería. Todos los sensores son instalados en la reserva norte (ReNo), y se instrumentan desde los pernos de anclajes, columnas, tiros y fallas geológicas presentes en el lugar. Para CODELCO es de suma importancia tener controlados las deformaciones de los túneles debido al tipo de explotación que se realiza en la mina, el método de hundimiento, que consiste en dejar una zona superior de la mina que (como su nombre lo indica) se va hundiendo poco a poco hasta llegar a colapsos controlados. Para poder tener el control del hundimiento a medida que se excava se dejan pilares sin excavar las que sirven de apoyo para el nivel y se va avanzando en el frente de la mina. Una vez colapsada, se recogen los restos y se envían a los niveles inferiores (Nivel Producción y Nivel de Ventilación) en donde

será chancado y transportado al exterior de la mina. La zona de colapso se denomina frente de socavación y es un sector peligroso debido a la alta inestabilidad presente, resultando esencial detectar con anterioridad las señales que envía la roca (microsisimos generados por la fractura a altas presiones y que actúa como alerta temprana) cuando está sometida a deformación plástica o altas tensiones. Por este motivo se tiene una red sismográfica al interior de la mina, lo que permite detectar sismos locales y seguimientos visuales a deformaciones visuales a pilares colindantes del frente de socavación para prevenir los estallidos de rocas (altas acumulaciones de tensiones en la roca que se liberan súbitamente) y la fluencia lenta del túnel o squeezing (disminución del área transversal del túnel que puede generar colapsos o impedimento del paso de maquinaria).

La “FALLA N1” fué instrumentada para observar su evolución en el tiempo de 3 meses. Las posibles fallas que puede presentar esta zona debido a la cercanía del frente de socavación son los potenciales deslizamientos de bloques y cuñas como las observadas en la Figura 2-2 como (a) y (b), concentración de cargas y deformación en pilares.

Los sensores con los que se trabaja a lo largo de la presente memoria se les llamarán TS (Tube Sensor) y están diseñados para detectar desplazamientos en largos tramos. Por este motivo se instrumenta la falla geológica denominado “FALLA N1” (Figura 2-3), en donde se instalaron a lo largo de ésta en forma perpendicular para medir su movimiento en los tres niveles de la mina (Hundimiento, Producción y Ventilación) y poder estimar el tipo falla a la que puede estar sujeta la zona.

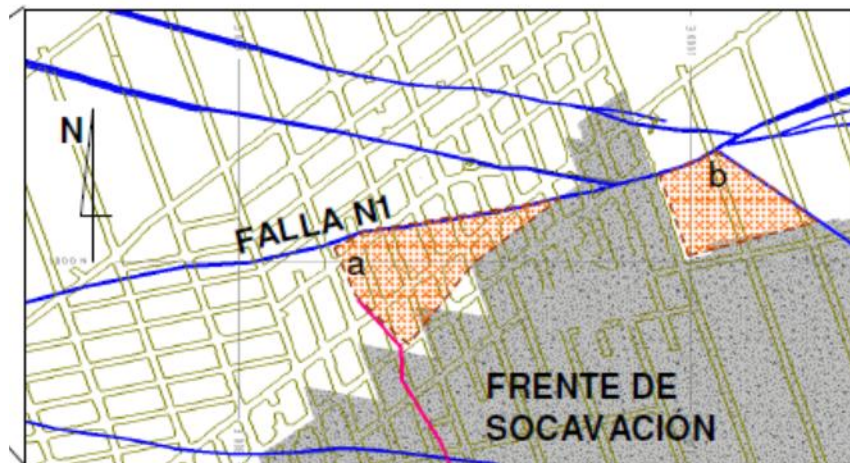


Figura 2-2: Plano Reserva Norte (RENO) con frente de socavación.

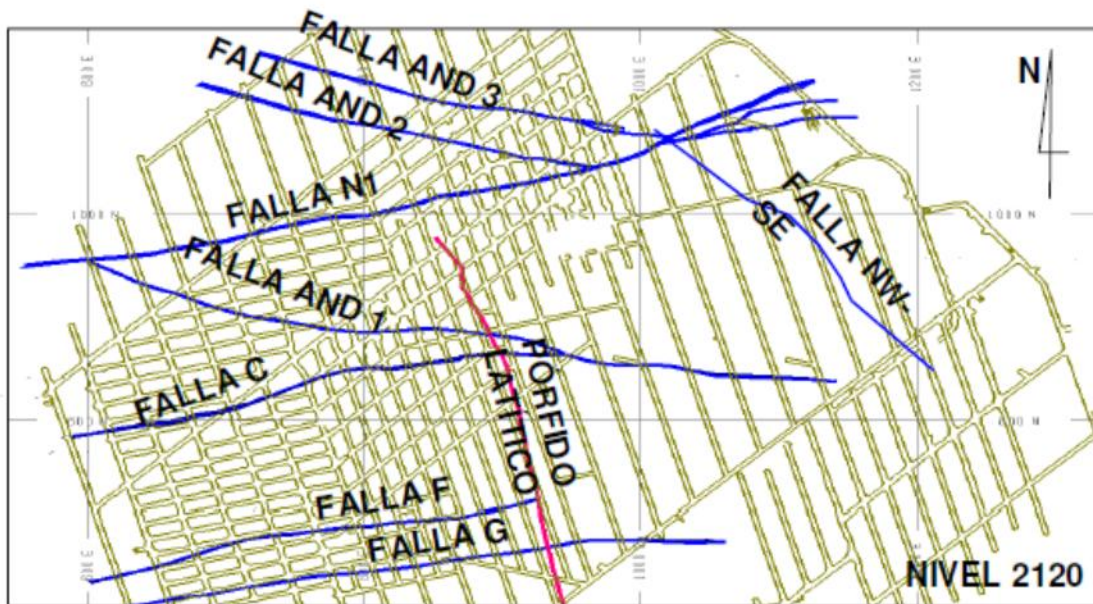


Figura 2-3: Plano RENO con sus principales fallas geológicas.

2.3 Descripción del sensor.

El sensor que se utilizó para el seguimiento del desplazamiento de la falla es llamado “Tube Sensor” o TS. Este sensor tiene la particularidad de detectar movimientos en dos dimensiones de forma simultánea, siendo una herramienta útil para describir el comportamiento de un plano de falla si no se sabe cómo se desplazará.

El sensor TS tiene las siguientes partes como se observa en la siguiente imagen:

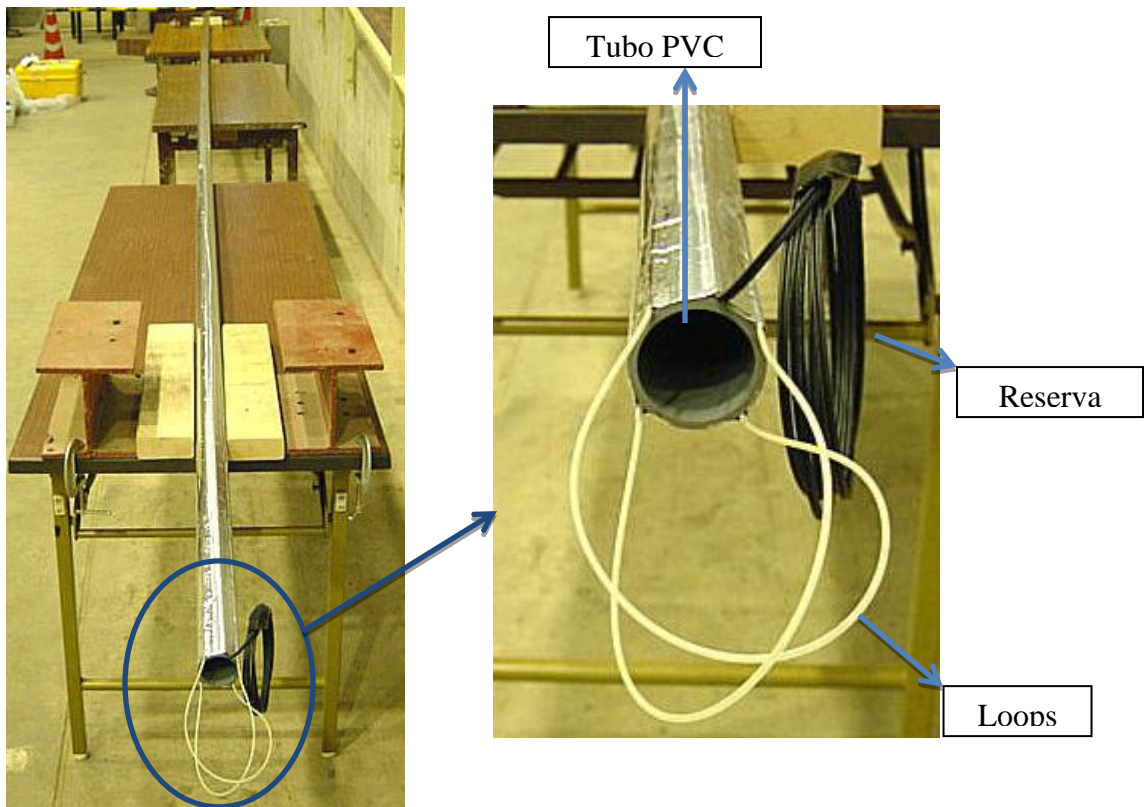


Figura 2-4: Componentes de un TS

Un TS consiste en un tubo de PVC de diámetro y largo variable, con la particularidad de que en el exterior se le pega fibra óptica tensada. Esta fibra tiene que ser continua y pasar por diferentes lados del tubo (mínimo tres) para que pueda detectar las deformaciones al que puede estar sometido. Los TS que se utilizaron en la mina El Teniente tienen las dimensiones de 5 metros de largo, con un diámetro exterior de 40 milímetros y espesor de 3 milímetros.

Para la construcción, primero se debe unir diferentes partes del tubo (lo más común es utilizar un sistema enroscado) si es que está dividido en dos o más partes.

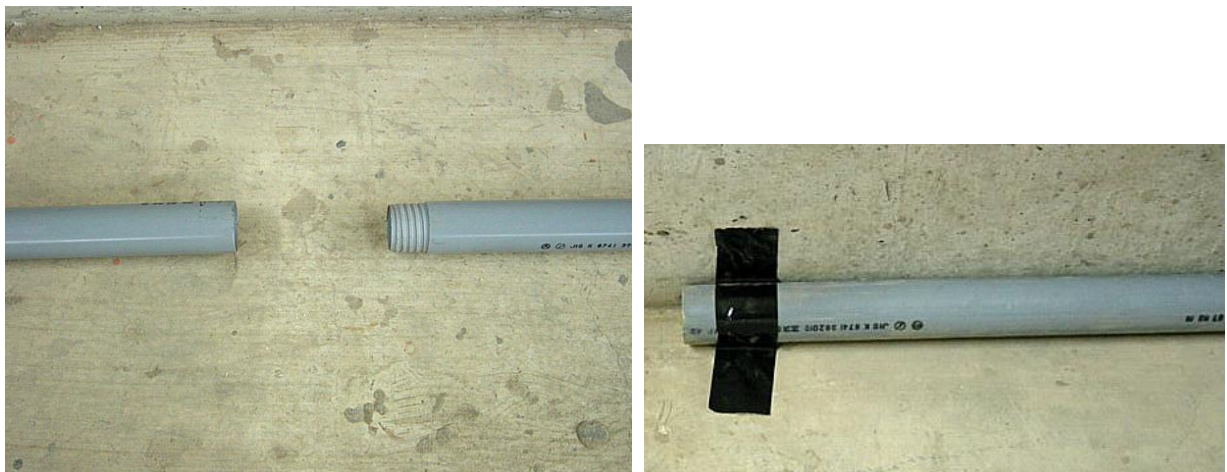


Figura 2-5: Enroscado y fijado del tubo.

Una vez unido el tubo se deja a lo largo de un muro recto y se sujetan los extremos con cinta adhesiva para evitar el giro o movimiento del tubo.

Luego se marca una línea base paralela al eje central con un marcador y cada marca separada en aproximadamente 50 centímetros. Para marcar la distancia que se desea entre fibras (en este caso van a ser cuatro) se marca una hilera de papel de largo igual al diámetro del tubo y se marcan cada cuarto, después se recorre todas las marcas del eje central para marcar cada cuarto del tubo. Después de marcar todos los puntos, se limpia el exterior y se deja fijo el tubo para pegar la fibra.

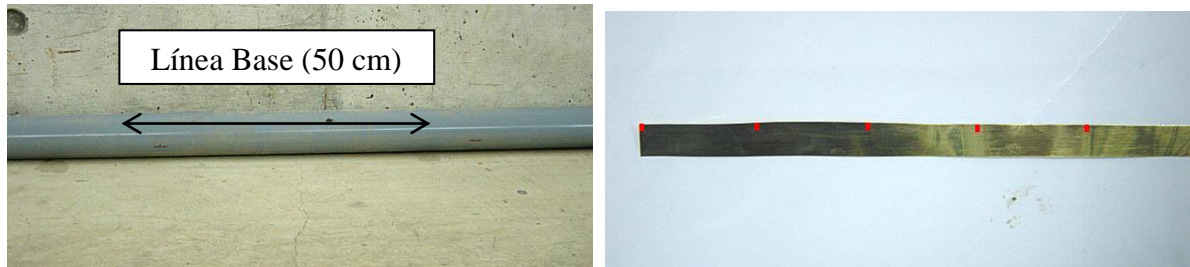


Figura 2-6: Marcado del tubo

Se mide la fibra óptica de tal manera de marcar los puntos donde llegará a los extremos del tubo y la cantidad de reserva que se dejará para los loops que se forman cuando se pasa de una cara a otra.

Finalmente se pega la fibra con una pequeña tensión a lo largo de las marcas con un pegamento, luego se agrega una resina epóxica y con una cinta adhesiva se cubre para protegerla.





Figura 2-7: Pegado de la fibra óptica

La fibra óptica es muy sensible ante deformaciones, golpes o cambios de temperatura, por lo que todas las protecciones antes mostradas se deben colocar con extrema precaución para no modificar la posición de la fibra y de no dejar un sector sin el contacto con el tubo ya que induce a errores en las mediciones.

Cuando se desea conectar un TS a una red de fibra óptica es necesario unir los filamentos y utilizar el mismo procedimiento que se ha explicado para cuidar la fibra óptica de la red.

2.4 Instalación en terreno.

La instalación de los sensores en la mina se realizó de acuerdo al siguiente protocolo implementado por MICOMO:

- a) Demarcación de tiros: Se debe marcar con pintura spray los lugares donde se realizaran las perforaciones para instalar los pernos de sensor TS. Estas marcas deben tener una distribución lineal aproximadamente desde 1 m hasta 1,40 m de separación.
- b) Perforaciones: Según procedimiento habitual, se realizan las perforaciones que tienen profundidad de 1m y 36mm de diámetro
- c) Instalación y lechado de pernos: Se perfora e instala los pernos de 1.20 m de largo y 22 mm de diámetro, dejando 1 m del perno en la roca y los 20 cm restantes quedan sobresaliendo en la superficie para instalar el soporte del sensor TS.
- d) Instalación de soportes en pernos: Se instalan soportes en pernos de fortificación.
- e) Instalación de sensor TS en soportes: Se instala sensor TS en soportes, este debe quedar instalado con fibra sensora de entrada de sensor TS hacia abajo (quedando en ranura de plancha del soporte), posteriormente se instala abrazadera con sus correspondientes pernos y tuercas.



Figura 2-8: Fotos de sensores TS en la mina (MICOMO).

f) Fusión de fibra óptica: Se debe fusionar la fibra óptica de acercamiento con la fibra óptica principal de manera de dar conectividad al circuito.

g) Pruebas de conectividad: Se realiza pruebas de continuidad y pérdidas al circuito.

2.5 Funcionamiento del sensor

El funcionamiento de los sensores TS se basan en la tracción o compresión de la fibra pegada en el exterior para permitir la deformación del tubo. Para esto el TS debe estar conectado a un analizador BOTDR, aparato que permite monitorear la posición y la deformación de la fibra mediante la señal de luz que envía logrando detectar esfuerzos corte y momento.

El analizador BOTDR es un equipo sofisticado traído desde Japón por la empresa de telecomunicaciones NTT. El analizador BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) manda la señal por la fibra óptica y recopila información de deformación y temperatura.

Debido a que pueden ser muchas las mediciones que se tienen que hacer, las grandes cantidades de metros lineales de fibra óptica que se utiliza y por un mejor manejo de datos es que se crean distintos circuitos cerrados (empiezan y terminan en el analizador BOTDR), llamados canales o channels, en donde se tiene ciertos sets de sensores o zonas del túnel asociadas a cada circuito. Para poder cambiar el canal donde se envía la señal BOTDR a los diferentes circuitos se utiliza un aparato llamado “switch” que permite mandar la señal del BOTDR a distintos canales que están conectados, así la señal es enviada a cada canal y es recibida por un receptor que detecta las refracciones de la señal y su ubicación. El error asociado a la detección de deformación del sensor es de un $\pm 0.01\%$.

Para más detalles del Analizador Advantest N8510, empleado en las lecturas de El Teniente, referirse a la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Analizador BOTDR N8510, utilizado en terreno

Medición	Distribución espacial de deformaciones, espectro de dispersión Brillouin, distribución de pérdidas de dispersión Brillouin
Muestreo	Max 100,000 puntos
Resolución de medición de frecuencia	1, 2, 5, 10, 20 y 50 MHz
Promedio de tiempo disponible	$2^{10} \sim 2^{24}$
Unidades de deformación	$\mu\epsilon$, %
Longitud de onda	Banda 1.55 μm
Rango de medición de deformaciones (1)	$100\mu\epsilon \sim 15000\mu\epsilon$
Repetibilidad (2)	$< \pm 100\mu\epsilon$
Linealidad (3)	$\pm 4 \times 10^{-3}$
Ancho de pulso	10, 20, 50, 100 y 200 ns
Rango dinámico (4)	3.5, 7.5, 11.5, 14.5 y 16.5 dB
Precisión en distancia	$\pm (5.0 \times 10^{-5} \times \text{Distancia (m)} + 0.2 \text{ (m)} + 2 \times \text{resolución de lectura (m)})$
Conector óptico	FC/APC (pulido angular).
Clase de laser	Clase 1 (IEC60825-1:2001)
AC Power	AC100V-AC120V、50Hz/60Hz, AC220V- AC240V、50Hz/60Hz (Universal)
Dimensiones	Aprox. 430(W) X 310(H) X 500(D) mm
Peso	Aprox 29 kg
Condiciones de operación	Temperatura +10 ~ +40C, humedad 85% o menor
Condiciones de almacenamiento	Temperatura 0 ~ +50C, humedad 85% o menor

(1) A SMF1.3 μm (ITU-T G.652)

(2) Con 2^{14} promedios temporales, un paso de frecuencia de 5MHz, SMF (ITU-T G.652) para 10 mediciones consecutivas de deformaciones de la desviación estándar.

(3) Con 2^{14} promedios temporales, un paso de frecuencia de 5MHz, SMF (ITU-T G.652) se mide deformación lineal sin cambio en el comportamiento de la fibra

(4) Con 2^{14} promedios temporales, un paso de frecuencia de 5MHz, SMF (ITU-T G.652), repetibilidad menor a $\pm 100\mu\epsilon$.

El analizador es conectado al switch fotónico de manera de alternar secuencialmente la medición en distintos circuitos utilizando el mismo analizador. Por ejemplo, El analizador instalado en el Teniente, monitorea 12 canales, para 6 aplicaciones distintas, tomando una lectura con la siguiente en un intervalo aproximado de 4 horas.

2.6 Descripción de los datos de laboratorio.

Los sensores TS fueron sometidos a diferentes ensayos a flexión por petición de MICOMO para constatar la detección de deformación. Estos ensayos consistieron en ver las lecturas de las mediciones del TS para desplazamientos controlados en los apoyos del sensor, para ello se realizaron varios experimentos con sensores de iguales características que los instalados en la mina “El Teniente” como también otros con diámetros inferiores y comparaciones con sensores strain gage los que no fueron considerados en el presente trabajo.



Figura 2-9: Montaje del ensayo en el laboratorio.

Estos sensores fueron conectados a un analizador BOTDR, el que fue provisto por MICOMO,. Además del analizador BOTDR se utilizó un computador con un programa proporcionado por MICOMO para toma de lectura de datos y su almacenamiento. Los datos que se utilizaron fueron organizados, procesados y entregados en tablas Excel, donde se entregaron gráficos con las deformaciones para diferentes magnitudes, deformación neta, la ubicación aproximada de los apoyos y la lista de datos capturados por el computador.



Figura 2-10: Esquema del sensor TS en laboratorio.

Se hicieron cuatro tipos de desplazamientos en los apoyos con el fin de poder deformar los cuatro tramos de fibra óptica unidos al sensor TS y estos son:

TIPO I: Desplazamiento vertical para el apoyo P1.

TIPO II: Desplazamiento horizontal y vertical del apoyo P1.

TIPO III: Desplazamiento horizontal de P1.

TIPO IV: Desplazamiento vertical de A y P1.

Los gráficos que se entregan son de Distancia (centímetros) vs Strain (Deformación porcentual) y además se señala esquemáticamente en los gráficos los apoyos y los tramos del TS.

Se realizaron diferentes variaciones a los experimentos que se realizaron, variando las magnitudes de desplazamientos en los apoyos, diámetros del tubo de PVC y comparando dos sensores distintos (fibra óptica y strain gage), pero los datos ocupados en este trabajo son las lecturas del tubo de 40 mm mediante fibra óptica.

Las características del analizador utilizado para estos experimentos son las siguientes:

Tabla 2-2: Parámetros del analizador BOTDR utilizado en laboratorio.

DISTANCE RANGE	1 KM
Pulse Width	10 ns
Index	1.48
Average Number	2 ¹⁴
Sampling Number	20000
Sampling Resolution	0.05 m
Center	0.506757 km
Width	1.01351 km
Output Power	MID
Start_Freq	10.75 GHz
Stop_Freq	11.44 GHz
Step_Freq	10 MHz
Step_Counts	70
Step_End_Counts	70
Newb0 Mode	Settings
Filter	FALSE
Strain Unit	%
Newb(0)	10.85 GHz
Strain Coef	4.78
Wave Length	1550 nm

2.7 Descripción de los datos en terreno.

El analizador BOTDR entrega los datos en forma de espectro, es decir, mide la frecuencia de la señal y su variación a lo largo de todo el trayecto del canal. Con este dato se observa el corrimiento que tiene la frecuencia Brillouin (ν_B) debido a la deformación de la fibra y a través de parámetros entregados por el fabricante, se obtiene la deformación acumulado de la fibra.

Se tuvo acceso a la base de datos que tiene MICOMO en su oficina central y se descargaron los datos que se encontraron disponibles.

Los datos recopilados de MICOMO datan según la siguiente tabla:

Tabla 2-3: Fechas de registro de datos (año 2009).

Zona	Canal	Fecha inicio	Fecha término
Hundimiento	9	01-Oct	31-Dic
	10	01-Oct	31-Dic
Producción	7	01-Oct	31-Dic
	8	01-Oct	31-Dic
Ventilación	11	27-Oct	31-Dic
	12	27-Oct	31-Dic

Cada dato que se descargó del servidor de MICOMO tiene un set de cinco archivos en formato .CSV y encriptados, que muestran los valores que se leyeron para ese día-hora en un formato de texto y en un formato de planilla, las pérdidas de intensidad promedio junto con las de peaks de la fibra óptica y además con datos restimado, en que se utilizó un algoritmo que permite disminuir el ruido y discriminar cuando dos peaks en el espectro de frecuencia se encuentran muy cerca (el analizador BOTDR no detecta de buena manera dos peaks muy juntos en el espectro).

En resumen cada dato que se obtiene debería tener:

- El archivo con los datos en formato texto (.std)
- Planilla en OpenOffice (.csv)
- Pérdida de intensidad en los peaks (.csv)
- Pérdida de intensidad promedio (.csv)
- Datos restimados (.csv)

El primer archivo (.std) contiene toda la información, mientras que los demás archivos son textos para visualizar la información en gráficos.

Los datos rescatados de los servidores de MICOMO entregan la deformación porcentual (donde el valor positivo entrega una tracción de la fibra) a lo largo de toda la fibra, esto incluye, desde la salida del analizador BOTDR, pasando por los respectivos sensores hasta llegar de vuelta al analizador BOTDR. Esta distancia por lo general tiene alrededor de 3 kilómetros, comparando los 20 metros que utiliza el TS y los 10 metros que usa otro tipo de sensor de fibra óptica llamado IC-LOCK (que no será incluido en el presente trabajo) hace difícil ubicar el punto donde se empieza los datos medibles.

Para poder distinguir los sensores, se utilizan acumulaciones de fibra llamadas “reservas” las que marcan el inicio de datos utilizables de los demás datos inservibles y además proporcionan

material provisorio en caso de algún acontecimiento que requiera corte de fibra. Estas reservas hacen que el grafico que se obtiene se desplace notoriamente con respecto a las demás mediciones de fibra, permitiendo encontrar a simple vista los sectores donde están los instrumentos. Además, como medida adicional, se duplicó las mediciones para los sensores IC-LOCK, , como se observa en el GRÁFICO 2-1, donde IC-LOCK (1) y (2) son el mismo sensor.

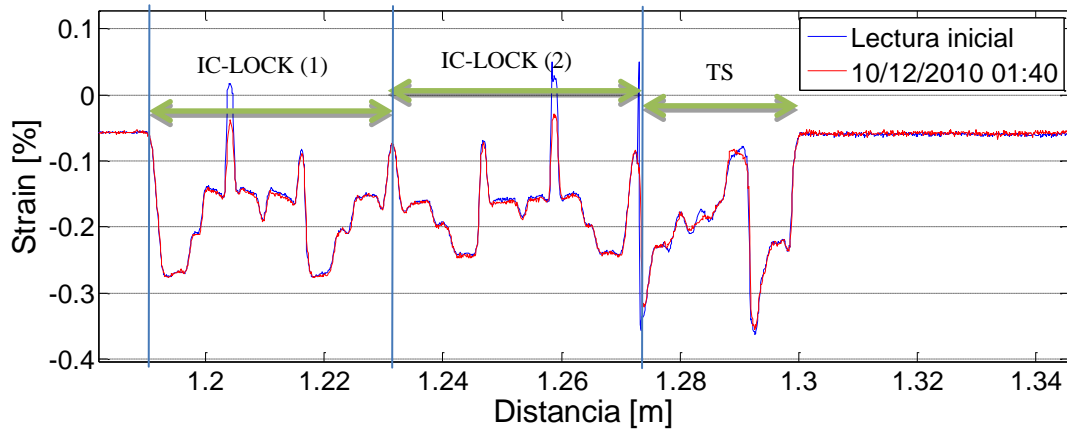


Gráfico 2-1: Redundancia de lectura IC-LOCK

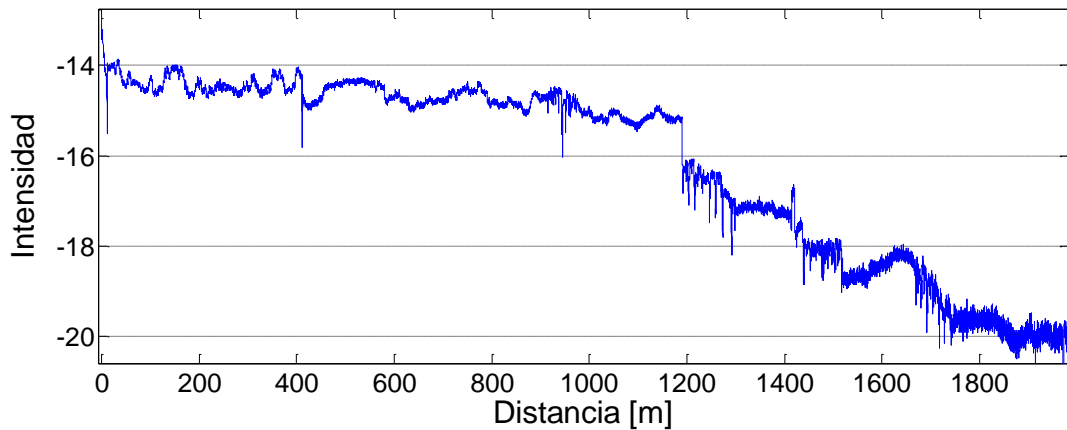


Gráfico 2-2: Pérdida de Intensidad de los Peaks para 11/25 01:40 CH9 Hundimiento.

Un problema que se encontró en los datos de diciembre de todos los niveles es el desfase existente, es decir, hay un corrimiento de la señal tanto en el eje X y/o en el eje Y. Este desplazamiento de mediciones se debe principalmente a la mantención que se le hizo al analizador BOTDR o a reparaciones por cortes o malas lecturas que se produjeron en la fibra óptica debido al constante movimiento de máquinas pesadas. Ante esta situación se tuvo que hacer un proceso de encaje para todos los gráficos del mismo nivel y para ello se procedió a calzar el desfase con su anterior lectura correcta. Los datos son tomados cada 4 horas, siendo un tiempo corto para que existiera una gran diferencia entre deformaciones.

A continuación se dará a conocer observaciones puntuales que se notaron al momento de procesar los gráficos:

- En los tramos finales de cada lectura se va perdiendo nitidez en los datos.
- La zona de ventilación presenta mediciones deficientes y por lo tanto no se trabaja con esos datos.
- Alrededor de la fecha 22/12/2009 se le hizo una mantención al circuito lo que generó como consecuencia que los datos medidos tuvieran un desplazamiento tanto en el eje X como en el eje Y. La corrección se hizo bajo el criterio de superponer los tramos rectos, donde no hay sensores.
- Los datos de los últimos días de Diciembre para todos los TS de todas las zonas presentan mucho ruido por lo que se descartaron para el análisis.

2.8 Ubicación de los sensores.

La ubicación de las calles y las conexiones en que se ubican los sensores está dada por la Figura 2-11.



Figura 2-11: Ubicación de los sensores TS nivel hundimiento.



Figura 2-12: Ubicación de los sensores TS nivel Producción

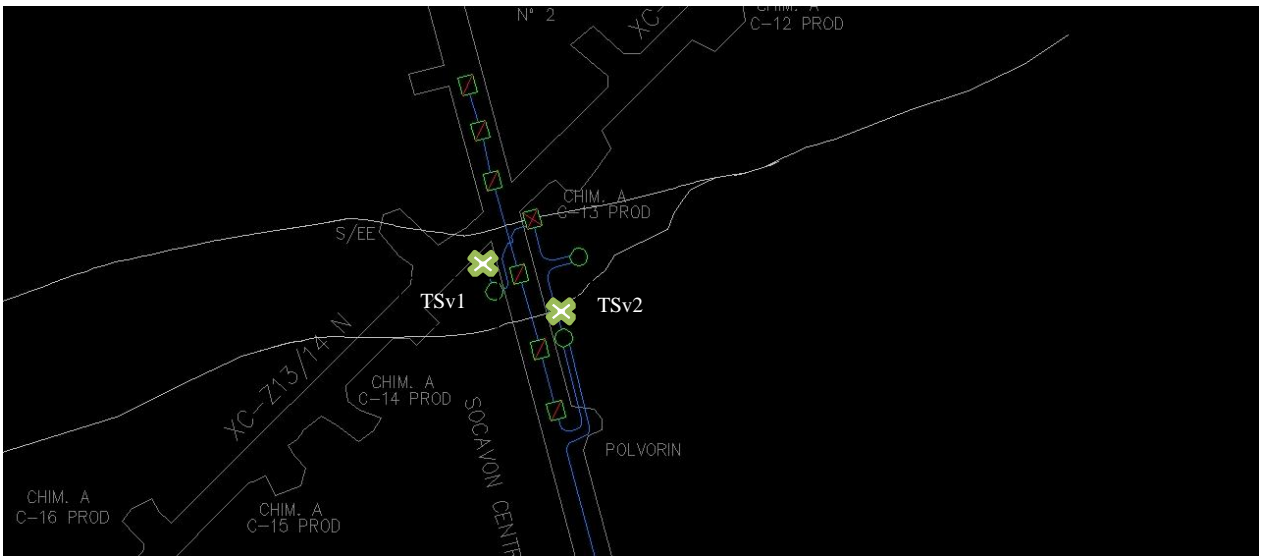


Figura 2-13: Ubicación de los sensores TS nivel Ventilación

Los resultados de los datos teóricos son entregados en ejes locales, siendo la entrada de la fibra óptica como el inicio de la lectura y el primer apoyo como “A”. De modo que si se quiere saber el movimiento con respecto a los ejes de la mina se tiene que conocer la orientación del sensor con respecto a la mina. A continuación se mostrará la orientación de los sensores en el nivel hundimiento.

TS11:

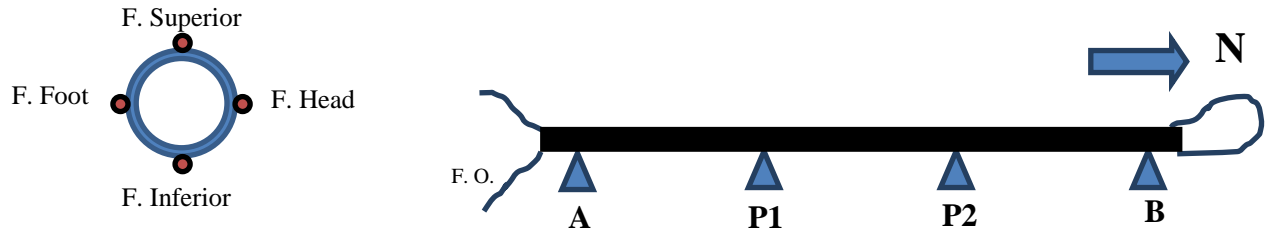


Figura 2-14: Orientación del sensor TS11, nivel hundimiento.

TS12:

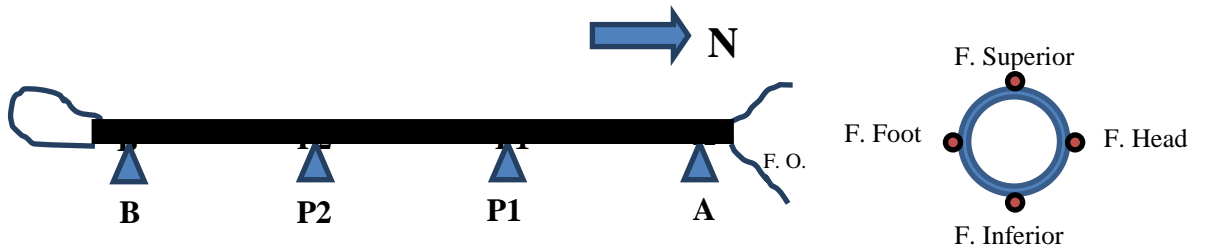


Figura 2-15: Orientación del sensor TS12, nivel hundimiento.

TS13:

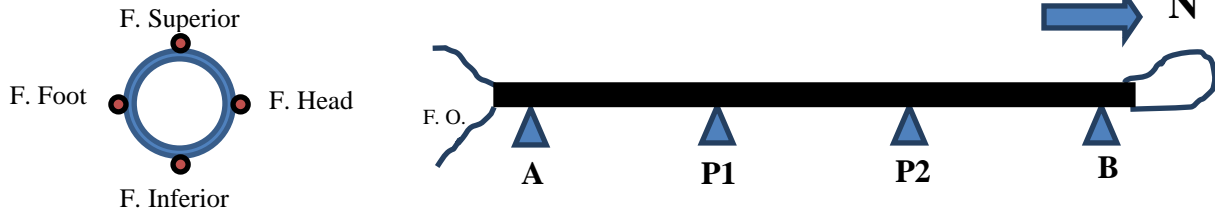


Figura 2-16: Orientación del sensor TS13, nivel hundimiento.

TS14:

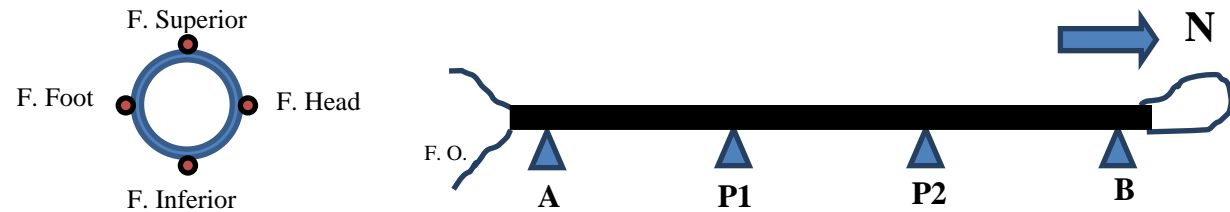


Figura 2-17: Orientación del sensor TS14, nivel hundimiento.

3 MODELACIÓN ESTRUCTURAL DE UN SENSOR DE DESPLAZAMIENTO.

3.1 Generalidades.

Como se dijo con anterioridad el sensor TS consta de un tubo de PVC de cinco metros de largo y 40 centímetros de diámetro. La forma en que se instala en el macizo rocoso es mediante cuatro apoyos separados una cierta distancia dependiendo de la zona que se está. Es muy importante que la unión del apoyo con el macizo sea como unidad, es decir, que cualquier movimiento o deformación de la roca se transmita a los apoyos los que a su vez deforman el tubo de PVC y es detectado por la fibra óptica.

Para determinar la distribución de tensiones y desplazamientos que se aplican al TS debido a cargas externas es necesario señalar las hipótesis con que se trabajará la teoría y estas son:

- Se asume que el material tiene un comportamiento lineal y elástico.
- Las deformaciones con que se trabaja son pequeñas.
- Se asume el principio de superposición como válido.
- El sensor TS es capaz de transmitir esfuerzos internos de corte, flexión, torsión y axial.
- Las acciones externas solo actúan en los apoyos del TS.
- Se desprecia la contribución del peso propio.

A partir de estas hipótesis se desarrolla un modelo teórico para poder predecir a contar de las deformaciones del TS el comportamiento del macizo rocoso al que está adherida.

3.2 Bases para el modelo teórico.

Para modelar el TS como un elemento estructural hay que tener presente la geometría y la forma de trabajo que tiene el sensor, de esta manera el elemento que más se asemeja es la viga. Tanto el TS como una viga tienen comportamientos similares, ambas se pueden considerar como un elemento lineal que trabajan principalmente a flexión y por lo general son horizontales. El apoyo del TS son unas placas metálicas que están incrustadas en el macizo rocoso de tal manera de transmitir todas las acciones externas, pero la unión entre la placa y el tubo de PVC permite al TS tener libre el giro ante acciones externas y poca resistencia a deslizamientos axiales, por lo que se consideró que los apoyos que tendría el modelo será simplemente apoyados.

Otro punto importante es cómo representar la acción de las cargas externas que es lo que se pretende conocer. Dichas acciones son desplazamientos del macizo rocoso que afectan los apoyos del TS, por lo que es correcto afirmar que un desplazamiento del apoyo teóricamente es producido por el mismo efecto del movimiento del macizo rocoso.

Finalmente el modelo se representa como una viga continua cuyas acciones se ejecutan como desplazamiento de los apoyos. A continuación se definen los grados de libertad existentes en cada uno de los apoyos.

Tabla 3-1: Definición de grados de libertad.

v	Desplazamiento en el plano Z
θ	Giro en el plano Z
u	Desplazamiento en el plano X
χ	Giro en el plano X
w	Desplazamiento en el plano Y
φ	Giro en el plano Y

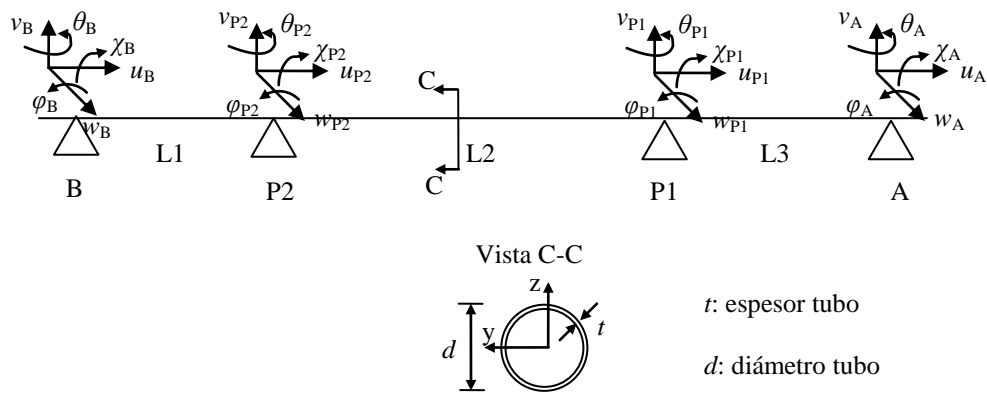


Figura 3-1: Modelo del sensor TS con sus grados de libertad.

Para los grados de libertad señalados en la Tabla 3-1 y Figura 3-1, solo algunos serán calculados debido a que ciertos movimientos del sensor son altamente improbables, como lo es la torsión en los apoyos (χ). Para el grado de libertad axial (u) el modelo puede estimar su desplazamiento, pero dado que el sensor fue diseñado para detectar desplazamientos de corte en los apoyos no resulta de gran utilidad mostrar los resultados.

El algoritmo se desarrolla considerando conceptos de resistencia de materiales en donde dos fórmulas toman un valor muy importante para encontrar los esfuerzos en una sección transversal. La primera de ellas es la fórmula proveniente de la teoría constitutiva que parte de la base que todo elemento estructural tiene una elasticidad y con ella una relación entre su grado de deformación y la tensión que se ejerce. Debido a las hipótesis supuestas anteriormente se asume la ecuación constitutiva como lineal.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Utilizando la ecuación de Navier se puede calcular las tensiones que afectan a la sección transversal, a partir de los diagramas de momento, axial y las propiedades geométricas de la sección.

$$\sigma_{xx} = \frac{N_{axial}}{A} + \frac{M_{zz} \cdot y}{I_{zz}} - \frac{M_{yy} \cdot z}{I_{yy}} \quad (2)$$

La aplicación de la ecuación (2) se basa en el principio de Saint-Venant que postula que al aplicar una fuerza sobre un elemento continuo, la distribución de tensiones en la sección transversal será independiente de dicha fuerza, siempre que la sección a analizar este alejada de la zona de aplicación de la fuerza y que se mantenga el equilibrio global del elemento (tanto de fuerzas como de momento).

Aplicando la definición de tensión y ocupando las ecuaciones (1) y (2) se obtienen las siguientes relaciones:

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{A} = E \cdot \varepsilon = \frac{N_{axial}}{A} + \frac{M_{zz} \cdot y}{I_{zz}} - \frac{M_{yy} \cdot z}{I_{yy}} \quad (3)$$

Con la ecuación (3) se tiene una relación entre las fuerzas y los momentos con las deformaciones del TS.

Dado que el TS es simétrico, el análisis para el eje Z como el eje Y es el mismo. Con ello la ecuación (3) se reduce a la ecuación (4).

$$E \cdot \varepsilon = \frac{N_{axial}}{A} + \frac{M_{zz} \cdot y}{I_{zz}} \quad (4)$$

3.3 Desarrollo del problema.

Teniendo ya definido el modelo ahora surge el problema de como determinar los desplazamientos en los apoyos de la viga, conociendo las deformaciones del TS. Para conocer la solución se resuelve como un problema inverso, es decir, se conocen las deformaciones axiales y se requiere obtener los desplazamientos de los apoyos (i.e., condiciones de borde) del TS que las inducen. Se realiza el mismo proceso que al resolver una viga continua con desplazamiento en sus apoyos, pero conociendo como dato de entrada la distribución de la deformación axial, dejando como incógnita a conocer el desplazamiento de los apoyos. Considerando que cada apoyo tiene cuatro grados de libertad, no se sabe cuáles son los grados ni los apoyos que efectivamente se mueven, siendo necesario imponer ciertas condiciones de borde y crear un proceso iterativo que permitan acotar el problema para obtener la solución. Sakurai (2003) menciona que muchas veces estos análisis inversos no muestran una solución única [12], pero sin imponer las condiciones de borde y realizar las iteraciones no es posible resolver el problema.

Los grados de libertad que se desplazan no actúan uno a la vez, sino que se desarrollan como movimientos complejos que combinan diferentes grados de libertad actuando simultáneamente.

El algoritmo será capaz de identificar cada uno de estos movimientos dependiendo de las condiciones de borde que se planteen.

Dado que se realizará un análisis elástico-lineal a los datos de laboratorio proporcionados por el profesor Ricardo Moffat (Gráfico 4-1) se observa que la deformación detectada en las zonas cercanas al apoyo son curvas, es decir, no siguen un comportamiento elástico-lineal debido a que, en las zonas cercanas al apoyo puede que no se cumplan alguna de las hipótesis antes planteadas, lo que se traduce en deformaciones no lineales en la sección transversal del tubo, lo que está fuera del alcance de este trabajo. Más adelante se propone un procedimiento para procesar estos tramos de lectura no lineales.

Recopilando todas las restricciones antes mencionadas se ensambla una rutina en MATLAB que permite solucionar el problema inverso mediante el método de la rigidez [18], cuya matriz será dependiente de las condiciones de borde y los datos conocidos del TS para entregar el movimiento más probable del macizo rocoso.

3.4 Datos de entrada.

Para poder crear la rutina hay que revisar primero los datos que se conocen y las ecuaciones que se utilizan para obtener los desplazamientos de los apoyos.

Del TS se sabe que están compuestos por un plástico llamado PVC (policloruro de vinilo) y de él se conocen todas sus propiedades mecánicas (Tabla 3-2).

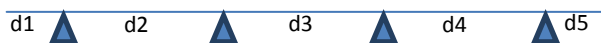
Tabla 3-2: Propiedades mecánicas PVC [17].

°POLICLORURO DE VINILO RIGIDO (NO PLASTIFICADO)				
PROPIEDADES MECANICAS A 23°C	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
PESO ESPECÍFICO	gr/cm ³	D-792	53479	1.45
RESIST. A LA TRACC.(FLUENCIA / ROTURA)	Kg/cm ²	D-638	53455	550 / --
RES. A LA COMPRESIÓN (1 Y 2 % DEF)	Kg/cm ²	D-695	53454	170 / 300
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	Kg/cm ²	D-790	53452	700
RES. AL CHOQUE SIN ENTALLA	Kg.cm/cm ²	D-256	53453	NO ROMPE
ALARGAMIENTO A LA ROTURA	%	D-638	53455	> 20
MÓDULO DE ELASTICIDAD (TRACCIÓN)	Kg/cm ²	D-638	53457	31000
DUREZA	Shore D	D-2240	53505	80 - 83
RES. AL DESGASTE POR ROCE				MALA

Además de las propiedades mecánicas, es necesario conocer las propiedades geométricas para cada nivel, pues las distancias entre los apoyos varían debido a dificultades técnicas que tuvieron al momento de la instalación en terreno en las zonas de falla geológica.

A continuación se presenta las propiedades geométricas para cada nivel, entregadas por MICOMO. (Tabla 3-3)

Tabla 3-3: Distancia entre apoyos de cada TS.



Nivel	TS en calle	d1 [m]	d2 [m]	d3 [m]	d4 [m]	d5 [m]
Hundimiento	14	0.17	1.45	1.73	1.48	0.17
	13	0.1	1.45	1.97	1.38	0.1
	12	0.08	1.44	2.06	1.34	0.08
	11	0	1.50	2.1	1.40	0
Producción	14	0.075	1.89	1.54	1.42	0.075
	13	0.405	1.16	1.61	1.42	0.405
	12	0.315	1.17	1.78	1.42	0.315
Ventilación	Subnivel 1	0.1	1.38	2.01	1.41	0.1
	Subnivel 2	0.1	1.38	2.01	1.41	0.1

La irregularidad de distancias entre apoyos se debe principalmente a las condiciones del terreno en la mina, ya que constantemente se topaban con refuerzos del túnel, los cuales no se podían penetrar con las herramientas convencionales, siendo la mejor solución trasladar los apoyos sin cambiar la ubicación del TS.

Se tiene como dato conocido las propiedades que presenta la sección transversal del sensor (Tabla 3-4).

Tabla 3-4: Propiedades sección transversal

Largo TS	5	[m]
Diámetro	40	[mm]
Espesor	3	[mm]
Área sección transversal	348.7	[mm ²]
Constante Torsional	120133	[tonf-mm]
Inercia	60066	[mm ⁴]
Área de Corte	175.1	[mm ²]

3.5 Descripción de la plataforma computacional.

Como se explicó anteriormente para resolver el problema inverso se utiliza el método de la rigidez [18] conociendo las deformaciones axiales del sensor. Es así como se presenta a continuación el algoritmo que permite calcular los desplazamientos de los apoyos del sensor.

3.5.1 Trazado de regresiones.

Por la teoría de la mecánica de materiales y las hipótesis planteadas al principio de este capítulo, se sabe que las deformaciones del sensor deben seguir una tendencia rectilínea, en base al comportamiento elástico-lineal de los materiales. Este comportamiento no es efectivo a medida que se tienen lecturas cercanas a los apoyos del sensor, donde muestran signos de comportamiento no lineal del material. Debido a que el algoritmo se basa en la teoría elástica de los materiales, es necesario realizar un procesamiento a los datos antes de ingresarlos al algoritmo de tal manera que todos los tramos del sensor cumplan con las hipótesis.

Se propone eliminar los tramos cercanos a los apoyos y continuar la tendencia lineal de las deformaciones a través de regresiones lineales en lecturas alejadas de los apoyos como muestra el Gráfico 3-1. Se considera como una distancia apropiada que asegure el comportamiento lineal del material como cinco veces el diámetro (unos 10 cm.) del apoyo, de tal manera que los datos que están en este rango no se utilizarán en el algoritmo. Para mantener la continuidad de las deformaciones se extrapola las regresiones lineales y en el siguiente capítulo se discutirá sobre el mejor método para juntar estas regresiones.

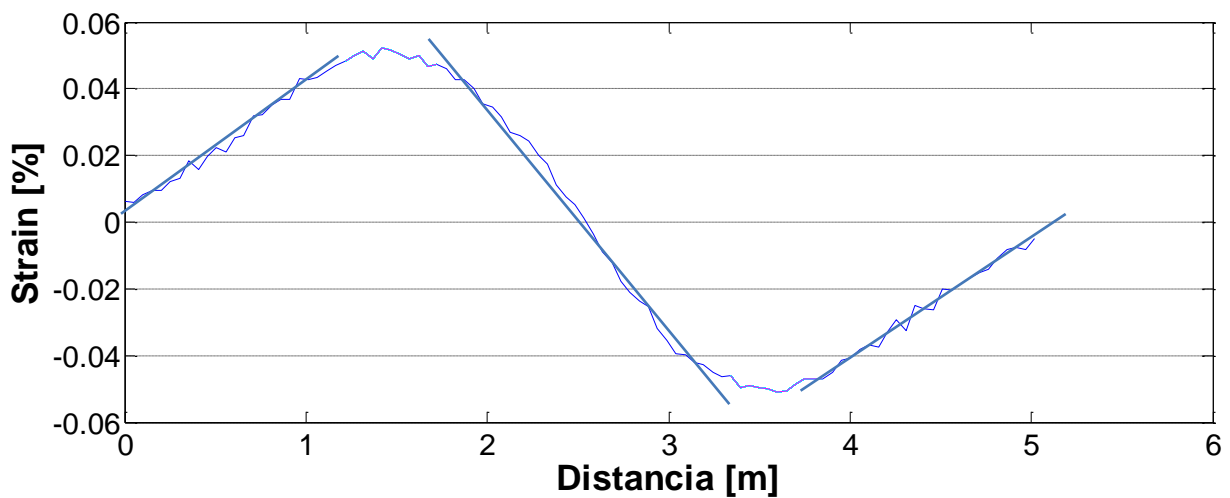


Gráfico 3-1: Zonas eliminadas y regresiones en las lecturas del sensor.

Una vez procesado los datos de deformación axial, se introducen en el algoritmo para el cálculo de los diferentes esfuerzos del TS.

3.5.2 Diagrama axial.

Como se mencionó con anterioridad, el sensor no fue diseñado para detectar desplazamientos axiales de los apoyos, pero a pesar de ello el modelo permite calcular la deformación axial inducido por una carga sabiendo las deformaciones de dos fibras opuestas del sensor (ver FIGURA 3-2). Se utiliza la lectura de los cuatro puntos de la sección transversal para conocer el

diagrama de tensiones al cual está sometida la sección en ambos ejes y se unen puntos a través de una recta.

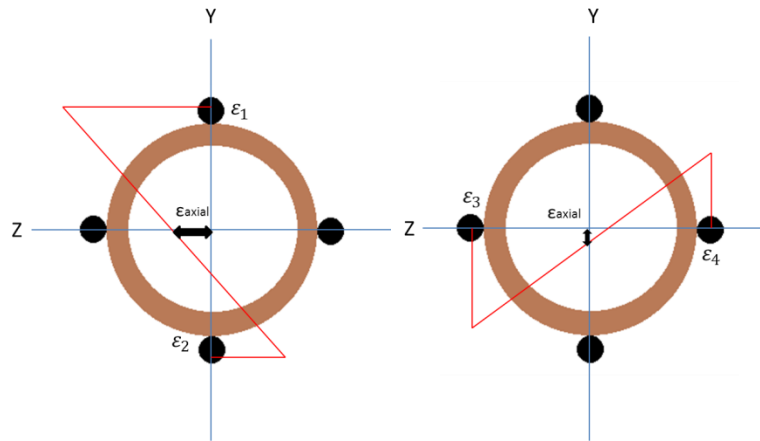


Figura 3-2: Diagrama de tensión, sección transversal.

Al calcular los parámetros de la recta se puede conocer las deformaciones de todos los puntos de la sección transversal. La teoría establece que el eje neutro debe pasar por el origen cuando la sección está sometida a una flexión pura debido a la ausencia de cargas axiales, por lo que cualquier desvío del eje neutro con respecto al centro representa una deformación producida por una carga axial. En el caso de la Figura 3-2, ϵ_{axial} representa la deformación a causa de una carga axial en el sensor. Debido a que el análisis se desarrolla en dos ejes de la sección transversal, se usa el promedio de ambos para estimar el valor de ϵ_{axial} .

Este procedimiento se repite a lo largo del sensor para obtener el diagrama axial del TS y utilizando la ley constitutiva (ecuación (1)) se llega a una carga axial aplicada en la sección.

Una vez conocida la carga axial, se debe establecer un criterio para considerar el valor obtenido como relevante para el análisis o si forma parte del error de las mediciones del sensor. Para establecer el criterio se utilizó la resistencia máxima a la compresión del tubo PVC (según Tabla 3-2 170 Kg/cm^2), si la carga axial es menor al 1% de dicha carga de compresión, es decir 6 Kg, se considera irrelevante para el análisis.

3.5.3 Diagrama Momento y de Corte.

El diagrama de momento de la sección se obtiene de forma directa a través de la ecuación (4), considerando una carga axial nula y las curvaturas mostradas en la Figura 3-3.

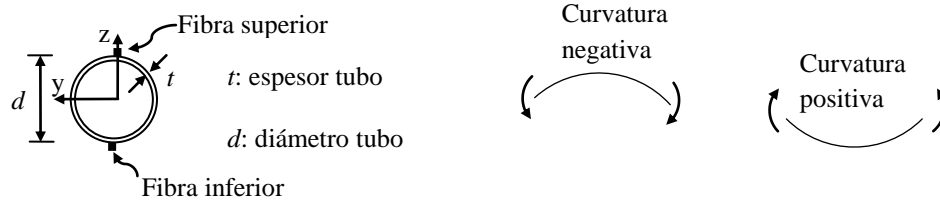


Figura 3-3: Deformación longitudinal fibra superior e inferior.

Para calcular el diagrama de corte del sensor se separa el TS en tres tramos, cada tramo consiste en un nodo inicial y un nodo final marcado por los apoyos del sensor. Se realiza el diagrama de cuerpo libre para un segmento entre apoyos, de esta manera conociendo los momentos en los extremos se calculan los cortes en los nodos para cada tramo i que forma el TS.

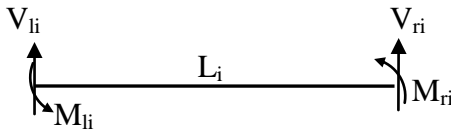


Figura 3-4: Diagrama de cuerpo libre de un tramo del TS

Utilizando equilibrio se puede llegar a conocer los cortes en los extremos del elemento V_{li} y V_{ri} .

$$M_{li} = -M_z(0) \quad M_{ri} = M_z(L_i) \quad (5)$$

$$V_{li} = \frac{M_{li} + M_{ri}}{L_i} = -V_{ri} \quad (6)$$

Es importante precisar que este análisis considera una flexión recta, por ende, para determinar el diagrama de corte y momento para otro plano se debe usar las deformaciones de ese plano respectivo.

3.5.4 Desplazamientos Nodales.

Una vez calculado el diagrama de corte para cada uno de los tramos del TS, se debe relacionar los grados de libertad con las fuerzas aplicadas en ellas. La Figura 3-5 muestra todos los grados de libertad para un tramo i del TS.

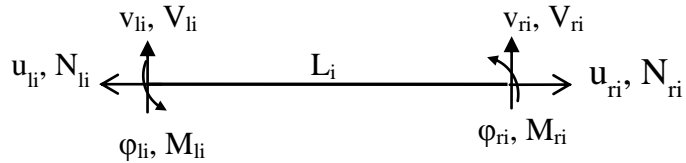


Figura 3-5: Grados de libertad y fuerzas nodales del elemento i

La matriz de rigidez de un elemento viga viene dado por (Hibbeler 2007):

$$[K]_i = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}_i \quad (7)$$

Esta matriz representa solo un tramo del sensor TS y es necesario acoplar los diferentes tramos para obtener la matriz de rigidez global del TS.

Se determina las fuerzas nodales al momento mantener el equilibrio en el nodo que une los diferentes tramos como se observa en la Figura 3-6.

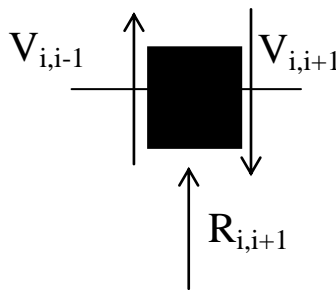


Figura 3-6: Equilibrio en el Nodo i

Una vez conocido las fuerzas nodales y la matriz de rigidez del sensor, se utiliza el equilibrio global del sensor para llegar a la ecuación (8)

$$[K]_{TS} \{u\}_{TS} = \{R\}_{TS} \quad (8)$$

Para encontrar la solución es necesario imponer ciertas condiciones de movimiento del sensor o condiciones de borde que libera o restringe los grados de libertad verticales, de manera que la ecuación (8) tenga solución.

Las condiciones de bordes usadas en el algoritmo se presentan en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5: Condiciones de borde utilizadas por la plataforma computacional.

Condición Borde	Apoyo A	Apoyo P1	Apoyo P2	Apoyo B
1	↓			
2		↓		
3	↓	↓		
4	↓		↓	
5		↓	↓	
6			↓	
7			↓	↓
8		↓		↓

Las condiciones de borde mostradas no son todas las combinaciones posibles, pero al liberar 3 apoyos simultáneos se registraron errores en las soluciones. Con estas 8 condiciones de borde se abarca los movimientos más probables que pueda tener el sensor.

A continuación se mostrará un ejemplo para entender mejor el método que se emplea para calcular los desplazamientos.

EJEMPLO: Se tiene una viga con los siguientes grados de libertad y reacciones asociadas a la condiciones de borde 3.

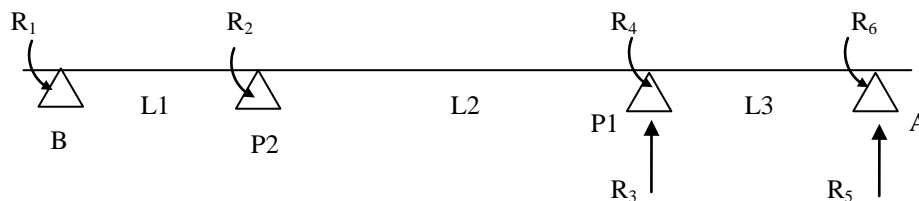


Figura 3-7: Grados de libertad y reacciones del ejemplo.

Se considera la deformación longitudinal en la fibra superior (ε_{xsup}) e inferior (ε_{xinf}) de la sección del TS como dato conocido (Figura 3-3). Utilizando la ley constitutiva se determinan la tensión longitudinal en la fibra superior σ_{xsup} e inferior σ_{xinf} de la sección del TS (Ec. (1)).

Después utilizando la fórmula de Navier (Ec. (2)), se obtiene el diagrama de esfuerzo de flexión a lo largo del TS, con lo cual se obtienen el momento de flexión y esfuerzo de corte en cada extremo (nodo) de cada elemento i que forma el TS (Figura 3-4). Estos valores se obtienen del diagrama de momento y de condiciones de equilibrio. Para ello se utilizan las ecuaciones (3) y (4).

Con los valores de V_{li} y V_{ri} calculados, se obtienen los valores de las fuerzas nodales R_3 y R_5 (Figura 3-6), mediante la relación siguiente:

$$R_i = V_{ij-1} + V_{ij+1} \quad (9a)$$

donde $V_{i,i-1}$ y $V_{i,i+1}$ son los esfuerzos de corte a la derecha del tramo definido por los nodos $(i-1,i)$ y a la izquierda del tramo definido por los nodos $(i,i+1)$ respectivamente.

Una vez calculado las fuerzas nodales y definido la matriz de rigidez acoplada, se tiene:

$$[K]_{TS} \{u\}_{TS} = \{R\}_{TS} \quad (8b)$$

donde

$$\{u\}_{TS} = [\varphi_B, \varphi_{P2}, v_{P1}, \varphi_{P1}, v_A, \varphi_A]^T \quad (8c)$$

$$\{R\}_{TS} = [R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6]^T. \quad (8d)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones representado por la Ec. (7a) se obtiene $\{u\}_{TS}$.

Algunos componentes del vector de fuerzas nodales son conocidos: $R_1 = R_2 = R_4 = R_6 = 0$ ya que no están asociados a grados de libertad cinemáticos y los otros dos son incógnitas: R_3 y R_5 (Figura 3-7).

3.5.5 Diagrama de momento Teórico.

Se debe calcular un diagrama de momento teórico a partir de las rotaciones y desplazamientos calculados anteriormente a partir de la condición de borde impuesta, de esta manera se permite comparar el diagrama de momento calculado por las deformaciones del sensor y el momento teórico.

Se utilizan las funciones de interpolación (McGuire et. al. 2000) para calcular la deflexión que tiene la viga y a partir de ello se deriva la expresión dos veces para calcular el momento [20]. Considerando el tramo i -ésimo del TS tal como muestra la Figura 3-5, donde se especifican los

desplazamientos, giros, las fuerzas y momentos nodales. El desplazamiento vertical del tramo i -ésimo del TS, $v_i(x)$, donde $0 \leq x \leq L_i$ está dado por

$$v_i(x) = v_{li}N_i(x) + v_{ri}N_2(x) + \varphi_{li}N_3(x) + \varphi_{ri}N_4(x) \quad (10)$$

Donde:

$$\begin{aligned} N_1(x) &= 1 - 3\left(\frac{x}{L_i}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{L_i}\right)^3 & N_2(x) &= 3\left(\frac{x}{L_i}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{L_i}\right)^3 \\ N_3(x) &= x\left(1 - \frac{x}{L_i}\right)^2 & N_4(x) &= x\left(\left(\frac{x}{L_i}\right)^2 - \frac{x}{L_i}\right) \end{aligned}$$

A partir de la Ec.(10) se obtiene la curvatura de la viga y para calcular el momento se deriva la Ec. (10) en función de x , de esta manera se obtiene el momento a partir de la interpolación.

$$M_i(x) = v''_i(x) = v_{li}N''_i(x) + v_{ri}N''_2(x) + \varphi_{li}N''_3(x) + \varphi_{ri}N''_4(x) \quad (11)$$

Donde:

$$\begin{aligned} N''_1(x) &= \frac{12x}{L^3} - \frac{6}{L^2} & N''_2(x) &= \frac{6}{L^2} - \frac{12x}{L^3} \\ N''_3(x) &= \frac{2x}{L^2} + \frac{4}{L}\left(\frac{x}{L} - 1\right) & N''_4(x) &= \frac{6x}{L^2} - \frac{2}{L} \end{aligned}$$

Así, se obtiene el diagrama de momento teórico dependiente de las condiciones de borde iniciales del problema. Teóricamente, si la condición de borde impuesta es el mismo movimiento del sensor, implica que los diagramas de momento teóricos con los calculados por las deformaciones del TS son los mismos.

3.5.6 Elección de Desplazamiento de Apoyos.

Todos los cálculos mostrados con anterioridad tienen solución al imponer una condición de movimiento para el sensor, pero se debe iterar para diferentes tipos de condiciones de borde ya que no se conoce cuál es el movimiento correcto que tiene el sensor TS.

Se crea un sistema que permite cuantificar qué condición de borde es la más cercana a la realidad mediante la comparación de la condición de borde impuesta con respecto al diagrama de momento teórico obtenido a través de las funciones de interpolación. Para esto se crea un índice de error que facilita la elección de la condición de borde correcta y consiste en una resta simple entre ambos diagramas de momento, punto por punto, (ecuación (12)) para luego sacar un promedio por cada segmento entre apoyos (A-P1 (L1), P1-P2 (L2), P2-B (L3)), como indica la ecuación (13). El índice de error final será la suma de los tres índices de error de cada segmento (ecuación (14)).

$$IE_i = (|M_{sensor} - M_{interpolación}|)_i \quad (12)$$

$$IE_{Li} = \frac{\sum_i^n IE_i}{n} \quad (13)$$

$$IE = \sum_1^3 IE_{Li} \quad (14)$$

Donde:

M_{sensor} : Momento para lectura i calculado con datos del sensor entre apoyos.

$M_{interpolación}$: Momento para lectura i calculado por interpolación entre apoyos.

IE_i : Índice de error de la lectura i entre apoyos.

IE_{Li} : Índice de error para el tramo L_i .

IE : Índice de error de la condición de borde.

El índice de error indicará qué tan acertada es la condición de borde, siendo un valor cercano a cero como una superposición de ambos gráficos.

3.5.7 Diagrama del algoritmo.

La Figura 3-8 muestra los procesos que ejecuta el algoritmo desde el ingreso de datos hasta llegar a una solución, iterando diferentes condiciones de bordes predeterminadas.

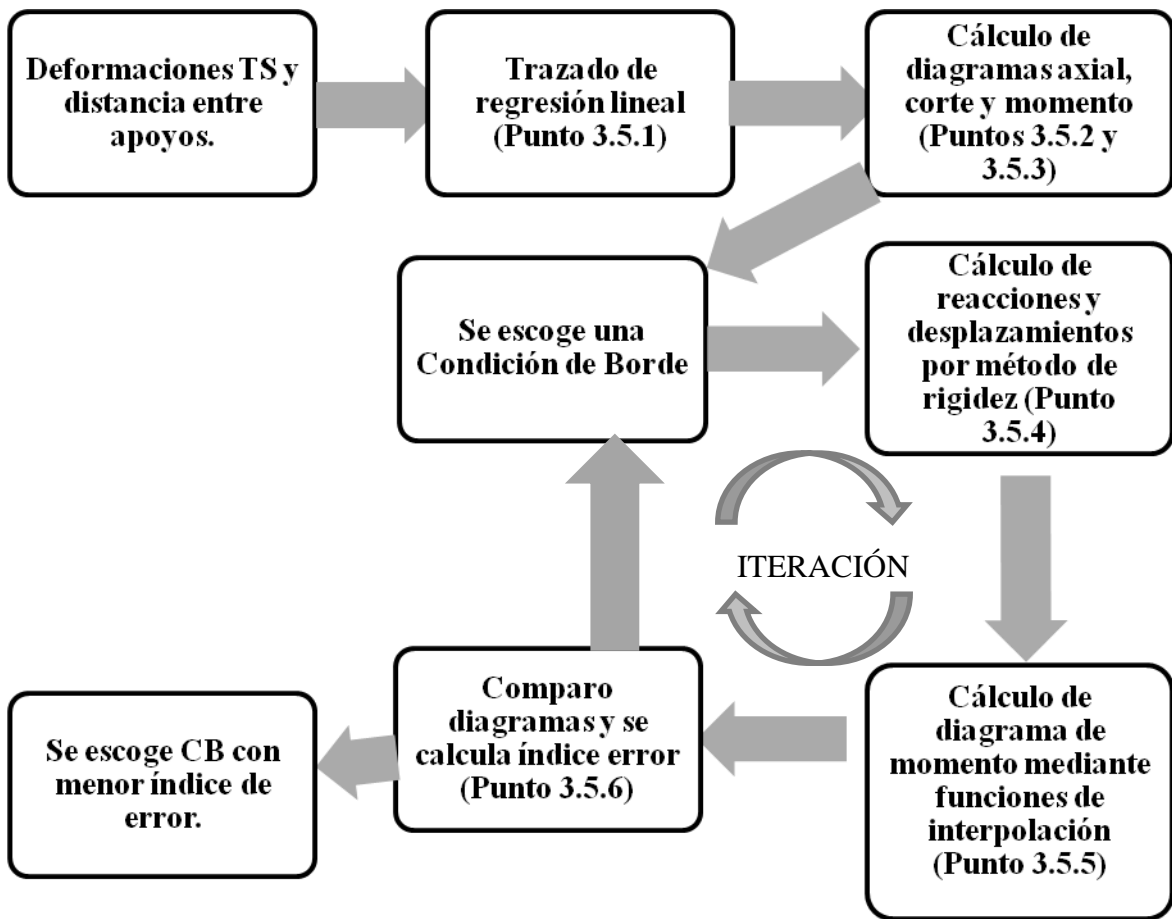


Figura 3-8: Diagrama del algoritmo.

4 IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA Y APLICACIONES.

4.1 Datos disponibles

Antes de validar las rutinas se mostrará los diferentes datos disponibles que se utilizaron en el algoritmo.

4.1.1 Datos de laboratorio.

Se probó la eficiencia de los sensores en un laboratorio, utilizando una serie de desplazamientos controlados en los apoyos. Los tipos de movimientos utilizados en estos experimentos se presentan en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Tipos de desplazamiento en apoyos para datos de laboratorio.



Tipo I	Desplazamiento vertical apoyo P1.
Tipo II	Desplazamiento vertical y horizontal apoyo P1.
Tipo III	Desplazamiento horizontal P1.
Tipo IV	Desplazamiento vertical de apoyo A y apoyo P1.

Los datos de laboratorio del sensor TS fueron entregados en formato Excel, en ellos se pueden encontrar los datos en forma de gráficos de la deformación del tubo en porcentaje. En el Gráfico 4-1 se observa la deformación del sensor para diferentes desplazamientos del tipo I para cuatro elevaciones del apoyo P1.

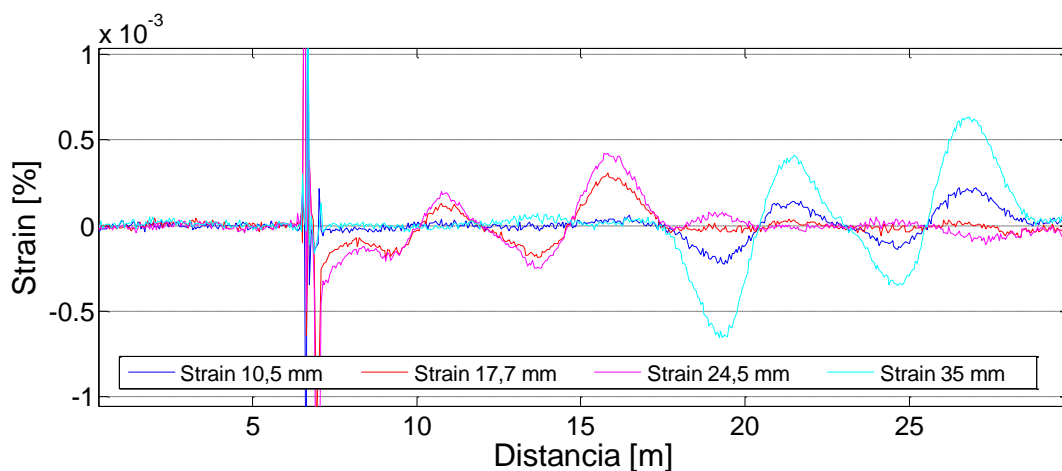


Gráfico 4-1: Resultados de Laboratorio para desplazamiento Tipo I

El Gráfico 4-1 muestra deformaciones coincidentes con los desplazamientos, una mayor deformación se asocia a un mayor desplazamiento del apoyo P1, pero cabe notar que algunas mediciones tienen posiciones opuestas. A pesar de aquello se ubican las 4 fibras del sensor y se cortan las lecturas para ser ingresadas al algoritmo.

4.1.2 Datos de terreno.

Cada canal consiste en una serie de sensores conectados a la una red de fibra óptica y que tiene asociada un nivel, fecha y hora. Para obtener las deformaciones que se utilizan en el algoritmo ocupa el primer dato (lectura inicial) como cero y a partir de esa fecha se obtuvo la diferencia neta de deformación, la que se introducirá como input.

La lectura real de datos en terreno abarca una distancia de 3 kilómetro aproximadamente. Los sensores se ubican entre el kilómetro uno y dos como muestra el Gráfico 4-2, el que debe ser extraído para obtener los tramos que representan al sensor TS y así ser introducido en el algoritmo.

Tabla 4-2: Orden de calles que pasa la fibra óptica en las distintas mediciones en terreno

Canales	Orden de calles en lectura de canales.						
Canal 09	Calle 14	→	Calle 13	→	Calle 12	→	Calle 11
Canal 10	Calle 11	→	Calle 12	→	Calle 13	→	Calle 14
Canal 07	Calle 14	→	Calle 13	→	Calle 12		
Canal 08	Calle 12	→	Calle 13	→	Calle 14		

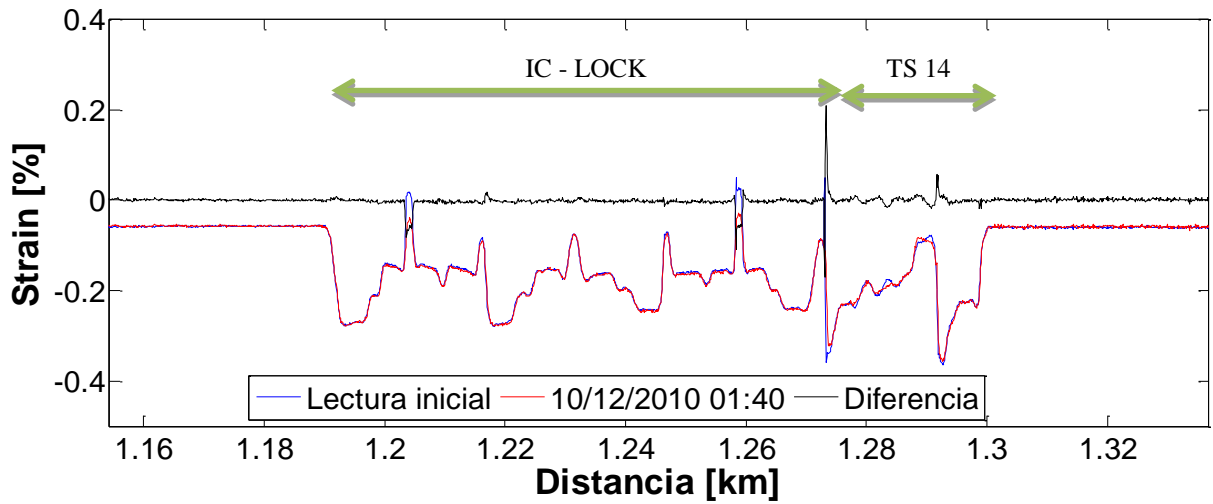
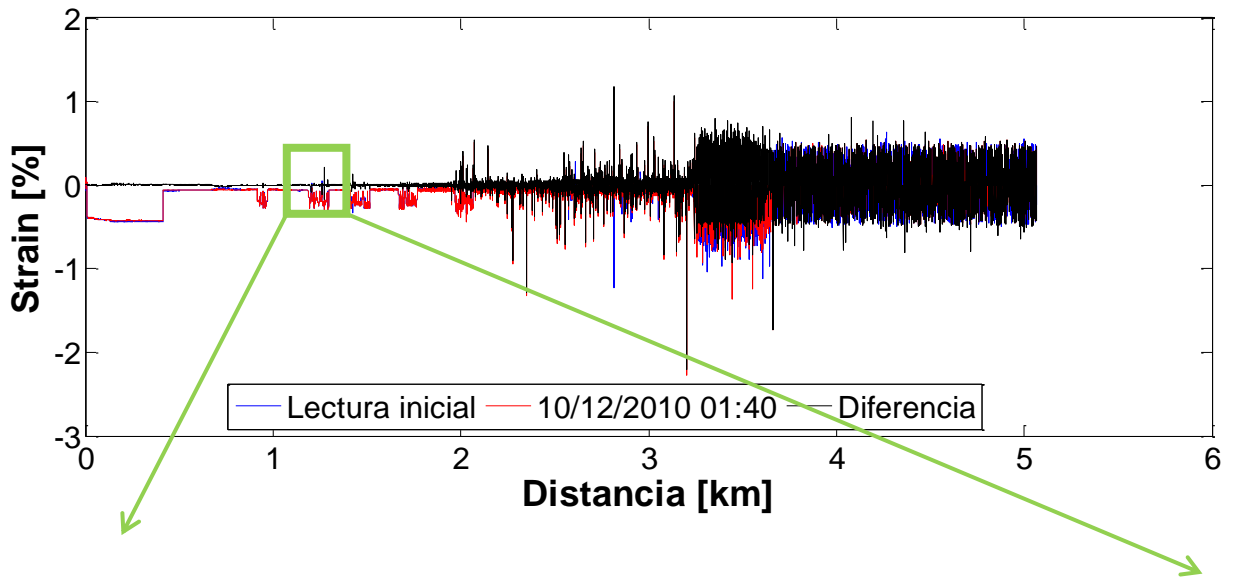


Gráfico 4-2: Cambio para dos meses de medición del TS calle 14, canal 9, nivel hundimiento

A partir del Gráfico 4-3 al Gráfico 4-6 se observa las deformaciones netas obtenidas para diferentes sensores.

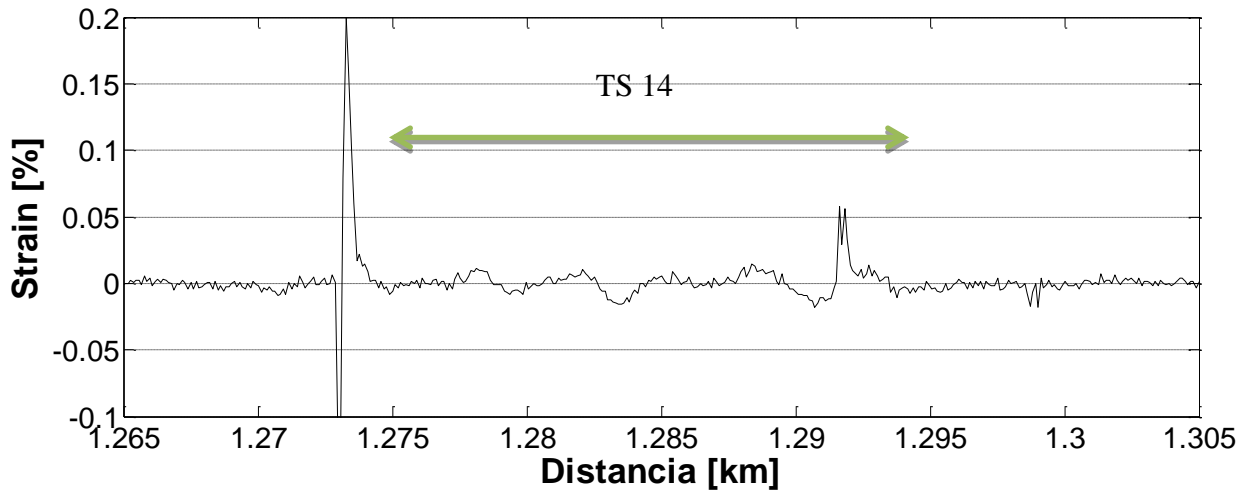


Gráfico 4-3: Deformación neto TS calle 14, canal 9, zona hundimiento

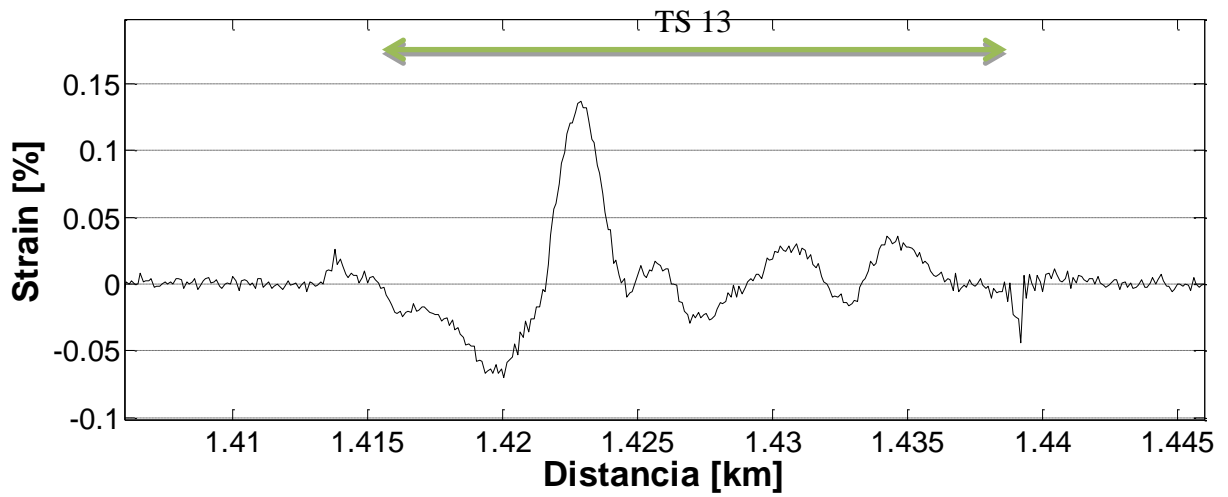


Gráfico 4-4: Deformación neto TS calle 13, canal 9, zona hundimiento

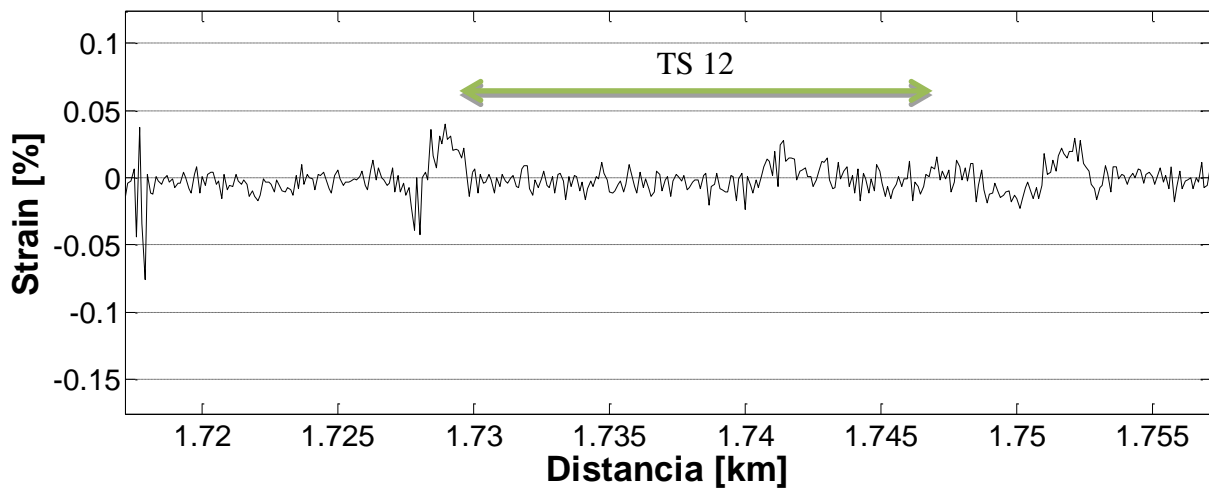


Gráfico 4-5: Deformación neto TS calle 12, canal 9, zona hundimiento

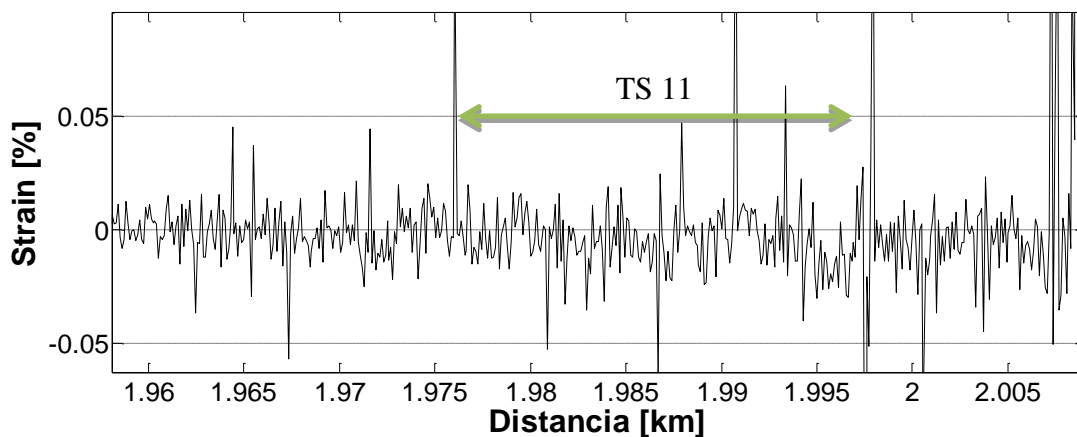


Gráfico 4-6: Deformación neto TS calle 11, canal 9, zona hundimiento

Las deformaciones netas entre el Gráfico 4-3 al Gráfico 4-6, muestran dos meses de acumulación de deformación para diferentes sensores ubicados en la zona de hundimiento. Se aprecia que los datos del TS de 11 (Gráfico 4-6) presentan excesivo ruido, lo que es perjudicial para el proceso utilizado por el algoritmo para calcular los desplazamientos. Lo mismo ocurre para todos los datos de los sensores ubicados en las distancias más alejadas de la lectura total, tanto para el canal 9 como el canal 10 como para los otros 2 niveles de la mina. Por este motivo es que se utilizan solo los dos primeros datos de sensores, es decir según la Tabla 4-2, para el canal 9 se utilizan las lecturas de los sensores TS14 y TS13 y para el canal 10 los sensores TS11 y TS12.

Las lecturas de las deformaciones netas de los canales 7 y 8, correspondientes a la zona de producción, presentan deformaciones producidas por cargas axiales, las que no debiesen ser consideradas pues el sensor no fue diseñado a resistir cargas axiales. En general los datos obtenidos en el nivel de producción son pocos confiables (confirmado por personal de

MICOMO) y por tanto no se analizarán mayormente en este trabajo. A pesar de ello se ingresaron estos datos en el algoritmo y los resultados están en el Anexo B.

Con respecto a las lecturas del nivel ventilación no presentan mediciones, dado que al parecer la fibra está cortada o bien existe mucho ruido en la medición. Por este motivo se descartan todas las lecturas de los canales 11 y 12.

En el mes de diciembre, las lecturas de los canales presentan un desfase para los niveles de hundimiento y producción con respecto a la primera fecha de lectura. Este desfase se observa tanto en el eje X como en el eje Y al momento de graficar los datos y se realizó una corrección de manera de hacer calzar las distancias y posiciones de los sensores para obtener la lectura neta. Este desfase fue atribuido a una mantención que se realizó al aparato BOTDR.

En la calle 13, nivel hundimiento, se realizó una mantención a ese sensor (TS13) el día 13/11/2009, provocando una gran deformación en las lecturas para esa fecha producto de dicha mantención. Para utilizar los datos después de esta fecha se escoge como una segunda lectura inicial la fecha de la mantención (13/11/2009).

En resumen, las observaciones a los datos de terrenos se presentan a continuación:

- En los tramos finales de cada lectura se pierde nitidez de los datos.
- La zona de producción presenta mediciones poco confiables, avalado por la persona a cargo del proyecto.
- La zona de ventilación presenta mediciones deficientes por lo que quedan excluidas de todo análisis.
- Alrededor de la fecha 22/12/2009 se realizó una mantención al analizador BOTDR lo que tuvo como consecuencia el desplazamiento de los datos medidos tanto en el eje X como en el eje Y. La corrección se hizo bajo el criterio de superponer los tramos rectos donde no hay sensores.
- Con respecto a los datos del sensor TS13, a partir del 13/11/2009 se realizó una mantención.
- Los últimos días de Diciembre, para todas las zonas, presentan datos deficientes y con mucho ruido, por lo que se descartaron para el análisis.

4.2 Validación del modelo.

Como se explicó con anterioridad, el algoritmo computacional son una serie de subrutinas que permiten entregar resultados a partir de los datos iniciales que se le entreguen. Para poder utilizar el algoritmo computacional con los datos de terreno es necesario primero validar el buen funcionamiento de las rutinas con desplazamientos conocidos, como los datos de laboratorio.

El proceso de validación se basa en obtener resultados de desplazamiento en los apoyos similares a los realizados para los datos de laboratorio, de esta manera se comprueba que el algoritmo funcione de acuerdo a lo esperado.

Además se mostrarán tres alternativas con diferentes procedimientos para los apoyos, las que se pondrán a prueba con los datos de laboratorio y se observará su resultado.

4.2.1 Validación con datos de laboratorio.

Como se explicó en el capítulo 3, antes de ingresar los datos al algoritmo, se deben trazar regresiones lineales en los tramos alejados de los apoyos para asegurar la linealidad de las mediciones. En el Gráfico 4-7 se destacan las zonas donde se ubica el apoyo.

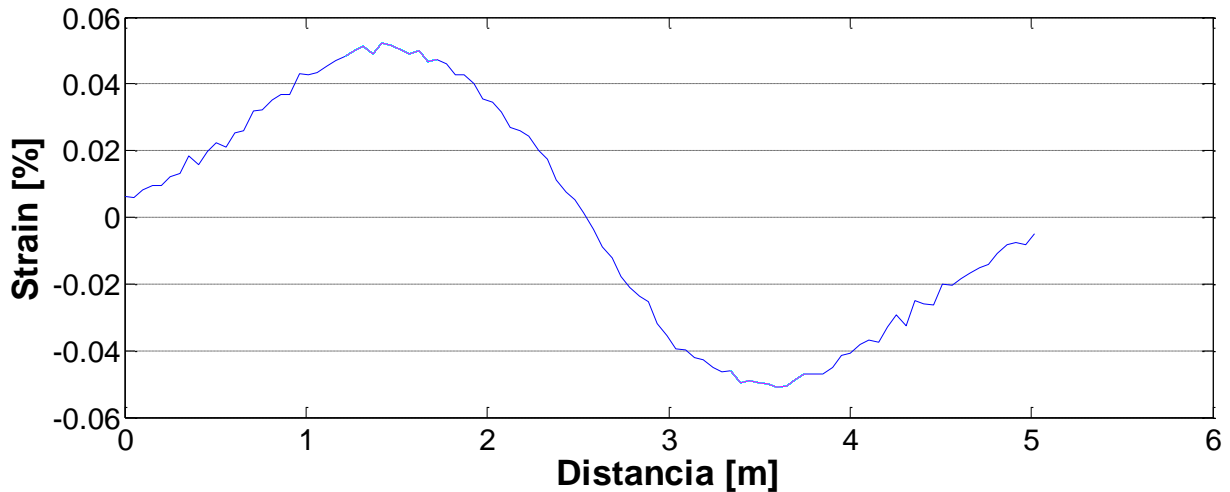


Gráfico 4-7: Zonas excluidas del análisis, Eje Z, zona superior Tipo IV.

Ante la exclusión de los datos ubicados en los apoyos se requiere extrapolar las regresiones trazadas hacia los apoyos de manera que exista una continuidad en las lecturas de deformación. A continuación se realiza una comparación entre diagrama de momentos calculados por el algoritmo a partir de los datos de deformación del sensor (sensor), el diagrama de momento teórico y las regresiones extrapoladas hacia los apoyos.

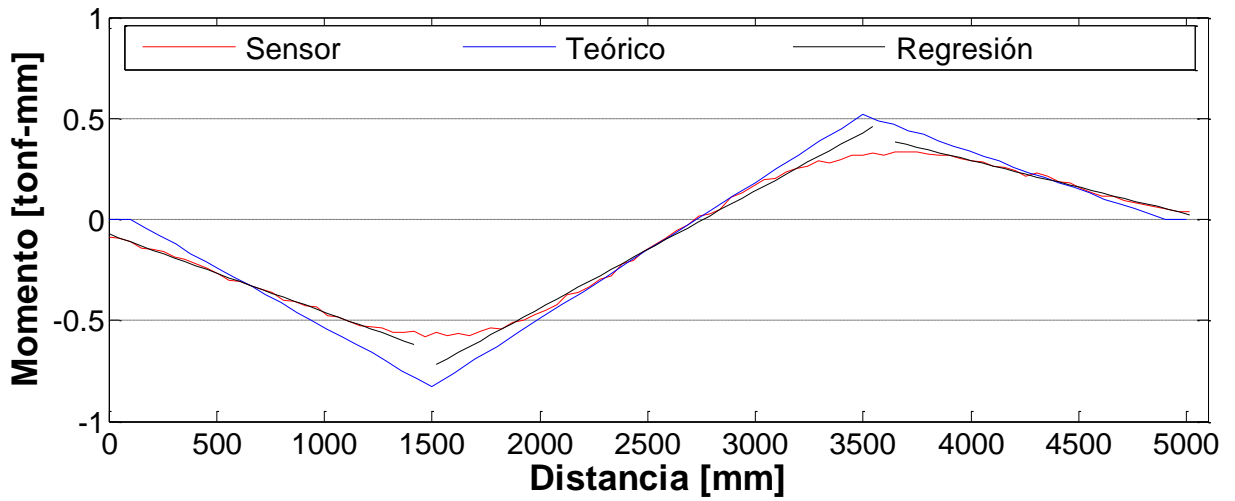


Gráfico 4-8: Comparación de diagramas de momento tipo I, eje Z.

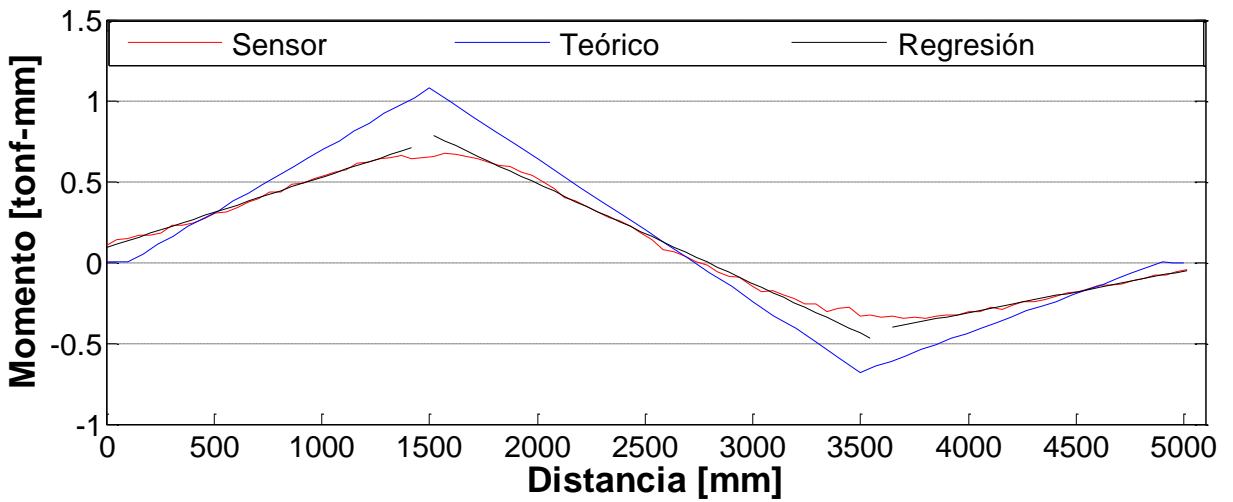


Gráfico 4-9: Comparación de diagramas de momento tipo II, eje Y.

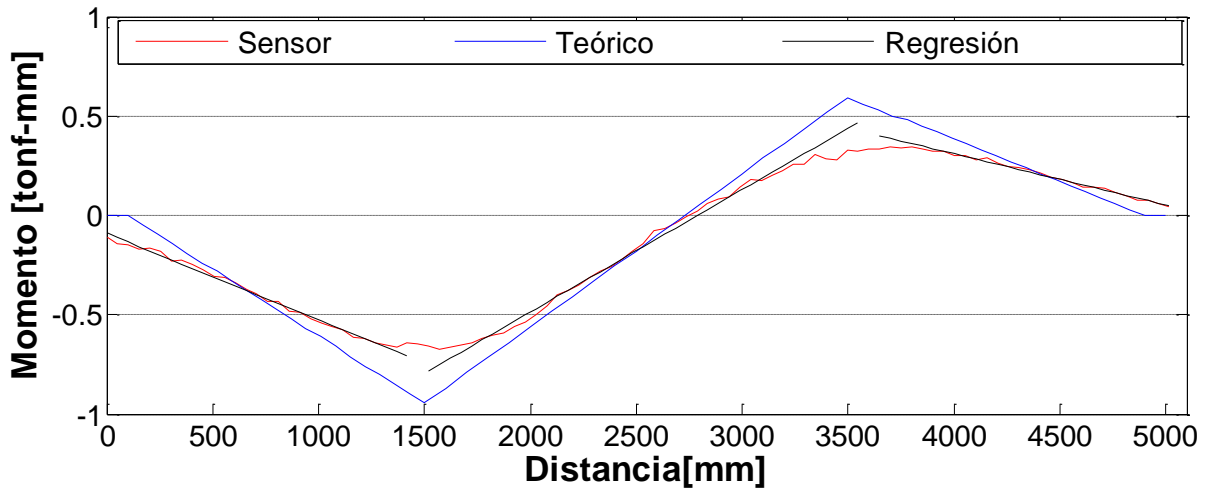


Gráfico 4-10: Comparación de diagramas de momento tipo II, eje Z.

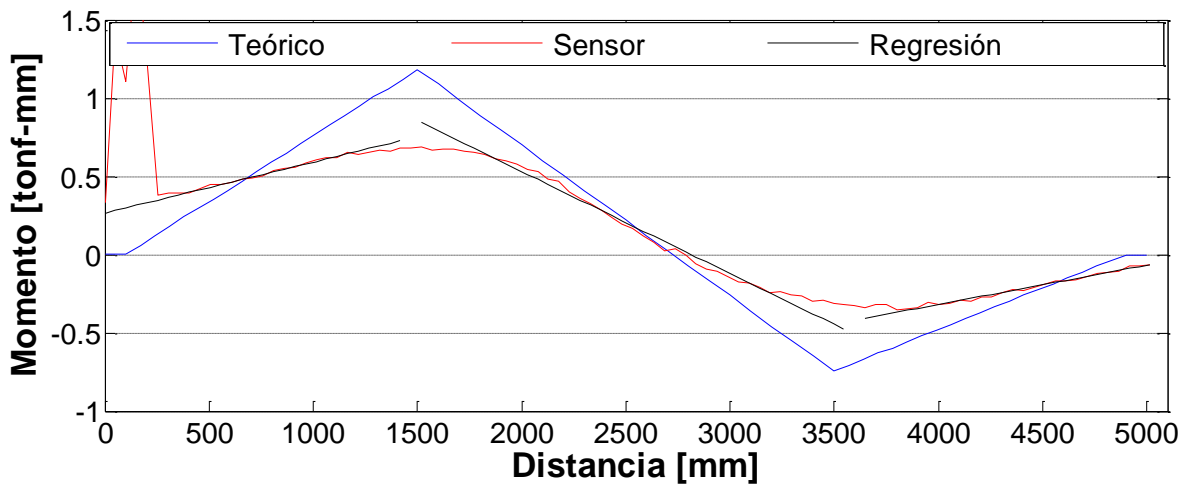


Gráfico 4-11: Comparación de diagramas de momento tipo III, eje Y.

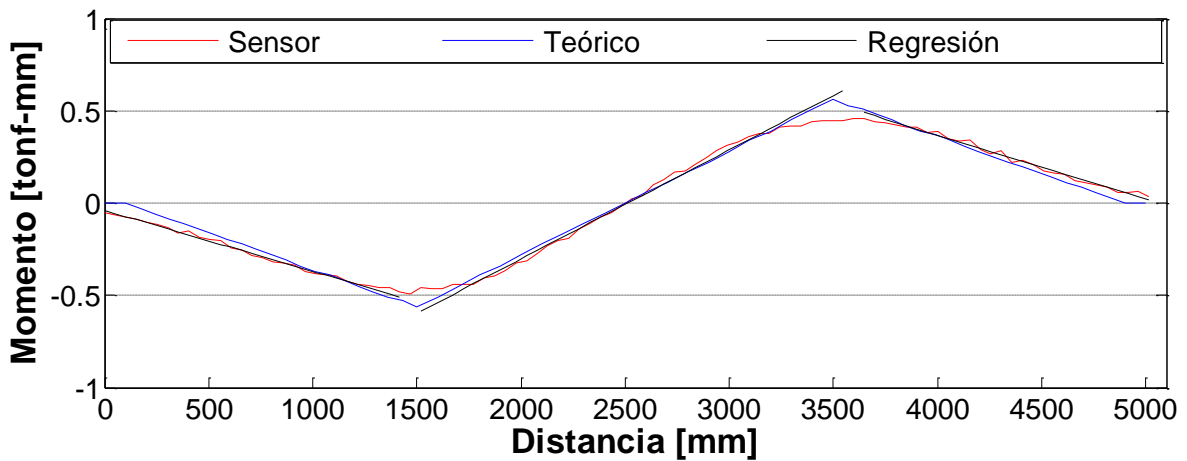


Gráfico 4-12: Comparación de diagramas de momento tipo tipo IV, eje Z.

Del Gráfico 4-8 al Gráfico 4-12 hay movimientos que muestran una muy buena semejanza entre rectas, especialmente para el movimiento tipo IV lo que se debería traducir en una buena interpretación del algoritmo al momento de calcular los desplazamientos del sensor. Por el contrario para el movimiento tipo II Z y tipo III se aprecia una menor lectura de deformación de la que debería ser teóricamente ya que al alejarse de los apoyos las rectas tienen diferentes pendientes y no coinciden con las rectas teóricas. Esta diferencia entre las rectas teóricas y las obtenidas por laboratorio deja en evidencia algún posible error en la ejecución del ensayo o en una probable pérdida de lectura por parte del sensor debido a algún factor externo. Para la validación del algoritmo se usará los cuatro tipos de movimientos, pero solo se mostrará los resultados obtenidos para el tipo IV y los demás estarán incluidos en el Anexo A.

Al momento de unir las distintas regresiones trazadas para un tipo de movimiento, éstas no llegan al mismo punto creando una no continuidad del diagrama de momento que según la teoría, debería ser continuo. Para solucionar este problema se hacen cuatro tipos de regresiones utilizando diferentes métodos y aproximaciones para finalmente comparar los resultados de los desplazamientos y escoger un método para ser aplicado a los datos de terreno. Las cuatro regresiones se describen a continuación:

REGRESIÓN 0 (R0): No se elimina ningún dato al momento de ingresarlos al algoritmo y no se realiza ningún tratamiento previo.

REGRESIÓN 1 (R1): Se eliminan los datos ubicados en los apoyos (peaks) y se aplican regresiones lineales en los tramos alejados de ellos para luego extrapolar sobre los datos eliminados. El punto de encuentro entre rectas se considera el promedio de ambos.

REGRESIÓN 2 (R2): Al igual que R1, se eliminan los datos, en los apoyos se realizan las regresiones lineales y se extrapolan hacia los apoyos hasta que la recta se intersecte con la regresión del otro segmento.

REGRESIÓN 3 (R3): Se realiza el mismo procedimiento inicial que R1, pero la recta es forzada a que los extremos del sensor sean ceros y los peaks serán los promedios entre las dos regresiones entre apoyos (como R1), de manera que se asemeje más a los datos teóricos.

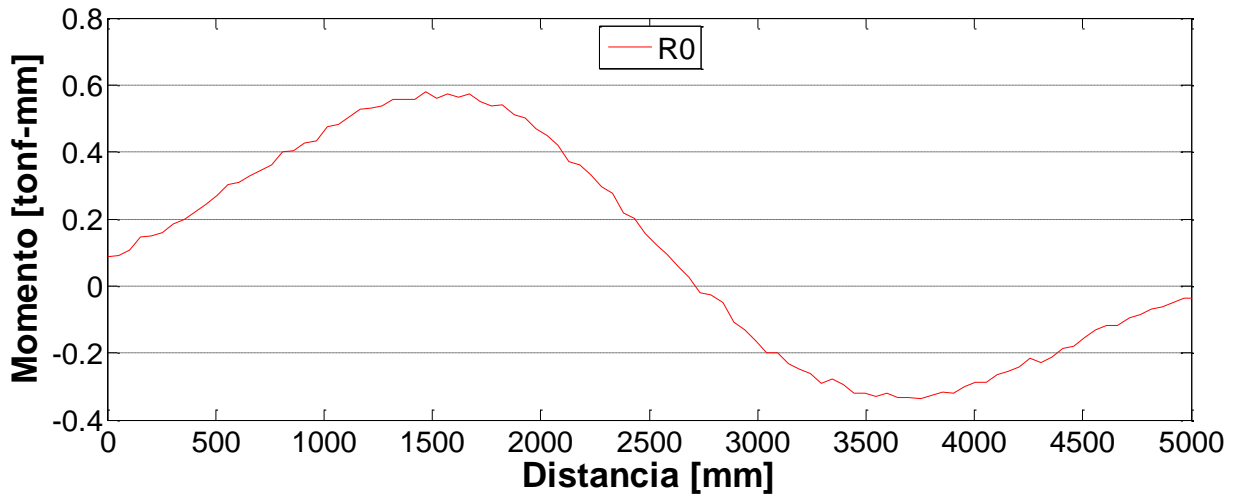


Gráfico 4-13: Diagrama de momento calculado con R0, tipo I.

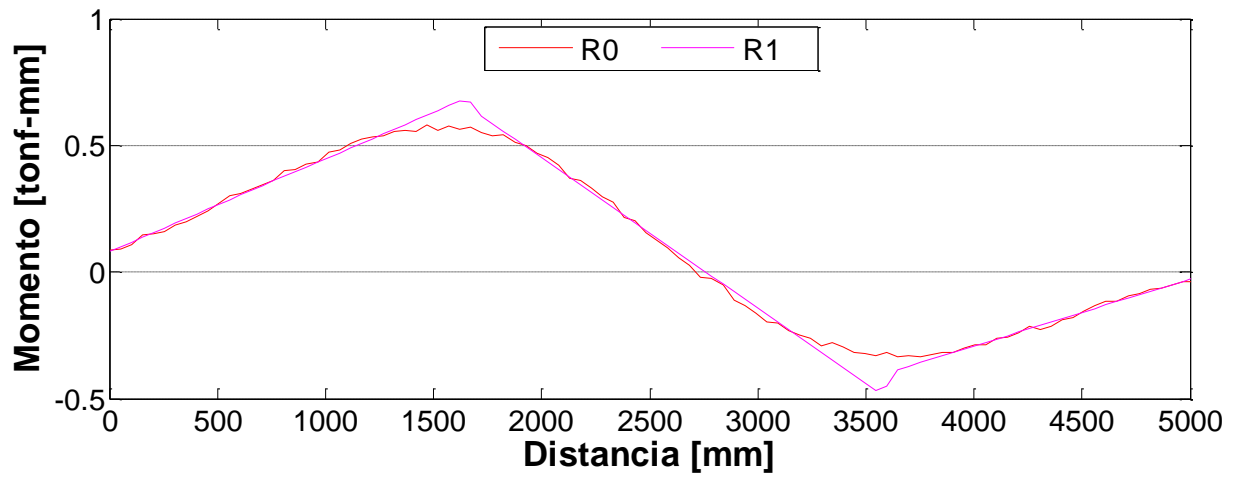


Gráfico 4-14: Regresión R1, tipo I.

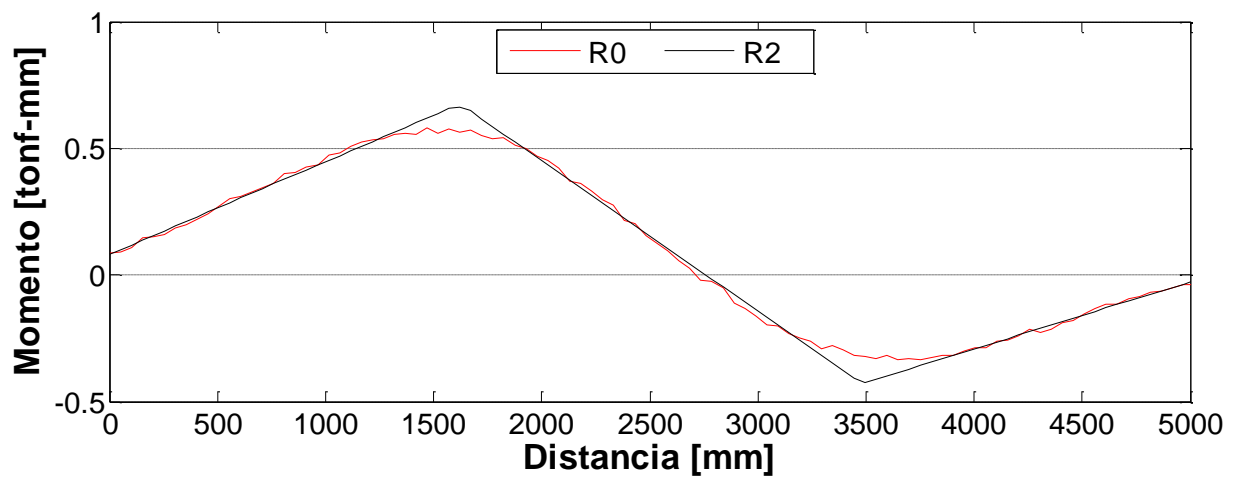


Gráfico 4-15: Regresión R2, tipo I.

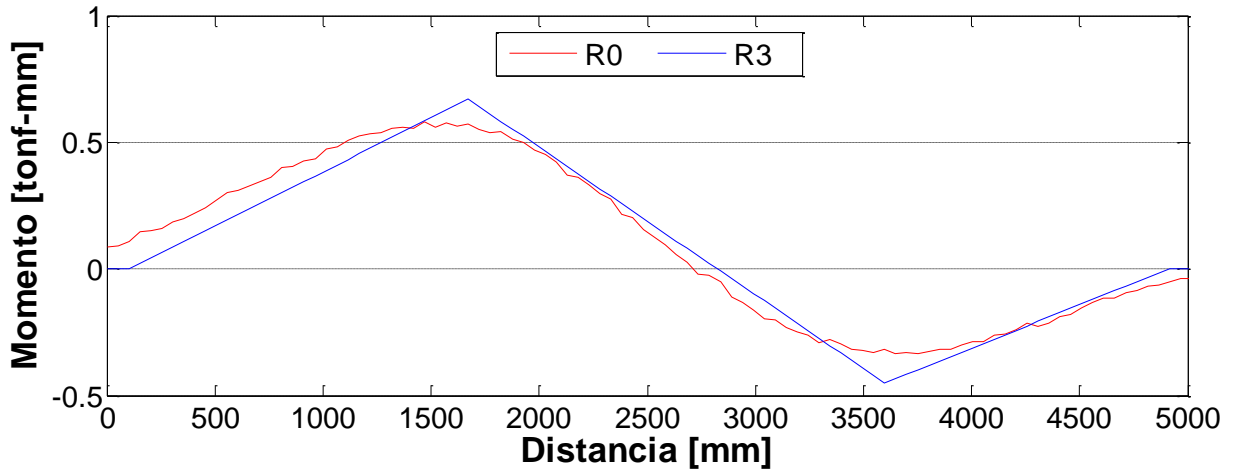


Gráfico 4-16: Regresión R3, tipo I.

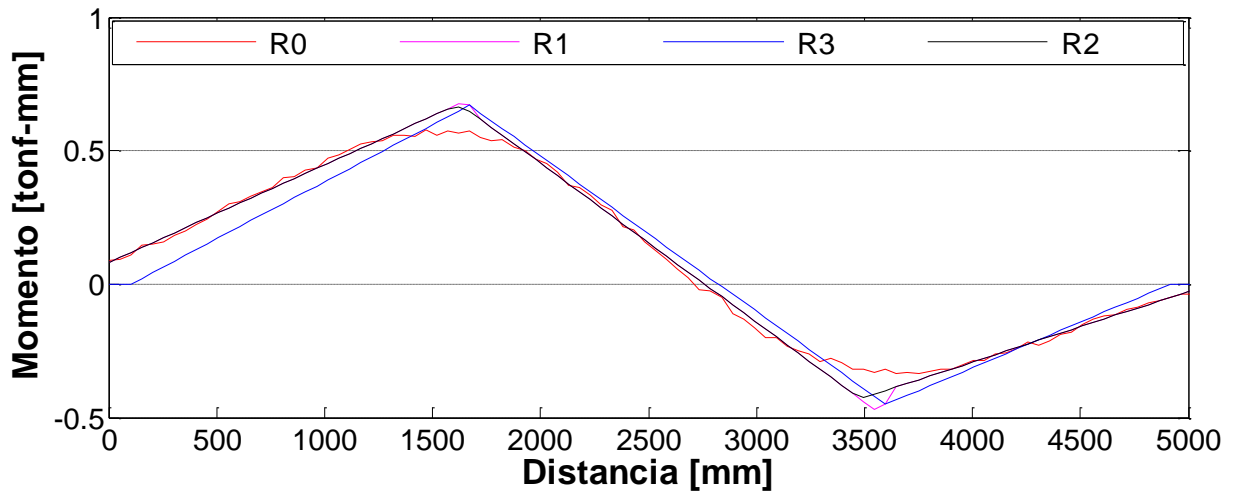


Gráfico 4-17: Todas las regresiones para tipo I.

En los Gráfico 4-13 al Gráfico 4-16 se aprecia las distintas regresiones aplicados a los datos en bruto y al superponerlas se obtiene el Gráfico 4-17. Visualmente no se aprecia mucha diferencia entre los distintos tipos de regresiones, pero más adelante se analizarán las diferencias. Con estas cuatro regresiones se tiene cuatro formas distintas de aproximar los peaks.

A continuación se mostrará los resultados obtenidos por el algoritmo del movimiento tipo IV, ya que presenta datos más promisorios y serán aplicados para cada regresión mostrado anteriormente.

Desviación de Medición para R0

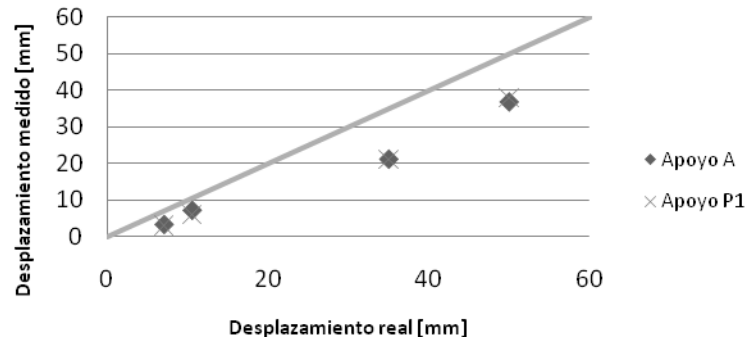


Gráfico 4-18: Resultado para R0, movimiento tipo IV.

Desviación de Medición para R1

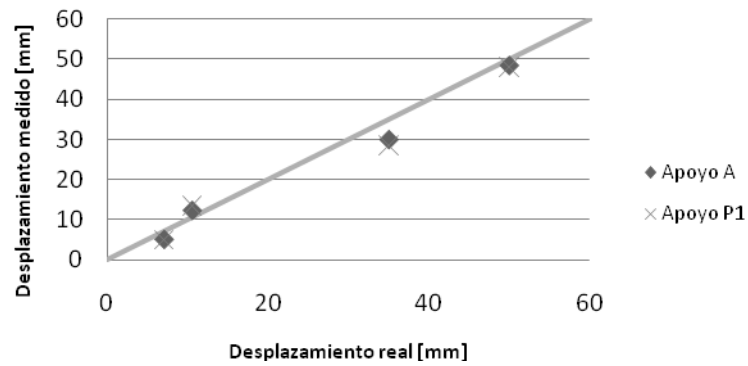


Gráfico 4-19: Resultado para R1, movimiento tipo IV.

Desviación de Medición para R2

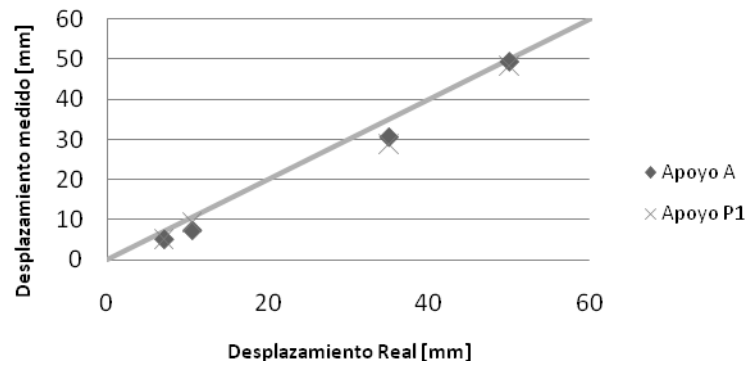


Gráfico 4-20: Resultado para R2, movimiento tipo IV.

Desviación de Medición para R3

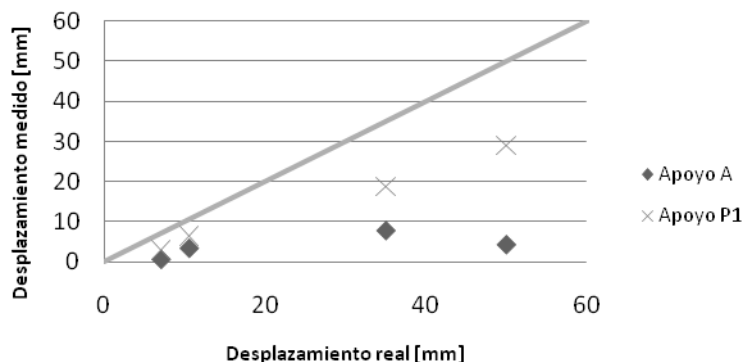


Gráfico 4-21: Resultado para R3, movimiento tipo IV.

Tabla 4-3: Tabla resumen de índices de error para cada regresión.

Regresión	CB 3	CB 4	CB 7	CB 8
R0	0,228	0,228	0,228	0,228
R1	0,155	0,155	0,155	0,155
R2	0,037	0,037	0,037	0,037
R3	0,270	0,446	0,185	0,191

Al comparar los resultados se observa que tanto la regresión R1 como la R2 presentan mejores lecturas que utilizando las regresiones R0 y R3. El Gráfico 4-19 como el Gráfico 4-20, presentan ambos valores muy cercanos a los desplazamientos reales para el movimiento tipo IV. Si no se utilizará la regresión se estaría subestimando el valor real de desplazamiento, como muestra el Gráfico 4-18, en que se tiene hasta 10 mm de diferencia, por lo tanto, al aplicar las regresiones sobre las lecturas del sensor se mejora los datos y permite entregar resultados más exactos en los desplazamientos considerando que la diferencia entre el peak teórico y el máximo obtenido en la lectura no fuera mayor a 0,01% (Gráfico 4-12).

La Tabla 4-3 permite elegir la regresión R2 por sobre R1 debido a que R2 tiene un menor índice de error (0,037) que R1 (0,155). Obtener un menor índice de error es importante ya que nos permite saber qué tanta diferencia hay entre las condiciones de borde, siendo esto un factor clave para elegir R2 como la metodología utilizada para ser aplicada en los datos de terreno.

Las condiciones de borde señaladas por el algoritmo no son únicas para las regresiones R0, R1 y R2, reafirmando lo mencionado anteriormente, que al resuelve un problema inverso no hay solución única. En este caso no existe incertidumbre sobre la condición de borde correcta, pero para los datos de terreno no se debe descartar ninguna condición de borde, por este motivo se deja un rango de 0,05 de error en el índice de manera de abarcar posibles resultados que no

tengan el menor índice de error, pero si muy cercano y considerándolo como un posible movimiento del sensor. En estos casos será importante notar la evolución de las condiciones de borde durante el tiempo de medición.

El caso de la regresión R3 es la que presenta el peor desempeño. Esto puede explicarse por el hecho de forzar las lecturas a que pasen por cero en los extremos y en el promedio de las regresiones hace que la regresión del tramo central cambie de pendiente, perjudicando más de lo que se tenía pensado los resultados de desplazamiento, por lo que queda descartado para ser aplicado en los datos de terreno.

Finalmente la regresión que presentó un mejor desempeño en predecir la condición de borde y un menor error al momento de calcular los desplazamientos es R2, por lo que se usa para los datos de terreno cuyos resultados son presentados en el siguiente capítulo.

5 RESULTADOS PARA DATOS DE TERRENO.

Una vez que el modelo ha sido probado para los datos de laboratorio con éxito, el siguiente paso natural es probarlos con los datos de terreno, pero antes de ser ingresados hay ciertas observaciones que se deben discutir sobre la información recolectada.

5.1 Observaciones sobre mediciones en Terreno.

Como se ha mencionado con anterioridad se dispone de 7 sensores operativos, correspondientes a las zonas de hundimiento y producción. De estos sensores el que más llama la atención es el ubicado en calle 13, nivel hundimiento, llegando a una deformación cercana al 0.15%, mientras que en las otras calles para ambos niveles no superan una deformación del 0.05%, sobrepasando levemente el rango de error de lectura del analizador BOTDR correspondiente al 0.01%.

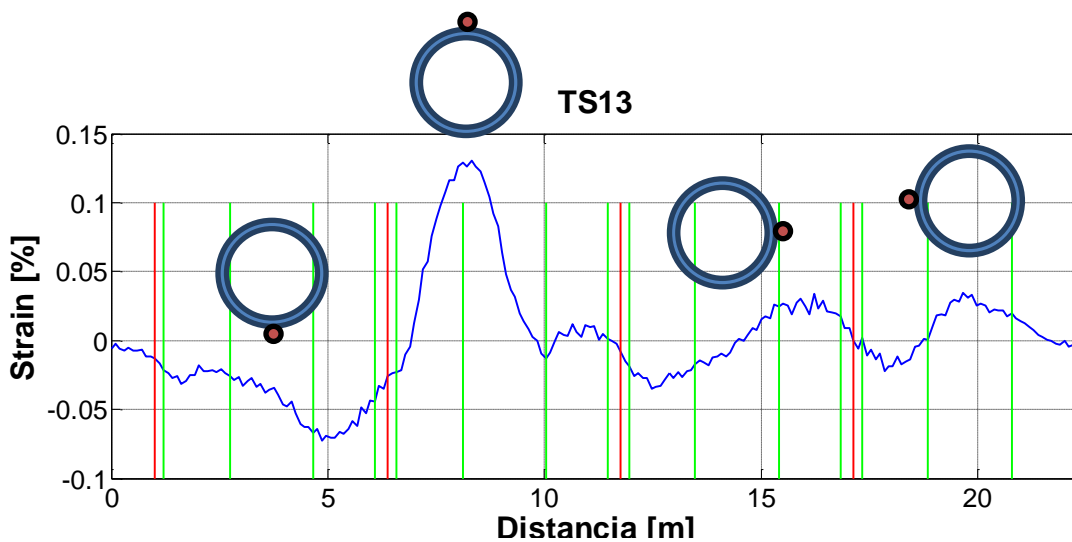


Gráfico 5-1: Deformación del sensor TS13 debido a mantención.

Lamentablemente estas deformaciones no son parte del movimiento de la falla, sino que son producidas por una reparación al sensor TS13, (reportado en “Informes de Trabajos Realizados”, de la empresa J C Faúndez, 13 de Noviembre 2009) y como consecuencia dejó una deformación permanente en el tubo, que es lo observado en el Gráfico 5-1. A pesar de esta deformación artificial (no producido por la roca) se demuestra que el sensor está operativo y funcionando. Para poder utilizar dichos datos en el algoritmo se deja como dato inicial la lectura del 13/11, a las 13:40, para los siguientes días dejando el análisis del mes de noviembre del sensor TS13 dividido entre un antes y un después de la mantención.

Por el contrario para los sensores de las calles 11 en hundimiento y 14 en producción no detectaron deformaciones considerables lo que presume un movimiento relativo nulo entre los apoyos.

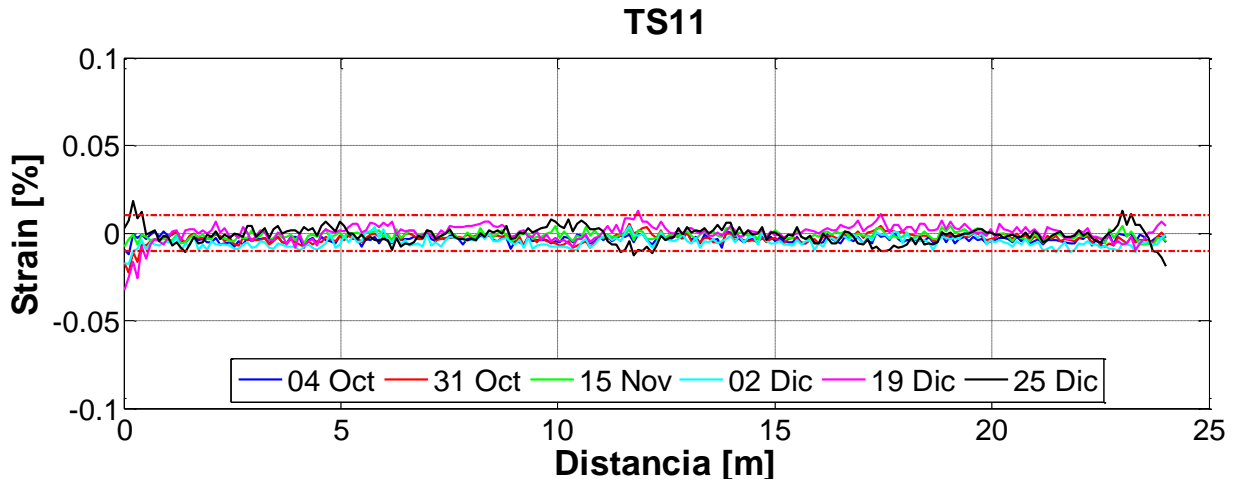


Gráfico 5-2: Deformación del sensor TS11 en seis días, zona hundimiento

El Gráfico 5-2 justifica la marginación del análisis del sensor TS11 dado que no existe una deformación detectada por la fibra, asumiendo que los desplazamientos relativos en los apoyos son nulos.

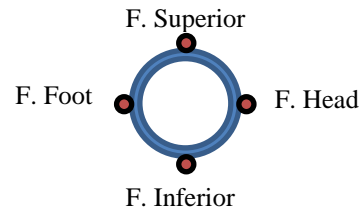
Los gráficos de terreno no presentan una lectura simétrica como los gráficos de laboratorio por las deformaciones de las fibras opuestas. Hay que recordar que existen dos lecturas de deformación por eje, las que deben ser simétricas o por lo menos tener lecturas similares entre la fibra superior e inferior, pero esto no se cumple en los datos de terreno. Debido a la poca simetría de las lecturas se escoge una de las dos fibras y se crea una lectura espejo de la fibra, de manera que el algoritmo pueda estimar el movimiento del sensor con solo una fibra.

Uno de los problemas que presentaron los datos de terreno fue la incerteza de la posición de los apoyos del sensor y se usó como criterio que los peaks de las deformaciones coincidieran con los apoyos del sensor, pero siempre respetando las distancias entre apoyos (Tabla 3-3). Es por este motivo que se extrae las lecturas con más distancias que las que ocuparía el sensor, para acomodar la fibra óptica lo mejor posible, entre los peaks de deformación y los apoyos del sensor. Más adelante en el capítulo se observará la sensibilidad al elegir distintas posiciones de los apoyos dentro de los datos de deformación de la fibra para determinar qué tan influyente es la ubicación de los apoyos en el algoritmo.

La Tabla 5-1 indica cuales fibras se utilizan de cada sensor, en la zona de hundimiento.

Tabla 5-1: Fibras utilizadas en el algoritmo para cada sensor

Sensor	F. Superior	F. Inferior	F. Fw	F. Hw
TS12		X	X	
TS13		X		X
TS14	X			



5.2 Resultados Datos Terreno.

Los datos recopilados de los niveles de hundimiento y producción, (4 sensores en nivel hundimiento y 3 en producción), son introducidos al algoritmo, pero antes se realiza una recapitulación.

- Los resultados solo contemplan los datos de la zona de hundimiento ya que presenta mediciones más confiables que las entregadas por el nivel producción (Anexo B).
- Se utilizaron las condiciones de borde mostradas en la Tabla 3-5.
- A pesar que los sensores TS12 y TS13 presentan deformaciones menores al error instrumental, se les aplica el algoritmo para tener una mayor diversidad de resultados en los datos de terreno.
- Antes de los resultados de cada sensor se mostrará un gráfico con la evolución temporal de la fibra del sensor en 6 días, de los 3 meses, mostrando la tendencia de desplazamiento que va teniendo el sensor.
- Los resultados de los sensores están divididos por mes (Octubre, Noviembre, Diciembre).

Los pasos que se utilizarán para escoger una condición de borde serán los siguientes:

- 1) Por cada lectura del sensor se considera una condición de borde como posible movimiento de sensor cuando tiene el menor índice de error (IE_{min}) o con una diferencia menor o igual a 0.05 con respecto a IE_{min} .
- 2) Después de (1), se escoge la condición de borde que más se repite a lo largo del mes, pero, se debe observar que dicha condición de borde esté presente a lo largo del periodo de análisis (1 mes).
- 3) Si al final de (1) y (2) aún existen condiciones de borde como probables movimientos, se debe tener en cuenta los movimientos más lógicos que pueda tener el sensor y desplazamientos acordes a las deformaciones detectadas.

5.2.1 Resultados sensor TS12, hundimiento.

En el Gráfico 5-3 se muestran seis lecturas de distintos días, con esto se observa la tendencia a lo largo de los tres meses de mediciones. Además se agrega como línea punteada el error instrumental del aparato BOTDR en la medición.

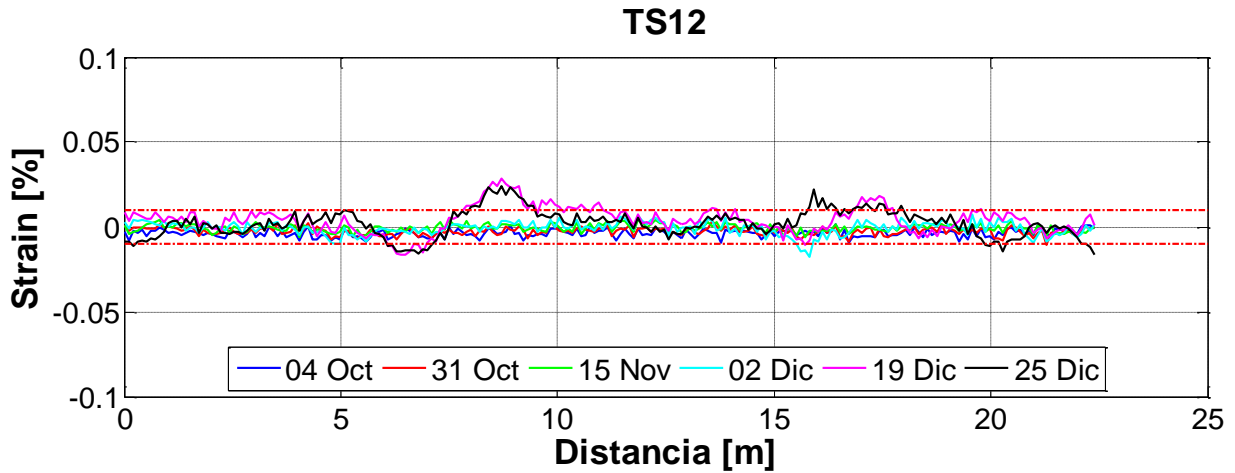


Gráfico 5-3: Deformación sensor TS12 para 6 días.

Las lecturas de los días 19 y 25 de Diciembre presentan deformaciones sobre el error instrumental, indicando una posible detección de deformación por parte del sensor.

Los resultados obtenidos para el sensor TS12, en el mes de Octubre se presentan a continuación:

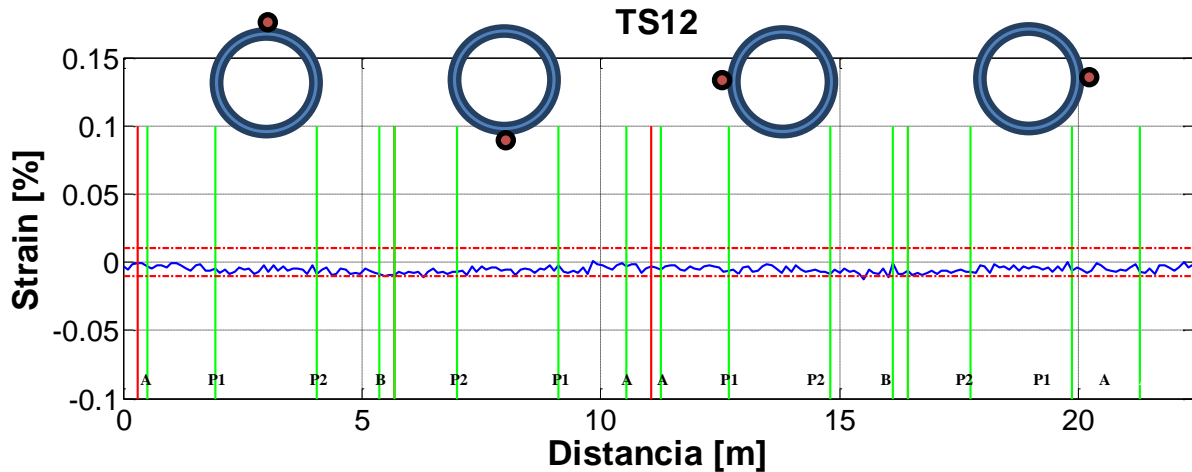


Gráfico 5-4: Deformación del sensor TS12 a finales de Octubre.

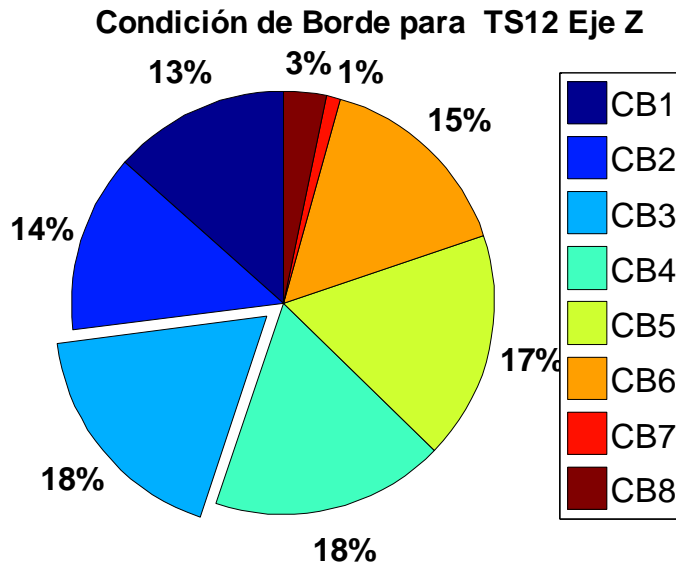


Gráfico 5-5: Condiciones de borde para TS12 Eje Z, Octubre.

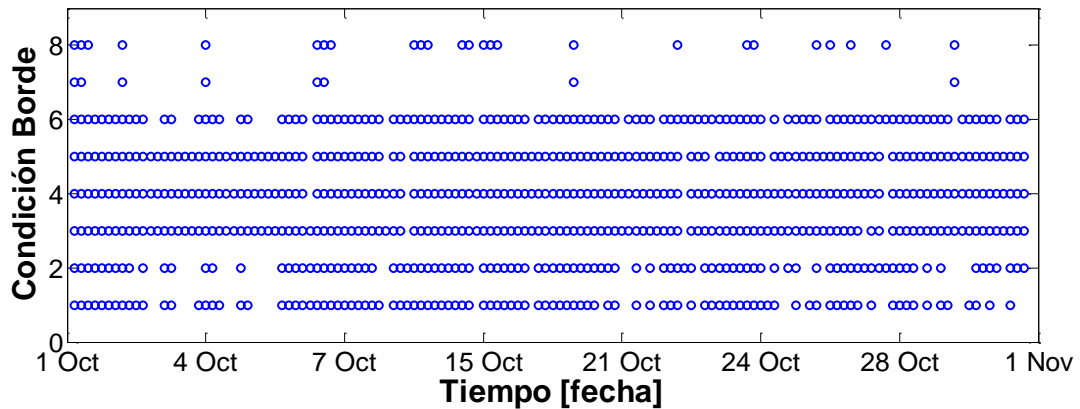


Gráfico 5-6: Distribución de Condición de Borde TS12 Eje Z (Octubre).

El Gráfico 5-5 muestra las condiciones de borde que más se repiten a lo largo del mes, en un gráfico tipo torta, sobresaliendo fuera de la torta la condición de borde con mayor porcentaje. Además se debe complementar la información entregada por el Gráfico 5-5 con el Gráfico 5-6, que indica con un círculo azul las condiciones de borde que cumplen con IE_{\min} más 0.05 en el mes. Con estos dos gráficos se puede relacionar las condiciones de borde que más se repiten con su distribución a lo largo del mes, de manera que se puede analizar el comportamiento del sensor durante el mes.

Finalmente se entrega en la Tabla 5-2 los desplazamientos (en mm) y giros (en radianes) para todas las condiciones de bordes. Los valores destacados en rojo representan el desplazamiento del apoyo para esa condición de borde y al final de la columna, se muestran los índices de error (IE) obtenidos para cada condición de borde. La Figura 5-1 muestra los desplazamientos de los apoyos en el sensor.

Tabla 5-2: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS12 Eje Z (Octubre).

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	1,399	-	9,8	5,1	-	-	-	-
	Giro	-0,001	-5,1E-05	-0,004	-0,004	-0,004	0,0003	0,005	0,002
P1	Corte	-	-0,05	4,1	-	-4,6	-	-	2,6
	Giro	-0,001	-4,3E-07	-0,004	-0,003	-0,002	-0,0007	-0,009	0,001
P2	Corte	-	-	-	-2,7	-4,8	-1,5	-38,7	-
	Giro	0,0001	1,9E-05	-0,0008	0,001	0,003	0,0003	-0,03	-0,005
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	-76,0	-7,5
	Giro	-5,9E-05	-9,5E-06	0,0004	0,003	0,005	0,002	-0,03	-0,007
Índice Error		0,121	0,097	0,097	0,098	0,099	0,061	0,346	0,126

Según el Gráfico 5-4, la condición de borde que más se repite es CB3 y aparece constantemente a lo largo de Octubre, según el Gráfico 5-6.



Figura 5-1: Desplazamiento de apoyos TS12 Eje Z, Octubre.

Finalmente se vuelve a repetir los gráficos para el eje Y del sensor.

Condición de Borde para TS12 Eje Y

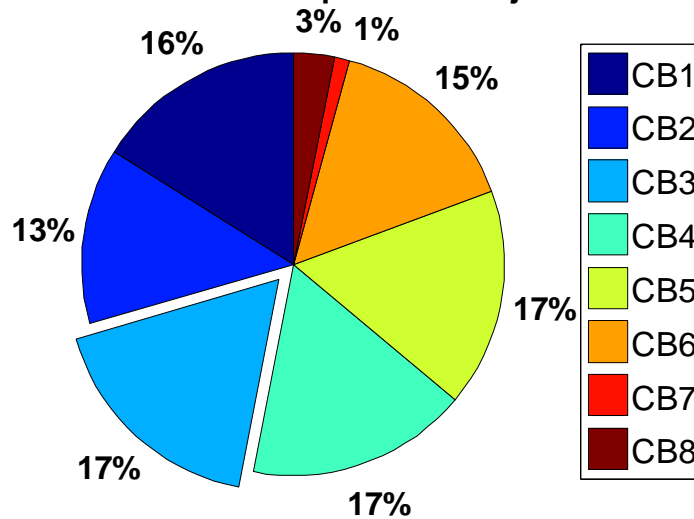


Gráfico 5-7: Condiciones de borde para TS12 Eje Y, Octubre.

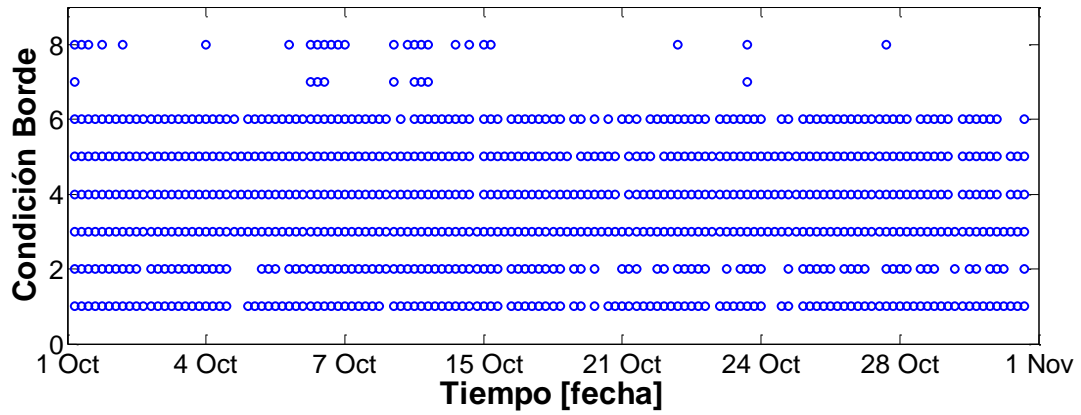


Gráfico 5-8: Distribución de Condición de Borde TS12 Eje Y (Octubre).

Tabla 5-3: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS12 Eje Y (Octubre).

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	0,670	-	7,0	4,0	-	-	-	-
	Giro	-0,001	1,3E-04	-0,003	-0,003	-0,003	0,0003	0,004	0,002
P1	Corte	-	0,13	3,1	-	-3,9	-	-	2,8
	Giro	0,000	1,1E-06	-0,003	-0,003	-0,002	-0,0007	-0,009	0,001
P2	Corte	-	-	-	-2,3	-4,3	-1,4	-37,3	-
	Giro	0,0001	-5,0E-05	-0,0006	0,001	0,002	0,0002	-0,03	-0,005
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	-73,2	-7,5
	Giro	-2,8E-05	2,5E-05	0,0003	0,003	0,004	0,002	-0,03	-0,007
Índice Error		0,087	0,067	0,072	0,082	0,090	0,058	0,451	0,166



Figura 5-2: Desplazamiento de apoyos TS12 Eje Y, Octubre.

A continuación se presentan los resultados del mes de Noviembre para el sensor TS12.

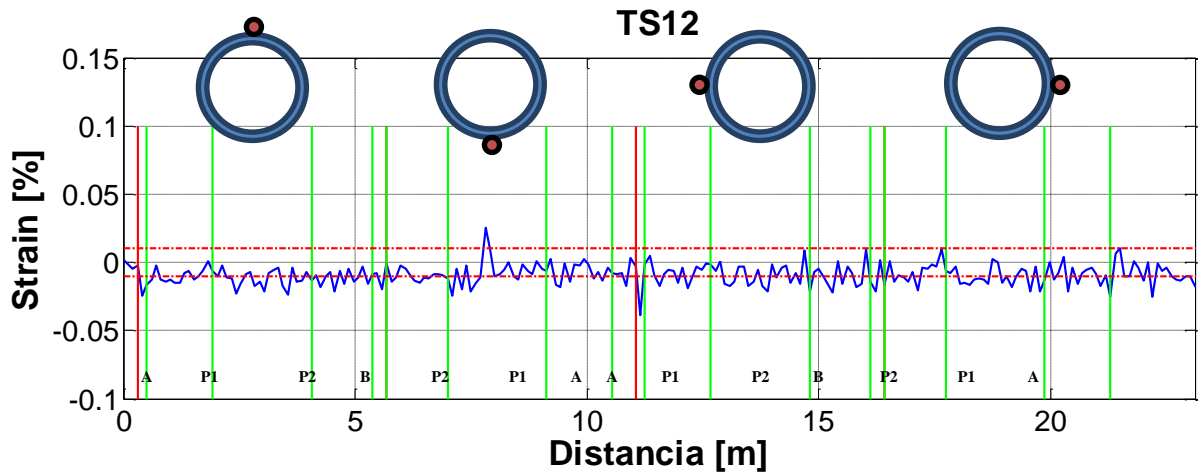


Gráfico 5-9: Deformación del sensor TS12 a finales de Noviembre.

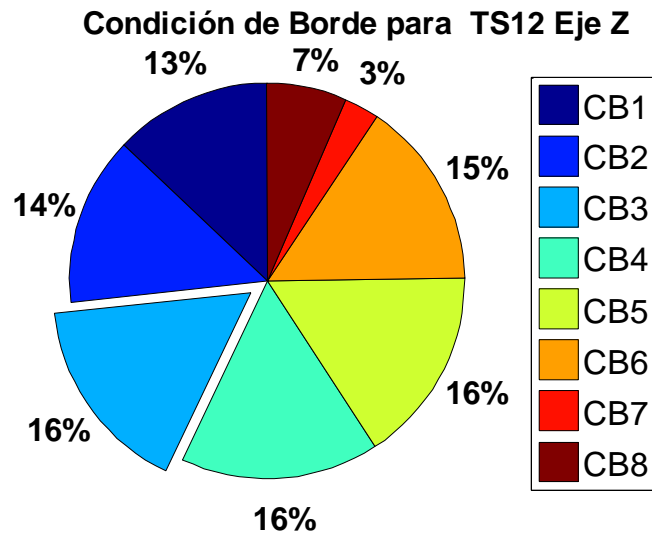


Gráfico 5-10: Condiciones de borde para TS12 Eje Z, Noviembre.

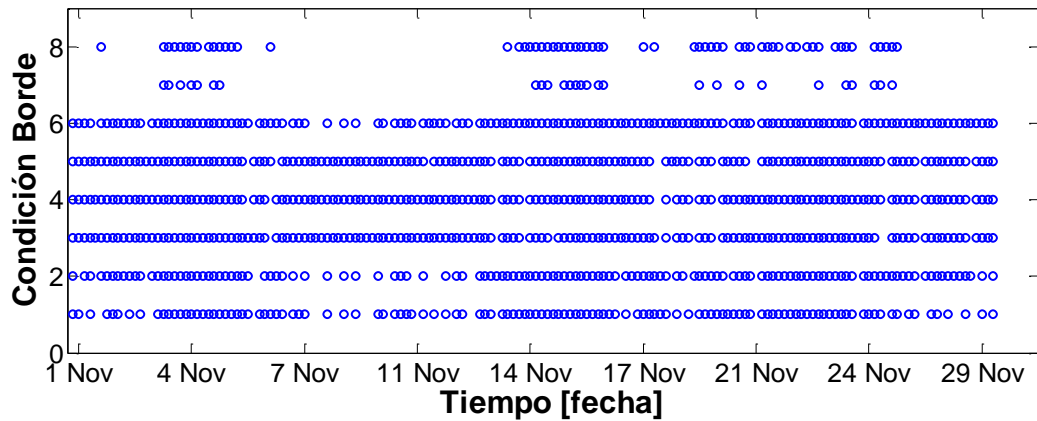


Gráfico 5-11: Distribución de Condición de Borde TS12 Eje Z (Noviembre).

Tabla 5-4: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS12 Eje Z (Noviembre).

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	0,741	-	8,3	3,9	-	-	-	-
	Giro	-0,001	1,9E-04	-0,003	-0,003	-0,003	0,0003	0,004	0,002
P1	Corte	-	0,18	3,7	-	-3,5	-	-	2,6
	Giro	-0,0003	1,6E-06	-0,003	-0,003	-0,002	-0,0006	-0,008	0,001
P2	Corte	-	-	-	-2,3	-4,0	-1,4	-34,6	-
	Giro	0,0001	-7,0E-05	-0,0008	0,001	0,002	0,0002	-0,03	-0,004
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	-67,7	-6,9
	Giro	-3,1E-05	3,5E-05	0,0004	0,003	0,004	0,002	-0,03	-0,007
Índice Error		0,111	0,083	0,103	0,102	0,101	0,045	0,349	0,121



Figura 5-3: Desplazamiento de apoyos TS12 Eje Z, Noviembre.

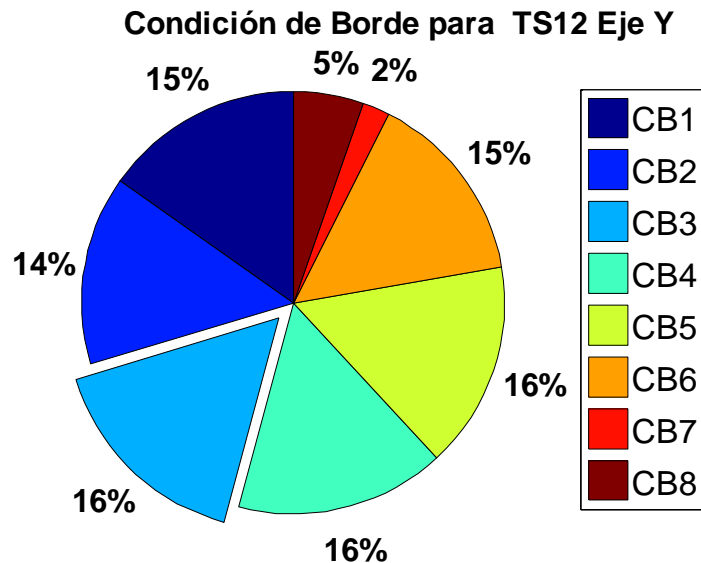


Gráfico 5-12: Condiciones de borde para TS12 Eje Y, Noviembre.

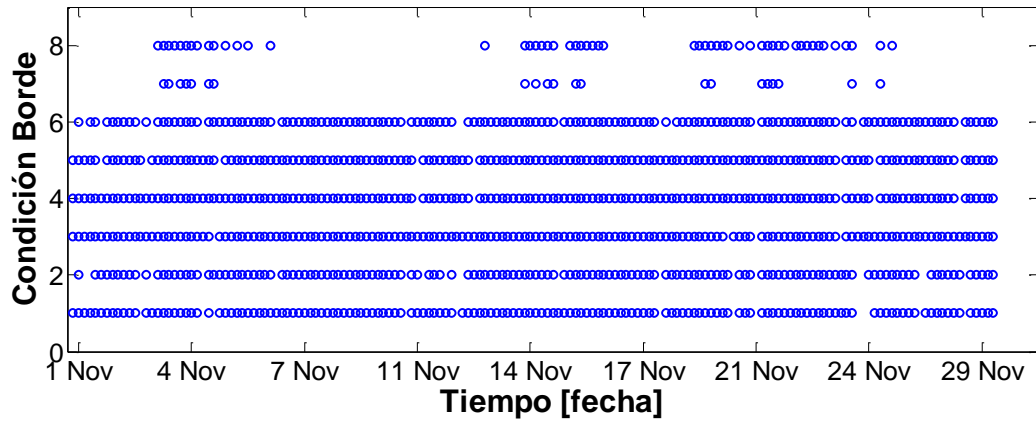


Gráfico 5-13: Distribución de Condición de Borde TS12 Eje Y (Noviembre).

Tabla 5-5: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS12 Eje Y (Noviembre).

GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	4,953	-	14,0	7,8	-	-	-
	Giro	-0,004	-1,6E-03	-0,008	-0,006	-0,005	0,0001	0,002
P1	Corte	-	-1,52	4,4	-	-5,6	-	-1,1
	Giro	-0,0018	-1,3E-05	-0,005	-0,004	-0,002	-0,0001	-0,003
P2	Corte	-	-	-	-2,1	-4,4	-0,2	-13,7
	Giro	0,0004	6,0E-04	-0,0006	0,001	0,003	0,00004	-0,01
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	-27,5
	Giro	-2,1E-04	-3,0E-04	0,0003	0,002	0,004	0,000	-0,01
Índice Error	0,047	0,064	0,080	0,074	0,072	0,088	0,284	0,115

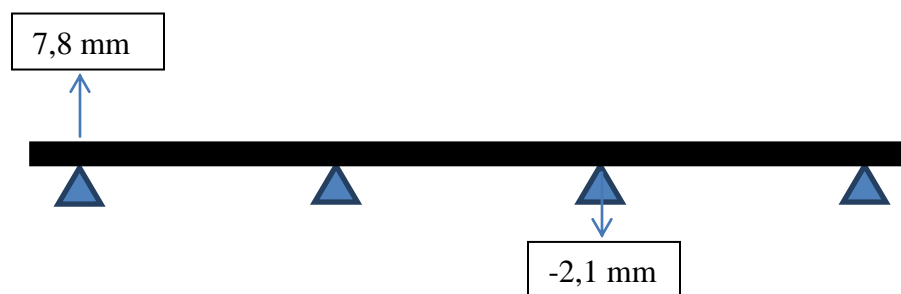


Figura 5-4: Desplazamiento de apoyos TS12 Eje Y, Noviembre.

A continuación se presentan los resultados del mes de Diciembre para el sensor TS12.

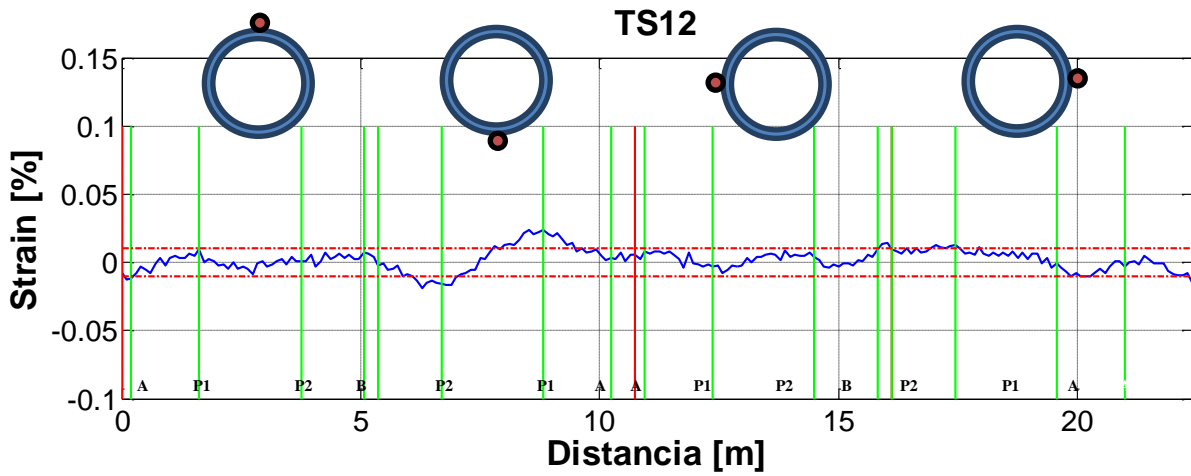


Gráfico 5-14: Deformación del sensor TS12 a finales de Diciembre.

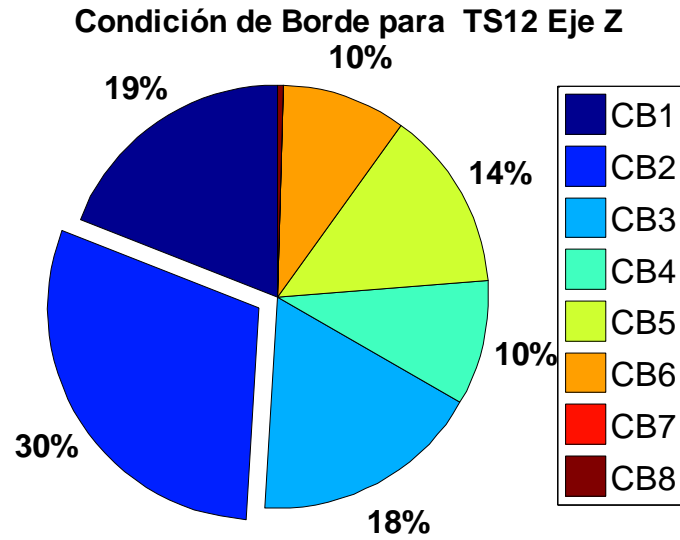


Gráfico 5-15: Condiciones de borde para TS12 Eje Z, Diciembre.

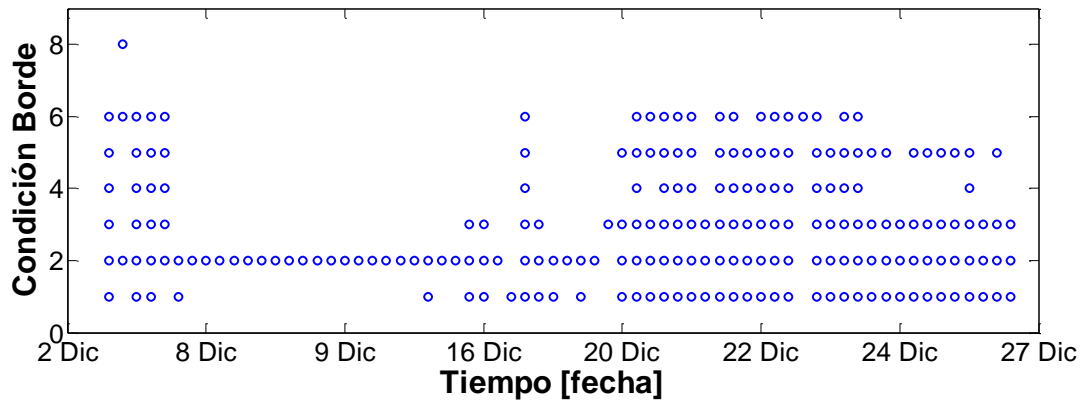


Gráfico 5-16: Distribución de Condición de Borde TS12 Eje Z (Diciembre).

Tabla 5-6: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS12 Eje Z (Diciembre)

GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-6,7	-	-11,8	-5,7	-	-	-
	Giro	0,006	2,7E-03	0,008	0,005	0,002	0,0005	0,005
P1	Corte	-	2,5	-2,5	-	2,0	-	6,6
	Giro	0,0024	2,2E-05	0,004	0,002	0,000	-0,0010	-0,010
P2	Corte	-	-	-	-0,7	-0,6	-2,0	-42,8
	Giro	-0,0006	-1,0E-03	0,0000	0,000	-0,001	0,00036	-0,03
B	Corte	-	-	-	-	-76,0	-83,1	-11,3
	Giro	2,8E-04	5,0E-04	0,0000	0,001	0,001	0,002	-0,04
Índice Error	0,206	0,248	0,253	0,283	0,271	0,315	1,110	0,433



Figura 5-5: Desplazamiento de apoyos TS12 Eje Z, Diciembre.

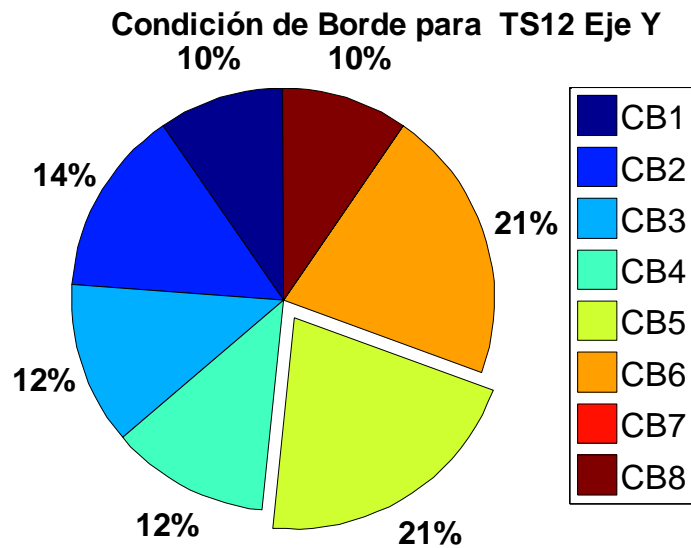


Gráfico 5-17: Condiciones de borde para TS12 Eje Y, Diciembre.

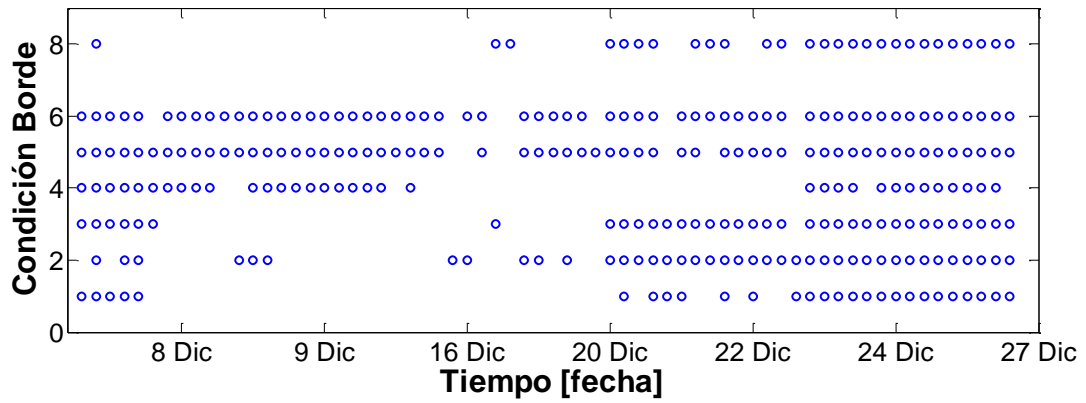


Gráfico 5-18: Distribución de Condición de Borde TS12 Eje Y (Diciembre).

Tabla 5-7: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS12 Eje Y (Diciembre)

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	1,9	-	-10,6	-3,7	-	-	-	-
	Giro	-0,002	-1,7E-03	0,003	0,002	0,003	-0,0007	-0,009	-0,007
P1	Corte	-	-1,6	-6,1	-	4,2	-	-	-7,3
	Giro	-0,0007	-1,4E-05	0,004	0,003	0,003	0,0015	0,017	-0,0020
P2	Corte	-	-	-	4,0	6,3	3,1	72,9	-
	Giro	0,0002	6,4E-04	0,0015	-0,001	-0,003	-0,00054	0,06	0,0106
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	142,3	15,9
	Giro	-8,0E-05	-3,2E-04	-0,0008	-0,005	-0,007	-0,004	0,06	0,015
Índice Error		0,226	0,234	0,220	0,244	0,237	0,228	0,457	0,214



Figura 5-6: Desplazamiento de apoyos TS12 Eje Y, Diciembre.

5.2.2 Resultados sensor TS13, hundimiento.

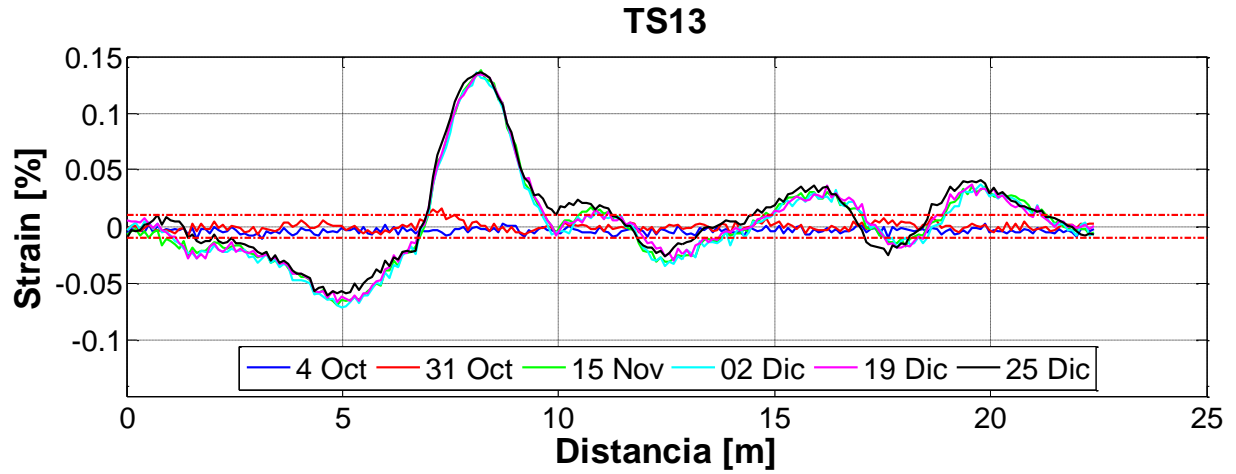


Gráfico 5-19: Deformación del sensor TS13 para 6 días.

A continuación se presentan los resultados del mes de Octubre para el sensor TS13.

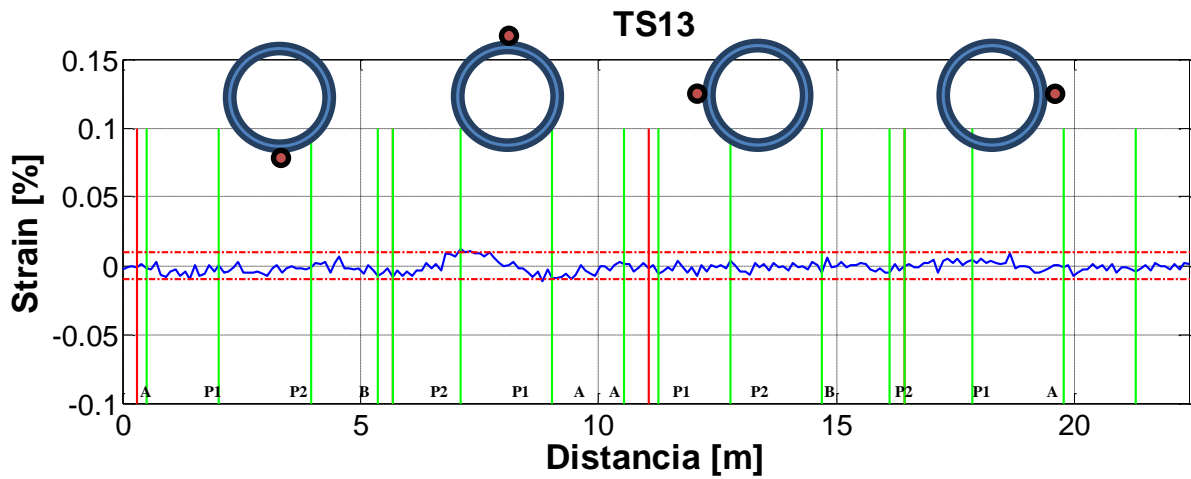


Gráfico 5-20: Deformación del sensor TS13 a finales de Octubre.

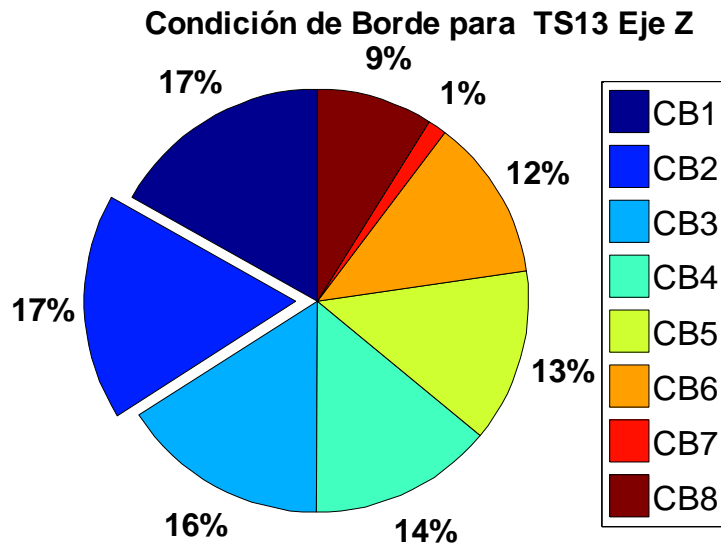


Gráfico 5-21: Condiciones de borde para TS13 Eje Z, Octubre.

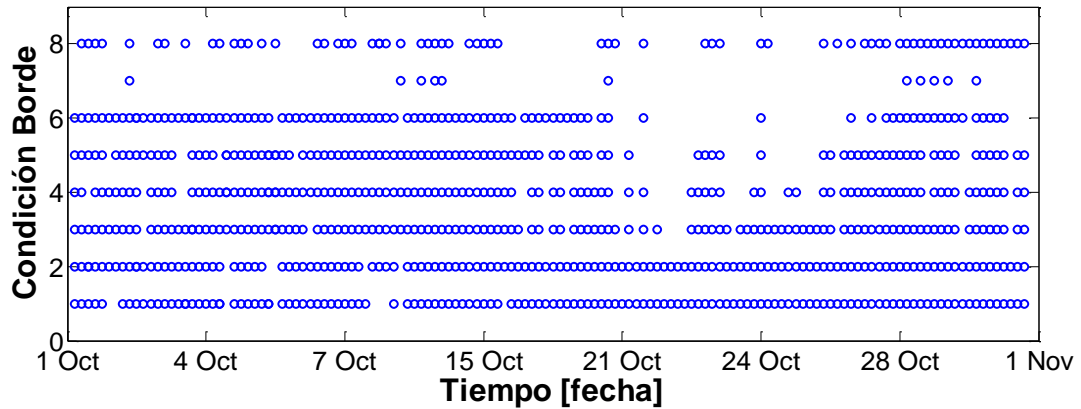


Gráfico 5-22: Distribución de Condición de Borde TS13 Eje Z (Octubre).

Tabla 5-8: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS13 Eje Z (Octubre).

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-4,8	-	6,7	-3,7	-	-	-	-
	Giro	0,004	2,9E-03	0,000	0,003	0,004	0,0004	0,002	0,005
P1	Corte	-	2,7	5,4	-	4,3	-	-	4,7
	Giro	0,0017	-1,6E-04	-0,003	0,001	0,001	-0,0008	-0,005	0,0004
P2	Corte	-	-	-	-0,7	1,7	-1,5	-16,3	-
	Giro	-0,0004	-1,2E-03	-0,0018	0,000	-0,002	0,00018	-0,01	-0,0047
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	-31,6	-5,7
	Giro	2,0E-04	6,0E-04	0,0009	0,001	-0,001	0,002	-0,01	-0,005
Índice Error		0,092	0,103	0,116	0,123	0,122	0,143	0,218	0,100



Figura 5-7: Desplazamiento de apoyos TS13 Eje Z, Octubre.

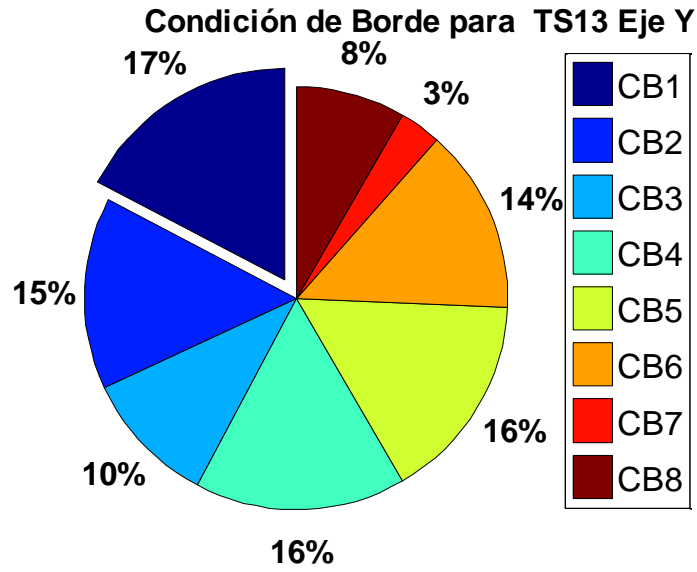


Gráfico 5-23: Condiciones de borde para TS13 Eje Y, Octubre.

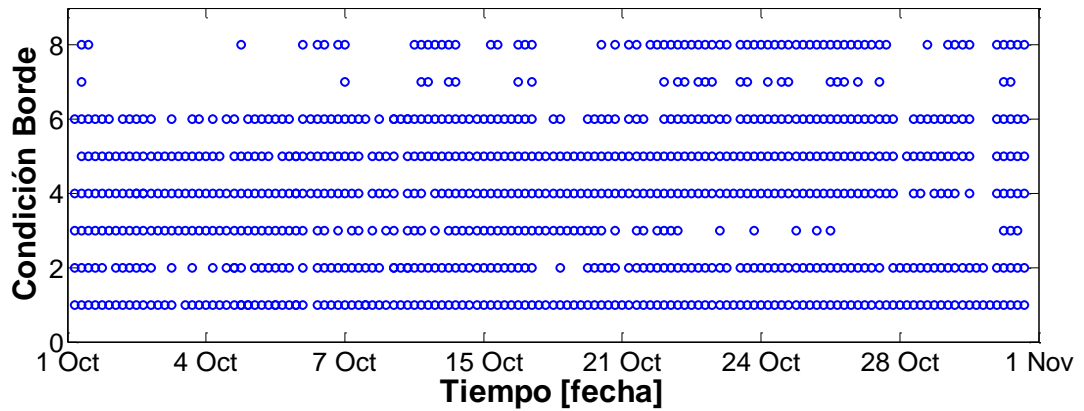


Gráfico 5-24: Distribución de Condición de Borde TS13 Eje Y (Octubre).

Tabla 5-9: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS13 Eje Y (Octubre).

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-2,7	-	-8,2	-4,7	-	-	-	-
	Giro	0,002	7,4E-04	0,004	0,004	0,003	-0,0001	-0,002	0,000
P1	Corte	-	0,7	-2,6	-	3,4	-	-	0,04
	Giro	0,0009	-4,1E-05	0,003	0,002	0,001	0,0002	0,003	-0,0002
P2	Corte	-	-	-	1,4	2,9	0,3	11,2	-
	Giro	-0,0002	-3,0E-04	0,0004	-0,001	-0,002	-0,00004	0,01	0,0009
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	23,4	1,9
	Giro	1,1E-04	1,5E-04	-0,0002	-0,001	-0,003	0,000	0,01	0,002
Índice Error		0,064	0,101	0,117	0,079	0,092	0,073	0,169	0,101



Figura 5-8: Desplazamiento de apoyos TS13 Eje Y, Octubre.

A continuación se presentan los resultados del mes de Noviembre antes de la mantención para el sensor TS13.

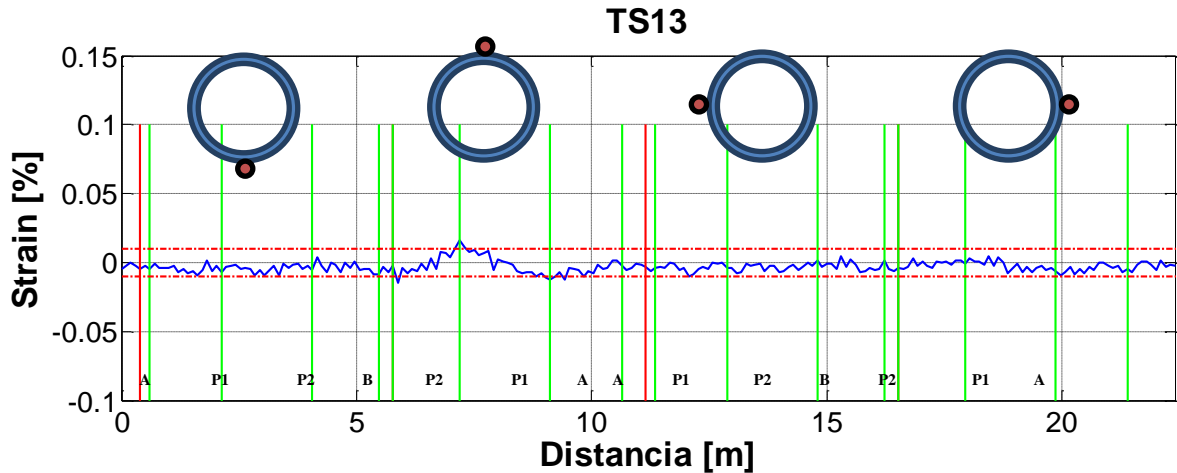


Gráfico 5-25: Deformación del sensor TS12 antes de mantención, Noviembre.

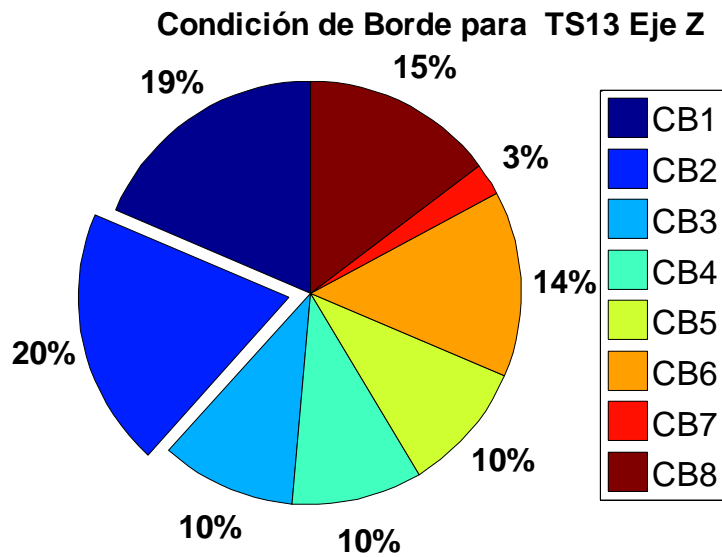


Gráfico 5-26: Condiciones de borde para TS13 Eje Z, Noviembre (antes 13/11).

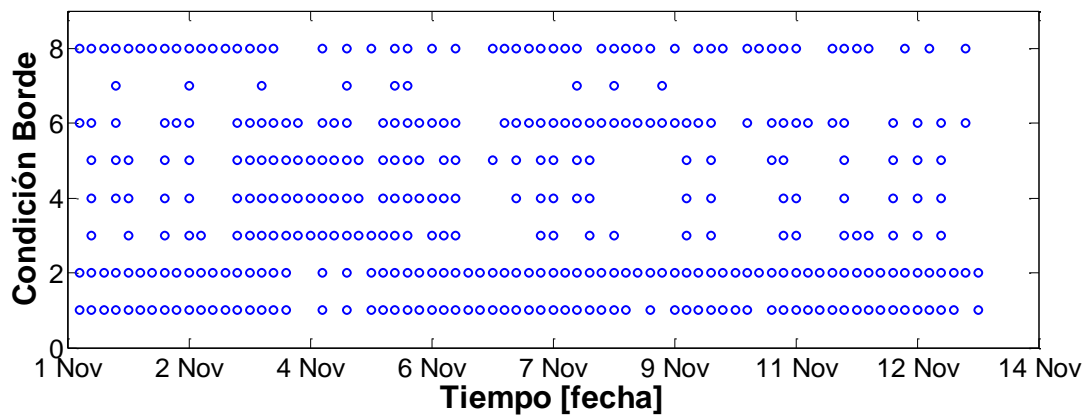


Gráfico 5-27: Distribución de Condición de Borde TS13 Eje Z (Noviembre antes 13/11).

Tabla 5-10: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS13 Eje Z (Noviembre antes 13/11).

GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-6,2	-	1,5	-6,2	-	-	-
	Giro	0,006	3,3E-03	0,003	0,005	0,006	0,0004	0,002
P1	Corte	-	3,0	3,6	-	5,9	-	4,8
	Giro	0,0022	-1,8E-04	-0,001	0,002	0,001	-0,0008	-0,003
P2	Corte	-	-	-	0,0	3,1	-1,4	-11,8
	Giro	-0,0005	-1,3E-03	-0,0015	-0,001	-0,003	0,00016	-0,01
B	Corte	-	-	-	-	-76,0	-22,3	-5,1
	Giro	2,6E-04	6,7E-04	0,0007	0,000	-0,002	0,002	-0,01
Índice Error	0,072	0,107	0,154	0,161	0,165	0,192	0,466	0,145



Figura 5-9: Desplazamiento de apoyos TS13 Eje Z, Noviembre (antes 13/11).

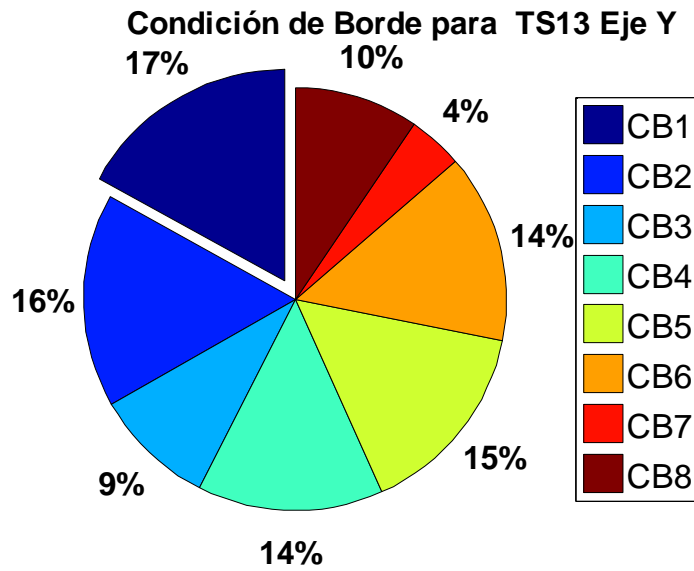


Gráfico 5-28: Condiciones de borde para TS13 Eje Y, Noviembre (antes 13/11).

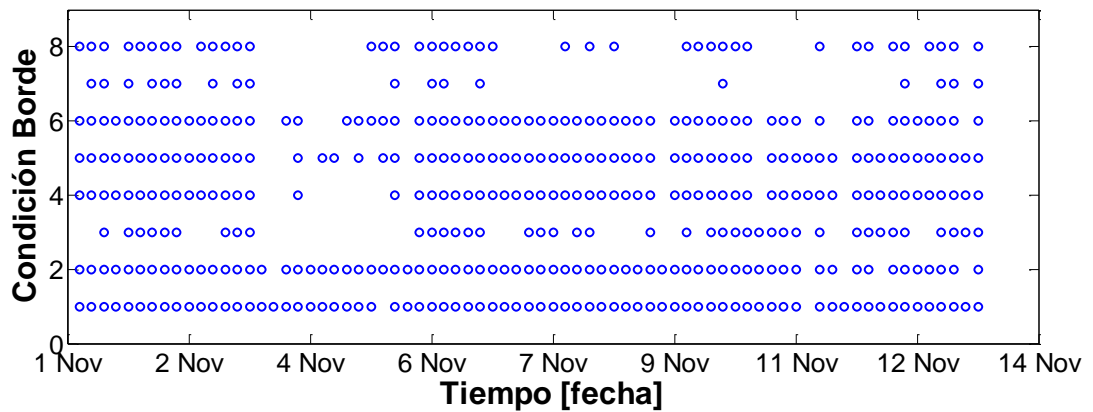


Gráfico 5-29: Distribución de Condición de Borde TS13 Eje Y (Noviembre antes 13/11).

Tabla 5-11: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS13 Eje Y (Noviembre antes 13/11).

GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-4,3	-	-18,2	-9,0	-	-	-
	Giro	0,004	8,2E-04	0,009	0,007	0,005	-0,0003	-0,004
P1	Corte	-	0,8	-6,5	-	6,5	-	-1,3
	Giro	0,0015	-4,6E-05	0,007	0,005	0,003	0,0006	0,008
P2	Corte	-	-	-	3,2	6,0	1,2	30,7
	Giro	-0,0004	-3,3E-04	0,0013	-0,001	-0,004	-0,00013	0,03
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	63,3
	Giro	1,8E-04	1,7E-04	-0,0007	-0,004	-0,006	-0,001	0,03
Índice Error	0,109	0,127	0,117	0,100	0,107	0,106	0,109	0,107



Figura 5-10: Desplazamiento de apoyos TS13 Eje Y, Noviembre (antes 13/11).

A continuación se presentan los resultados después de la mantención del mes de Noviembre para el sensor TS13.

:

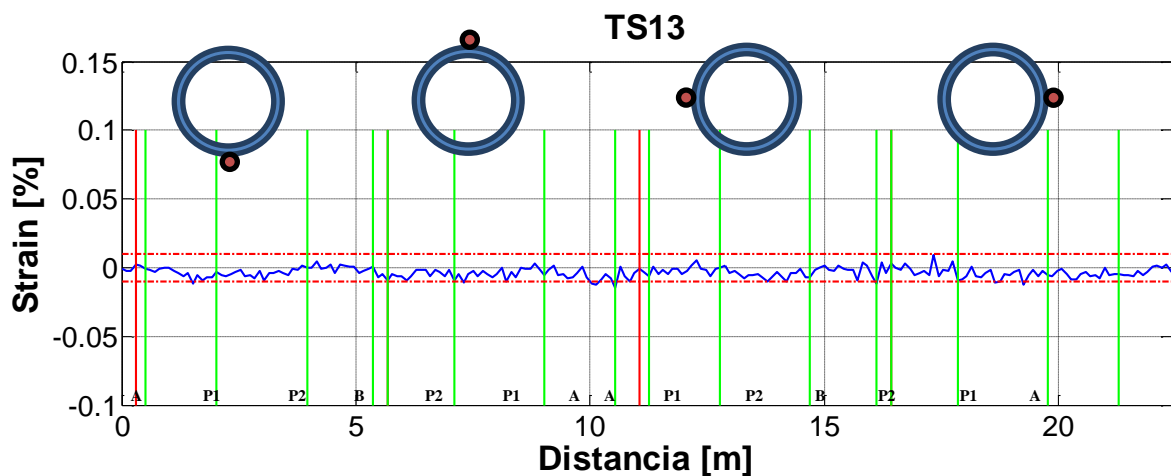


Gráfico 5-30: Deformación del sensor TS12 a finales de Noviembre (reiniciado 13/11).

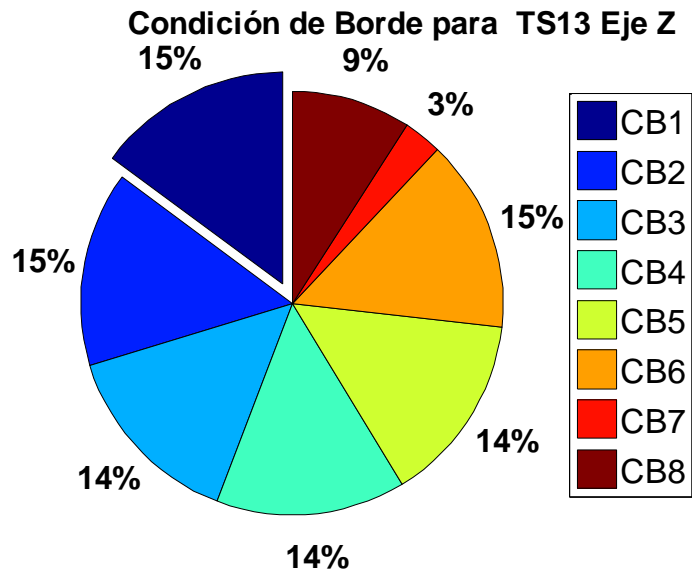


Gráfico 5-31: Condiciones de borde para TS13 Eje Z, Noviembre.

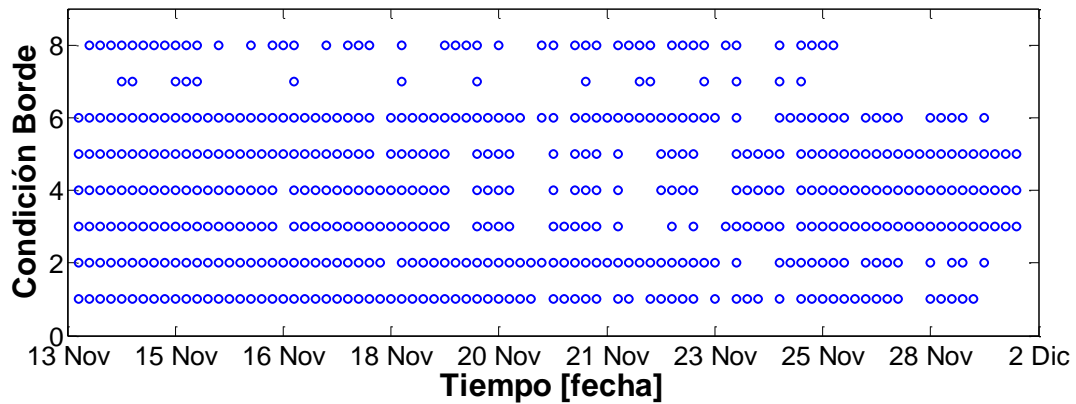


Gráfico 5-32: Distribución de Condición de Borde TS13 Eje Z (Noviembre después 13/11).

Tabla 5-12: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS13 Eje Z (Noviembre después 13/11).

GL		CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-4,9	-	-18,2	-7,9	-	-	-	-
	Giro	0,004	1,2E-03	0,009	0,006	0,004	-0,0001	-0,001	0,001
P1	Corte	-	1,1	-6,2	-	4,4	-	-	0,98
	Giro	0,0017	-6,4E-05	0,007	0,004	0,002	0,0001	0,002	-0,0001
P2	Corte	-	-	-	2,0	3,6	0,2	7,8	-
	Giro	-0,0004	-4,7E-04	0,0012	-0,001	-0,002	-0,00002	0,01	-0,0003
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	16,3	0,2
	Giro	2,1E-04	2,3E-04	-0,0006	-0,002	-0,003	0,000	0,01	0,000
Índice Error		0,072	0,059	0,093	0,085	0,078	0,044	0,047	0,064



Figura 5-11: Condiciones de borde para TS13 Eje Z, Noviembre (después 13/11).

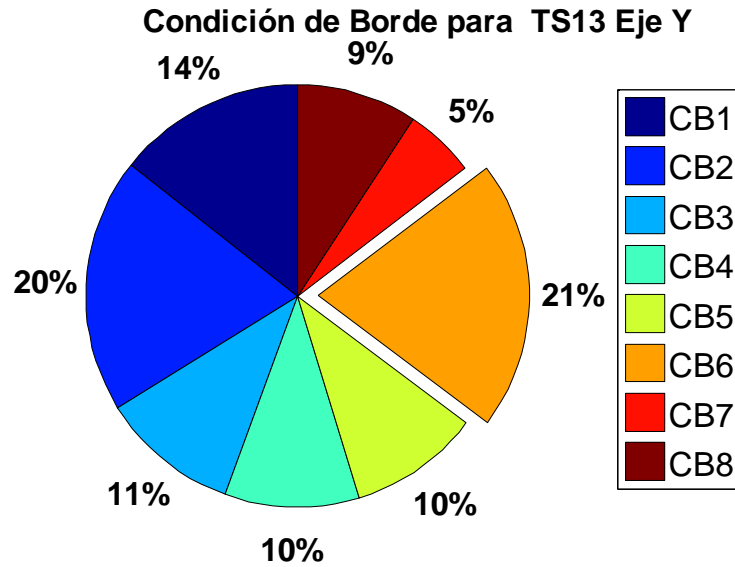


Gráfico 5-33: Condiciones de borde para TS13 Eje Y, Noviembre (después 13/11).

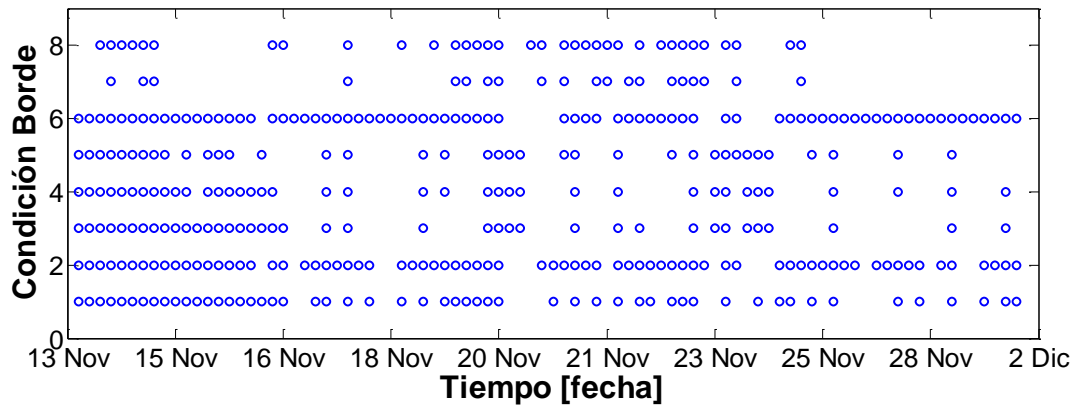


Gráfico 5-34: Distribución de Condición de Borde TS13 Eje Y (Noviembre después 13/11).

Tabla 5-13: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS13 Eje Y (Noviembre después 13/11).

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-3,6	-	-17,7	-6,7	-	-	-	-
	Giro	0,003	4,9E-04	0,008	0,005	0,003	-0,0002	-0,002	0,000
P1	Corte	-	0,4	-6,6	-	3,5	-	-	-0,24
	Giro	0,0012	-2,7E-05	0,007	0,003	0,002	0,0003	0,004	-0,0002
P2	Corte	-	-	-	2,1	3,3	0,6	13,1	-
	Giro	-0,0003	-2,0E-04	0,0014	-0,001	-0,002	-0,00007	0,01	0,0010
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	26,7	2,0
	Giro	1,5E-04	9,9E-05	-0,0007	-0,002	-0,003	-0,001	0,01	0,002
Índice Error		0,126	0,078	0,201	0,201	0,201	0,101	0,695	0,217



Figura 5-12: Condiciones de borde para TS13 Eje Y, Noviembre (después 13/11).

A continuación se presentan los resultados del mes de Diciembre para el sensor TS13.

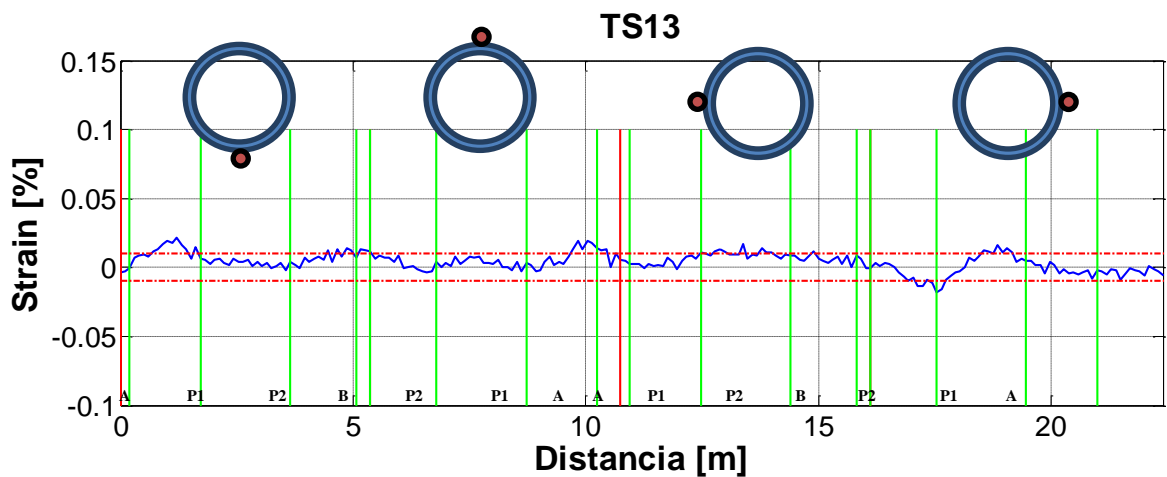


Gráfico 5-35: Deformación del sensor TS13 a finales de Diciembre.

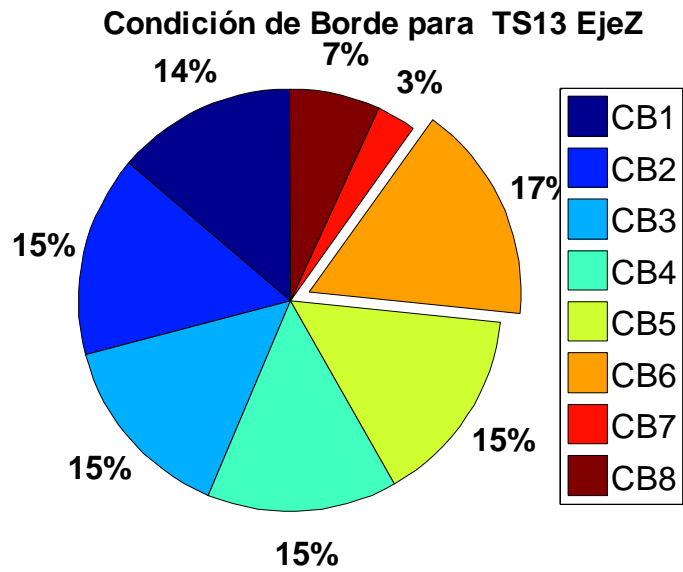


Gráfico 5-36: Condiciones de borde para TS13 Eje Z, Diciembre.

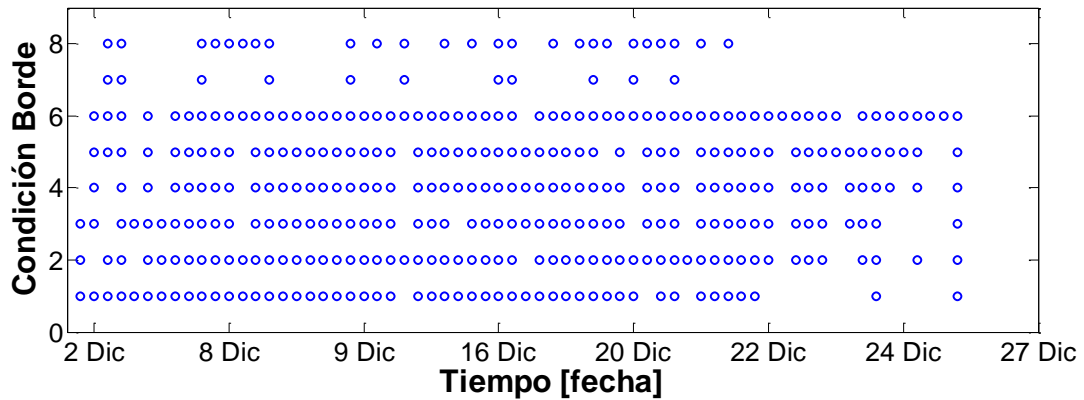


Gráfico 5-37: Distribución de Condición de Borde TS13 Eje Z (Diciembre).

Tabla 5-14: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS13 Eje Z (Diciembre).

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	11,4	-	59,0	24,9	-	-	-	-
	Giro	-0,010	-1,4E-03	-0,028	-0,020	-0,013	0,0009	0,011	0,004
P1	Corte	-	-1,3	22,2	-	-16,1	-	-	4,4
	Giro	-0,0040	7,8E-05	-0,022	-0,013	-0,007	-0,0019	-0,023	0,0018
P2	Corte	-	-	-	-9,0	-15,6	-3,5	-82,8	-
	Giro	0,0010	5,7E-04	-0,0048	0,003	0,009	0,00040	-0,07	-0,0097
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	-169,7	-16,5
	Giro	-4,8E-04	-2,9E-04	0,0024	0,010	0,016	0,004	-0,08	-0,016
Índice Error		0,223	0,219	0,175	0,182	0,188	0,191	0,729	0,357



Figura 5-13: Condiciones de borde para TS13 Eje Z, Diciembre.

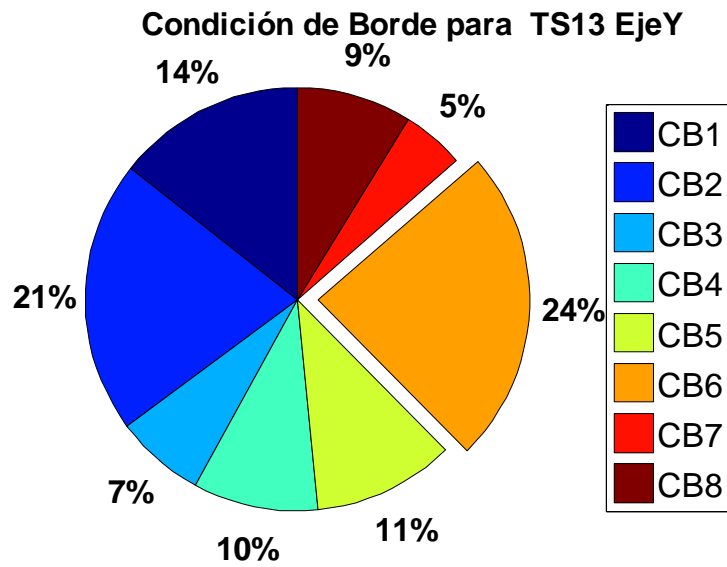


Gráfico 5-38: Condiciones de borde para TS13 Eje Y, Diciembre.

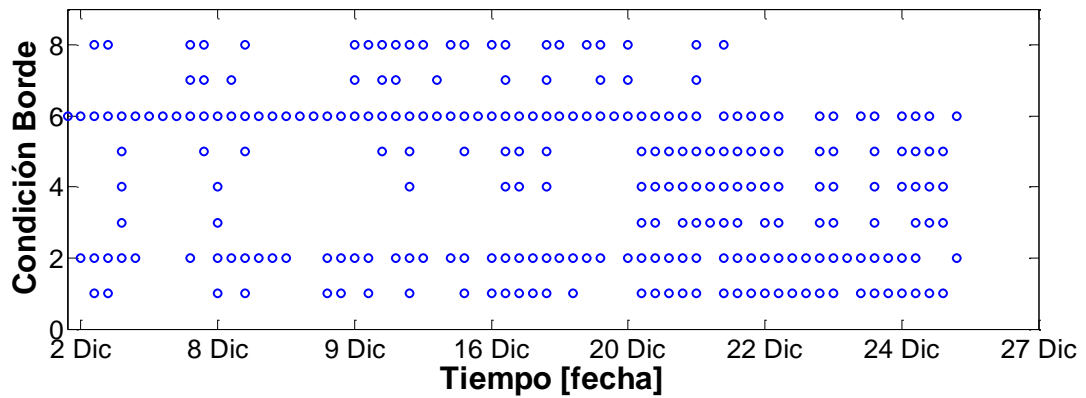


Gráfico 5-39: Distribución de Condición de Borde TS13 Eje Y (Diciembre).

Tabla 5-15: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS13 Eje Y (Diciembre).

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	4,2	-	21,6	10,1	-	-	-	-
	Giro	-0,004	-5,1E-04	-0,010	-0,008	-0,006	0,0005	0,006	0,002
P1	Corte	-	-0,5	8,1	-	-7,3	-	-	2,6
	Giro	-0,0014	2,9E-05	-0,008	-0,006	-0,003	-0,0009	-0,011	0,0010
P2	Corte	-	-	-	-3,9	-7,2	-1,7	-42,0	-
	Giro	0,0004	2,1E-04	-0,0018	0,001	0,004	0,00019	-0,04	-0,0054
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	-86,3	-8,9
	Giro	-1,8E-04	-1,0E-04	0,0009	0,004	0,007	0,002	-0,04	-0,009
Índice Error		0,211	0,134	0,273	0,265	0,258	0,160	1,144	0,396

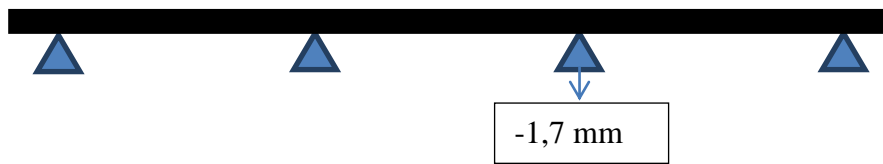


Figura 5-14: Condiciones de borde para TS13 Eje Y, Diciembre.

5.2.3 Resultados sensor TS14, hundimiento.

En este sensor no se consideró las deformaciones laterales debido a una medida puntual que afectó la lectura de la fibra óptica, alterando las mediciones. Además la forma no se asemeja a ninguna de las condiciones expuestas en el laboratorio y para evitar alguna mala interpretación de resultados se decide excluirla del análisis.

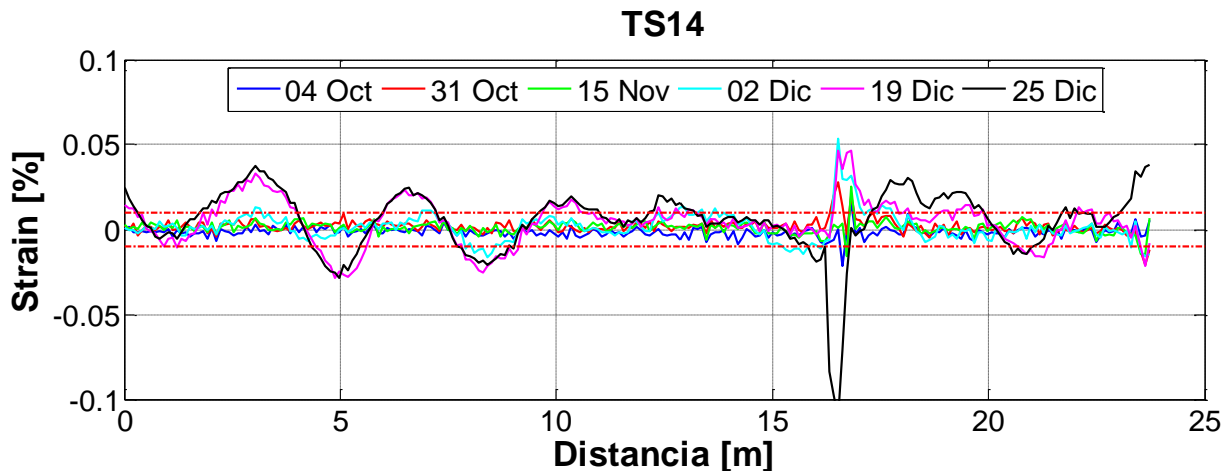


Gráfico 5-40: Deformación del sensor TS14 para 6 días.

A continuación se presentan los resultados del mes de Octubre para el sensor TS14.

:

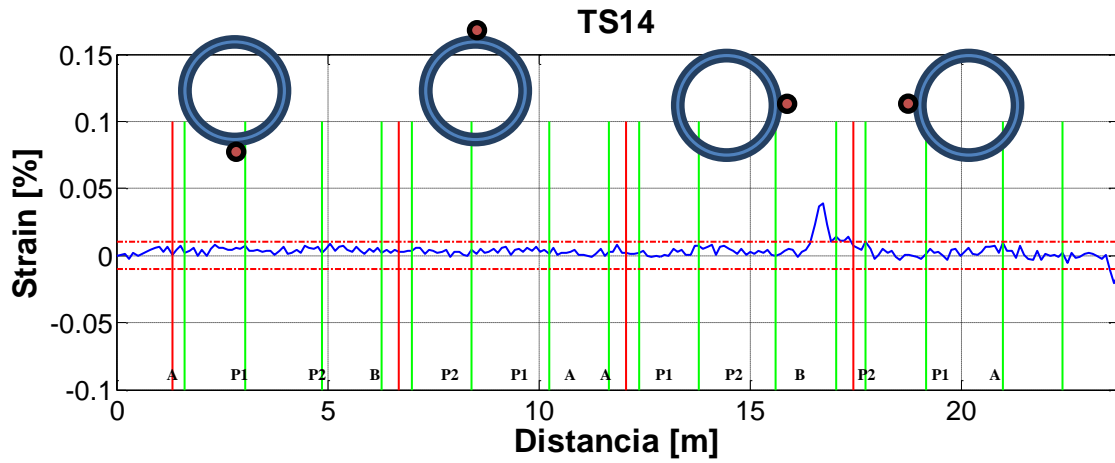


Gráfico 5-41: Deformación del sensor TS14 a finales de Octubre.

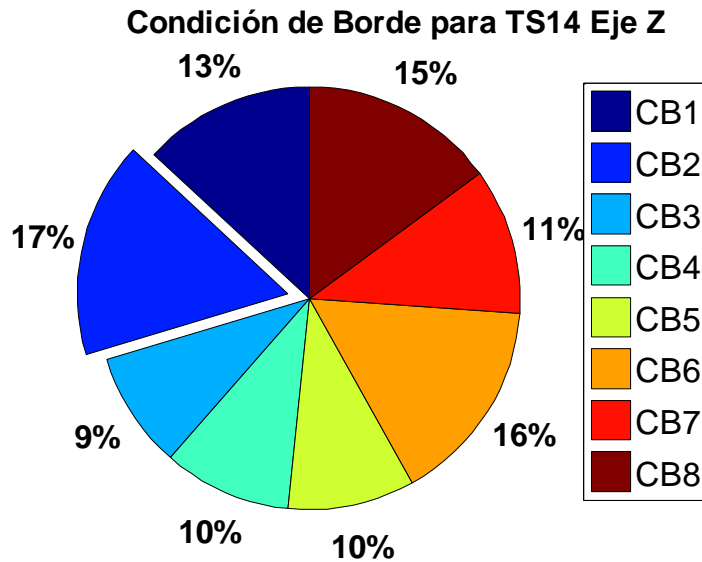


Gráfico 5-42: Condiciones de borde para TS14 Eje Z, Octubre.

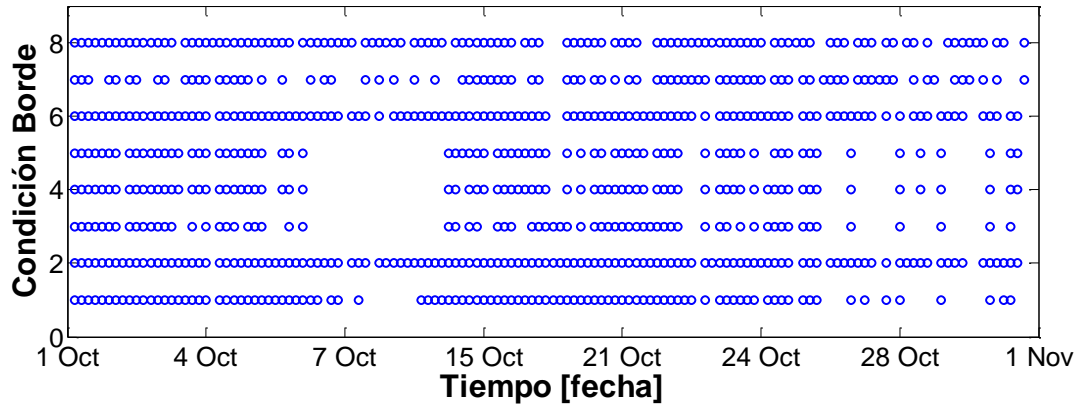


Gráfico 5-43: Distribución de Condición de Borde TS14 Eje Z (Octubre).

Tabla 5-16: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS14 Eje Z (Octubre).

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-5,9	-	-29,0	-13,5	-	-	-	-
	Giro	0,005	1,1E-03	0,014	0,011	0,008	-0,0003	-0,003	-0,001
P1	Corte	-	1,0	-10,8	-	9,4	-	-	-1,20
	Giro	0,0021	-5,9E-05	0,011	0,007	0,005	0,0007	0,007	-0,0007
P2	Corte	-	-	-	5,8	10,9	1,4	23,0	-
	Giro	-0,0006	-5,7E-04	0,0032	0,000	-0,003	0,00036	0,02	0,0034
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	67,7	12,1
	Giro	3,2E-04	2,8E-04	-0,0016	-0,005	-0,007	-0,001	0,03	0,008
Índice Error		0,194	0,150	0,310	0,306	0,303	0,154	0,133	0,084

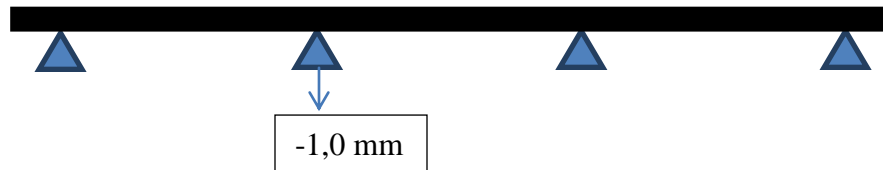


Figura 5-15: Condiciones de borde para TS14 Eje Z, Octubre.

A continuación se presentan los resultados del mes de Noviembre para el sensor TS14.

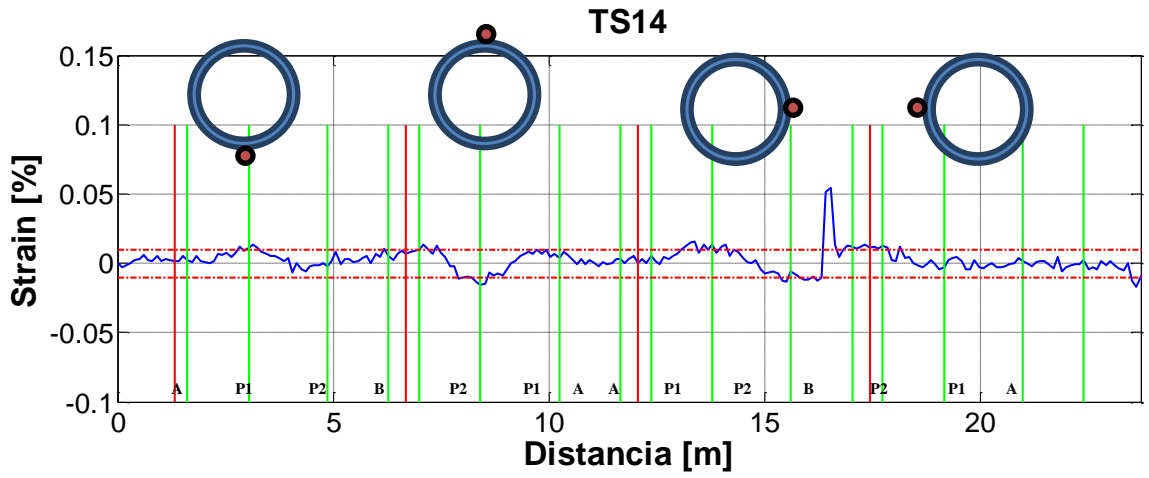


Gráfico 5-44: Deformación del sensor TS14 a finales de Noviembre.

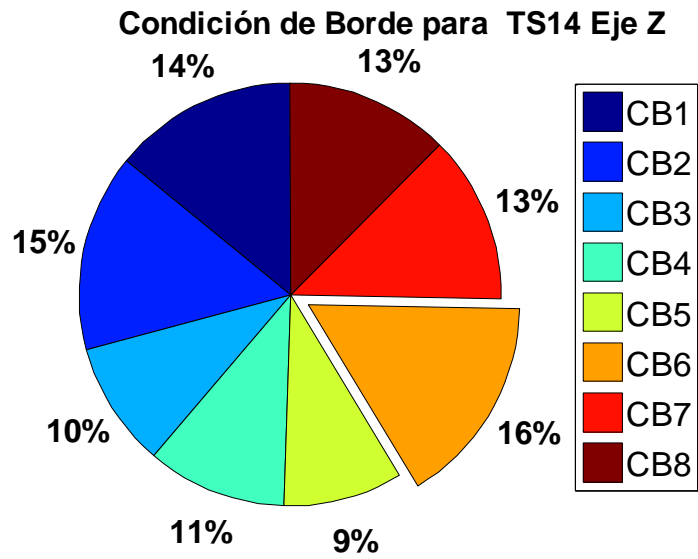


Gráfico 5-45: Condiciones de borde para TS14 Eje Z, Noviembre.

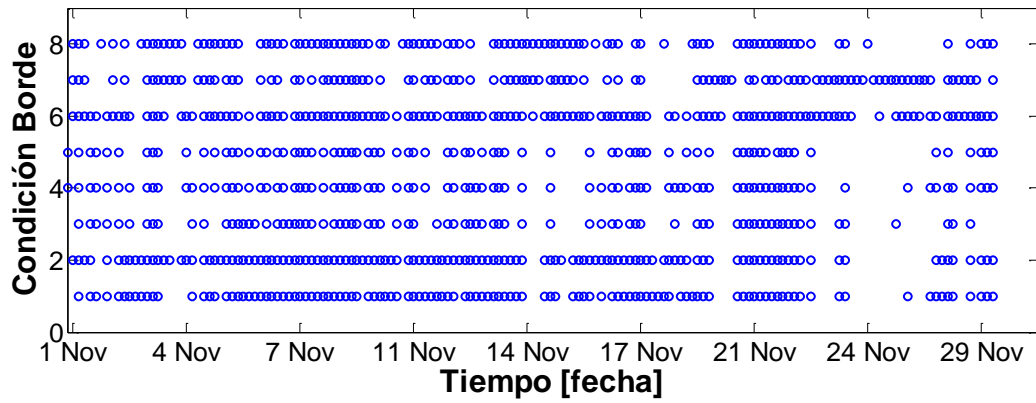


Gráfico 5-46: Distribución de Condición de Borde TS14 Eje Z (Noviembre).

Tabla 5-17: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS14 Eje Z (Noviembre).

GL		CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-5,9	-	-12,7	-9,2	-	-	-	-
	Giro	0,005	2,2E-03	0,008	0,008	0,006	0,0001	-0,001	0,002
P1	Corte	-	2,0	-3,2	-	7,4	-	-	1,53
	Giro	0,0020	-1,2E-04	0,005	0,004	0,003	-0,0002	0,002	-0,0002
P2	Corte	-	-	-	2,6	7,0	-0,4	6,3	-
	Giro	-0,0006	-1,2E-03	0,0005	-0,0003	-0,003	-0,0001	0,01	-0,0003
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	21,3	2,5
	Giro	3,1E-04	5,8E-04	-0,0003	-0,002	-0,004	0,0004	0,01	0,002
Índice Error		0,119	0,152	0,173	0,133	0,152	0,135	0,167	0,154



Figura 5-16: Condiciones de borde para TS14 Eje Z, Noviembre.

A continuación se presentan los resultados del mes de Diciembre para el sensor TS14.

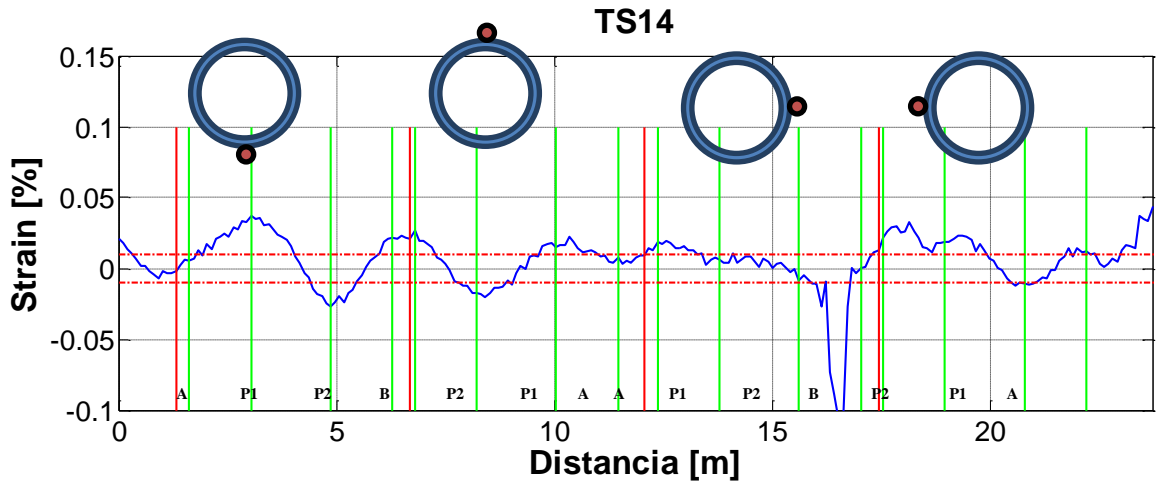


Gráfico 5-47: Deformación del sensor TS14 a finales de Diciembre.

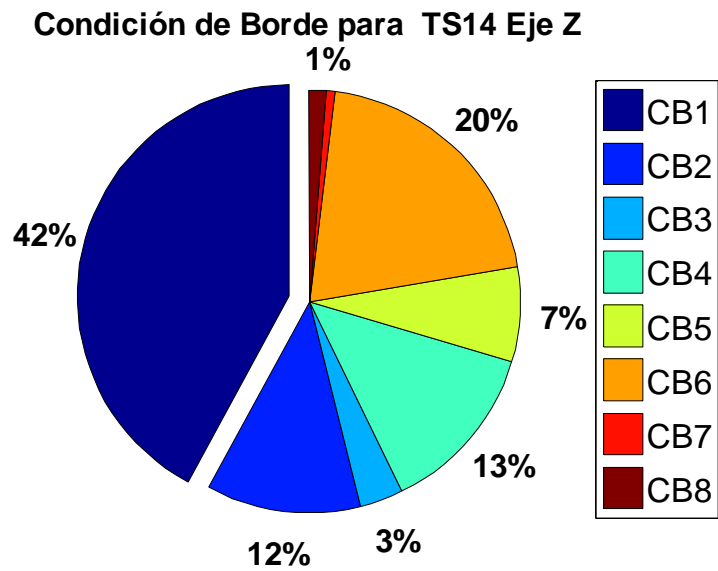


Gráfico 5-48: Condiciones de borde para TS14 Eje Z, Diciembre.

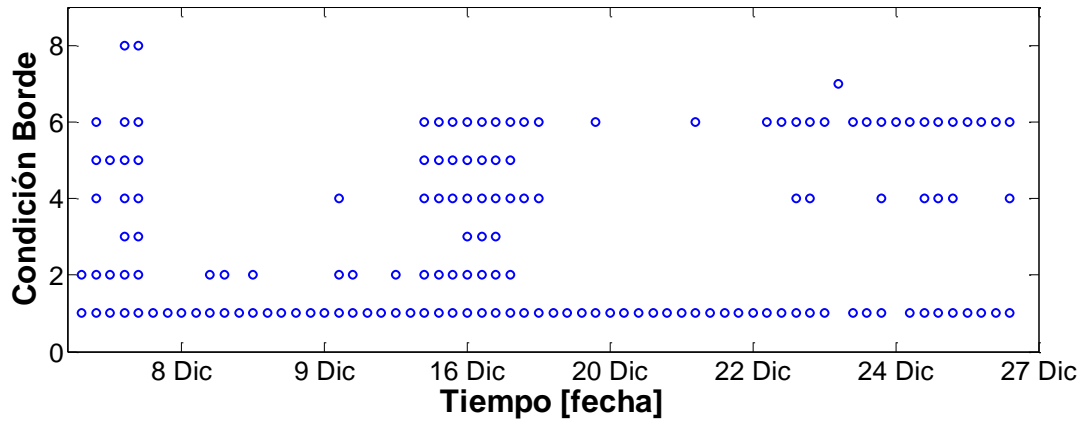


Gráfico 5-49: Distribución de Condición de Borde TS14 Eje Z (Diciembre).

Tabla 5-18: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS14 Eje Z (Diciembre).

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-27,7	-	-5,9	-25,0	-	-	-	-
	Giro	0,024	1,4E-02	0,016	0,023	0,021	0,0024	0,009	0,021
P1	Corte	-	12,6	10,2	-	21,4	-	-	20,3
	Giro	0,010	-7,7E-04	0,001	0,008	0,004	-0,005	-0,018	0,0014
P2	Corte	-	-	-	-2,1	11,4	-10,2	-59,0	-
	Giro	-0,0029	-7,3E-03	-0,007	-0,003	-0,010	-0,0025	-0,05	-0,0215
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	-153,8	-42,8
	Giro	1,5E-03	3,7E-03	0,0033	0,003	-0,004	0,0095	-0,05	-0,024
Índice Error		0,724	0,795	0,808	0,760	0,789	0,715	0,935	0,791



Figura 5-17: Condiciones de borde para TS14 Eje Z, Diciembre.

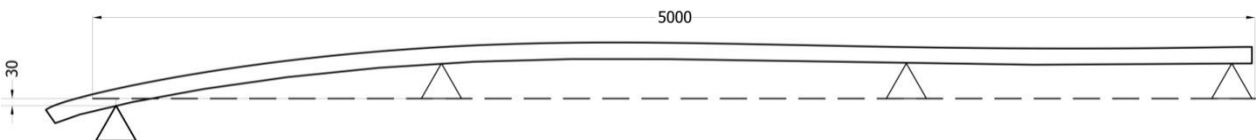


Figura 5-18: Deformación del sensor TS14.

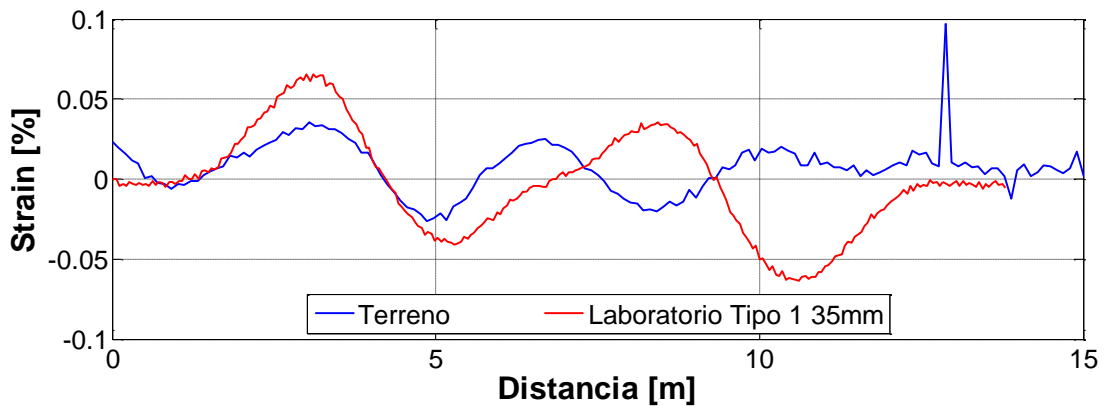


Gráfico 5-50: Comparación datos terreno TS14 y datos de laboratorio Tipo I (35mm)

Tabla 5-19: Resumen de desplazamientos de sensores en hundimiento.

Sensor	Mes	Z [mm]	Orientación	Y [mm]	Orientación
TS12	Octubre	9,8	Norte	7	Este
	Noviembre	8,3	Norte	7,8	Este
	Diciembre	3,1	Sur	3,1	Este
TS13	Octubre	-4,8	Sur	-2,7	Oeste
	Noviembre	-6,2	Sur	-4,3	Oeste
	Noviembre	-4,9	Sur	-3,6	Oeste
	Diciembre	-3,5	Norte	1,7	Este
TS14	Octubre	-1,0	Sur	-----	-----
	Noviembre	0		-----	-----
	Diciembre	-27,7	Sur	-----	-----

5.3 Sensibilidad del sensor TS14.

Se hace un análisis de sensibilidad para verificar qué tan influyente es la elección de los apoyos al momento de ingresar los datos al algoritmo. A continuación se presenta la Tabla 5-20, donde se muestra los resultados obtenidos:

Tabla 5-20: Resumen de Sensibilidad para TS14, Condición de Borde 1.

	Desfase	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
A	Vertical	-16,0	-18,7	-22,3	-25,0	-28,1	-30,7	-33,6	-36,6	-38,5	-35,7	-30,4
	Giro	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
P1	Giro	0,006	0,007	0,008	0,009	0,010	0,011	0,012	0,013	0,013	0,013	0,011
P2	Giro	-0,001	-0,002	-0,002	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,004	-0,003	-0,003
B	Giro	0,0007	0,0009	0,0010	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001
	Error	0,28	0,27	0,29	0,31	0,56	0,35	0,35	0,39	0,40	0,40	0,39

El desfase 0 indica la posición que se realizó los resultados y tanto los valores negativos como positivos dan a entender cuánto a la izquierda o a la derecha se desplazó el ingreso de los datos al algoritmo.

Se observa que para datos colindantes la diferencia de desplazamiento es de 2 a 3 mm, que es parte del error de aparato.

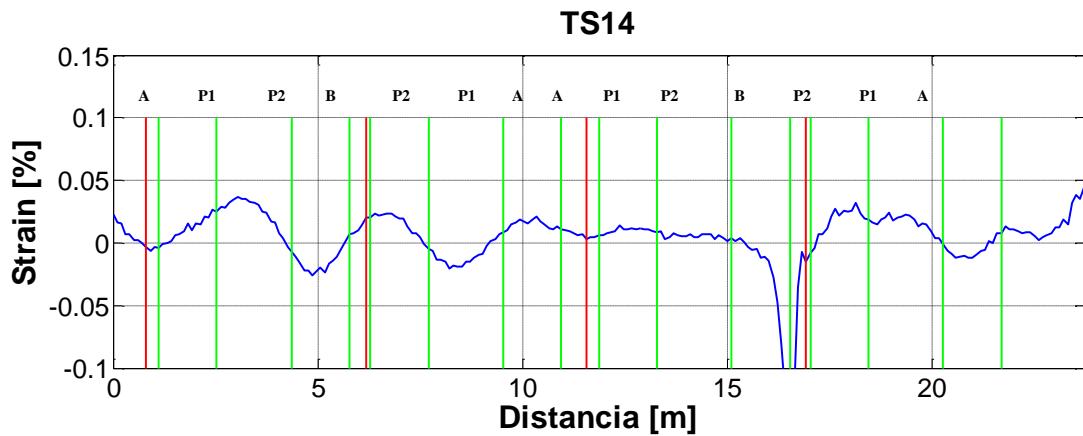


Gráfico 5-51: Posición de apoyos para desfase -5.

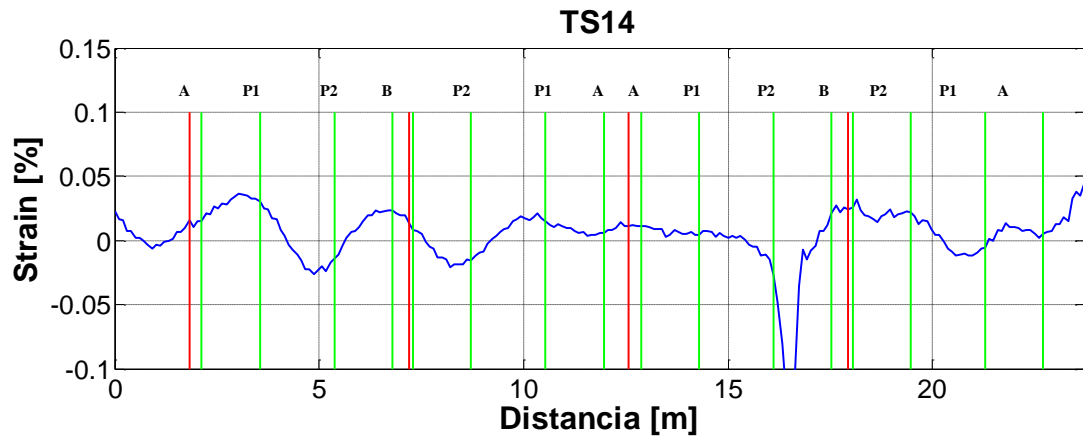


Gráfico 5-52: Posición de apoyos para desfase 5.

La diferencia en el ingreso de los datos en el algoritmo se muestra en el Gráfico 5-51 y Gráfico 5-52 junto con la Tabla 5-20 indican la sensibilidad del algoritmo, logrando una diferencia de resultados del orden de 1,5 cm. Esto muestra la existencia de una influencia al momento de recortar los datos del sensor de la lectura total del canal.

5.4 Análisis de Resultados.

Con todos los resultados expuestos se observa que en líneas generales el algoritmo responde a la relación de deformación del sensor con el desplazamiento en los apoyos. A pesar de registrar deformaciones pequeñas donde la mayor deformación obtenida corresponde al sensor TS14 (Gráfico 5-47) existen lecturas que supera el error del instrumento con deformación máxima registrada de 0.04% correspondiente a un desplazamiento aproximado de 30 mm para el apoyo A. Al comparar las medidas obtenidas por el sensor TS14 con la lectura de laboratorio (Tipo I) se tienen desplazamientos similares (Gráfico 5-50) y con similar forma en los primeros tramos, pero se va desacoplando a medida que avanza la distancia en que se desarrolla la deformación. Esto puede explicarse a que en los datos de laboratorio se tiene un mayor control de las variables externas, mientras que para los datos de terreno existen diversos factores que son imposibles de incluir y forman parte de las incertezas del terreno.

Observando los primeros meses de todos los sensores se tienen deformaciones como parte del error instrumental, lo que entrega como resultado una igualdad de probabilidades para varias condiciones de borde, en cambio, para deformaciones mayores como el sensor TS14, el algoritmo empieza a descartar condiciones de borde con índices de error altos, dejando una clara tendencia del tipo de movimiento que llega a predominar. En otras palabras, la elección de una condición de borde es ambigua cuando las deformaciones detectadas por el sensor son menores al error instrumental asociado, pero a medida que aumentan se puede llegar a acotar los posibles movimientos del sensor.

Existe el caso particular del sensor TS12 (Gráfico 5-16) donde se observa una tendencia a una condición de borde en un tramo de tiempo acotado (días 8 y 10 de diciembre) para después cambiar a condiciones de borde que ya habían sido descartados. Este cambio puede deberse a que en un momento la fibra presentó indicios de deformaciones para un cierto tipo de movimiento, de manera que el algoritmo estableció los apoyos desplazados para generar dichas deformaciones, pero al pasar el tiempo puede haber cambiado el tipo de movimiento predominante en el macizo rocoso y como resultado el algoritmo presenta nuevas probables condiciones de borde que anteriormente habían sido descartadas. También se puede obtener dichos resultados por el relajo de la fibra lo que hace que las demás condiciones de bordes vuelvan a aparecer.

Para todos los sensores, no se observa una deformación progresiva en los tres meses de datos, sino que a partir de cierta fecha el sensor detecta una deformación permanente la que se mantiene relativamente constante en el tiempo. Es probable encontrarse con este tipo de lecturas debido a que se está instrumentando una falla geológica, la que se ve afectada por los constantes estallidos

cercanos a las calles donde se encuentran instalados los sensores, acumulando tensiones en la falla las que son disipadas mediante desplazamientos hasta llegar a un equilibrio en el sistema.

La tendencia de los datos analizados entrega que para sensores más cercanos a la socavación como TS11 y TS12, no se detectaron deformaciones relevantes, en cambio el sensor TS14 presenta la máxima deformación detectada, con un mayor desplazamiento. Existen dos posibles explicaciones ante este suceso. La primera consiste en un movimiento completo de los sensores cercanos al frente de socavación experimentando un nulo desplazamiento relativo entre apoyos, es decir, no detecto deformaciones. La segunda posible explicación tiene como base la distribución de tensiones en la mina. A partir de observaciones en terreno se sabe que sectores cercanos a la socavación son quebradizos y con poca rigidez, por tanto para mantener la mina estable se redistribuyen los esfuerzos provocados por el socavón a sectores con mayor rigidez alejados de la zona de excavación, como lo puede ser las calles 13 y 14, donde están los sensores TS13 y TS14 respectivamente.

En general las lecturas obtenidas en terreno no concuerdan con los trabajados en laboratorio, en donde por cada lectura de fibra se tiene una lectura opuesta consecuente con la deformación encontrada (a modo de espejo), en cambio las lecturas de los datos de terreno no presentan esa lectura espejo en sus mediciones. Un ejemplo de esto es el sensor TS13 para finales de diciembre (Gráfico 5-35: Deformación del sensor TS13 a finales de Diciembre.), hay zonas locales en tracción de largo aproximado 1 metro pero sin su contraparte en compresión característico de una viga sometida a flexión pura. Estos tipos de datos resultan difíciles de interpretar debido a que son datos de terreno y como tales existen innumerables acontecimientos que pueden alterar las lecturas que se presentan, además se puede mencionar que estas lecturas son en tramos cortos y el analizador BOTDR utiliza funciones no lineales para el cálculo de deformaciones los que se salen de las hipótesis del algoritmo, especialmente cuando la fibra es sometida a cambios bruscos de deformación en poca distancia de medición.

A pesar de lo anterior los desplazamientos en los apoyos obtenidos son coincidentes con la posición donde se encuentra el frente de socavación (Figura 2-2), mostrando una tendencia al hundimiento para el macizo rocoso ubicado al sur de la falla, pero esta tendencia es poco clara cuando se trata de los desplazamientos laterales de los sensores.

6 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES.

El algoritmo logró con éxito predecir el tipo de movimiento y el desplazamiento del sensor a partir de resolver el problema inverso que se plantea. Muchos de los resultados del algoritmo son obtenidos a partir de deformaciones del sensor que están al límite del error instrumental, lo que tuvo como consecuencia una no muy clara tendencia a la elección del movimiento, en cambio para el sensor TS14, donde se obtuvieron los resultados más precisos con una clara tendencia a la condición de borde 1. A pesar de los tres meses, la mayoría de los sensores detectaron poca deformación, lo que indica en primera instancia un buen diseño de la mina en relación al avance del frente, el movimiento de la falla y la seguridad de la mina.

El algoritmo detectó desplazamientos coherentes a lo observado en la mina, especialmente el sensor TS14, mostrando una caída para la zona sur de la falla N1, donde se encuentra toda la zona de subducción, aunque no así para los desplazamientos laterales que no fueron coherentes debido a la poca deformación encontrada.

Es importante ubicar los apoyos en los datos de deformación que entrega el sensor, aunque es posible obtenerlos buscando el peak de la deformación, es preferible tener la ubicación del apoyo en la lectura del canal para poder interpretar de manera correcta los resultados obtenidos, ya que el algoritmo se basa en un comportamiento elástico-lineal con ausencia de fuerzas y momentos externos, pero pueden existir comportamientos no lineales o fuerzas externas, donde el análisis sale de los alcances de esta memoria.

Existen diferentes aspectos a mejorar en el algoritmo, como una interfaz que permita al usuario interactuar de manera amena para poder cambiar las distintas opciones según requiera, como por ejemplo las condiciones de borde. Otro punto importante a mejorar es la implementación de esta plataforma en la minería para realizar todos los análisis antes vistos en tiempo real, es decir, al momento de recopilar una deformación de algún sensor, el algoritmo pueda analizarlo en breves minutos y entregar los posibles movimientos del macizo a través de los desplazamientos de los apoyos. Para esto se necesita un programa comercial más elaborado y entregar de manera rápida y eficiente las condiciones de borde que se adecuan a la deformación como también los desplazamientos en los apoyos

Es muy importante complementar, para futuros trabajos, una base de datos de deformaciones de los sensores ya que permitiría a través del algoritmo determinar los posibles lugares que presentan desplazamientos riesgosos a medida que se avanza en las faenas de extracción.

Este algoritmo pretende ser una herramienta complementaria para implementar un sistema de alarmas en túneles, especialmente en la minería con una base de datos accesible que permita obtener información de deformaciones y desplazamiento de los sensores para realizar un completo análisis de los probables movimientos, posibles fallas y su evolución siendo esto de

manera remota lo que es una clara mejora hacia una mayor seguridad. Cabe recordar que este algoritmo no reemplaza el criterio que pueda tener el ingeniero a cargo, sino mas bien entrega información para anticipar futuros inconvenientes y tomar las medidas correctivas al respecto

7 BIBLIOGRAFÍA.

- [1]. Bao X., Dhliwayo J., Heron N., Webb D. J., Jackson D. A. (1995) “Experimental and Theoretical Studies on a Distributed Temperature Sensor Based on Brillouin Scattering”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13, p 1340 – 1348.
- [2]. Bao X., DeMerchant M., Brown A., Bremmer T. (2001) “Tensile and Compressive Strain Measurement in the Lab and Field with the Distributed Brillouin Scattering Sensor” *Optical Fiber Technology* Vol. 19 p 1698 – 1704.
- [3]. Bernini R., Minardo A., Zeni L. (2007) “Vectorial Dislocation Monitoring of pipelines by use of Brillouin-based Fiber-optic Sensor” IOPscience Publishing, doi:10.1088/0964-1726/17/01/015006
- [4]. DeMarchant M., Brown A., Bao X., Bremmer T. (1999) “Structural monitoring by use of a Brillouin distributed sensor” *Appl. Opt.*, vol.38.
- [5]. Horiguchi T., Kurashima T., Tateda M., Koyamada Y. (1989) “Development of a Distributed Sensing Technique Using Brillouin Scattering”, *Photonics Technology Letters*, Vol. 1, p 107 – 108.
- [6]. Horiguchi T., Kurashima T and Tateda M (1989) “Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers”, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 1 107–8.
- [7]. Horiguchi T., Shimizu K., Kurashima T., Tateda M., (1995) “Tensile Strain Dependence of Brillouin Frequency Shift in Silica Optical Fibers”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13, p 1296 – 1302.
- [8]. Kim S., Lee J., Kwon I. (2002) “Structural monitoring of a bending beam using Brillouin distributed optical fiber” *Institute of Physics Publishing*, Vol. 11 p 396 – 403.
- [9]. Leng J., Winter D., Barnes R., Mays G., Fernando G. “Structural health monitoring of smart civil structures using fiber optic sensor” *SPIE Proceedings*, Vol 5852
- [10]. Pozzi M., Zonta D., Wu H., Inaudi D. (2008) “Development and laboratory validation of in-line multiplexed low-coherence interferometric sensors” *Optical Fiber Technology* 14 p 281–293
- [11]. Ravet F., Zou L., Bao X., Chen L., Huang R., Khoo H. A. (2006) “Detection of buckling in steel pipes and column by the distributed Brillouin sensor” *Optical Fiber Technology*, Vol 12 p 305 – 311

- [12]. Sansuke S., Akutagawa S., Takeuchi K., Shinji M., Shimizu N. (2003) “Back analysis for tunnel engineering as a modern observational method” Tunnelling and Underground Space Technology, Vol 18 p 185-196.
- [13]. Yan S. Z., Chyan L. S. (2010) “Performance enhancement of BOTDR fiber optic sensor for oil and gas pipeline monitoring” Vol 16 p 100 – 109.
- [14]. MICOMO S.A. Página principal, introducción. [en línea] <www.micomo.cl> [consulta 10 Mayo 2012].
- [15]. CODELCO S.A. Página principal, introducción. [en línea] <http://www.codelco.com/la-corporacion/prontus_codelco/2011-06-21/164601.html> [consulta 10 Mayo 2012].
- [16]. CODELCO S.A. Descripción de la mina “El Teniente”. [en línea] <http://www.codelco.com/prontus_codelco/site/edic/base/port/el_teniente.html> [consulta 11 Mayo 2012].
- [17]. INDUSTRIAS JQ Datos técnicos del material PVC. [en línea] <<http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/PVC/PVCprop/dtecnicos.htm>> [consulta 15 Junio 2012].
- [18]. Hibbeler R. C. (1997) “Análisis Estructural Tercera Edición” Juárez, Estado de Mexico, Prentice Hall Hispanoamericana S. A., p 653 – 700.
- [19]. (1997) “Reporte de trabajos” Juárez, Estado de Mexico, Prentice Hall Hispanoamericana S. A., p 653 – 700.
- [20]. W. McGuire, R. Gallagher, and R. Ziemian, (2000) Matrix Structural Analysis, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [21]. Valdés R. 2009. Análisis con y sin reforzamiento del crecimiento del sector oeste de la mina Esmeralda. Memoria de Ingeniero Civil en minas. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 20-21p.

ANEXOS

ANEXO A Resultados de la validación del algoritmo para todos los tipos de movimientos ejecutados.

Para la validación del modelo se mostró como resultado solo el tipo de movimiento 4, el que consiste en el levantamiento de los apoyos A y P1 del sensor. Se eligió dicho movimiento debido a que presentaba mayor semejanza con respecto a la recta teórica (Véase Gráfico 4-8 al Gráfico 4-12). A continuación se mostrará los resultados obtenidos para los demás movimientos hechos en el laboratorio, independiente de la semejanza que tengan los datos obtenidos en el laboratorio con los datos teóricos para esos movimientos. Además de muestra una tabla que muestra el índice de error para cada tipo de regresión y las CB que obtuvieron menores índices.

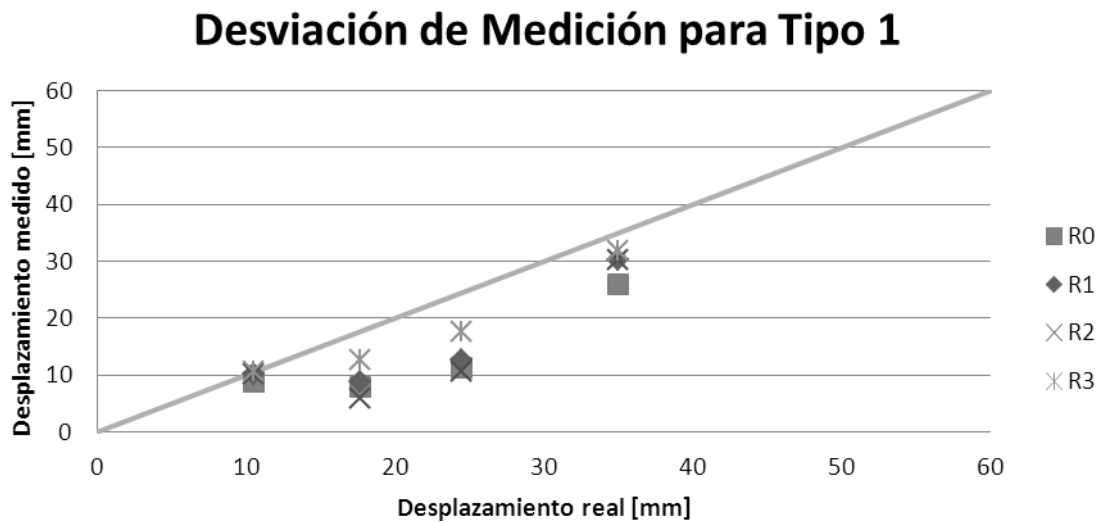


Gráfico A-1: Resultado para movimiento Tipo I.

Tabla A-1: Índices de errores mínimos y CB para distintos tipos de regresiones, Tipo I.

TIPO 1			
CB	2	8	CB min
R0	0,227		2
R1	0,149		2
R2	0,041	0,036	8-2
R3	0,153		2

Desviación de Medición para Tipo 2 V

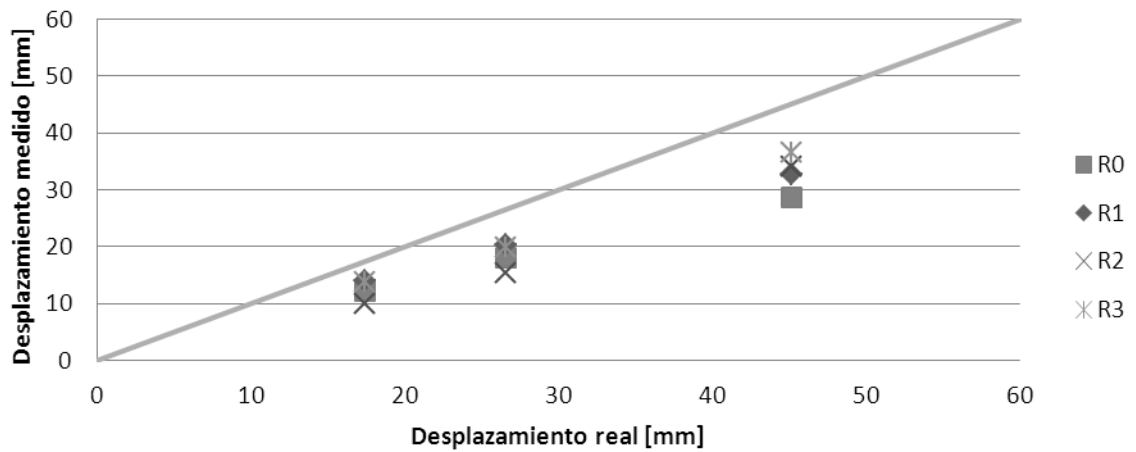


Gráfico A-2: Resultado para movimiento Tipo II vertical.

Tabla A-2: Índices de errores mínimos y CB para distintos tipos de regresiones, Tipo II V.

TIPO 2 V			
CB	2	8	CB min
R0	0,260		2
R1	0,188		2
R2	0,076	0,039	8-2
R3	0,153		2

Desviación de Medición para Tipo 2 H

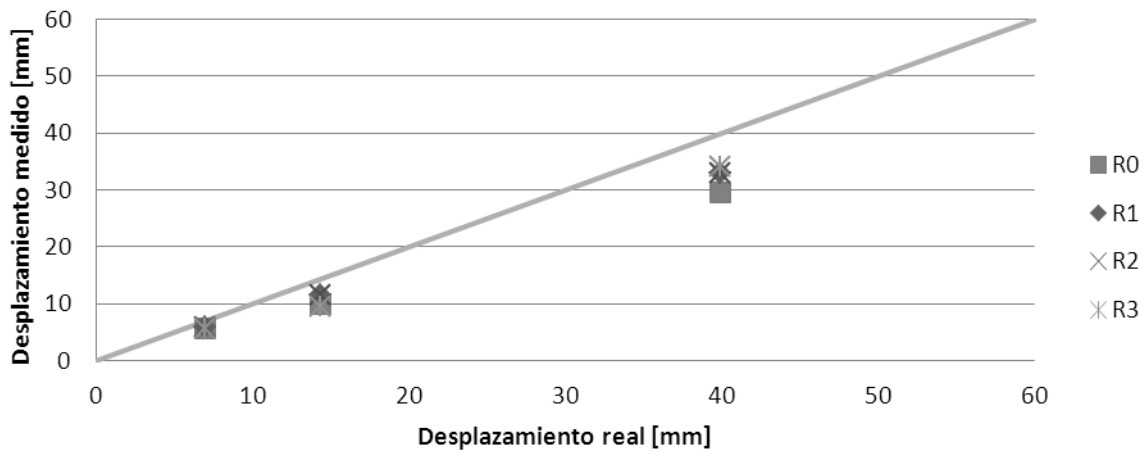


Gráfico A-3: Resultado para movimiento Tipo II horizontal.

Tabla A-3: Índices de errores mínimos y CB para distintos tipos de regresiones, Tipo II H.

TIPO 2 H		
CB	2	CB min
R0	0,375	2
R1	0,183	2
R2	0,032	2
R3	0,214	2

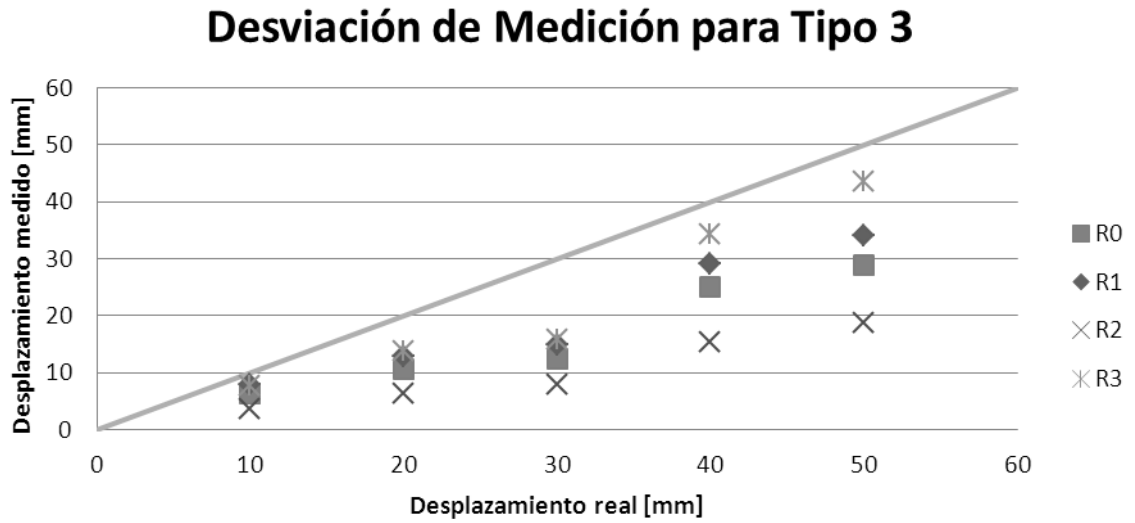


Gráfico A-4: Resultado para movimiento Tipo III.

Tabla A-4: Índices de errores mínimos y CB para distintos tipos de regresiones, Tipo III.

TIPO 3		
CB	2	CB min
R0	0,463	2
R1	0,247	2
R2	0,419	2
R3	0,261	2

Desviación de Medición para Tipo 4 A

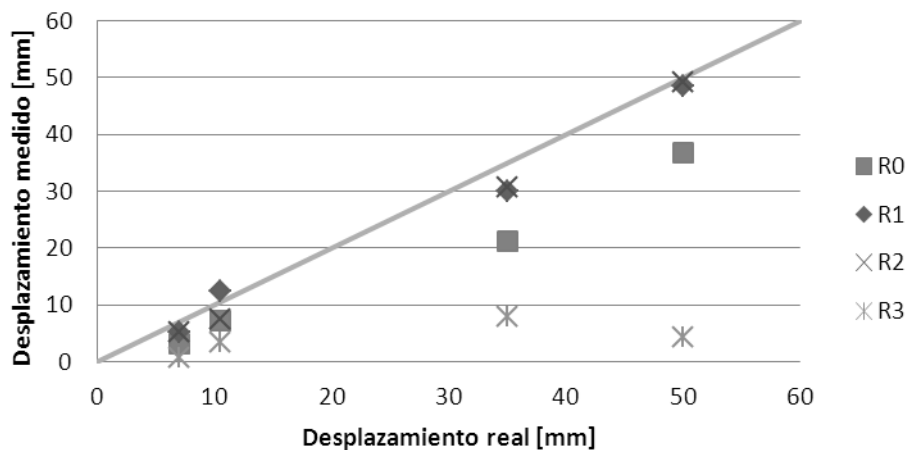


Gráfico A-5: Resultado para movimiento Tipo 4, apoyo A.

Desviación de Medición para Tipo 4 P1

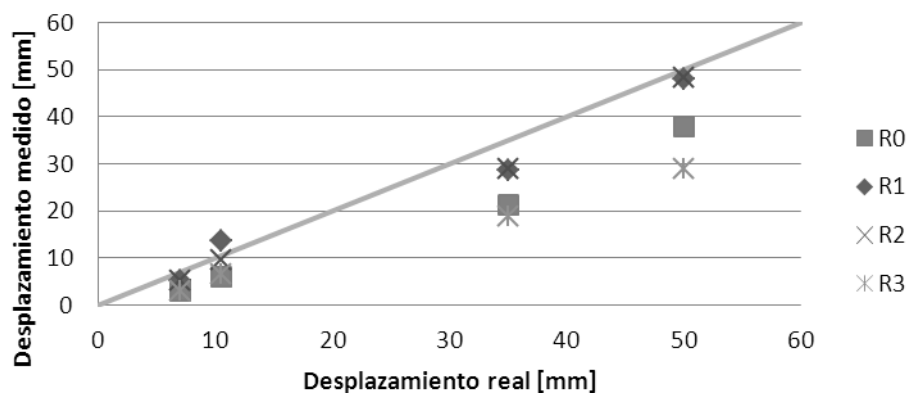


Gráfico A-6: Resultado para movimiento Tipo IV, apoyo P1.

Tabla A-5: Índices de errores mínimos y CB para distintos tipos de regresiones, Tipo IV.

TIPO 4					
CB	3	4	7	8	CB min
R0	0,228	0,228	0,228	0,228	3-4-7-8
R1	0,155	0,155	0,155	0,155	3-4-7-8
R2	0,037	0,037	0,037	0,037	3-4-7-8
R3	0,270	0,446	0,185	0,191	7

ANEXO B Resultados del algoritmo para datos de terreno del nivel Producción.

Se mostrará a continuación los resultados obtenidos al ingresar los datos reportados por los sensores ubicados en el nivel Producción de la mina. Estos datos no fueron utilizados para su análisis debido a lo poco confiable que fueron sus lecturas, debido a la inexistencia de cambios de signos en sus deformaciones. Además parte del staff que instaló dichos sensores presentaron diferentes problemas en su instalación.

El análisis que debiese hacer es qué cargas crean una deformación presentada en los gráficos, pero escapan de los objetivos planteados en el presente trabajo.

Sensor TS12, nivel producción:

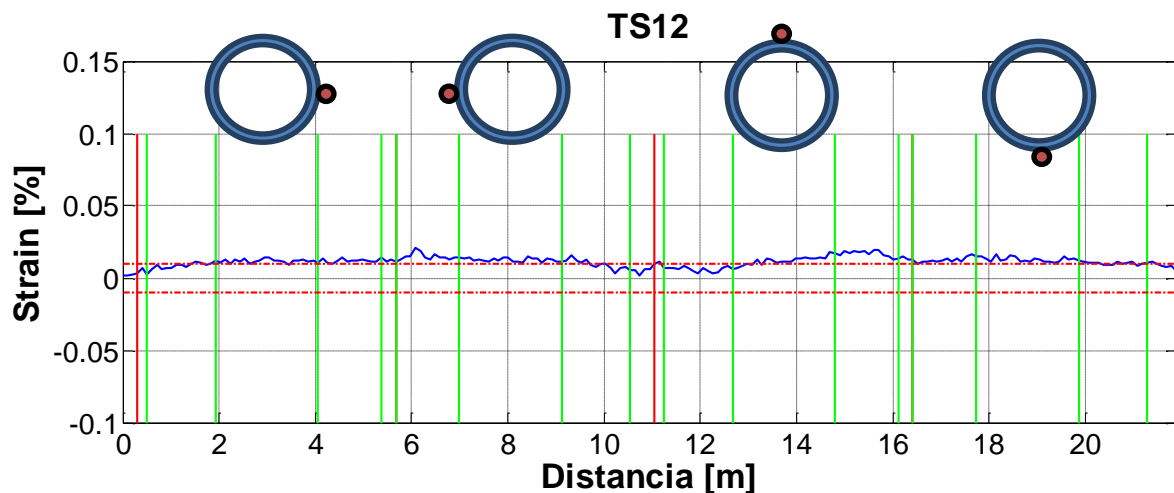


Gráfico B-1: Deformación del sensor TS12 a finales de Octubre, nivel producción.

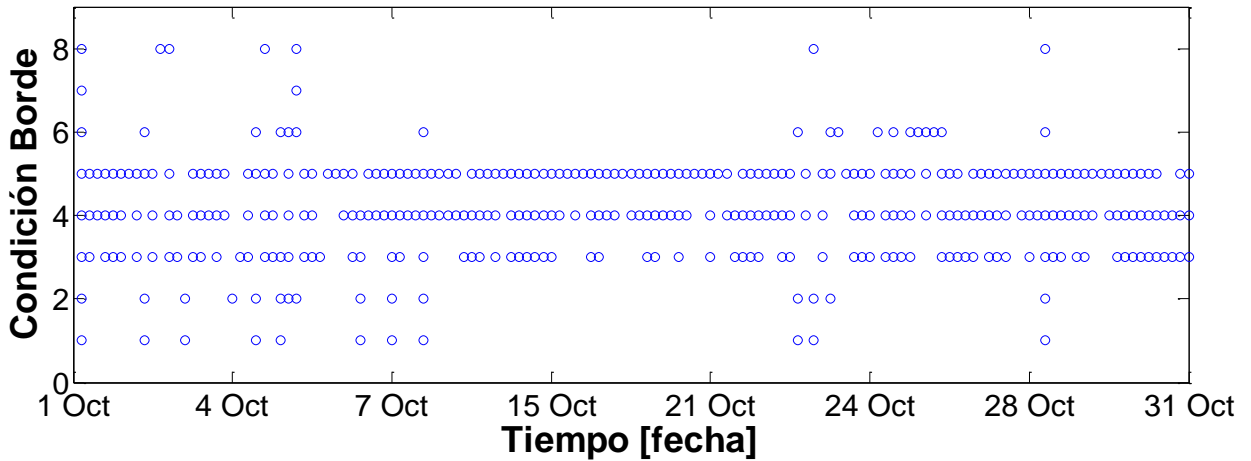


Gráfico B-2: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS12 Eje Z (Octubre), nivel producción.

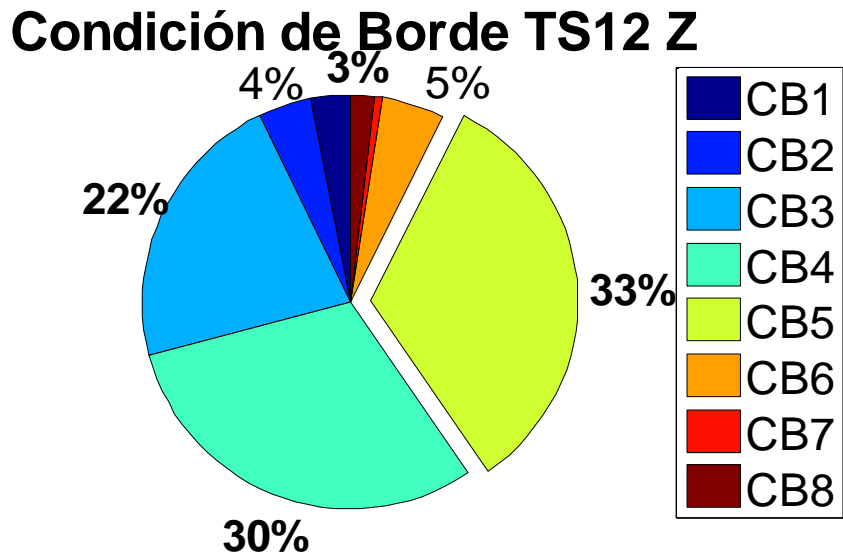


Gráfico B-3: Condiciones de borde para TS12 Eje Z (Octubre), nivel producción.

Tabla B-1: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS12 Eje Z (Octubre), nivel producción

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-11,9	-	-53,6	-26,8	-	-	-	-
	Giro	0,010	2,5E-03	0,025	0,021	0,017	-0,0010	-0,015	-0,004
P1	Corte	-	2,4	-20,5	-	20,8	-	-	-5,4
	Giro	0,004	2,1E-05	0,019	0,015	0,010	0,002	0,029	-0,0028
P2	Corte	-	-	-	10,6	19,8	4,3	125,0	-
	Giro	-0,0010	-9,3E-04	0,004	-0,004	-0,012	-0,0008	0,10	0,0126
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	246,0	21,7
	Giro	5,0E-04	4,7E-04	-0,0018	-0,012	-0,020	-0,0052	0,11	0,021
Índice Error		0,296	0,321	0,211	0,211	0,211	0,280	1,417	0,577

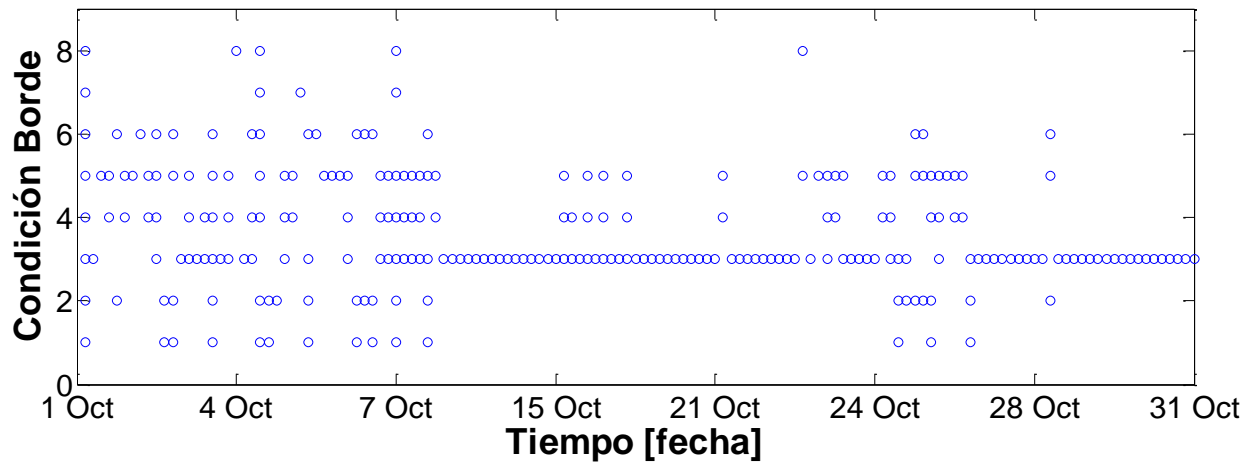


Gráfico B-4: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS12 Eje Y (Octubre), nivel producción.

Condición de Borde TS12 Y

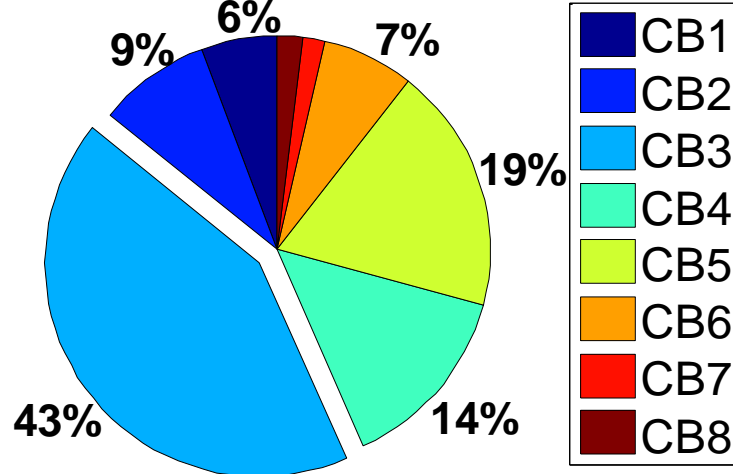


Gráfico B-5: Condiciones de borde para TS12 Eje Y (Octubre), nivel producción.

Tabla B-2: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS12 Eje Y (Octubre), nivel producción

GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-15,1	-	-72,0	-30,6	-	-	-
	Giro	0,013	2,9E-03	0,034	0,024	0,017	-0,0009	-0,013
P1	Corte	-	2,7	-27,9	-	20,7	-	-3,2
	Giro	0,005	2,4E-05	0,026	0,016	0,009	0,002	0,025
P2	Corte	-	-	-	11,1	19,3	3,9	107,0
	Giro	-0,0013	-1,1E-03	0,005	-0,005	-0,012	-0,0007	0,08
B	Corte	-	-	-	-	-76,0	210,3	16,8
	Giro	6,4E-04	5,4E-04	-0,0025	-0,012	-0,019	-0,0046	0,09
Índice Error	0,274	0,315	0,136	0,186	0,220	0,270	1,597	0,646

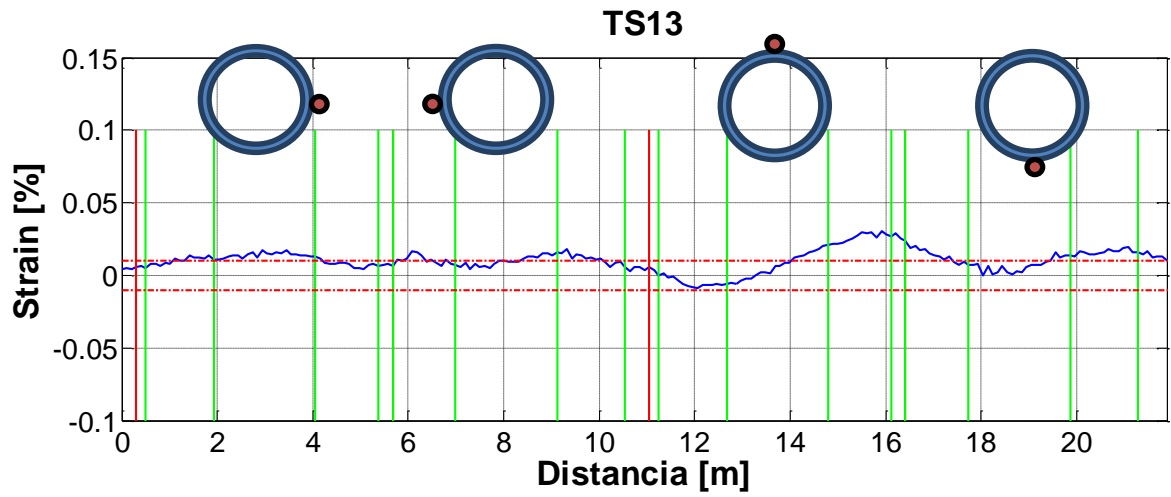


Gráfico B-6: Deformación del sensor TS12 a finales de Noviembre, nivel producción

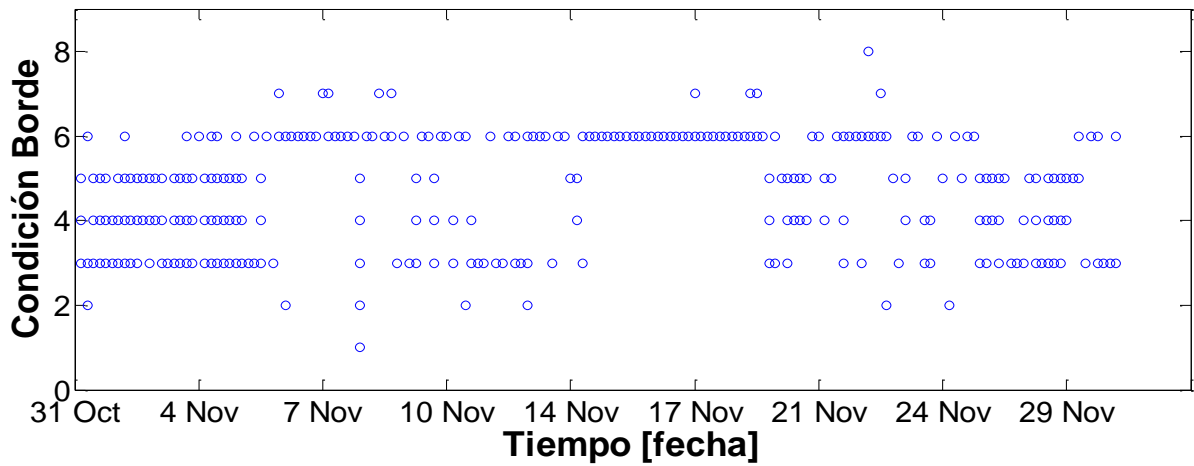


Gráfico B-7: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS12 Eje Z (Noviembre), nivel producción.

Condición de Borde TS12 Z

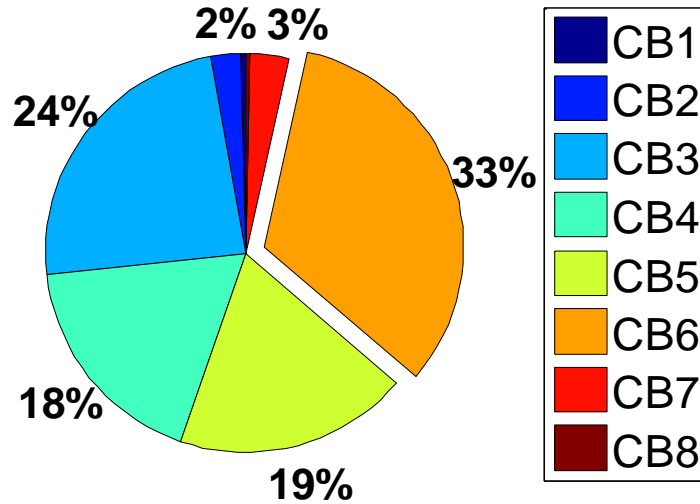


Gráfico B-8: Condiciones de borde para TS12 Eje Z (Noviembre), nivel producción.

Tabla B-3: Desplazamientos [mm] y giros [rad] para cada CB de TS12 Eje Z (Noviembre), nivel producción

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-14,9	-	-50,6	-27,0	-	-	-	-
	Giro	0,013	4,3E-03	0,026	0,022	0,017	-0,0005	-0,009	0,001
P1	Corte	-	4,0	-17,5	-	20,1	-	-	0,0
	Giro	0,005	3,6E-05	0,018	0,014	0,008	0,001	0,019	-0,0014
P2	Corte	-	-	-	8,6	17,2	2,3	80,6	-
	Giro	-0,0013	-1,6E-03	0,003	-0,004	-0,011	-0,0004	0,06	0,0055
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	159,7	11,3
	Giro	6,3E-04	8,0E-04	-0,0013	-0,009	-0,017	-0,0027	0,07	0,012
Índice Error		0,285	0,267	0,257	0,273	0,285	0,264	1,260	0,446

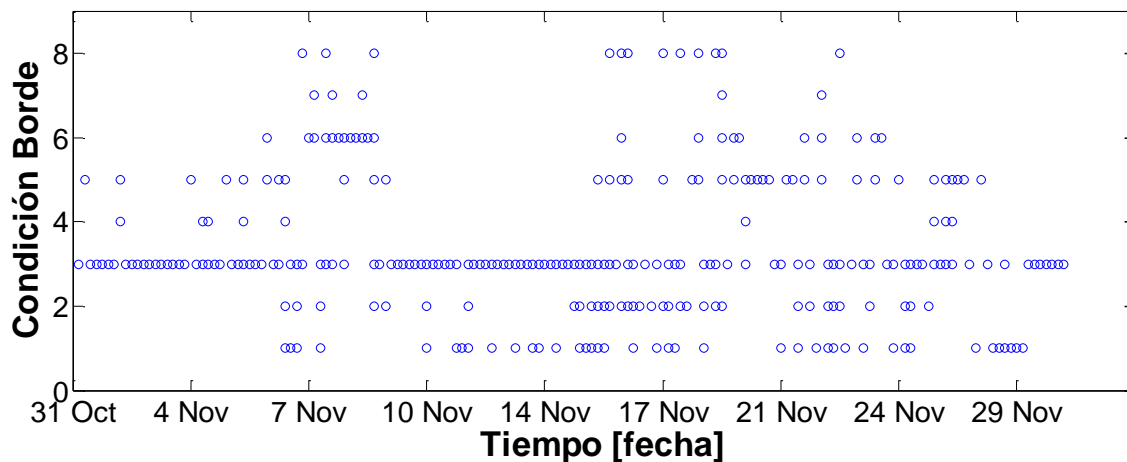


Gráfico B-9: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS12 Eje Y (Noviembre), nivel producción.

Condición de Borde para TS12 Y

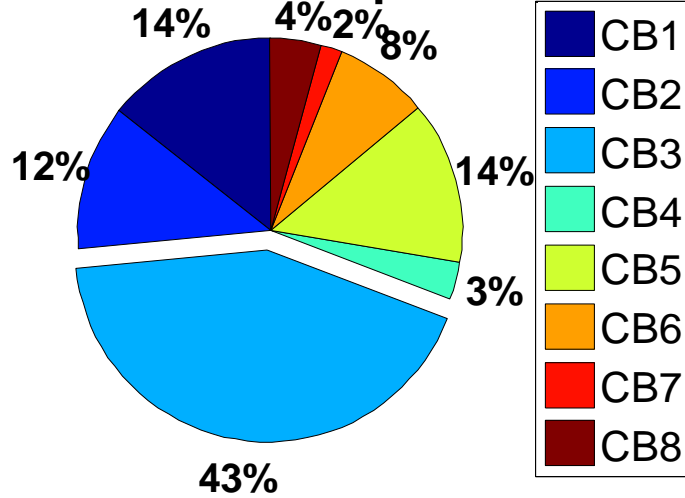


Gráfico B-10: Condiciones de borde para TS12 Eje Y (Noviembre), nivel producción.

Tabla B-4: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS12 Eje Y (Noviembre), nivel producción

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-21,4	-	-76,5	-37,4	-	-	-	-
	Giro	0,019	5,8E-03	0,038	0,030	0,022	-0,0006	-0,011	0,002
P1	Corte	-	5,5	-27,1	-	26,0	-	-	1,3
	Giro	0,008	4,9E-05	0,028	0,019	0,011	0,001	0,022	-0,0015
P2	Corte	-	-	-	11,4	22,0	2,7	93,6	-
	Giro	-0,0018	-2,2E-03	0,004	-0,005	-0,014	-0,0005	0,07	0,0051
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	185,4	11,7
	Giro	9,1E-04	1,1E-03	-0,0021	-0,012	-0,021	-0,0032	0,08	0,012
Índice Error		0,259	0,299	0,244	0,277	0,294	0,323	1,151	0,472

Sensor TS13, nivel producción:

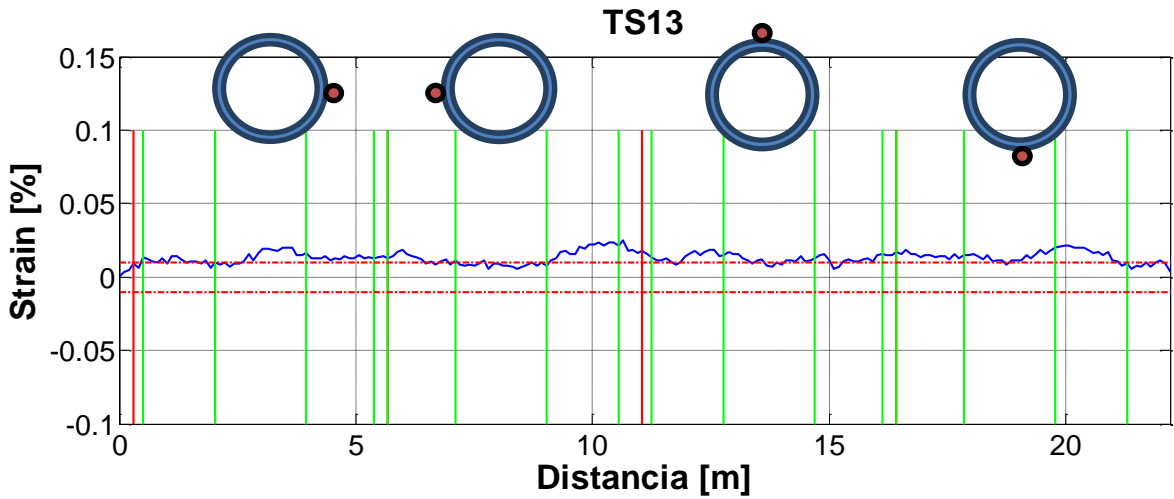


Gráfico B-11: Deformación del sensor TS13 a finales de Octubre, nivel producción

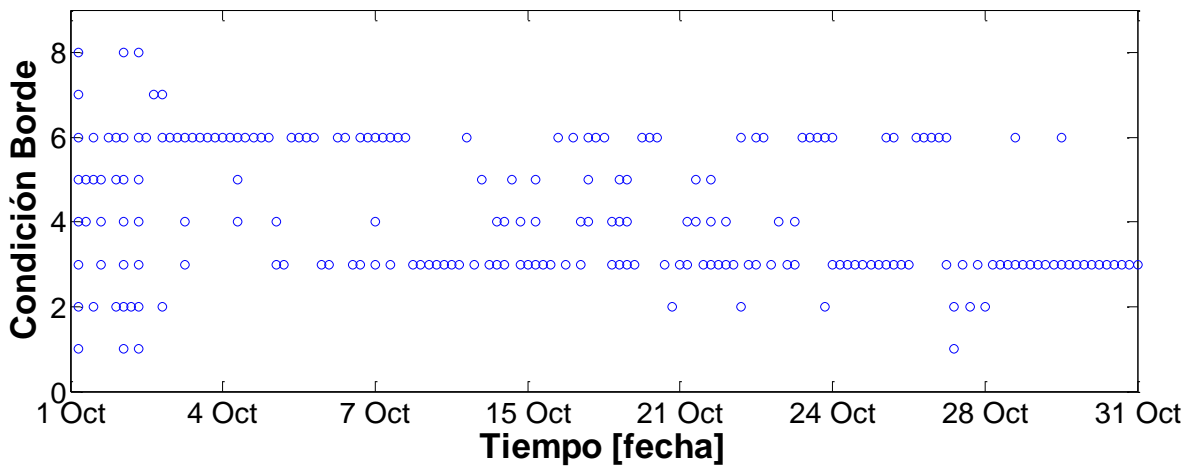


Gráfico B-12: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS13 Eje Z (Octubre), nivel producción.

Condición de Borde para TS13 Z

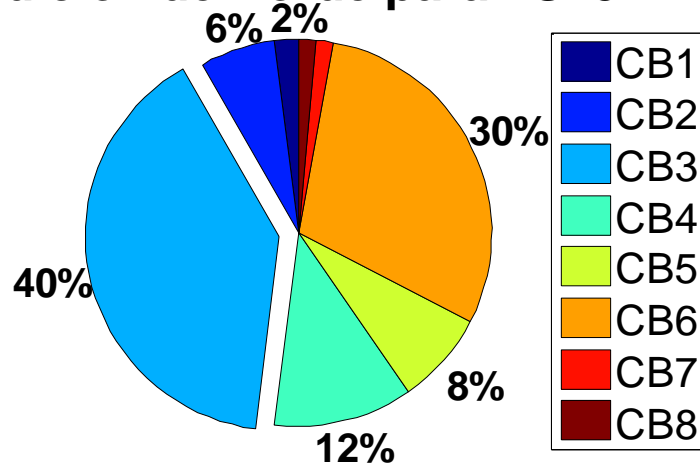


Gráfico B-13: Condiciones de borde para TS13 Eje Z (Octubre), nivel producción.

Tabla B-5: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS13 Eje Z (Octubre), nivel producción

GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-14,5	-	-62,0	-29,1	-	-	-
	Giro	0,013	2,8E-03	0,031	0,023	0,017	-0,0009	-0,012
P1	Corte	-	2,5	-22,2	-	19,8	-	-3,1
	Giro	0,005	-1,5E-04	0,023	0,015	0,009	0,002	0,024
P2	Corte	-	-	-	9,8	18,3	3,3	87,0
	Giro	-0,0012	-1,1E-03	0,005	-0,004	-0,011	-0,0004	0,07
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	179,3
	Giro	6,2E-04	5,6E-04	-0,0023	-0,011	-0,018	-0,0041	0,08
Índice Error	0,307	0,304	0,216	0,253	0,282	0,284	1,456	0,577

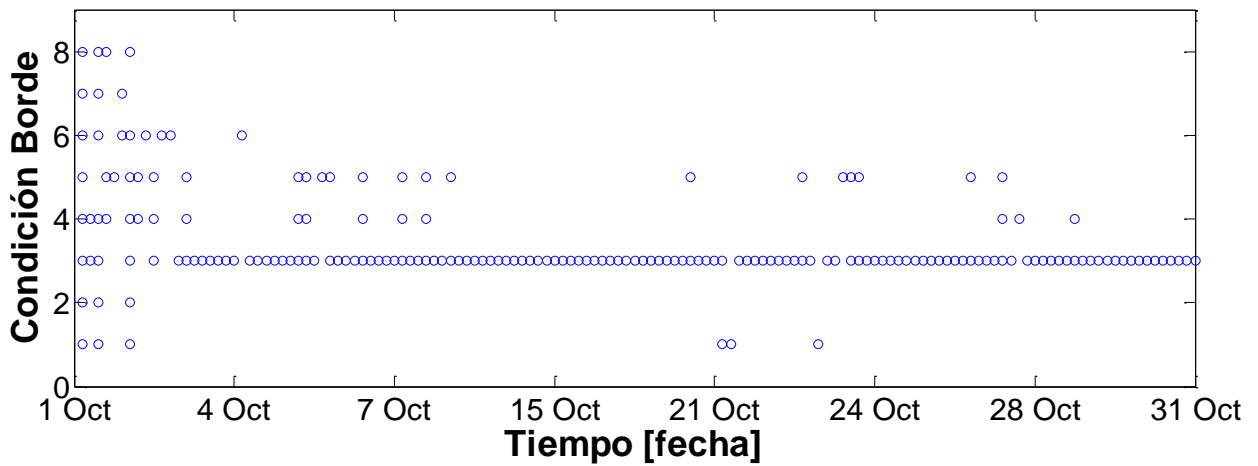


Gráfico B-14: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS13 Eje Y (Octubre), nivel producción.

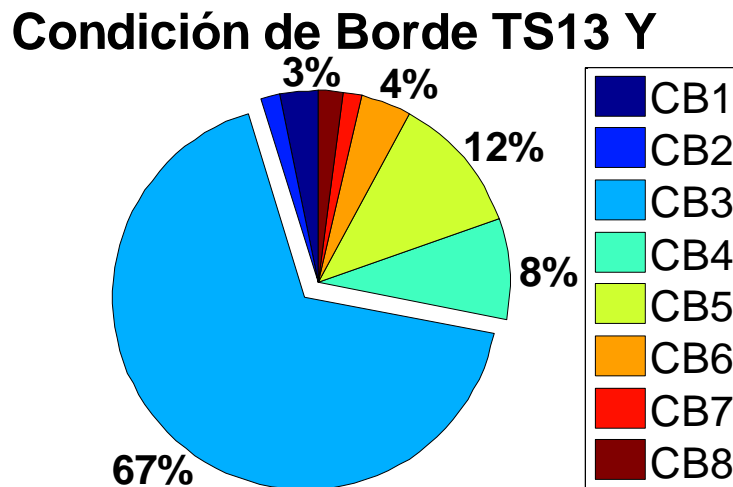


Gráfico B-15: Condiciones de borde para TS13 Eje Y (Octubre), nivel producción.

Tabla B-6: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS13 Eje Y (Octubre), nivel producción

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-15,7	-	-58,7	-30,6	-	-	-	-
	Giro	0,014	3,6E-03	0,030	0,024	0,019	-0,0008	-0,012	-0,002
P1	Corte	-	3,3	-20,1	-	22,2	-	-	-2,6
	Giro	0,005	-2,0E-04	0,022	0,016	0,009	0,002	0,025	-0,0020
P2	Corte	-	-	-	10,0	19,9	3,2	91,7	-
	Giro	-0,0013	-1,5E-03	0,004	-0,004	-0,012	-0,0004	0,08	0,0092
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	189,6	17,2
	Giro	6,7E-04	7,4E-04	-0,0019	-0,011	-0,020	-0,0039	0,09	0,018
Índice Error		0,287	0,365	0,214	0,225	0,230	0,341	1,445	0,627

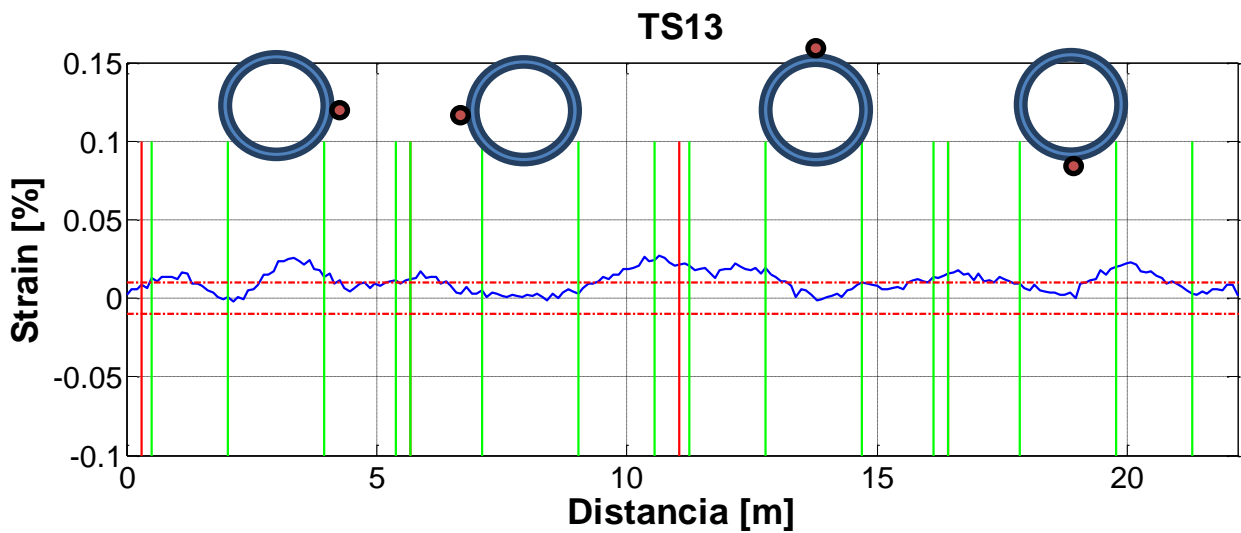


Gráfico B-16: Deformación del sensor TS13 a finales de Noviembre, nivel producción

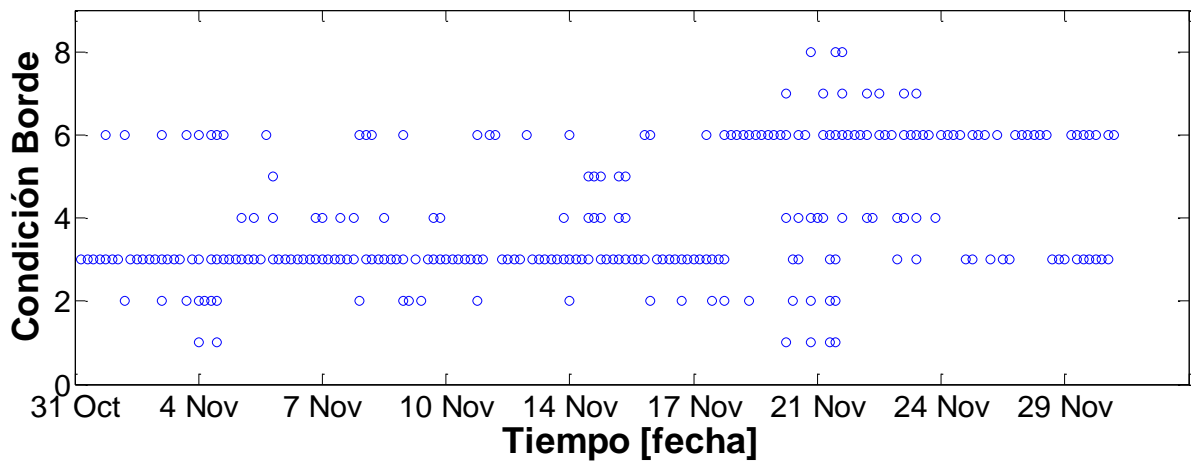


Gráfico B-17: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS13 Eje Z (Noviembre), nivel producción.

Condición de Borde para TS13 Z

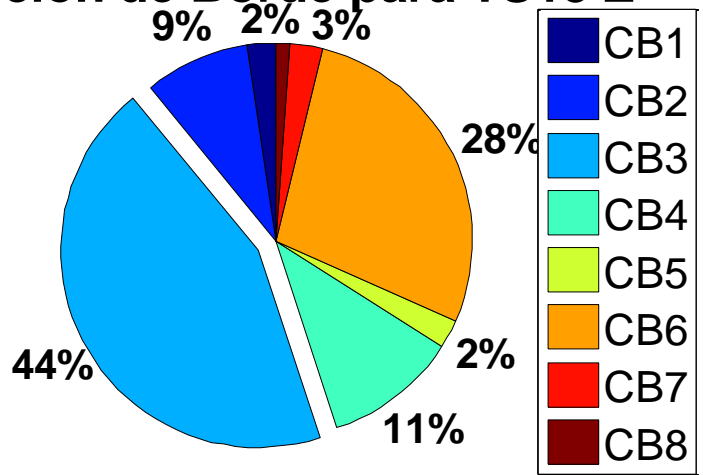


Gráfico B-18: Condiciones de borde para TS13 Eje Z (Noviembre), nivel producción.

Tabla B-7: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS13 Eje Z (Noviembre), nivel producción

GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-13,0	-	-52,7	-23,9	-	-	-
	Giro	0,012	2,7E-03	0,026	0,019	0,013	-0,0005	-0,007
P1	Corte	-	2,5	-18,5	-	15,2	-	-0,6
	Giro	0,005	-1,5E-04	0,019	0,012	0,006	0,001	0,015
P2	Corte	-	-	-	7,3	13,4	2,0	54,0
	Giro	-0,0011	-1,1E-03	0,004	-0,003	-0,008	-0,0002	0,05
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	111,3
	Giro	5,5E-04	5,5E-04	-0,0019	-0,008	-0,013	-0,0024	0,05
Índice Error	0,242	0,215	0,214	0,273	0,318	0,201	1,147	0,406

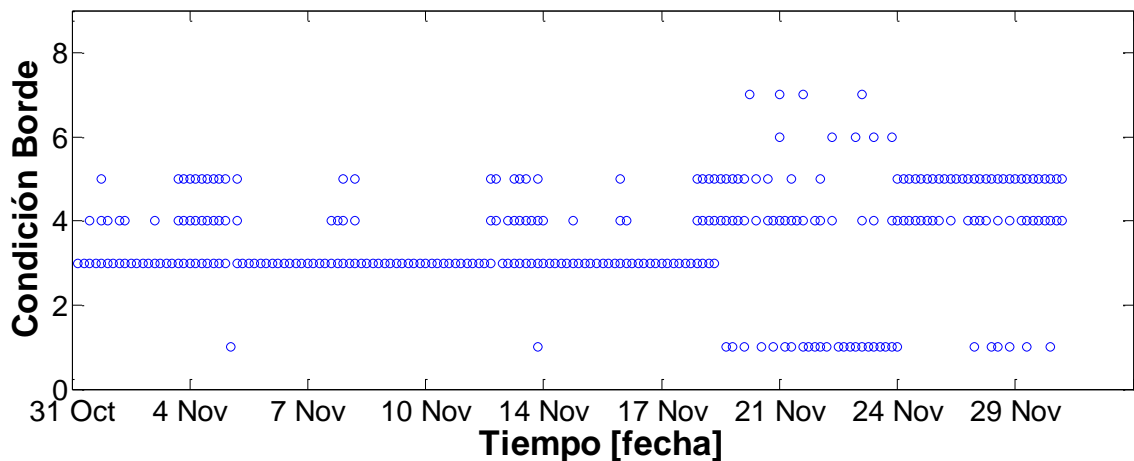


Gráfico B-19: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS13 Eje Y (Noviembre), nivel producción.

Condición de Borde para TS13 Y

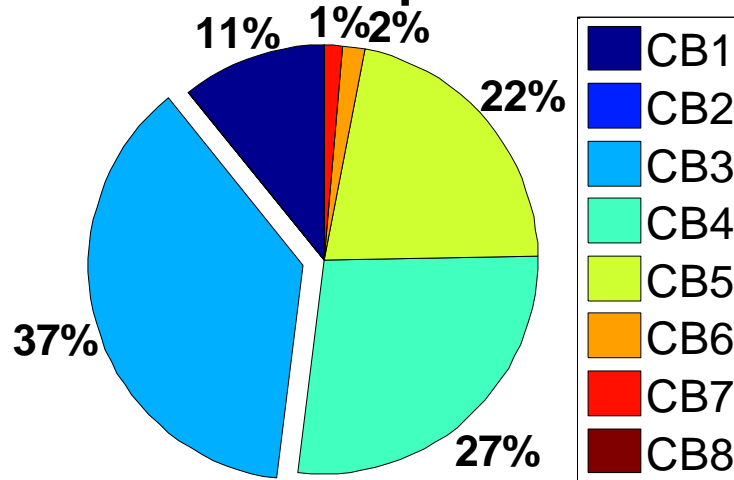


Gráfico B-20: Condiciones de borde para TS13 Eje Y (Noviembre), nivel producción.

Tabla B-8: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS13 Eje Y (Noviembre), nivel producción

GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-13,2	-	-41,3	-25,1	-	-	-
	Giro	0,012	3,7E-03	0,022	0,020	0,017	-0,0006	-0,010
P1	Corte	-	3,4	-13,1	-	19,5	-	-1,5
	Giro	0,005	-2,0E-04	0,015	0,013	0,008	0,001	0,021
P2	Corte	-	-	-	7,9	17,1	2,3	76,0
	Giro	-0,0011	-1,5E-03	0,002	-0,003	-0,011	-0,0003	0,07
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	157,6
	Giro	5,6E-04	7,4E-04	-0,0011	-0,009	-0,017	-0,0029	0,07
Índice Error	0,214	0,298	0,196	0,185	0,182	0,286	0,976	0,438

Sensor TS14, nivel producción:

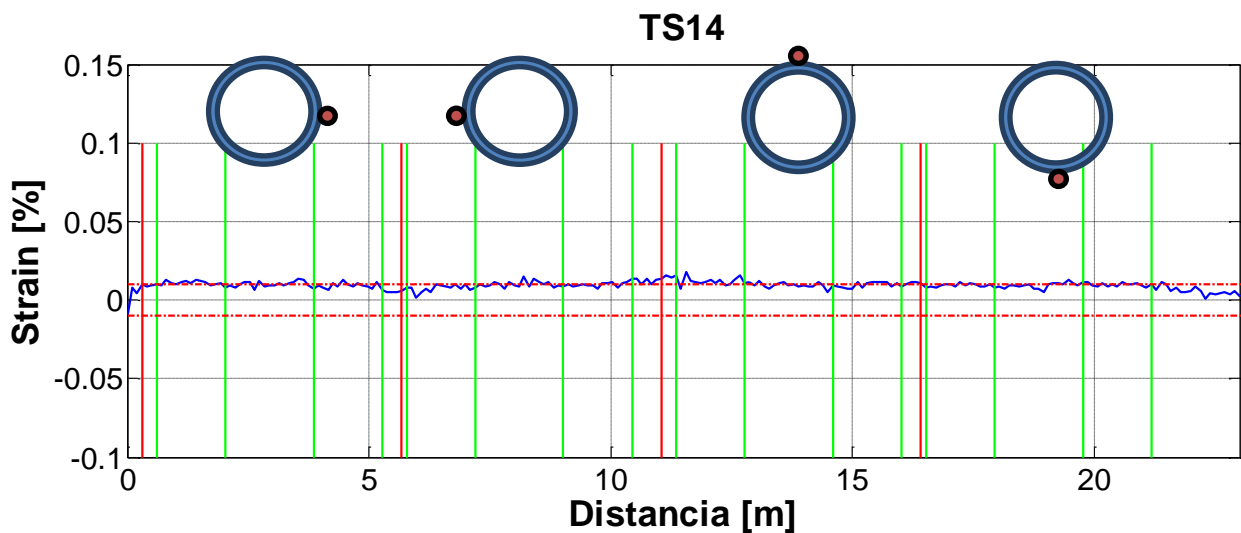


Gráfico B-21: Deformación del sensor TS14 a finales de Octubre, nivel producción

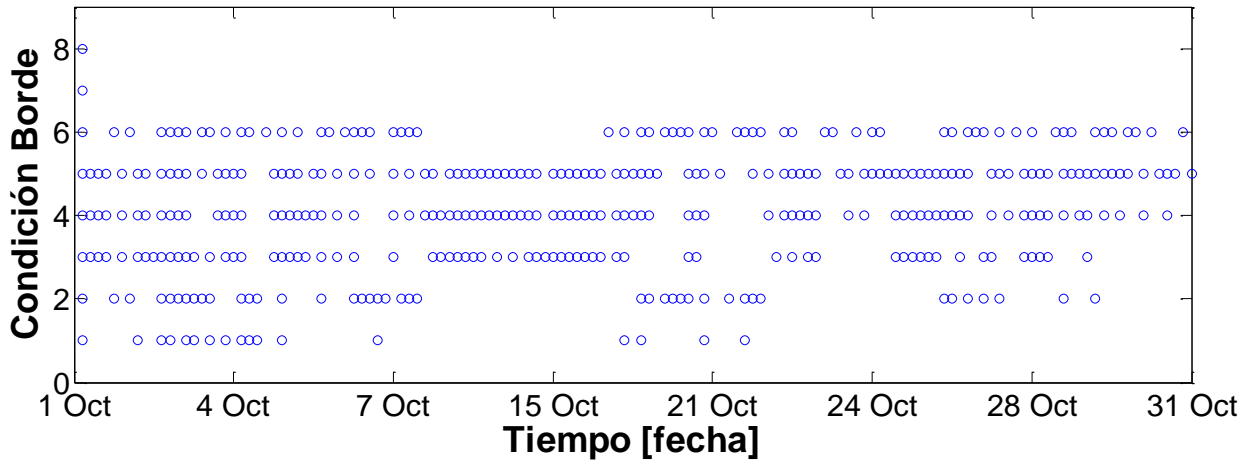


Gráfico B-22: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS14 Eje Z (Octubre), nivel producción.

Condición de Borde para TS14 Z

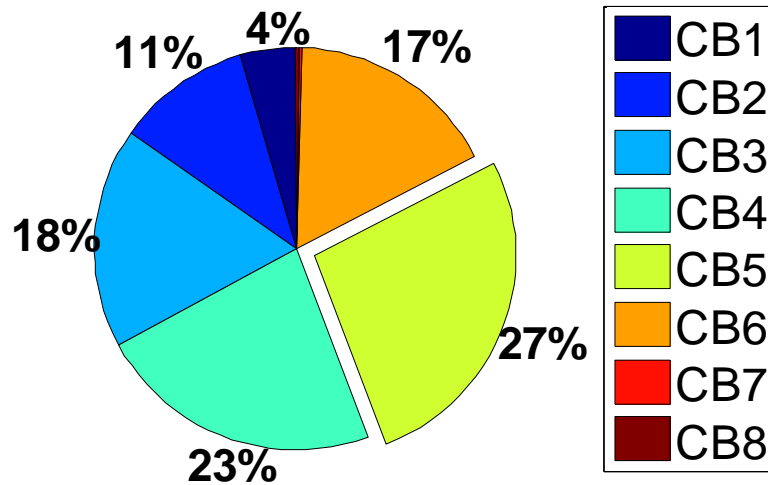


Gráfico B-23: Condiciones de borde para TS14 Eje Z (Octubre), nivel producción.

Tabla B-9: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS14 Eje Z (Octubre), nivel producción

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-11,2	-	-52,8	-25,2	-	-	-	-
	Giro	0,010	2,1E-03	0,025	0,020	0,015	-0,0006	-0,006	-0,002
P1	Corte	-	2,0	-19,5	-	17,8	-	-	-2,1
	Giro	0,004	-1,2E-04	0,019	0,014	0,009	0,001	0,012	-0,0013
P2	Corte	-	-	-	10,7	20,5	2,6	42,8	-
	Giro	-0,0012	-1,1E-03	0,006	0,000	-0,005	0,0006	0,04	0,0063
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	126,5	22,6
	Giro	6,0E-04	5,7E-04	-0,0029	-0,009	-0,014	-0,0024	0,05	0,015
Índice Error		0,262	0,239	0,226	0,211	0,199	0,223	0,913	0,459

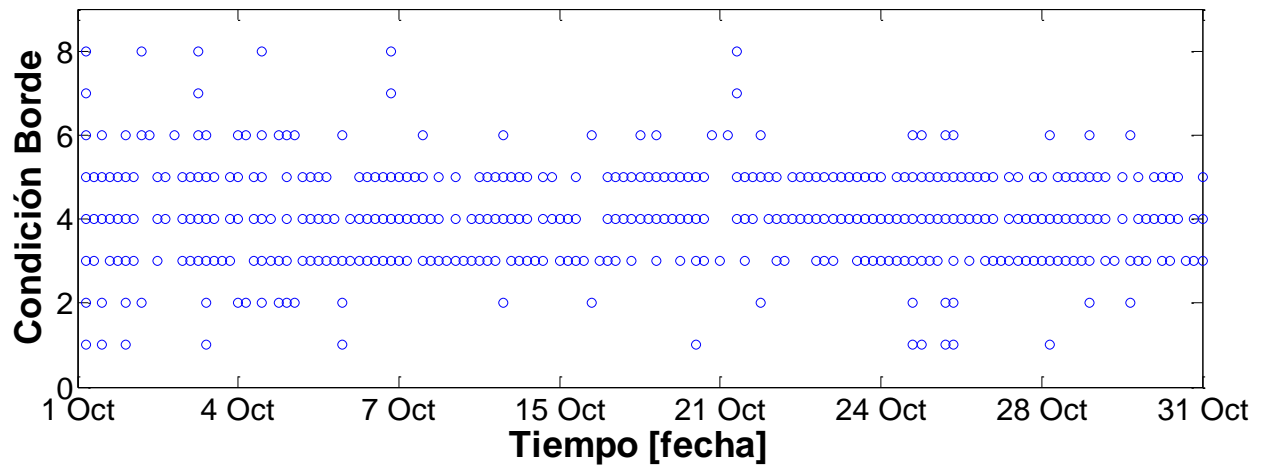


Gráfico B-24: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS14 Eje Y (Octubre), nivel producción.

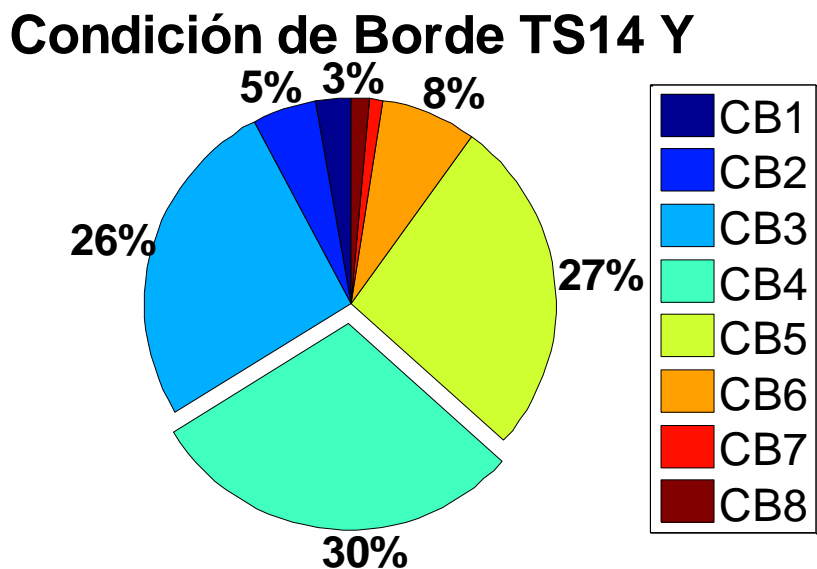


Gráfico B-25: Condiciones de borde para TS14 Eje Y (Octubre), nivel producción.

Tabla B-10: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS14 Eje Y (Octubre), nivel producción

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-15,4	-	-69,1	-32,4	-	-	-	-
	Giro	0,014	3,2E-03	0,034	0,026	0,018	-0,0006	-0,006	0,000
P1	Corte	-	2,9	-25,2	-	22,1	-	-	-1,1
	Giro	0,005	-1,8E-04	0,025	0,017	0,010	0,001	0,013	-0,0013
P2	Corte	-	-	-	13,1	24,8	2,6	45,1	-
	Giro	-0,0016	-1,7E-03	0,007	0,000	-0,007	0,0006	0,04	0,0056
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	133,8	22,1
	Giro	8,2E-04	8,5E-04	-0,0037	-0,010	-0,017	-0,0024	0,05	0,015
Índice Error		0,237	0,269	0,168	0,169	0,169	0,248	0,901	0,494

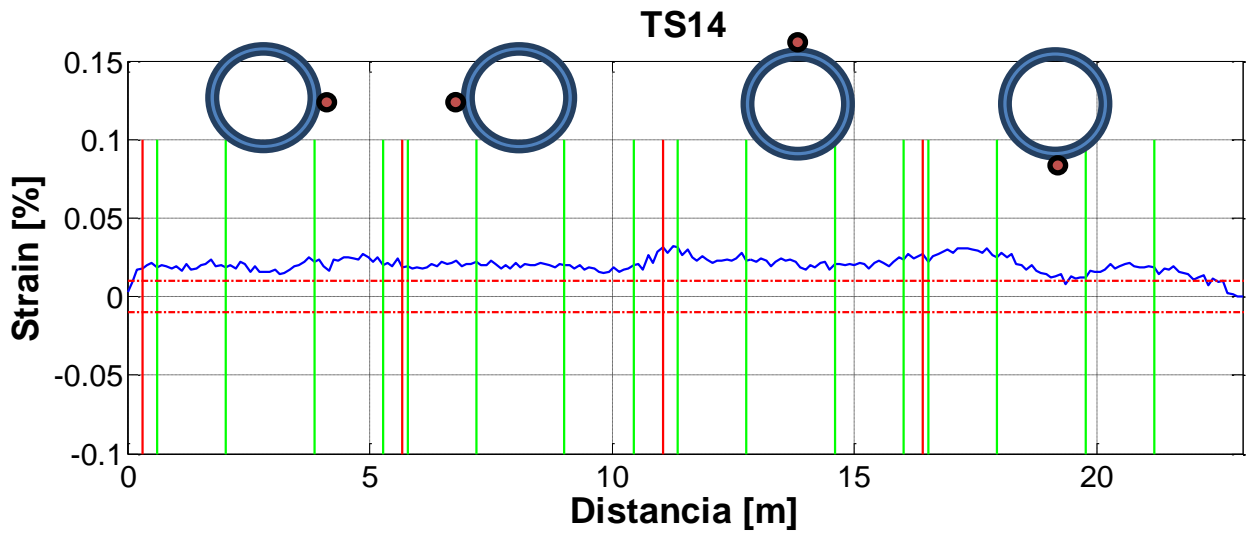


Gráfico B-26: Deformación del sensor TS14 a finales de Noviembre, nivel producción

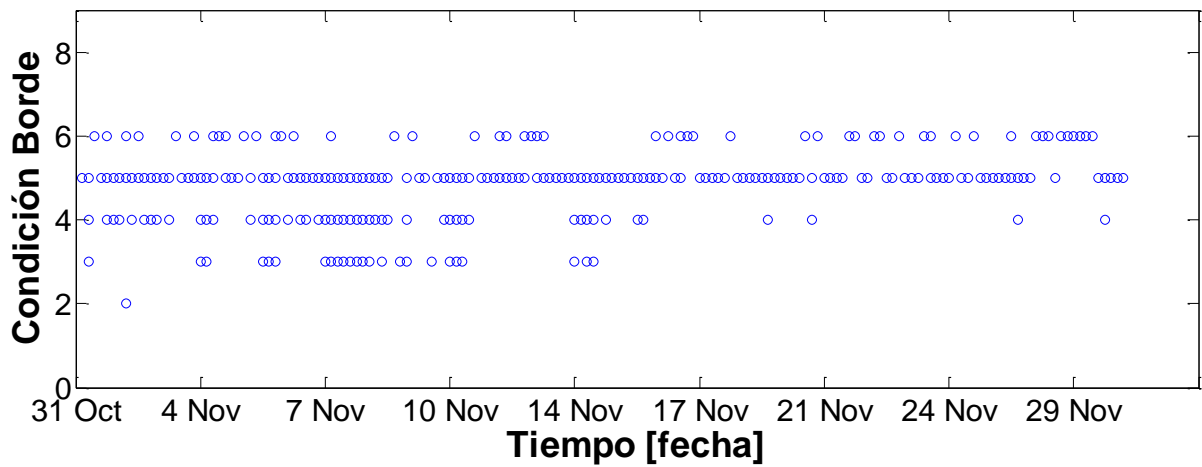


Gráfico B-27: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS14 Eje Z (Noviembre), nivel producción.

Condición de Borde TS14 Z

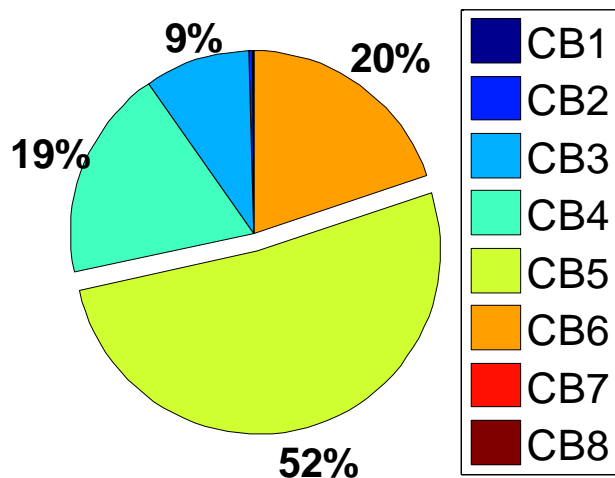


Gráfico B-28: Condiciones de borde para TS14 Eje Z (Noviembre), nivel producción.

Tabla B-11: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS14 Eje Z (Noviembre), nivel producción

GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-37,7	-	-164,5	-80,0	-	-	-
	Giro	0,033	8,1E-03	0,081	0,063	0,046	-0,0015	-0,017
P1	Corte	-	7,4	-59,5	-	56,3	-	-3,6
	Giro	0,013	-4,5E-04	0,060	0,043	0,026	0,003	0,034
P2	Corte	-	-	-	32,5	63,2	6,6	119,9
	Giro	-0,0040	-4,3E-03	0,017	0,000	-0,017	0,0016	0,11
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	356,6
	Giro	2,0E-03	2,2E-03	-0,0086	-0,026	-0,043	-0,0061	0,14
Índice Error	0,702	0,724	0,504	0,424	0,363	0,737	1,767	0,963

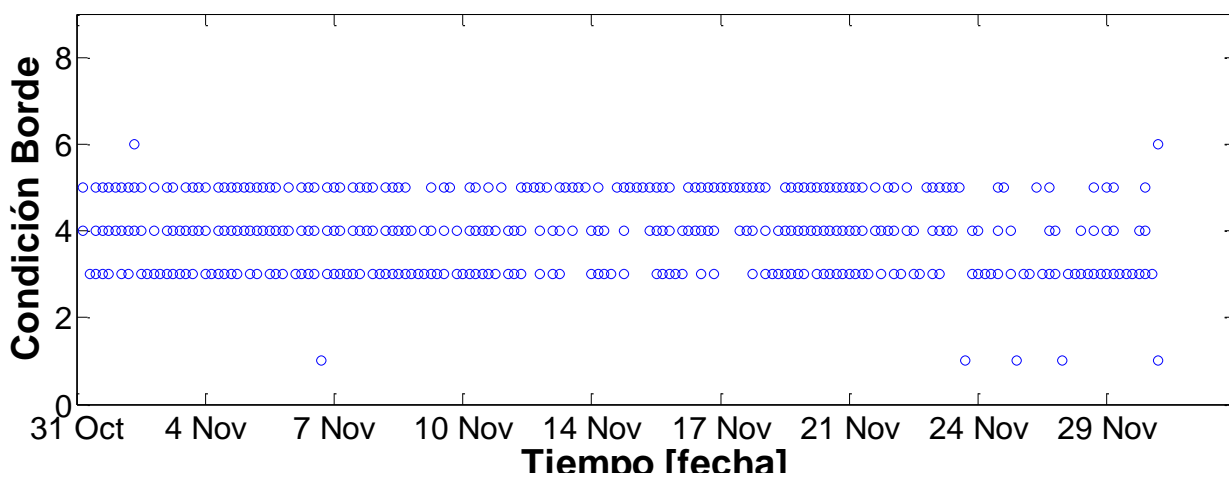


Gráfico B-29: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS14 Eje Y (Noviembre), nivel producción.

Condición de Borde TS14 Y

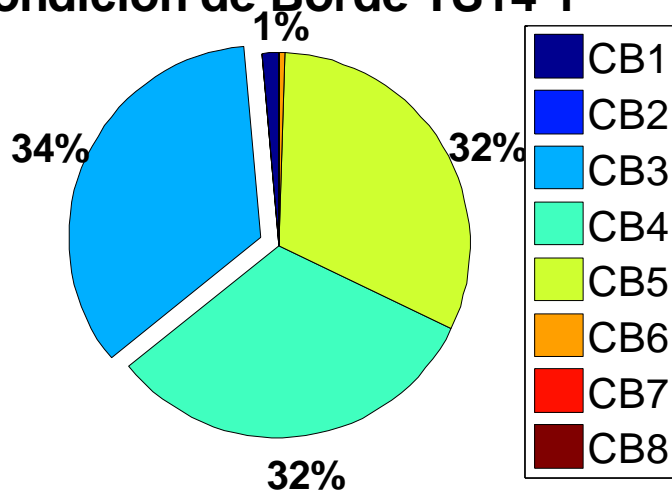


Gráfico B-30: Condiciones de borde para TS14 Eje Y (Noviembre), nivel producción.

Tabla B-12: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS14 Eje Y (Noviembre), nivel producción

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-41,5	-	-169,3	-78,2	-	-	-	-
	Giro	0,037	9,7E-03	0,084	0,062	0,042	-0,0007	-0,009	0,006
P1	Corte	-	8,9	-60,0	-	50,0	-	-	4,6
	Giro	0,014	-5,4E-04	0,062	0,040	0,022	0,001	0,019	-0,0018
P2	Corte	-	-	-	28,1	53,1	2,8	66,2	-
	Giro	-0,0044	-5,2E-03	0,017	-0,001	-0,016	0,0007	0,06	0,0027
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	199,5	24,0
	Giro	2,2E-03	2,6E-03	-0,0084	-0,022	-0,035	-0,0026	0,08	0,018
Índice Error		0,567	0,607	0,604	0,602	0,600	0,573	2,408	1,215

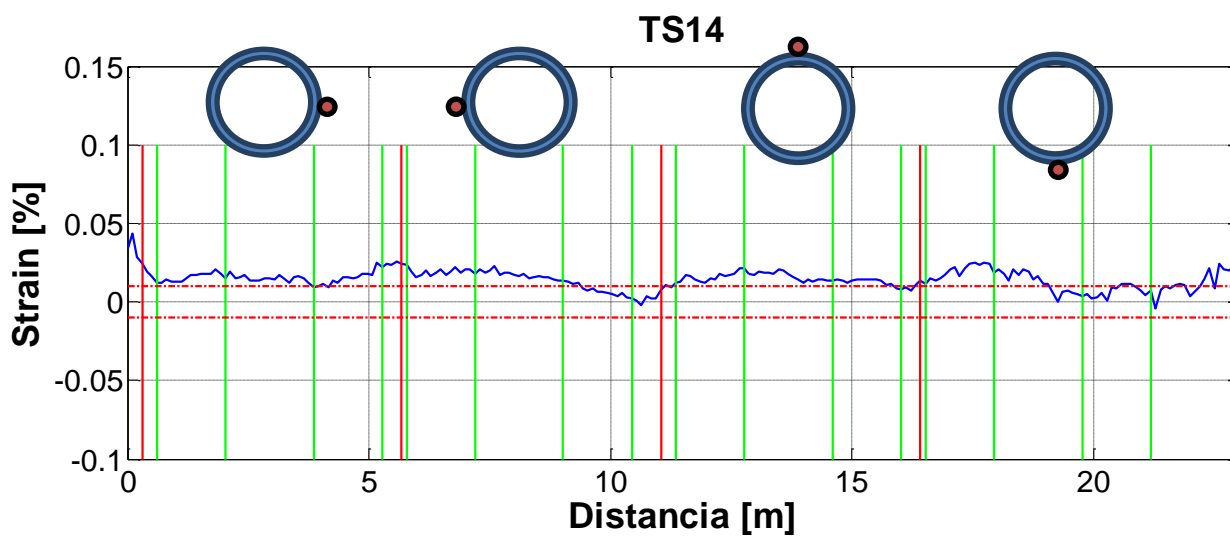


Gráfico B-31: Deformación del sensor TS14 a finales de Diciembre, nivel producción

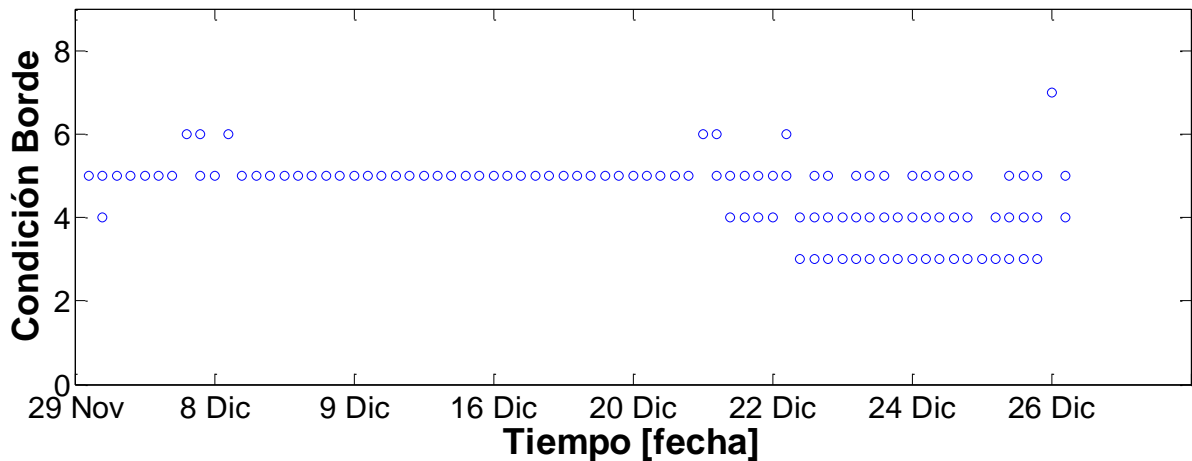


Gráfico B-32: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS14 Eje Z (Diciembre), nivel producción.

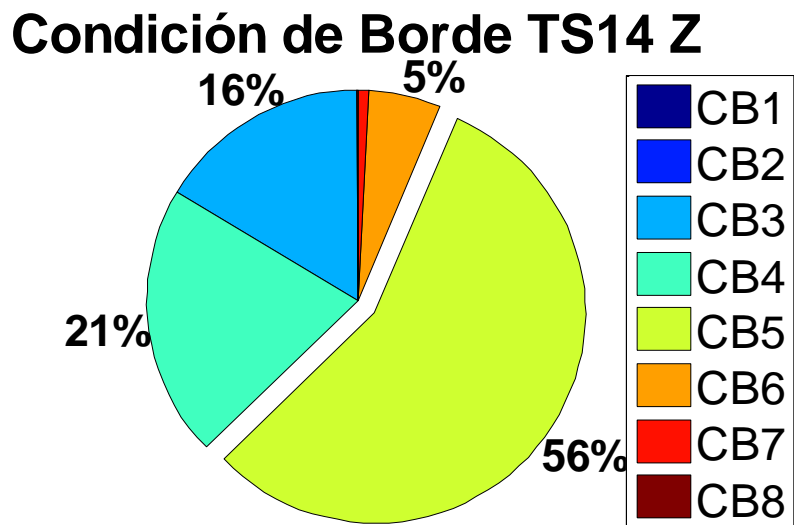


Gráfico B-33: Condiciones de borde para TS14 Eje Z (Diciembre), nivel producción.

Tabla B-13: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS14 Eje Z (Diciembre), nivel producción

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-19,4	-	-86,3	-44,0	-	-	-	-
	Giro	0,017	4,0E-03	0,042	0,034	0,027	-0,0011	-0,012	-0,003
P1	Corte	-	3,7	-31,4	-	32,9	-	-	-4,5
	Giro	0,007	-2,2E-04	0,032	0,024	0,016	0,002	0,023	-0,0025
P2	Corte	-	-	-	18,9	37,7	4,6	82,4	-
	Giro	-0,0021	-2,2E-03	0,009	0,000	-0,010	0,0012	0,08	0,0128
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	244,7	45,2
	Giro	1,0E-03	1,1E-03	-0,0046	-0,015	-0,026	-0,0043	0,09	0,030
Índice Error		0,382	0,398	0,277	0,269	0,261	0,383	1,259	0,676

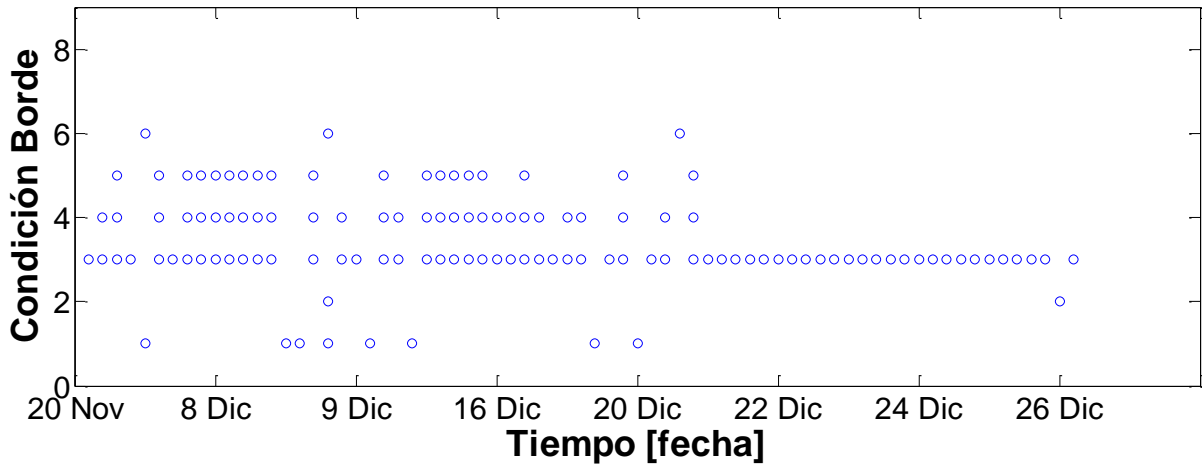


Gráfico B-34: Distribución de Condición de Borde en el tiempo para TS14 Eje Y (Diciembre), nivel producción.

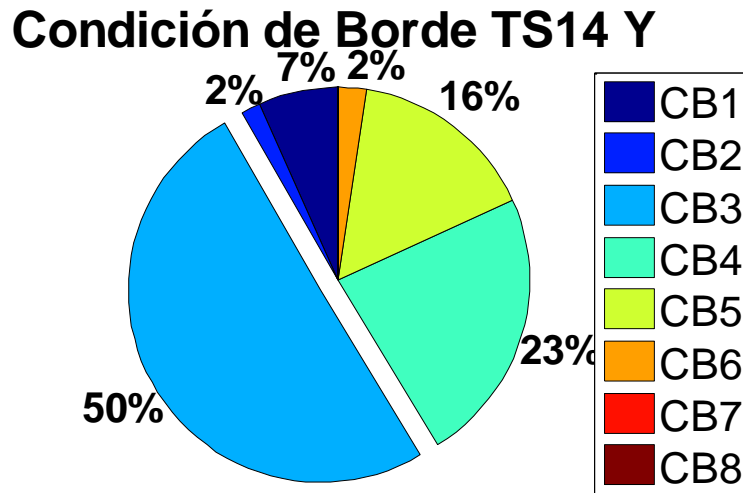


Gráfico B-35: Condiciones de borde para TS14 Eje Y (Diciembre), nivel producción.

Tabla B-14: Desplazamientos [mm] y giros [radianes] para cada CB de TS14 Eje Y (Diciembre), nivel producción

	GL	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6	CB7	CB8
A	Corte	-20,2	-	-86,5	-41,7	-	-	-	-
	Giro	0,018	4,4E-03	0,043	0,033	0,024	-0,0007	-0,008	0,000
P1	Corte	-	4,1	-31,1	-	28,8	-	-	-1,0
	Giro	0,007	-2,5E-04	0,032	0,022	0,013	0,001	0,016	-0,0017
P2	Corte	-	-	-	16,5	32,0	3,0	56,9	-
	Giro	-0,0021	-2,4E-03	0,009	0,000	-0,009	0,0008	0,05	0,0069
B	Corte	-	-	-	-	-	-76,0	169,7	27,9
	Giro	1,1E-03	1,2E-03	-0,0045	-0,013	-0,021	-0,0028	0,06	0,019
Índice Error		0,346	0,413	0,196	0,232	0,259	0,377	1,639	0,863

ANEXO C Registro fotográfico de los sensores TS en la mina “El Teniente”.

Se presenta a continuación un registro fotográfico de los sensores instalados en la mina “El Teniente”

