



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**RESOLUCIÓN ESPACIAL EN LA APLICACIÓN DE FIBRA
ÓPTICA (BOTDR) EN PERNOS DE ANCLAJE DE
SOPORTE EN TÚNELES**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
MENCIÓN INGENIERÍA GEOTÉCNICA**

JAVIER ANDRE YERKO SANDOVAL GUZMÁN

PROFESOR GUÍA:
RICARDO MOFFAT COVARRUBIAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RAMÓN VERDUGO ALVARADO
CLAUDIO FONCEA NAVARRO
ALEJANDRA ÁLVAREZ VALLEJOS

SANTIAGO DE CHILE
ENERO 2010

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL Y MAGÍSTER EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA MENCIÓN
INGENIERÍA GEOTÉCNICA
POR: JAVIER SANDOVAL GUZMÁN
FECHA: Ex. Grado 29/01/2010
PROF. GUÍA: Sr. RICARDO MOFFAT

“RESOLUCIÓN ESPACIAL EN LA APLICACIÓN DE FIBRA ÓPTICA (BOTDR) EN PERNOS DE ANCLAJE DE SOPORTE EN TÚNELES”

El presente estudio trata sobre la interpretación y análisis de la *Reflectometría Óptica Brillouin de Dominio Temporal (BOTDR)* en su aplicación a pernos de anclaje en túneles.

Su motivación surge de la búsqueda de perfeccionamiento o mayor eficacia en el monitoreo de sistemas de soporte en túneles, respecto a los métodos existentes en la actualidad. La tecnología BOTDR emplea fibra óptica para monitorear deformaciones con ventajas sobre métodos tradicionales, al permitir incluir extensos tramos con inmunidad a influencias electromagnéticas. La teoría establece que existen cambios en la frecuencia de la luz que pasa a través de la fibra óptica cuando ella se deforma, y que tales cambios están directamente relacionados con las deformaciones axiales que determina automáticamente el sistema analizador BOTDR. Éste sistema permite obtener las curvas de espectro de frecuencia, de donde se deduce la frecuencia característica asociada al máximo nivel de potencia.

Para la aplicación en pernos de anclaje, ha sido necesario observar el procedimiento que usa el sistema deteniéndose en la curvas de espectro, y utilizar varias alternativas para la obtención de parámetros correlacionándolos con las mediciones de deformaciones unitarias a través de strain gages.

Existe una importante restricción en la resolución espacial, ya que el sistema BOTDR sólo permite obtener las deformaciones unitarias axiales promedio en la fibra óptica en tramos de un metro de longitud. Su aplicación directa en pernos de anclaje es por tanto cuestionada, en particular debido a la gran variación de la deformación tanto en el tiempo, como en la posición a lo largo del perno.

La alternativa que este estudio recomienda utilizar, consiste en modificar la curva del espectro de frecuencias aplicando una determinada función potencia, calcular luego su frecuencia promedio obtenida como centro de gravedad del área de esta curva y asociar esta frecuencia promedio con la deformación de la fibra. Las confirmaciones experimentales permiten trabajar con tramos de hasta aproximadamente 50 cm de longitud.

Se entregan recomendaciones para la aplicación práctica de la fibra óptica en pernos de anclaje y su instrumentación en túneles utilizando un monitoreo central a través de una misma fibra óptica que permita obtener las deformaciones en un conjunto de pernos. Asimismo, se entregan recomendaciones para la continuidad de esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

A los profesores Ramón Verdugo y Claudio Foncea por haber incentivado en mí el aprendizaje de esta hermosa disciplina conocida como Geotecnia. Al profesor Ricardo Moffat, por su confianza y por haberme aceptado como su alumno tesista.

A Omar, Víctor y la gran familia del emblemático laboratorio de sólidos. Aquellos momentos vividos, donde nos ayudábamos mutuamente sin esperar nada a cambio, fueron fundamentales para mantener siempre la fuerza necesaria que permitió terminar este largo y arduo trabajo.

A los poetas muertos, con quienes hablábamos de lo impensado e indagábamos en lo más profundo de nuestras mentes, para comprender al ser humano y a nosotros mismos.

A los trabajadores de Micomo y CMM por la amabilidad y buen trabajo de equipo. A Álvaro Uribe (no el presidente) por su apoyo para el desarrollo de esta investigación.

A mi familia por el inmenso apoyo incondicional, por estar siempre a mi lado, sobretodo en los momentos difíciles, cuando creí estar solo. Les pido disculpas por haberlos abandonado en tantas ocasiones sin haberlo querido. A veces, para entregar a los que más necesitan, hay que sacrificar lo que uno más ama.

A la Universidad de Chile y su comunidad tri-estamental, por permitirme ser parte de ella y por no haber perdido del todo, el espíritu y rol social con el cual fue fundada.

A los imprescindibles, aquellos que dedican toda su vida a la lucha por construir un mundo mejor y que pese a todos los obstáculos, mantienen siempre la alegre rebeldía. Con esto agradezco a los hijos de Recabarren, con quienes compartí los momentos más bellos de mi época estudiantil, con quienes crecí como persona, con quienes abrí los ojos. Sigamos hasta ser imprescindibles, sigamos aunque nos cueste la vida. Compañeros, simplemente... doy las gracias por su luz.

A todos aquellos que forman parte de los recuerdos de la etapa que hasta ahora, ha sido la más hermosa de mi vida. No lo creía así cuando llegué, no esperaba que así fuera. Tuve la suerte de escoger los caminos que me han traído hasta acá, de rodearme de aquellos que contribuyeron a que ahora me sienta así. Todavía falta mucho por aprender, mucho por recorrer, mucho por entregar y un mundo por transformar. Dejo acá un humilde testimonio de agradecimiento. Es difícil escribir estas líneas sin quebrarse, sin que mi mente recorra con emoción y nostalgia todos esos momentos, muchos más buenos que malos; momentos que sin duda han servido de aprendizaje, ayudándome a comprender el mundo en que vivo. Se me fue la juventud en esto, pero no me arrepiento de nada. Agradezco cada minuto que caminé por los pasillos de la Escuela de Ingeniería y Ciencias. Agradezco haber asistido a sus aulas, haber descansado en las áreas verdes aledañas y haber conocido el vecindario y sus habitantes. Agradezco haber jugado las pichangas y campeonatos, haber tocado con la banda en la cafeta, haber compartido con mis compañeros y haber conocido a los funcionarios y su labor. Agradezco haber participado en la organización y movimiento estudiantil, aportando en la construcción de un país más justo y solidario. Sólo soy uno más de cientos de miles que han pasado por acá, y me voy como tal. Ojalá cada joven que sueñe y se esfuerce por estudiar en un lugar como éste, pueda hacerlo; y que una vez acá, logre despertar y darse cuenta, como pude hacerlo yo, que ser joven y no ser revolucionario, es una contradicción hasta biológica.

A mis padres...

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN	43
1.1.	Motivación y Generalidades	43
1.2.	Objetivos y Alcances	46
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	47
2.1.	Acerca de la Tecnología BOTDR	47
2.1.1.	Principios Físicos de la Tecnología BOTDR	48
2.1.2.	Resolución Espacial	54
2.1.3.	Análisis Sobre la Resolución Espacial	55
2.1.4.	Resumen del proceso físico y análisis de información BOTDR	61
2.1.5.	Características de la medición con sistema BOTDR	61
2.1.6.	Influencia de la temperatura en la medición	63
2.1.7.	Lecturas del software para captura de datos del sistema BOTDR	64
2.1.8.	Integración realizada por el sistema BOTDR en la Resolución Espacial....	68
2.2.	Tipos y Estructuras de Fibras Ópticas	78
2.3.	Característica de Curvado de la Fibra Óptica	80
2.4.	Propiedades de Transmisión de la Fibra Óptica	81
2.4.1.	Atenuación o Pérdida en la Fibra	81
2.4.2.	El Decibel (dB)	81
2.5.	Sobre Anclajes en Roca	83
2.5.1.	Distribución Teórica de Esfuerzos en Anclajes	85
2.6.	Aplicación en Mina Subterránea El Teniente, sector Reservas Norte (RENO) ...	105
2.6.1.	Características Geotécnicas y Geomecánicas El Teniente y Sector RENO 105	
2.6.2.	Detalle de Anclajes Instalados en Sector RENO.	111
3.	EQUIPOS UTILIZADOS	112
3.1.	Equipos para Aplicación y Medición de Carga Axial	112
3.1.1.	Cilindro, Bomba y Manguera Hidráulica Power Team®:	112

3.2.	Equipos y software para medición y adquisición de datos.....	113
3.2.1.	Celda de carga (ver <i>Fig. 3.3</i>):	113
3.2.2.	Field Point (adquisición de datos) (ver <i>Fig. 3.4</i>):.....	114
3.2.3.	Software LabView® de National Instruments®.....	117
3.2.4.	Analizador BOTDR ADVANTEST® desarrollado por Nipon Telegraph and Telephone®, Software N8510® y Computador Dell®:.....	117
3.2.5.	Dispositivo para fusionar fibra óptica	118
3.2.6.	Manómetro Análogo.....	119
3.2.7.	Termómetro portátil.....	120
3.3.	Dispositivos de medición de deformación.....	120
3.3.1.	Extensómetro	121
3.3.2.	Diales	122
3.3.3.	Strain gages.....	123
3.3.4.	Fibras Ópticas Utilizadas:	128
4.	INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL	134
4.1.	Materiales Utilizados	134
4.1.1.	Pernos de Acero tipo SafeRock®	134
4.1.2.	Hormigón:.....	135
4.1.3.	Resina Epóxica ADHEROK ASG®:.....	137
4.1.4.	Lechada de Cemento (Grout):	138
4.1.5.	Pegamentos utilizados (Instalación Fibra Óptica Sensora en Pernos):	138
4.1.6.	Sujetadores Fibra Óptica:	140
4.2.	Instrumentación y Preparación Pernos de Anclaje.....	142
4.2.1.	Alternativas de Instalación de Fibra Sensora en Pernos:	144
4.2.2.	Conclusión sobre alternativas de instalación:	146
4.3.	Procedimiento de Ensayo.....	147
4.3.1.	Ensayos de Calibración:	148
4.3.2.	Ensayos en pernos de anclaje:	149

4.4.	Programa de Investigación	158
4.4.1.	Ensayos de Calibración:	159
4.4.2.	Ensayos en Perno de Acero:	160
I.	Ensayos de pernos en laboratorio (ensayos tipo L):	160
II.	Ensayos de pernos en losa de H. A. (ensayos tipo B, AH, AR y AG):.....	162
5.	RESULTADOS	168
5.1.	Ensayos Preliminares	168
5.1.1.	Comparación de distintos tipos de pegamentos	168
5.1.2.	Calibración y análisis de error experimental de strain gages y celda de carga	169
5.1.3.	Calibración Fibra Óptica.....	176
5.2.	Metodologías de Análisis del Resultado BOTDR	197
5.2.1.	Metodología manual de análisis de resultados	198
5.2.2.	Análisis de resultados mediante observación de espectros	214
5.3.	Resultados de mediciones de Strain Gages y Celda de Carga	229
5.3.1.	Consideraciones previas.....	229
5.3.2.	Ensayos de Pernos tipo L, en Laboratorio.	230
5.3.3.	Ensayos de Pernos de Anclajes Tipo B, en Losa de H.A.	233
5.3.4.	Ensayos de Pernos de Anclajes Tipo A, en Losa de H.A.	234
5.4.	Resultados BOTDR	247
5.4.1.	Ensayos de Pernos de Anclaje Tipo L, en Laboratorio.	269
5.4.2.	Ensayos de Pernos de Anclajes Tipo B, en Losa de H.A.	285
5.4.3.	Ensayos de Pernos de Anclajes Tipo A, en Losa de H.A.	302
5.4.4.	Bandas de correlaciones ensayos tipo A (AH, AR y AG).....	364
5.4.5.	Resúmenes estadísticos de los resultados mostrados	386
6.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	395
6.1.	Análisis de sensibilidad de las alternativas usadas	395
6.2.	Análisis de Deformaciones Absolutas	396

6.3.	Otros Métodos de Análisis Derivados de la Investigación	407
7.	DISCUSIÓN	410
8.	CONCLUSIONES	416
9.	RECOMENDACIONES	418
9.1.	Aplicación a Pernos de Anclaje	418
9.2.	De Futuros Estudios	418
10.	REFERENCIAS	420
	<u>ANEXO A:</u> Figuras Anexas de Resultados de Ensayos.....	424
	<u>ANEXO B:</u> Fotografías Anexas de la Investigación.....	429
	<u>ANEXO C:</u> Mapeos de la Instrumentación de Pernos.....	433
	<u>ANEXO D:</u> Detalle Puntos 1 y 2 de Observación.	444
	<u>ANEXO E:</u> Lecturas a través de <i>software N8510</i> [®]	446
	<u>ANEXO F:</u> Tablas con correlaciones de frecuencias promedio versus deformación unitaria de strain gages.	450
	<u>ANEXO G:</u> Identificación del largo real deformado	464
G.1.	Identificación Largo Real Deformado.....	465
	<u>ANEXO H:</u> Resumen del proceso físico y análisis de información BOTDR	470
H.1.	Resumen del proceso físico y análisis de información BOTDR.....	471
	<u>ANEXO I:</u> Corrección de la influencia de la temperatura	475
I.1.	Corrección de la influencia de la temperatura.....	476
	<u>ANEXO J:</u> Otras características y propiedades de la fibra óptica	477
J.1.	Característica de Curvado de la Fibra Óptica	478
J.2.	Métodos de las Tecnologías de Medición con Fibra Óptica	479

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1: Condiciones del “setup” del sistema BOTDR (NTT, 2007)</i>	62
<i>Tabla 2.2: Características de la medición con sistema BOTDR (NTT, 2007)</i>	62
<i>Tabla 2.3: Especificaciones de instalación de ensayos realizados en anclajes completamente grouteados en resina epóxica (Farmer, 1975).</i>	96
<i>Tabla 2.4: Propiedades mecánicas de materiales utilizados en ensayos realizados en anclajes completamente grouteados en resina epóxica (Hyett, 1992).</i>	96
<i>Tabla 2.5: Propiedades mecánicas de materiales utilizados en ensayos realizados en anclajes completamente grouteados en resina epóxica (Farmer, 1975).</i>	96
<i>Tabla 2.6: Propiedades Geotécnicas Roca Intacta en El Teniente (PND 2009, Informe Interno, Div. El Teniente, CODELCO CHILE).</i>	107
<i>Tabla 2.7: Propiedades Módulo de Young para roca intacta y para macizo rocoso (Ei y Em) en sector RENO (PND 2009, Div. El Teniente, CODELCO CHILE)</i>	108
<i>Tabla 2.8: Frecuencia de estructuras geológicas por metro para diferentes unidades litológicas (PND 2009, Div. El Teniente, CODELCO CHILE, 2008)</i>	108
<i>Tabla 2.9: Características Relevantes Falla N1, (Benado, D., Informe Interno, 2004)</i>	109
<i>Tabla 2.10: Detalles de anclajes instalados en túneles de niveles hundimiento, producción y ventilación, sector RENO (MICOMO – CODELCO, 2008).</i>	111
<i>Tabla 3.1: Especificaciones Extensómetro Epsilon Modelo 3542</i>	121
<i>Tabla 3.2: Especificaciones Diales Mitutoyo[®], modelo 3062S-19.</i>	122
<i>Tabla 3.3: Especificaciones técnicas de Strain Gages utilizados en la investigación (TML)</i>	128
<i>Tabla 3.4: Especificaciones técnicas de Strain Gages utilizados en la investigación (TML)</i>	128
<i>Tabla 4.1: Propiedades Mecánicas Mínimas (Gerdau AZA[®])</i>	135
<i>Tabla 4.2: Dimensiones Nominales (Gerdau AZA[®])</i>	135
<i>Tabla 4.3: Dimensiones y propiedades nominales de placas y tuercas de sujeción (DSI – Soprofin[®], sitio electrónico)</i>	135

<i>Tabla 4.4: Materiales utilizados para fabricación de losa de H.A.</i>	137
<i>Tabla 4.5: Propiedades mecánicas típicas según norma ASTM D 368 (Loctite®, sitio electrónico)</i>	139
<i>Tabla 4.6: Propiedades físicas típicas antes del curado o endurecimiento del adhesivo y sus componentes (Loctite®, sitio electrónico)</i>	140
<i>Tabla 4.7: Programa de ensayos realizados</i>	166
<i>Tabla 4.8: Resumen instalación y condición de strain gages por ensayo.</i>	167
<i>Tabla 5.1: Tramos del ensayo según mapeo. Datos ensayo de calibración 16-nov-2007.</i>	177
<i>Tabla 5.2: Posición absoluta de puntos de observación. Datos ensayo calibración 16-nov-2007.</i>	177
<i>Tabla 5.3: Tramos del ensayo según mapeo manual. Datos ensayo calibración 21-nov-2007</i>	183
<i>Tabla 5.4: Posición absoluta de puntos de observación. Datos ensayo calibración 21-nov-2007.</i>	183
<i>Tabla 5.5: Tramos del ensayo según mapeo manual. Datos ensayo de calibración 22-nov-2007.</i>	192
<i>Tabla 5.6: Posición absoluta de puntos de observación. Datos ensayo de calibración 22-nov-2007.</i>	192
<i>Tabla 5.7: Métodos de análisis de espectros de frecuencia BOTDR en forma manual</i> ...	203
<i>Tabla 5.8: Resumen de Alternativas de Deducción de Frecuencias Promedio</i>	226
<i>Tabla 5.9: Deformación Teórica Perno de Acero a Tracción</i>	230
<i>Tabla 5.10: Ensayo L 26-nov-2007 (laboratorio). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.</i>	231
<i>Tabla 5.11: Ensayo L 26-dic-2007 (laboratorio). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.</i>	232
<i>Tabla 5.12: Ensayo B 23-ene-2008 (terreno, falla tipo bloque). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.</i>	233

<i>Tabla 5.13: Ensayo B 21-feb-2008 (terreno, falla tipo bloque). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.</i>	234
<i>Tabla 5.14: Ensayo AH 26-feb-2008 (terreno, zona anclada en hormigón). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.</i>	235
<i>Tabla 5.15: Ensayo AH 18-jul-2008 (terreno, tipo zona anclada en hormigón). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.</i>	235
<i>Tabla 5.16: Ensayo AR 22-ago-2008 (terreno, tipo zona anclada en resina). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.</i>	236
<i>Tabla 5.17: Ensayo AR 08-sep-2008 (terreno, tipo zona anclada en resina). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.</i>	236
<i>Tabla 5.18: Ensayo AG1 25-nov-2008 (terreno, tipo zona anclada en grout). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.</i>	237
<i>Tabla 5.19: Ensayo AG2 25-nov-2008 (terreno, tipo zona anclada en grout). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.</i>	238
<i>Tabla 5.20: Ensayos tipo AH (terreno, tipo zona anclada en hormigón). Parámetros decaimiento exponencial de deformación en profundidad (ver Ec. 5.5).</i>	240
<i>Tabla 5.21: Ensayos tipo AR (terreno, tipo zona anclada en resina). Parámetros decaimiento exponencial de deformación en profundidad (ver Ec. 5.5).</i>	241
<i>Tabla 5.22: Ensayos tipo AG (terreno, tipo zona anclada en grout). Parámetros decaimiento exponencial de deformación en profundidad (ver Ec. 5.5).</i>	242
<i>Tabla 5.23: Ensayos tipo AH, AR y AG (en terreno, tipo zona anclada). Parámetros decaimiento exponencial de deformación en profundidad (ver Ec. 5.5).</i>	244
<i>Tabla 5.24: Ensayos tipo AH, AR y AG (en terreno, tipo zona anclada). Parámetros relación lineal tensión-deformación. Datos de strain gage 1 y 2.</i>	245
<i>Tabla 5.25: Ensayos tipo AH, AR y AG (en terreno, tipo zona anclada). Parámetros relación lineal tensión-deformación. Promedio strain gages 1 y 2.</i>	246
<i>Tabla 5.26: Tendencias de frecuencias promedio según nivel de carga. Datos ensayo AR 08-sep-2008, paso 10MHz.</i>	249

<i>Tabla 5.27: Punto1-Alternativa 1. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas desplazadas en 100dB versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.</i>	<i>253</i>
<i>Tabla 5.28: Punto1+5cm-Alternativa 1. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas desplazadas en 100dB versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.</i>	<i>254</i>
<i>Tabla 5.29: Punto1+10cm-Alternativa 1. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas desplazadas en 100dB versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.</i>	<i>255</i>
<i>Tabla 5.30: Punto2-Alternativa 1. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas desplazadas en 100dB versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.</i>	<i>256</i>
<i>Tabla 5.31: Punto 1-Alternativa 2. Correlaciones entre Δfrecuencias (Máximo del rango – frecuencia promedio de curvas sin desplazar) versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.</i>	<i>257</i>
<i>Tabla 5.32: Punto 1+5cm-Alternativa 2. Correlaciones entre Δfrecuencias (Máximo del rango – frecuencia promedio de curvas sin desplazar) versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.</i>	<i>258</i>
<i>Tabla 5.33: Punto 1+10cm-Alternativa 2. Correlaciones entre Δfrecuencias (Máximo del rango – frecuencia promedio de curvas sin desplazar) versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.</i>	<i>259</i>
<i>Tabla 5.34: Punto 2-Alternativa 2. Correlaciones entre Δfrecuencias (Máximo del rango – frecuencia promedio de curvas sin desplazar) versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.</i>	<i>260</i>
<i>Tabla 5.35: Punto 1-Alternativa 3. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas desplazadas en mínimo dB del rango versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.</i>	<i>261</i>
<i>Tabla 5.36: Punto 1+5cm-Alternativa 3. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas desplazadas en mínimo dB del rango versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.</i>	<i>262</i>

<i>Tabla 5.37: Punto 1+10cm-Alternativa 3. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas desplazadas en mínimo dB del rango versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.</i>	263
<i>Tabla 5.38: Punto 2-Alternativa 3. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas desplazadas en mínimo dB del rango versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.</i>	264
<i>Tabla 5.39: Punto 1-Alternativa 4. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas transformadas aplicando función inversa (transformando los datos de decibel a potencia, ver Ec. 2.20) versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.</i>	265
<i>Tabla 5.40: Punto 1+5cm-Alternativa 4. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas transformadas aplicando función inversa (transformando los datos de decibel a potencia, ver Ec. 2.20) versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.</i>	266
<i>Tabla 5.41: Punto 1+10cm-Alternativa 4. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas transformadas aplicando función inversa (transformando los datos de decibel a potencia, ver Ec. 2.20) versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.</i>	267
<i>Tabla 5.42: Punto 2-Alternativa 4. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas transformadas aplicando función inversa (transformando los datos de decibel a potencia, ver Ec. 2.20) versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.</i>	268
<i>Tabla 5.43: Ponderación o grado de importancia considerado para la variación de los dos parámetros estudiados.</i>	280
<i>Tabla 5.44: Ensayos tipo L – Alternativa 1. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo L (laboratorio).</i>	281
<i>Tabla 5.45: Ensayo L 26-nov-2007 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo L 26-nov-2007.</i>	281
<i>Tabla 5.46: Ensayo L 26-dic-2007 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo L 26-dic-2007.</i>	281

<i>Tabla 5.47: Ensayos tipo L – Alternativa 1. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo L (laboratorio).</i>	282
<i>Tabla 5.48: Ensayos tipo L – Alternativa 2. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo L (laboratorio).</i>	282
<i>Tabla 5.49: Ensayo L 26-nov-2007 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo L 26-nov-2007.</i>	282
<i>Tabla 5.50: Ensayo L 26-dic-2007 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo L 26-dic-2007.</i>	282
<i>Tabla 5.51: Ensayos tipo L – Alternativa 2. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo L (laboratorio).</i>	282
<i>Tabla 5.52: Ensayos tipo L – Alternativa 3. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo L (laboratorio).</i>	283
<i>Tabla 5.53: Ensayo L 26-nov-2007 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo L 26-nov-2007.</i>	283
<i>Tabla 5.54: Ensayo L 26-dic-2007 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo L 26-dic-2007.</i>	283
<i>Tabla 5.55: Ensayos tipo L – Alternativa 3. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo L, en laboratorio.</i>	283
<i>Tabla 5.56: Ensayos tipo L – Alternativa 4. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo L (laboratorio).</i>	284
<i>Tabla 5.57: Ensayo L 26-nov-2007 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo L 26-nov-2007.</i>	284
<i>Tabla 5.58: Ensayo L 26-dic-2007 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo L 26-dic-2007.</i>	284
<i>Tabla 5.59: Ensayos tipo L – Alternativa 4. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo L (laboratorio).</i>	284
<i>Tabla 5.60: Ensayos tipo B – Alternativa 1. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo B (en terreno, falla tipo bloque).</i>	298
<i>Tabla 5.61: Ensayo B 23-ene-2008 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo B 23-ene-2008.</i>	298

<i>Tabla 5.62: Ensayo B 21-feb-2008 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo B 21-feb-2008.</i>	298
<i>Tabla 5.63: Ensayos tipo B – Alternativa 1. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo B (en terreno, falla tipo bloque).</i>	298
<i>Tabla 5.64: Ensayos tipo B – Alternativa 2. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo B (en terreno, falla tipo bloque).</i>	299
<i>Tabla 5.65: Ensayo B 23-ene-2008 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo B 23-ene-2008.</i>	299
<i>Tabla 5.66: Ensayo B 21-feb-2008 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo B 21-feb-2008.</i>	299
<i>Tabla 5.67: Ensayos tipo B – Alternativa 2. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo B (en terreno, falla tipo bloque).</i>	299
<i>Tabla 5.68: Ensayos tipo B – Alternativa 3. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo B (en terreno, falla tipo bloque).</i>	300
<i>Tabla 5.69: Ensayo B 23-ene-2008 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo B 23-ene-2008.</i>	300
<i>Tabla 5.70: Ensayo B 21-feb-2008 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo B 21-feb-2008.</i>	300
<i>Tabla 5.71: Ensayos tipo B – Alternativa 3. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo B (en terreno, falla tipo bloque).</i>	300
<i>Tabla 5.72: Ensayos tipo B – Alternativa 4. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo B (en terreno, falla tipo bloque).</i>	301
<i>Tabla 5.73: Ensayo B 23-ene-2008 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo B 23-ene-2008.</i>	301
<i>Tabla 5.74: Ensayo B 21-feb-2008 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo B 21-feb-2008.</i>	301
<i>Tabla 5.75: Ensayos tipo B – Alternativa 4. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo B (en terreno, falla tipo bloque).</i>	301
<i>Tabla 5.76: Ensayos tipo AH – Alternativa 1. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AH (en terreno, tipo zona anclada en hormigón).</i>	313

<i>Tabla 5.77: Ensayo AH-26-feb-2008 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AH 26-feb-2008.</i>	313
<i>Tabla 5.78: Ensayo AH-18-jul-2008 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AH 18-jul-2008.</i>	313
<i>Tabla 5.79: Ensayos tipo AH – Alternativa 1. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AH (en terreno, tipo zona anclada en hormigón).</i>	313
<i>Tabla 5.80: Ensayos tipo AH – Alternativa 2. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AH (en terreno, tipo zona anclada en hormigón).</i>	314
<i>Tabla 5.81: Ensayo AH-26-feb-2008 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AH 26-feb-2008.</i>	314
<i>Tabla 5.82: Ensayo AH-18-jul-2008 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AH 18-jul-2008.</i>	314
<i>Tabla 5.83: Ensayos tipo AH – Alternativa 2. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AH (en terreno, tipo zona anclada en hormigón).</i>	314
<i>Tabla 5.84: Ensayos tipo AH – Alternativa 3. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AH (en terreno, tipo zona anclada en hormigón).</i>	315
<i>Tabla 5.85: Ensayo AH-26-feb-2008 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AH 26-feb-2008.</i>	315
<i>Tabla 5.86: Ensayo AH-18-jul-2008 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AH 18-jul-2008.</i>	315
<i>Tabla 5.87: Ensayos tipo AH – Alternativa 3. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AH (en terreno, tipo zona anclada en hormigón).</i>	315
<i>Tabla 5.88: Ensayos tipo AH – Alternativa 4. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AH (en terreno, tipo zona anclada en hormigón).</i>	316
<i>Tabla 5.89: Ensayo AH-26-feb-2008 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AH 26-feb-2008.</i>	316
<i>Tabla 5.90: Ensayo AH-18-jul-2008 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AH 18-jul-2008.</i>	316
<i>Tabla 5.91: Ensayos tipo AH – Alternativa 4. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AH (en terreno, tipo zona anclada en hormigón).</i>	316

<i>Tabla 5.92: Ensayos tipo AR – Alternativa 1. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).</i>	339
<i>Tabla 5.93: Ensayo AR 22-ago-2008 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AR 22-ago-2008.</i>	339
<i>Tabla 5.94: Ensayo AR 08-sep-2008 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AR 08-sep-2008.</i>	339
<i>Tabla 5.95: Ensayos tipo AR – Alternativa 1. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).</i>	339
<i>Tabla 5.96: Ensayos tipo AR – Alternativa 2. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).</i>	340
<i>Tabla 5.97: Ensayo AR 22-ago-2008 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AR 22-ago-2008.</i>	340
<i>Tabla 5.98: Ensayo AR 08-sep-2008 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AR 08-sep-2008.</i>	340
<i>Tabla 5.99: Ensayos tipo AR – Alternativa 2. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).</i>	340
<i>Tabla 5.100: Ensayos tipo AR – Alternativa 3. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).</i>	341
<i>Tabla 5.101: Ensayo AR 22-ago-2008 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AR 22-ago-2008.</i>	341
<i>Tabla 5.102: Ensayo AR 08-sep-2008 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AR 08-sep-2008.</i>	341
<i>Tabla 5.103: Ensayos tipo AR – Alternativa 3. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).</i>	341
<i>Tabla 5.104: Ensayos tipo AR – Alternativa 4. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).</i>	342
<i>Tabla 5.105: Ensayo AR 22-ago-2008 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AR 22-ago-2008.</i>	342
<i>Tabla 5.106: Ensayo AR 08-sep-2008 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AR 08-sep-2008.</i>	342

<i>Tabla 5.107: Ensayos tipo AR – Alternativa 4. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).</i>	<i>342</i>
<i>Tabla 5.108: Ensayos tipo AG – Alternativa 1. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AG (en terreno, tipo zona anclada en grout).</i>	<i>360</i>
<i>Tabla 5.109: Ensayo AG1 25-nov-2008 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AG1 25-nov-2008.</i>	<i>360</i>
<i>Tabla 5.110: Ensayo AG2 25-nov-2008 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AG2 25-nov-2008.</i>	<i>360</i>
<i>Tabla 5.111: Ensayos tipo AG – Alternativa 1. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).</i>	<i>360</i>
<i>Tabla 5.112: Ensayos tipo AG – Alternativa 2. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AG (en terreno, tipo zona anclada en grout).</i>	<i>361</i>
<i>Tabla 5.113: Ensayo AG1 25-nov-2008 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AG1 25-nov-2008.</i>	<i>361</i>
<i>Tabla 5.114: Ensayo AG2 25-nov-2008 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AG2 25-nov-2008.</i>	<i>361</i>
<i>Tabla 5.115: Ensayos tipo AG – Alternativa 2. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).</i>	<i>361</i>
<i>Tabla 5.116: Ensayos tipo AG – Alternativa 3. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AG (en terreno, tipo zona anclada en grout).</i>	<i>362</i>
<i>Tabla 5.117: Ensayo AG1 25-nov-2008 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AG1 25-nov-2008.</i>	<i>362</i>
<i>Tabla 5.118: Ensayo AG2 25-nov-2008 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AG2 25-nov-2008.</i>	<i>362</i>
<i>Tabla 5.119: Ensayos tipo AG – Alternativa 3. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).</i>	<i>362</i>
<i>Tabla 5.120: Ensayos tipo AG – Alternativa 4. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AG (en terreno, tipo zona anclada en grout).</i>	<i>363</i>
<i>Tabla 5.121: Ensayo AG1 25-nov-2008 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AG1 25-nov-2008.</i>	<i>363</i>

<i>Tabla 5.122: Ensayo AG2 25-nov-2008 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AG2 25-nov-2008.</i>	<i>363</i>
<i>Tabla 5.123: Ensayos tipo AG – Alternativa 4. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).</i>	<i>363</i>
<i>Tabla 5.124: Parámetros línea promedio sobre gráfico de bandas Alternativa 4, paso 10MHz.</i>	<i>367</i>
<i>Tabla 5.125: Resumen Estadístico para Todos los Puntos de Ubicación en la Fibra. Datos Corregidos.....</i>	<i>391</i>
<i>Tabla 5.126: Resumen Estadístico para Todos los Puntos de Ubicación en la Fibra. Datos Sin Corregir.</i>	<i>391</i>
<i>Tabla 5.127: Influencia de la Corrección ó No Corrección de Datos.....</i>	<i>392</i>
<i>Tabla 5.128: Calidad de las correlaciones frecuencias promedio vs. deformación unitaria. Todos los puntos, ambos pasos y rangos de frecuencia considerados. Datos corregidos.....</i>	<i>392</i>
<i>Tabla 5.129: Calidad de las correlaciones frecuencias promedio vs. deformación unitaria. Todos los puntos, ambos pasos y rangos de frecuencia considerados. Datos sin corregir.</i>	<i>393</i>
<i>Tabla 6.1: Ensayo AR 08-sep-2008. Punto en SG-1 Tramo 1. Deformaciones unitarias calculadas según el procedimiento de recolección automática de frecuencias asociadas a peaks de potencia.</i>	<i>401</i>
<i>Tabla 6.2: Ensayo AR 08-sep-2008. Punto en SG-2 Tramo 1. Deformaciones unitarias calculadas según el procedimiento de recolección automática de frecuencias asociadas a peaks de potencia.</i>	<i>401</i>
<i>Tabla 6.3: Ensayo AR 08-sep-2008. Punto en SG-1 Tramo 2. Deformaciones unitarias calculadas según el procedimiento de recolección automática de frecuencias asociadas a peaks de potencia.</i>	<i>402</i>
<i>Tabla 6.4: Ensayo AR 08-sep-2008. Punto en SG-2 Tramo 2. Deformaciones unitarias calculadas según el procedimiento de recolección automática de frecuencias asociadas a peaks de potencia.</i>	<i>402</i>

<i>Tabla 6.5: Deformaciones unitarias calculadas utilizando resultados de estudios previos en anclajes en hormigón.</i>	<i>406</i>
<i>Tabla 7.1: Deducción de deformación unitaria mediante frecuencias promedio. Datos ensayo AG1 25-nov-2008 con paso 10MHz, alternativa 4.</i>	<i>415</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Fig. 1.1: Aplicación de fibra óptica sensora en fortificación en túnel mina El Teniente</i>	45
<i>Fig. 2.1: Esquema de Espectro Brillouin (Ohsaki et al., 2002)</i>	49
<i>Fig. 2.2: Espectro de dispersión Brillouin tri-dimensional, describiendo la distribución de potencia de luz para distintas frecuencias y posiciones a lo largo de la fibra óptica (Zhang & Wu, 2008)</i>	50
<i>Fig. 2.3: Esquema de Espectro de Frecuencia Brillouin con y sin deformación aplicada a la Fibra Óptica Sensora (Ohsaki et al., 2002)</i>	51
<i>Fig. 2.4: Espectro de distribución de potencia Brillouin, en una determinada frecuencia a lo largo de la fibra óptica (Zhang & Wu, 2008)</i>	51
<i>Fig. 2.5: Diagrama de Bloques del funcionamiento del sistema BOTDR (Ohsaki et al., 2002)</i>	52
<i>Fig. 2.6: Espectro Brillouin total generado en una fibra deformada en tramo menor a la resolución espacial (i.e. largo deformado <1m) para una deformación $\varepsilon \leq 0,10\%$, con $x_p \approx ar$ (Ohsaki et al., 2002; Zhang & Wu, 2008)</i>	57
<i>Fig. 2.7: Espectro Brillouin total generado en una fibra deformada en tramo menor a la resolución espacial (i.e. largo deformado <1m) para una deformación $0,10\% \leq \varepsilon \leq 0,25\%$, con $x_p < ar$ (Zhang & Wu, 2008)</i>	59
<i>Fig. 2.8: Espectro Brillouin total generado en una fibra deformada en tramo menor a la resolución espacial (i.e. largo deformado <1m) para una deformación $\varepsilon \geq 0,25\%$, con $r < 0,5$; $x_p = 0$ (Ohsaki et al., 2002; Zhang & Wu, 2008)</i>	60
<i>Fig. 2.9: Espectro Brillouin total generado en una fibra deformada en tramo menor a la resolución espacial (i.e. largo deformado <1m) para una deformación $\varepsilon \geq 0,25\%$, con $r > 0,5$; $x_p = a$ (Zhang & Wu, 2008)</i>	60
<i>Fig. 2.10: Patrones de medición de Def. Unitaria según la Resolución Espacial. Deformación real aplicada (ε_r) = 0,13% (NTT, 2007)</i>	63
<i>Fig. 2.11: Datos visualizados en la interfaz gráfica del software ADVANTEST N8510®. A la izquierda: Gráfico 3-D. Distancia en la fibra (eje horizontal)- Frecuencia (eje hacia</i>	

<i>adentro de la figura) - Potencia (eje vertical). A la derecha: Curva de espectro de frecuencias, Potencia (eje vertical) vs. Frecuencia (eje horizontal). (NTT, 2007)</i>	<i>65</i>
<i>Fig. 2.12: Gráfico 3-D entregado por el software ADVANTEST N8510®</i>	<i>65</i>
<i>Fig. 2.13: Ejemplo de Curva de Espectro de Frecuencias recibida (celeste) y Curva Lorentziana (negro) ajustada por el software ADVANTEST N8510®</i>	<i>66</i>
<i>Fig. 2.14: Ejemplo de medición errónea debido a mala selección, en el “setup” del software, del Rango de Frecuencias a analizar.</i>	<i>67</i>
<i>Fig. 2.15: Relación lineal entre frecuencia y deformación unitaria utilizada por el software. Datos ensayo calibración 16-nov-2007 (ver capítulo 5)</i>	<i>68</i>
<i>Fig. 2.16: Mapeo de puntos relevantes y distribución de deformación unitaria entregada por el software. Datos ensayo calibración 22-nov-2007, paso 10MHz.</i>	<i>69</i>
<i>Fig. 2.17: a): Distancia donde BOTDR comienza a detectar espectro deformado. b): Curva de espectro asociada. Datos ensayo calibración 22-nov-2007, paso 10MHz.</i>	<i>71</i>
<i>Fig. 2.18: a): Distancia inmediatamente antes del tramo deformado según BOTDR. b): Curva de espectro asociada. Datos ensayo calibración 22-nov-2007, paso 10MHz.</i>	<i>72</i>
<i>Fig. 2.19: a): Distancia de inicio tramo deformado según BOTDR. b): Curva de espectro asociada. Datos ensayo calibración 22-nov-2007, paso 10MHz.</i>	<i>73</i>
<i>Fig. 2.20: a): Distancia en punto medio del tramo deformado según BOTDR, donde el peak izquierdo se hace mínimo. b): Curva de espectro asociada. Datos ensayo calibración 22-nov-2007, paso 10MHz.</i>	<i>74</i>
<i>Fig. 2.21: a): Distancia al final de tramo deformado según BOTDR. b): Curva de espectro asociada. Datos ensayo calibración 22-nov-2007, paso 10MHz.</i>	<i>75</i>
<i>Fig. 2.22: a): Distancia al final de tramo deformado según mapeo. b): Curva de espectro asociada. Datos ensayo calibración 22-nov-2007, paso 10MHz.</i>	<i>76</i>
<i>Fig. 2.23: Análisis teórico integración realizada por el sistema BOTDR utilizado en el presente estudio.</i>	<i>78</i>
<i>Fig. 2.24: Fibra Óptica tipo Single Mode: Estructura y mecanismo de transmisión de luz en su interior. (NTT, 2007)</i>	<i>79</i>
<i>Fig. 2.25: Fibra Óptica tipo Graded Index Multi Mode: Estructura y mecanismo de transmisión de luz en su interior. (NTT, 2007)</i>	<i>79</i>

<i>Fig. 2.26: Estructura y características de la Fibra Óptica tipo “Embossing Surface” (de mecanismo Single Mode) con blindaje de plástico reforzado con fibra de aramida y cobertura de polietileno. Dimensiones en mm. (NTT, 2007)</i>	<i>80</i>
<i>Fig. 2.27: Vista (real) de algunos tipos de Fibra Óptica, interior y coberturas (NTT, 2007)</i>	<i>80</i>
<i>Fig. 2.28: Modelos de sollicitación representados en ensayos de laboratorio y terreno</i>	<i>84</i>
<i>Fig. 2.29: Esquema perno helicoidal “Saferock” instrumentado con fibra óptica (GerdauAza (modificado), sitio electrónico)</i>	<i>85</i>
<i>Fig. 2.30: Estado de esfuerzos en un anclaje “grouteado” (Farmer, 1975)</i>	<i>87</i>
<i>Fig. 2.31: Distribución teórica de esfuerzo de corte a lo largo de un anclaje en resina, en perforación rígida con anillo grouteado delgado ($R - a < a$) (Farmer, 1975).</i>	<i>92</i>
<i>Fig. 2.32: Distribución de carga a lo largo de pernos completamente grouteados (Moosavi et al., 2002)</i>	<i>93</i>
<i>Fig. 2.33: Notación para formulación por método de diferencias finitas (Moosavi et al., 2002)</i>	<i>95</i>
<i>Fig. 2.34: Curva Carga-desplazamiento y Curvas de Distribución de Deformación a lo largo del perno. Largo anclaje = 500mm. (Farmer, 1975)</i>	<i>98</i>
<i>Fig. 2.35: Curvas de Distribución de Esfuerzo de Corte a lo largo del perno para cada nivel de carga. Línea continua: Esfuerzo de corte deducido (Ec. 2.44). Línea punteada: Esfuerzo de corte teórico (Ec. 2.35). Largo anclaje = 500mm. (Farmer, 1975)</i>	<i>98</i>
<i>Fig. 2.36: Curva Carga-desplazamiento y Curvas de Distribución de Deformación a lo largo del perno; Largo anclaje = 350mm. (Farmer, 1975)</i>	<i>99</i>
<i>Fig. 2.37: Curvas de Distribución de Esfuerzo de Corte a lo largo del perno para cada nivel de carga. Línea continua: Esfuerzo de corte deducido (Ec. 2.44). Línea punteada: Esfuerzo de corte teórico. Largo anclaje = 350mm. (Farmer, 1975)</i>	<i>99</i>
<i>Fig. 2.38: Diferentes tipos de cables (desde arriba hacia abajo): Caja de nueces, bulbo Garford y Nido de pájaro. Utilizados en el estudio de Moosavi et al. (2002) (Windsor, 1992)</i>	<i>100</i>
<i>Fig. 2.39: Distribución de carga por desplazamientos del macizo rocoso debido a una discontinuidad de apertura u_{r0} variable. Izquierda: Cable convencional. Derecha: Cable modificado (Moosavi et al., 2002).</i>	<i>102</i>

<i>Fig. 2.40: Distribución de carga por desplazamientos del macizo rocoso debido a tres discontinuidades de apertura variable. Izquierda: Cable convencional. Derecha: Cable modificado (Moosavi et al., 2002).</i>	102
<i>Fig. 2.41: Distribución de carga por desplazamientos del macizo rocoso debido a patrón de discontinuidades de apertura variable $u_r = u_{r0}/(1+x)$. Izquierda: Cable convencional. Derecha: Cable modificado (Moosavi et al., 2002).</i>	103
<i>Fig. 2.42: Distribución de carga por desplazamientos del macizo rocoso debido a discontinuidad ubicada a distancia variable. Izquierda: Cable convencional. Derecha: Cable modificado (Moosavi et al., 2002).</i>	104
<i>Fig. 2.43: Distribución de carga por desplazamientos del macizo rocoso debido a discontinuidad ubicada a distancia variable. Efecto de incorporación de placa de sujeción. Izquierda: Cable convencional. Derecha: Cable modificado (Moosavi et al., 2002).</i>	104
<i>Fig. 2.44: Concentración de Polos Falla N1, nivel de hundimiento, sector RENO (Benado, D., 2004).</i>	110
<i>Fig. 2.45: DETALLE 1: sección calle 14 Nivel Hundimiento. Instalación típica fibra óptica BOTDR. Secciones intercaladas cada 15m; 6 secciones en 75m; 3 pernos por sección (MICOMO-CODELCO, 2008).</i>	111
<i>Fig. 3.1: Equipos de Aplicación de Carga: Bomba hidráulica, manguera hidráulica, Cilindro de Carga.</i>	112
<i>Fig. 3.2: Equipos de Aplicación de Carga. Cilindro de Carga a Tracción, Bomba Hidráulica y Manómetro.</i>	113
<i>Fig. 3.3: Celda de Carga.</i>	114
<i>Fig. 3.4: Sistema de Adquisición de Datos Tipo Compact Field Point – NI[®]. Modelo cFP-1804.</i>	115
<i>Fig. 3.5: Sistema BOTDR: A la izquierda, analizador-generador de pulso de luz. A la derecha, computador con software para visualizar los datos entregados (NTT, 2007).</i>	117
<i>Fig. 3.6: Dispositivo para fusionar Fibra óptica, modelo FSM-17R fabricado por Fujikura[®].</i>	118

<i>Fig. 3.7: Proceso de Fusión al Arco en dispositivo modelo FSM-17R fabricado por Fujikura®</i>	119
<i>Fig. 3.8: Manómetro hidráulico análogo Power Team®, diámetro 3/8", capacidad 10.000psi</i>	119
<i>Fig. 3.9: Termómetro E-Sun®, modelo ETP101</i>	120
<i>Fig. 3.10: Extensómetro Epsilon®, modelo 3542</i>	121
<i>Fig. 3.11: Diales Mitutoyo®, modelo 3062S-19</i>	122
<i>Fig. 3.12: Strain Gage modelo PFL-20-11 fabricado por TML®. a): Esquema b): Imagen real</i>	123
<i>Fig. 3.13: Configuración del puente de Wheatstone (National Instruments)</i>	124
<i>Fig. 3.14: Circuito de cuarto de puente (National Instruments)</i>	125
<i>Fig. 3.15: Circuito de medio puente (National Instruments)</i>	126
<i>Fig. 3.16: Carrete Fibra Óptica Tipo Embossing Surface</i>	129
<i>Fig. 3.17: Fibra Óptica Sensora Tipo Embossing Surface</i>	130
<i>Fig. 3.18: Procedimiento de desenvoltura Fibra Óptica Sensora Tipo Embossing Surface (NTT, 2007)</i>	130
<i>Fig. 3.19: Fibra de conexión de entrada al analizador (no-sensora)</i>	131
<i>Fig. 3.20: Fibra de acercamiento (no-sensora)</i>	132
<i>Fig. 3.21: Unión de fibras no-sensoras mediante simple ensamblaje. Izquierda: fibra de conexión de entrada al analizador. Derecha: fibra de acercamiento</i>	132
<i>Fig. 3.22: Fusión fibra de acercamiento con fibra sensora embossing, mediante fusión al arco (ver Fig. 3.7)</i>	133
<i>Fig. 3.23: Sistema de fibras típico. Izquierda: fibra de conexión de entrada al analizador. Al medio: fibra de acercamiento. Derecha: fibra sensora embossing</i>	133
<i>Fig. 4.1: Perno de Acero Saferock (Gerdau AZA®)</i>	134
<i>Fig. 4.2: Plano losa H.A. confeccionada para la investigación</i>	136
<i>Fig. 4.3: Enfierradura losa H.A. confeccionada para la investigación</i>	137
<i>Fig. 4.4: Cartucho de resina epóxica</i>	137

<i>Fig. 4.5: Abrazadera plástica fabricada por NTT. Arriba: con fibra embossing. Abajo: con otro tipo de fibra sensora.</i>	141
<i>Fig. 4.6: Topes metálicos.</i>	142
<i>Fig. 4.7: Esquema general de perno instrumentado con fibra óptica y strain gages</i>	144
<i>Fig. 4.8: Deformación unitaria versus distancia, entregada por sistema BOTDR. Datos ensayo AR 08-sep-2008, sin carga (0Kgf).</i>	147
<i>Fig. 4.9: Esquema instalación experimental para tensado de fibra, aplicado a ensayos desde enero de 2008.</i>	149
<i>Fig. 4.10: Vista de losa de hormigón en construcción y formación de las perforaciones para anclajes.</i>	152
<i>Fig. 4.11: Vista en perspectiva de losa de hormigón y distribución de los ensayos tipo zona anclada realizados (modelo A de ensayos)</i>	153
<i>Fig. 4.12: Instalación equipo de carga en terreno para ensayo falla tipo bloque (modelo B de ensayos).</i>	154
<i>Fig. 4.13: Detalle instalación placa superior.</i>	155
<i>Fig. 4.14: Entrada y salida de fibra a través de la placa de sujeción.</i>	155
<i>Fig. 4.15: Detalle instalación placa inferior (bajo sector delgado losa). Ensayo falla tipo bloque (modelo B de ensayos).</i>	156
<i>Fig. 4.16: Instalación pernos en túnel mina El Teniente.</i>	157
<i>Fig. 4.17: Perno instalado (completamente grouteado) en túnel mina El Teniente.</i>	157
<i>Fig. 4.18: Túnel con pernos instrumentados con fibra óptica en nivel de hundimiento mina El Teniente.</i>	158
<i>Fig. 4.19: Perno de acero instrumentado con extensómetros, fibra óptica sensora y strain gages.</i>	161
<i>Fig. 4.20: Perno instrumentado con fibra óptica sensora y strain gages</i>	162
<i>Fig. 4.21: Instalación experimental Ensayos Falla Tipo Bloque (B).</i>	163
<i>Fig. 4.22: Instalación experimental Ensayos Zona Anclada (AH*, AR y AG).</i>	164

<i>Fig. 5.1: Lecturas celda de carga y carga promedio calculada. Datos ensayo B 21-feb-2008.....</i>	<i>169</i>
<i>Fig. 5.2: Lecturas Strain Gages y promedios calculados. Datos ensayo B 21-feb-2008..</i>	<i>170</i>
<i>Fig. 5.3: Lecturas celda de carga en laboratorio, sin aplicación de carga.....</i>	<i>171</i>
<i>Fig. 5.4: Lecturas de strain gages en laboratorio, instalados en barra 06 (usada en ensayo AR 08-sep-08), sin aplicación de carga.....</i>	<i>172</i>
<i>Fig. 5.5: Lecturas de strain gages en terreno, instalados en barra 06 (usada en ensayo AR 08-sep-08), justo antes de comenzar ensayo.</i>	<i>173</i>
<i>Fig. 5.6: Lecturas de strain gages durante ensayo AR 08-sep-08.</i>	<i>174</i>
<i>Fig. 5.7: Lecturas strain gages durante ensayo AH 26-feb-2008. Sólo se obtuvo medición de SG-2.</i>	<i>175</i>
<i>Fig. 5.8: Comparación entre deformación medida con diales y BOTDR (Largo tensado 2,23 m). Datos ensayo calibración 16-nov-2007.....</i>	<i>178</i>
<i>Fig. 5.9: Variación en valor BOTDR medido en punto de referencia al repetir la medición. Datos ensayo calibración 16-nov-2007.</i>	<i>179</i>
<i>Fig. 5.10: Correlación entre carga aplicada y deformación medida en BOTDR en M1. Datos ensayo calibración 16-nov-2007.</i>	<i>180</i>
<i>Fig. 5.11: Comparación entre BOTDR en M1 y extensómetro (largo tensado 2,23 m). Datos ensayo calibración 16-nov-2007.</i>	<i>181</i>
<i>Fig. 5.12: Ejemplo de archivo medición extensómetro Datos ensayo calibración 16-nov-2007.....</i>	<i>181</i>
<i>Fig. 5.13: Efecto de a temperatura en el valor de referencia (zona sin carga). Datos ensayo calibración 16-nov-2007.....</i>	<i>182</i>
<i>Fig. 5.14: Comparación entre deformación medida con diales y BOTDR (Largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 21-nov-2007. Datos sin corregir.....</i>	<i>184</i>
<i>Fig. 5.15: Comparación entre deformación medida con diales y BOTDR (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 21-nov-2007.Datos Corregidos.</i>	<i>185</i>
<i>Fig. 5.16: Variación en valor BOTDR medido en punto de referencia al repetir la medición (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 21-nov-2007.</i>	<i>186</i>

<i>Fig. 5.17: Correlación entre carga aplicada y deformación medida en BOTDR en M1 (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 21-nov-2007. Datos sin corregir.</i>	<i>187</i>
<i>Fig. 5.18: Correlación entre carga aplicada y deformación medida en BOTDR en M1 (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 21-nov-2007. Datos corregidos.</i>	<i>188</i>
<i>Fig. 5.19: Comparación entre BOTDR en M1 y extensómetro (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 21-nov-2007. Datos sin corregir.</i>	<i>189</i>
<i>Fig. 5.20: Comparación entre BOTDR en M1 y extensómetro (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 21-nov-2007. Datos corregidos.</i>	<i>189</i>
<i>Fig. 5.21: Ejemplo de archivo medición extensómetro (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 21-nov-2007.</i>	<i>190</i>
<i>Fig. 5.22: Efecto de a temperatura en valor de referencia (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 21-nov-2007.</i>	<i>191</i>
<i>Fig. 5.23: Comparación entre deformación medida con diales y BOTDR en M1 (largo tensado 0,99m). Datos ensayo de calibración 22-nov-2007. Datos corregidos.</i>	<i>193</i>
<i>Fig. 5.24: Variación en valor BOTDR medido en punto de referencia al repetir la medición (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 22-nov-2007.</i>	<i>194</i>
<i>Fig. 5.25: Correlación entre carga aplicada y deformación medida en BOTDR en M1 (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 22-nov-2007.</i>	<i>195</i>
<i>Fig. 5.26: Efecto de a temperatura en valor de referencia (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 22-nov-2007.</i>	<i>196</i>
<i>Fig. 5.27: Tramo de fibra libre (largo variable) posterior al punto de aplicación de cargas en ensayos de calibración.</i>	<i>197</i>
<i>Fig. 5.28: Perfil de deformación deducida por sistema BOTDR. Ensayo L 26-dic-2007, 6000Kgf.</i>	<i>199</i>
<i>Fig. 5.29: Perfil de deformación deducida por sistema BOTDR. Ensayo L 26-dic-2007, 15000Kgf.</i>	<i>200</i>
<i>Fig. 5.30: Ejemplo donde el software no ajustó curva y donde se pueden escoger distintas frecuencias asociadas al mismo estado de deformación. Datos ensayo L 26-dic-2007, 6000kgf.</i>	<i>201</i>

<i>Fig. 5.31: Ejemplo de dos peaks claramente distinguibles. El programa siempre escoge donde se obtiene mayor potencia. Posición 9.48m. Datos ensayo L 26-dic-2007...</i>	202
<i>Fig. 5.32: Ejemplo de dos peaks claramente distinguibles. El programa siempre escoge donde se obtiene mayor potencia. Posición 9.68m. Datos ensayo L 26-dic-2007...</i>	202
<i>Fig. 5.33: Explicación método a. Ensayo L 26-dic-2007, 3000Kgf, paso 20MHz.</i>	204
<i>Fig. 5.34: Explicación métodos b1 y b2. Ensayo L 26-dic-2007, 12000Kgf, paso 20MHz.</i>	205
<i>Fig. 5.35: Explicación métodos b3. Ensayo L 26-dic-2007, 6000Kgf, paso 20MHz.</i>	206
<i>Fig. 5.36: Explicación métodos c. Ensayo L 26-dic-2007, 9000Kgf, paso 20MHz.</i>	207
<i>Fig. 5.37: Deformación unitaria mediante método a (ensayo L 26-dic-2007). Pasos 10 y 20MHz.</i>	208
<i>Fig. 5.38: Deformación unitaria mediante método b1 (ensayo L 26-dic-2007). Pasos 10 y 20MHz.</i>	209
<i>Fig. 5.39: Deformación unitaria mediante método b2 (ensayo L 26-dic-2007). Pasos 10 y 20MHz.</i>	210
<i>Fig. 5.40: Deformación unitaria mediante método b3 (ensayo L 26-dic-2007). Pasos 10 y 20MHz.</i>	211
<i>Fig. 5.41: Deformación unitaria mediante método c (ensayo L 26-dic-2007). Pasos 10 y 20MHz.</i>	212
<i>Fig. 5.42: Deformación unitaria mediante método d (ensayo L 26-dic-2007). Pasos 10 y 20MHz.</i>	213
<i>Fig. 5.43: Cálculo de área bajo las Curvas de Espectro. Potencia en decibeles (dB) versus frecuencias (GHz). Ver Ec. 5.1 y Ec. 5.2. Datos ensayo L 26-dic-2007.....</i>	215
<i>Fig. 5.44: Frecuencias Promedio calculadas como centros de gravedad (según alternativa 1, ver Fig. 5.54). Datos ensayo L 26-dic-2007</i>	216
<i>Fig. 5.45: Curvas de Espectro asociadas a 3 niveles de carga. Datos ensayo B 21-feb-2008.....</i>	217
<i>Fig. 5.46: Curvas de Espectro asociadas a 3 niveles de carga. Datos ensayo AH 26-feb-2008.....</i>	218

<i>Fig. 5.47: Curvas de Espectro asociadas a 3 niveles de carga. Datos ensayo AR 08-sep-2008.....</i>	<i>219</i>
<i>Fig. 5.48: Comparación entre curvas obtenidas con paso de frecuencia de 10MHz y 20MHz. Datos ensayo L 26-dic-2007.</i>	<i>221</i>
<i>Fig. 5.49: Curva de espectro de frecuencia entregada por el software para una posición determinada. Datos ensayo L 26-dic-2007.....</i>	<i>222</i>
<i>Fig. 5.50: Rangos de frecuencia (anchos de banda) analizados. Datos ensayo L 26-dic-2007.....</i>	<i>223</i>
<i>Fig. 5.51: Rangos de frecuencias analizados. Datos ensayo AH 26-feb-2008.</i>	<i>224</i>
<i>Fig. 5.52: Ejemplo de corrección de ruido o caídas en los datos analizados. Corrección efectuada sólo a los datos dentro de los rangos definidos.....</i>	<i>224</i>
<i>Fig. 5.53: Curvas de espectro con y sin corrección de ruido o caídas. Corrección efectuada sólo a los datos dentro de los rangos definidos. Datos ensayo AH 26-feb-2008.....</i>	<i>225</i>
<i>Fig. 5.54: Curva de espectro de frecuencia trasladada según Alternativas 1.a, 1.a*, 1.b, 1.b*. Datos ensayo L 26-dic-2007.</i>	<i>227</i>
<i>Fig. 5.55: Curva de espectro de frecuencia trasladada según Alternativas 3.a, 3.a*, 3.b, 3.b*. Datos ensayo L 26-dic-2007.</i>	<i>228</i>
<i>Fig. 5.56: Curva de espectro de frecuencia modificada según Alternativas 4.a, 4.a*, 4.b y 4.b*. Datos ensayo L 26-dic-2007.</i>	<i>229</i>
<i>Fig. 5.57: Perno instrumentado con fibra luego de finalizar el ensayo. Se observa el pegamento Poxipol agrietado.....</i>	<i>232</i>
<i>Fig. 5.58: Ensayos tipo AH. Deformación unitaria en distancia o profundidad en anclaje sometido a tracción. Datos entregados por los strain gages.....</i>	<i>239</i>
<i>Fig. 5.59: Ensayos Tipo AR. Distribución de deformación unitaria en distancia o profundidad en anclaje sometido a tracción. Datos entregados por los strain gages.</i>	<i>241</i>
<i>Fig. 5.60: Ensayos Tipo AG. Distribución de deformación unitaria en distancia o profundidad en anclaje sometido a tracción. Datos entregados por los strain gages.</i>	<i>242</i>

<i>Fig. 5.61: Resumen. Distribución de deformación unitaria en distancia o profundidad en anclaje sometido a tracción. Datos entregados por los strain gages.</i>	<i>243</i>
<i>Fig. 5.62: Relación entre la tensión aplicada en el extremo libre del anclaje versus deformación unitaria a distintas profundidades. Datos entregados por los strain gages.</i>	<i>245</i>
<i>Fig. 5.63: Tensión aplicada en el extremo libre del anclaje versus deformación unitaria promedio obtenida. Datos entregados por los strain gages.</i>	<i>246</i>
<i>Fig. 5.64: Zonas de ubicación puntos de observación 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.</i>	<i>248</i>
<i>Fig. 5.65: Curvas de espectro en vecindad del punto 1 (a 5 y 10cm de éste). Datos de ensayo perno a tracción en laboratorio, L 26-dic-2007. Setup en 10MHz.</i>	<i>250</i>
<i>Fig. 5.66: Curvas de espectro en vecindad del punto 1 (a 5 y 10cm de éste). Datos de ensayo perno a tracción en laboratorio, L 26-dic-2007. Setup en 20MHz.</i>	<i>251</i>
<i>Fig. 5.67: Curvas de espectro en vecindad del punto 1 (a 5 y 10cm de éste). Datos de ensayo perno a tracción en laboratorio, AR 08-sep-2008. Setup en 10MHz.</i>	<i>251</i>
<i>Fig. 5.68: Formato de datos de strain gages incluidos en figuras posteriores.</i>	<i>269</i>
<i>Fig. 5.69: Ensayo L 26-nov-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.</i>	<i>270</i>
<i>Fig. 5.70: Ensayo L 26-nov-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.</i>	<i>271</i>
<i>Fig. 5.71: Ensayo L 26-dic-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.</i>	<i>272</i>
<i>Fig. 5.72: Ensayo L 26-dic-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.</i>	<i>273</i>
<i>Fig. 5.73: Ensayo L 26-dic-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.</i>	<i>274</i>

<i>Fig. 5.74: Ensayo L 26-dic-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.</i>	<i>275</i>
<i>Fig. 5.75: Ensayo L 26-dic-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.</i>	<i>276</i>
<i>Fig. 5.76: Ensayo L 26-dic-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.</i>	<i>277</i>
<i>Fig. 5.77: Ensayo L 26-dic-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.</i>	<i>278</i>
<i>Fig. 5.78: Ensayo L 26-dic-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.</i>	<i>279</i>
<i>Fig. 5.79: Ensayo B 23-ene-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.</i>	<i>286</i>
<i>Fig. 5.80: Ensayo B 23-ene-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.</i>	<i>287</i>
<i>Fig. 5.81: Ensayo B 23-ene-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.</i>	<i>288</i>
<i>Fig. 5.82: Ensayo B 23-ene-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.</i>	<i>289</i>
<i>Fig. 5.83: Ensayo B 21-feb-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.</i>	<i>290</i>

<i>Fig. 5.84: Ensayo B 21-feb-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.</i>	291
<i>Fig. 5.85: Ensayo B 21-feb-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.</i>	292
<i>Fig. 5.86: Ensayo B 21-feb-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.</i>	293
<i>Fig. 5.87: Ensayo B 21-feb-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.</i>	294
<i>Fig. 5.88: Ensayo B 21-feb-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.</i>	295
<i>Fig. 5.89: Ensayo B 21-feb-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.</i>	296
<i>Fig. 5.90: Ensayo B 21-feb-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.</i>	297
<i>Fig. 5.91: Ensayo AH 26-feb-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.</i>	303
<i>Fig. 5.92: Ensayo AH 26-feb-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.</i>	304
<i>Fig. 5.93: Ensayo AH 26-feb-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.</i>	305

Fig. 5.94: Ensayo AH 26-feb-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.	306
Fig. 5.95: Ensayo AH 26-feb-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.	307
Fig. 5.96: Ensayo AH 26-feb-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.	308
Fig. 5.97: Ensayo AH 26-feb-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.	309
Fig. 5.98: Ensayo AH 26-feb-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.	310
Fig. 5.99: Ensayo AH 18-jul-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.	311
Fig. 5.100: Ensayo AH 18-jul-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.	312
Fig. 5.101: Ensayo AR 22-ago-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.	318
Fig. 5.102: Ensayo AR 22-ago-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.	319
Fig. 5.103: Ensayo AR 22-ago-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.	320

Fig. 5.104: Ensayo AR 22-ago-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.	321
Fig. 5.105: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.	322
Fig. 5.106: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.	323
Fig. 5.107: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.	324
Fig. 5.108: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.	325
Fig. 5.109: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.	326
Fig. 5.110: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.	327
Fig. 5.111: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.	328
Fig. 5.112: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.	329
Fig. 5.113: Definición puntos adicionales de observación, contiguos a strain gages 1 y 2 (según mapeo).	330

<i>Fig. 5.114: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-1 Tramo 1, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.....</i>	<i>331</i>
<i>Fig. 5.115: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-2 Tramo 1, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.....</i>	<i>332</i>
<i>Fig. 5.116: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-1 Tramo 2, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.....</i>	<i>333</i>
<i>Fig. 5.117: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-2 Tramo 2, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.....</i>	<i>334</i>
<i>Fig. 5.118: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-1 Tramo 1, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.....</i>	<i>335</i>
<i>Fig. 5.119: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-2 Tramo 1, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.....</i>	<i>336</i>
<i>Fig. 5.120: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-1 Tramo 2, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.....</i>	<i>337</i>
<i>Fig. 5.121: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-2 Tramo 2, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.....</i>	<i>338</i>
<i>Fig. 5.122: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.</i>	<i>344</i>
<i>Fig. 5.123: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.</i>	<i>345</i>

<i>Fig. 5.124: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.</i>	<i>346</i>
<i>Fig. 5.125: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.</i>	<i>347</i>
<i>Fig. 5.126: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.</i>	<i>348</i>
<i>Fig. 5.127: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.</i>	<i>349</i>
<i>Fig. 5.128: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.</i>	<i>350</i>
<i>Fig. 5.129: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.</i>	<i>351</i>
<i>Fig. 5.130: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-1 Tramo 1, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.....</i>	<i>352</i>
<i>Fig. 5.131: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-2 Tramo 1, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.....</i>	<i>353</i>
<i>Fig. 5.132: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-1 Tramo 2, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.....</i>	<i>354</i>
<i>Fig. 5.133: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-2 Tramo 2, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.....</i>	<i>355</i>

Fig. 5.134: Ensayo AG2 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.	356
Fig. 5.135: Ensayo AG2 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.	357
Fig. 5.136: Ensayo AG2 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.	358
Fig. 5.137: Ensayo AG2 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.	359
Fig. 5.138: Banda de Correlaciones de Frecuencias Promedio versus Deformación Unitaria asociada, según Alternativa 1. Ensayos tipo Zona Anclada (AH, AR y AG). Setup en 10MHz.	365
Fig. 5.139: Banda de Correlaciones de Frecuencias Promedio versus Deformación Unitaria asociada, según Alternativa 2. Ensayos tipo Zona Anclada (AH, AR y AG). Setup en 10MHz.	366
Fig. 5.140: Banda de Correlaciones de Frecuencias Promedio versus Deformación Unitaria asociada, según Alternativa 4. Ensayos tipo Zona Anclada (AH, AR y AG). Setup en 10MHz.	366
Fig. 5.141: Banda de Correlaciones y Línea Promedio versus Deformación Unitaria asociada, según Alternativa 4. Ensayos tipo Zona Anclada (AH, AR y AG). Setup en 10MHz.	367
Fig. 5.142: Curvas deformación BOTDR versus carga según Alternativa 4. Ensayos tipo Zona Anclada (AH, AR y AG). Setup en 10MHz.	368
Fig. 5.143: Curvas deformación BOTDR versus carga para ensayo AR 08-sep-2008 según alternativas 1, 2 y 4. Setup en 10MHz.	369
Fig. 5.144: Punto1- Alternativa 1. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 10MHz.	370

<i>Fig. 5.145: Punto2- Alternativa 1. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 10MHz.....</i>	<i>371</i>
<i>Fig. 5.146: Punto1- Alternativa 1. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 20MHz.....</i>	<i>372</i>
<i>Fig. 5.147: Punto2- Alternativa 1. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 20MHz.....</i>	<i>373</i>
<i>Fig. 5.148: Punto1- Alternativa 2. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 10MHz.....</i>	<i>374</i>
<i>Fig. 5.149: Punto2- Alternativa 2. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 10MHz.....</i>	<i>375</i>
<i>Fig. 5.150: Punto1- Alternativa 2. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 20MHz.....</i>	<i>376</i>
<i>Fig. 5.151: Punto2- Alternativa 2. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 20MHz.....</i>	<i>377</i>
<i>Fig. 5.152: Punto1- Alternativa 3. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 10MHz.....</i>	<i>378</i>
<i>Fig. 5.153: Punto2- Alternativa 3. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 10MHz.....</i>	<i>379</i>
<i>Fig. 5.154: Punto1- Alternativa 3. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 20MHz.....</i>	<i>380</i>
<i>Fig. 5.155: Punto2- Alternativa 3. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 20MHz.....</i>	<i>381</i>
<i>Fig. 5.156: Punto1- Alternativa 4. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 10MHz.....</i>	<i>382</i>
<i>Fig. 5.157: Punto2- Alternativa 4. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 10MHz.....</i>	<i>383</i>
<i>Fig. 5.158: Punto1- Alternativa 4. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 20MHz.....</i>	<i>384</i>
<i>Fig. 5.159: Punto2- Alternativa 4. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 20MHz.....</i>	<i>385</i>

<i>Fig. 5.160: Conteo de casos “Sí” según la ubicación en la fibra sensora y según alternativa de cálculo de frecuencia promedio. Datos Corregidos.</i>	386
<i>Fig. 5.161: Conteo casos “Sí” según ubicación en la fibra, todas las alternativas, ambos pasos y rangos de frecuencia considerados.</i>	387
<i>Fig. 5.162: Conteo casos “Sí” según alternativas, todos los puntos, ambos pasos y rangos de frecuencia considerados.</i>	388
<i>Fig. 5.163: Conteo casos “Sí” según rango de frecuencia analizado, todos los puntos y alternativas; ambos pasos de frecuencia considerados.</i>	389
<i>Fig. 5.164: Conteo casos “Sí” según setup ó paso utilizado en la medición, todos los puntos y alternativas; ambos rangos de frecuencia considerados.</i>	390
<i>Fig. 6.1: Ensayo AR 08-sep-2008. Curvas de espectros de frecuencia para distintos niveles de carga en el Punto en posición de SG-1 Tramo 1. Setup en 10MHz.</i>	397
<i>Fig. 6.2: Ensayo AR 08-sep-2008. Curvas de espectros de frecuencia para estado inicial (sin carga) en el Punto en posición de SG-1 Tramo 1. Setup en 10MHz.</i>	398
<i>Fig. 6.3: Ensayo AR 08-sep-2008. Curvas de espectros de frecuencia para estado de carga intermedia en el Punto en posición de SG-1 Tramo 1. Setup en 10MHz.</i>	399
<i>Fig. 6.4: Ensayo AR 08-sep-2008. Curvas de espectros de frecuencia para estado estado final de carga en el Punto en posición de SG-1 Tramo 1. Setup en 10MHz.</i>	400
<i>Fig. 6.5: Ensayo AR 08-sep-2008. Distribución de Deformación Unitaria en el perno de anclaje según método propuesto. Constante usada =3,0dB.</i>	403
<i>Fig. 6.6: Ensayo AG1 25-nov-2008. Distribución de Deformación Unitaria en el perno de anclaje según método propuesto. Constante usada =3,0dB.</i>	404
<i>Fig. 6.7: Ensayo AG1 25-nov-2008. Distribución de Deformación Unitaria en el perno de anclaje según método propuesto. Constante usada =1,0dB.</i>	405
<i>Fig. 6.8: Curva Carga-desplazamiento y Curvas de Distribución de Deformación a lo largo del perno. Largo anclaje = 500mm. (Farmer, 1975).</i>	406
<i>Fig. 6.9: Deformación unitaria versus distancia para distintos niveles de carga en ensayo AR 08-sep-2008. La fibra deformada se encuentra en el tramo entre 6,7 a 7,4m aproximadamente (CMM – CORFO Innova BOTDR, 2009)</i>	408

<i>Fig. 6.10: Promedio de deformación en la zona deformada ensayo AR 08-sep-2008 (CMM - CORFO Innova BOTDR, 2009).....</i>	<i>409</i>
<i>Fig. 7.1: Relación Strain Gages (%) y Frecuencia Promedio BOTDR (GHz) vs Carga (Kgf). Ensayo B 21-feb-2008.....</i>	<i>412</i>
<i>Fig. 7.2: Relación Strain Gages (%) y Frecuencia Promedio BOTDR (GHz) vs Carga (Kgf). (Eliminando nivel más alto de carga). Ensayo B 21-feb-2008.....</i>	<i>413</i>
<i>Fig. 7.3: Ensayo B 21-feb-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages, eliminando nivel más alto de carga. Setup en 10MHz.</i>	<i>414</i>

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación y Generalidades

En la actualidad existen variados métodos para monitorear el estado de estructuras naturales o artificiales, que debido a su función, requieren de constante observación y cuidado. Algunos instrumentos de monitoreo cuentan con una historia de eficacia y gran aprobación en su uso en ingeniería. Sin embargo, todos estos métodos están sujetos a constante estudio y perfeccionamiento, fomentándose la búsqueda de nuevos y más eficientes sistemas de monitoreo. El perfeccionamiento parte por mejorar los aspectos más deficientes de lo existente. Un caso particular y de uso masivo son los *Strain Gages*, instrumentos para medición de deformaciones, de larga historia de utilización con resultados de gran confiabilidad en la práctica de ingeniería. Sin embargo, esta herramienta tiene como limitantes: el que sólo mide deformaciones puntuales; que su instalación para abarcar grandes tramos monitoreados resulta lenta y compleja; y que requieren de electricidad para su funcionamiento, implicando un riesgo en lugares de alta humedad.

Frente a esta problemática, surge una alternativa innovadora que motiva el presente estudio, aplicando tecnologías que hace poco tiempo atrás, poseían usos muy distintos a los que se les entrega en la actualidad. Este es el caso de la Fibra Óptica (BOTDR¹), que es utilizada para la medición de deformaciones. Su principal cualidad surge del hecho de permitir abarcar grandes tramos monitoreados de forma simple, y por ventajas tales como su inmunidad a influencias electromagnéticas (Zhang & Wu, 2008), su rápida y económica instalación, y el pequeño espacio utilizado por ésta debido a su pequeña dimensión transversal. Teniendo en cuenta estas ventajas, se propone y estudia su aplicación en minería subterránea.

La teoría detrás de esta tecnología puede llegar a ser compleja dependiendo del grado de profundidad con que se estudie y de la aplicación que se le quiera dar. Sin

¹ BOTDR: Brillouin Optical Time Domain Refelctometry (Reflectometría Óptica Brillouin de Dominio Temporal).

embargo, a grandes rasgos, puede entenderse el principio con conocimientos básicos de la física en el campo de estudio de óptica cuántica.

Debido a sus características como alta durabilidad, no generar ruido de inducción electromagnética y la posibilidad de transmitir señales sobre grandes distancias, etc., los métodos de medición que usa la fibra óptica son reconocidos por su buen desempeño y el alcance de su uso práctico va en aumento (NTT, 2007).

En Chile, existen innumerables estructuras que requieren de constante monitoreo de estado e integridad (salud). Muchas de éstas son tan grandes que no pueden ser monitoreadas en su totalidad por instrumentos mecánicos o eléctricos, debiendo ser la inspección visual el mejor modo de estar alerta ante cualquier situación de riesgo.

La principal actividad económica en Chile, la minería, reviste de gran dificultad y peligrosidad en su diario progreso. Es así como se hace necesario el constante monitoreo de las obras que dan forma a una mina. En el caso de la minería subterránea, la información sobre el estado de las galerías y túneles es imprescindible en cada momento. Hasta la fecha, el monitoreo de toda la longitud de una galería se realiza en forma de inspección visual la que, lógicamente, no puede ser de forma permanente y además, depende del observador; siendo ésta una gran desventaja. De aquí surge la necesidad de contar con un sensor que pueda monitorear la totalidad de un túnel, que sea de fácil y rápida instalación, como el sistema BOTDR (Reflectometría Óptica Brillouin de Dominio Temporal) que se utiliza en la presente investigación.

El monitoreo de una galería puede y debe llevarse a cabo en distintas áreas. Una de ellas es el monitoreo del estado de deformaciones del macizo rocoso mismo, en la superficie del túnel. Además, existe la necesidad de monitorear el estado de los sistemas de soporte, como complemento de un monitoreo global del estado de una galería. En *El Teniente*, la mina subterránea más grande del mundo, ubicada en la VI región de Chile, se considera el uso de anclajes pasivos que se instalan embebidos en resina epóxica o lechada de cemento (en inglés: *grout*) (ver *Fig. 1.1*). Su mecanismo es de tipo pasivo, ya que entran en acción al oponerse a la expansión o dilatación que se produce en las discontinuidades de la roca, comenzando a producirse un deslizamiento entre las mismas. Su función, por tanto, es la de actuar como soporte de paredes y techo de túneles subterráneos en macizos rocosos. El trabajo al que son sometidos estos anclajes, puede incluir tanto la acción de esfuerzos longitudinales como transversales a su eje. Sin

embargo, el presente estudio sólo se limita a estudiar el primero de estos comportamientos.

Una forma de estar al tanto de lo que ocurre en alguna sección de un túnel, es observar el estado de deformaciones de los anclajes de soporte. Si es posible obtener la información de un número considerable de éstos, se puede tener una idea global de lo que ocurre en las paredes y techo de un túnel subterráneo. El monitoreo de estos anclajes es complejo, debido a que las solicitaciones que estos sufren se encuentran bajo la superficie. La tecnología BOTDR plantea la posibilidad de medir la evolución temporal de la deformación del perno en profundidad.

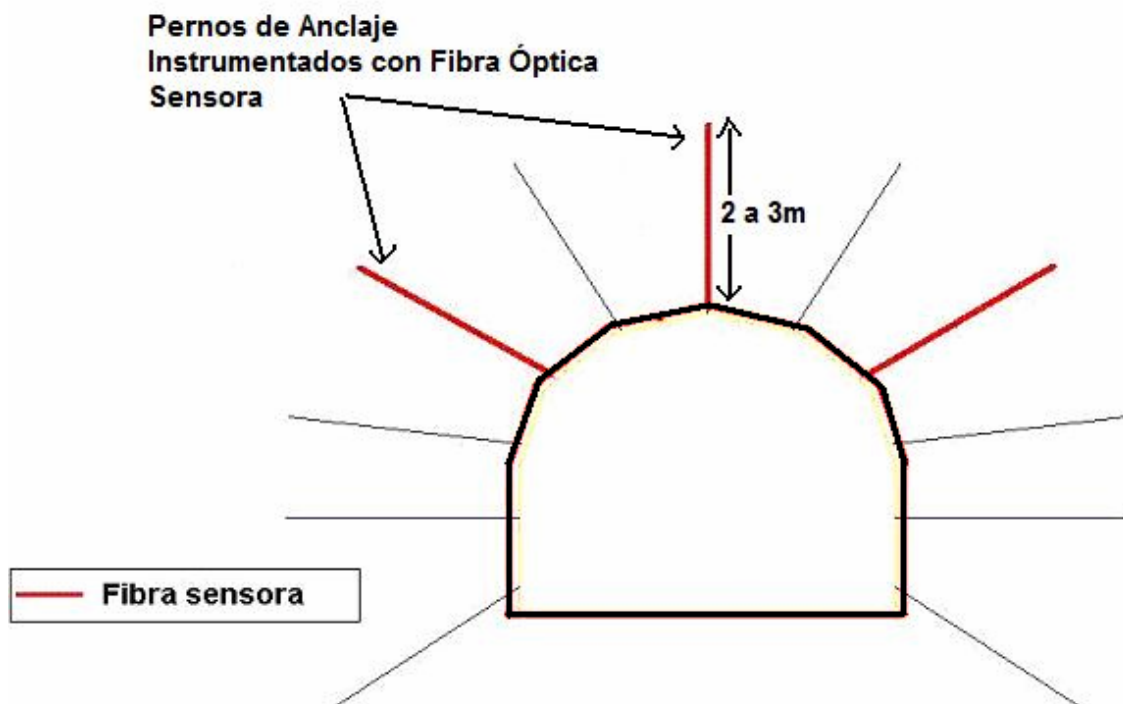


Fig. 1.1: Aplicación de fibra óptica sensora en fortificación en túnel mina El Teniente

Como se explicará en el siguiente capítulo, el sistema BOTDR tiene una resolución espacial mínima de 1m, debido al principio físico que está detrás de esta tecnología (NTT, 2007). Esto hace que su aplicación para medir deformaciones en anclajes no sea directa, ya que si bien normalmente estos tienen largos mayores a la resolución espacial del sistema BOTDR, las deformaciones presentadas en ellos, así como en cualquier estructura, pueden concentrarse en largos bastante menores a 1m, por lo cual no serían detectadas con esta tecnología.

Se han realizado algunos estudios sobre la resolución espacial del sistema BOTDR enfocándose en tramos cortos, y se han propuesto metodologías de cómo rescatar datos que normalmente no podrían recuperarse de la forma que actualmente utiliza el sistema. Estos estudios son mencionados en el capítulo 2.

1.2. Objetivos y Alcances

El propósito de esta investigación, es evaluar la factibilidad de que la tecnología BOTDR permita monitorear pernos de anclaje sometidos a tracción, para posteriormente implementar un sistema de alarma en túneles de la mina El Teniente. A la vez, se pretende entregar alternativas de instalación de la fibra óptica sensora para cumplir con dicha tarea. Se espera que este sistema permita entregar una visión general de lo que está ocurriendo en los anclajes, sin necesidad de conocer valores exactos del estado de deformaciones, permitiendo plantear hipótesis sobre el estado y evolución por la que atraviesa el macizo rocoso en las zonas estudiadas.

El trabajo que se describe en esta tesis, corresponde a los siguientes ensayos y actividades:

- Medición de deformación unitaria en fibra sensora contrastando los resultados con otro tipo de mediciones
- Medición de rango de deformación unitaria máximo de la fibra óptica sensora
- Medición del rango elástico de deformación unitaria de la fibra óptica sensora
- Análisis del cambio en mediciones sin alteración mecánica (medición adicional de temperatura)
- Definir instalación de fibra óptica sensora en pernos de anclaje
- Comprobar mediciones de deformación unitaria en pernos de anclaje sometidos a esfuerzos longitudinales, realizadas mediante el sistema BOTDR, contrastándolas con mediciones de strain gages.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Acerca de la Tecnología BOTDR

La tecnología de *Reflectometría Óptica Brillouin¹ de Dominio Temporal* (BOTDR, por sus siglas en inglés) que ha sido intensamente investigada en las últimas décadas, permite medir la deformación unitaria de la fibra óptica a través del desplazamiento de frecuencia de la luz *Brillouin* transmitida y reflejada dentro de ella (Ohsaki et al., 2002; Kurashima et al., 1993; Horiguchi et al., 1995). La deformación en una estructura puede ser medida en toda su dimensión a través del sistema BOTDR, utilizando fibra óptica adherida o instalada en ella. Debido a limitantes de esta tecnología, la medición no se efectúa en forma continua en el tiempo, sino que en intervalos discretos, en los que se observa el estado de la estructura, para luego repetir las mediciones cuando se desee monitorearla. Cada una de estas mediciones, demora un lapso de tiempo determinado por parámetros de entrada (*input*) en el sistema, ingresados antes de efectuar la medición, como el rango o ancho de banda de frecuencias y su discretización o paso. Cada lectura del sistema BOTDR aplicada en este estudio, toma generalmente entre 5 a 10 minutos.

La información de salida, entregada por el sistema BOTDR, corresponde a una banda de frecuencias (GHz), cada una con sus respectivas potencias asociadas medidas en decibeles (dB). La *frecuencia característica*, asociada al estado de deformación en una posición determinada de la fibra, teóricamente, es aquella donde la potencia de la señal recibida es máxima, como se explicará en detalle más adelante. Los espectros así recibidos, tienen formas de distribuciones simétricas en torno al máximo en potencia. Por ende, sería posible ajustar al espectro recibido, cualquier distribución simétrica con ciertos parámetros. En el estudio de señales, es común la utilización de la distribución (o curva) *Lorentziana*. A grandes rasgos, el procedimiento del sistema BOTDR, consiste en buscar

¹ Nombre que se da a los términos asociados a la fibra óptica y a los conceptos de luz, frecuencia, intensidad, etc., transmitidos a través de ella. La denominación deriva del físico francés, Léon Nicolas Brillouin, quien propuso una ecuación de estado basada en las vibraciones atómicas (*fonones*) que se propagan a través de un sólido. También estudió la propagación de ondas de luz monocromáticas y su interacción con ondas acústicas; fenómeno que provoca la dispersión de la luz con un cambio de frecuencia que se conoce como dispersión Brillouin. (Laboratoire Léon Brillouin, 2008; RP Photonics, 2008; ; Mehra y Rechenberg, 2001; Mosseri, R., 1999)

dentro del espectro de frecuencias, aquella asociada a la máxima potencia, para luego ajustar una curva *Lorentziana* centrada en esa frecuencia.

La resolución espacial BOTDR es fijada por el ancho del pulso de luz óptico usado en la medición, estando actualmente limitada a 1m. Si se continúa disminuyendo el ancho del pulso óptico para mejorar la resolución espacial (i.e. haciendo que ésta sea menor a 1m), la precisión en la medición de la deformación se deteriora abruptamente. Por lo tanto, la resolución espacial debe ser mejorada sin disminuir el ancho del pulso (Ohsaki et al., 2002; Hotate y Hasegawa, 2000; Naruse y Tatema, 2001).

2.1.1. Principios Físicos de la Tecnología BOTDR

Una onda de luz transmitida a través de la fibra óptica es reflejada y dispersada por una interacción no-lineal con ondas acústicas llamadas *fonones*¹. Este efecto recibe el nombre de dispersión *Brillouin* (*Brillouin scattering, en inglés*) (Zhang & Wu, 2008; Wu et al., 2006; Zhang et al., 2004). Debido a que los *fonones* decaen exponencialmente (Zhang and Wu, 2008), el espectro de luz Brillouin dispersada tiene una forma semejante a una *función Lorentziana* (ver Fig. 2.1).

La frecuencia óptica de la luz dispersada, es disminuida en una cantidad equivalente a la frecuencia de los *fonones* acústicos. Considerando el hecho que el desplazamiento en frecuencia ν_b (*Desplazamiento en Frecuencia Brillouin*) es proporcional a la deformación aplicada a la fibra óptica, es posible deducir la deformación midiendo este desplazamiento (Ohsaki et al., 2002), el cual está dado por la siguiente ecuación:

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

Ec. 2.1: Desplazamiento de Frecuencia Brillouin (Ohsaki et al., 2002).

¹ Un **fonón** es una vibración cuantizada o un cuanto de la energía vibracional de la red cristalina de un sólido, de magnitud $h \cdot f$, donde h es la constante de Planck y f la frecuencia de vibración. La energía vibracional puede ser intercambiada sólo en fonones, análogamente a los fotones o cuantos de luz (Oxford University Press, 2005; RP Photonics, 2008).

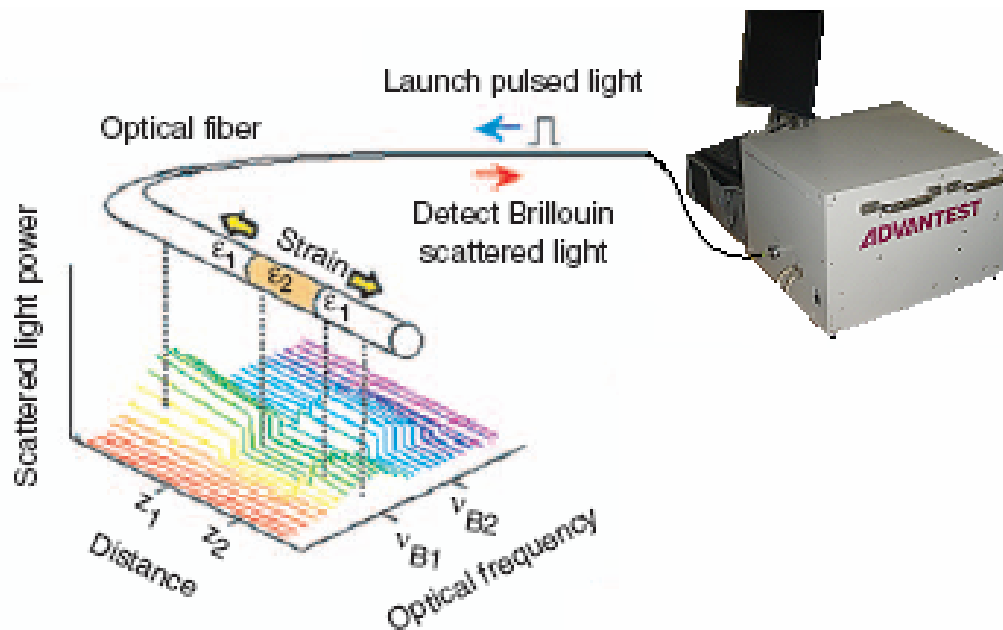


Fig. 2.2: Espectro de dispersión Brillouin tri-dimensional, describiendo la distribución de potencia de luz para distintas frecuencias y posiciones a lo largo de la fibra óptica (Zhang & Wu, 2008).

La información recibida por el sistema, esquematizada en la Fig. 2.2, permite conocer simultáneamente, para una determinada posición en la fibra óptica, el espectro y la potencia máxima de la señal, así como también la frecuencia característica asociada a ésta. Con los datos mostrados, es posible calcular la deformación en dicha ubicación, mediante la observación de la frecuencia asociada al estado de referencia y su posterior corrimiento.

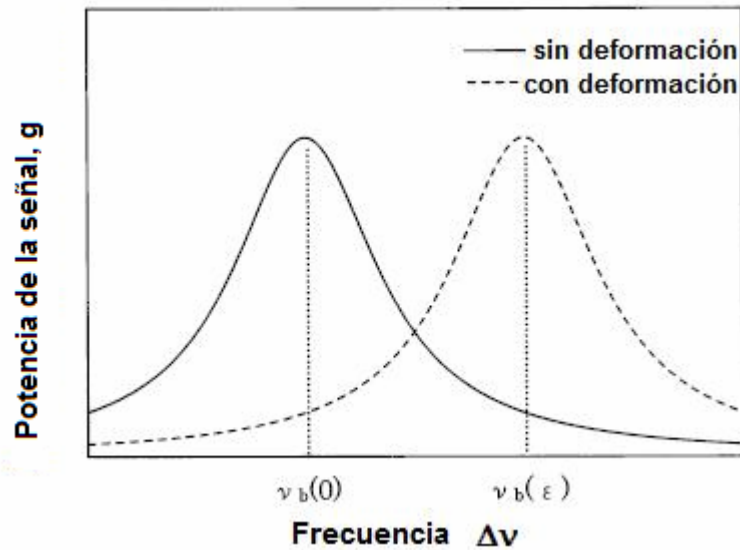


Fig. 2.3: Esquema de Espectro de Frecuencia Brillouin con y sin deformación aplicada a la Fibra Óptica Sensora (Ohsaki et al., 2002).

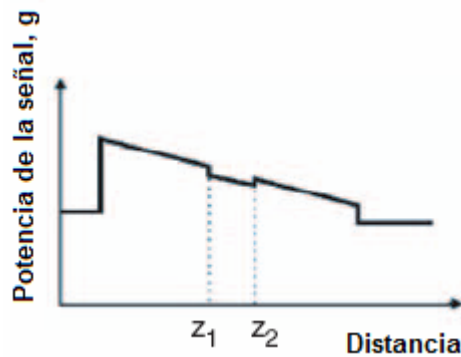


Fig. 2.4: Espectro de distribución de potencia Brillouin, en una determinada frecuencia a lo largo de la fibra óptica (Zhang & Wu, 2008).

En la Fig. 2.5 se muestra un diagrama de bloques que explica el mecanismo de funcionamiento del sistema BOTDR. El diagrama muestra la luz de un láser en operación de onda continua (en adelante luz láser CW, por sus siglas en inglés) con frecuencia ν , que es modulada a un pulso de luz con frecuencia $\nu + \Delta\nu$ usando un modificador (modulador) de frecuencias óptico. El pulso de luz enviado a través de la fibra óptica genera la luz Brillouin dispersada en ella. La luz dispersada, cuya frecuencia es disminuida en ν_b , se mezcla con la luz láser CW y es enviada a un detector con un ancho de banda de poca magnitud (angosto). Cuando el desplazamiento de frecuencia $\Delta\nu$ en el

modificador se hace igual a ν_b , la señal de conteo en el detector se maximiza. De esta forma, es posible obtener el Espectro Brillouin variando $\Delta\nu$. La posición del punto donde la luz incidente se refleja y dispersa, es obtenida del tiempo transcurrido entre el envío y la llegada de la luz retro-dispersada (*backscattered light*) (Ohsaki et al., 2002). Esta posición puede ser determinada utilizando la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{cT}{2n}$$

Ec. 2.2: Posición en la fibra óptica donde se genera la luz retro-dispersada (*backscattered light*) (Zhang & Wu, 2008)

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío, n es el índice de refracción de la fibra óptica y T es el intervalo de tiempo entre el envío del pulso de luz y la recepción de la luz retro-dispersada.

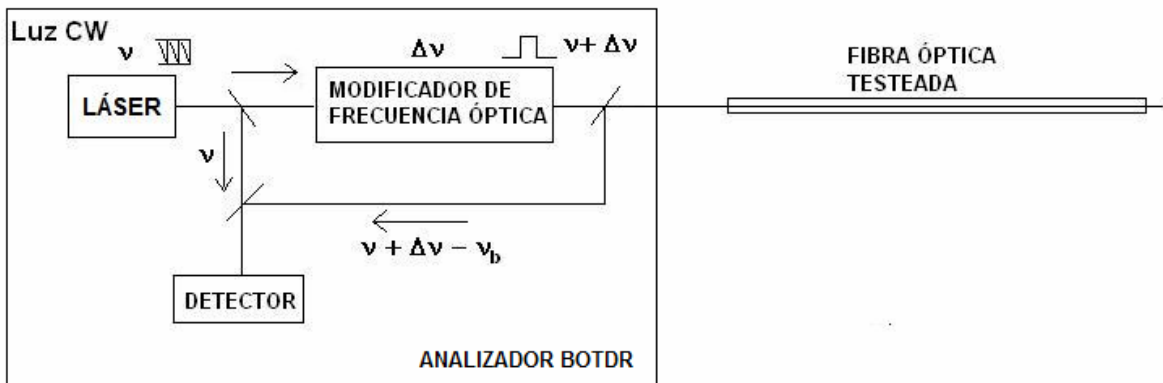


Fig. 2.5: Diagrama de Bloques del funcionamiento del sistema BOTDR (Ohsaki et al., 2002).

La frecuencia correspondiente a la intensidad peak del espectro Brillouin es calculada ajustando una curva *lorentziana* al espectro leído en cada punto a lo largo de la fibra óptica. La deformación unitaria (*strain*) a lo largo de la fibra es calculada a partir de esta frecuencia.

Si hay deformación longitudinal o cambios de temperatura a lo largo de la fibra óptica, el desplazamiento en frecuencia Brillouin ν_b cambia en proporción a esa variación de deformación o temperatura. Las relaciones lineales que modelan este efecto se muestran a continuación:

$$v_b(T_0, \varepsilon) = C_\varepsilon(\varepsilon - \varepsilon_0) + v_{b0}(T_0, \varepsilon_0)$$

Ec. 2.3: Relación lineal entre desplazamiento en Frecuencia Brillouin y Deformación Unitaria (Zhang & Wu, 2008)

$$v_b(T, \varepsilon_0) = C_T(T - T_0) + v_{b0}(T_0, \varepsilon_0)$$

Ec. 2.4: Relación lineal entre desplazamiento en Frecuencia Brillouin y Temperatura (Zhang & Wu, 2008)

Donde C_ε ¹ y C_T son los *coeficientes de deformación y temperatura*, respectivamente, que difieren con los distintos tipos de fibra dependiendo de sus concentraciones de impurezas, etc. ε_0 y T_0 son la deformación y temperatura correspondientes a una frecuencia Brillouin de referencia v_{b0} . Como ejemplo, un valor referencial indica que una deformación unitaria de 100µm (0,01%) típicamente desplaza el espectro Brillouin en 5MHz aproximadamente.

El espectro Brillouin tiene una forma *lorentziana* del tipo:

$$g(\Delta\nu) = \frac{1}{1 + \left\{ \frac{\Delta\nu - \nu_b}{\frac{\Delta\nu_b}{2}} \right\}^2} \cdot g_0$$

Ec. 2.5: Función Lorentziana (Espectro Brillouin) (Horiguchi & Tateda, 1989; Ohsaki et al., 2002)

Donde g_0 es el coeficiente Brillouin y $\Delta\nu_b$ es el *Ancho Total a Mitad del Máximo* (FWHM², por sus siglas en inglés) del espectro (ver Fig. 2.1).

El espectro Brillouin de la Ec. 2.5, es lo que teóricamente genera el fenómeno físico BOTDR. Sin embargo, por limitantes atribuibles al mismo fenómeno, no es posible

¹ Ohsaki et al. (2002), refiriéndose sólo a este coeficiente, plantean que varía de fibra en fibra, dependiendo, entre otros aspectos, de la concentración de impurezas.

² FWHM: Full Width at Half Maximum. Es un parámetro comúnmente usado para describir el ancho de una "protuberancia" en una curva o función. Está dado por la distancia entre puntos de la curva donde la función alcanza la mitad de su máximo valor (Wolfram MathWorld, sitio electrónico)

visualizar el espectro en forma discretizada para cada posición a lo largo de la fibra, sino que, como se explicará más adelante, el resultado observable proviene de una integración o promedio de estas curvas lorentzianas sobre una longitud específica, denominada resolución espacial.

2.1.2. Resolución Espacial

La resolución espacial L del sistema BOTDR, es proporcional al ancho (duración) del pulso τ enviado a través de la fibra óptica. Está dada por:

$$L = \frac{v \cdot \tau}{2}$$

Ec. 2.6: Resolución espacial BOTDR

Donde v es la velocidad de la luz en la fibra. La deformación unitaria medida por el sistema BOTDR es interpretada como el valor promedio de deformación dentro de la resolución espacial L . Ésta determina la habilidad del sensor de fibra óptica, basado en retro-dispersión Brillouin, para localizar¹ el segmento deformado y obtener la distribución real de deformación a lo largo de la fibra. Según la *Ec. 2.6*, un pulso más angosto (menor duración) disminuye (afina) la resolución espacial. Sin embargo, Ohsaki et al. (2002) y Zhang & Wu (2008) afirman que esta condición, a la vez, produce un aumento en el ancho de espectro del pulso de luz. Cuando la duración del pulso es disminuida aún más, el ancho de su espectro aumenta, y luego de exceder el del espectro de los fonones acústicos, la precisión de la medición de deformación unitaria se deteriora abruptamente. Por lo tanto, la resolución espacial está limitada a 1m aproximadamente en el sistema de medición actual, correspondiente a 10ns de ancho de pulso.

¹ En secciones posteriores se discutirá sobre el mecanismo de integración y promedio sobre la resolución espacial efectuado por el sistema; determinando si se efectúa completamente hacia delante de la posición estudiada, hacia atrás de ésta o alguna opción intermedia.

2.1.3. Análisis Sobre la Resolución Espacial

Cuando una deformación uniforme se aplica sobre una sección mayor a la resolución espacial, el espectro se traslada uniformemente, como puede verse en la Fig. 2.3. Debido a la resolución espacial, la medición real del espectro Brillouin (entregada por el sistema BOTDR y observada mediante el software respectivo), ignorando la atenuación de la fibra, está dada por:

$$\bar{g}(v, Z) = \frac{1}{L} \int_{Z-L}^Z g(v_b(\zeta)) d\zeta$$

Ec. 2.7: Integración efectuada por el sistema BOTDR para entregar la medición del espectro en la resolución espacial (Murayama et al., 2004).

Donde L denota la resolución espacial anteriormente descrita.

Cuando la deformación es aplicada en un tramo menor a la resolución espacial, se generan dos componentes del espectro, una componente no desplazada, asociada al tramo de fibra sin deformación (o con su deformación original), y otra componente desplazada, asociada al tramo deformado (nueva deformación) de fibra, cuyo peak decrece dependiendo del largo de la sección deformada. Al respecto, se define el parámetro *razón de deformación parcial* r ($0 \leq r \leq 1$), como la razón entre el largo deformado versus la resolución espacial. La componente $g_0(x)$ para la sección no deformada y la componente $g_\varepsilon(x)$ para la parte deformada del espectro, están dadas por funciones *lorentzianas*, de la forma:

$$g_0(x) = \frac{1-r}{1+x^2}$$

Ec. 2.8: Componente Lorentziana del Espectro Brillouin Original (No deformado) (Ohsaki et al., 2002; Zhang & Wu, 2008).

$$g_\varepsilon(x) = \frac{r}{1+(x-a)^2}$$

Ec. 2.9: Componente Lorentziana del Espectro Brillouin Deformado (o con nueva deformación) (Ohsaki et al., 2002; Zhang & Wu, 2008).

Donde:

$$x = \frac{\Delta \nu - \nu_b(0)}{\frac{\Delta \nu_b}{2}}$$

Ec. 2.10: Desplazamiento de frecuencia óptica desde el modulador de frecuencias (Ohsaki et al., 2002; Zhang & Wu, 2008).

$$a = \frac{\nu_b(\varepsilon) - \nu_b(0)}{\frac{\Delta \nu_b}{2}}$$

Ec. 2.11: Desplazamiento de frecuencia Brillouin debido a la deformación aplicada (Ohsaki et al., 2002; Zhang & Wu, 2008).

Donde los parámetros x y a de la función de espectro Brillouin, están normalizados. Desde la Fig. 2.6 a la Fig. 2.9, por simplicidad, el origen del desplazamiento óptico de frecuencia es trasladado a la posición peak del espectro Brillouin para la sección sin deformación. El espectro combinado o total, medido y entregado por el sistema BOTDR, está dado por:

$$g(x) = g_0(x) + g_\varepsilon(x)$$

Ec. 2.12: Espectro Brillouin total, medido por el sistema BOTDR (Ohsaki et al., 2002; Zhang & Wu, 2008).

De acuerdo a distintos largos deformados y distintas magnitudes de deformación, la medición del sistema BOTDR entregará distintos valores, según se describe a continuación:

I. Si el nivel de deformación (incluyendo la deformación de pre-tensado) es $<1000\mu\varepsilon$ (0,10%), el desplazamiento de la componente del espectro de la sección de fibra deformada, no es lo suficientemente grande para ser separada de la componente del espectro asociada al tramo sin deformación. Por lo tanto, el espectro Brillouin total, tiene sólo un peak, como se muestra en la Fig. 2.6:

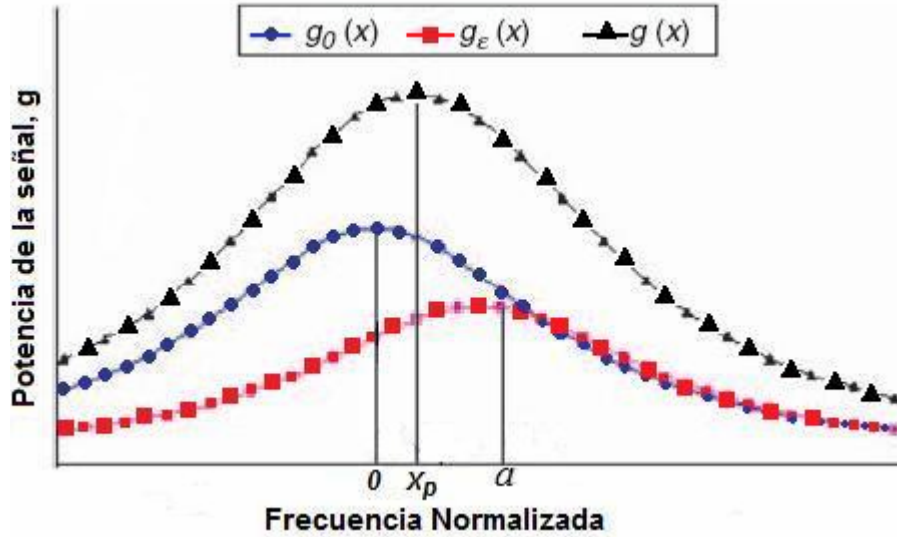


Fig. 2.6: Espectro Brillouin total generado en una fibra deformada en tramo menor a la resolución espacial (i.e. largo deformado $< 1m$) para una deformación $\epsilon \leq 0,10\%$, con $x_p \approx ar$ (Ohsaki et al., 2002; Zhang & Wu, 2008).

Debido a que la posición peak de $g(x)$ no coincide con el desplazamiento a , el valor del desplazamiento no puede ser detectado directamente. El análisis teórico de $g(x)$ se realiza como se explica a continuación (Ohsaki et al., 2002; Zhang & Wu, 2008).

La posición peak x_p del espectro $g(x)$, es obtenida del cero de su derivada $g'(x)$:

$$g'(x) = -\frac{2(1-r)x}{(1+x^2)^2} - \frac{2r(x-a)}{\{1+(x-a)^2\}^2} = 0$$

Ec. 2.13: Anulación de la derivada del espectro Brillouin total para búsqueda del máximo.

Como ambos, x y a son pequeños para bajas deformaciones, una solución simple aproximada se obtiene de despreciar los términos de segundo o mayor orden, obteniéndose:

$$x_p \approx ar$$

Ec. 2.14: Posición del máximo (peak) del espectro Brillouin combinado.

Entonces, para pequeñas deformaciones ($< 0,10\%$), el valor de la posición del peak x_p , del espectro Brillouin total, es proporcional al valor de la posición a del peak del espectro

Brillouin del tramo deformado, y la constante proporcional coincide con la razón de deformación parcial r de la fibra óptica.

Según la *Ec. 2.14*, la deformación real de la fibra óptica puede ser determinada del valor de deformación medida, a través de la *Ec. 2.15*:

$$\varepsilon_r = \frac{L}{l} \times \varepsilon_m$$

Ec. 2.15: Obtención del valor de deformación real a través del valor medido para $\varepsilon \leq 0,10\%$.

Donde:

ε_r	:	Valor de deformación real de la fibra óptica
ε_m	:	Valor de deformación medido
L	:	Resolución espacial
l	:	Largo de fibra óptica deformado

Esta característica puede permitir la deducción de la deformación real cuando se tiene un tramo deformado menor a la resolución espacial, a través de los datos entregados por el sistema BOTDR.

II. En casos donde el nivel de deformación de la fibra óptica está dentro del rango 1000 a 2500 $\mu\varepsilon$ (0,10 a 0,25%), el espectro Brillouin total también tiene un sólo peak, como se muestra en la *Fig. 2.7*. La posición x_p del peak de $g(x)$ es menor a ar , y mientras mayor sea el valor de la deformación, menor es la razón entre x_p y a , lo que significa:

$$\varepsilon_r > \frac{L}{l} \times \varepsilon_m$$

Ec. 2.16: Relación entre valor de deformación real y valor medido para $0,10\% \leq \varepsilon \leq 0,25\%$.

En esta condición, resulta difícil obtener una relación definida entre el valor de deformación medida y el valor real.

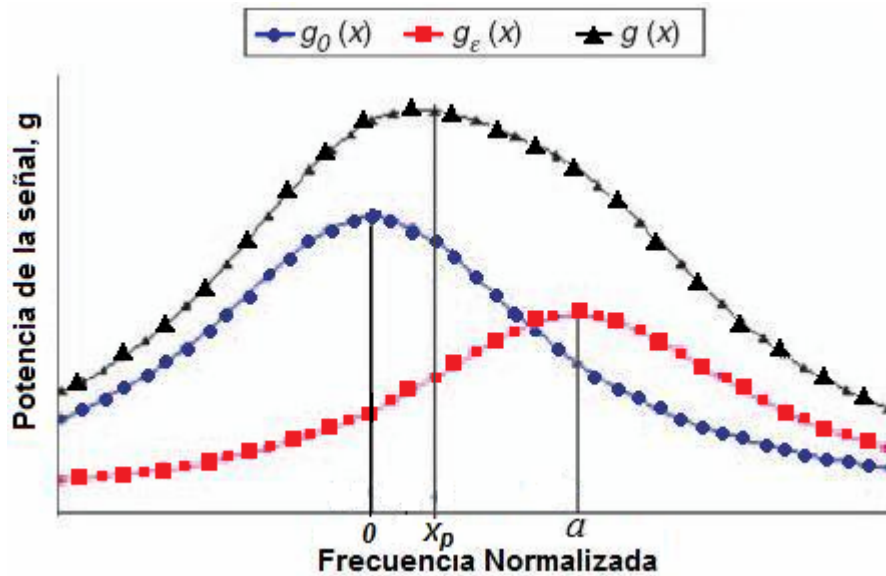


Fig. 2.7: Espectro Brillouin total generado en una fibra deformada en tramo menor a la resolución espacial (i.e. largo deformado $< 1m$) para una deformación $0,10\% \leq \epsilon \leq 0,25\%$, con $x_p < ar$ (Zhang & Wu, 2008).

III. En casos en que el nivel de deformación de la fibra óptica es mayor que $2500\mu\epsilon$ ($0,25\%$), para distintos largos de medición, la deformación medida por el sistema BOTDR entregará dos valores distintos, como se explica a continuación:

III.a. Si $r < 0.5$ (i.e. el largo deformado de la fibra óptica es menor a $0,5m$), el espectro Brillouin total $g(x)$ tiene dos peaks, como se muestra en la Fig. 2.8. El primer peak del espectro Brillouin total coincide en la abscisa con el peak de la componente del espectro para la fibra sin deformación, y el segundo (y menor) peak del espectro total coincide en la abscisa con el peak de la componente del espectro para el tramo de fibra deformado. El sistema BOTDR debiera capturar los peaks más altos. Por lo tanto, en esta condición, la deformación medida por el sistema BOTDR es cero (en terminos relativos).

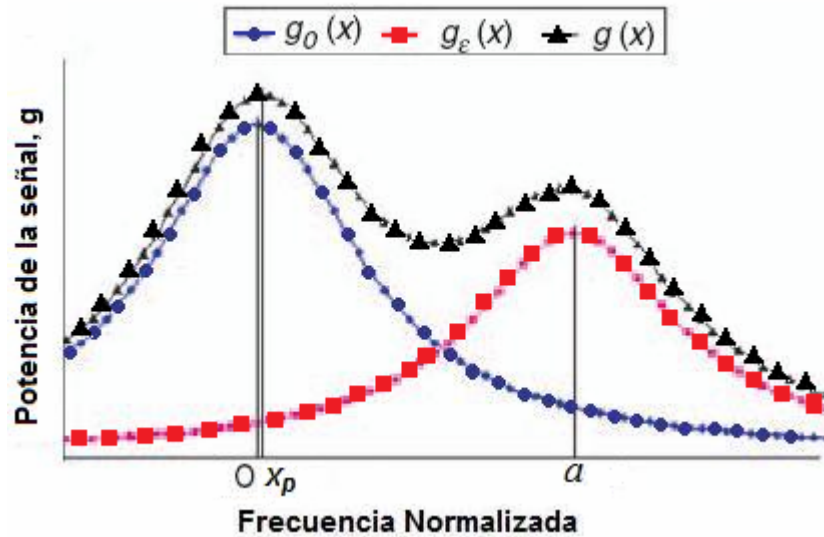


Fig. 2.8: Espectro Brillouin total generado en una fibra deformada en tramo menor a la resolución espacial (i.e. largo deformado <1m) para una deformación $\varepsilon \geq 0,25\%$, con $r < 0,5$; $x_p = 0$ (Ohsaki et al., 2002; Zhang & Wu, 2008).

III.b. Si $r > 0.5$ (i.e. el largo deformado de la fibra óptica es mayor a 0,5m), el espectro Brillouin total $g(x)$, también tiene dos peaks, como se muestra en la Fig. 2.9. Sin embargo, el segundo peak es más alto que el primero, por lo tanto, en esta condición, el valor medido por el sistema BOTDR iguala al valor de la deformación real del tramo de fibra óptica deformado.

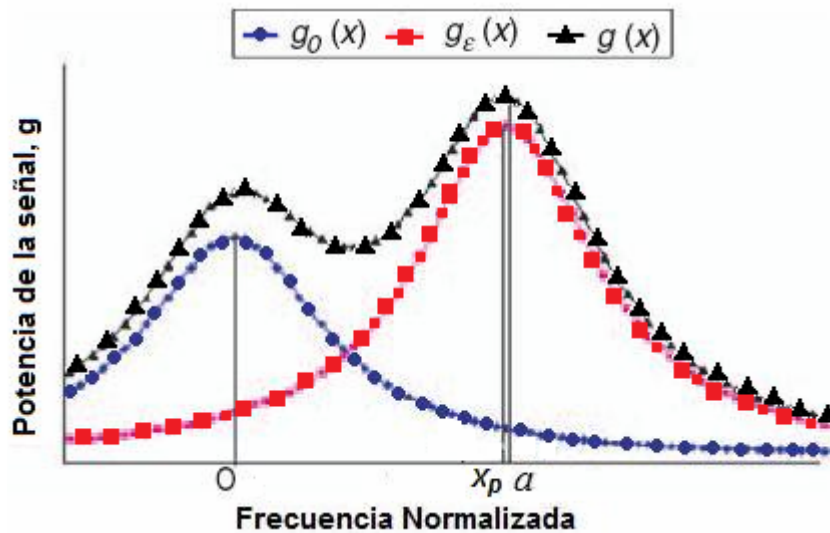


Fig. 2.9: Espectro Brillouin total generado en una fibra deformada en tramo menor a la resolución espacial (i.e. largo deformado <1m) para una deformación $\varepsilon \geq 0,25\%$, con $r > 0,5$; $x_p = a$ (Zhang & Wu, 2008).

2.1.4. Resumen del proceso físico y análisis de información BOTDR

Para un mejor entendimiento del proceso físico BOTDR, así como del análisis de resultados entregados por el analizador y *software*¹ respectivos, en el anexo H se exponen figuras elaboradas por el Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile para CORFO Innova Chile (CMM – CORFO Innova BOTDR, 2009), las cuales muestran las distintas etapas que, teóricamente, se desarrollan para obtener la información en forma de espectros de potencia.

2.1.5. Características de la medición con sistema BOTDR

Una característica distintiva del sistema, es que permite mediciones de deformación unitaria estática de larga distancia (ver *Tabla 2.1*), producida a lo largo de la fibra óptica. Además, el sistema posee otras especificaciones que permiten tener cierta idea de su aplicación y alcance práctico. En la *Tabla 2.1* se muestra además el parámetro *ancho o duración del pulso de luz* enviado a través de la fibra, el cual condiciona otros aspectos tales como la resolución espacial. Éste parámetro se ingresa como input o *setup* al sistema. En la *Tabla 2.2* se muestran características relacionadas con la calidad de la medición.

¹ La descripción y nombre tanto del analizador BOTDR como del software asociado, se detallan más adelante en este estudio.

Tabla 2.1: Condiciones del “setup” del sistema BOTDR (NTT, 2007)

Ancho del Pulso	Resolución Espacial	Distancia (alcance) de Medición	Pérdida ¹	Largo mínimo del sensor para medir deformación
(ns)	(m)	(km)	(dB)	(m)
10	1,0	7	3,5	1,0
20	2,0	15	7,5	2,0
50	5,0	23	11,5	5,0

Tabla 2.2: Características de la medición con sistema BOTDR (NTT, 2007)

Característica	Método BOTDR
Puntos Medibles con 1 cable de fibra óptica	10000 puntos continuos en largo de 1m a 22m en promedio en intervalos de ancho de 10cm a 100cm
Precisión de la medición	±0,01% (Deformación Unitaria)
Tiempo por cada Medición (depende del seteo de tiempo promedio)	10 a 20 min
Cable de Fibra Óptica	Fibra Óptica SM (Modo Individual) de telecomunicación general
Aptitud	Medición de cambio gradual
Rango de medición (recomendado)	1,0% ²

En la *Fig. 2.10* se muestra el efecto de la resolución espacial y el ancho del pulso escogido en el *setup* del *software*, sobre la medición de deformación unitaria.

¹ Aún cuando el largo de la fibra sensora esté dentro de la distancia de medición, ésta distancia se reducirá si el valor de la pérdida supera los valores recomendados en la tabla.

² Dato obtenido mediante ensayos pertenecientes a la presente investigación

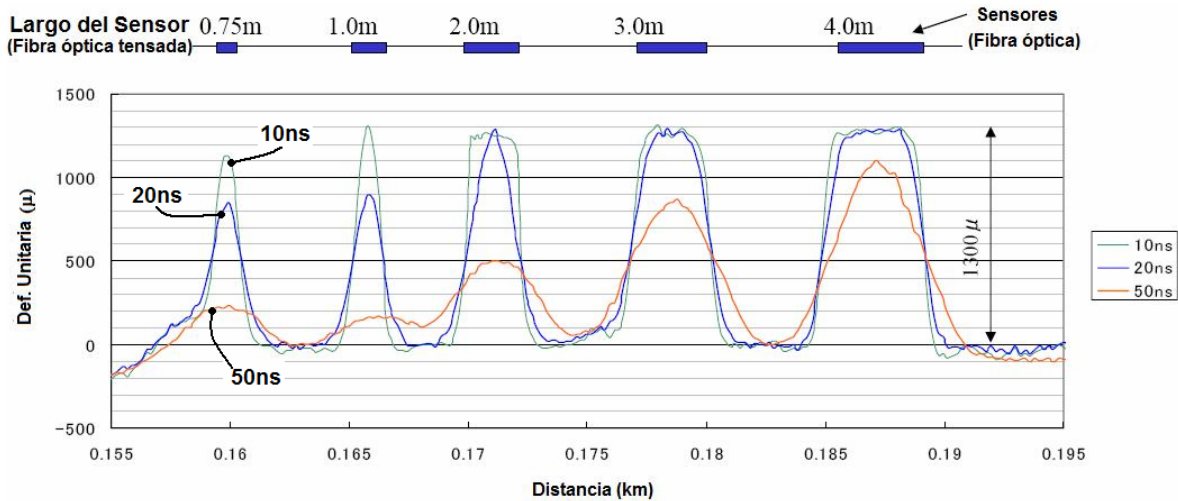


Fig. 2.10: Patrones de medición de Def. Unitaria según la Resolución Espacial. Deformación real aplicada ($\epsilon_r = 0,13\%$ (NTT, 2007))

2.1.6. Influencia de la temperatura en la medición

En general, además de cambios en la deformación de una estructura instrumentada con el sistema BOTDR, el valor de la medición variará debido a que la fibra óptica puede ser afectada por cambios en la temperatura, lo que implicará cambios en la deformación unitaria medida.

De esta forma, en el actual sistema de medición y monitoreo, deben ser considerados tanto el objeto a medir, como también los cambios en la temperatura del medioambiente. Para asegurar precisión en la medición, puede ser necesario corregir los cambios en el valor de ésta, debido a la variación de temperatura que afecta a la fibra óptica sensora.

Una forma de corregir la influencia de la temperatura requiere que existan sensores de temperatura (confeccionados con la misma fibra, pero sin deformar), que no sean afectados por cambios en la estructura medida (i.e. deformación de la estructura) y que estén bajo las mismas condiciones medioambientales. Específicamente, durante la instalación del sistema de fibra sensora, se dejan tramos de fibra suelta extra (sensores de temperatura) que sólo miden el valor del cambio en temperatura. Luego, con la información obtenida a través de este sensor, se corrigen dichos efectos (ver anexo I). Sin

embargo, dependiendo de los tipos de fibra, hay diferencias en cómo las secciones tensadas y no tensadas (secciones extra), responden a los cambios de temperatura.

En el capítulo 5, se muestra la influencia real de la temperatura en las mediciones de deformación, observada durante los ensayos de calibración realizados en la presente investigación.

2.1.7. Lecturas del software para captura de datos del sistema BOTDR

El sistema BOTDR fabricado incluye el software *ADVANTEST N8510*[®] para la utilización del analizador y la posterior captura y análisis de datos. El software mencionado, incorpora algoritmos que entregan el cálculo de deformación unitaria en todo el largo de fibra sensora conectada al sistema. Además, el sistema entrega información directa (NTT, 2007) sobre:

- ***Espectros de frecuencia Brillouin***: Patrón de espectro de ondas
- ***Strain***: Valor de Deformación Unitaria calculada directamente según la teoría de ajuste de curvas lorentzianas desarrollada en secciones anteriores. Se expresa en (%) o micro strain (μ -strain)
- ***Pérdida peak***: Equivalente a la mitad de la potencia máxima del espectro de frecuencias en una posición determinada (definición enmendada).
- ***Pérdida promedio***: Dato por medio del cual la potencia es acumulada hasta que alcanza 1/2 del valor peak del espectro de frecuencias
- ***Parámetro B.S. Width***: Equivale al parámetro FWHM en cada posición de la fibra.

En la *Fig. 2.11* se muestra el tipo de datos que pueden ser observados por la interfaz gráfica del software. A la izquierda se aprecia el gráfico tri-dimensional entregado, relacionando posición o distancia en la fibra con la frecuencia asociada, y además la potencia asociada a cada frecuencia. El plano de corte a la derecha muestra una de las opciones de datos que pueden ser visualizados, el gráfico de “*Spectrum*” o *Curva de Espectro de Frecuencias* (en adelante, *curva de espectro*) con la gama de frecuencias (en GHz) y sus respectivas potencias (en dB) asociadas.

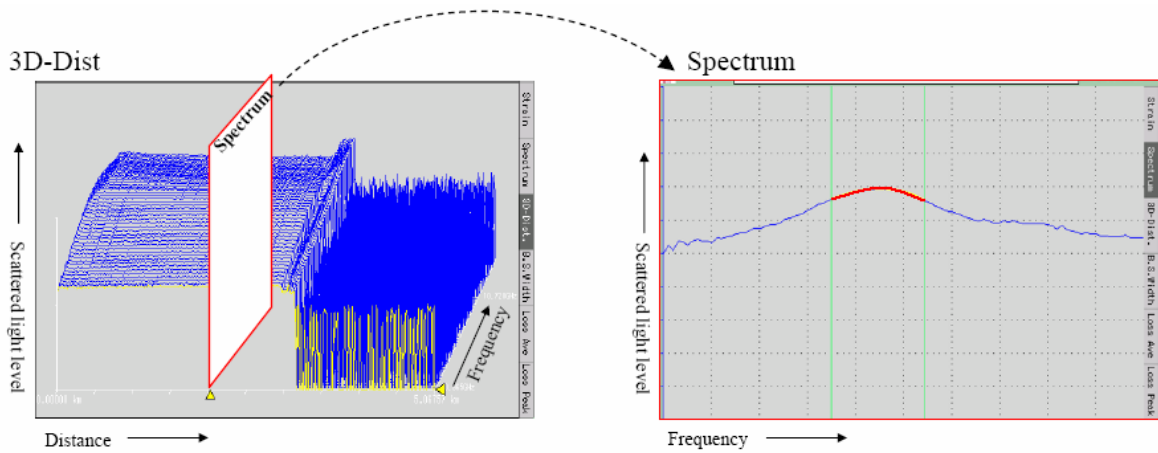


Fig. 2.11: Datos visualizados en la interfaz gráfica del software ADVANTEST N8510®. A la izquierda: Gráfico 3-D. Distancia en la fibra (eje horizontal)- Frecuencia (eje hacia adentro de la figura) - Potencia (eje vertical). A la derecha: Curva de espectro de frecuencias, Potencia (eje vertical) vs. Frecuencia (eje horizontal). (NTT, 2007)

La Fig. 2.12 muestra el gráfico tri-dimensional con un mayor nivel de detalle, destacando la curva de espectro para una posición determinada y la distribución de potencia para una frecuencia determinada. En este caso, las frecuencias aumentan saliendo del plano de la figura.

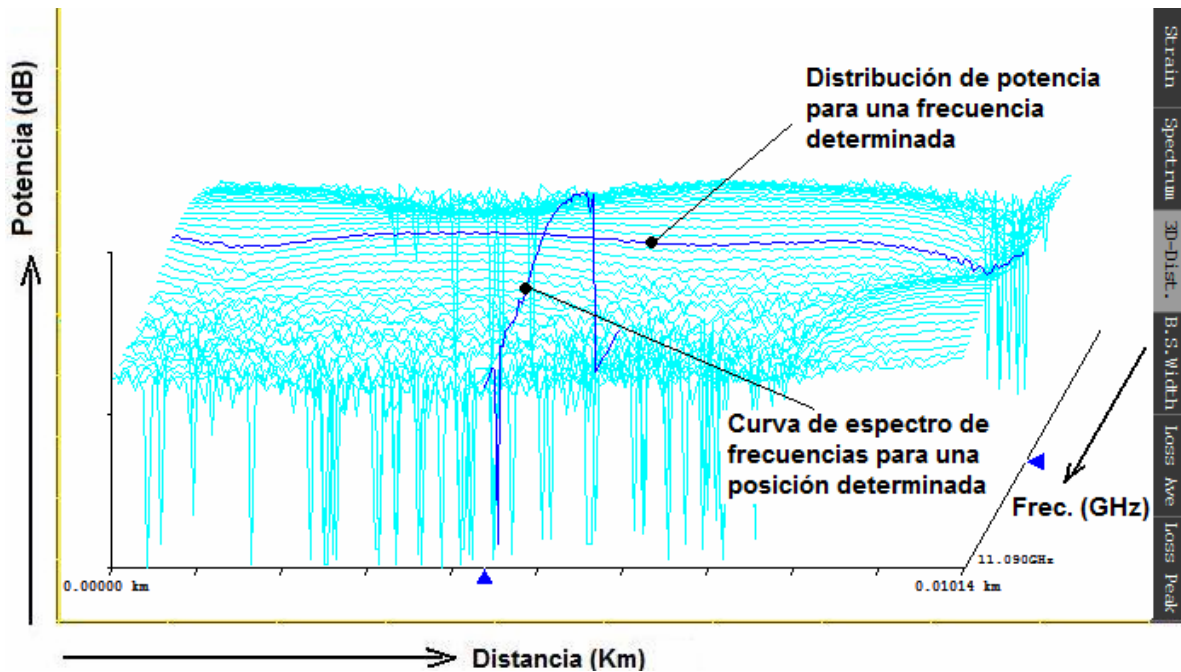


Fig. 2.12: Gráfico 3-D entregado por el software ADVANTEST N8510®

La Fig. 2.13 muestra la *curva de espectro* con más detalle, exhibiendo la *curva lorentziana* ajustada al espectro y el parámetro FWHM.

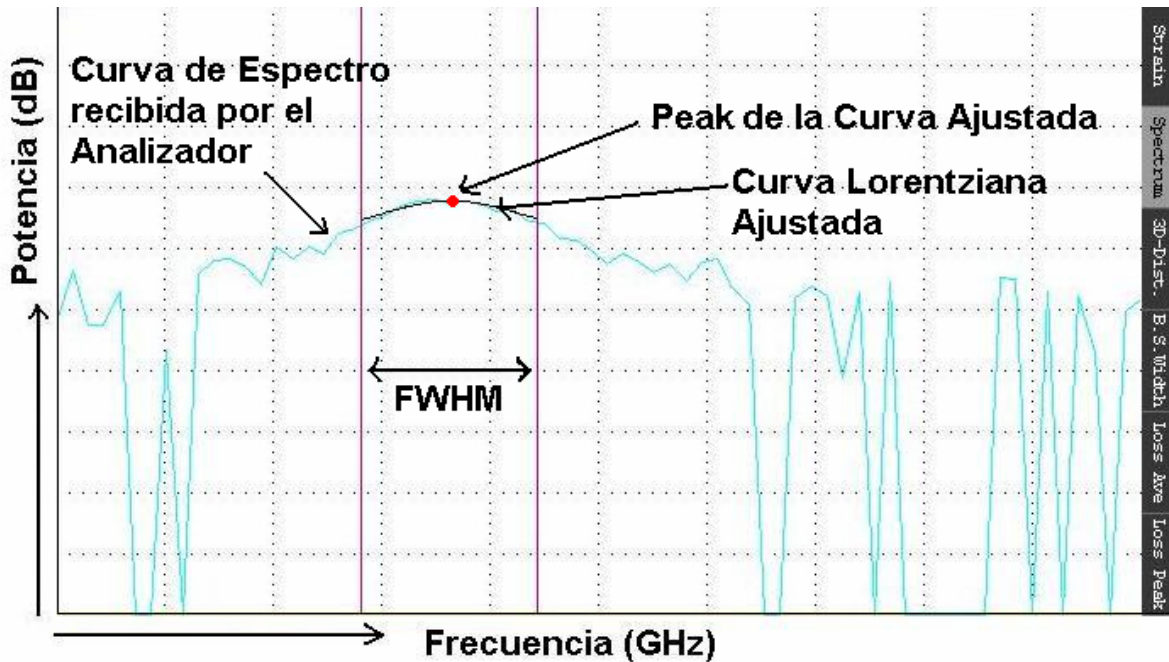


Fig. 2.13: Ejemplo de Curva de Espectro de Frecuencias recibida (celeste) y Curva Lorentziana (negro) ajustada por el software ADVANTEST N8510®

En la Fig. 2.14 se aprecia un ejemplo de mediciones erróneas efectuadas con el equipo cuando el operador no escoge en forma correcta el rango de frecuencias que se espera obtener como resultado de una medición. Para evitar este error, debe tenerse en cuenta la frecuencia original de la fibra sensora, además de las frecuencias máximas asociadas a las deformaciones máximas esperadas. Las pruebas de calibración realizadas con la fibra fueron fundamentales para conocer estos parámetros, las cuales la llevaron a la rotura, obteniéndose así una estimación de las frecuencias máximas que pueden esperarse en la fibra en condiciones normales, las que superan ampliamente las deformaciones que alcanzarán a desarrollarse en la práctica.

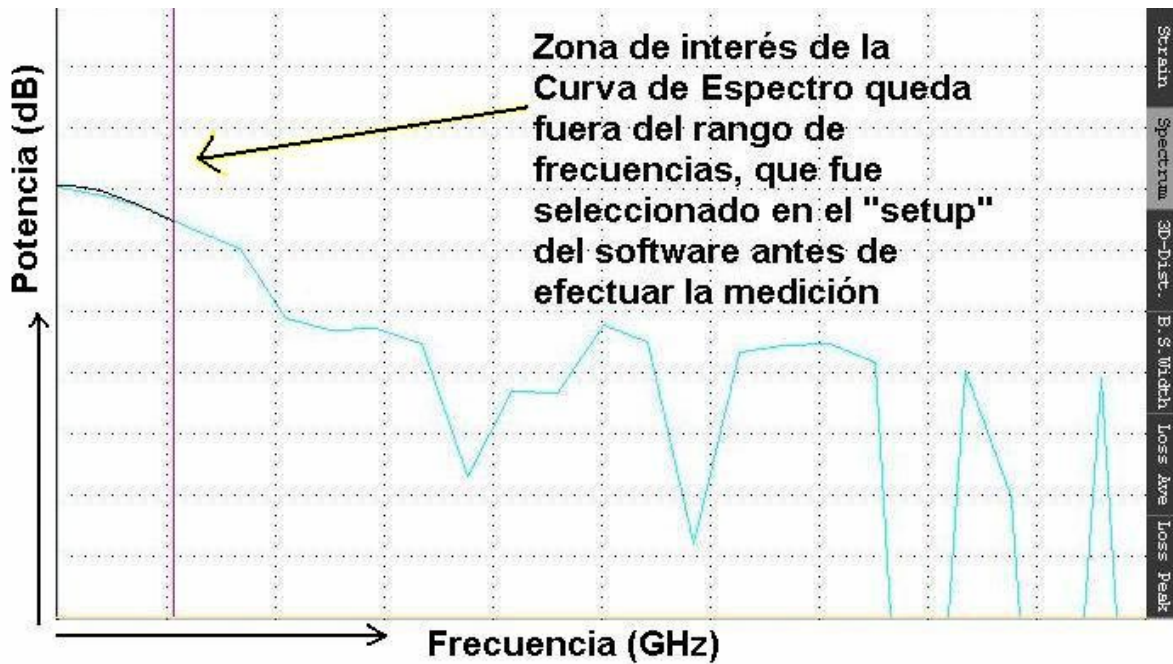


Fig. 2.14: Ejemplo de medición errónea debido a mala selección, en el "setup" del software, del Rango de Frecuencias a analizar.

Como se mencionó anteriormente, el *software* realiza automáticamente, la transformación de la información obtenida como espectros de frecuencia, a deformación unitaria. La correlación utilizada para efectuar dicha transformación, obtenida de ensayos de calibración realizados en la presente investigación (ensayo calibración 16-nov-2007, capítulo 5), se muestra en la *Fig. 2.15*. Como puede verse, se trata de una relación lineal entre ambas cantidades físicas.

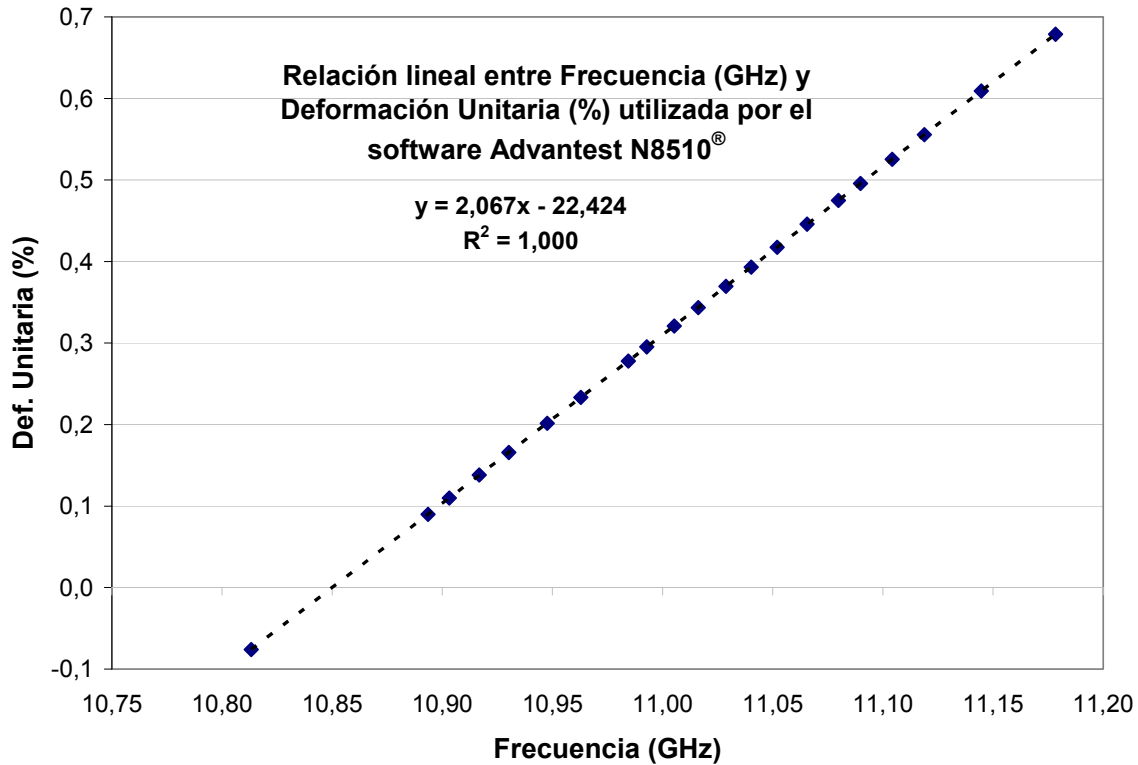


Fig. 2.15: Relación lineal entre frecuencia y deformación unitaria utilizada por el software. Datos ensayo calibración 16-nov-2007 (ver capítulo 5)

2.1.8. Integración realizada por el sistema BOTDR en la Resolución Espacial

Con respecto a la integración (o promedio) sobre la resolución espacial efectuada por el sistema, como se mencionó anteriormente, se ha observado que ésta difiere de la expuesta por Murayama et al. (2004) y Zhang & Wu (2008). Para analizar esto, se consideran resultados entregados por el sistema BOTDR durante un ensayo de calibración de fibra óptica sensora, donde se aplicó deformación a un tramo de fibra de largo levemente menor a la resolución espacial de 1m. La instalación y resultados más detallados de este ensayo se muestra en secciones posteriores (ensayo de calibración 22-nov-2007, paso 10MHz). La Fig. 2.16 presenta la distribución de deformación entregada por el software durante el ensayo, para una deformación aplicada de 0,4% aproximadamente, según lo indicado por el sistema BOTDR y por dispositivos externos a la fibra óptica. Además, en ésta y en las figuras posteriores se identifican puntos

relevantes según mapeo efectuado manualmente y según el análisis de la información entregada por el *software*.

Un dato adicional que debe tenerse en cuenta en este análisis, es el hecho de que el analizador BOTDR utilizado, posee un tramo de fibra óptica en su interior que no fue considerado al realizar los mapeos en ensayos. El largo de este tramo de fibra se ha estimado en 50cm aproximadamente. Más adelante, se efectuará un breve análisis teórico explicando la influencia que tiene este tramo adicional sobre las lecturas entregadas por el sistema BOTDR.

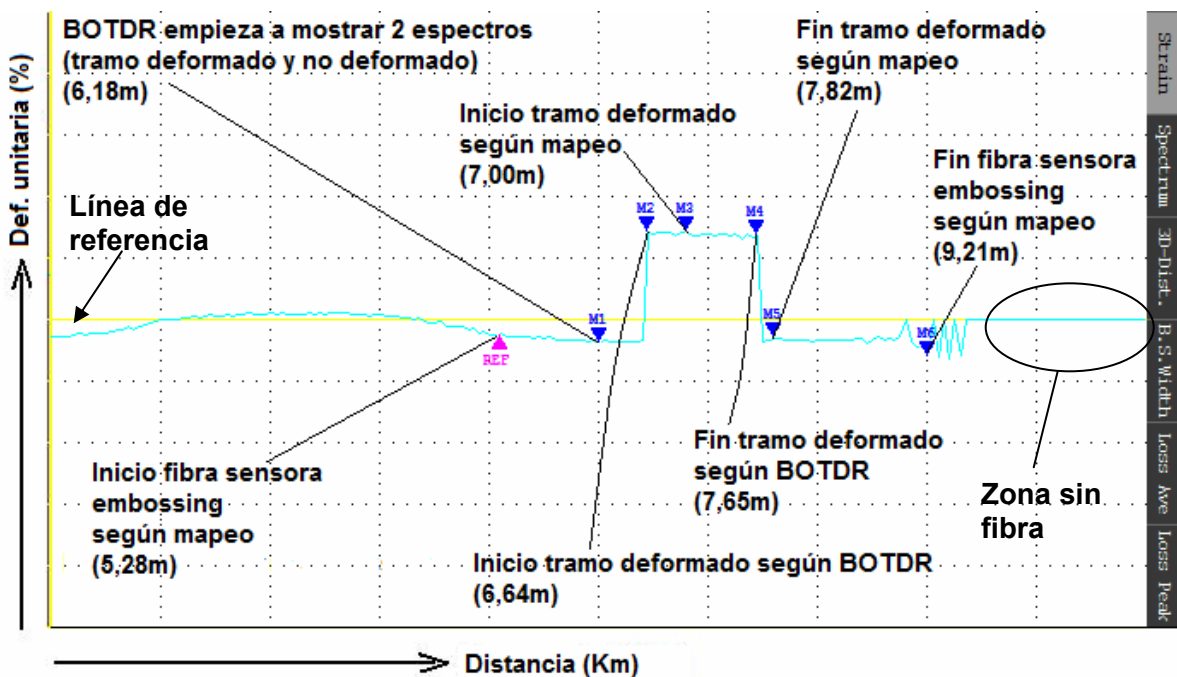


Fig. 2.16: Mapeo de puntos relevantes y distribución de deformación unitaria entregada por el *software*. Datos ensayo calibración 22-nov-2007, paso 10MHz.

La “línea de referencia” indicada en la *Fig. 2.16*, es utilizada por el *software* y no tiene mayor relevancia en el análisis. Ésta indica un valor de deformación unitaria igual a 0%, lo que no debe confundirse con deformación nula en la práctica, ya que como puede apreciarse, el estado sin deformación de la fibra sensora aparece por debajo de ésta línea, es decir, es negativa inicialmente respecto a la referencia. Además, en la figura se muestra la zona donde ya no existe fibra, lo que se traduce en una línea horizontal sobre la referencia mencionada. Esta zona sin fibra, muestra en otros casos algunos peaks en

forma alternada, que sólo indican ruido de la señal. Estos podrán apreciarse más adelante, en lecturas de ensayos de pernos de anclaje en terreno.

La *Fig. 2.17* muestra cómo crece otro peak de potencia (asociado al tramo de fibra deformada), a la derecha del peak original (asociado al tramo de fibra no deformada), en la curva de espectro entregada por el *software*. Ésto indica la posición donde el sistema comienza a detectar deformación en la fibra óptica y, por lo tanto, a incluir en la integración de espectros mencionada anteriormente, aquellos asociados a la fibra deformada. Al seguir avanzando en distancia, la integración sobre la resolución espacial va incluyendo cada vez más espectros asociados al tramo deformado de fibra; por lo cual el nuevo peak crece hasta igualar, y sobrepasar en potencia, al peak original (ver *Fig. 2.18*). Cuando esto último ocurre, se observa un cambio considerable en el valor de la deformación entregada por el *software*, debido a que éste escoge el nuevo peak, y se mantiene escogiéndolo, mientras tenga una potencia mayor que la del peak original (ver *Fig. 2.19*).

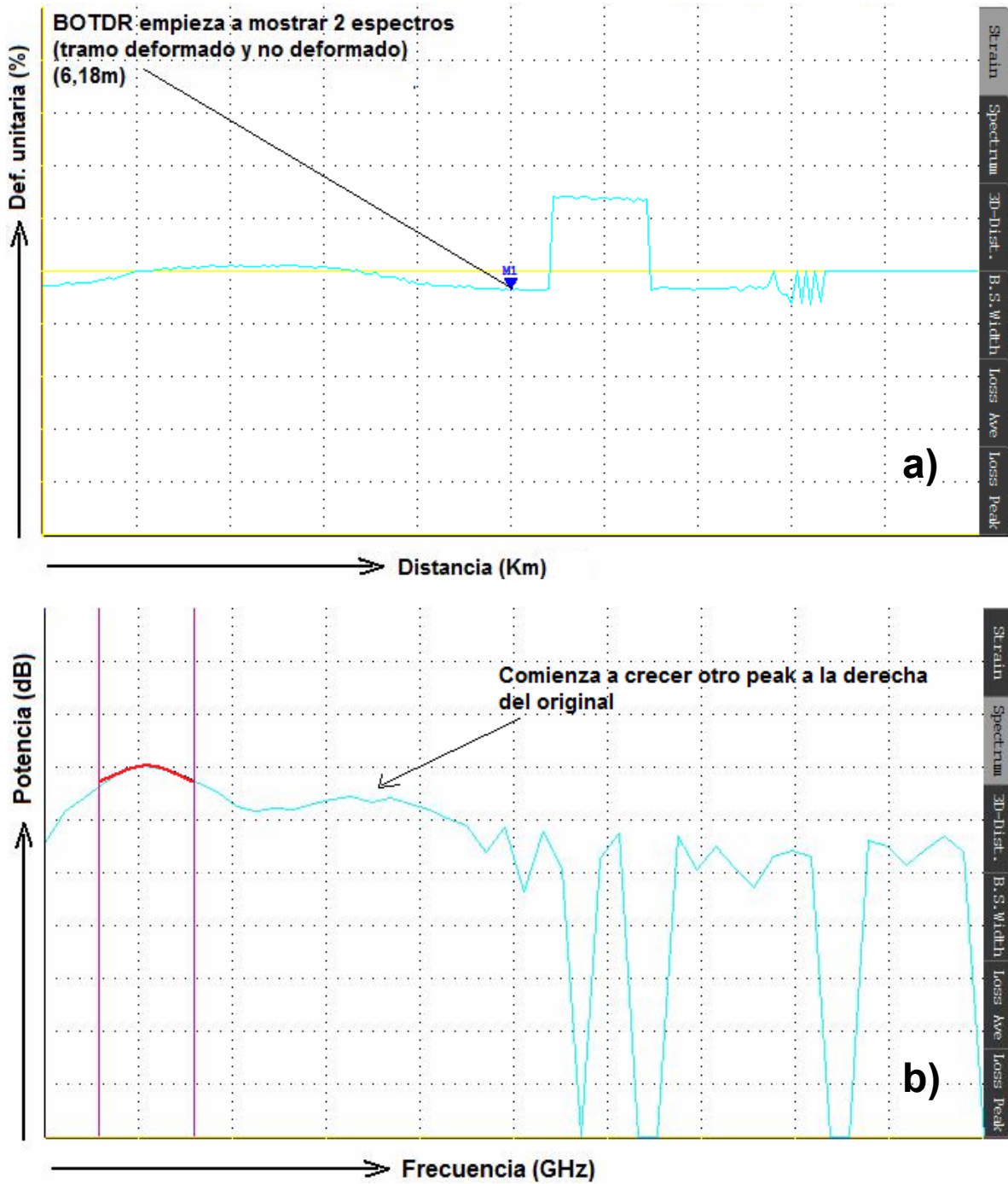


Fig. 2.17: a): Distancia donde BOTDR comienza a detectar espectro deformado. b): Curva de espectro asociada. Datos ensayo calibración 22-nov-2007, paso 10MHz.

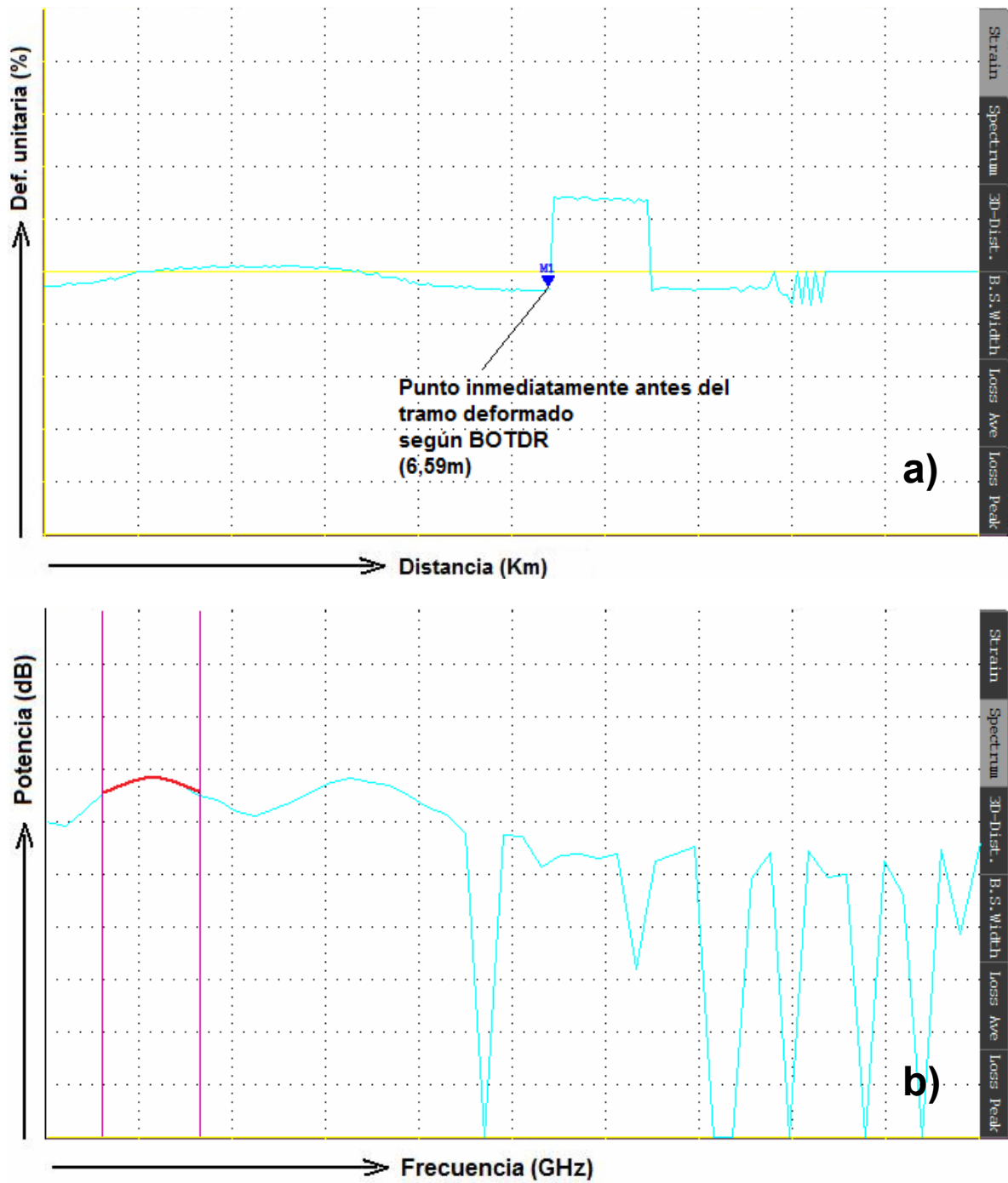


Fig. 2.18: a): Distancia inmediatamente antes del tramo deformado según BOTDR. b): Curva de espectro asociada. Datos ensayo calibración 22-nov-2007, paso 10MHz.

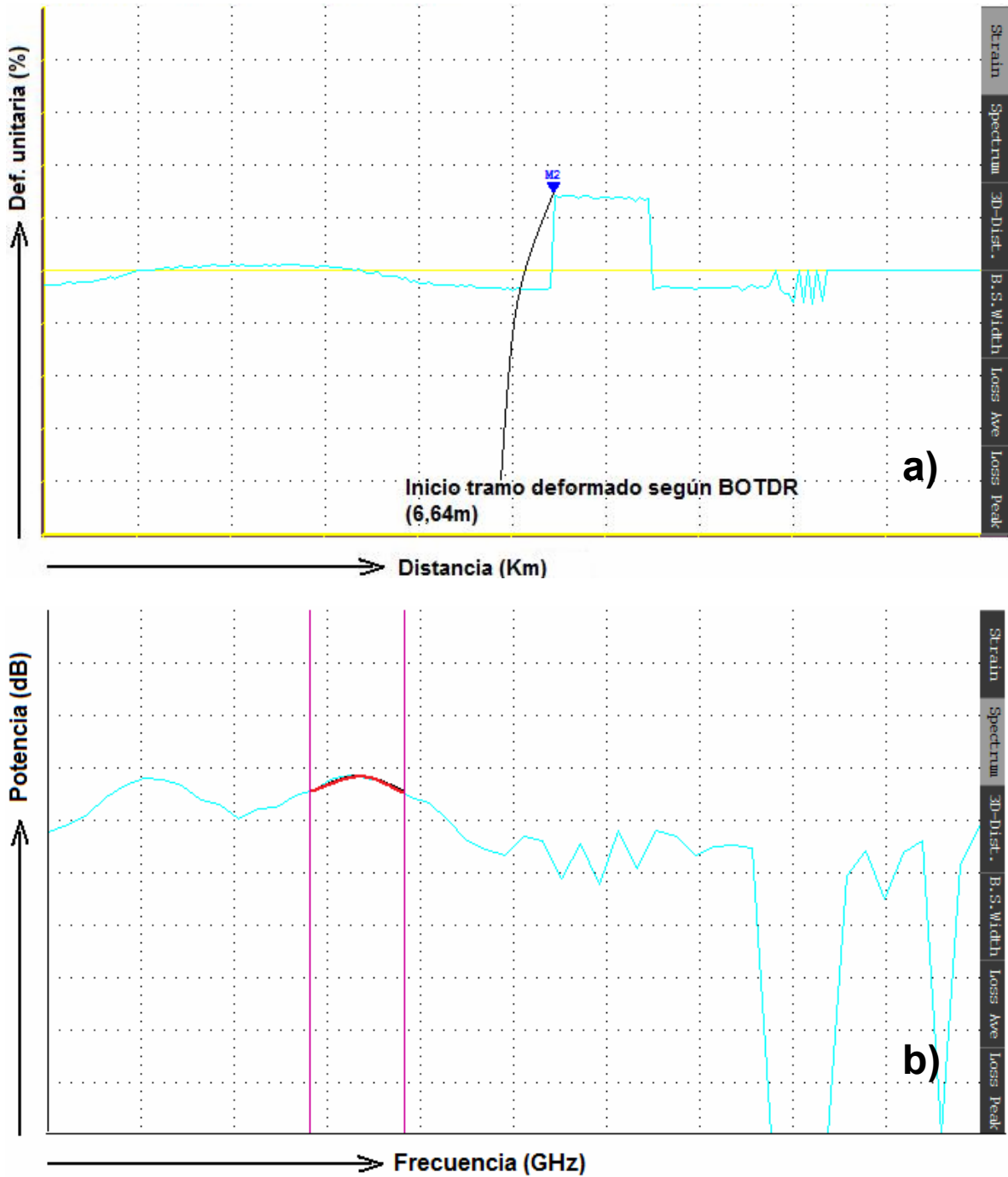


Fig. 2.19: a): Distancia de inicio tramo deformado según BOTDR. b): Curva de espectro asociada. Datos ensayo calibración 22-nov-2007, paso 10MHz.

La Fig. 2.20 a continuación, muestra la distancia donde el peak izquierdo se hace mínimo, la cual coincide con el punto medio del tramo deformado según BOTDR. Esto indica, que la integración sobre la resolución espacial, abarca casi por completo espectros

asociados al tramo deformado y sólo una pequeña cantidad de espectros asociados al tramo no deformado. Si la integración fuera completamente hacia atrás del punto analizado, se observarían dos espectros similares, asociados al tramo deformado y no deformado.

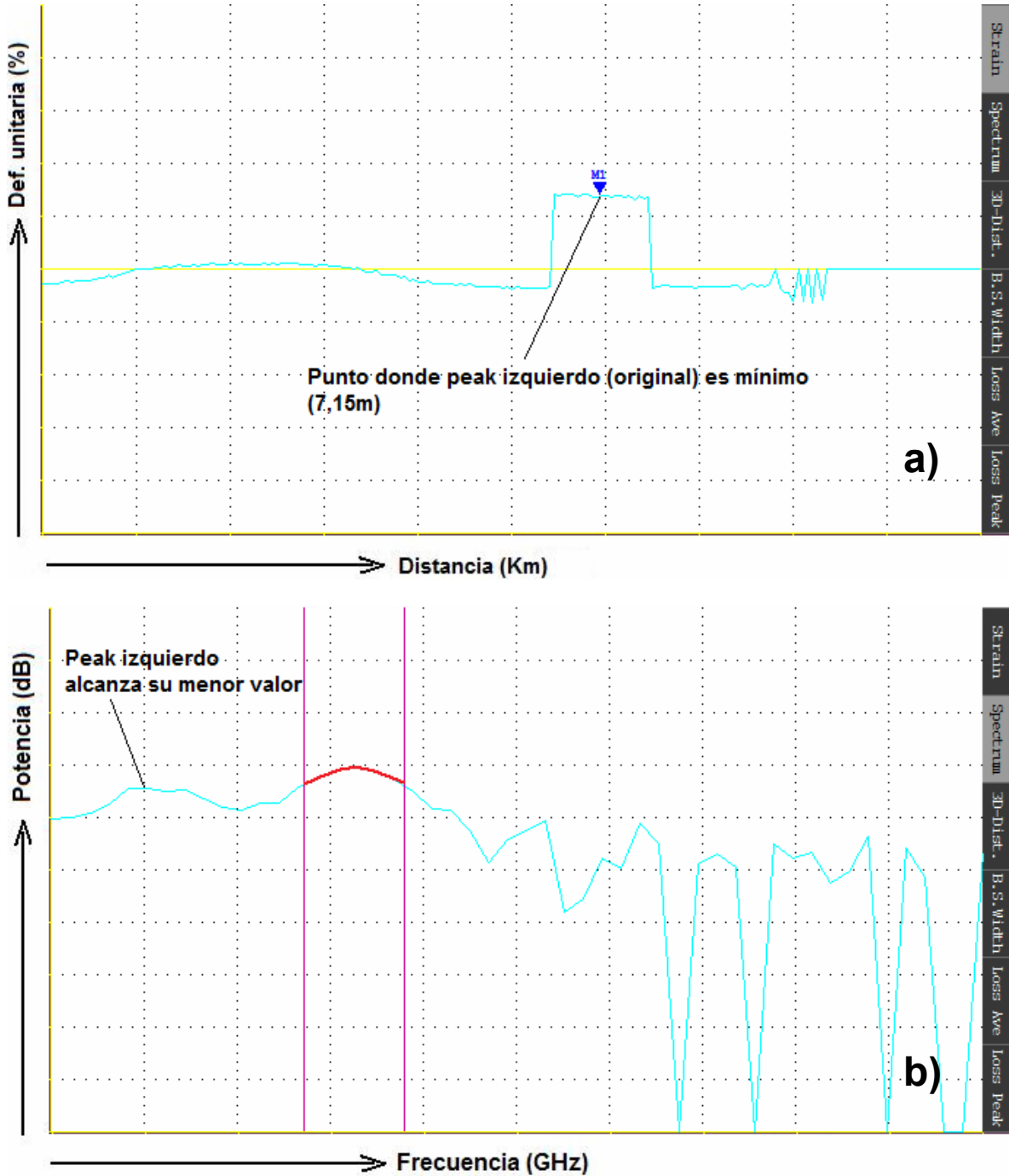


Fig. 2.20: a): Distancia en punto medio del tramo deformado según BOTDR, donde el peak izquierdo se hace mínimo. b): Curva de espectro asociada. Datos ensayo calibración 22-nov-2007, paso 10MHz.

La Fig. 2.21 muestra la distancia y la curva de espectro al final del tramo deformado según el sistema BOTDR. Se aprecia que ambos peak vuelven a ser similares, debido a que la integración abarca igual cantidad de espectros de ambos tramos.

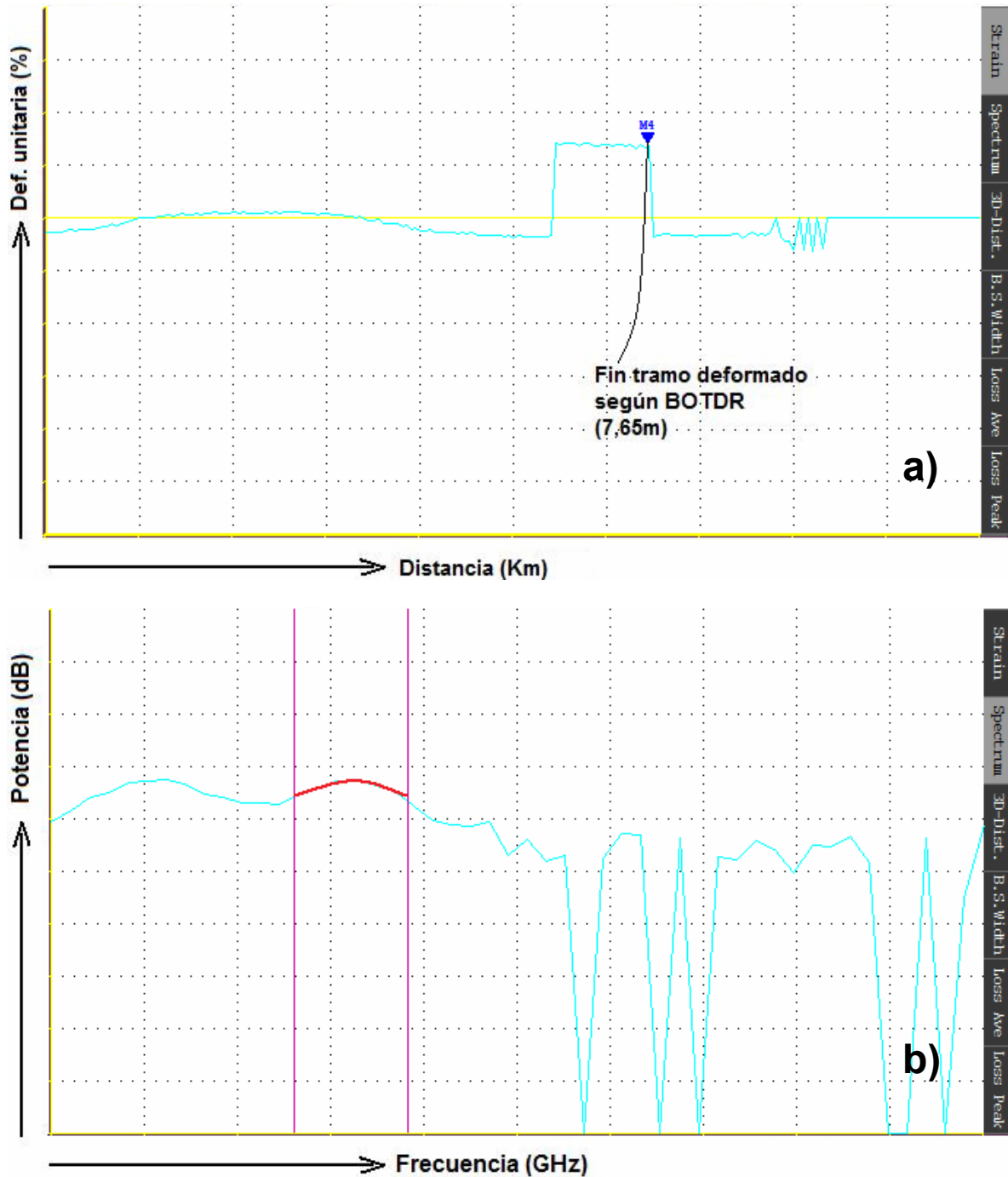


Fig. 2.21: a): Distancia al final de tramo deformado según BOTDR. b): Curva de espectro asociada. Datos ensayo calibración 22-nov-2007, paso 10MHz.

La Fig. 2.22 muestra el punto final del tramo deformado según mapeo y el espectro entregado por el software para dicha ubicación.

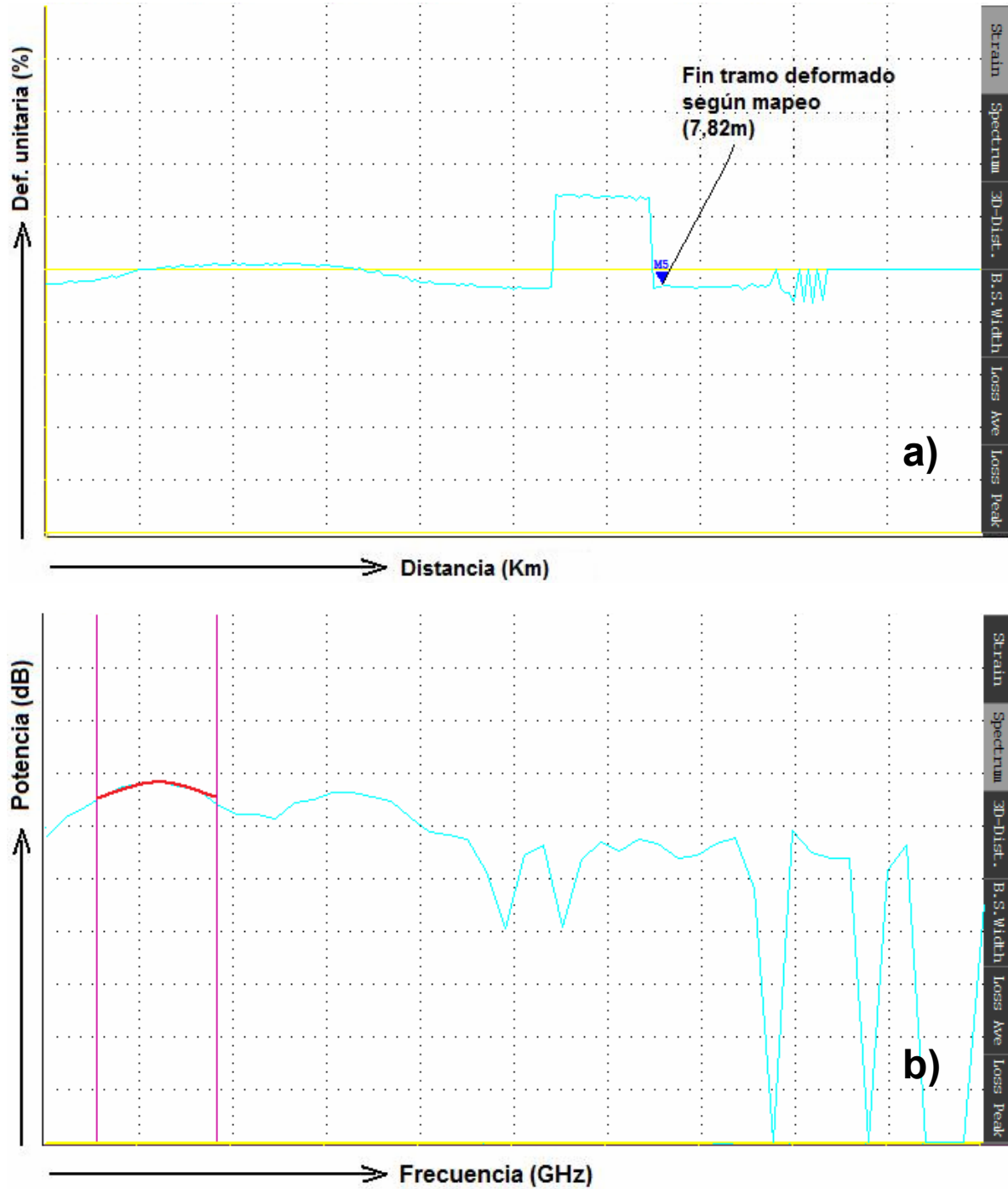


Fig. 2.22: a): Distancia al final de tramo deformado según mapeo. b): Curva de espectro asociada. Datos ensayo calibración 22-nov-2007, paso 10MHz.

Considerando lo anterior, es posible concluir que la integración sobre la resolución espacial efectuada por el sistema BOTDR, no se realiza ni completamente hacia atrás, ni completamente hacia delante del punto analizado, sino que de forma intermedia entre ambos casos. Si se considera la detección anticipada del tramo deformado (ver *Fig. 2.17*), o el desfase que existe entre los resultados entregados por el sistema y lo esperado según el mapeo sobre la fibra, podría concluirse que la integración se realiza mayoritariamente hacia delante. Por ejemplo, se observa que el comienzo y término del tramo deformado, ocurren antes de lo esperado según el mapeo de la fibra, sin que esto sea atribuible a la diferencia entre largo real deformado y largo deformado según el sistema BOTDR (ver Anexo G).

Con estos antecedentes, puede analizarse teóricamente el tipo de integración y promedio de curvas lorentzianas realizado por el sistema. Este análisis se efectúa, por simplicidad, en términos de las distribuciones de deformación y no sobre las curvas de espectro. La *Fig. 2.23* muestra 5 perfiles de deformación unitaria de magnitud cualquiera. En ella se define el parámetro “m”, que indica la forma de integración realizada por el sistema. Si $m = 1.0$, entonces la integración y promedio de curvas *lorentzianas* se realiza completamente hacia atrás del punto considerado. Si $m = 0.5$ la integración se realiza mitad hacia atrás y mitad hacia adelante. Si $m = 0.0$ la integración se realiza completamente hacia adelante. Las tres distribuciones inferiores muestran estos casos, y surgen en base a la *distribución real desplazada 50cm*, es lo que realmente detecta el sistema para efectuar la integración, y no en base a la *distribución real según mapeo*. Los 50cm de desfase entre ambas distribuciones, provienen de la fibra interior del analizador, no considerada en el mapeo manual efectuado. Las tres distribuciones inferiores tienen una forma triangular, para representar la detección progresiva de la deformación aplicada sobre la fibra, mediante la resolución espacial que “avanza” tomando registros en la fibra. Luego, la deformación detectada aumenta hasta alcanzar un máximo, que es cuando la resolución espacial abarca completamente el tramo deformado, y finalmente decae a medida que se avanza a lo largo de la fibra y comienza a leer la zona sin deformación. Si se traza una línea vertical marcando el punto de “inicio tramo deformado según mapeo”, análogo al indicado en la *Fig. 2.16*; se observa cuál de las tres distribuciones representa de mejor forma lo observado en la práctica a través de la interfaz gráfica del software. De la *Fig. 2.23* es posible concluir entonces, que la integración del sistema es realizada mayoritariamente hacia delante. Sin embargo, es de suma relevancia considerar que este resultado incluye intrínsecamente, el hecho que el analizador BOTDR contiene un trozo

de fibra óptica de unos 50cm dentro de él. Sin este desfase, la conclusión sobre la forma de integración sería distinta.

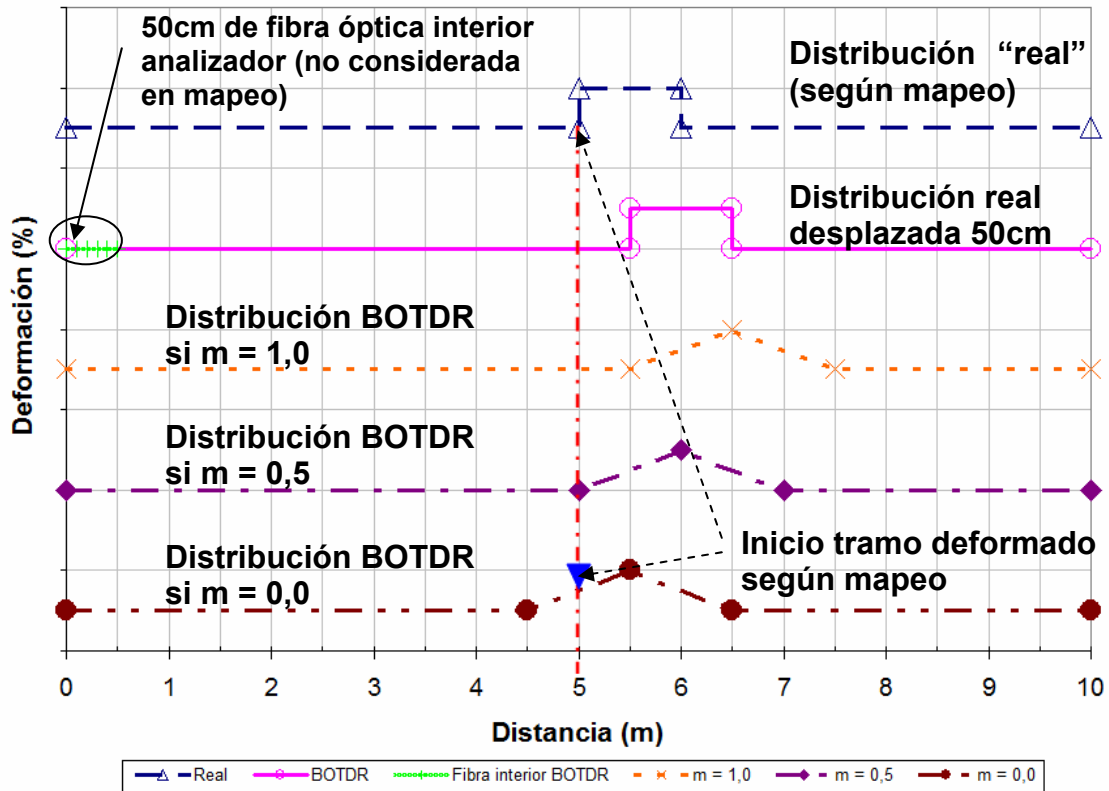


Fig. 2.23: Análisis teórico integración realizada por el sistema BOTDR utilizado en el presente estudio.

2.2. Tipos y Estructuras de Fibras Ópticas

La vaina de fibra óptica se constituye de un núcleo, un revestimiento o blindaje y una cobertura o protección, cada una de distinto índice de refracción.

En cuanto a su mecanismo de funcionamiento, hay principalmente 2 tipos de fibra óptica, la de “Modo Individual” (SM por sus siglas en inglés, ver Fig. 2.24) y la de “Índice Graduado de Modo Múltiple” (GI por sus siglas en inglés, ver Fig. 2.25). La fibra SM es la que generalmente se usa para la tecnología de medición de deformación y se distingue porque en esta viaja un solo rayo de luz en su interior a través de sucesivas reflexiones en las paredes del núcleo, como puede verse en la Fig. 2.24.

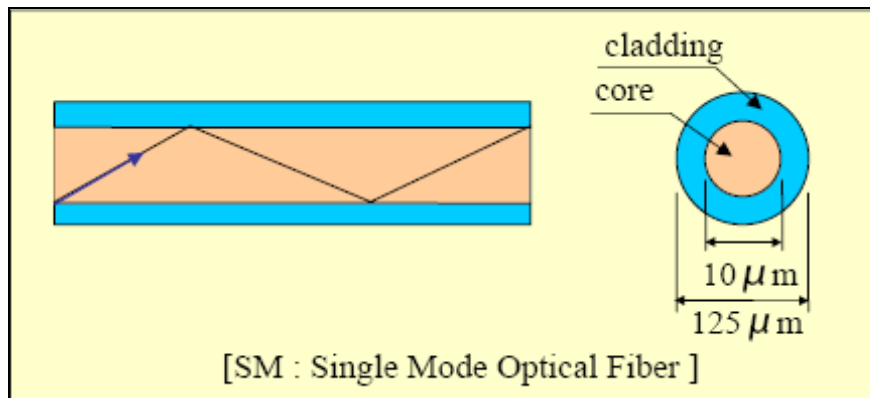


Fig. 2.24: Fibra Óptica tipo Single Mode: Estructura y mecanismo de transmisión de luz en su interior. (NTT, 2007)

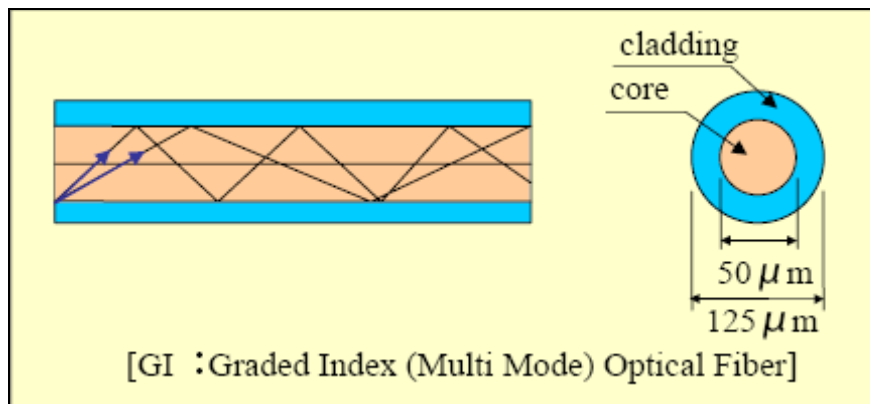


Fig. 2.25: Fibra Óptica tipo Graded Index Multi Mode: Estructura y mecanismo de transmisión de luz en su interior. (NTT, 2007)

Entendiendo como *fibra sensora*, aquella que se usa en la actualidad como un sensor para la medición de deformaciones, se presenta un tipo especial de fibra utilizada para estos fines, de mecanismo SM, y que posee una cobertura con un patrón de ranuras que la dotan de cierta rugosidad (y mayor agarre en la superficie a ser instalada). Ésta es la llamada fibra sensora *Embossing Surface*¹ (en adelante fibra embossing o fibra tipo embossing), cuyo nombre en inglés describe la característica de su superficie. Un esquema de las partes componentes de esta fibra puede verse en la Fig. 2.26. En la figura Fig. 2.27 se muestra una imagen real de la fibra óptica, su interior y recubrimientos.

¹ *Embossing*: cubrir con muchas protuberancias o ranuras. *Surface*: superficie.

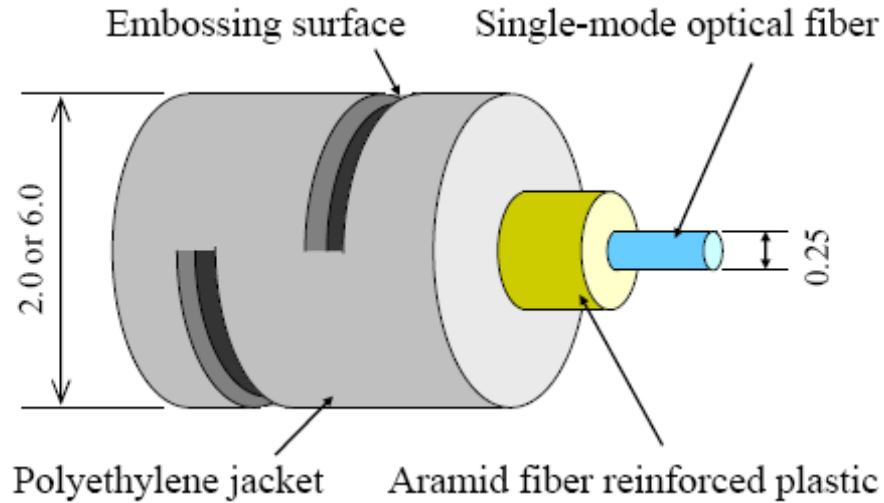


Fig. 2.26: Estructura y características de la Fibra Óptica tipo “Embossing Surface” (de mecanismo Single Mode) con blindaje de plástico reforzado con fibra de aramida y cobertura de polietileno. Dimensiones en mm. (NTT, 2007)

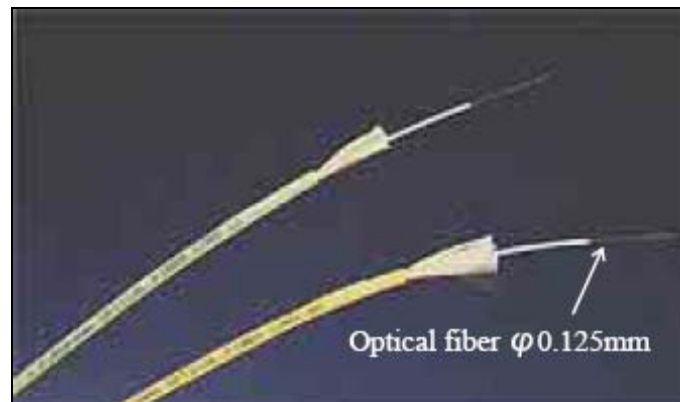


Fig. 2.27: Vista (real) de algunos tipos de Fibra Óptica, interior y coberturas (NTT, 2007)

2.3. Característica de Curvado de la Fibra Óptica

Debido a su fabricación, una fibra óptica en la actualidad no se quiebra fácilmente, incluso si es fuertemente curvada. En general, en un cable de fibra óptica, comienzan a exhibir pérdidas de luz o señal cuando éste es curvado en un radio menor o igual a 5cm (ver anexo J)

2.4. Propiedades de Transmisión de la Fibra Óptica

A continuación se definen algunos conceptos relacionados con la transmisión de señales en fibra óptica.

2.4.1. Atenuación o Pérdida en la Fibra

La atenuación o pérdida en la fibra es una medida de la pérdida de potencia durante la transmisión de señales ópticas dentro de ella. Si P_o es la potencia de entrada de una fibra de largo L , la potencia transmitida P_T , está dada por:

$$P_T = P_o \exp(-\alpha L)$$

Ec. 2.17: Potencia transmitida en una fibra óptica de largo L .

Donde la constante de atenuación α , es una medición de las pérdidas totales de la fibra desde todas las fuentes. Es común expresar α en unidades dB/km, donde dB representa la unidad decibel (Agrawal, 2001).

2.4.2. El Decibel (dB)

En la acústica y la tecnología de las telecomunicaciones, frecuentemente se usan algunas cantidades relativas adimensionales, siendo el decibel (abreviado dB), una de estas.

La definición general de decibel es de la forma:

$$dB = 10 \times \log\left(\frac{P_S}{P_E}\right)$$

Ec. 2.18: Función Decibel

Donde P_E es y P_S están expresadas en la misma unidad física. El uso más común del decibel es el de relaciones de potencias, siendo también el caso de interés en el presente estudio. De esta forma, la cantidad P_E corresponde a la potencia de la señal de entrada del dispositivo y P_S a la de salida. P_E puede considerarse como una potencia de referencia y por ende, para futuros cálculos, como una constante. El número 10 que multiplica al logaritmo, no tiene relevancia en el análisis requerido en este estudio y podría asignársele un valor arbitrario; en la ecuación se muestra el valor generalmente usado.

La naturaleza logarítmica de la escala decibel permite que una gran relación sea expresada en un número mucho más pequeño. Por ejemplo, 10^9 y 10^{-9} corresponden a 90 dB y -90 dB, respectivamente. Por otra parte, según la definición la relación $P_S/P_E = 1$ equivale a 0 dB, por lo tanto, relaciones menores que 1 son negativas en la escala decibel. Además, debe tenerse en cuenta que relaciones negativas no pueden ser expresadas en unidades de decibel (Agrawal, 2001).

Los datos entregados en la curva de espectro pueden entenderse como conteos de fotones retro-dispersados y recibidos por el analizador, cuyo valor está indicado por su potencia. El analizador, mediante un manejo interno de datos, entrega la información en decibeles para todo el rango de frecuencias considerado por el sistema.

En capítulos posteriores, se estudiarán alternativas de análisis de datos entregados por el sistema BOTDR (ver alternativas 1, 2 y 3 en capítulo 5), las que utilizan esta función y sólo se diferencian entre sí por la constante que se suma a cada una, por ende, se analiza la función decibel modificada:

$$dB(P_s) = 10 \cdot \log\left(\frac{P_s}{P_E}\right) + cte.$$

Ec. 2.19: Función Decibel (modificada)

La alternativa 4, también estudiada en el capítulo 5, utiliza los datos BOTDR devolviéndolos a su formato original, es decir, invirtiendo la transformación a decibeles. Esta función inversa, según se mostró anteriormente, es de la forma mostrada en la Ec. 2.20.

$$P_S = P_E \cdot 10^{\frac{dB}{10}}$$

Ec. 2.20: *Función Potencia (Función Decibel Inversa)*

La frecuencia promedio calculada más adelante en cada alternativa, adquiere distintas expresiones según el tipo de función utilizada, las que se muestran respectivamente en las *Ec. 2.21* y *Ec. 2.22*. Como puede notarse, es posible tomar el cálculo de la frecuencia promedio como una función de 2 variables, la potencia o decibel recibido, y la frecuencia respectiva.

$$\overline{F(P_{Si}, F_i)} = \frac{\sum_i A_i \cdot F_i}{\sum_i A_i} = \frac{\sum_i (dB_i \cdot \Delta F) \cdot F_i}{\sum_i A_i} = \frac{\Delta F}{A_{total}} \sum_i (10 \cdot \log\left(\frac{P_{Si}}{P_E}\right) + cte) \cdot F_i$$

Ec. 2.21: *Frecuencia Promedio, como función de la Potencia.*

$$\overline{F(P_{Si}, F_i)} = \frac{\sum_i A_i \cdot F_i}{\sum_i A_i} = \frac{\sum_i (dB_i \cdot \Delta F) \cdot F_i}{\sum_i A_i} = \frac{\Delta F}{A_{total}} \sum_i (10 \cdot \log\left(\frac{P_{Si}}{P_E}\right)) \cdot F_i$$

Ec. 2.22: *Frecuencia Promedio, como función del Decibel.*

2.5. Sobre Anclajes en Roca

La teoría presentada en esta sección busca explicar y pronosticar, las distintas sollicitaciones que pueden esperarse en anclajes actuando como sistemas de soporte de túneles en roca subterránea. En la *Fig. 2.28* se representan dos de ellas, las cuales pueden ser provocadas por el desprendimiento de un bloque de roca que hace trabajar el anclaje en forma longitudinal. Si bien existe teoría que estudia el comportamiento de anclajes sometidos a esfuerzos transversales a su eje longitudinal, ésta no se expone en el presente estudio, por considerarse fuera del alcance establecido. De esta manera, se plantean teóricamente los modelos A y B de sollicitaciones, los cuales fueron estudiados a

través de ensayos detallados en capítulos posteriores. El modelo A, considera la parte del perno anclada al macizo rocoso (firme) al momento de desprenderse el bloque de roca. Esta sección estaría intentando ser arrancada desde un extremo debido a la fuerza provocada por el desprendimiento del bloque hacia la excavación. El esfuerzo se transfiere desde el perno al macizo rocoso a través del grout. El modelo B, considera la sección del perno que intenta caer solidaria al bloque desprendido, por lo cual se estaría aplicando sobre él una fuerza longitudinal en la zona de la separación entre el bloque desprendido y el macizo rocoso, provocando una reacción en el extremo del perno ubicado en la superficie libre del túnel, debido a la placa de sujeción instalada (ver *Fig. 2.29*). Este modelo de sollicitación no fue representado a cabalidad, ya que los ensayos asociados consideraron el perno sollicitado a tracción pura, lo que difiere en cierto grado de lo que ocurre en la situación mostrada en la *Fig. 2.28*, ya que además de la fuerza sollicitante en la zona de la grieta y la reacción de la placa de acero en el extremo libre, existe un aporte como esfuerzo de corte (no uniforme) debido al grout entre el perno y la roca. Este último esfuerzo no fue considerado en este tipo de ensayos.

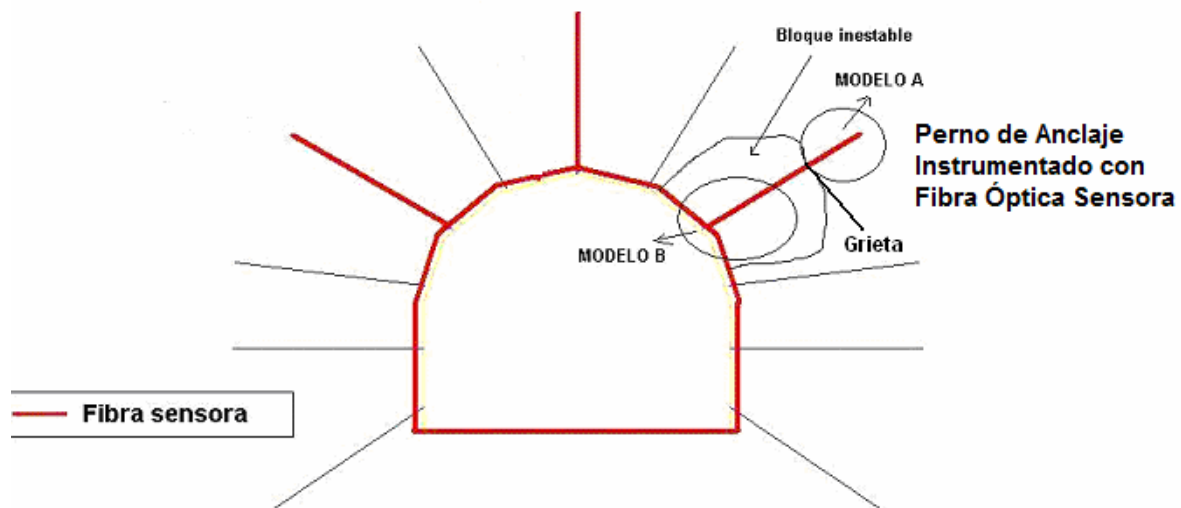


Fig. 2.28: Modelos de sollicitación representados en ensayos de laboratorio y terreno

La *Fig. 2.29* muestra un esquema del detalle de la interfaz entre la superficie libre de la excavación y la pared de roca con el sistema de soporte instalado, el cual consiste en el perno de acero helicoidal instrumentado con fibra óptica, la placa y tuerca de sujeción.

En adelante, se utilizará la denominación *grout*¹ para la lechada usada para fijar un perno de anclaje a una estructura (ya sea roca o losa de hormigón). En la literatura se utiliza la palabra *grout* para lechadas de cemento, resina o algún otro material. En este capítulo se exponen resultados de ensayos realizados con *grout* de resina. Sin embargo, en el capítulo 5 de resultados, se emplea el término *grout* sólo para referirse a lechada de cemento. Un perno grouteado es entonces un perno fijado a la roca mediante algún tipo de grout o lechada. Si está completamente grouteado significa que éste se fijó con grout en toda su longitud.

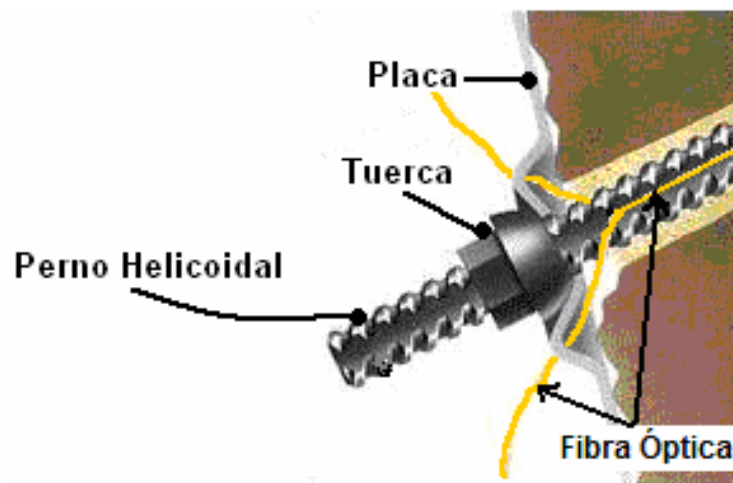


Fig. 2.29: Esquema perno helicoidal "Saferock" instrumentado con fibra óptica (GerdauAza (modificado), sitio electrónico)

2.5.1. Distribución Teórica de Esfuerzos en Anclajes

Para cables o pernos completamente grouteados, sin pre-tensado (i.e anclaje pasivo), el perno es activado por las deformaciones del macizo rocoso que ocurren luego de su instalación en las paredes de la excavación (ver Fig. 2.30 y Fig. 2.32).

Para un análisis simple, un perno de acero grouteado en una perforación en roca, mediante una resina de poliéster o epóxica, puede ser considerado como un anclaje elástico (de módulo de elasticidad E_a), rodeado por grout resistente al corte (de módulo de

¹ *Grout: lechada. Grouted: Lleno con lechada.*

rigidez G_g) y simétricamente posicionado en un soquete rígido constituido por la roca (ver *Fig. 2.30*). El módulo de elasticidad de la roca es, en efecto, de alrededor de un orden de magnitud mayor que la resina (Farmer, 1975).

Si una fuerza de tracción se aplica al perno, ésta es transferida al grout, a través de fuerzas de contacto o corte en la interfaz perno-grout, causando una extensión diferencial del perno y un esfuerzo de corte en el grout a lo largo del anclaje. En una angosta tajada diametral entre x y $x + \delta x$ (ver *Fig. 2.30*) esta transferencia puede ser representada por la *Ec. 2.23* o visto de otra forma en la *Ec. 2.24*.

$$\pi a^2 \delta \sigma_x = -2\pi a \tau_x \delta x$$

Ec. 2.23: *Equilibrio de esfuerzos a lo largo del perno grouteado (Farmer, 1975).*

Donde:

- a : Radio del perno
- σ_x : Esfuerzo axial en el perno
- τ_x : Esfuerzo de corte o tangencial en la interfaz perno-grout (resina)
- x : Coordenada de profundidad en el perno (en superficie libre $x = 0$).

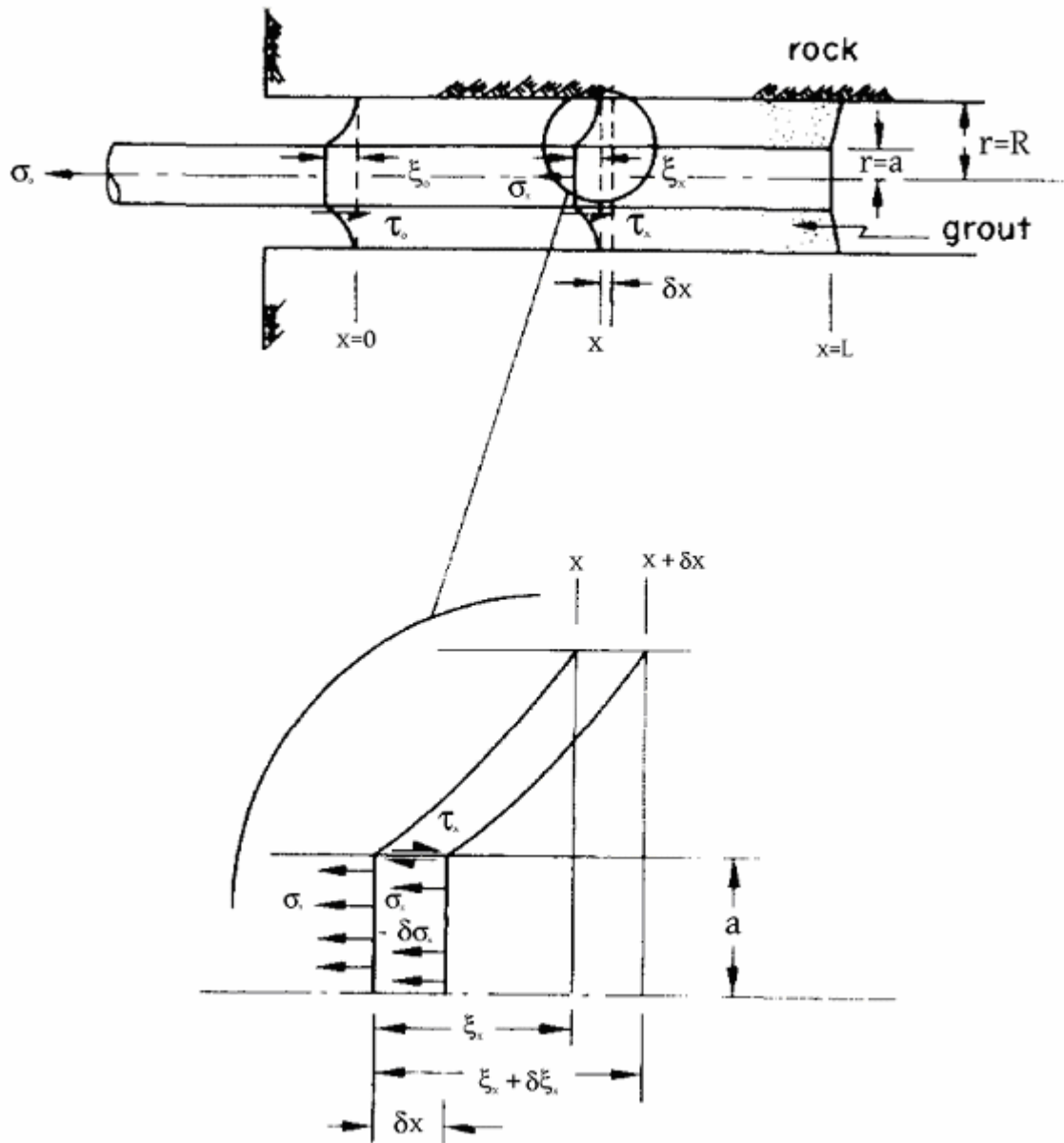


Fig. 2.30: Estado de esfuerzos en un anclaje "grouteado" (Farmer, 1975)

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = -\frac{2}{a} \tau_x$$

Ec. 2.24: Esfuerzo normal y de corte a lo largo del perno grouteado (Farmer, 1975).

Considerando que la deformación es elástica y $\sigma_x = -E_a \frac{\delta \varepsilon_x}{\delta x}$, donde ε_x es la deformación axial de la barra y E_a su módulo de elasticidad, la Ec. 2.24 se transforma en:

$$\frac{d^2 \varepsilon_x}{dx^2} = \frac{2 \tau_x}{a E_a}$$

Ec. 2.25: *Deformación axial en función del esfuerzo de corte (Farmer, 1975).*

Desde este punto en adelante, Moosavi et al. (2002) efectúan un análisis alternativo al desarrollado por Farmer (1975). La diferencia estriba principalmente en la consideración del esfuerzo de corte, donde este último autor plantea una distribución del esfuerzo de corte en función de: a) la deformación axial del perno sin tomar en cuenta la deformación de la roca, b) las propiedades elásticas del grout y c) la geometría del anillo de grout, lo que conlleva posteriormente a un análisis simplificado de la situación, mediante la resolución analítica de una ecuación diferencial homogénea para encontrar la distribución de deformación y esfuerzo de corte a lo largo del perno de anclaje. Es este desarrollo el que se considerará en profundidad, tomando resultados de ensayos realizados por este autor para comparar con los encontrados en el presente estudio.

Por otra parte, el enfoque planteado por Moosavi et al. (2002), toma el esfuerzo de corte como función de la deformación axial tanto del perno como de la roca. Además se considera una constante de rigidez k de la interfaz perno-grout. Este análisis conlleva al planteamiento de una ecuación diferencial no-homogénea para la distribución de deformación en el perno, por lo cual el análisis se desarrolla en forma numérica. A continuación se plantea el desarrollo efectuado por Farmer (1975) (ver Fig. 2.30). Más adelante se muestra, en forma alternativa, el análisis de Moosavi et al. (2002), respetando su notación (ver Fig. 2.32).

- **Desarrollo según Farmer (1975):**

Si el anillo de grout es delgado (i.e. $(R - a) < a$), entonces el esfuerzo de corte (τ_x) en la interfaz acero-resina es representativa del esfuerzo de corte en el anillo:

$$\tau_x = \frac{\varepsilon_x}{(R - a)} G_g$$

Ec. 2.26: Esfuerzo de corte en anillo de grout delgado ($(R - a) < a$) (Farmer, 1975).

Si el anillo es más grueso (i.e., $(R - a) > a$), entonces τ_x se verá afectado por cambios radiales en su magnitud y se puede demostrar que:

$$\tau_x = \frac{\varepsilon_x}{a \cdot \ln\left(\frac{R}{a}\right)} G_g$$

Ec. 2.27: Esfuerzo de corte en anillo de grout grueso ($(R - a) > a$) (Farmer, 1975).

En ambos casos, la ecuación Ec. 2.25 por sustitución, tomará la forma de una ecuación diferencial estándar:

$$\frac{\delta^2 \varepsilon_x}{\delta x^2} - \alpha^2 \varepsilon_x = 0$$

Ec. 2.28: Ecuación diferencial (homogénea) para la deformación axial del perno grouteado (Farmer, 1957).

Con la solución estándar:

$$\varepsilon_x = A \cdot \exp(\alpha x) + B \cdot \exp(-\alpha x)$$

Ec. 2.29: Solución estándar ecuación diferencial (homogénea) (Ec. 2.28) (Farmer, 1975).

Donde el valor de la constante α depende del ancho del anillo de grout, como puede verse en la para anillo delgado y en la para anillo grueso.

$$\alpha^2 = \frac{2G_g}{E_a a (R - a)}$$

Ec. 2.30: Constante α de la ec. diferencial homogénea para anillo de grout delgado ($(R - a) < a$) (Farmer, 1975).

$$\alpha^2 = \frac{2G_g}{E_a a^2 \cdot \ln\left(\frac{R}{a}\right)}$$

Ec. 2.31: Constante α de la ec. diferencial homogénea para anillo de grout grueso ($(R - a) > a$) (Farmer, 1975).

La Ec. 2.29 puede ser resuelta para cualquier condición de borde; en este caso: $\sigma_x = \sigma_0$ cuando $x = 0$ y $\sigma_x = 0$ cuando $x = L$, resultando:

$$A = \frac{\sigma_0}{E_a \alpha} \frac{\exp(-\alpha L)}{\exp(\alpha L) - \exp(-\alpha L)}$$

$$B = \frac{\sigma_0}{E_a \alpha} \frac{\exp(\alpha L)}{\exp(\alpha L) - \exp(-\alpha L)}$$

Ec. 2.32: Constantes A y B de la ec. diferencial homogénea según condiciones de borde (Farmer, 1975).

Sustituyendo en la Ec. 2.29 las constantes A y B obtenidas, resulta:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_0}{E_a \alpha} \frac{\cosh(\alpha(L-x))}{\sinh(\alpha L)}$$

Ec. 2.33: Deformación axial teórica en perno completamente grouteado (Farmer, 1975).

Si L es mucho mayor que $1/\alpha$ (condición dada en la mayoría de los anclajes), la Ec. 2.33 se transforma en un simple decaimiento exponencial de la deformación axial con la profundidad x del anclaje.

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_0}{E_a \alpha} \exp(-\alpha x)$$

Ec. 2.34: Deformación axial teórica (simplificada) en función de la profundidad en perno completamente grouteado (Farmer, 1975).

Considerando la Ec. 2.26 y la Ec. 2.27, que relacionan la deformación axial con el esfuerzo de corte, puede obtenerse una expresión para este último en función de la profundidad, como puede verse en la Ec. 2.35.

$$\tau_x = \frac{1}{2} a \alpha \sigma_0 \exp(-\alpha x)$$

Ec. 2.35: Esfuerzo de corte teórico (simplificado) en función de la profundidad en perno completamente grouteado (Farmer, 1975).

Si para un material elástico, se asume que su módulo de elasticidad E equivale a $2G$ (Farmer, 1975), entonces α en la Ec. 2.30 y la Ec. 2.31, puede ser expresado en términos de una razón de módulos K , entre el grout sometido a corte y el perno sometido a tracción.

$$K = \frac{2G_g}{E_a} = \frac{E_g}{E_a}$$

Ec. 2.36: Razón de módulos elásticos del grout y perno de acero (Farmer, 1975).

Reemplazando esto en las ecuaciones para la constante α se obtiene:

$$\alpha^2 = \frac{K}{a(R-a)}$$

Ec. 2.37: Constante α en función de K para anillo de grout delgado ($(R-a) < a$) (Farmer, 1975).

$$\alpha^2 = \frac{K}{a^2 \cdot \ln\left(\frac{R}{a}\right)}$$

Ec. 2.38: Constante α en función de K para anillo de grout grueso ($(R-a) > a$) (Farmer, 1975).

Una implicancia del decaimiento exponencial en la Ec. 2.34 para la deformación axial y en la Ec. 2.35 para el esfuerzo de corte, es que cuando el parámetro αx es igual a 4,6, entonces $\exp(-\alpha x) = 0,01$, por lo que ε_x y τ_x se reducen al 1% de su magnitud en el extremo libre del perno de anclaje. En otras palabras, la carga en el perno es efectivamente disipada en profundidad para un largo equivalente al *largo de transferencia* (LT), dado por:

$$LT = \frac{4,6}{\alpha}$$

Ec. 2.39: Largo de Transferencia (Farmer, 1975).

El largo de transferencia es equivalente al largo óptimo de diseño para el anclaje grouteado.

Una aproximación de la distribución de esfuerzo de corte a lo largo de un típico anclaje en resina se muestra en la Fig. 2.31, donde para una combinación típica resina-acero en el anclaje, con $K \approx 0,01$ y $(R - a) = 0,25a$, la constante α , según la Ec. 2.37 (para anillo delgado) se reduce a $0,2/a$ y el esfuerzo de corte τ_x resulta:

$$\frac{\tau_x}{\sigma_0} = 0,1 \cdot \exp(-\alpha x)$$

Ec. 2.40: Esfuerzo de corte según parámetros típicos de anclaje en resina (Farmer, 1975).

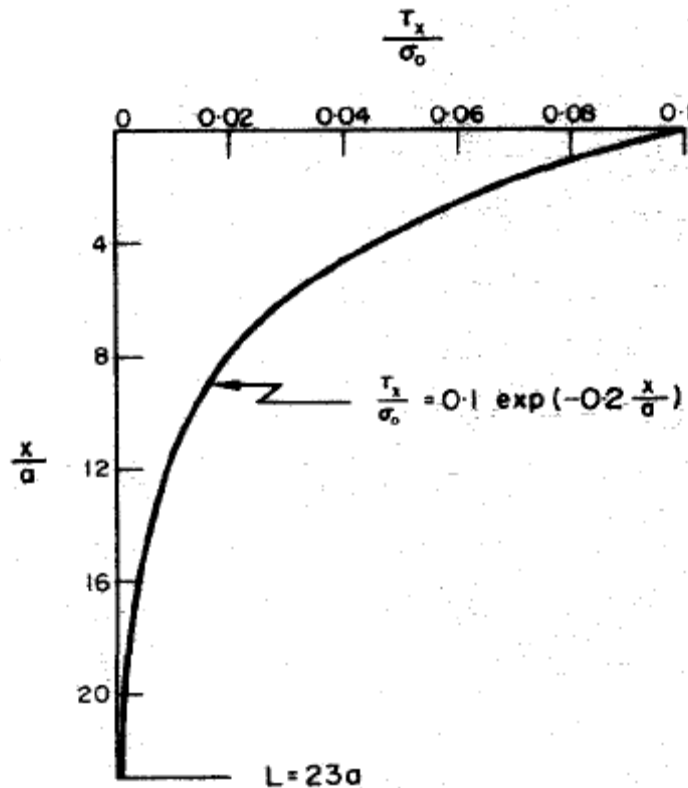


Fig. 2.31: Distribución teórica de esfuerzo de corte a lo largo de un anclaje en resina, en perforación rígida con anillo grouteado delgado $(R - a) < a$ (Farmer, 1975).

A continuación, como se mencionó anteriormente, se expone el desarrollo alternativo planteado por Moosavi et al. (2002). Luego de esto, se retornará al enfoque de Farmer (1975) mostrando resultados experimentales obtenidos en su investigación.

- **Desarrollo según Moosavi et al. (2002):**

Considerando que $\tau_x = F_s/A_a$, donde F_s es la fuerza de corte en la interfaz perno-grout y A_a el área transversal del perno. La Ec. 2.25 se transforma en:

$$\frac{d^2 u_x}{dx^2} = \frac{-F_s}{A_a E_a}$$

Ec. 2.41: Deformación axial en función de la fuerza de corte (Moosavi et al., 2002)

El término u_x de la Ec. 2.41 y la Fig. 2.31, es equivalente a ϵ_x en el análisis de Farmer (1975).

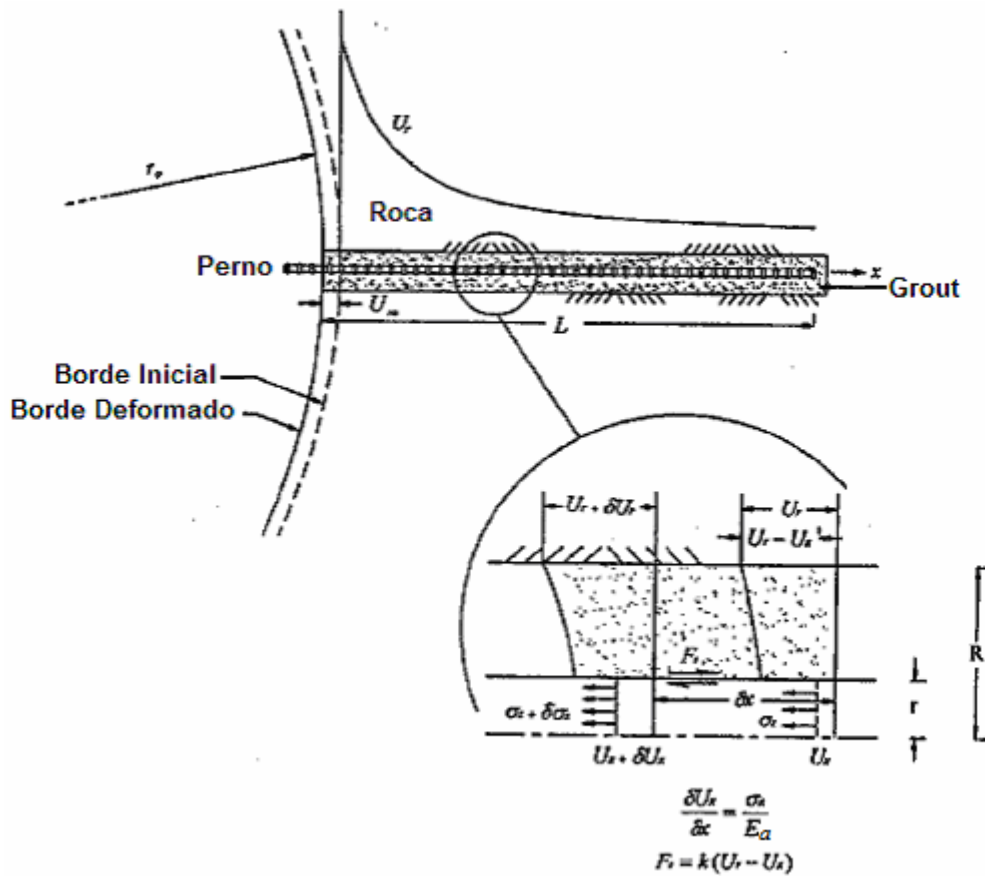


Fig. 2.32: Distribución de carga a lo largo de pernos completamente grouteados (Moosavi et al., 2002)

Asumiendo que la fuerza de corte debido al contacto por unidad de largo del perno es una función lineal de la deformación relativa entre el perno y la roca se obtiene:

$$F_s = k(u_r - u_x)$$

Ec. 2.42: Fuerza de corte debido al contacto por unidad de largo del perno como función lineal de la deformación relativa entre el perno y la roca (Moosavi et al., 2002).

Donde k es la rigidez al corte de la interfaz (grout) por unidad de largo, en N/mm². Cualquier función puede ser escogida para describir la distribución de u_r a lo largo del perno ($0 < x < L$). En general, u_r disminuirá con la distancia desde la superficie de la excavación. La forma y tasa de esta disminución dependerá del tamaño y forma de la perforación y de la resistencia y estructura del macizo rocoso. En la práctica de ingeniería, u_r puede ser determinado rutinariamente ya sea con un extensómetro o una cámara para perforaciones. Si se combinan la Ec. 2.41 y la Ec. 2.42, la distribución de desplazamiento a lo largo del perno es descrita por la siguiente ecuación no-homogénea de segundo orden:

$$\frac{d^2 u_x}{dx^2} - \frac{k}{A_a E_a} u_x = -\frac{k}{A_a E_a} u_r$$

Ec. 2.43: Ecuación diferencial (no-homogénea) para la deformación axial del perno grouteado

Aunque sería posible tratar analíticamente la resistencia de contacto no-lineal idealizada, como lo hizo Aydan (1989), se prefiere la versatilidad de una aproximación numérica. En el supuesto de que la distribución de desplazamiento dentro del perno varíe cuadráticamente, como en la Fig. 2.33, la Ec. 2.43 puede ser resuelta por un método típico de diferencias finitas (Hornbeck, 1975).

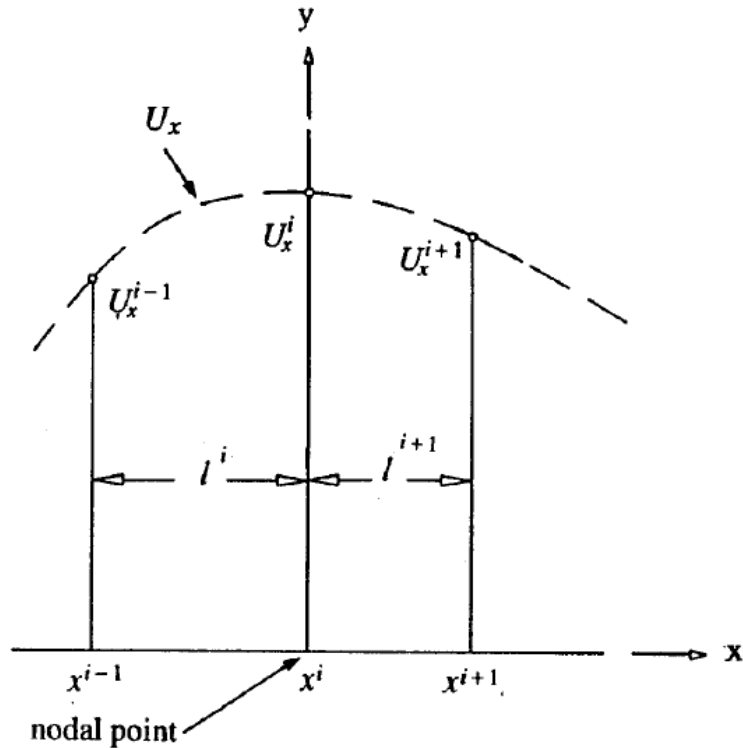


Fig. 2.33: Notación para formulación por método de diferencias finitas (Moosavi et al., 2002)

Con la finalidad de corroborar la teoría anteriormente expuesta, Farmer (1975) presenta una serie de resultados experimentales de ensayos en anclajes completamente grouteados con resina epóxica. Estos ensayos contemplaron las siguientes condiciones:

- Cada barra fue instrumentada con 6 o 7 strain gages de medición axial, equiespaciados.
- Grout: Resina epoxica llena de polvo de pizarra, premezclada y vertida en las perforaciones antes de insertar los pernos.
- Los agujeros fueron llenados hasta la superficie y la resina se dejó curar durante 24hrs antes del ensayo
- Durante los ensayos los anclajes fueron cargados contra una placa de sujeción de 300x300mm a una tasa de carga de 5KN/min
- La superficie fue monitoreada continuamente y las mediciones de deformación se realizaron a intervalos de 5 o 10KN

Tabla 2.3: Especificaciones de instalación de ensayos realizados en anclajes completamente grouteados en resina epóxica (Farmer, 1975).

Descripción ítem		Valor
Diámetro de las barras	(mm)	22
Diámetro de la perforación	(mm)	28
Largos de anclaje	(mm)	350 y 500

Los largos de anclaje especificados en la *Tabla 2.3*, caen dentro de los largos frecuentemente utilizados en investigaciones de este tipo. Según Hyett et al. (1992), la filosofía adoptada para la selección de los largos embebidos en pruebas de arranque de cables, es que son escogidos para representar espaciamientos de fracturas típicamente observados en minería (usualmente 250 a 300mm), por lo cual el largo embebido es 15 a 20 veces el diámetro del cable. Consecuentemente, cuando se analiza los resultados de ensayos y se interpreta el mecanismo de falla, las variaciones en esfuerzo de corte a lo largo del cable no pueden ser ignoradas.

Para establecer una estimación de la resistencia y confinamiento proporcionado por el grout en un anclaje, a continuación, en la *Tabla 2.4*, se muestran parámetros de resistencia derivados por Hyett et al. (1992), los cuales fueron obtenidos de ensayos de anclajes grouteados con cemento portland tipo 10. Como puede apreciarse, los parámetros obtenidos muestran ser significativamente menores a los observados típicamente en rocas, sin embargo, los parámetros de resistencia residual exhiben una mayor dependencia de la presión normal (de confinamiento).

Tabla 2.4: Propiedades mecánicas de materiales utilizados en ensayos realizados en anclajes completamente grouteados en resina epóxica (Hyett, 1992).

Razón Agua cemento	Resistencia peak		Resistencia Residual	
	Φ	c	Φ	c
w:c	(°)	(Mpa)	(°)	(Mpa)
0,32	27,0	18,91	41,0	3,07
0,40	22,6	15,55	40,8	2,39

La *Tabla 2.5* resume las propiedades y parámetros de resistencia de los ensayos efectuados por Farmer (1975).

Tabla 2.5: Propiedades mecánicas de materiales utilizados en ensayos realizados en anclajes completamente grouteados en resina epóxica (Farmer, 1975).

Material	E (KN/m ²)	Resistencia (KN/m ²)	Tipo resistencia
Perno de Acero	1,80x10 ⁸	5x10 ⁵	tracción
Resina Epoxica (24 horas)	2,25x10 ⁶	6000	tracción
		85000	corte
		160000	compresión
Concreto	20x10 ⁶	33000	compresión

Se presentan a continuación, tres tipos de figuras resultantes de los ensayos realizados por Farmer (1975):

- Curvas de carga-desplazamiento en el extremo del anclaje grouteado sin corregir por extensión del perno (esquina superior izquierda en *Fig. 2.34* y *Fig. 2.36*).
- Curvas de distribución de deformación a lo largo del perno para los distintos niveles de carga (*Fig. 2.34* y *Fig. 2.36*). En estas curvas se muestran la ubicación de los strain gages y el valor de deformación entregado por ellos.
- Curvas de distribución esfuerzo de corte deducido (*Fig. 2.35* y *Fig. 2.37*). El valor medio del esfuerzo de corte entre dos strain gages fue deducido según:

$$\tau_{1,2} = \frac{E_a}{a} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot 2l$$

Ec. 2.44: Esfuerzo de corte deducido.

Donde l es la separación entre strain gages.

Es importante recordar que aunque la distribución de esfuerzo-deformación representa el esfuerzo de corte en la interfaz perno-grout (resina), el anillo de grout en el presente caso es relativamente delgado, con $(R - a) = 0,4a$ (ver *Ec. 2.26*). Es entonces razonable asumir que el esfuerzo de corte deducido es representativo del esfuerzo distribuido en el anillo y, por ende, en la interfaz grout-roca.

En la *Fig. 2.34* se muestran las curvas de carga versus desplazamiento y distribución de deformación unitaria, obtenidas de un ensayo en anclaje de 500mm grouteado con resina, instalado en una perforación en concreto. La *Fig. 2.35* muestra el esfuerzo de corte teórico (ver *Ec. 2.44*) y el deducido de los resultados del ensayo (ver *Ec. 2.35*).

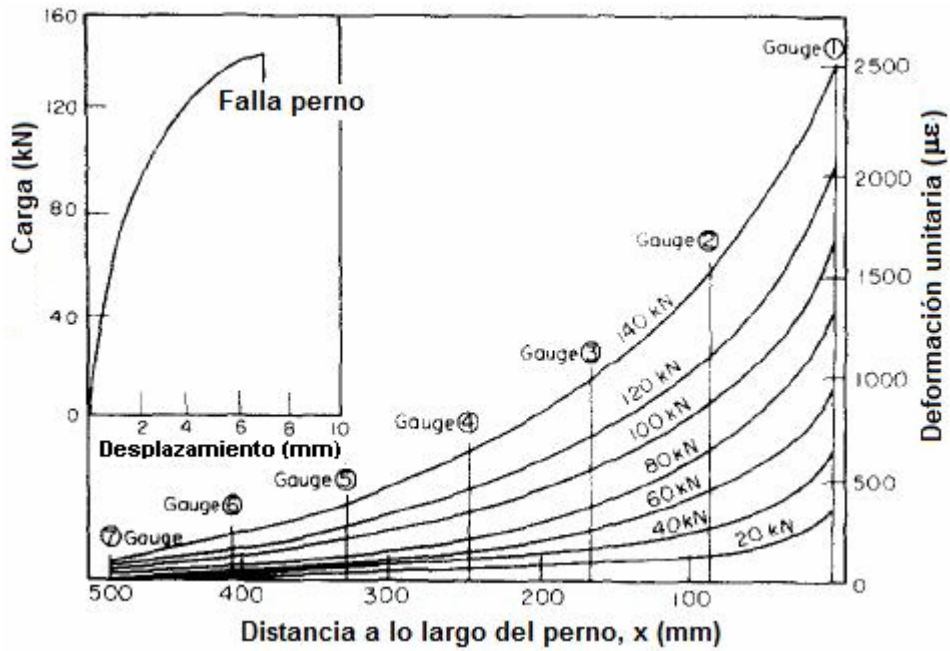


Fig. 2.34: Curva Carga-desplazamiento y Curvas de Distribución de Deformación a lo largo del perno. Largo anclaje = 500mm. (Farmer, 1975)

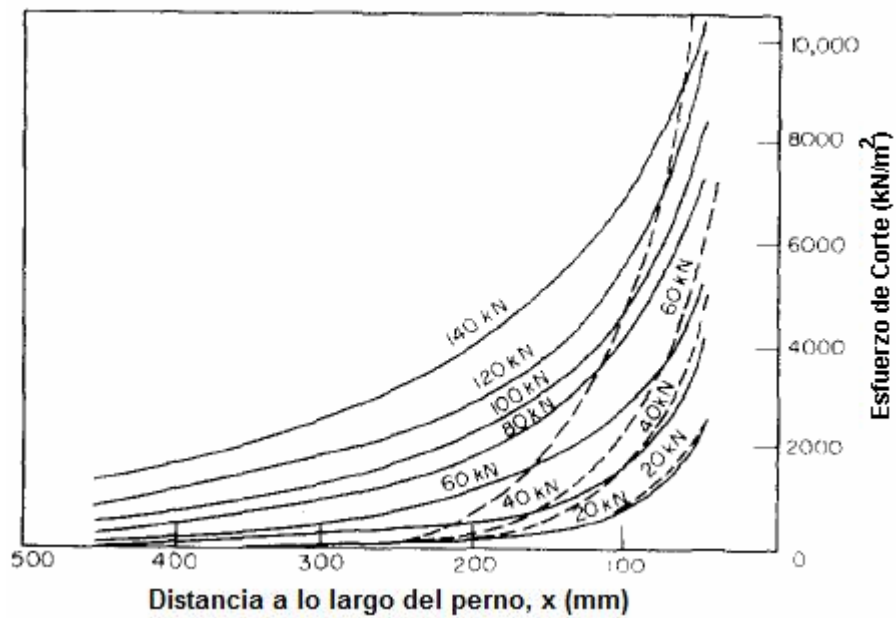


Fig. 2.35: Curvas de Distribución de Esfuerzo de Corte a lo largo del perno para cada nivel de carga. Línea continua: Esfuerzo de corte deducido (Ec. 2.44). Línea punteada: Esfuerzo de corte teórico (Ec. 2.35). Largo anclaje = 500mm. (Farmer, 1975)

La Fig. 2.36 muestra resultados del mismo tipo de ensayo mostrado en la Fig. 2.34, pero esta vez en un anclaje de 350mm de largo. De la misma forma, la Fig. 2.37 es análoga a la Fig. 2.35, para el nuevo largo considerado.

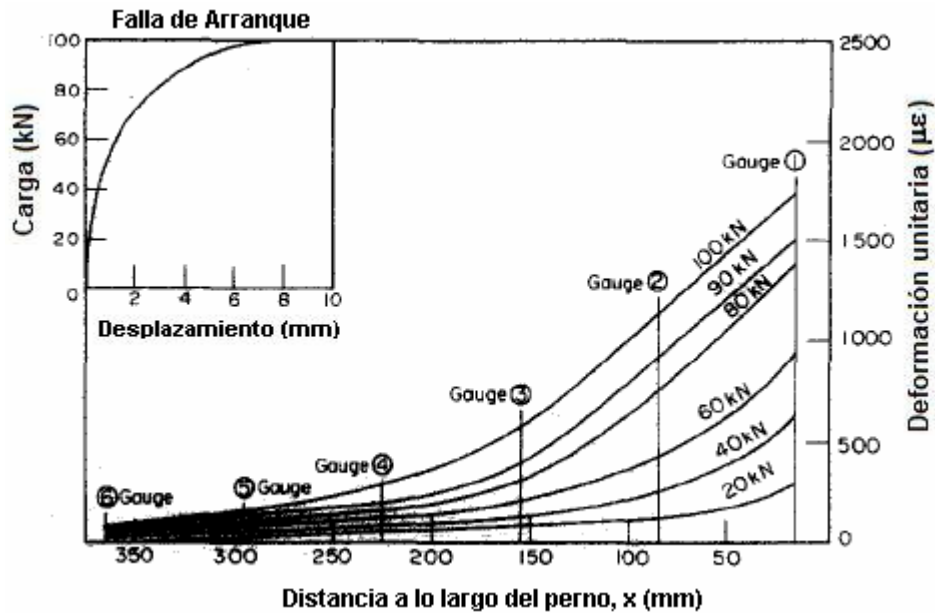


Fig. 2.36: Curva Carga-desplazamiento y Curvas de Distribución de Deformación a lo largo del perno; Largo anclaje = 350mm. (Farmer, 1975)

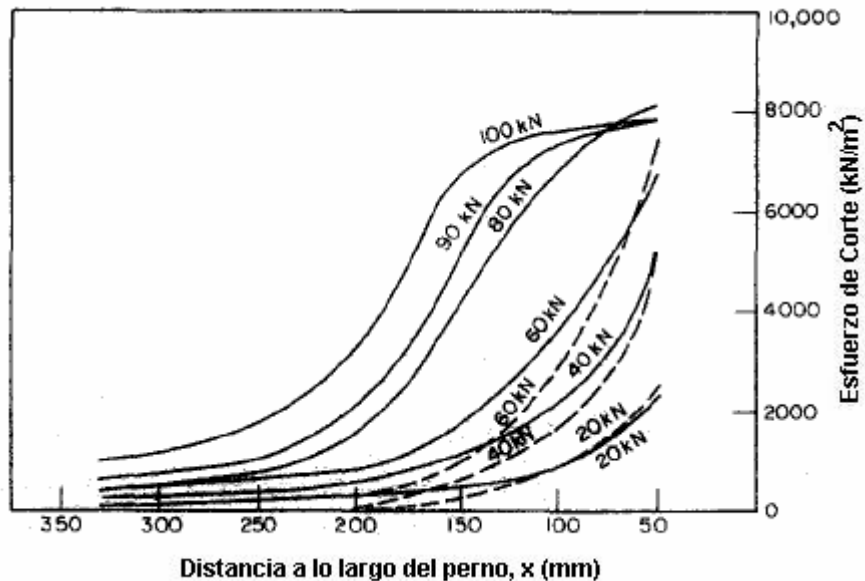


Fig. 2.37: Curvas de Distribución de Esfuerzo de Corte a lo largo del perno para cada nivel de carga. Línea continua: Esfuerzo de corte deducido (Ec. 2.44). Línea punteada: Esfuerzo de corte teórico. Largo anclaje = 350mm. (Farmer, 1975)

Los resultados presentados (Fig. 2.34 a Fig. 2.37) representan, cercanamente, las condiciones teóricas de borde de roca rígido asumidas en un principio. Los anclajes más

largos (*Fig. 2.34* y *Fig. 2.36*), fueron diseñados de tal forma que fallara el perno antes que ocurriera falla por arranque. Es interesante notar que, aunque la distribución experimental de esfuerzo de corte, a una fuerza de tracción de 20kN ($\sim 7 \times 10^4$ kN/m² de esfuerzo) es bastante cercana a la distribución teórica de esfuerzos, hay una diferencia sustancial entre estas a una fuerza de 40 kN, diferencia que aumenta al incrementar la fuerza aplicada. Es evidente entonces que, a esfuerzos altos, el largo completo del anclaje se despegó y la resistencia al arranque es largamente atribuible a un mayor nivel de fricción de la superficie. La no-linealidad de la curva carga-desplazamiento es ilustrativa de esto.

El estudio de Moosavi et al. (2002), que se basa en la teoría expuesta anteriormente, se enfoca en el efecto de fracturas internas en la roca sobre el comportamiento de cables de distintos tipos (ver *Fig. 2.38*). Si bien el sistema de anclaje con cables no corresponde al estudiado en la presente investigación, se incluye como referencia un resumen de los resultados obtenidos en el estudio mencionado, los cuales debieran ser similares a los resultados esperados para el caso de *pernos de acero helicoidales*, que son los utilizados en la presente investigación.

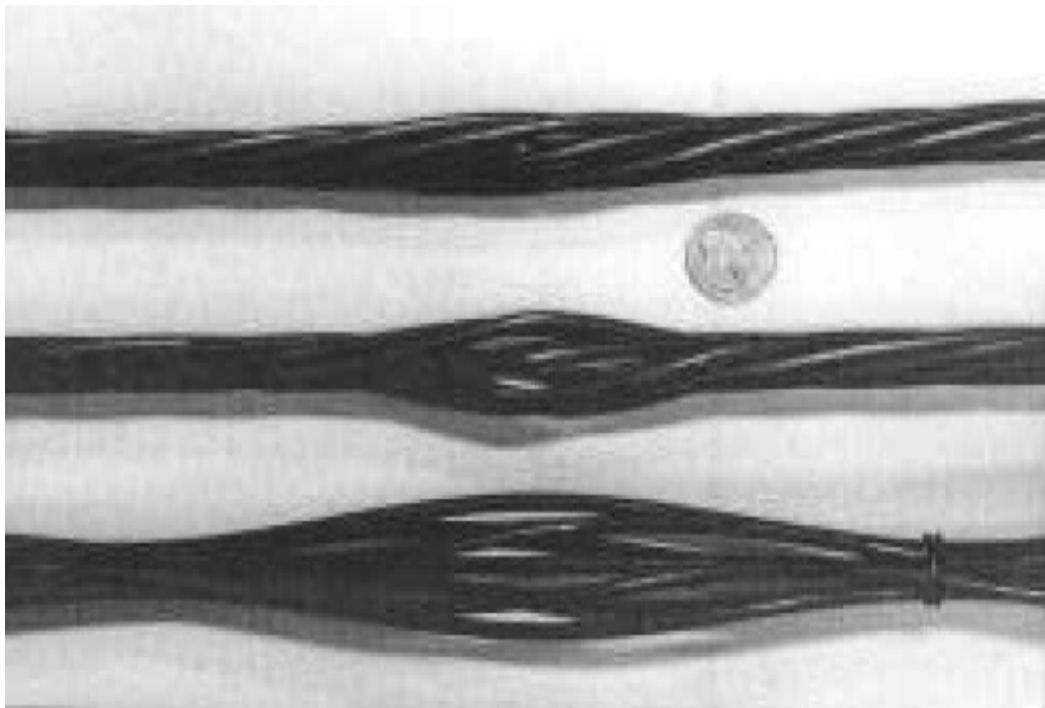


Fig. 2.38: Diferentes tipos de cables (desde arriba hacia abajo): Caja de nueces, bulbo Garford y Nido de pájaro. Utilizados en el estudio de Moosavi et al. (2002) (Windsor, 1992)

Moosavi et al. (2002), muestran que la máxima carga desarrollada ocurre en la ubicación de las discontinuidades o fracturas del medio donde se encuentran instalados

los anclajes (macizo rocoso). La *Fig. 2.39* muestra la distribución de carga en presencia de una discontinuidad de ancho u_{ro} en el punto medio del anclaje. Se presenta el resultado para el caso de un cable convencional (izquierda) y para un cable modificado (derecha). Las distintas curvas representan distintos valores para u_{ro} . Se observa que la carga desarrollada en el cable es máxima en la fractura y decrece al alejarse hacia ambos extremos libres del anclaje (ya que no hay placa de sujeción en el extremo de éste). La *Fig. 2.40* presenta el efecto en la distribución de carga en presencia de tres fracturas, donde el desplazamiento combinado es equivalente al de la fractura individual. El ancho de las fracturas disminuye hacia el interior del anclaje. En este caso se muestra sólo el resultado asociado al cable modificado. Nuevamente, el máximo desarrollo de carga ocurre en las discontinuidades, pero el nivel máximo es considerablemente menor que cuando el desplazamiento se concentra en una sola discontinuidad. Las distintas curvas representan distintos valores para u_{ro} . La *Fig. 2.41* muestra el resultado cuando existe un número mucho mayor de fracturas y, de esta forma, la distribución de deformación en la roca se puede asumir continua. Esta situación se simula usando un modelo numérico continuo para simular falla en un macizo rocoso fracturado, con un perfil de desplazamiento dado por $u_{ro}/(1+x)$, donde u_{ro} es el desplazamiento de la roca en la superficie libre y x es la distancia desde ésta hacia el interior del macizo rocoso. Nuevamente las distintas curvas representan el resultado para distintos valores del desplazamiento u_{ro} . Las tres simulaciones presentadas en estas figuras, indican que el desarrollo de carga en un cable depende críticamente del patrón de desplazamiento en la roca y, en particular, de si el desplazamiento está concentrado en una sola fractura o es más bien distribuido en muchas de ellas.

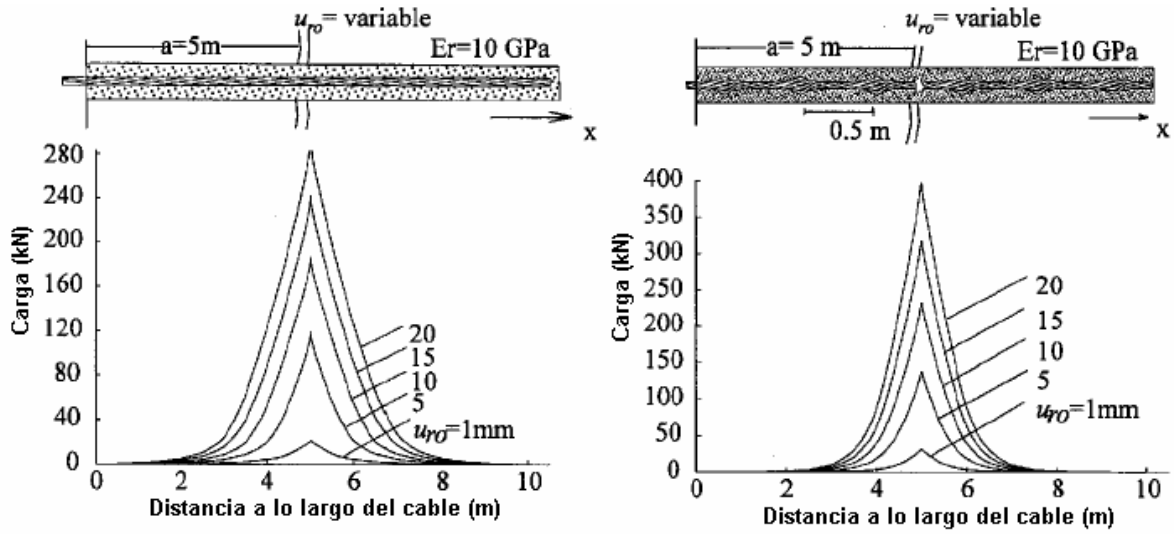


Fig. 2.39: Distribución de carga por desplazamientos del macizo rocoso debido a una discontinuidad de apertura u_{ro} variable. Izquierda: Cable convencional. Derecha: Cable modificado (Moosavi et al., 2002).

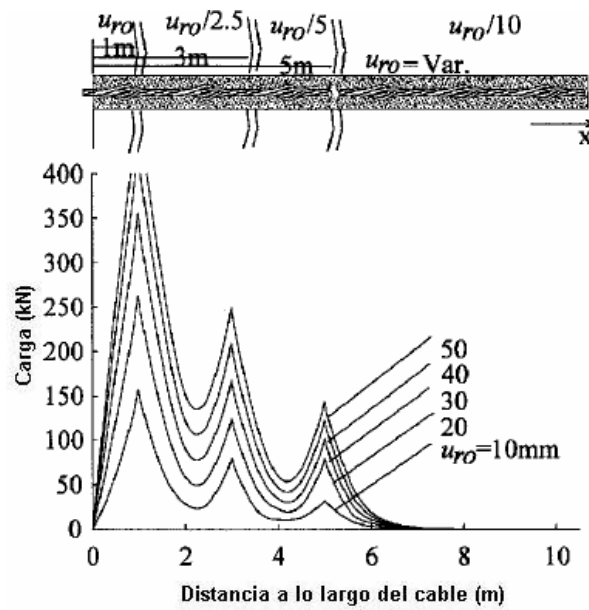


Fig. 2.40: Distribución de carga por desplazamientos del macizo rocoso debido a tres discontinuidades de apertura variable. Izquierda: Cable convencional. Derecha: Cable modificado (Moosavi et al., 2002).

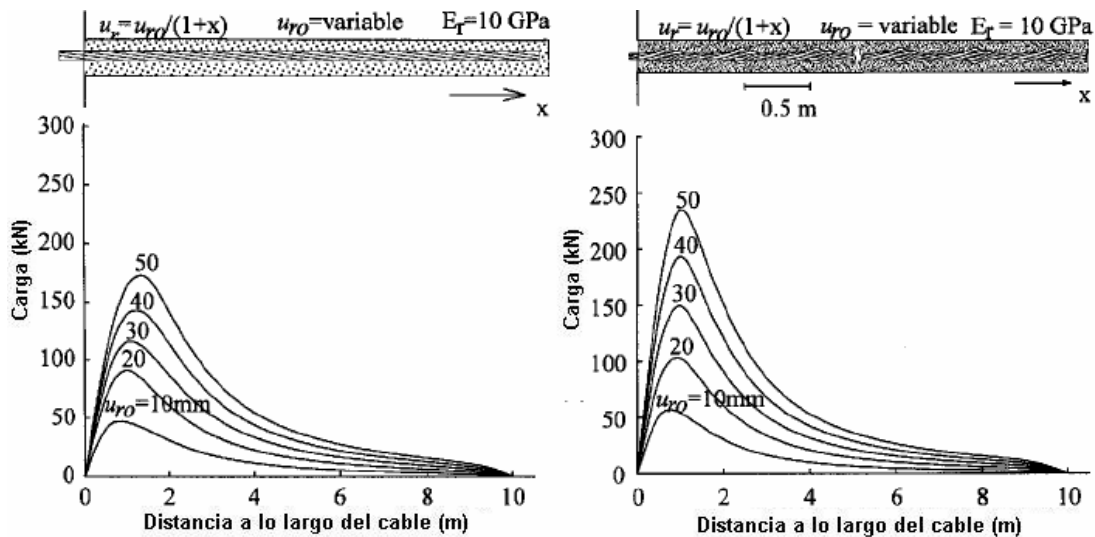


Fig. 2.41: Distribución de carga por desplazamientos del macizo rocoso debido a patrón de discontinuidades de apertura variable $u_r = u_{r0}/(1+x)$. Izquierda: Cable convencional. Derecha: Cable modificado (Moosavi et al., 2002).

Además, Moosavi et al. (2002) estudiaron el efecto de la instalación de placas de sujeción en el extremo del anclaje, como la mostrada en el esquema de la Fig. 2.29. A continuación se presenta el efecto de la instalación de una placa de sujeción en presencia de una fractura a una distancia “a” de la placa que decrece desde 5m hasta 1m. En la Fig. 2.42 se muestra el efecto sin incorporar una placa de sujeción en el anclaje, para el caso de un cable convencional (izquierda) y para un cable modificado (derecha). En este último tipo de cable, se distingue un caso A, donde el bulbo del cable se ubica entre la superficie libre y la fractura, y el caso B, donde no existe bulbo en esta ubicación. Como es de esperar, no existen grandes diferencias entre el cable convencional y el caso B del cable modificado. En la Fig. 2.43 se aprecian los resultados luego de la incorporación de una placa de sujeción. El estudio plantea que la placa es especialmente efectiva cuando la fractura está ubicada cerca de la superficie libre.

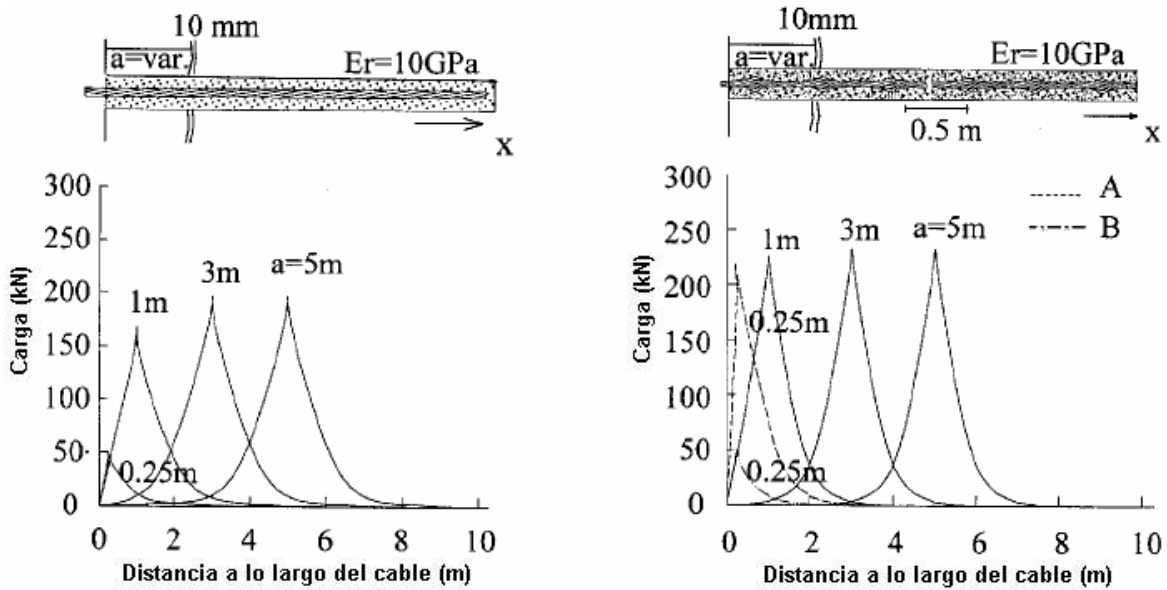


Fig. 2.42: Distribución de carga por desplazamientos del macizo rocoso debido a discontinuidad ubicada a distancia variable. Izquierda: Cable convencional. Derecha: Cable modificado (Moosavi et al., 2002).

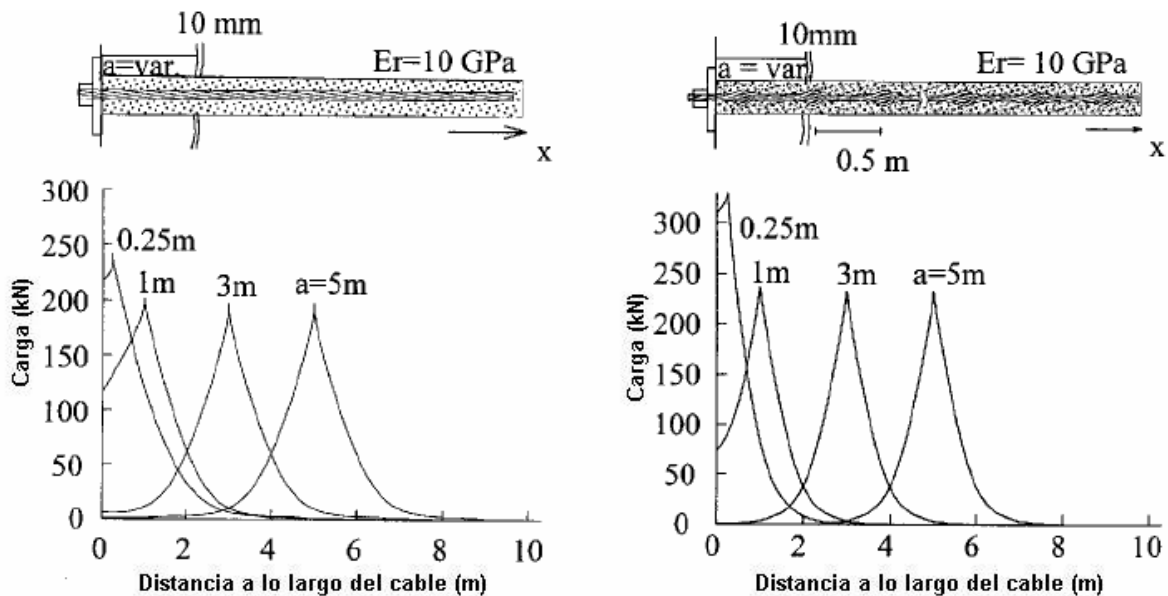


Fig. 2.43: Distribución de carga por desplazamientos del macizo rocoso debido a discontinuidad ubicada a distancia variable. Efecto de incorporación de placa de sujeción. Izquierda: Cable convencional. Derecha: Cable modificado (Moosavi et al., 2002).

Los resultados anteriormente expuestos, permiten definir modelos de interés en el estudio de anclajes actuantes como soporte en túneles de roca. Además, entregan una estimación del comportamiento esperado en los ensayos realizados para la presente

investigación. Se puede entonces tomar la experiencia de Farmer (1975) para estimar el comportamiento del modelo A de sollicitación (o falla) (ver *Fig. 2.28*). Los estudios de Moosavi et al. (2002), permiten definir los ensayos que aproximan el modelo B de sollicitación (ver *Fig. 2.28*) los cuales, son ensayos a tracción pura, como se mencionó anteriormente.

2.6. Aplicación en Mina Subterránea El Teniente, sector Reservas Norte (RENO)

La presente investigación, tiene como objetivo final la aplicación de la tecnología BOTDR en la mina subterránea El Teniente, propiedad de CODELCO Chile, División El Teniente. El sector particular donde se instalará corresponde a Reservas Norte (RENO), el cual se caracteriza por ser una zona sísmica (sismicidad inducida por la actividad minera) y por estar compuesto por roca de origen primario (Benado D., comunicación privada, 2009). Esta roca es en su mayoría andesita, y se la ha denominado *Complejo Máfico El Teniente* (CMET), por su alta presencia en toda la mina. Cabe destacar además la presencia en el sector de la falla o estructura geológica N1, que está dentro de las estructuras más importantes reconocidas en El Teniente (CODELCO Chile, Div. El Teniente, 2008). Algunas propiedades geotécnicas y geomecánicas del macizo rocoso en el sector se adjuntan en las secciones a continuación, así como también planos y esquemas que permiten conocer la ubicación relativa del sector estudiado.

2.6.1. Características Geotécnicas y Geomecánicas El Teniente y Sector RENO

La *Tabla 2.6* resume las propiedades geotécnicas de la roca intacta de las principales unidades litológicas de El Teniente, describiéndose también la forma de obtenerlas.

Los principales ensayos realizados en probetas de rocas que componen el macizo rocoso de la mina El Teniente son: ensayos de resistencia, como por ejemplo la resistencia en compresión no confinada de la roca intacta (CUS) y resistencia en tracción de la roca intacta (TS); ensayos a la compresión triaxial, los que permiten definir los

parámetros del criterio de falla de Hoek & Brown, como resistencia en compresión no confinada de la roca intacta (σ_{ci}), resistencia en tracción de la roca intacta (σ_{tm}) y “m” y “s” que son parámetros del criterio de falla de Hoek & Brown, y también permiten definir los parámetros cohesión de la roca intacta (c) y el ángulo de fricción interna de la roca (Φ); evaluación de la deformabilidad, como módulo de Young estático y dinámico ($E_{e,d}$) y razón de Poisson estático y dinámico ($\nu_{e,d}$). Adicionalmente, se miden otras propiedades, como velocidad de propagación de la onda P y S, peso unitario y porosidad. Las propiedades geotécnicas que deben ser estimadas para el macizo rocoso son las mismas enumeradas para la roca intacta, las cuales deben ser escaladas al volumen del macizo rocoso.

Tabla 2.6: Propiedades Geotécnicas Roca Intacta en El Teniente (PND 2009, Informe Interno, Div. El Teniente, CODELCO CHILE).

Parámetros	Complejo Máfico primaria	Coef.var (%)	Pórfido Dacítico Primario	coef. var. (%)
E [GPa]	60	20	30	30
v	0.16	40	0.18	40
B [GPa]	29.4	30	15.6	35
G [GPa]	25.9	30	12.7	35
D [ton/m ³]	2.80	2	2.62	4
P [%]	4.40	32	3.00	17
UCS [MPa]	120	30	110	30
T_i [MPa]	14	25	12	20
E/UCS	500	25	273	30
UCS/ T_i	8.6	27	9.2	25
V_p [m/s]	6000	8	4800	6
V_s [m/s]	3200	9	2900	7
M_i	9.1	23	20.2	-
σ_{ci} [MPa]	118	10	112	-
σ_{ti} [MPa]	13	30	6	-
C [MPa]	23	15	19	-
Φ [°]	38	8	48	-

Donde: **E**: Módulo de Young. **v**: Razón de Poisson. **B**: Módulo de deformación volumétrica **G**: Módulo de corte **γ**: Densidad **π**: Porosidad **UCS**: Resistencia a la compresión **T_i**: Resistencia a la tracción **V_p**: Velocidad de onda P **V_s**: Velocidad de onda S **m_i**: Parámetro del criterio de falla de Hoek-Brown. **σ_{ci}**: Resistencia a la compresión según el criterio de falla de Hoek-Brown. **σ_{ti}**: Resistencia a la tracción según el criterio de falla de Hoek-Brown. **c**: Cohesión. **Φ**: Angulo de fricción interna.

La *Tabla 2.7* muestra el escalamiento del módulo de Young al macizo rocoso para el sector RENO.

Tabla 2.7: *Propiedades Módulo de Young para roca intacta y para macizo rocoso (Ei y Em) en sector RENO (PND 2009, Div. El Teniente, CODELCO CHILE)*

Sector	Litología	Ei [GPa]	Em [GPa]
RENO	CMET Hw	60	43
	CMET Fw	47	32
	Pórfido Diorítico	44	34
	Pórfido Dacítico	33	29

La *Tabla 2.8* resume la frecuencia de estructuras geológicas, diferenciadas en fallas (estructuras abiertas), vetillas blandas y vetillas duras.

Tabla 2.8: *Frecuencia de estructuras geológicas por metro para diferentes unidades litológicas (PND 2009, Div. El Teniente, CODELCO CHILE, 2008)*

Unidad Geotécnica	Frecuencias de Vetillas en Sondajes (por metro)		
	Fallas	Vetillas Blandas	Vetillas Duras
CMET ambiente HT	0,04	8,3	14,1
CMET ambiente HP	0,04	14,5	12,5
Pórfido Diorítico	0,09	3,7	8,28
Pórfido Dacítico	0,08	1,4	11,6

Con respecto a la caracterización de la falla N1, cabe mencionar que ésta posee orientación noroeste, desplazamiento en el rumbo y manteo subvertical. Además, en ella se presentan rellenos mineralógicos blandos de tipo hidrotermal tardío, tales como

Anhidrita, Carbonatos, Molibdenita, Clorita, Calcopirita, Yeso, Turmalina y Salbanda de falla. (CODELCO Chile, Div. El Teniente, 2008; Benado, D., 2004). A continuación en la *Tabla 2.9*, se presentan éstas y otras características relevantes.

Tabla 2.9: Características Relevantes Falla N1, (Benado, D., Informe Interno, 2004)

Nombre Estructura	Tipo	Clasificación	Dip/DipDir	Rumbo	Manteo	Mineralogía Principal ¹	Espesor (cm)	Espesor Promedio (cm)
Falla N1	FHT ²	Maestra	83/164	N74°E	83S	Cb-Anh-Sal-Tur-Ys	1 a 50	10

Adicionalmente, se muestran a continuación diagramas de concentraciones de polos de la falla N1 en el nivel de hundimiento³, sector RENO.

¹ Cb: Carbonato; Anh: Anhidrita; Ys: Yeso; Cpy: Calcopirita; Mo: Molibdenita; Sal: Salbanda; Ten: Tennantita

² FHT: Falla Hidrotermal Tardía

³ Nivel de Hundimiento: Nivel superior de una mina subterránea, construido para perforar y provocar el tronado y quebrado del macizo rocoso a extraer. Debajo de él se encuentran los niveles de producción y ventilación.

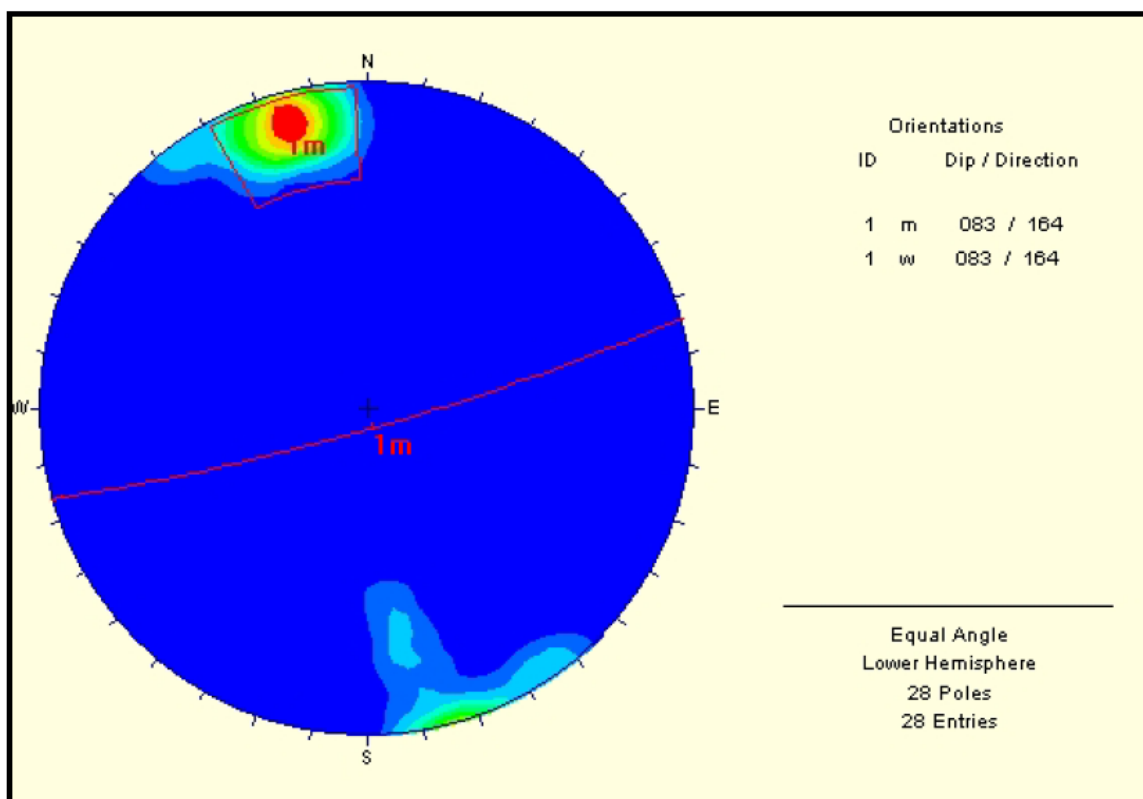
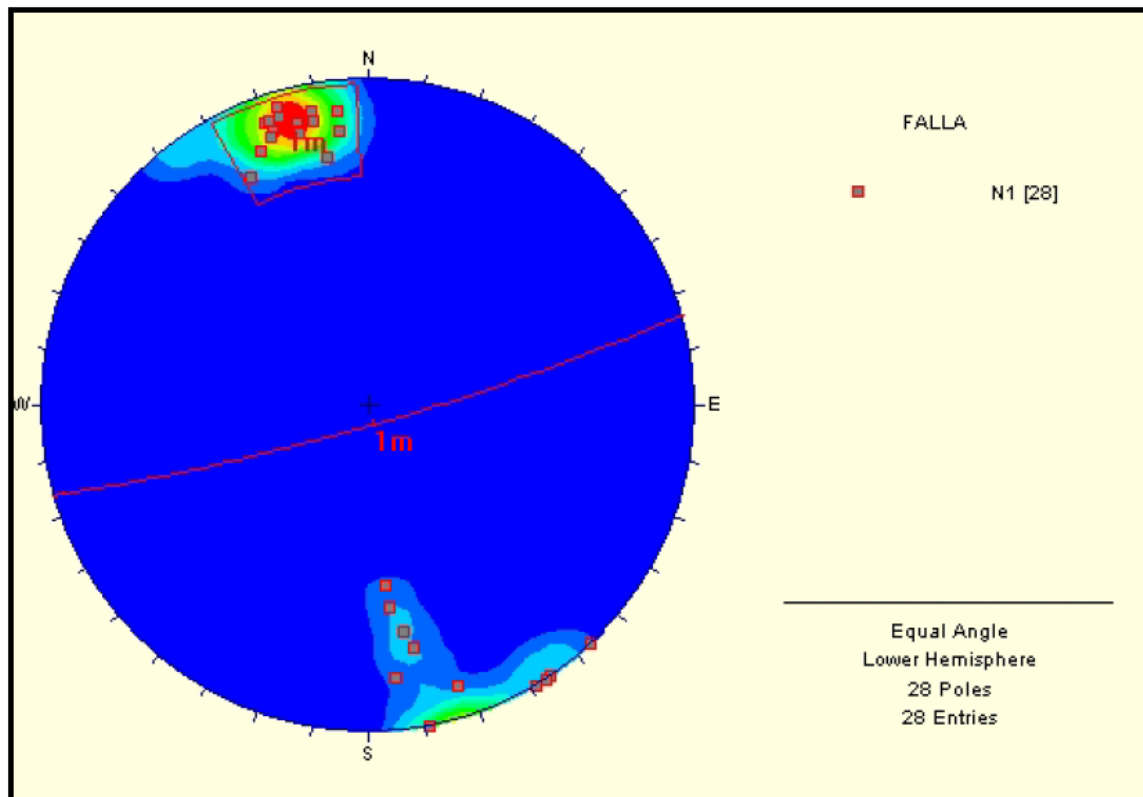


Fig. 2.44: Concentración de Polos Falla N1, nivel de hundimiento, sector RENO (Benado, D., 2004).

2.6.2. Detalle de Anclajes Instalados en Sector RENO.

En la *Tabla 2.10* y *Fig. 2.45* se detallan especificaciones de secuencia y geometría de instalación de los anclajes instrumentados con el sistema BOTDR, en el sector RENO de la mina subterránea El Teniente.

Tabla 2.10: Detalles de anclajes instalados en túneles de niveles hundimiento, producción y ventilación, sector RENO (MICOMO – CODELCO, 2008).

Ítem		Nivel Mina		
		Hundimiento	Producción	Ventilación
Largos de pernos en techo y laterales	(m)	2,3	2,3	2,9
Diámetro de las perforaciones	(mm)	45		

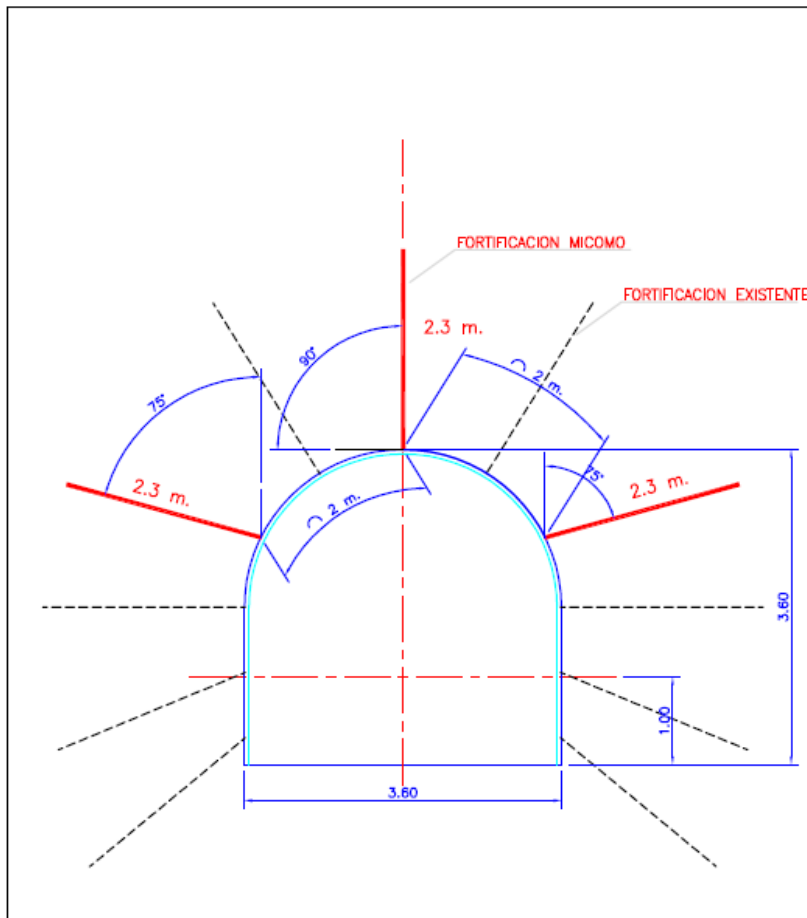


Fig. 2.45: DETALLE 1: sección calle 14 Nivel Hundimiento. Instalación típica fibra óptica BOTDR. Secciones intercaladas cada 15m; 6 secciones en 75m; 3 pernos por sección (MICOMO-CODELCO, 2008).

3. EQUIPOS UTILIZADOS

3.1. Equipos para Aplicación y Medición de Carga Axial

3.1.1. Cilindro, Bomba y Manguera Hidráulica Power Team®:

Los equipos para aplicación de carga, son utilizados para ensayar pernos de acero a tracción. Éstos incluyen (ver *Fig. 3.1*):

- Cilindro de carga a tracción, marca Power Team®, modelo RH306. Capacidad máxima 30Tonf; 6" de carrera, simple acción, con orificio central.
- Gato o bomba hidráulica, marca Power Team®, 2 veolcidades, capacidad máxima 10.000psi
- Manguera hidráulica de caucho, marca Power Team®, dimensiones:10'x1/4".



Fig. 3.1: Equipos de Aplicación de Carga: Bomba hidráulica, manguera hidráulica, Cilindro de Carga.

En la *Fig. 3.2* se muestra un esquema de instalación del sistema de aplicación de carga.

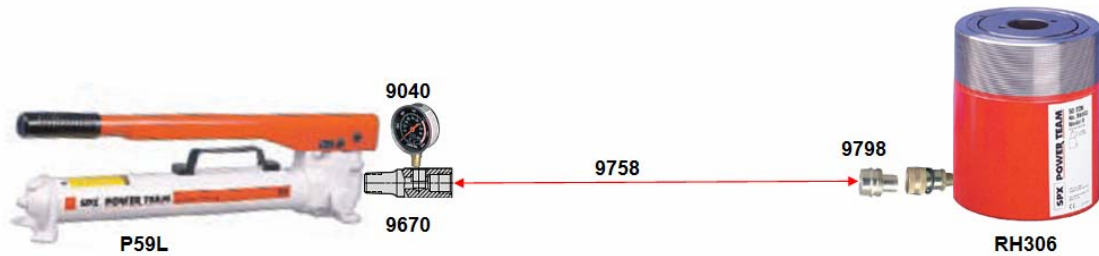


Fig. 3.2: Equipos de Aplicación de Carga. Cilindro de Carga a Tracción, Bomba Hidráulica y Manómetro.

3.2. Equipos y software para medición y adquisición de datos

3.2.1. Celda de carga (ver Fig. 3.3):

Aparato diseñado para medir cargas de hasta 30Tonf. Se conecta a un sistema de adquisición de datos que registra los valores en voltaje entregados por ésta, los que posteriormente se transforman en valores de carga según su calibración. Para este dispositivo, se estima un error de medición de $\pm 8\text{Kg}$ f. El detalle de esta estimación se verá más adelante.



Fig. 3.3: Celda de Carga

3.2.2. Field Point (adquisición de datos) (ver Fig. 3.4):

El sistema de adquisición de datos utilizado, permite obtener un muestreo continuo de las mediciones de strain gages (deformación) y celda de carga. El aparato portátil utilizado es el Compact FieldPoint® modelo cFP-1804, manufacturado por National Instruments®. Este equipo posee 32 canales de entrada con voltajes ajustables según los instrumentos a utilizar. Una característica principal es su movilidad, lo que permite mediciones en terreno en condiciones de ensayos similares a las utilizadas en laboratorio.



Fig. 3.4: Sistema de Adquisición de Datos Tipo Compact Field Point – NI®. Modelo cFP-1804.

A continuación se describen los módulos y componentes que integran el equipo Compact FieldPoint® con sus principales características:

- Bloque conector integrado para cablear a la E/S (NI cFP-CB-1):
 - Se monta al plano trasero en medio de los módulos de E/S
 - Facilidad de cableado con las terminales, con codificación en colores para conexiones de voltaje y conexiones comunes
 - Liberación de tensión y ranuras integradas para ataduras de cables
 - Se requiere un cFP-CB-1 para cada módulo de E/S Compact FieldPoint

- Módulo de entrada de voltaje analógica de 16 canales (NI cFP-AI-112):
 - Resolución de 16 bits, rechazo de ruido de 50/60 Hz
 - Rango de entrada y filtro configurable por software y canal
 - 16 entradas de voltaje
 - Operación HotPnP (plug-and-play)
 - Mide señales de 60mV a 10V, unipolares y bipolares

- Rango de operación de -40 a 70 °C
- Interfaz Ethernet/Serial para Compact FieldPoint® (NI cFP-1804):
 - Acceso a través de protocolos de comunicación estándares en la industria como Modbus y OPC
 - Software FieldPoint para acceso de E/S por medio de clic y arrastre a sistemas distribuidos
 - Hardware robusto para entornos industriales - 50 g de impacto, 5 g de vibración, -40 a 70 °C
 - Hasta 4 módulos Compact FieldPoint® por interfaz distribuida en red para Ethernet/Serial
 - Fácil de leer y escribir desde un servidor en red usando NI LabVIEW o cualquier cliente OPC
- Módulo de entrada analógica de strain gage de 8 canales (NI cFP-SG-140):
 - Resolución de 16 bits
 - Rango de operación de -40 a 70 °C
 - Mide strain gages instalados como puente completo o medio puente, celdas de carga, sensores de fuerza y sensores de par de torsión
 - Nivel de excitación (2.5, 5 o 10 V) y filtro configurable por software y canal
 - 8 canales de entrada
 - Operación HotPnP (plug-and-play)

La frecuencia máxima de adquisición de datos que alcanza el módulo de strain gages del equipo Compact FieldPoint®, es de 1.1Hz cuando los 8 canales disponibles se encuentran funcionando simultáneamente. En el caso del presente estudio, se utilizaron generalmente 3 canales, por lo cual, la frecuencia máxima de muestreo fue de 3Hz aproximadamente.

3.2.3. Software LabView® de National Instruments®:

El software LabView® de National Instruments®, permite rescatar y almacenar los datos medidos con el equipo Compact FieldPoint®. La interfaz del software permite ajustar la frecuencia de adquisición de datos hasta una capacidad máxima de 1000Hz. Para este trabajo se fija en 1Hz.

3.2.4. Analizador BOTDR ADVANTEST® desarrollado por Nipon Telegraph and Telephone®, Software N8510® y Computador Dell®:

El analizador ADVANTEST® manufacturado por NTT, como fue descrito anteriormente, permite enviar el pulso de luz a través de la fibra óptica y recibir la luz retro-dispersada en ella. Además, se utiliza un computador marca DELL® de gran capacidad para el almacenamiento de de datos, además del software N8510® también descrito anteriormente (ver Fig. 3.5).

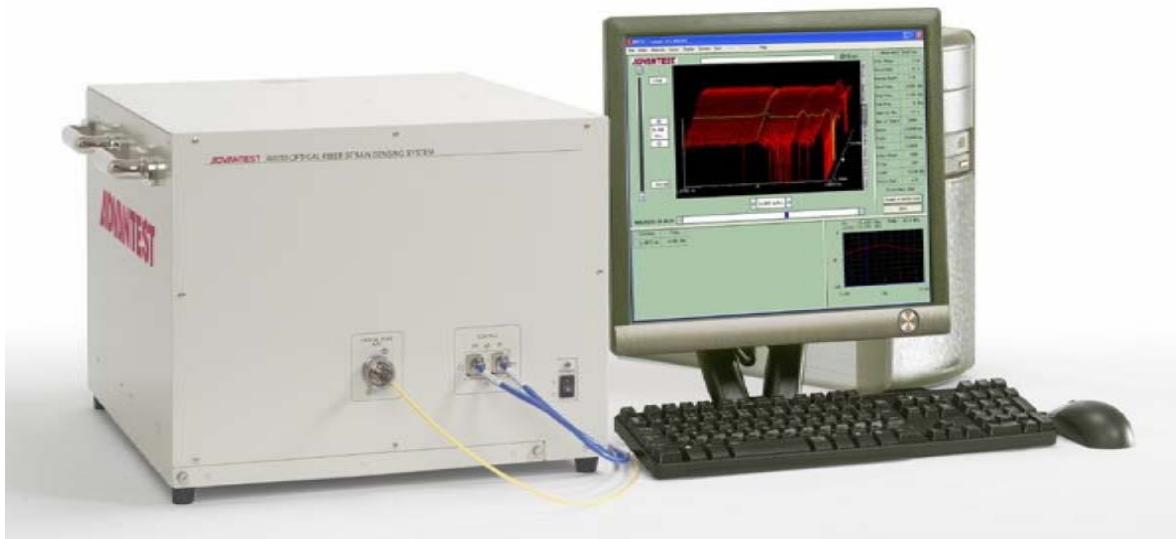


Fig. 3.5: Sistema BOTDR: A la izquierda, analizador-generador de pulso de luz. A la derecha, computador con software para visualizar los datos entregados (NTT, 2007).

3.2.5. Dispositivo para fusionar fibra óptica

Permitió realizar las fusiones necesarias para unir distintos tipos de fibra óptica. Actúa mediante un proceso de fusión al arco. Además de realizar la fusión de una o varias hebras en distintos tipos de fibra óptica, permite fabricar una protección plástica rígida a la zona fusionada, como se muestra más adelante.



Fig. 3.6: Dispositivo para fusionar Fibra óptica, modelo FSM-17R fabricado por Fujikura®.

La Fig. 3.7 muestra el dispositivo durante su funcionamiento, efectuando una fusión entre 2 tipos de fibra óptica. Este es un proceso de fusión al arco (denominado así por el proceso físico involucrado), el cual logra alcanzar temperaturas superiores a los 2000°C, permitiendo una disminución de la viscosidad de la sílica vítrea, que compone la fibra óptica, a unos 10^5 Poise (Yablon A., 2005).



Fig. 3.7: Proceso de Fusión al Arco en dispositivo modelo FSM-17R fabricado por Fujikura®.

3.2.6. Manómetro Análogo

Para los ensayos en terreno, se utilizó un manómetro análogo de capacidad máxima 10.000psi, el cual fue instalado junto a la bomba hidráulica (ver Fig. 3.8).



Fig. 3.8: Manómetro hidráulico análogo Power Team®, diámetro 3/8", capacidad 10.000psi.

3.2.7. Termómetro portátil

Este aparato fue requerido en etapas preeliminares, considerando los antecedentes que indican que la fibra óptica sensora es afectada por cambios en la temperatura (ver Fig. 3.9).



Fig. 3.9: Termómetro E-Sun[®], modelo ETP101.

3.3. Dispositivos de medición de deformación

A continuación, se describen los dispositivos utilizados específicamente para la medición de deformación tanto en ensayos de calibración en laboratorio, como de ensayos en terreno. Es importante además, la estimación de errores de medición provenientes de los equipos involucrados en el proceso. Estos errores pueden estimarse en forma teórica, analizando las variables involucradas en la deducción de algún parámetro estudiado o también pueden ser verificados con mediciones controladas. En esta sección se exponen los errores de fábrica para los dispositivos

3.3.1. Extensómetro

Durante los ensayos de calibración, se utilizó un extensómetro de calibración certificada. Este dispositivo se muestra en la *Fig. 3.10*. Su funcionamiento consiste en 2 brazos metálicos ajustables, que se abren o cierran según la deformación del objeto en el cual se haya instalado. El principio físico involucrado es similar al de un strain gage, donde el cambio en las propiedades físicas de una resistencia, debido a la deformación aplicada, se traduce en un cambio en voltaje. Este voltaje es posteriormente transformado en deformación unitaria según una calibración conocida. La precisión de este instrumento es de un 0,06% de la escala completa de medición, según certificación.



Fig. 3.10: Extensómetro Epsilon®, modelo 3542.

Tabla 3.1: Especificaciones Extensómetro Epsilon Modelo 3542

Ancho de medición [mm]	50
Desplazamiento (en tracción) [mm]	+10,0
Desplazamiento (en compresión) [mm]	-10,0

3.3.2. Diales

Los diales¹ fueron utilizados para medir desplazamiento en los ensayos de calibración de fibra óptica. Su medición fue transformada en deformación unitaria al dividirla por el largo total de fibra deformada. En la *Fig. 3.11* se aprecia la instalación experimental típica de los dos diales usados y en la *Tabla 3.2* se presentan sus características.



Fig. 3.11: Diales Mitutoyo[®], modelo 3062S-19.

Tabla 3.2: Especificaciones Diales Mitutoyo[®], modelo 3062S-19.

Graduación	Rango total	Rango por cada vuelta	Precisión	Modelo
0,01mm	100mm	1mm	$\pm 0,05\text{mm}$	3062S-19

¹ En Chile se les conoce también como “relojes comparadores”.

3.3.3. Strain gages

Estos dispositivos fueron utilizados durante la investigación, tanto en ensayos preliminares, como durante ensayos en terreno. A grandes rasgos, los strain gages (ver *Fig. 3.9*) son resistencias que al cambiar sus dimensiones, debido a la deformación aplicada, entregan un cambio en el voltaje transmitido. Este voltaje es convertido a deformación unitaria mediante una calibración conocida, obtenida al contrastar resultados con los de un extensómetro calibrado.

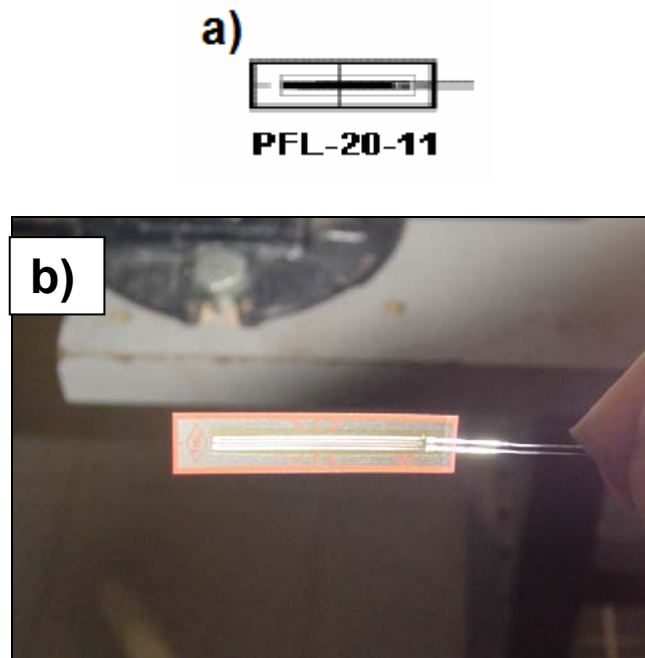


Fig. 3.12: Strain Gage modelo PFL-20-11 fabricado por TML[®]. **a):** Esquema **b):** Imagen real.

Para que los strain gages actúen como sensores de deformación, son conectados formando un *Puente de Wheatstone*¹, cuyo principio físico permite la medición de una resistencia desconocida y sus propiedades, utilizando una fuente de voltaje y resistencias conectadas en un circuito cerrado, de valores conocidos.

¹ Un **puente de Wheatstone** es un circuito de balanceo de cuatro brazos, teniendo resistencias en cada uno y usado para medir una resistencia desconocida en términos de una resistencia estándar. El dispositivo fue popularizado, pero no inventado, por Sir Charles Wheatstone (Stan Gibilisco, 2001; Oxford University Press, 2005)

El *Puente de Wheatstone* (su versión genérica), se ilustra en la *Fig. 3.13*. Éste consiste en cuatro brazos resistivos con un voltaje de excitación, V_{EX} , que es aplicado a través del puente (National Instruments).

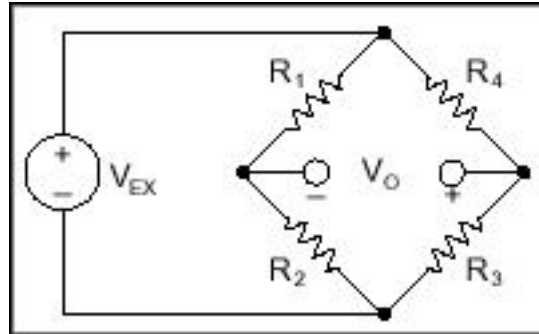


Fig. 3.13: Configuración del puente de Wheatstone (National Instruments)

El voltaje de salida del puente, V_o , es igual a:

$$V_o = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \cdot V_{EX}$$

Ec. 3.1: Voltaje de salida en puente de wheatstone (National Instruments)

De esta ecuación, se aprecia que cuando $R_1/R_2 = R_4/R_3$, el voltaje de salida, V_o , es cero. Bajo estas condiciones, se dice que el puente está balanceado. Cualquier cambio en la resistencia de cualquiera de los brazos del puente resultará en un voltaje de salida diferente de cero. Por tanto, si se reemplaza R_4 en la *Fig. 3.13* por un strain gage, cualquier cambio en la resistencia de este sensor desbalancea el puente y produce un voltaje de salida diferente de cero. Si la resistencia nominal del strain gage se designa por R_G , entonces el cambio inducido por la deformación en la resistencia, se puede expresar como:

$$\Delta R = R_G \cdot GF \cdot \varepsilon$$

Ec. 3.2: Cambio en una resistencia o strain gage debido a la deformación aplicada (National Instruments)

En la *Ec. 3.2*, el término GF , es el *gage factor* o factor del sensor, que define la sensibilidad de un strain gage. Más adelante, se indica el valor de GF para los strain

gages utilizados en la presente investigación. Asumiendo que $R_1 = R_2$ y $R_3 = R_G$, la ecuación previa del puente se puede reescribir para expresar V_o/V_{EX} como una función de la tensión (ver Ec. 3.3). La presencia del término $\frac{1}{\left(1 + GF \cdot \frac{\varepsilon}{2}\right)}$, indica la no linealidad de la

salida en un cuarto de puente con respecto a la deformación (National Instruments).

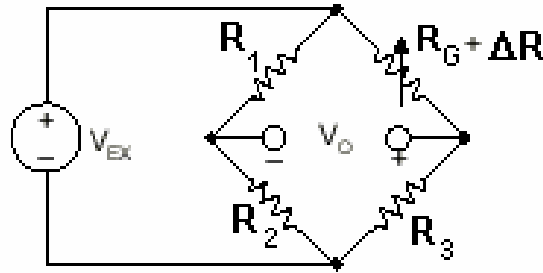


Fig. 3.14: Circuito de cuarto de puente (National Instruments).

$$\frac{V_o}{V_{EX}} = -\frac{GF \cdot \varepsilon}{4} \left(\frac{1}{1 + GF \cdot \frac{\varepsilon}{2}} \right)$$

Ec. 3.3: Razón de voltajes de salida y entrada en configuración de cuarto de puente (National Instruments).

Es posible duplicar la sensibilidad del puente a la deformación aplicada haciendo que existan dos resistencias activas, en una configuración de medio puente, sometidas a la misma deformación (ver Fig. 3.15). Esta configuración produce un voltaje de salida que es lineal y aproximadamente el doble de la salida del circuito de un cuarto de puente (ver Ec. 3.4)

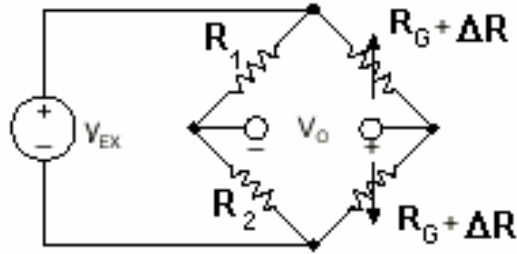


Fig. 3.15: Circuito de medio puente (National Instruments).

$$\frac{V_o}{V_{EX}} = -\frac{GF \cdot \varepsilon}{2}$$

Ec. 3.4: Razón de voltajes de salida y entrada en configuración de medio puente (National Instruments).

El sistema de adquisición de datos *Compact FieldPoint*[®], permite ajustar su funcionamiento para distintas configuraciones de puentes de wheatstone, utilizando resistencias internas. En la presente investigación, fueron utilizadas configuraciones de cuarto puente modificadas, incorporando dos resistencias para completar el puente, una de ellas inactiva (resistencia *dummy*), de 120Ohm, y otra activa, correspondiente al strain gage, de resistencia inicial equivalente a la *dummy*. Las otras dos resistencias las aportó el dispositivo *Compact FieldPoint*[®] al escoger mediante el software controlador, la configuración respectiva.

Para determinar el error de medición de los strain gages, se efectuó tanto un análisis teórico como experimental, donde se consideró finalmente, el mayor valor de error encontrado. A continuación se muestra la deducción teórica del error de medición y, más adelante, en el capítulo de resultados de ensayos preliminares, se expone el análisis del error experimental, donde finalmente, es este último el valor escogido como error del instrumento por tener un valor mayor. Si se modifica la Ec. 3.3, despreciando el término del paréntesis por ser muy cercano a 1, y luego despejando en ésta la deformación unitaria ε , resulta:

$$\varepsilon = -\frac{4 \cdot V_o}{V_{EX} \cdot GF}$$

Ec. 3.5: Deducción de la deformación unitaria a partir del voltaje medido por el strain gage

Luego, haciendo un análisis de propagación de error sobre esta ecuación, se obtiene la siguiente expresión:

$$\varepsilon = -\frac{4 \cdot V_o}{V_{EX} \cdot GF} \pm \left(\frac{4 \cdot V_o}{V_{EX} \cdot GF} \cdot \frac{e(GF)}{GF} \right)$$

Ec. 3.6: Propagación del error

Donde:

- V_o : Voltaje de salida
- V_{EX} : Voltaje de excitación del puente
- ε : Deformación unitaria
- GF : Gage Factor
- $e(GF)$: Error asociado al Gage Factor (entregado por el fabricante)

Entonces, se tiene que $\frac{e(GF)}{GF} = \frac{0,01}{2,12} \approx 0,005$ lo que equivale a decir que el error

asociado es de un 0,5% del valor de strain medido. Si se toma en cuenta el nivel de deformaciones máximas esperadas, se puede concluir que el error teórico no supera aquel que se obtiene a un nivel de deformación de 2% (muy superior a los niveles alcanzados en los ensayos, como se verá en el capítulo 5), lo que entrega un valor de $\pm 0,01\%$.

Más adelante, se muestra un análisis efectuado sobre las mediciones de strain gages de ensayos realizados en terreno. El resultado de este procedimiento, entrega un error experimental del orden de $\pm 0,01\%$, coincidiendo con el valor teórico asociado a una deformación unitaria de 2%.

A continuación, en la *Tabla 3.3* y la *Tabla 3.4* se presentan otras características y propiedades relevantes de strain gages.

Tabla 3.3: Especificaciones técnicas de Strain Gages utilizados en la investigación (TML)

Principales Materiales de Testeo Compatibles	Metal, Mortero.
Temperatura de Operación	-20 a +80°C
Rango de Compensación	+10 a +80°C
Adhesivo para Instalación	Cianocrilato
Material de Estampilla	Poliéster
Material de Elementos	Lámina de aleación Cu-Ni
Límite de Deformación	2%
Vida Útil (fatiga) a temperatura ambiente (<i>room T°</i>)	1×10^6 ($\pm 1500 \times 10^{-6}$)
Coefficiente de Expansión Térmica	$11,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Coefficiente de Temperatura de Factor de Sensor (Gage Factor)	+0,1 \pm 0,5 %/10°C

Tabla 3.4: Especificaciones técnicas de Strain Gages utilizados en la investigación (TML)

Modelo	Factor de Sensor (Gage Factor)	Largo Sensor	Ancho Sensor	Largo Estampilla	Ancho Estampilla	Resistencia Ω
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
PFL-20-11	2,12 \pm 1%	20	1,2	28	6	120

3.3.4. Fibras Ópticas Utilizadas:

En las figuras a continuación se muestran las distintas fibras ópticas utilizadas durante la presente investigación, las cuales pueden ser sensoras (se les aplica deformación) y no-sensoras (no se utilizan para medir deformación). La Fig. 3.16 muestra el carrete que porta la fibra óptica embossing sin uso.



Fig. 3.16: Carrete Fibra Óptica Tipo Embossing Surface.

En la *Fig. 3.17* se aprecia el interior de la fibra al remover su primera capa plástica protectora. La *Fig. 3.18* muestra el procedimiento para remover la segunda capa protectora.



Fig. 3.17: Fibra Óptica Sensora Tipo Embossing Surface.



Fig. 3.18: Procedimiento de desenvoltura Fibra Óptica Sensora Tipo Embossing Surface (NTT, 2007).

La Fig. 3.19 muestra la fibra no-sensora utilizada para efectuar la conexión con el analizador BOTDR.



Fig. 3.19: Fibra de conexión de entrada al analizador (no-sensora).

La Fig. 3.20 muestra la fibra de acercamiento no-sensora, la cual se une a un extremo con la fibra de conexión al analizador BOTDR (ver Fig. 3.21), y en el otro, con la fibra sensora embosing (ver Fig. 3.22) mediante fusión de fibras.



Fig. 3.20: Fibra de acercamiento (no-sensora).



Fig. 3.21: Unión de fibras no-sensoras mediante simple ensamblaje. Izquierda: fibra de conexión de entrada al analizador. Derecha: fibra de acercamiento



Fig. 3.22: Fusión fibra de acercamiento con fibra sensora embossing, mediante fusión al arco (ver Fig. 3.7)

La Fig. 3.23 muestra el sistema de fibras requerido en forma general para cada ensayo.



Fig. 3.23: Sistema de fibras típico. Izquierda: fibra de conexión de entrada al analizador. Al medio: fibra de acercamiento. Derecha: fibra sensora embossing.

4. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

4.1. Materiales Utilizados

A continuación se describen los materiales utilizados durante la presente investigación, indicando además sus propiedades y características principales.

4.1.1. Pernos de Acero tipo SafeRock®

En la *Fig. 4.1* se muestra un esquema del perno o barra de acero helicoidal tipo Saferock®, con el que se construyen los anclajes estudiados durante la investigación. Este perno posee ciertas características que lo distinguen de las barras de refuerzo típicas utilizadas en estructuras de hormigón armado; en particular la forma de su hilo, que permite la instalación de una tuerca de sujeción ajustable, como se mostró anteriormente. En la *Tabla 4.1* se indican sus propiedades mecánicas mínimas, para los dos grados de acero utilizados durante la investigación. El grado utilizado mayoritariamente correspondió al A440-280H, el cual coincide con el comúnmente utilizado en los anclajes de la mina El Teniente. La *Tabla 4.2* muestra las dimensiones nominales del perno.



Fig. 4.1: Perno de Acero Saferock (Gerdau AZA®)

Tabla 4.1: Propiedades Mecánicas Mínimas (Gerdau AZA®)

Grado del Acero	Resistencia a la Tracción Fu		Límite de Fluencia Fy		Alargamiento
	Mpa	Kgf/cm ²	Mpa	Kgf/cm ²	%
A440-280H	440	4490	280	2860	16
A630-420H ¹	630	6420	420-580	4280	7000/Fu-K* ≥ 8
Norma de Referencia: NCh204 Of.2006					
*K=1 para diámetro nominal de 22mm					

Tabla 4.2: Dimensiones Nominales (Gerdau AZA®)

Diámetro Normal	Masa	Paso del Hilo, p	Ancho Máximo (H)	Núcleo Máximo (N)
mm	Kgf/m	mm	mm	mm
22	2,85	11,09	24,6	21,4

La *Tabla 4.3* muestra la descripción y propiedades de las tuercas y placas de sujeción utilizadas en la instalación de anclajes.

Tabla 4.3: Dimensiones y propiedades nominales de placas y tuercas de sujeción (DSI – Soprofin[®], sitio electrónico)

Materiales	Descripción	Calidad
Placas de sujeción	200x200x5mm (Acero)	A42-27ES
Tuerca de sujeción	Φ22 (Acero)	ASTM A536

4.1.2. Hormigón:

Se confeccionó en terreno una losa de hormigón armado para representar, en forma aproximada, roca *in situ*; utilizando el mismo tipo de perforaciones e instrumentación a ser aplicado posteriormente en túneles de la mina El Teniente.

¹ Grado utilizado en ensayos tipo AH.

El diseño de la losa de hormigón armado consideró las cargas a las cuales serían sometidos los pernos de anclaje de modo de evitar rotura de la losa y permitir mediciones de deformación en la interfaz perno-losa y perforación-losa. Para su confección se utilizó hormigón H30.

En las Fig. 4.2 y Fig. 4.3, se muestran esquemas de la losa diseñada y la armadura necesaria para este efecto. Este diseño fue realizado por la División de Estructuras-Construcción-Geotecnia, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Además de indicar los modelos que intentan representar las perforaciones en la losa, se incluye el tipo (ó código) de ensayo, con siglas B, AH, AR y AG. Estos códigos se explican más adelante en el capítulo de programa de investigación.

La Tabla 4.4 muestra los materiales utilizados en la confección de la losa y sus propiedades.

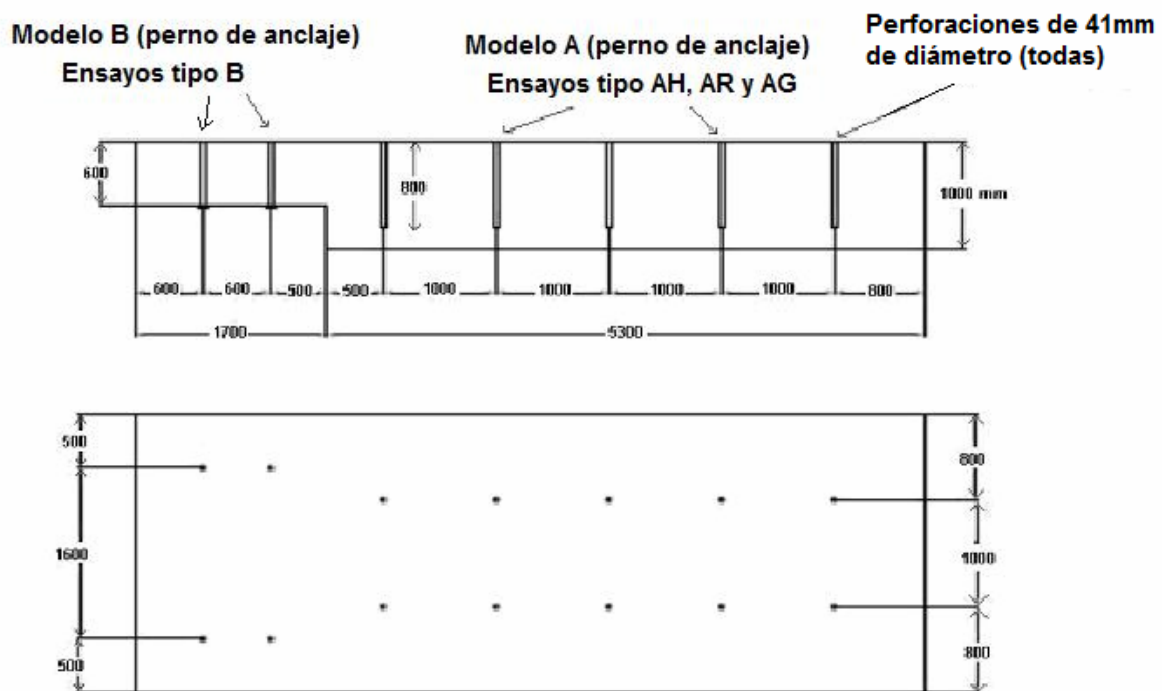


Fig. 4.2: Plano losa H.A. confeccionada para la investigación.

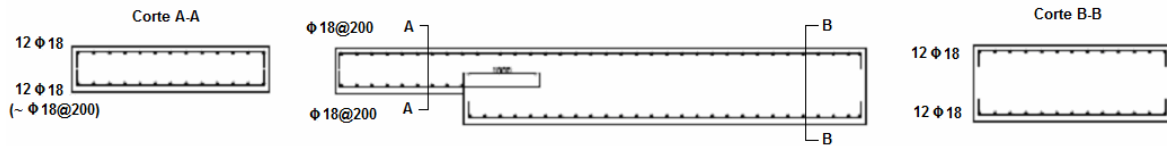


Fig. 4.3: Enfierradura losa H.A. confeccionada para la investigación.

Tabla 4.4: Materiales utilizados para fabricación de losa de H.A.

Materiales	Descripción	Calidad
Losa	Hormigón	H-30
	Acero refuerzo	A630-420

4.1.3. Resina Epóxica ADHEROK ASG®:

Resina de alta resistencia y secado rápido, a base de poliéster insaturado, conteniendo estireno monómero, aditivos y cargas inertes.

La resina se adquiere en un formato de cartuchos, listos para su uso en perforaciones para anclajes (ver Fig. 4.4). Sólo requiere del pre-mezclado con una pasta catalizadora para asegurar su homogeneidad y rápido endurecimiento.



Fig. 4.4: Cartucho de resina epóxica.

4.1.4. Lechada de Cemento (Grout):

El cemento utilizado para fabricar la lechada es de tipo puzolánico, grado corriente según norma NCh 148 Of. 68, marca Polpaico (Grupo Polpaico, sitio electrónico).

La razón agua-cemento ($w : c$) utilizada es de 0,33 aproximadamente, que es similar a la utilizada en la fortificación con anclajes en el sector RENO (13lts de agua por 1 saco de cemento de 42,5Kg, es decir $w : c = 0,31$).

4.1.5. Pegamentos utilizados (Instalación Fibra Óptica Sensora en Pernos):

A continuación se describen los principales pegamentos sometidos a prueba durante la investigación, para la instalación de fibra óptica en pernos de anclaje. Se incluye también el pegamento que presentó un mejor desempeño para el objetivo buscado, siendo éste el utilizado en el resto de los ensayos.

-Poxipol® de AKAPOL S.A.: pegamento tipo soldadura bi-componente, de alta resistencia y para todo tipo de material. Compuesto en base a solución de resinas epóxicas (especificaciones técnicas no entregadas por el fabricante).

-La Gotita® de AKAPOL S.A.:

Pegamento instantáneo, perteneciente a la familia de los *cianocrilatos*, los cuales se caracterizan por su gran resistencia y rigidez (especificaciones técnicas no entregadas por el fabricante).

-Plasticceys® de Ceys® (En adelante se denotará como pegamento “Rígido”):

Adhesivo para plásticos duros ó rígidos, como PVC, poliéster, metacrilato. En base a solución de resinas de PVC en disolventes orgánicos.

Características: Resiste alrededor de 40 Kg/cm², seca en 3 horas y alcanza la máxima resistencia en 24 horas

-Vinilceys® de Ceys® (En adelante se denotará como pegamento “Flexible”):

Adhesivo especial para vinilos, plásticos flexibles, tejidos plásticos, cuero y símil de piel (skay). En base solución de resinas de PVC en disolventes orgánicos. Resistente al agua.

Características: Resiste alrededor de 35 Kgf/cm², seca en 40 minutos y alcanza la máxima resistencia en 12 horas.

-Metalceys® de Ceys® (En adelante se denotará como pegamento “Polvo Metálico”):

Resina de poliéster instaurada bicomponente, especialmente diseñada para la restauración de superficies metálicas.

Características: Resiste alrededor de 442 Kgf/cm² en tracción, y posee un módulo de elasticidad cercano a 633 Kgf/cm². Su fraguado depende de la mezcla de componentes realizada y puede tardar hasta 15 minutos.

- Speedbonder H3151® de LOCTITE®:

Pegamento bi-componente, perteneciente a la familia de los *metacrilatos*, caracterizados por poseer alta resistencia siendo menos rígidos que los *cianocrilatos*, lo que les permite alcanzar mayores deformaciones antes de la rotura. En la *Tabla 4.5* se indican las propiedades mecánicas típicas especificadas por el fabricante y sus características físicas se muestran en la *Tabla 4.6*.

Tabla 4.5: *Propiedades mecánicas típicas según norma ASTM D 368 (Loctite®, sitio electrónico)*

Resistencia a la tracción (kgf/cm ²)	218 a 232
Elongación (%)	15 a 25
Módulo de Rigidez (kgf/cm ²)	13

Tabla 4.6: *Propiedades físicas típicas antes del curado o endurecimiento del adhesivo y sus componentes (Loctite®, sitio electrónico)*

Propiedades típicas antes del curado (endurecimiento)	Parte A	Parte B	Mezcla
Tiempo duración abierto a 21°C (min)	-	-	45 a 60
Tiempo duración luego de aplicación a 21°C (min)	-	-	60 a 120
Color	Crema	Amarillo claro	Amarillo claro
Viscosidad (cP)	60000 a 80000	60000 a 80000	-
Gravedad específica	1,01	0,96	0,99
Peso por Litro (kgf)	8,42	8,03	8,22
Razón de mezcla:			
Por peso	1	1	-
Por volumen	1	1	-

4.1.6. Sujetadores Fibra Óptica:

Los sujetadores presentados a continuación, fueron necesarios para permitir el tensado de la fibra óptica tanto en la etapa de calibración, como durante la instalación de ésta en pernos de anclaje.

- Abrazadera plástica para IC-Locks:

Esta abrazadera fue proporcionada por NTT para la construcción de sistemas de sensores llamados IC-Locks, los cuales requieren de otro tipo de fibra distinta a la fibra embossing utilizada en la presente investigación. Sin embargo, esta abrazadera puede ser utilizada sin problema alguno, para fijar fibra embossing, como puede apreciarse en la *Fig. 4.5* (NTT, comunicación privada, 2008).



Fig. 4.5: Abrazadera plástica fabricada por NTT. Arriba: con fibra embossing. Abajo: con otro tipo de fibra sensora.

- Topes Metálicos

Estos topes fueron diseñados como alternativa a las abrazaderas plásticas mostradas anteriormente. Su instalación es mediante apriete manual, por lo cual se requirió de mayor cuidado luego de notar daños en la fibra, cuando la fuerza utilizada para su instalación resultó excesiva. Otra desventaja presentada por estos topes, es que concentran la tensión aplicada sobre la fibra, por lo cual la dañan rápidamente cuando se aplican altas tensiones, llegando a inducir el corte de ésta de forma más temprana que utilizando las abrazaderas plásticas. En la Fig. 4.6 se aprecian tres topes metálicos instalados en fibra embossing para sostener pesos que transmiten tensión a la fibra.



Fig. 4.6: Topes metálicos

4.2. Instrumentación y Preparación Pernos de Anclaje

Se instrumentaron barras o pernos de acero helicoidales tipo *Saferock*, para modelar los anclajes de soporte utilizados en túneles de la mina El Teniente. Los detalles de la instrumentación dependen del tipo de ensayo ejecutado, entre los cuales se encuentran ensayos a tracción pura en laboratorio, ensayos a tracción pura en terreno y ensayos de barras ancladas a la losa de hormigón con distintos materiales. Los ensayos modelan los tipos de sollicitación teóricamente esperados (ver modelos A y B en *Fig. 2.28*). La instrumentación contempló tanto el uso de strain gages como de la tecnología BOTDR, con la finalidad de contrastar los resultados obtenidos durante los ensayos. Se efectuaron los procedimientos recomendados para la correcta instrumentación con los dispositivos de medición mencionados.

El primer tipo de instrumentación fue realizado para ensayos en laboratorio y losa de tracción pura, donde la losa representa en este caso el trozo de roca que se puede desprender, como se muestra en el modelo tipo B de la *Fig. 2.28*. El segundo tipo de ensayo corresponde al modelo de la zona del perno que quedará anclado a la roca mediante el material usado para este efecto, ya sea hormigón, *grout* o resina epóxica (modelo tipo A, *Fig. 2.28*).

La metodología de instrumentación de pernos propuesta por esta investigación, está siendo patentada, por lo cual no será publicada hasta el término de este proceso.

La *Fig. 4.7* muestra un esquema general de un perno instrumentado para la presente investigación, indicando los tramos típicos de la fibra sensora, descritos a continuación en el sentido de avance desde el analizador BOTDR.

- Tramo libre de fibra embossing desde o hacia el analizador
- Tramo 1 pegado o amarrado al perno, que es el que se deformará junto a él,
- Loop de fibra, que puede estar conformado por fibra embossing o por fibra ultra-flexible
- Tramo 2 (análogo al tramo 1)
- Tramo libre final y corte de fibra embossing

En la siguiente sección se muestra con mayor detalle la instalación de fibra sensora en los pernos de anclaje.

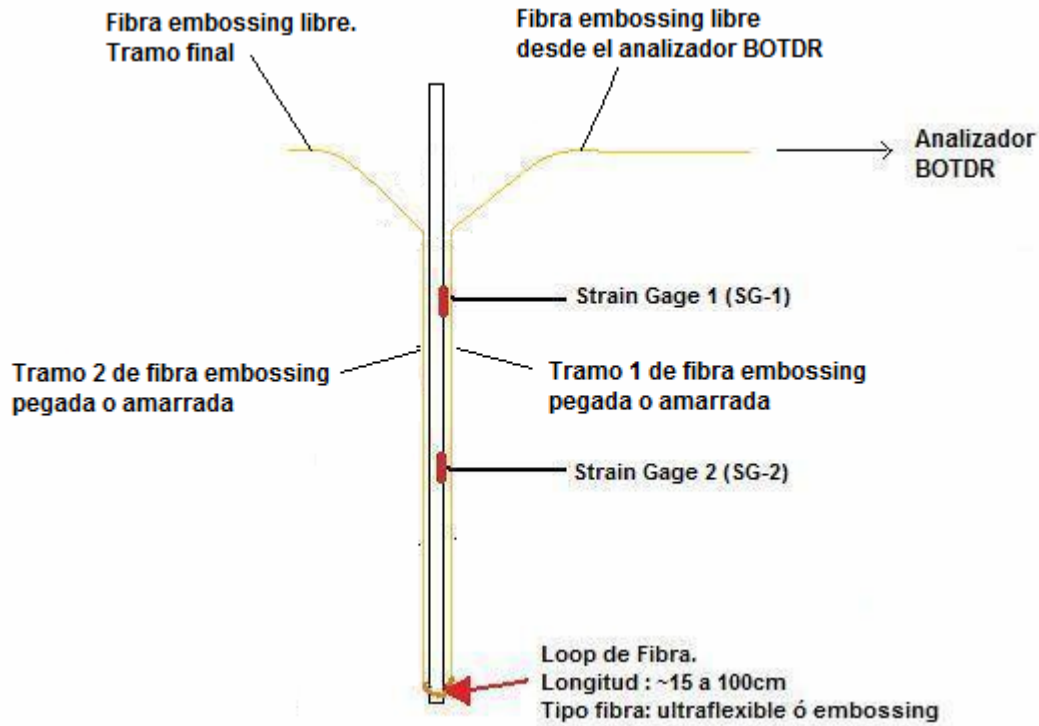


Fig. 4.7: Esquema general de perno instrumentado con fibra óptica y strain gages

4.2.1. Alternativas de Instalación de Fibra Sensora en Pernos:

A continuación se describen las alternativas de instalación de fibra sensora comúnmente utilizadas para instrumentar pernos de anclaje durante la presente investigación. En las descripciones se menciona el término “mapear la fibra”, el cual se refiere a hacer mediciones manuales de los largos de tramos relevantes de la fibra (como los mencionados anteriormente) y las ubicaciones de puntos característicos, como por ejemplo, la ubicación en (m) donde la fibra comienza a estar adherida al perno, o el punto en la fibra cuando pasa junto a un strain gage, etc. Estos mapeos se muestran en detalle en el anexo C.

➤ **Alternativa de Instalación 0**

Esta alternativa no permite saber la deformación aplicada inicialmente. Fue utilizada en los primeros ensayos en pernos realizados en laboratorio. Requiere

que se utilice sólo fibra *embossing*, sin fusiones en la zona de loop, o simplemente hacer las fusiones posteriormente a la instalación de la fibra en la barra. Sólo la fibra amarilla de conexión al analizador puede estar fusionada previamente. No necesita la polea, ya que se tensa manualmente.

➤ **Alternativa de Instalación 1**

Esta alternativa permite deducir la deformación inicial aplicada a la fibra al tensarla (mediante tabla o gráfico tensión-deformación que se confeccionó en pruebas anteriores de calibración de la fibra), además de asegurar que esta deformación sea igual en ambos tramos. Requiere que se utilice sólo fibra *embossing*, sin fusiones en la zona de loop, o simplemente hacer las fusiones posteriormente a la instalación en la barra. Las zonas de fusiones deben ser protegidas por una manguera plástica corriente, de 4 a 6mm de diámetro interior y 7 a 9mm de diámetro exterior¹. Sólo la fibra amarilla de conexión al analizador puede estar fusionada previamente para poder llevar a cabo el proceso.

➤ **Alternativa de Instalación 2**

Esta alternativa no permite saber la deformación aplicada inicialmente, pero sí permite que esta sea igual en ambos tramos. También requiere que se utilice sólo fibra *embossing*, sin fusiones en la zona de loop, o simplemente que se hagan las fusiones posteriormente a la instalación de la fibra en la barra. Sólo la fibra amarilla de conexión al analizador puede estar fusionada previamente. No necesita la polea, ya que se tensa manualmente.

¹ Las variaciones de estas dimensiones provienen de fábrica.

➤ **Alternativa de Instalación 3**

Esta alternativa permite tener una idea de la deformación inicial aplicada a la fibra al tensarla, además de asegurar que esta deformación sea igual en ambos tramos. Permite que existan fusiones previas a la instalación en la barra en la zona del loop, pero requiere que la fusión de la fibra amarilla de conexión al analizador se haga al final del procedimiento.

4.2.2. Conclusión sobre alternativas de instalación:

La opción más conveniente, de acuerdo a lo observado durante la confección de pernos, es la *alternativa de instalación 3, con protección de resina en zona del loop*. Ésta requiere del uso de fibra ultra-flexible, cuya fusión debe ser hecha previamente a la instalación de la fibra en anclajes. Además, el loop debe quedar dentro de la barra y no fuera de ella, de tal manera de evitar que se dañe al insertar los anclajes en la roca. Un loop corto de este tipo se recomienda además para efectos del cálculo de deformaciones, permitiendo dar continuidad y mayor longitud al tramo tensado de fibra considerado por el sistema al tomar lecturas sobre la resolución espacial. O visto de otra forma, para que exista un menor tramo que esté promediando deformación nula. Particular cuidado debe tenerse con las zonas de fusión aledañas al loop, las cuales hasta ahora se han protegido con las mangueras plásticas mostradas anteriormente y fijando la fibra con cinta adhesiva o silicona. Si existe demasiada movilidad en la fibra dentro de las mangueras, es posible que ésta quede enrollada, entregando curvas de espectro irregulares. También puede cortarse fácilmente, siendo ésta la zona más frágil de la fibra. La fibra en la zona del loop no debe ir adherida a la barra para evitar que esta zona sea traccionada.

El pretensado aplicado sobre la fibra en todas las alternativas de instalación, tiene como objetivo fundamental el permitir observar con mayor claridad la zona de interés en los pernos de anclaje instrumentados. De esta forma, si el pegamento es capaz de mantener la deformación inicial en la fibra, una vez que se ha quitado el sistema de gancho y pesos utilizados en el proceso de instrumentación, es posible definir a través de la interfaz gráfica del software, los puntos de observación relevantes durante los ensayos, siendo éstos donde se espera exista incremento de deformación luego de la aplicación de carga sobre el anclaje. Con respecto a lo anterior, el pegamento finalmente escogido,

debido a su buen desempeño, corresponde a *Speedbonder H3151[®] de LOCTITE[®]*. Este adhesivo es el que se utiliza en los últimos ensayos realizados durante la investigación. En la *Fig. 4.8* se muestra un ejemplo de lectura del sistema BOTDR justo antes de empezar un ensayo con aplicación de cargas, es decir, en el momento en que el perno ya se encuentra instrumentado (según la alternativa escogida) y anclado a la losa de hormigón. Los datos corresponden al ensayo AR 08-sep-2008. Figuras similares para distintos niveles de carga de este y otros ensayos, se presentan en el anexo E.

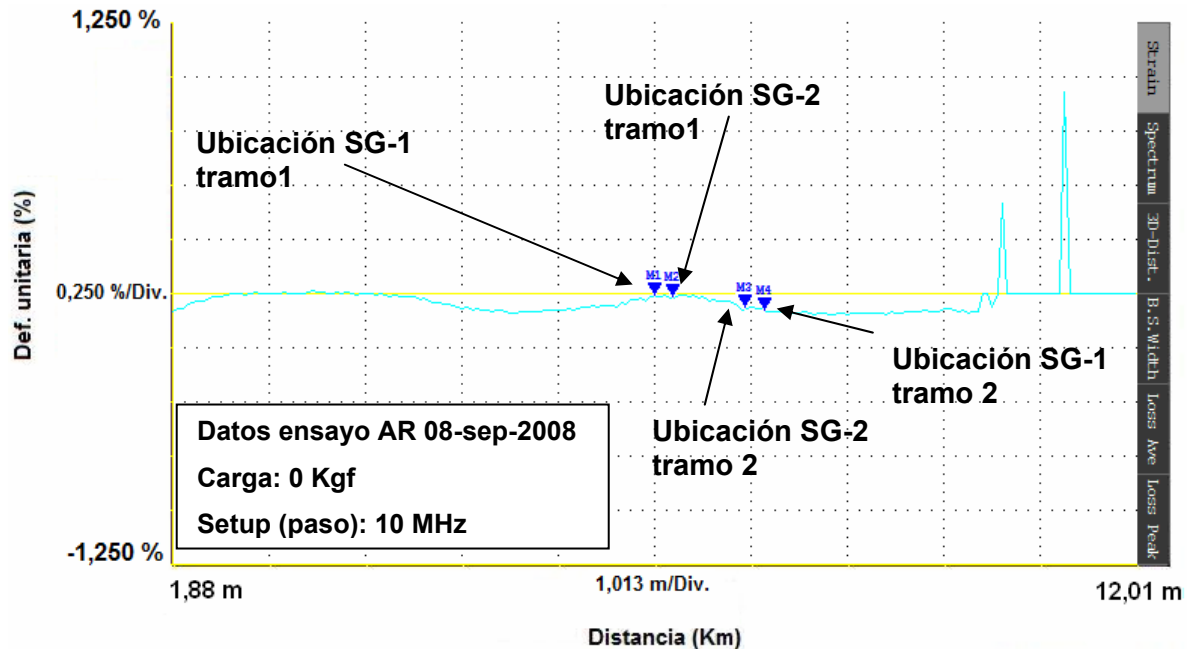


Fig. 4.8: Deformación unitaria versus distancia, entregada por sistema BOTDR. Datos ensayo AR 08-sep-2008, sin carga (0Kgf).

Un objetivo adicional que justifica el pretensado sobre la fibra, es el acercarse más tempranamente a la condición presentada por Zhang & Wu (2008) para el caso de deformación unitaria (ϵ) > 0,25%, donde el peak original de la curva de espectro y aquél asociado a la deformación aplicada, son claramente distinguibles.

4.3. Procedimiento de Ensayo

En este acápite se describe el procedimiento para ensayos realizados en laboratorio y aquellos realizados en la losa de hormigón armado en terreno.

4.3.1. Ensayos de Calibración:

- **Curva de calibración fibra embossing**

El propósito de estos ensayos, fue el de corroborar los resultados entregados por NTT respecto del funcionamiento del sistema BOTDR.

La calibración de la fibra embossing se realizó mediante un sistema de carga controlada, y la instalación de una polea en la cual se apoyó la fibra para ser cargada, como se muestra en la *Fig. 4.9*. En ésta se destacan algunos puntos característicos del sistema, los cuales son descritos a continuación:

- 1 : Inicio fibra desde analizador ADVANTEST BOTDR
- 2 : Fibra afirmada mediante prensa
- 3 : Polea y giro en 90° de la fibra
- 4 : Unión fibra-gancho de cargas mediante sujetadores

De esta manera, se aplicaron sucesivas cargas conocidas observando la deformación entregada por el software. Esta información fue contrastada con la lectura de diales dispuestos para medir la elongación de la fibra. Los ensayos se repitieron para distintos largos de la fibra tensada. Luego de encontrar correlaciones adecuadas entre las mediciones de software y diales, se rescataron las frecuencias asociadas a cada nivel de deformación y se estableció la relación carga-deformación unitaria y deformación unitaria-frecuencia asociada. Esta última relación es utilizada más adelante en métodos manuales para el cálculo de deformaciones.

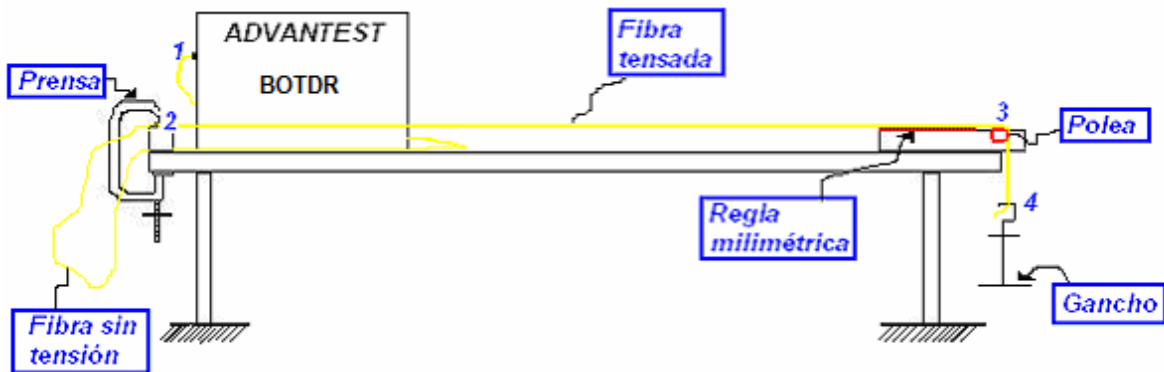


Fig. 4.9: Esquema instalación experimental para tensado de fibra, aplicado a ensayos desde enero de 2008.

4.3.2. Ensayos en pernos de anclaje:

En una primera etapa, se realizaron ensayos de tracción pura en laboratorio. Los pernos ensayados en esta etapa, contaron con instrumentación mediante fibra óptica, strain gages y extensómetros calibrados, lo que permitió corroborar la medición de los sensores y conocer el comportamiento de la medición BOTDR con la fibra óptica actuando como sensor adherido a los pernos. En estos ensayos, el largo instrumentado con fibra óptica, fue cercano a 1m, que es la resolución espacial mencionada en capítulos anteriores. Además, se realizaron pruebas con diversos pegamentos para instalar la fibra óptica sensora en el perno, permitiéndose descartar varios de ellos y continuar en posteriores ensayos, con aquellos que presentaron mejor comportamiento.

Posteriormente, se realizaron ensayos en pernos instalados en la losa de hormigón armado. Los pernos de esta segunda etapa, contaron sólo con instrumentación mediante fibra óptica y strain gages. Se comenzó con ensayos de falla tipo bloque (modelo B de ensayos), solicitados en forma similar a los realizados en laboratorio, es decir, traccionando el perno en forma pura. Sin embargo, estos ensayos se realizaron en la zona delgada de la losa (espesor de 60cm aproximadamente), por lo cual, el largo traccionado del perno, y por ende, el largo de la fibra óptica actuando como sensor, fue bastante menor a la resolución espacial de 1m (se estima que algo similar puede ocurrir en la roca). Luego se continuó, en forma paralela, con ensayos tipo zona anclada (modelo A de ensayos), los cuales tuvieron largos mayores a los de falla tipo bloque. El

procedimiento de aplicación de carga y observaciones durante el ensayo, que se expone a continuación, es similar en los tres tipos de ensayos de pernos de anclaje mencionados.

- **Carga de los anclajes**

Los anclajes fueron cargados monótonamente y en forma individual, mediante incrementos de carga constantes en la mayoría de los casos. En algunas situaciones, no fue posible alcanzar el incremento de carga deseado debido a aproximarse la falla del anclaje. Los incrementos de carga se definieron *a priori* según las resistencias máximas esperadas de los pernos o del sistema de anclaje. En algunos ensayos en la losa de hormigón, como se verá más adelante, se realizaron descargas y recargas intermedias, continuando luego los incrementos pre-definidos. Algunos anclajes fueron llevados hasta la falla, mientras que otros ensayos fueron interrumpidos antes de alcanzarla, por razones como rotura o mal funcionamiento de la fibra.

Luego de la aplicación de cada nivel de carga, se realizaron mediciones mediante el sistema BOTDR, manteniendo fija la carga aplicada.

Según las capacidades de los equipos (celda y cilindro de carga), la carga máxima posible de alcanzar es de 30 tonf. Sin embargo, debido a las características del acero helicoidal del anclaje mayormente usado (A44-28H), se estimó que la carga no debía superar las 20 tonf por falla de la barra. La carga sobre el anclaje se incrementó desde 0 hasta 21 tonf (o el máximo aplicable) en tramos no mayores a 3 tonf cada uno¹.

- **Observaciones durante el ensayo**

El principal parámetro observado durante los ensayos, fue la deformación unitaria producida en el perno de anclaje. Para esto se contrastaron mediciones obtenidas a través de la tecnología BOTDR con aquellas realizadas mediante strain gages. Como se explicó anteriormente, en algunos ensayos fue posible distinguir claramente la zona de fibra adherida al perno antes de comenzar la aplicación de cargas, debido a que dicha zona contó con un pretensado inicial aplicado durante la instrumentación del perno. De

¹ Como se muestra más adelante, en algunos ensayos, para cargas altas, no fue posible alcanzar incrementos de 3 tonf, aplicándose en definitiva, la máxima carga que el sistema soportó.

esta forma, se determinó el pegamento que fue capaz de mantener esta condición en el tiempo, para utilizarlo en forma definitiva en el resto de los ensayos.

- **Observaciones post-ensayo**

Las observaciones post-ensayo tienen por objetivo determinar el estado operativo de la fibra óptica una vez finalizado el ensayo, además de realizar una inspección visual de la condición del pegamento utilizado y su adherencia a la barra, en los casos en que esta zona se mantuvo visible (ensayos tipo L y B). Con esto se buscó determinar la aptitud de la fibra a resistir la instalación, y posteriores cargas durante el ensayo. Además, se estudió el estado de los anclajes para determinar con mayor claridad la causa de falla en los casos donde ésta se alcanzó.

- **Descripción de losa y distribución de anclajes**

Se utilizó una plataforma o losa de hormigón armado para anclar barras helicoidales de diámetro 22 mm y calidades A63-42H ó A44-28H. La losa de dimensiones: 3.2m de ancho, 6.8m de largo, y 1.5m (0.6m en zona delgada) de profundidad, contempla 10 puntos de anclaje de barras. Las barras ancladas se incorporarán durante la construcción (anclaje en hormigón) o posteriormente a la construcción de la losa. En este último caso, el anclaje de barras se realizará por medio de grout (lechada de cemento) o resina epóxica para lograr adherencia a la losa de reacción. Para cada tipo de anclaje se construyeron 2 o más probetas en la losa (ver *Fig. 4.11*) y fueron ancladas una profundidad de 1.0m aproximadamente. Las perforaciones consideradas para el anclaje de barras posterior a la construcción de la losa son de un diámetro aproximado de 41 mm. Estas perforaciones se construyeron colocando tuberías de PVC al momento de hormigonar (ver *Fig. 4.10*) y fueron removidas antes de la colocación de las barras.



Fig. 4.10: Vista de losa de hormigón en construcción y formación de las perforaciones para anclajes.

Las perforaciones fueron también utilizadas para determinar un método de instalación adecuado de la fibra. En la *Fig. 2.28* se muestran las dos aplicaciones que se representaron en los ensayos.

La losa fue diseñada para evitar una falla por punzonamiento para una carga límite de arrancamiento o *pullout* de las barras de anclaje. Las barras de anclaje embebidas en hormigón son cargadas en tracción hasta que se produzca deslizamiento entre el hormigón, grout o resina y el acero o hasta que se evidencie fluencia en la barra traccionada. En el caso de las barras embebidas en grout, se anticipó una falla por deslizamiento entre el grout y el hormigón circundante.

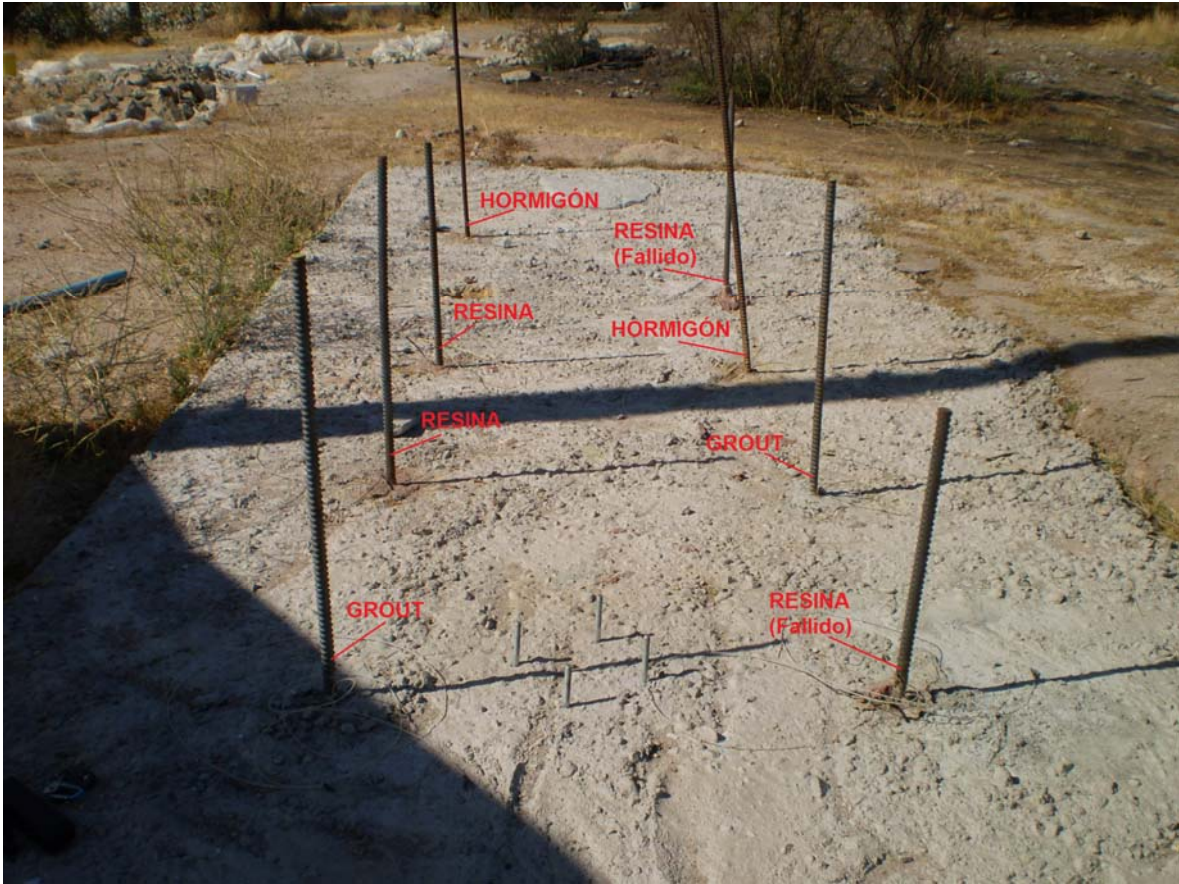


Fig. 4.11: Vista en perspectiva de losa de hormigón y distribución de los ensayos tipo zona anclada realizados (modelo A de ensayos)

- **Instalación de pernos instrumentados y montaje de ensayo**

Todos los anclajes, sean estos anclados posteriormente o al momento de la construcción de la losa, incorporaron fibra óptica sensora adherida en todo su largo sometido a tracción.

Una vez instrumentados los pernos, se procedió a su instalación en la losa de hormigón en terreno, introduciendo el perno por la perforación existente en la losa de hormigón armado. Una vez que se instala la placa de sujeción es posible colocar el cilindro de carga que se utilizará para tensar los pernos en estudio (ver Fig. 4.12).



Fig. 4.12: *Instalación equipo de carga en terreno para ensayo falla tipo bloque (modelo B de ensayos).*

En las figuras presentadas a continuación, se muestran algunas de las consideraciones relevantes en el montaje experimental. La *Fig. 4.13* muestra el detalle de la instalación de la placa superior¹ en los ensayos, donde debió tenerse particular cuidado con el curvado de la fibra que viene desde el perno instrumentado al interior de la losa y su salida a través de la placa de sujeción. La *Fig. 4.14* muestra una vista en planta de la fibra saliendo a través de las perforaciones en la placa de sujeción.

¹ *Se instala doble placa para disminuir la deformación excesiva de éstas al aplicar cargas altas.*



Fig. 4.13: *Detalle instalación placa superior.*



Fig. 4.14: *Entrada y salida de fibra a través de la placa de sujeción.*

La Fig. 4.15 muestra el detalle de la parte inferior de la losa en su sección delgada (ensayos tipo B), donde el extremo del perno, al igual que la parte superior, es fijado

mediante una placa y tuerca de sujeción¹. Puede apreciarse además, para el caso mostrado, un loop de fibra embossing largo que sobresale de las placas, verificando siempre el curvado suave para evitar que ésta se dañe.



Fig. 4.15: Detalle instalación placa inferior (bajo sector delgado losa). Ensayo falla tipo bloque (modelo B de ensayos).

En la *Fig. 4.18*, se describe la instalación de los pernos de anclaje instrumentados, según la alternativa escogida, en los túneles de la mina El Teniente. Se puede apreciar la protección de resina en el extremo del perno que queda hacia el interior del maciso rocoso (ver *Fig. 4.16*). En la *Fig. 4.17* se observa el extremo del perno que queda visible luego de haberlo instalado al interior de la roca fijándolo con grout.

¹ Nuevamente, al igual que en las placas superiores, se instala doble placa para disminuir la deformación excesiva de éstas al aplicar cargas altas.



Fig. 4.16: *Instalación pernos en túnel mina El Teniente.*



Fig. 4.17: *Perno instalado (completamente grouteado) en túnel mina El Teniente.*



Fig. 4.18: Túnel con pernos instrumentados con fibra óptica en nivel de hundimiento mina El Teniente.

4.4. Programa de Investigación

El programa de investigación descrito en esta sección, muestra la planificación de los ensayos requeridos para cumplir con los objetivos propuestos al comienzo de la investigación. Se describen los ensayos de calibración, laboratorio y, finalmente, aquellos realizados en terreno. De esta forma, se estimó *a priori* el número y tipo de ensayos requeridos permitiendo, además, anticipar la duración de la investigación. Cabe mencionar que se establecieron prioridades entre ensayos y las distintas variables a estudiar, por lo cual, algunos aspectos de interés que no pudieron ser considerados en la presente investigación, se incluyen más adelante como recomendaciones.

4.4.1. Ensayos de Calibración:

Estos ensayos fueron requeridos para determinar la correcta utilización tanto de strain gages como del sistema BOTDR. Además permitieron el análisis de la capacidad de la fibra sensora utilizada. Para la calibración de strain gages, se utilizaron resultados de ensayos a tracción pura en barras instrumentadas con estos dispositivos, los cuales se contrastaron con mediciones de extensómetros calibrados. Para la calibración de la fibra sensora *embossing*, se realizaron ensayos de estiramiento de fibras en forma libre.

- **Calibración strain gages:**

Objetivo:

- Dar confiabilidad a la medición de deformación proporcionada por strain gages

Para cumplir con este objetivo, se consideraron 2 ensayos a tracción pura en pernos instrumentados con strain gages y extensómetros calibrados.

- **Calibración fibra óptica sensora:**

Objetivos:

- Conocer el funcionamiento del equipo de medición BOTDR
- Determinar o confirmar el rango de medición de la fibra sensora
- Determinar el rango de trabajo elástico de esta fibra
- Determinar la deformación en rotura de la fibra
- Confirmar el error de medición en la fibra.
- Cambio en mediciones debido a influencia de la temperatura (medición de temperatura adicional)

Para cumplir con los objetivos mencionados, se consideraron 3 ensayos en fibra óptica estirada en forma pura, variando la longitud de su tramo tensado.

4.4.2. Ensayos en Perno de Acero:

Se realizaron ensayos en pernos de acero helicoidal tipo *saferock*, efectuados tanto en instalaciones de laboratorio como en terreno sobre una losa de hormigón armado, confeccionada con motivo de la presente investigación. Para identificar y distinguir los ensayos realizados, se asignó un código que incluye letras, las cuales definen el tipo de ensayo y la fecha en que fue realizado. Esto se describe con mayor detalle a continuación.

En forma general, cada perno se instrumentó con 2 strain gages¹. En algunos casos sólo se pudo obtener mediciones de 1 strain gage por perno, siendo ésta la considerada en el análisis. En los casos donde se obtuvieron las mediciones de ambos strain gages, se tomó el promedio de las lecturas para comparar la deducción en el rango de medición del sistema BOTDR (1m).

I. Ensayos de pernos en laboratorio (ensayos tipo L):

Corresponden a ensayos a tracción simple en barras o pernos de acero, realizados en laboratorio en las instalaciones del laboratorio de maquinas de IDIEM - Universidad de Chile. Este tipo de ensayos permitió estudiar, en parte, el modelo B de sollicitación descrito anteriormente. Además, los resultados obtenidos se consideraron para efectuar las calibraciones de strain gages, como también para el estudio y consecuente descarte de algunos pegamentos para instalar la fibra óptica, considerados al inicio de la investigación. Esto último continuó siendo investigado, posteriormente, a través de los ensayos realizados en terreno, los cuales permitieron elegir en forma definitiva el pegamento con mejor comportamiento según los objetivos de la investigación.

Se consideraron 2 ensayos de pernos en laboratorio (L) para cumplir con los objetivos planteados.

¹Como se muestra más adelante, en el ensayo L 26-nov-2007, además, se utilizaron extensómetros, y el ensayo L 26-dic-2007 contó con mediciones de 3 strain gages.

En las *Fig. 4.19* y *Fig. 4.20* se muestran las instalaciones experimentales utilizadas en ensayos de pernos en laboratorio. En ellas puede observarse además, la instrumentación con extensómetros, fibra óptica sensora y strain gages. Los pernos en este tipo de ensayos fueron cargados hasta alcanzar la fluencia.

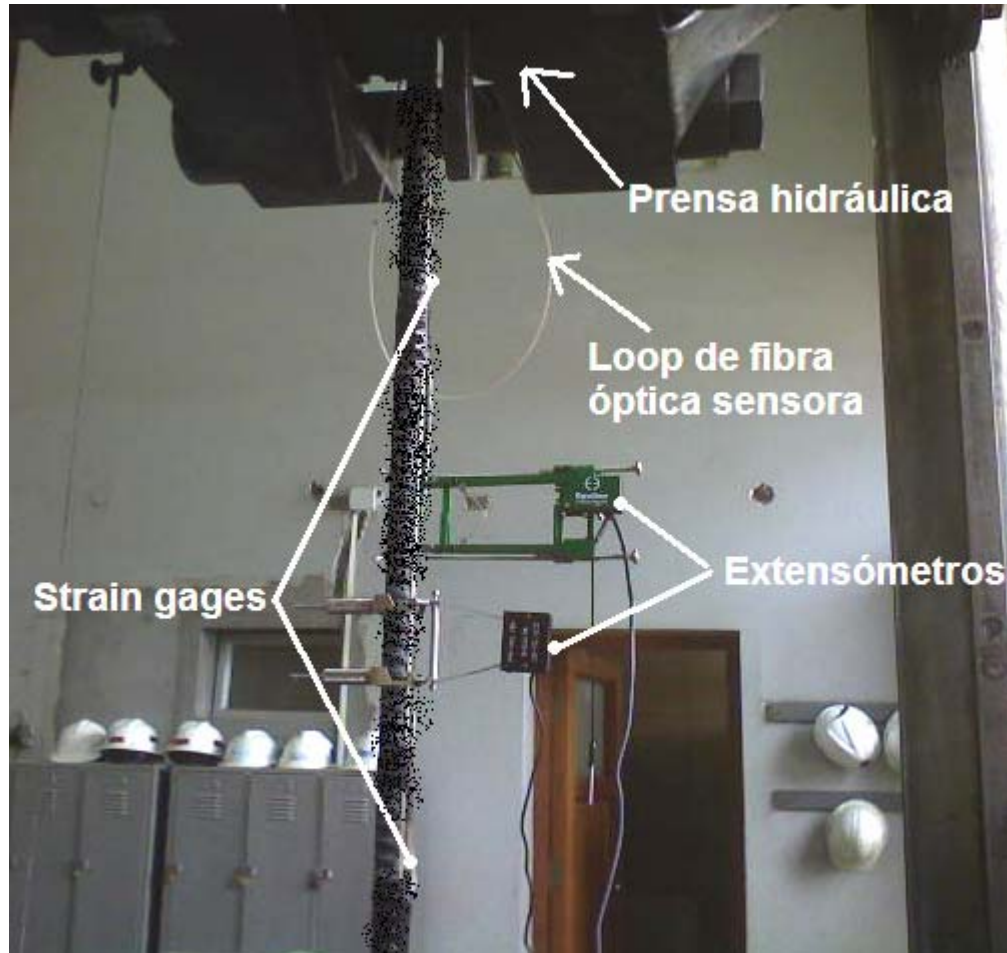


Fig. 4.19: Perno de acero instrumentado con extensómetros, fibra óptica sensora y strain gages.

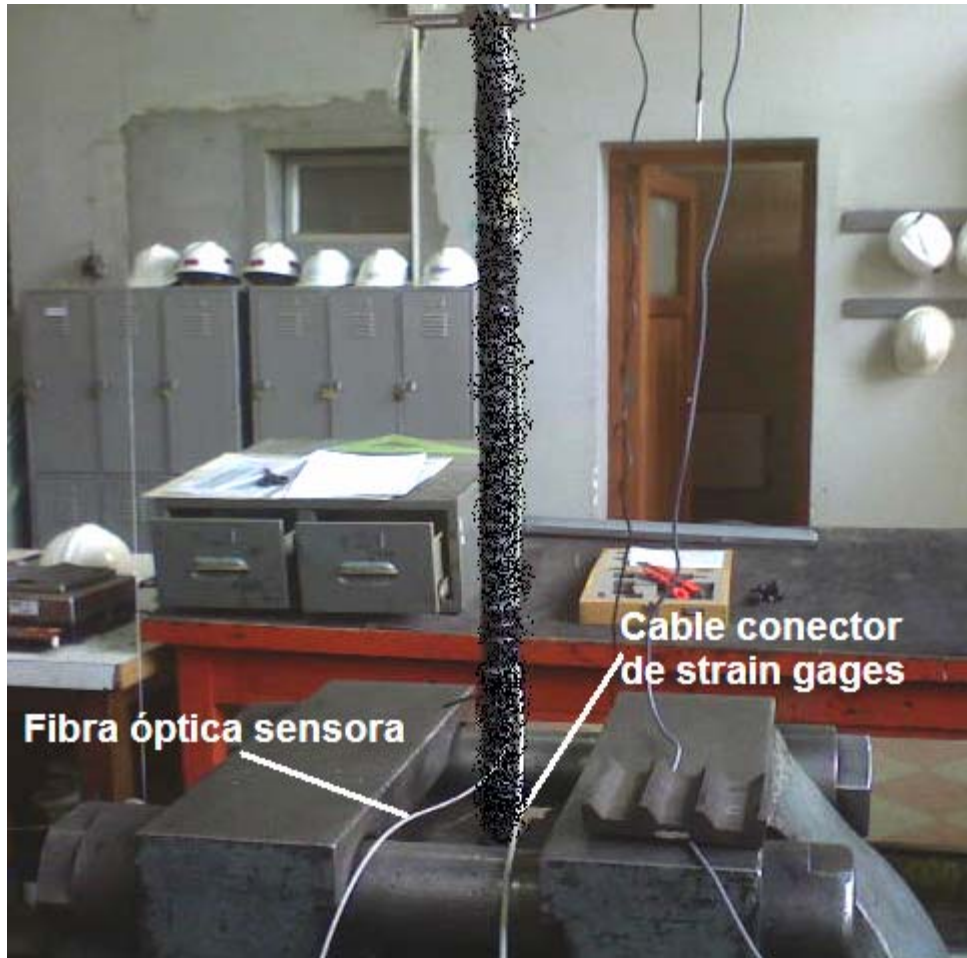


Fig. 4.20: Perno instrumentado con fibra óptica sensora y strain gages

II. Ensayos de pernos en losa de H. A. (ensayos tipo B, AH, AR y AG):

Ensayos realizados en las instalaciones de IDIEM – Universidad de Chile, en la comuna de Cerrillos. Este tipo de ensayos se subdivide según el modelo de comportamiento estudiado y según el material utilizado para anclar el perno en la losa. De esta manera se definen:

- Ensayos en pernos *falla tipo bloque* que estudian, en parte, el modelo B de sollicitación descrito anteriormente. El código que los identifica lleva la letra B y su fecha de realización. Se consideraron 2 ensayos de este tipo. La *Fig. 4.21* muestra un esquema de su instalación. Los pernos en este tipo de

ensayos fueron cargados hasta que las placas de sujeción alcanzaron deformaciones excesivas llegando a dañar la fibra óptica.

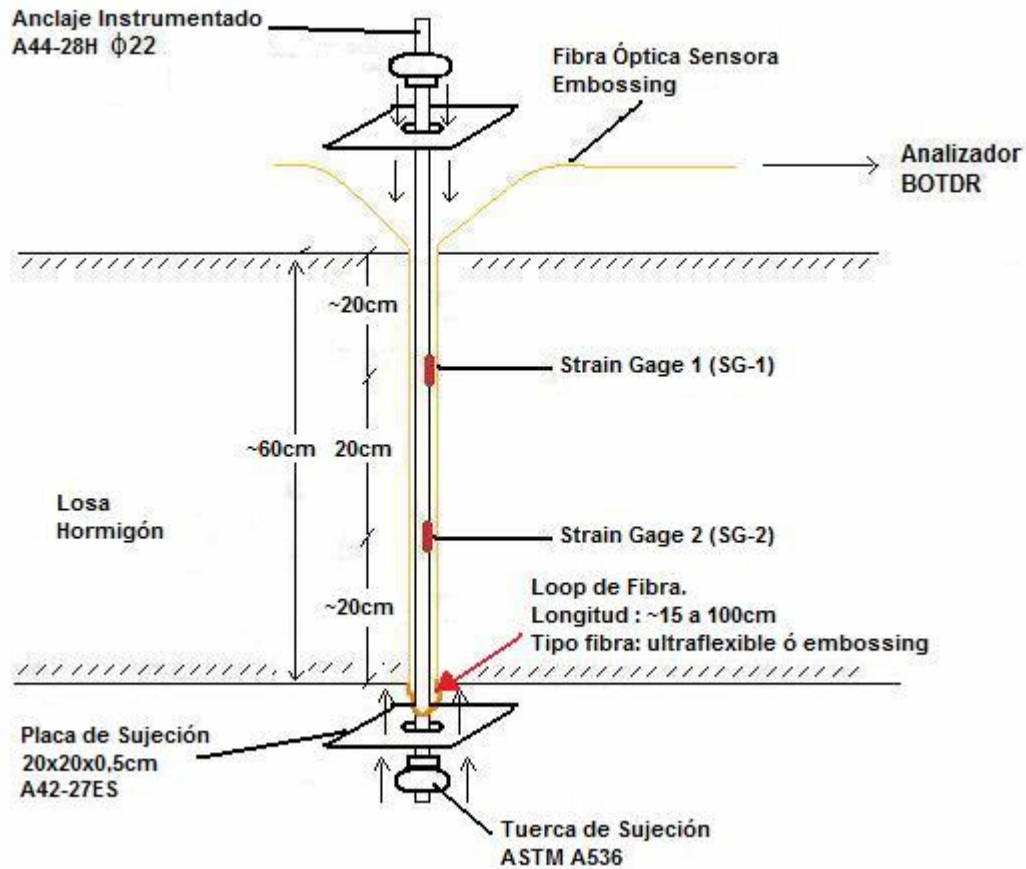


Fig. 4.21: Instalación experimental Ensayos Falla Tipo Bloque (B).

- Ensayos en pernos *anclados* en hormigón, resina epóxica o grout, que estudian el modelo A de sollicitación descrito anteriormente. Se denominarán, en adelante, ensayos *tipo zona anclada*. El código que los identifica lleva la letra A, junto con las letras H, R o G dependiendo de la forma de anclar el perno a la losa y, finalmente, incluyen la fecha en que fueron realizados¹. La Fig. 4.22 muestra un esquema de la instalación de los ensayos tipo zona anclada. La fibra óptica en el caso de los ensayos tipo AH (ver *Tabla 4.7*) fue adherida con pegamento POXIPOL® en el tramo 2, mientras que en el

¹ En el caso de los ensayos tipo AG, por haber sido realizados en la misma fecha, se asigna un número adicional al código que los identifica (ensayos AG1 25-nov-2008 y AG2 25-nov-2008)

tramo 1, ésta sólo se afirmó al perno mediante amarras plásticas. Las posiciones de los strain gages en estos ensayos difieren levemente de las mostradas en la figura (ver *Tabla 4.8*). En los ensayos tipo AR, la fibra fue *pretensada* y adherida en ambos tramos con pegamento LOCTITE H3151®. Los anclajes en este tipo de ensayos fueron cargados hasta alcanzar la fluencia del perno.

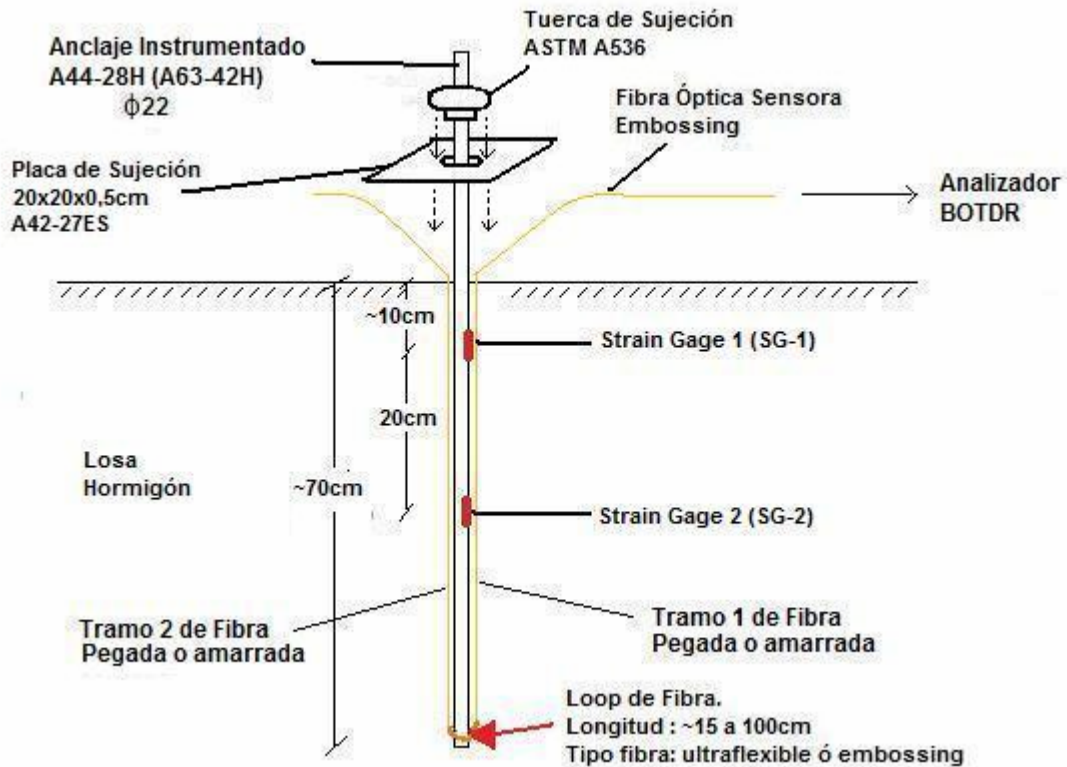


Fig. 4.22: Instalación experimental Ensayos Zona Anclada (AH*, AR y AG).

Como se mencionó anteriormente, se construyó una losa de hormigón armado con el fin de representar la situación de un perno de anclaje en roca. Mediante este modelamiento se buscó identificar la forma óptima de instalación de fibra sensora en los pernos de anclaje. Además, en forma paralela se realizarán mediciones de deformación en los pernos instrumentados con fibra.

Objetivos:

- Definir Instalación óptima de fibra en pernos de anclaje
- Comprobar mediciones de deformación unitaria en pernos de anclaje utilizando la tecnología BOTDR, al comparar con mediciones de deformación unitaria mediante strain gages.
- Observar comportamiento de la tecnología BOTDR para medir tramos menores a la resolución espacial de 1m.
- Encontrar métodos de análisis de datos y deducción de información relevante en mediciones que el sistema BOTDR no interpreta correctamente, al no cumplirse el requisito de la resolución espacial mínima de medición.

Los ensayos mencionados, se resumen en la *Tabla 4.7*. Algunos datos mostrados en ella, son explicados más adelante.

Tabla 4.7: Programa de ensayos realizados

Ensayo	Tipo Ensayo	Setup Software	Largo por Tramo de Fibra Pegada [m]	Pegamento en Tramo 1 (T1) y Tramo 2 (T2)
L 26-nov-2007	Laboratorio - Tracción	20MHz	0,90	Amarras Plásticas (Sin Pegamento)
L 26-dic-2007	Laboratorio - Tracción	10 y 20MHz	0,95	T1: Flexible (1ª mitad) - Polvo Metálico (2ª mitad) T2: Gotita (1ª mitad) – Poxipol (2ª mitad)
B 23-ene-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10 y 20MHz	0,67	T1 y T2: Polvo Metálico
B 21-feb-2008 ¹	Terreno - Falla Tipo Bloque	10 y 20MHz	0,73	T1 y T2: Rígido
AH 26-feb-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10 y 20MHz	0,92	T1: Amarras T2: Poxipol
AH 18-jul-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10MHz	0,87	T1: Amarras T2: Poxipol
AR 22-ago-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10 y 20MHz	0,47	T1 y T2: Loctite
AR 08-sep-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10 y 20MHz	0,47	T1 y T2: Loctite
AG1 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grouting	10 y 20MHz	0,48	T1 y T2: Loctite
AG2 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grouting	10 y 20MHz	0,48	T1 y T2: Loctite

¹: En este ensayo se reutilizó una barra de un ensayo anterior, en el que no se llegó a la fluencia del perno.

En la *Tabla 4.8* se muestra un resumen del número, posición y condición de los strain gages de los ensayos realizados en pernos de anclaje.

Tabla 4.8: Resumen instalación y condición de strain gages por ensayo.

Ensayo	Strain Gages instalados	Strain Gages en correcto funcionamiento	Distancia medición desde Superficie Superior Losa (aprox.) [cm]
L 26-nov-2007	2	2	-
L 26-dic-2008	4	3	-
B 23-ene-2008	2	2	SG-1 a 20cm; SG-2 a 40cm
B 21-feb-2008	2	2	SG-1 a 20cm; SG-2 a 40cm
AH 26-feb-2008	2	1	SG-2 a 50cm
AH 18-jul-2008	2	1	SG-2 a 50cm
AR 22-ago-2008	2	0	-
AR 08-sep-2008	2	2	SG-1 a 10cm; SG-2 a 30cm
AG1 25-nov-2008	2	2	SG-1 a 10cm; SG-2 a 30cm
AG2 25-nov-2008	2	0	-

5. RESULTADOS

En adelante, se muestran los resultados obtenidos en las distintas etapas de la investigación. En cada una de ellas se explica la metodología de análisis e interpretación de los datos entregados por el sistema BOTDR en estudio y las principales conclusiones obtenidas.

5.1. Ensayos Preliminares

Estos ensayos comprenden la etapa de conocimiento y familiarización con los equipos y la tecnología aplicada, calibración de mediciones y evaluación de las alternativas de instrumentación e instalación experimental. Por ende, algunos detalles de los ensayos en esta etapa difieren en parte de las configuraciones y características adoptadas en los ensayos finales.

5.1.1. Comparación de distintos tipos de pegamentos

Para pegar la fibra a los pernos de acero se han utilizado diferentes tipos de pegamentos (ver capítulo 4, sección 4.1) y durante las pruebas en laboratorio se ha determinado su desempeño para la adherencia de la fibra y perno bajo distintos niveles de deformación. De esta manera se concluyó sobre los pegamentos que mostraron mejor comportamiento, comparando los tramos donde se usó cada uno con el nivel de deformación esperado o el entregado por los strain gages instalados. Además, se observó el aspecto superficial de los pegamentos sobre la fibra, descartándose dos de ellos por mostrar fisuras prematuras durante los ensayos tal como se muestra más adelante. Durante la etapa de ensayos en terreno, fue probado el pegamento metacrilato *speedbonder H3151*[®] de *LOCTITE*[®], el cual fue escogido en forma definitiva como pegamento a utilizar para la instalación de la fibra, teniendo como principales características: la mayor adherencia fibra-perno entregada; alta resistencia y flexibilidad; fácil y rápida aplicación.

5.1.2. Calibración y análisis de error experimental de strain gages y celda de carga

Se muestran a continuación, datos de carga aplicada según lecturas de manómetro análogo (presente sólo en ensayos de terreno) y celda de carga, en conjunto con los valores de deformación unitaria entregados por los strain gages para cada ensayo. Un ejemplo de los resultados obtenidos mediante este procedimiento se muestra en la Fig. 5.1 y Fig. 5.2, correspondientes al ensayo en perno ensayado como *Falla Tipo Bloque*, B 21-feb-2008 (ver Tabla 4.7).

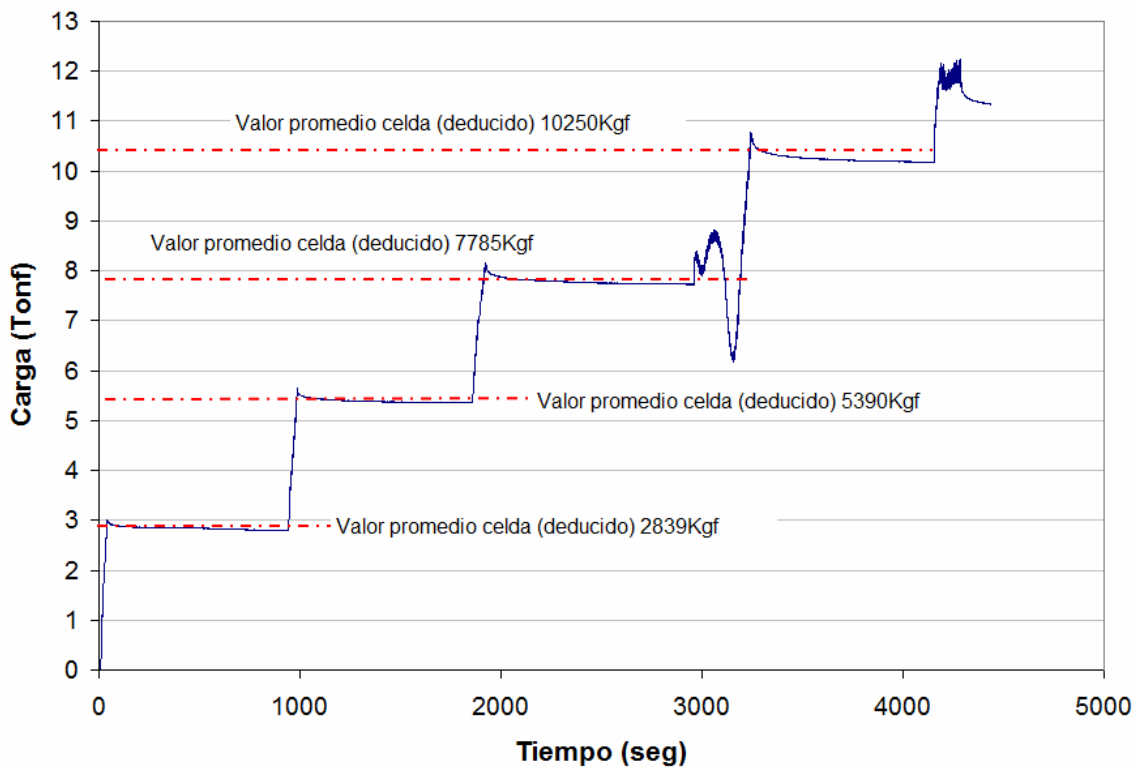


Fig. 5.1: Lecturas celda de carga y carga promedio calculada. Datos ensayo B 21-feb-2008.

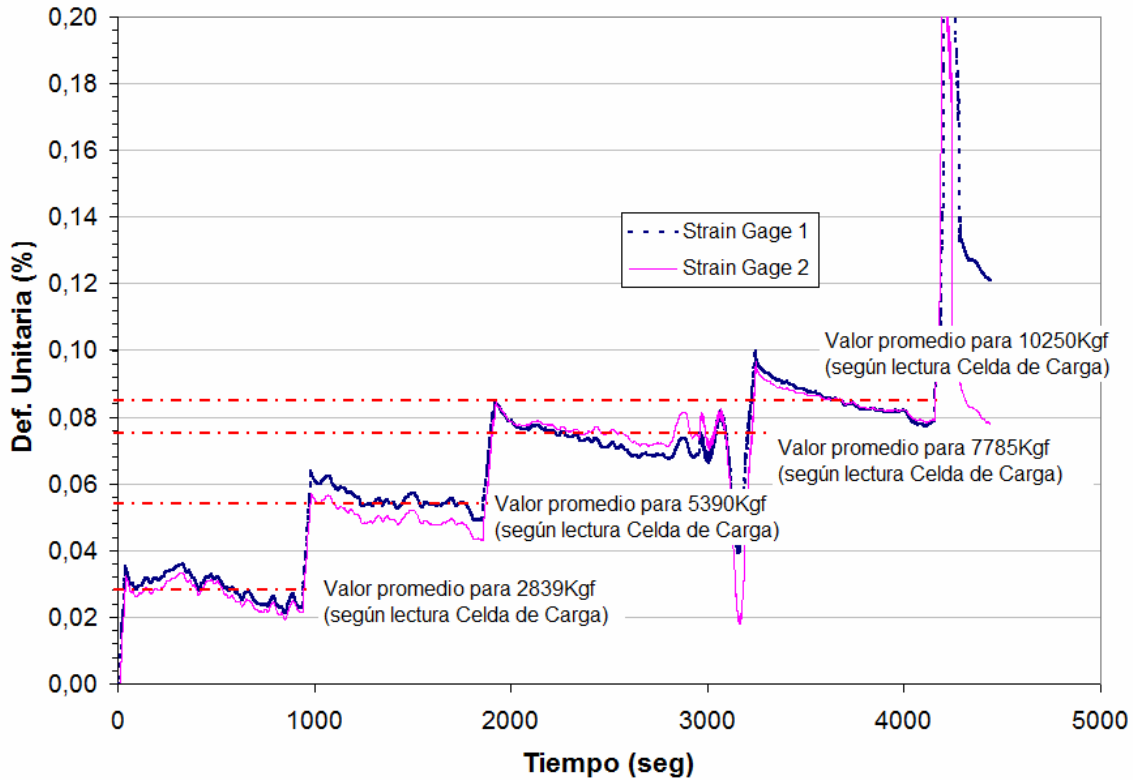


Fig. 5.2: Lecturas Strain Gages y promedios calculados. Datos ensayo B 21-feb-2008

Para estimar el error de medición de la celda de carga y strain gages, se utilizan lecturas proporcionadas por estos dispositivos. Se calcula el mayor valor entre: a) Lo observado de registros obtenidos en laboratorio, sin aplicación de cargas; b) De los resultados de ensayos en terreno (ver Fig. 5.3 a Fig. 5.5) y c) De las especificaciones entregadas por el fabricante de ambos dispositivos (en caso de que se cuente con este dato). Se estima entonces que los errores efectivos son de aproximadamente $\pm 8\text{Kgf}$ para la celda de carga y de $\pm 0.01\%$ en la lectura de los strain gages.

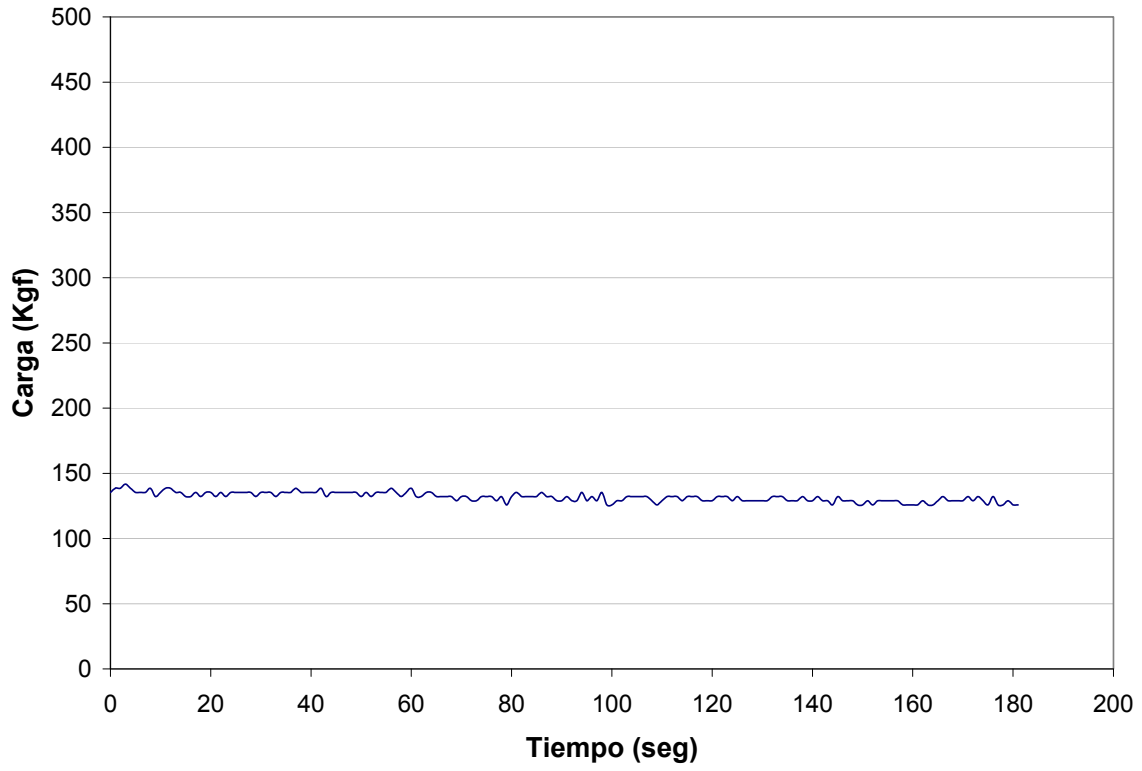


Fig. 5.3: Lecturas celda de carga en laboratorio, sin aplicación de carga.

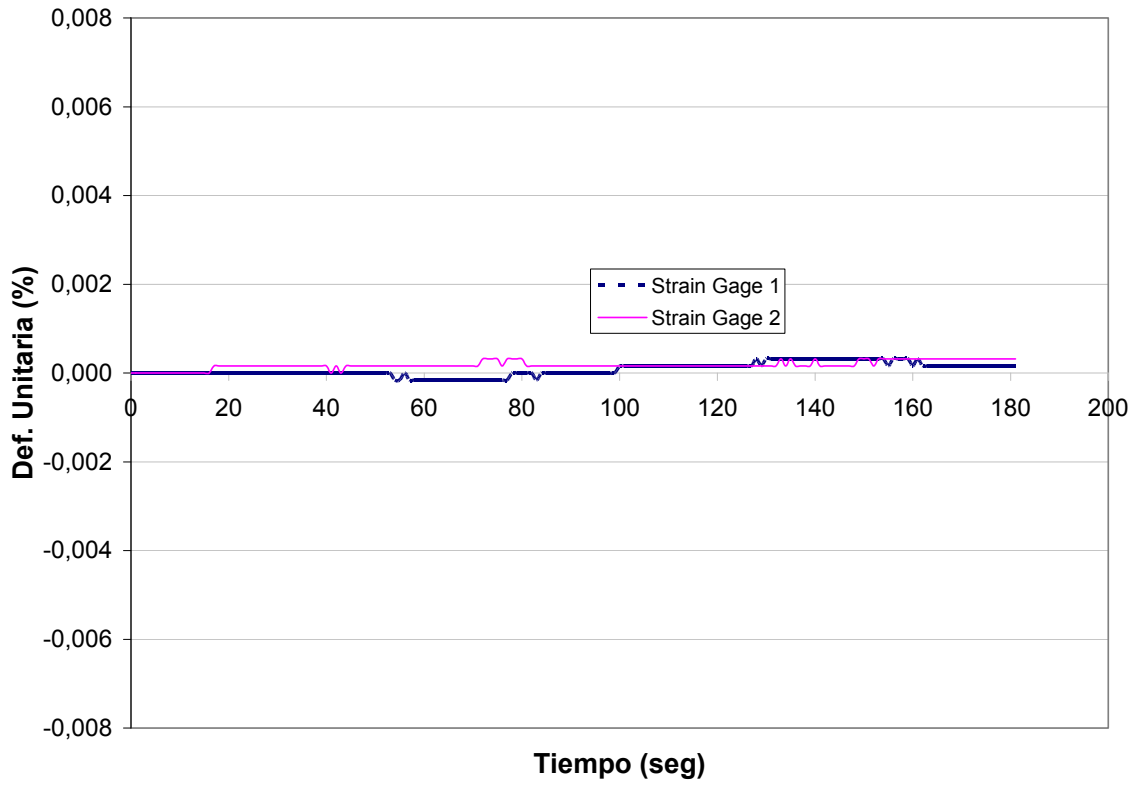


Fig. 5.4: Lecturas de strain gages en laboratorio, instalados en barra 06 (usada en ensayo AR 08-sep-08), sin aplicación de carga.

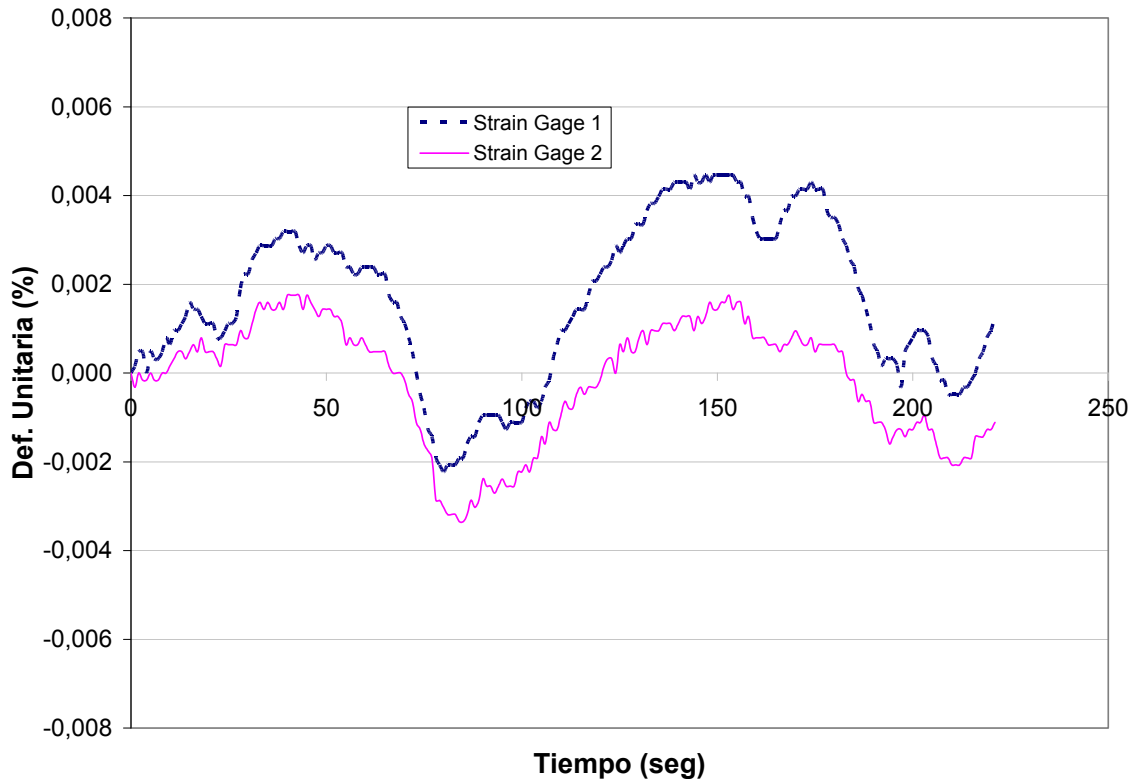


Fig. 5.5: Lecturas de strain gages en terreno, instalados en barra 06 (usada en ensayo AR 08-sep-08), justo antes de comenzar ensayo.

En la Fig. 5.6 y Fig. 5.7 se muestran lecturas de strain gages durante los ensayos y los promedios calculados para distintos niveles de carga aplicados, asociando las lecturas de la celda, donde se visualiza claramente el momento de aplicación de cargas. En estas figuras, se aprecia una variación mayor en la lectura de strain gages con respecto a las lecturas en laboratorio. Este comportamiento, se observó incluso antes de la aplicación de cargas, según las lecturas de prueba tomadas. Fue además, exclusivo de las lecturas de strain gages, ya que las lecturas de prueba en la celda de carga, mostraron un comportamiento en terreno similar a las lecturas sin carga obtenidas en laboratorio. Una posible explicación de esta variación en las mediciones de strain gages desde el laboratorio al terreno puede ser, entre otros factores, la acción del material con que se ancla la barra a la losa una vez instalada (materiales de adherencia anclaje-losa), ya sea hormigón, resina o grout. Estos materiales, en su estado inicial (semi-líquido) o durante su etapa de endurecimiento (curado), pueden afectar el strain gage, dañándolo o

disminuyendo el aislamiento aplicado en un principio sobre éste o sobre los cables conectores.

Como se mencionó anteriormente, hubo ensayos donde no se recuperaron datos de deformaciones según strain gages o donde sólo se obtuvo mediciones de uno de ellos. Estos casos pueden explicarse por daños durante la instalación del anclaje en la losa, ya sea corte de cables conectores o daño del mismo strain gage (por filtraciones líquidas de los materiales de adherencia anclaje-losa, despegue de strain gages de la barra, bajo aislamiento aplicado, etc.)

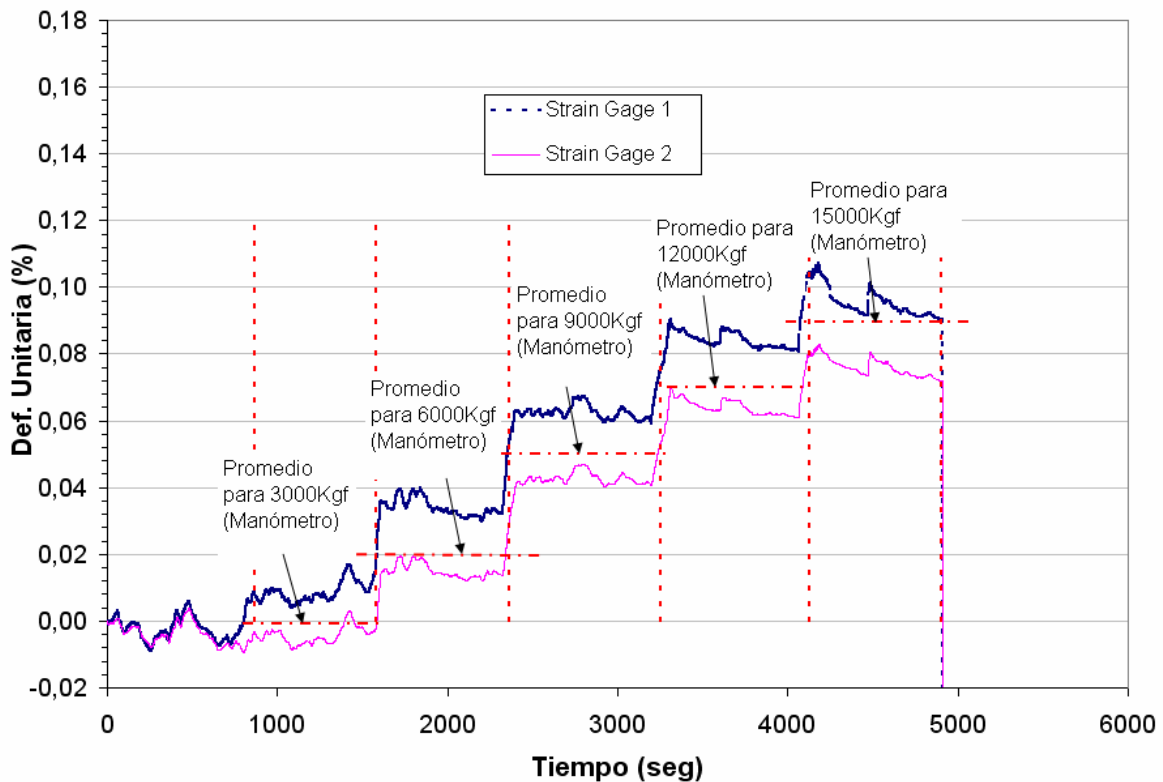


Fig. 5.6: Lecturas de strain gages durante ensayo AR 08-sep-08.

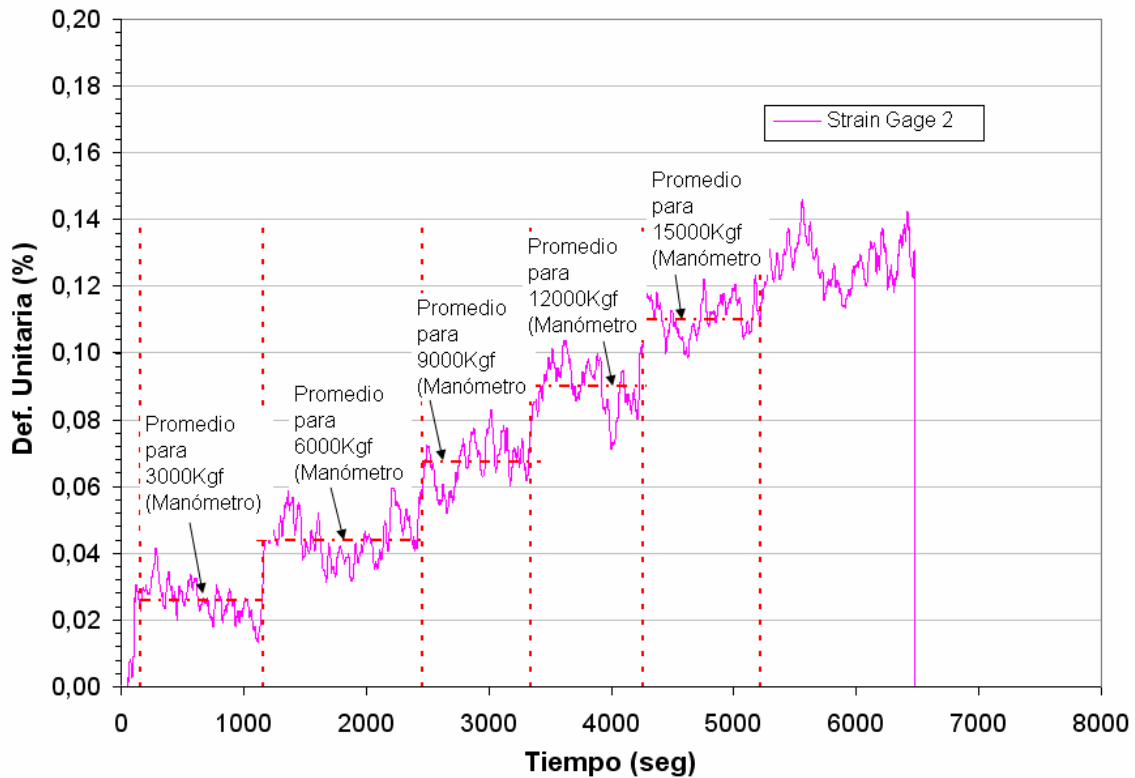


Fig. 5.7: Lecturas strain gages durante ensayo AH 26-feb-2008. Sólo se obtuvo medición de SG-2.

En forma general en los ensayos, se observa una leve disminución de deformación unitaria en cada nivel de carga por etapa, lo que induce a una pequeña disminución en la deformación unitaria. En el peor caso se registraron decaimientos de 600Kgf (5%) y de 0.03%, respectivamente. Se cree que la disminución de carga surge debido, principalmente, a un relajamiento en la placa de sujeción, la cual comienza a deformarse tempranamente con la carga aplicada, y a una leve disminución de presión en el gato hidráulico. Esto se traduce en cargas y deformaciones aplicadas no estáticas, lo que puede afectar las lecturas de la fibra óptica sensora y strain gages. Sin embargo, al ser esta situación factible en la aplicación real, resulta de interés observar la capacidad de la fibra de detectar deformaciones aún cuando existan pequeños cambios durante una lectura del sistema.

5.1.3. Calibración Fibra Óptica

Los resultados mostrados en esta sección permiten verificar las mediciones entregadas por el sistema BOTDR en condiciones de laboratorio controladas, a través del tensado de la fibra óptica pura, es decir, sin estar instalada en anclajes. Se estudiaron situaciones donde el fabricante asegura un buen desempeño del sistema (deformaciones constantes en largo mayor a la resolución espacial de 1m) para corroborar los resultados entregados por éste, mediante la comparación con mediciones de deformación alternativas proporcionadas por un extensómetro y dos diales calibrados. Se muestran además, resultados de ensayos donde el largo de fibra tensado fue levemente menor a la resolución espacial, con el objetivo de analizar su efecto sobre las mediciones.

Para el análisis de datos, se escogieron puntos de observación a lo largo de la fibra óptica, para evaluar la evolución de éstos durante el ensayo. Los puntos llamados “Ref” indican una posición en la zona de fibra embossing sin tensar, y fueron utilizados como referencia. Esta zona sin tensar fue identificada a través del software *ADVANTEST N8510*[®], coincidiendo con la información del mapeo y el desfase conocido, la cual indicó que dicha ubicación correspondió efectivamente a una zona sin tensión. Los puntos denotados como “M1”, indican ubicaciones dentro de un tramo deformado de fibra, considerando de igual forma tanto la información entregada por el sistema BOTDR, como el mapeo manual efectuado al inicio de cada ensayo. En estos ensayos se utilizó la instalación experimental para el tensado de fibra mostrada anteriormente.

- **Ensayo de calibración 16-nov-2007**

En la *Tabla 5.1* se indican las ubicaciones y tramos relevantes del ensayo de calibración 16-nov-2007. La *Tabla 5.2* muestra los puntos de observación y sus respectivas ubicaciones en el sentido de avance de la fibra desde el analizador BOTDR.

Tabla 5.1: Tramos del ensayo según mapeo. Datos ensayo de calibración 16-nov-2007.

Descripción	Unidad	Valor
Inicio fibra tensada	(m)	9,32
Fin fibra tensada	(m)	11,38
Largo inicial fibra tensada (antes de polea)	(m)	2,06
Tramo vertical después de polea	(m)	0,17
Largo total tensado	(m)	2,23

Tabla 5.2: Posición absoluta de puntos de observación. Datos ensayo calibración 16-nov-2007.

Punto de observación	Distancia (m)
Ref	7,30
M1	9,63

La Fig. 5.8 muestra la correlación entre la deformación unitaria entregada por el sistema BOTDR en el punto M1 y la deducida por dos diales ubicados en la zona de aplicación de cargas sobre la fibra. Se aprecia una correlación aceptable entre los datos, donde la medición BOTDR entrega un valor que representa un 90% de la deformación entregada por los diales.

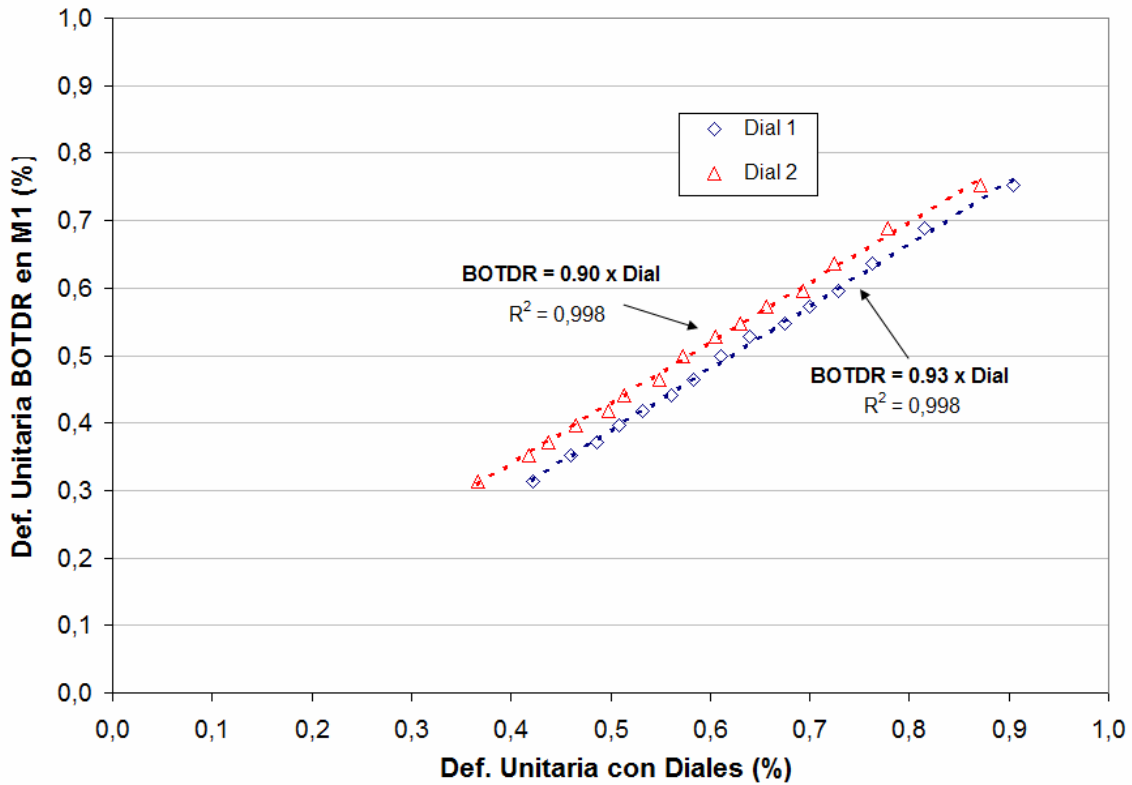


Fig. 5.8: Comparación entre deformación medida con diales y BOTDR (Largo tensado 2,23 m).
 Datos ensayo calibración 16-nov-2007.

La Fig. 5.9 muestra la variación de la deformación entregada por el sistema BOTDR en el punto de referencia, luego de repetir la medición bajo las mismas condiciones. Se aprecia que el cambio en el valor entregado no supera el 0,01%, siendo ésta la precisión del dato de deformación unitaria asegurada por el fabricante (NTT, 2007).

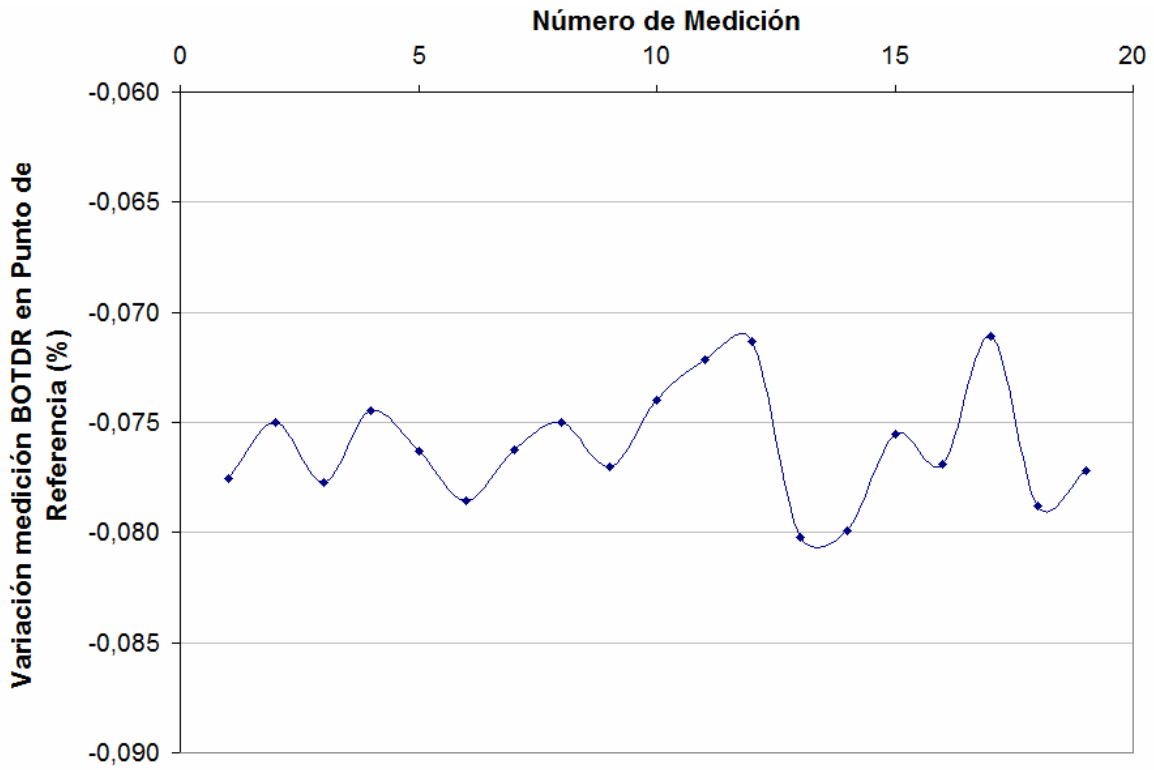


Fig. 5.9: Variación en valor BOTDR medido en punto de referencia al repetir la medición. Datos ensayo calibración 16-nov-2007.

La Fig. 5.10 muestra la correlación entre la carga aplicada y la deformación entregada por el sistema BOTDR, mostrándose una relación lineal bastante aceptable.

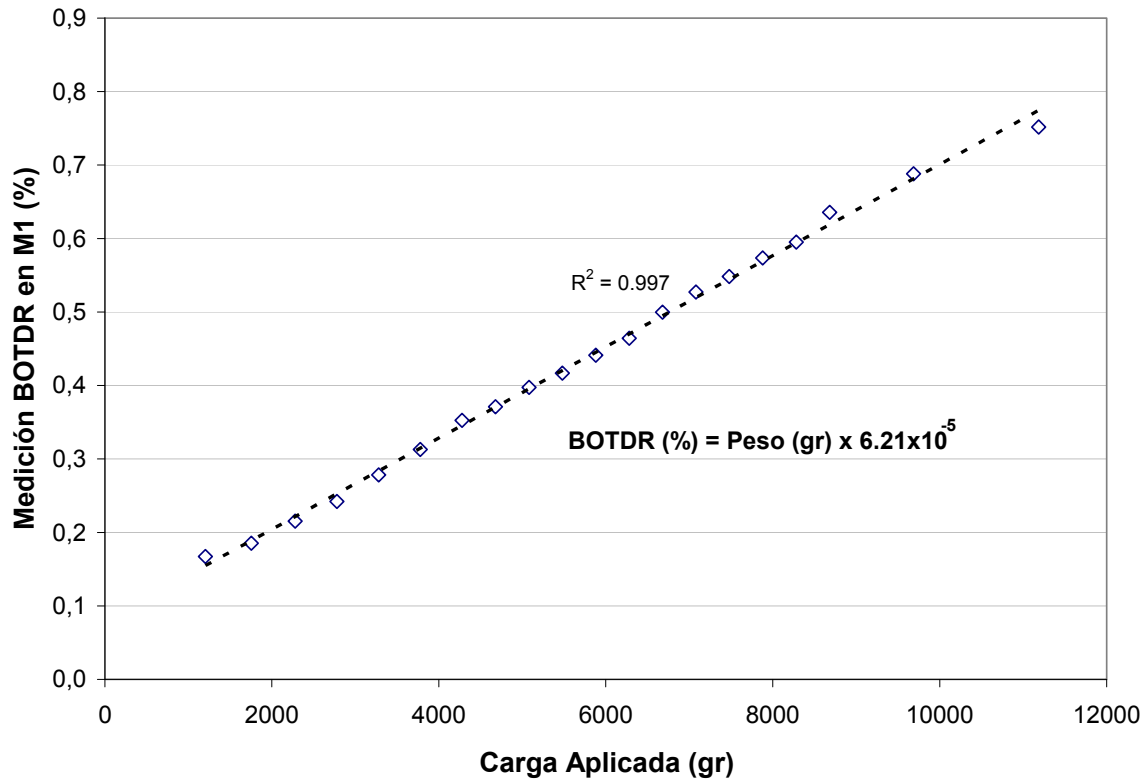


Fig. 5.10: Correlación entre carga aplicada y deformación medida en BOTDR en M1. Datos ensayo calibración 16-nov-2007.

La Fig. 5.11 muestra la relación lineal casi perfecta entre el dato BOTDR y la deformación medida mediante el extensómetro calibrado. La medición BOTDR resulta ser bastante cercana a la del extensómetro, alcanzando un 96% de ésta última. La Fig. 5.12 muestra un ejemplo de medición del extensómetro para un determinado estado de cargas, apreciándose la estabilidad de la medición.

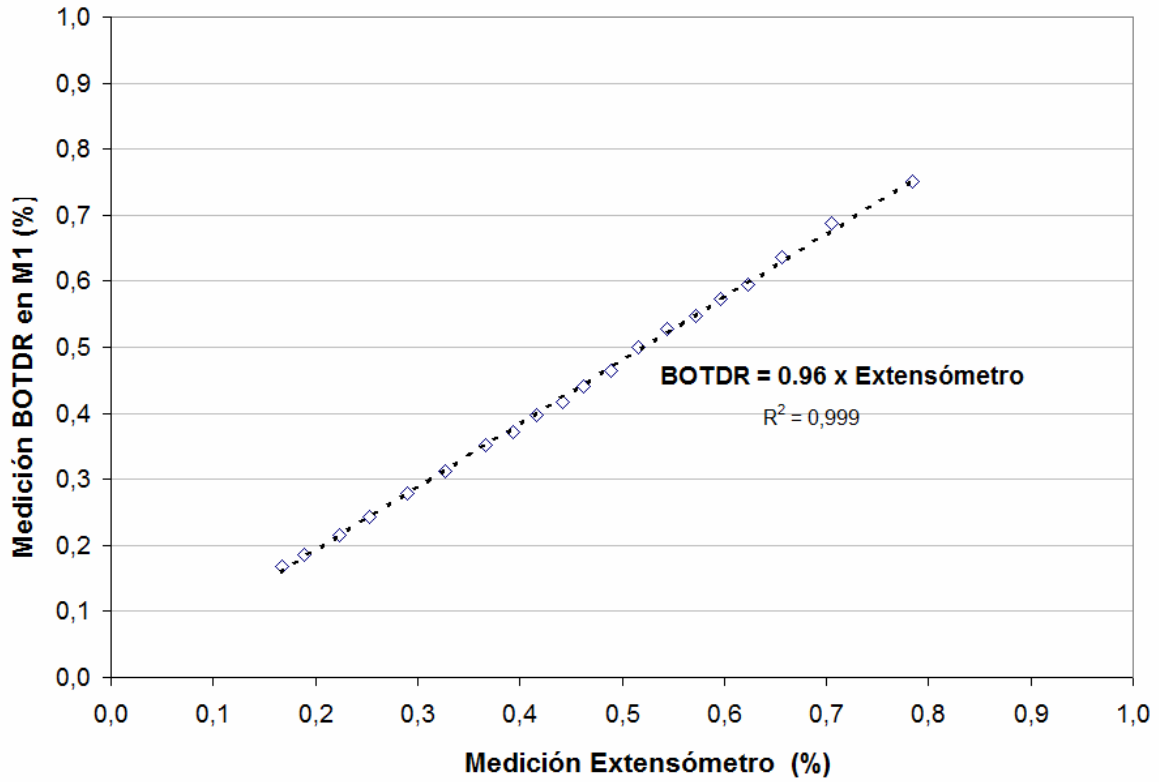


Fig. 5.11: Comparación entre BOTDR en M1 y extensómetro (largo tensado 2,23 m). Datos ensayo calibración 16-nov-2007.

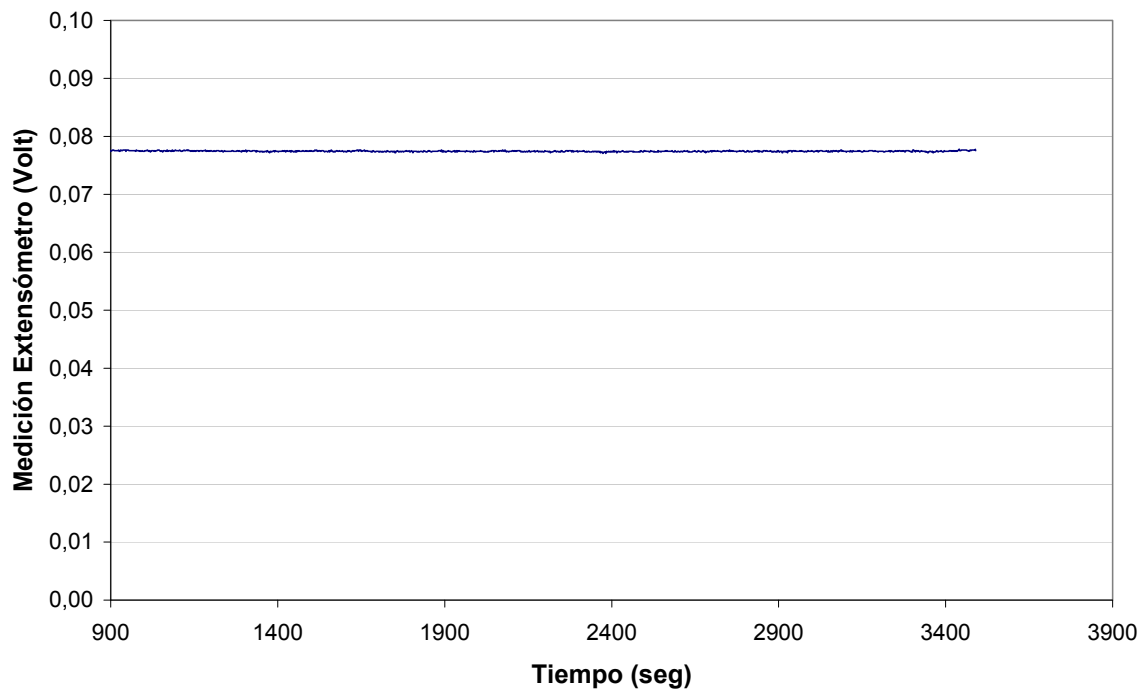


Fig. 5.12: Ejemplo de archivo medición extensómetro Datos ensayo calibración 16-nov-2007.

En la *Fig. 5.13* se muestra la variación de la medición en el punto de referencia respecto a la variación en temperatura durante el ensayo. Se aprecia gran aleatoriedad en los resultados y se observa que la máxima variación no supera el 0,01%, coincidiendo con la precisión del dato BOTDR asegurado por el fabricante. La ausencia de una correlación entre los datos, indica que variaciones de temperatura como las mostradas, parecen no afectar la medición BOTDR.

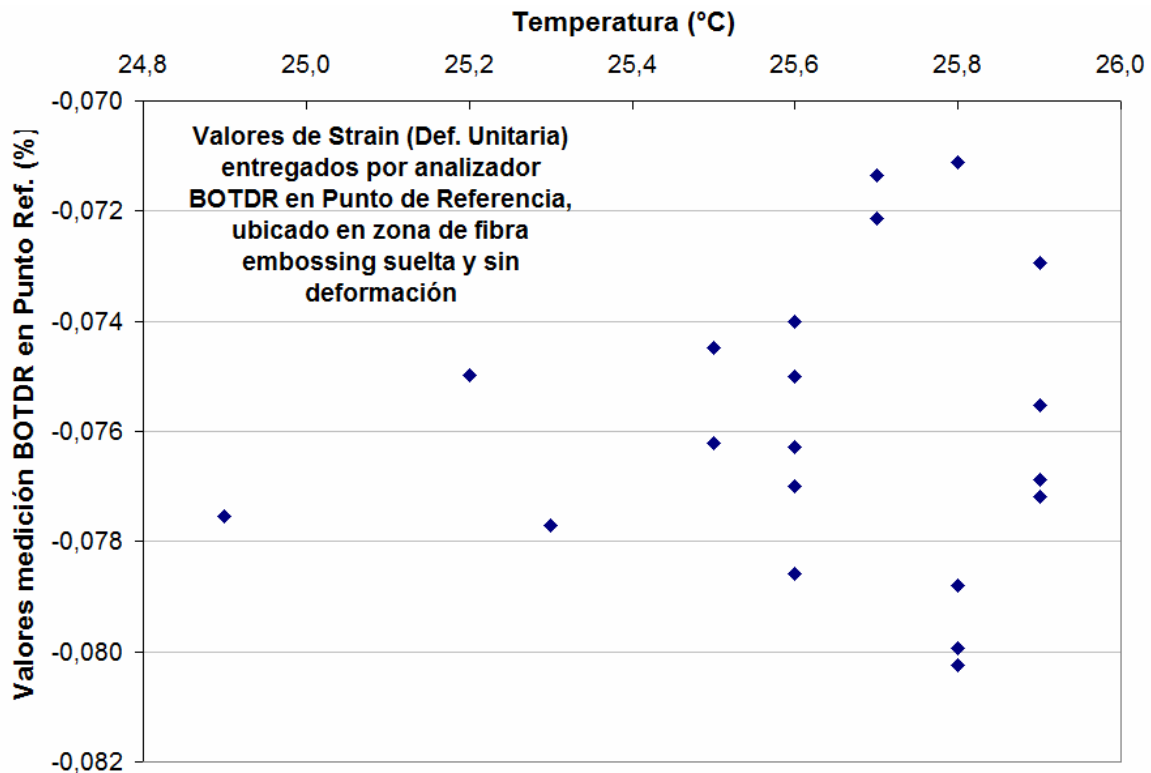


Fig. 5.13: Efecto de a temperatura en el valor de referencia (zona sin carga). Datos ensayo calibración 16-nov-2007.

- **Ensayo de calibración 21-nov-2007**

En la *Tabla 5.3* se indican las ubicaciones y tramos relevantes del ensayo de calibración 21-nov-2007. La *Tabla 5.4* muestra los puntos de observación y sus respectivas ubicaciones en el sentido de avance de la fibra desde el analizador BOTDR.

Tabla 5.3: Tramos del ensayo según mapeo manual. Datos ensayo calibración 21-nov-2007.

Descripción	Unidad	Valor
Inicio fibra tensada	(m)	8,05
Fin fibra tensada	(m)	8,87
Largo inicial fibra tensada (antes de polea)	(m)	0,82
Tramo vertical después de polea	(m)	0,17
Largo total tensado	(m)	0,99

Tabla 5.4: Posición absoluta de puntos de observación. Datos ensayo calibración 21-nov-2007.

Punto de observación	Distancia (m)
Ref	6,03
M1	8,16

La Fig. 5.14 muestra la correlación entre la deformación unitaria entregada por el sistema BOTDR en el punto M1 y la deducida por dos diales ubicados en la zona de aplicación de cargas sobre la fibra. En ella se especifica que los datos no han sido corregidos. Esto quiere decir, que no se ha eliminado ningún dato de las lecturas, salvo el dato final donde BOTDR muestra una caída a cero en los valores de deformación. Obsérvese que los últimos dos registros para cada dial, muestran datos casi verticalmente alineados, lo que afecta al coeficiente de correlación obtenido. La Fig. 5.15 es idéntica a la Fig. 5.14, pero eliminando los datos anómalos con el propósito de mejorar la linealidad (coeficiente de correlación). Esto conlleva, además, un cambio en la pendiente de la recta o la relación dato BOTDR-dial y cambios adicionales en otras relaciones mostradas más adelante. De aquí en adelante, se repetirá el mismo procedimiento para otras relaciones que incluyan los datos en M1, presentando figuras con y sin esta corrección.

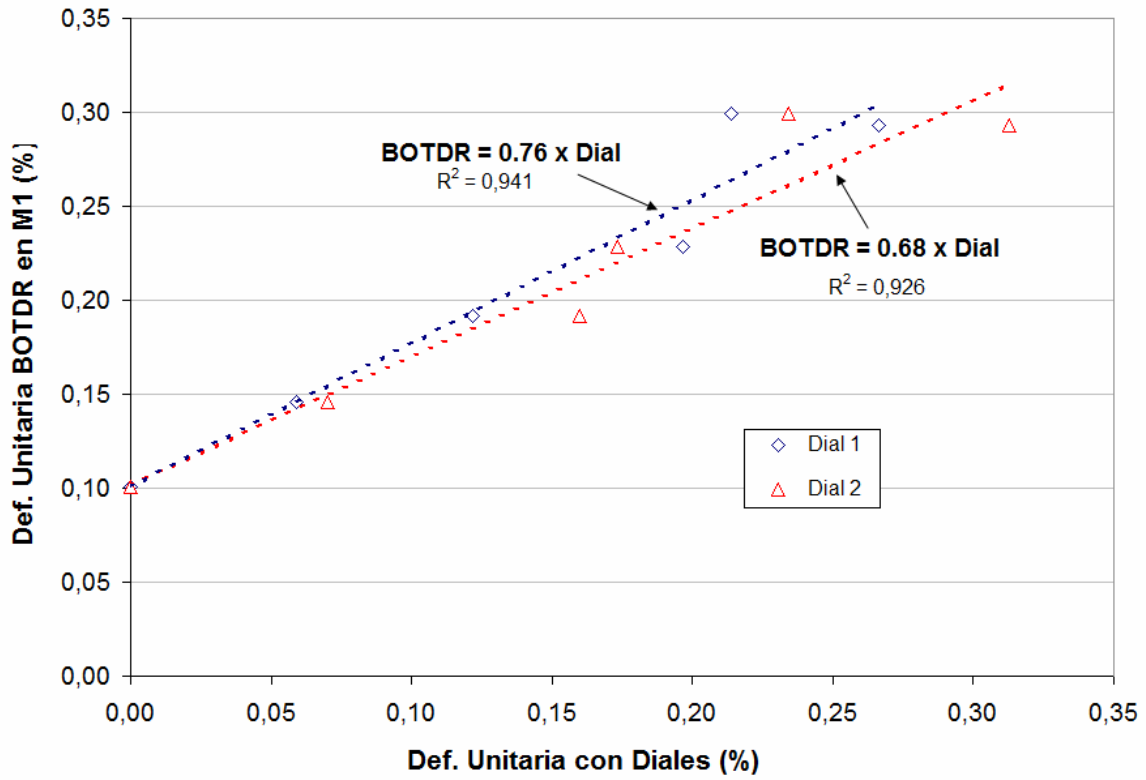


Fig. 5.14: Comparación entre deformación medida con diales y BOTDR (Largo tensado 0,99 m).
 Datos ensayo de calibración 21-nov-2007. Datos sin corregir.

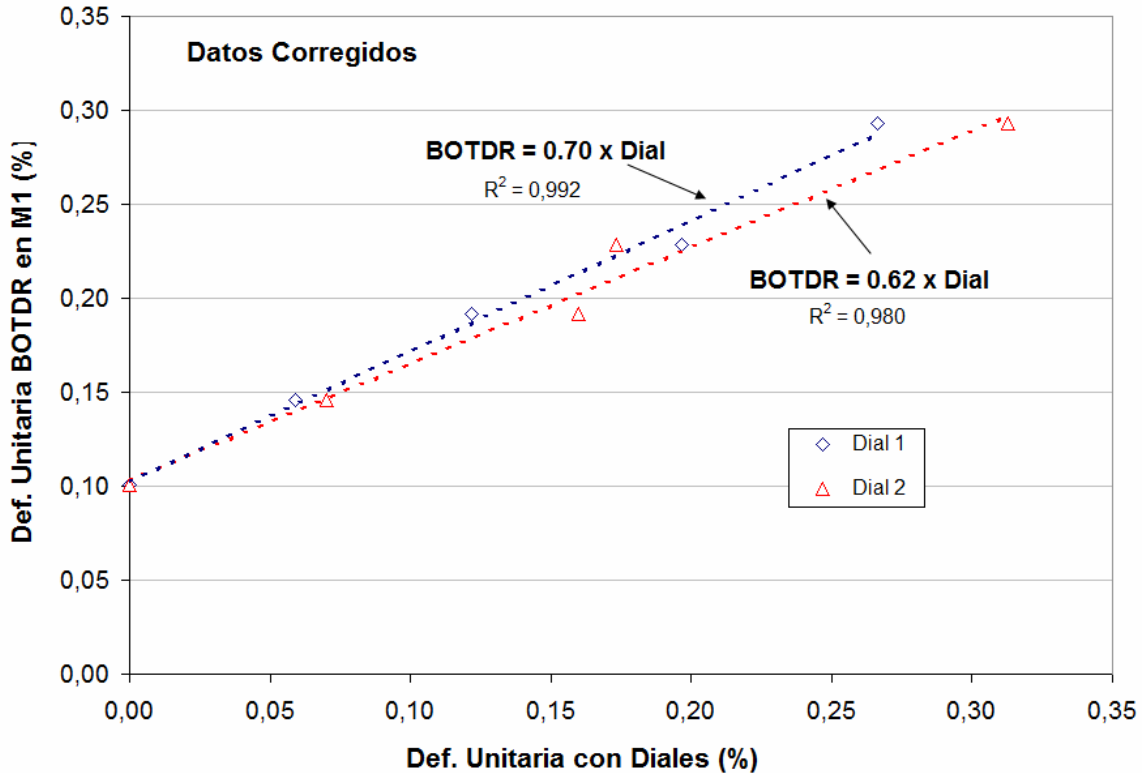


Fig. 5.15: Comparación entre deformación medida con diales y BOTDR (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 21-nov-2007. Datos Corregidos.

En la Fig. 5.15 se observa la mejora del coeficiente de correlación, el cual se acerca a la unidad, perdiéndose sin embargo, la cercanía entre las mediciones, donde el dato BOTDR representa tan sólo entre un 60 a 70% del valor de deformación deducido de los diales. De aquí en adelante, se repetirá el mismo procedimiento para otras relaciones que incluyan los datos en M1, presentando figuras con y sin la corrección mencionada.

La Fig. 5.16 muestra la variación de la deformación entregada por el sistema BOTDR en el punto de referencia, luego de repetir la medición bajo las mismas condiciones. Nuevamente se aprecia que el cambio en el valor entregado no supera el 0,01%.

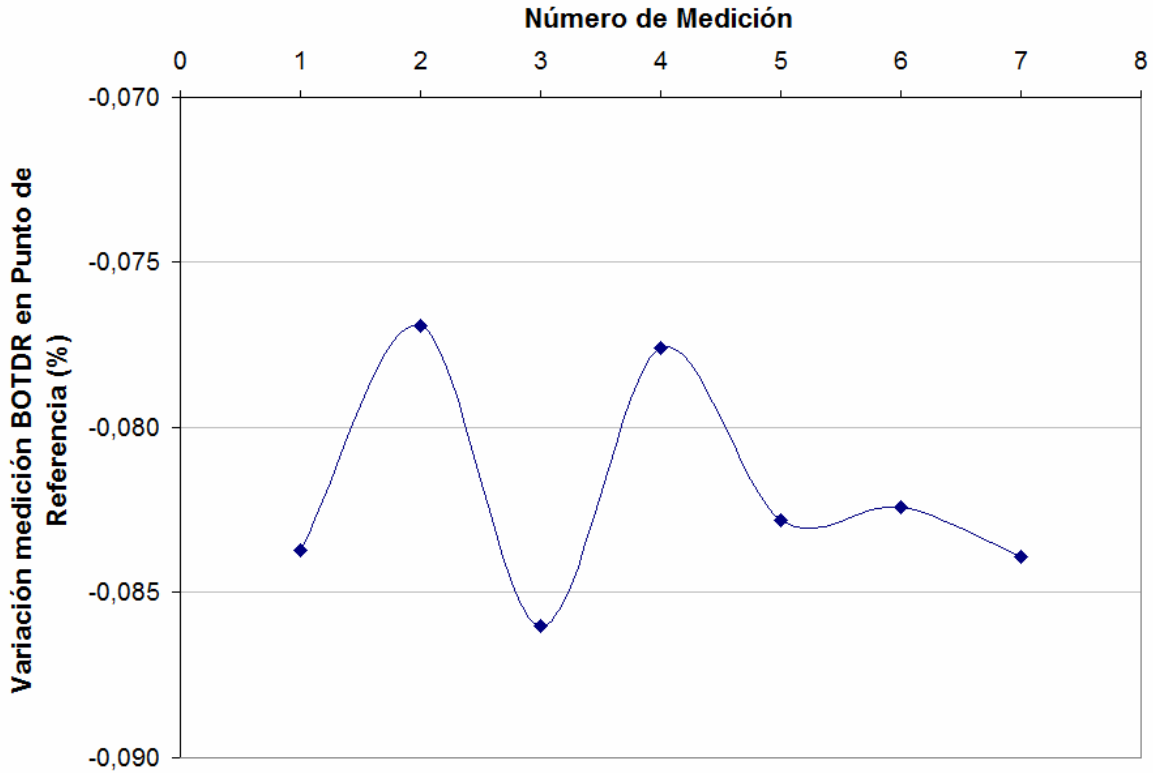


Fig. 5.16: Variación en valor BOTDR medido en punto de referencia al repetir la medición (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 21-nov-2007.

En la Fig. 5.17 se muestra la correlación entre la carga aplicada y la deformación entregada por el sistema BOTDR. La Fig. 5.18 muestra el mismo resultado con datos corregidos. En ambos casos, se aprecia una disminución del coeficiente de correlación respecto de lo obtenido para el ensayo anterior, lo que puede explicarse por la disminución del largo del tramo deformado, el cual es cercano a la resolución espacial del sistema.

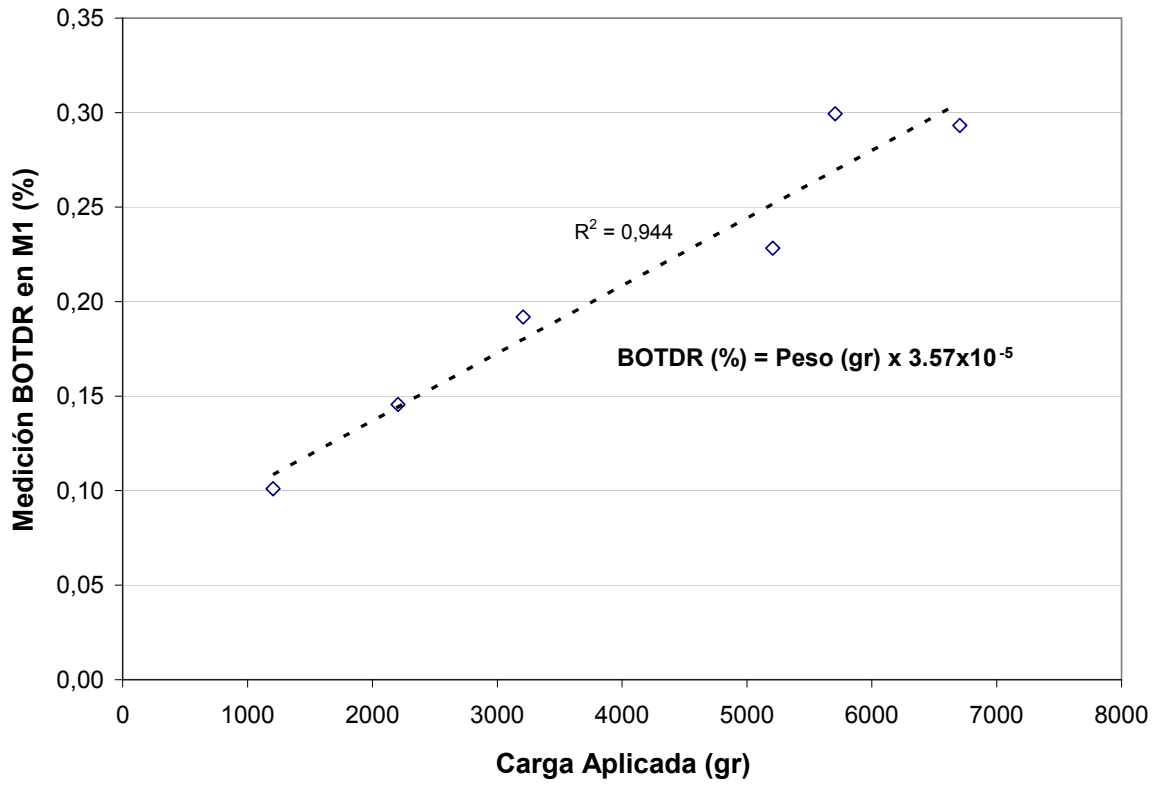


Fig. 5.17: Correlación entre carga aplicada y deformación medida en BOTDR en M1 (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 21-nov-2007. Datos sin corregir.

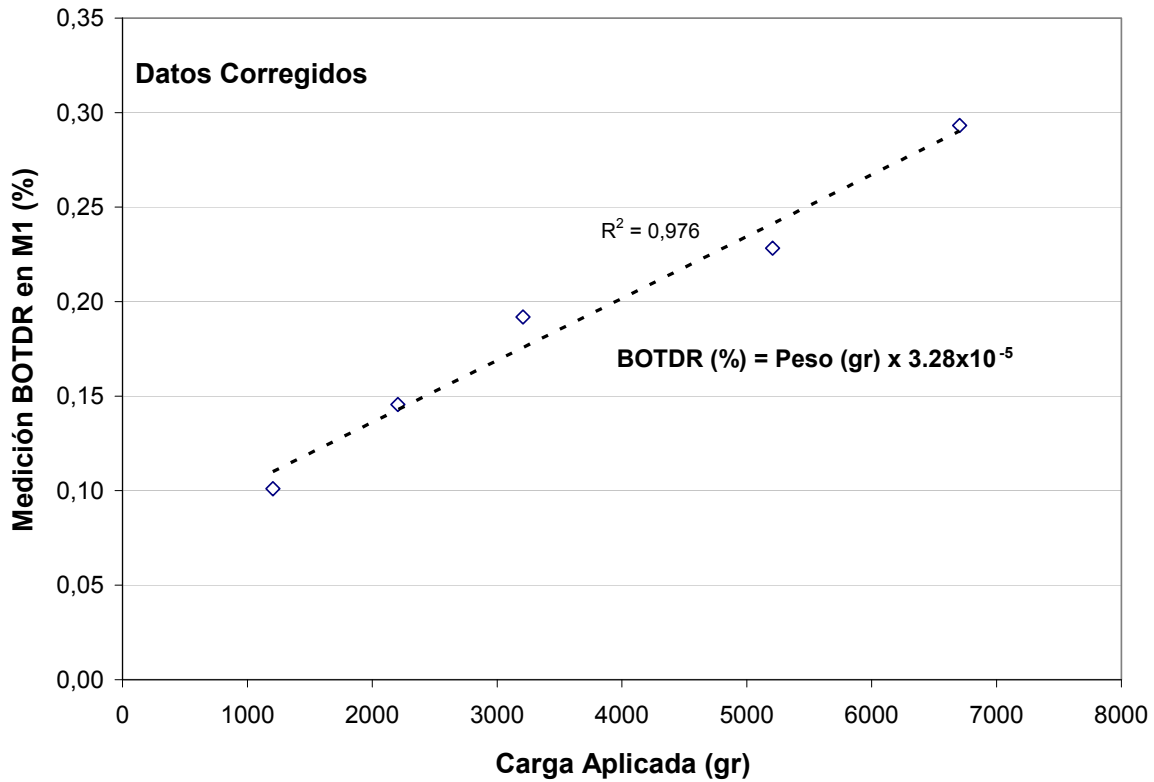


Fig. 5.18: Correlación entre carga aplicada y deformación medida en BOTDR en M1 (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 21-nov-2007. Datos corregidos.

La Fig. 5.19 muestra la correlación entre el dato BOTDR y la deformación medida mediante el extensómetro calibrado. La Fig. 5.20 muestra el mismo resultado con datos corregidos, lo que implica una mejora sustancial del coeficiente de correlación. Sin embargo, al corregir los datos, se pierde cercanía entre el dato BOTDR y la medición del extensómetro, donde la primera representa un 83% de la última. Al igual que en los resultados del ensayo anterior, la Fig. 5.21 muestra un ejemplo de medición del extensómetro para un determinado estado de cargas, apreciándose la estabilidad de la medición.

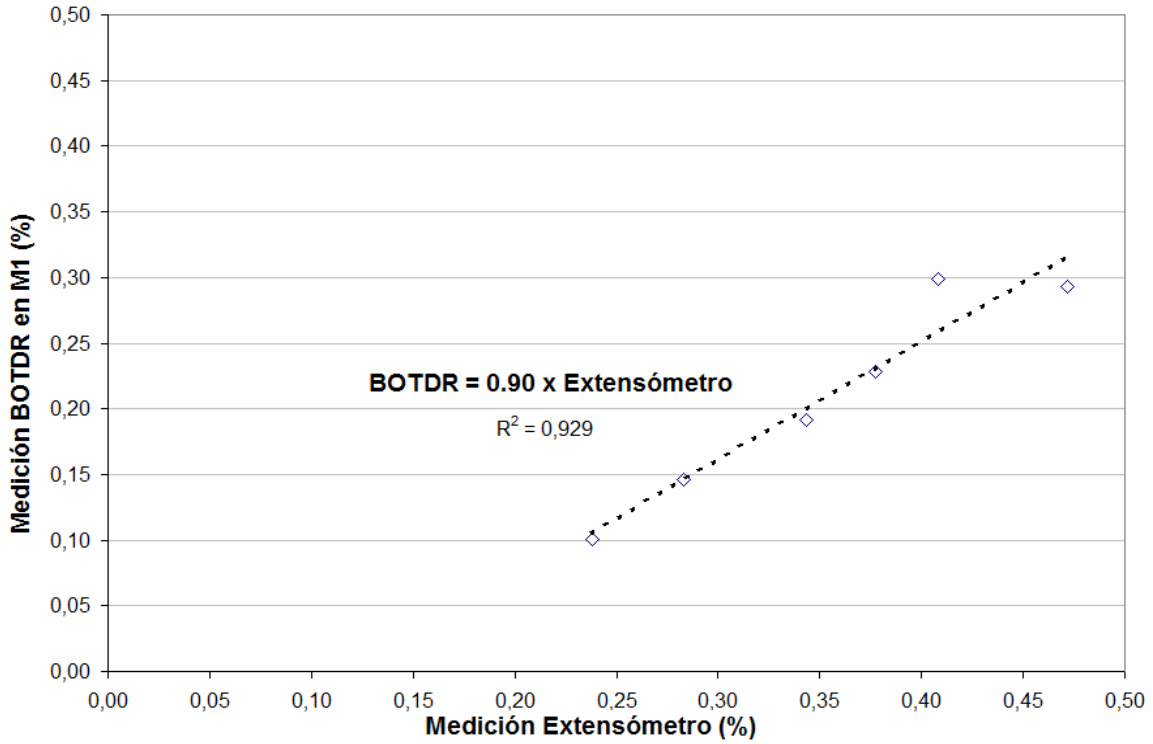


Fig. 5.19: Comparación entre BOTDR en M1 y extensómetro (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 21-nov-2007. Datos sin corregir.

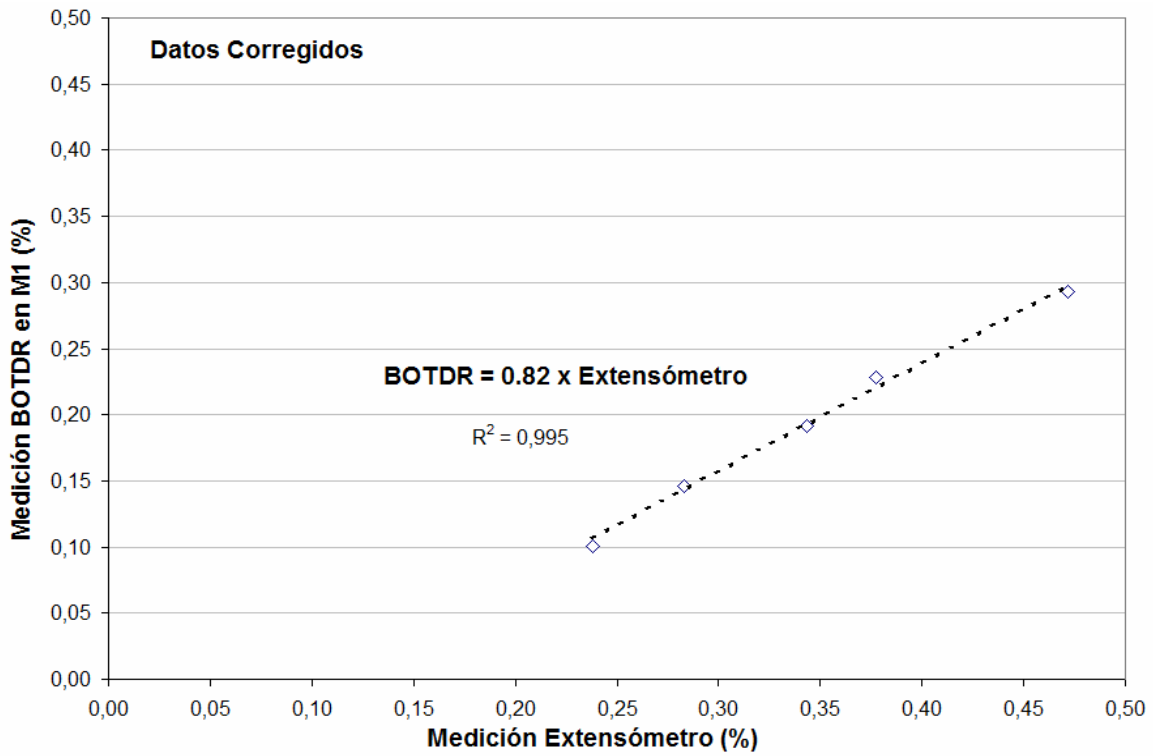


Fig. 5.20: Comparación entre BOTDR en M1 y extensómetro (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 21-nov-2007. Datos corregidos.

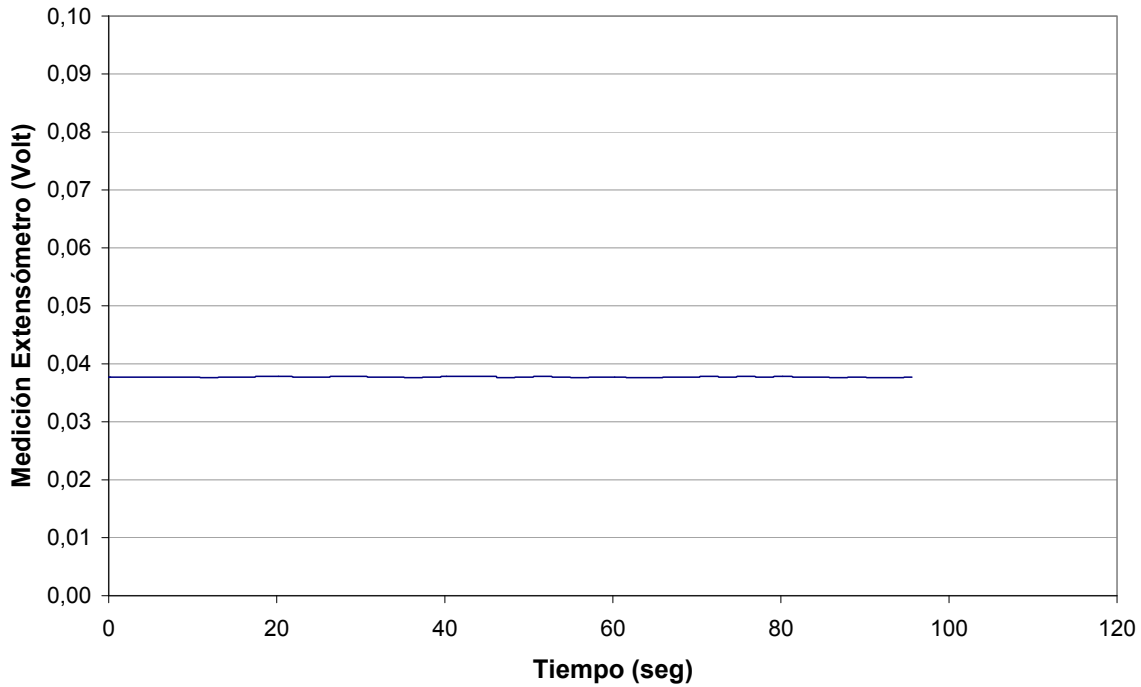


Fig. 5.21: Ejemplo de archivo medición extensómetro (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 21-nov-2007.

Las relaciones BOTDR-diales y BOTDR-extensómetro muestran ser aceptables al presentar coeficientes de correlación bastante cercanos a uno. El valor de las pendientes obtenidas en estas relaciones puede depender tanto del setup o input recomendado por el fabricante para transformar la variación de frecuencia en deformación unitaria, así como también de la calibración de diales y extensómetro (ver capítulo 3.3, *Fig. 3.10* y *Fig. 3.11*)

Análogamente al ensayo anterior, la *Fig. 5.22* muestra la variación de la deformación unitaria en el punto de referencia con la temperatura. Nuevamente se aprecia aleatoriedad en los resultados, sin que las variaciones del dato BOTDR superen el 0,01%.

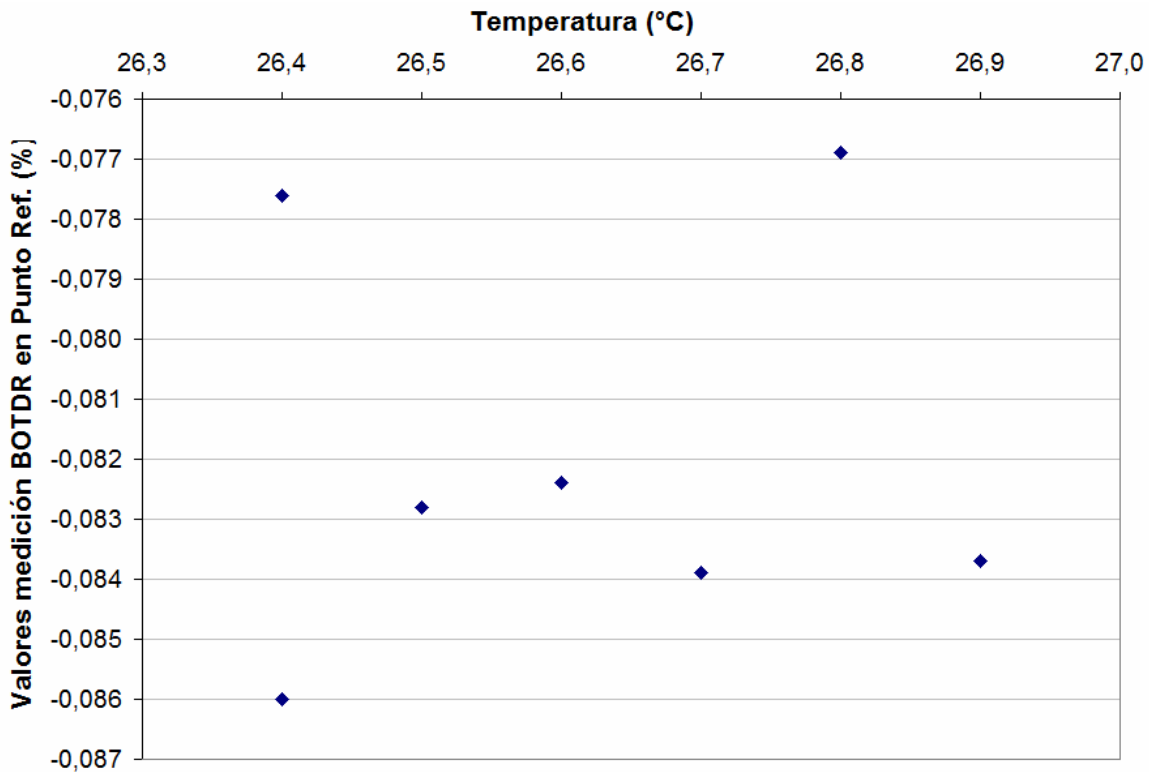


Fig. 5.22: Efecto de a temperatura en valor de referencia (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 21-nov-2007.

- **Ensayo de calibración 22-nov-2007¹**

En la *Tabla 5.3* se indican las ubicaciones y tramos relevantes del ensayo de calibración 21-nov-2007. La *Tabla 5.4* muestra los puntos de observación y sus respectivas ubicaciones en el sentido de avance de la fibra desde el analizador BOTDR.

¹ En este ensayo no se contó con la medición del extensómetro

Tabla 5.5: Tramos del ensayo según mapeo manual. Datos ensayo de calibración 22-nov-2007.

Descripción	Unidad	Valor
Inicio fibra tensada	(m)	7,00
Fin fibra tensada	(m)	7,82
Largo inicial fibra tensada (antes de polea)	(m)	0,82
Tramo vertical después de polea	(m)	0,17
Largo total tensado	(m)	0,99

Tabla 5.6: Posición absoluta de puntos de observación. Datos ensayo de calibración 22-nov-2007.

Punto de observación	Distancia (m)
Ref	5,93
M1	7,20

La Fig. 5.23 muestra la correlación entre la deformación unitaria entregada por el sistema BOTDR en el punto M1 y la deducida por dos diales ubicados en la zona de aplicación de cargas sobre la fibra. En ella se descartó un dato intermedio en el dial 1, por considerarse anómalo. En adelante, sólo se muestran figuras con datos corregidos. Las correlaciones observadas son casi perfectas, obteniéndose coeficientes de correlación que alcanzan la unidad, según las mediciones de ambos diales. Se obtiene una mejora en la cercanía entre el dato BOTDR y el deducido por los diales respecto de los resultados del ensayo anterior.

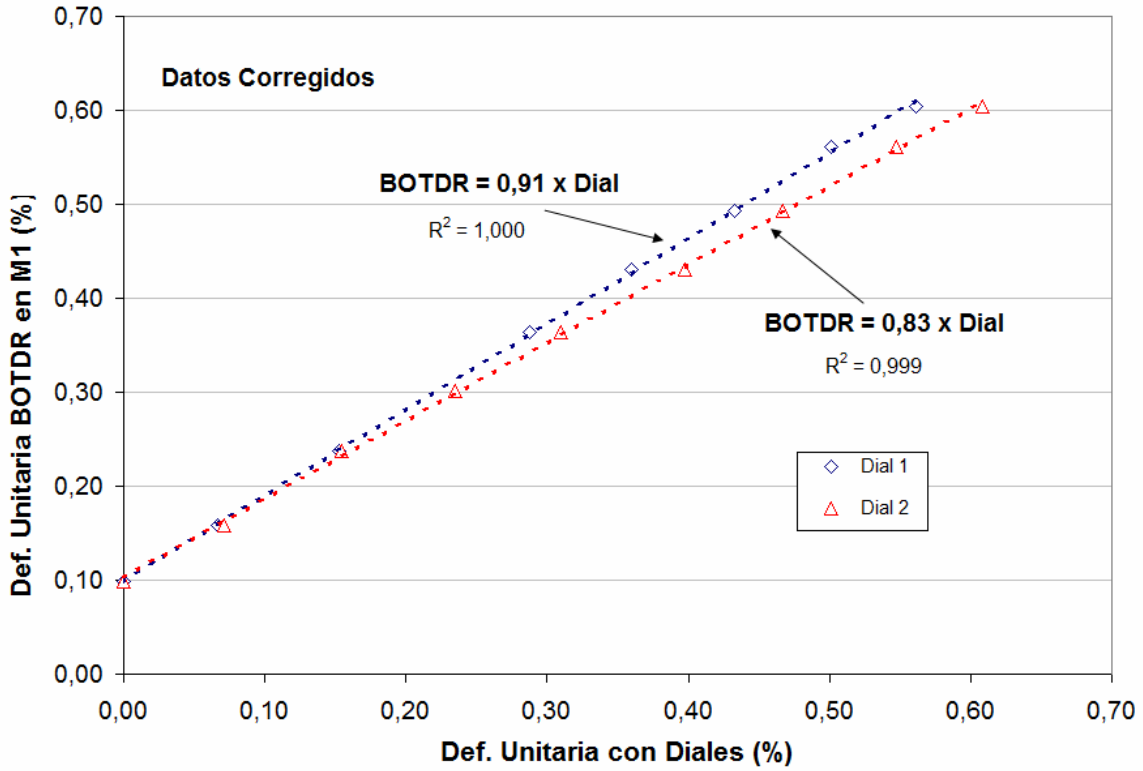


Fig. 5.23: Comparación entre deformación medida con diales y BOTDR en M1 (*largo tensado 0,99m*). Datos ensayo de calibración 22-nov-2007. Datos corregidos.

La Fig. 5.24 muestra la variación de la deformación entregada por el sistema BOTDR en el punto de referencia, luego de repetir la medición bajo las mismas condiciones. Nuevamente se aprecia que el cambio en el valor entregado no supera el 0,01%.

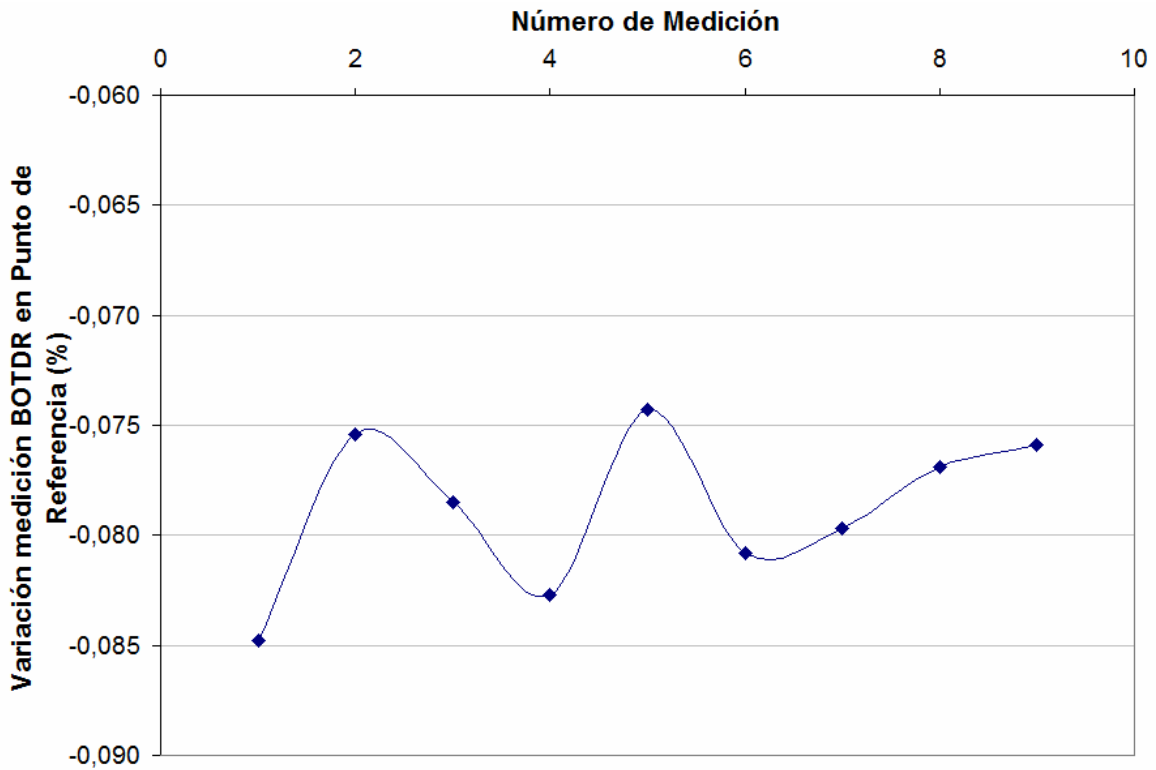


Fig. 5.24: Variación en valor BOTDR medido en punto de referencia al repetir la medición (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 22-nov-2007.

La Fig. 5.25 muestra la correlación casi perfecta entre la carga aplicada y la deformación entregada por el sistema BOTDR. Análogamente a los ensayos anteriores, la Fig. 5.26 muestra la variación de la deformación unitaria en el punto de referencia con la temperatura, donde nuevamente se aprecia aleatoriedad en los resultados, sin que las variaciones del dato BOTDR superen el 0,01%.

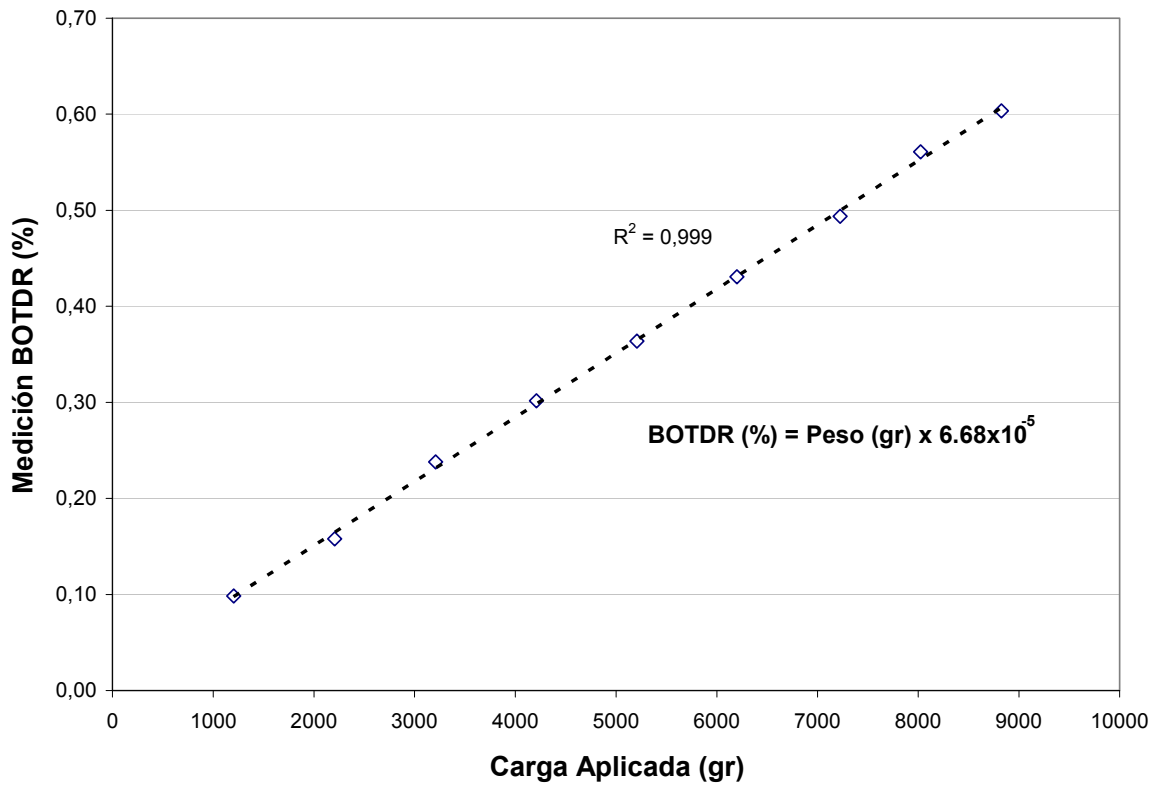


Fig. 5.25: Correlación entre carga aplicada y deformación medida en BOTDR en M1 (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 22-nov-2007.

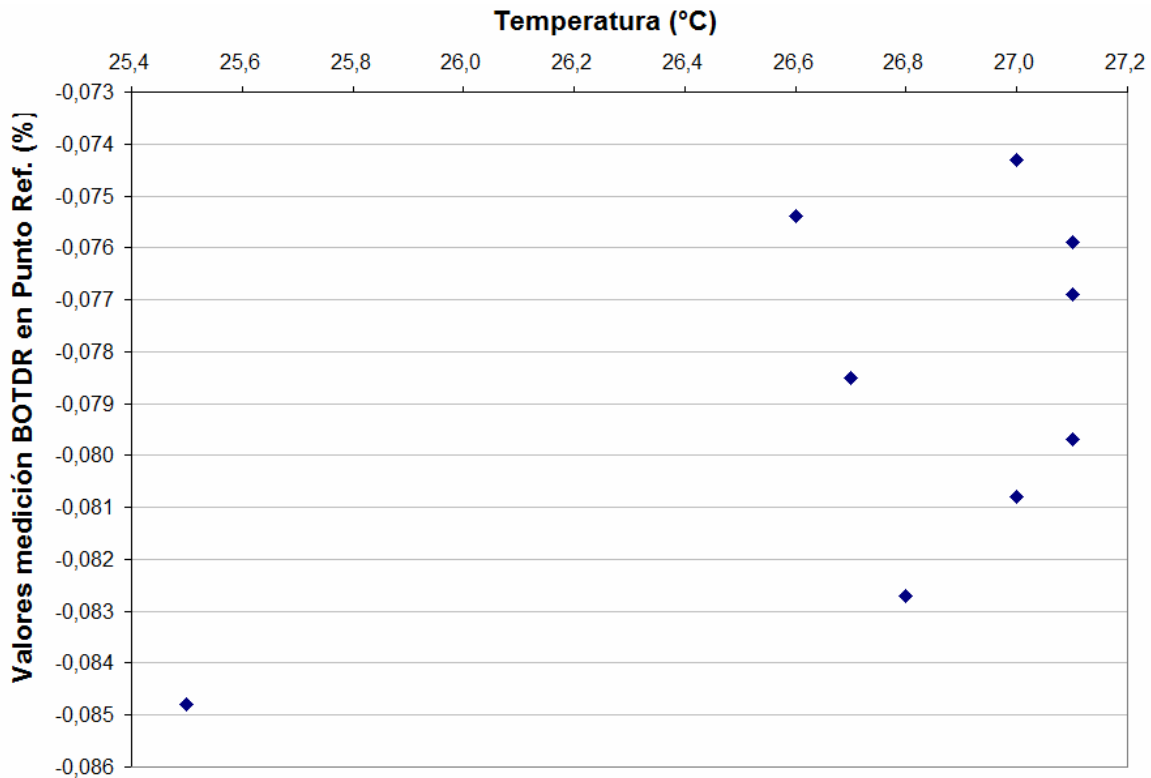


Fig. 5.26: Efecto de a temperatura en valor de referencia (largo tensado 0,99 m). Datos ensayo de calibración 22-nov-2007.

Puede notarse que el ensayo de calibración 22-nov-2007 presentó mejores resultados (mejores correlaciones) que el ensayo 21-nov-2007, a pesar de que, en general, ambos contaron con las mismas condiciones y características. La única distinción notoria entre ambos, fue el largo de fibra libre posterior a la zona tensada que se utilizó en ambos ensayos (ver Fig. 5.27). En el ensayo 21-nov-2007 este tramo fue de unos 10cm aproximadamente, mientras que en el ensayo 22-nov-2007, fue superior a la resolución espacial. En el ensayo 16-nov-2007 este tramo libre fue similar al del ensayo 21-nov-2007. Sin embargo, esta característica al parecer no afectó los resultados del primer ensayo, probablemente debido a que el tramo tensado fue bastante superior a la resolución espacial y el punto de observación en M1, se ubicó bastante alejado (más de 1m) a la singularidad que representa el corte abrupto de la fibra para el sistema. De esta manera puede concluirse sobre la conveniencia de dejar tramos libres superiores a la resolución espacial, posteriores una zona de fibra actuando como sensor de deformación, considerando además lo explicado anteriormente sobre la metodología de integración del sistema BOTDR a lo largo de la fibra. Esta recomendación fue incorporada posteriormente

en la instrumentación de anclajes. Adicionalmente, al analizar las pendientes de la Fig. 5.10, Fig. 5.17, Fig. 5.18 y Fig. 5.25, es posible observar que existe similitud entre las pendientes obtenidas de la relación *medición BOTDR (%) versus carga aplicada* (ambas de $6,5 \times 10^{-5} \%$ /gr, aproximadamente), para los ensayos 16-nov-2007 y 22-nov-2007. En cambio, el ensayo 21-nov-2007 presenta un valor bastante inferior ($3,3 \times 10^{-5} \%$ /gr). Esta diferencia, también puede ser explicada por la fibra libre final o la lejanía al corte del punto de observación, a diferencia de lo ocurrido en el ensayo 21-nov-2007, donde el punto de observación se situó cercano a la singularidad presentada por el corte de fibra.

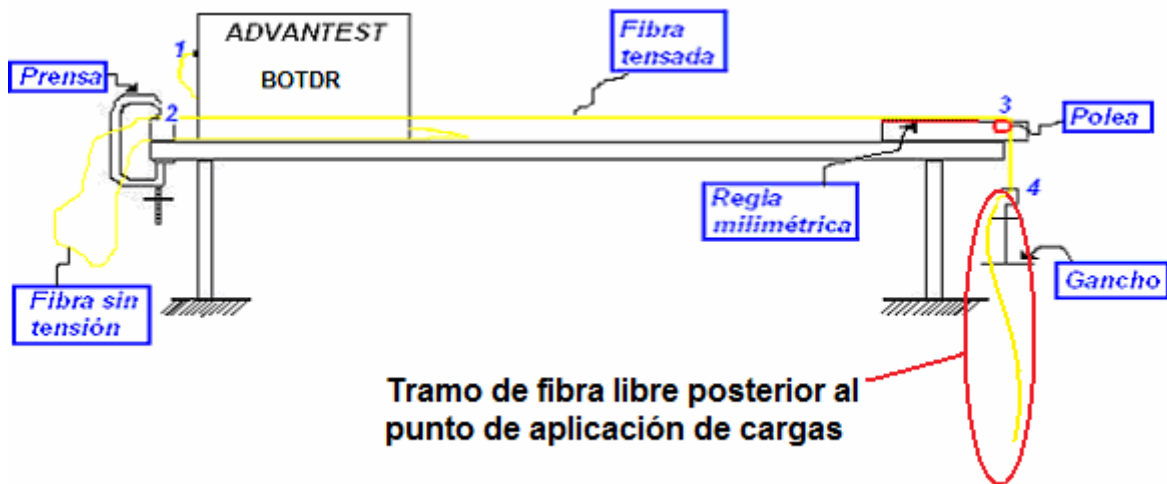


Fig. 5.27: Tramo de fibra libre (largo variable) posterior al punto de aplicación de cargas en ensayos de calibración.

5.2. Metodologías de Análisis del Resultado BOTDR

Como se muestra a continuación, las mediciones efectuadas por el sistema BOTDR dejan de ser confiables cuando las condiciones de deformación aplicada sobre la fibra difieren de las mostradas en la sección anterior, al no ser constantes y al tener longitudes menores a la resolución espacial. Los anclajes utilizados como sistema de soporte en túneles, tienen largos de trabajo menores a 1m, por lo cual fue necesario realizar ensayos en pernos de anclaje considerando esta condición. Se planteó entonces la necesidad de rescatar la mayor cantidad de información y poder re-estimar la deformación aplicada en la fibra en dichos casos, es decir, cuando el sistema BOTDR no fue capaz de entregarla directamente. En la presente sección, se evalúan metodologías

de análisis e interpretación de resultados obtenidos a lo largo de la investigación, para cumplir con este objetivo. Se estudian resultados de ensayos de anclajes en laboratorio y terreno entregados por el sistema BOTDR.

5.2.1. Metodología manual de análisis de resultados

Al analizar los resultados de deformación unitaria mediante BOTDR, de los ensayos en pernos; se observó en general señales ruidosas. Esto ocurrió tanto en la visualización de espectros (donde sus formas se hacían más irregulares y sus *peaks* más difusos), como en la distribución de deformación entregada por el sistema (ver *Fig. 5.28*), la cual no representó los valores entregados por los strain-gages. La deficiente calidad de la deducción de deformación unitaria por el sistema, se presentó con frecuencia en los ensayos de pernos en terreno, y en particular en los de tipo B, los cuales poseen menores tramos de fibra deformada (del orden de 60cm), y los de tipo AH, que fueron confeccionados de manera bastante distinta al resto de los pernos ensayados en terreno. En los casos de ensayos de laboratorio (ensayos tipo L), los resultados de deformación entregados parecen aceptables por ciertos tramos, lo que se explica porque contaron con largos de fibra deformada cercanos a la resolución espacial. Al intentar hacer un retro-análisis del origen de estos resultados, se analizó el espectro de frecuencias, observando que en muchos casos el software no es capaz de ajustar curvas lorentzianas al espectro correspondiente al nivel de deformación, o en otros casos, entrega una curva lorentziana de ajuste que no se considera satisfactoria por motivos a explicar más adelante¹. En aquellos casos, se procedió a buscar manualmente datos aceptables que reprodujeran de mejor forma los resultados esperados. Este procedimiento dio origen a distintos métodos de análisis (ver *Tabla 5.7*) los que son estudiados posteriormente en este trabajo.

¹ Al “mal ajuste” de la curva lorentziana se le conoce como “outlier”.

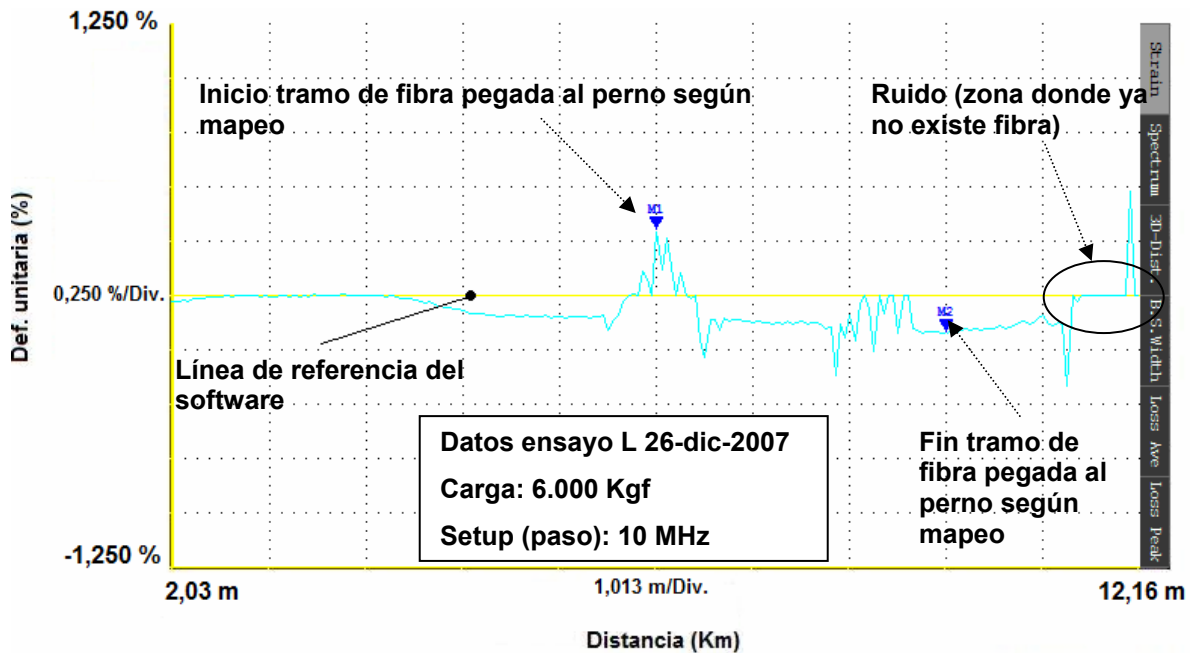


Fig. 5.28: Perfil de deformación deducida por sistema BOTDR. Ensayo L 26-dic-2007, 6000Kgf.

La Fig. 5.28 muestra un ejemplo del perfil de deformación entregado por el sistema BOTDR en ensayos de pernos de anclaje. En ella se indica además la ubicación según mapeo, del inicio y fin del tramo de fibra pegada al perno. También se indican la línea horizontal de referencia para el software y la zona donde ya no existe fibra, la cual además presenta peaks que sólo indican ruido de la señal. El caso mostrado corresponde al ensayo en laboratorio L 26-dic-2007 para una carga aplicada de 6.000Kgf. La Fig. 5.29 muestra el perfil para una carga de 15.000Kgf. En esta figura puede apreciarse que la calidad de la deformación entregada por el software mejora, obteniéndose un nivel más estable de deformación. Además, pueden apreciarse con claridad dos tramos de fibra tensados, lo que concuerda con lo esperado según la instrumentación del perno. Como se mostró anteriormente, la causa de obtener una mejora en la deducción de deformación para cargas altas puede ser explicada por el mayor desplazamiento del espectro asociado a la deformación, respecto del original. El segundo tramo de fibra (a la derecha), continúa mostrando caídas producto del desajuste o ruido presente en las curvas de espectros en esa zona, como se muestra a continuación.

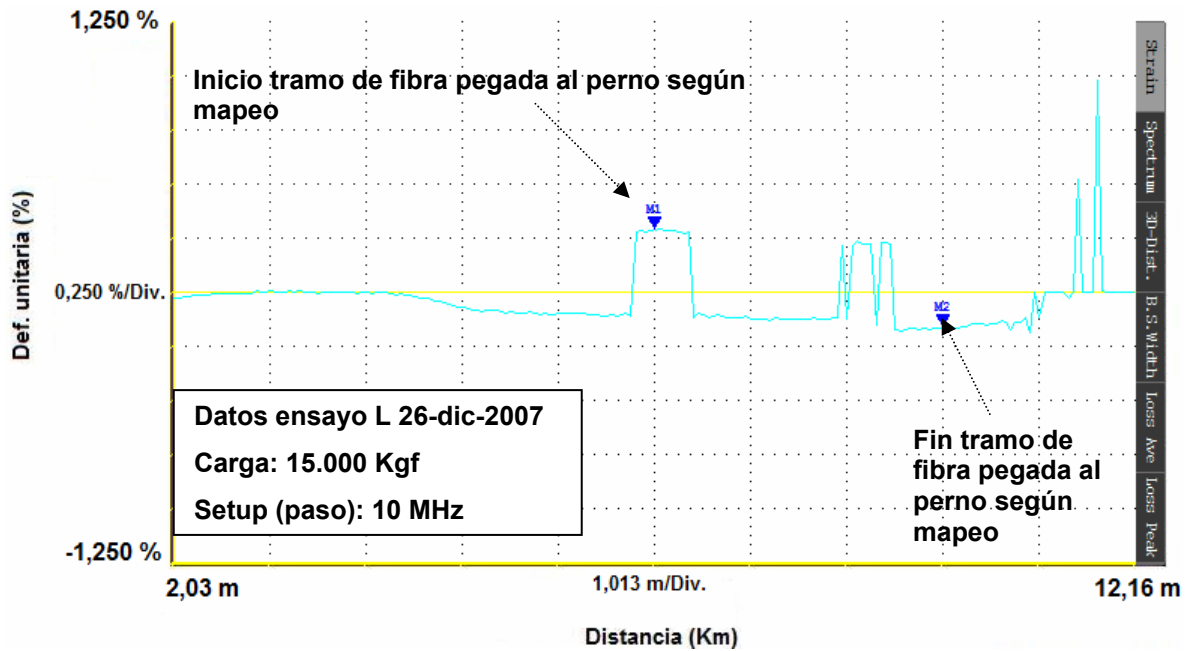


Fig. 5.29: Perfil de deformación deducida por sistema BOTDR. Ensayo L 26-dic-2007, 15000Kgf.

Desde la Fig. 5.30 a la Fig. 5.32 se muestran algunas de las situaciones encontradas al observar las curvas de espectros entregadas por el software, durante los ensayos realizados en pernos de anclaje. En la Fig. 5.30 se muestra el caso en que el software no fue capaz de ajustar una curva lorentziana a la curva de espectro, lo que se interpreta como si no existiera fibra en esa zona, llevando el valor a la línea de referencia mencionada anteriormente. En esta figura se incluye además, la frecuencia esperada según la deformación indicada por strain gages, considerando la calibración usada por el sistema BOTDR para transformar cambios de frecuencia en deformación unitaria.

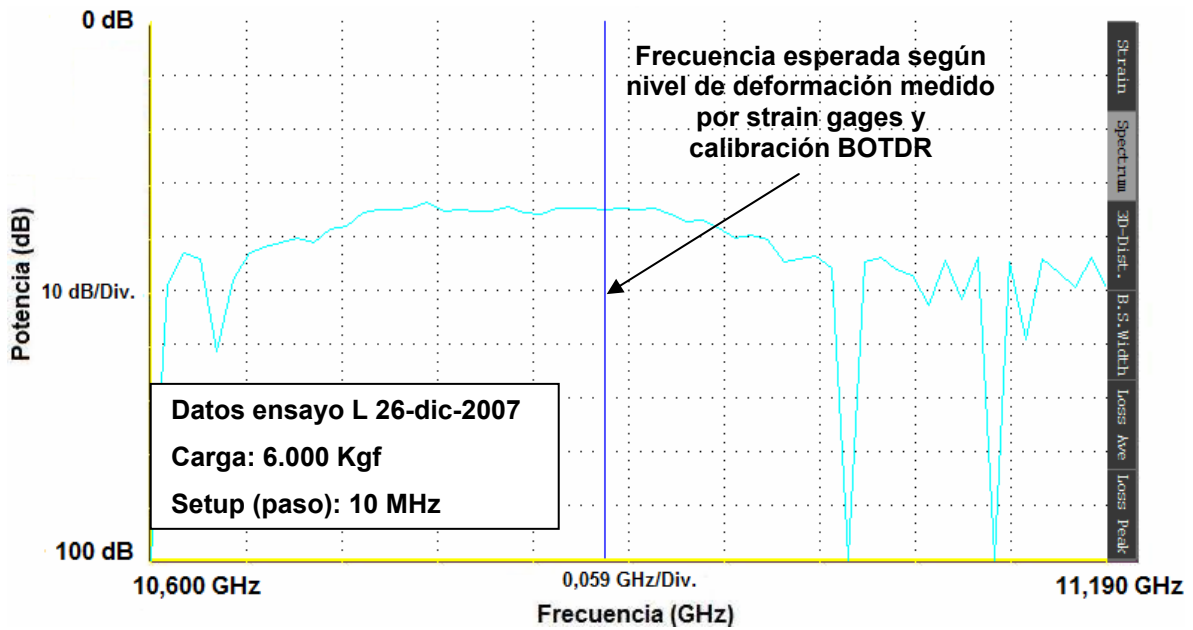


Fig. 5.30: Ejemplo donde el software no ajustó curva y donde se pueden escoger distintas frecuencias asociadas al mismo estado de deformación. Datos ensayo L 26-dic-2007, 6000kgf.

La Fig. 5.31 muestra una ubicación en la fibra (9,48m) donde se observan dos peaks de potencia distinguibles. El software siempre ajusta una lorentziana en el peak de mayor potencia. La Fig. 5.32 es similar a la Fig. 5.31, y corresponde al espectro en una posición cercana a la anterior (9,68m), sin embargo el software escoge el peak izquierdo, y debido a que hasta la posición inmediatamente anterior se escogió el peak de la derecha, el cambio repentino se traduce en una caída fuerte en el perfil de deformación obtenido. Esto ocurre reiteradas veces, alternándose el ajuste de *lorentzianas* entre el peak izquierdo y derecho, resultando un perfil de deformación como el observado en el tramo derecho de fibra tensada de la Fig. 5.29.

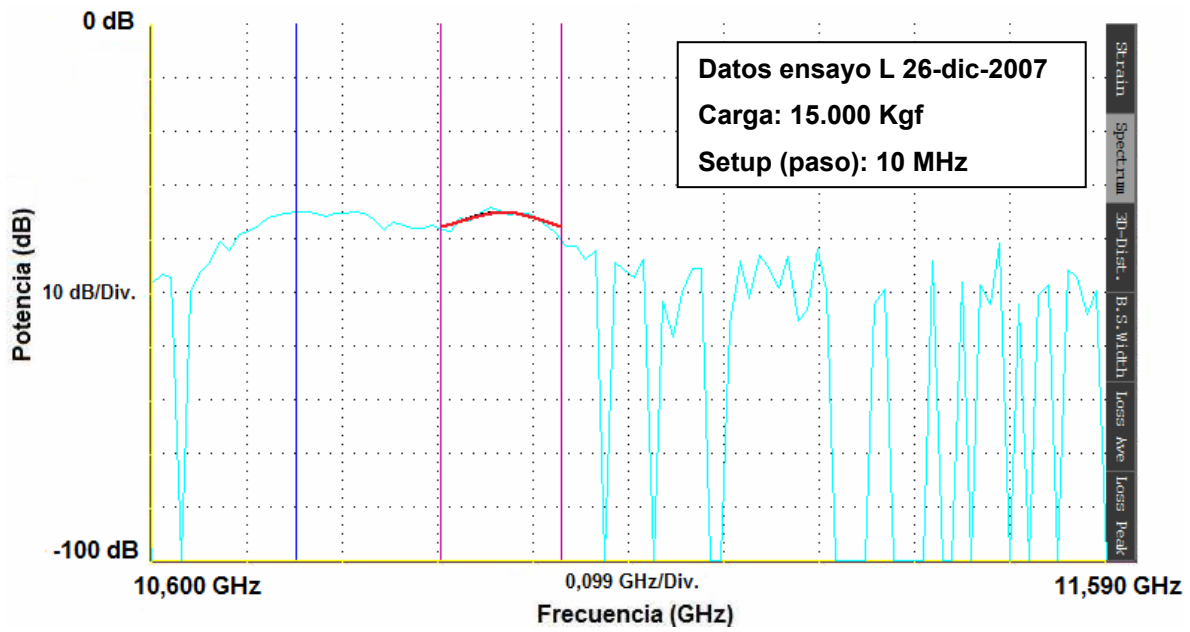


Fig. 5.31: Ejemplo de dos peaks claramente distinguibles. El programa siempre escoge donde se obtiene mayor potencia. Posición 9.48m. Datos ensayo L 26-dic-2007.

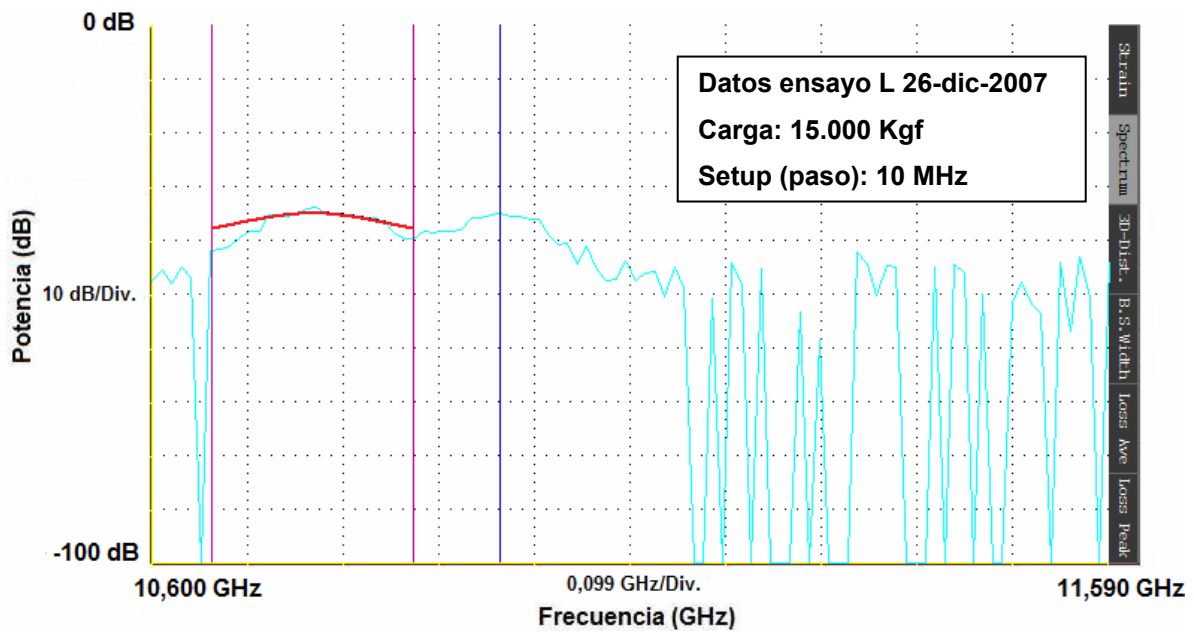


Fig. 5.32: Ejemplo de dos peaks claramente distinguibles. El programa siempre escoge donde se obtiene mayor potencia. Posición 9.68m. Datos ensayo L 26-dic-2007.

Considerando las diversas situaciones observadas, se planteó el uso de distintos métodos para deducir deformación a través del examen de las curvas de espectro, escogiendo manualmente las frecuencias características que representan, de mejor forma, el estado de la fibra. Se consideró además que los métodos planteados, idealmente, deben ser independientes tanto del observador, como de la situación particular en que se conoce el estado de sollicitación en la fibra, como ocurre en un ensayo. La *Tabla 5.7* a continuación, describe los distintos métodos propuestos.

Tabla 5.7: *Métodos de análisis de espectros de frecuencia BOTDR en forma manual*

Método	Descripción
a	Escoger frecuencia correspondiente al máximo nivel de potencia (ver <i>Fig. 5.33</i>)
b-1	Escoger frecuencias entregadas por el computador cuando queden dentro del rango de la ventana (ver <i>Fig. 5.34</i>) o en caso contrario escoger valor de frecuencia a conveniencia.
b-2	Escoger frecuencia a conveniencia aún en casos donde el computador entregue un valor dentro de rango (que no se considera adecuado para el nivel de deformaciones esperado en el punto) y donde se aprecia más de un peak distinguible. De no ser esos casos, usar el entregado por el computador.
b-3	Casi idéntico a caso b2, pero cambiando algunos valores donde, según el método anterior, se utiliza la frecuencia entregada por el computador, debido a que está dentro de rango y se distingue sólo un peak. Se cambiaron estos datos escogiendo arbitrariamente, lo que afectó particularmente a los valores para 6000kgf (mejorándolos).
c	Escogiendo valores promedio cuando se apreciara más de un peak o usando los entregados por el computador cuando apareciera sólo un peak claramente distinguible
d	Igual a caso a, pero usando los valores del computador cuando fue posible.

A continuación desde la Fig. 5.33 a la Fig. 5.36 se explica gráficamente las características que definen y distinguen a los métodos propuestos. La Fig. 5.33 muestra cómo el *método a* escoge la frecuencia asociada a la potencia máxima, a diferencia del *método d*, que escoge como frecuencia característica a la deducida por sistema BOTDR, ya que el ajuste de la curva *lorentziana* queda dentro del rango de frecuencias escogido como *input* (ventana de la figura).

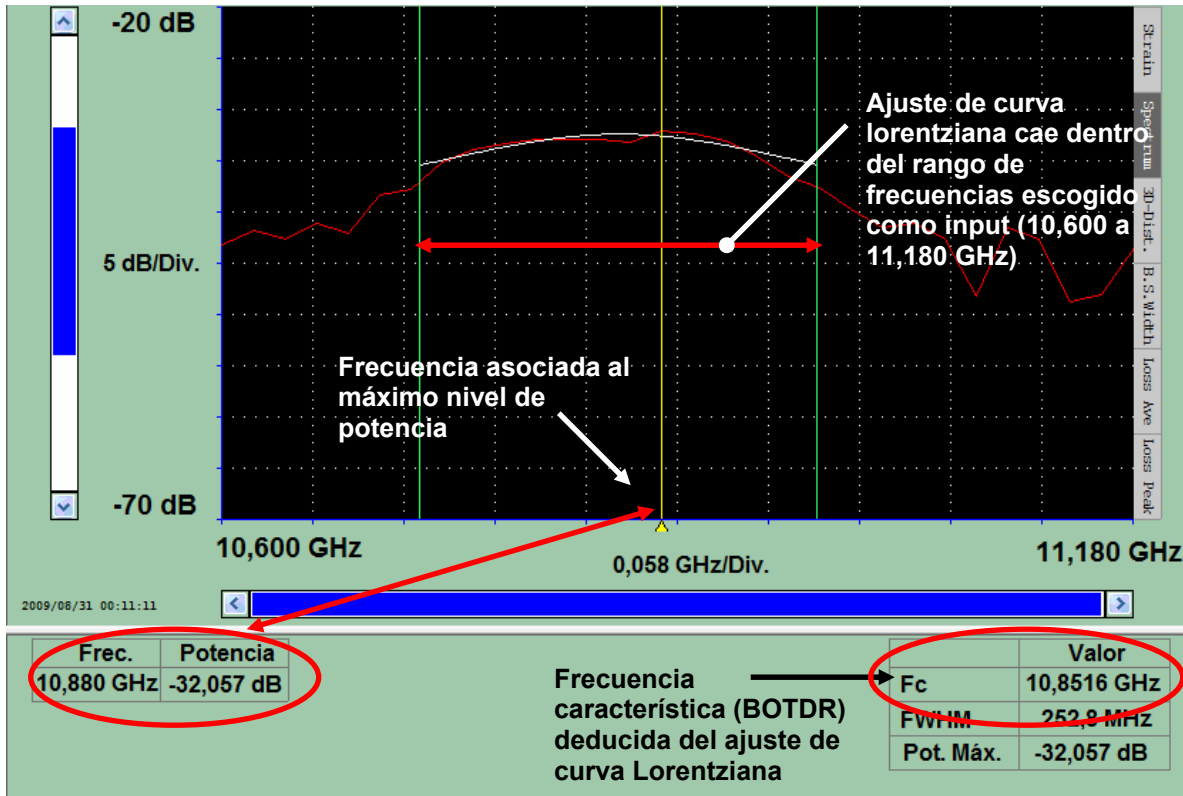


Fig. 5.33: Explicación método a. Ensayo L 26-dic-2007, 3000Kgf, paso 20MHz.

La Fig. 5.34 muestra la diferencia entre el *método b1*, que escoge la frecuencia característica deducida por sistema BOTDR, y el *método b2*, que escoge la frecuencia que convenga según el nivel de deformación esperado. En este caso, la frecuencia de conveniencia corresponde al segundo peak, ya que de esta manera la deformación aumenta respecto de la obtenida para un menor nivel de carga en la misma ubicación.

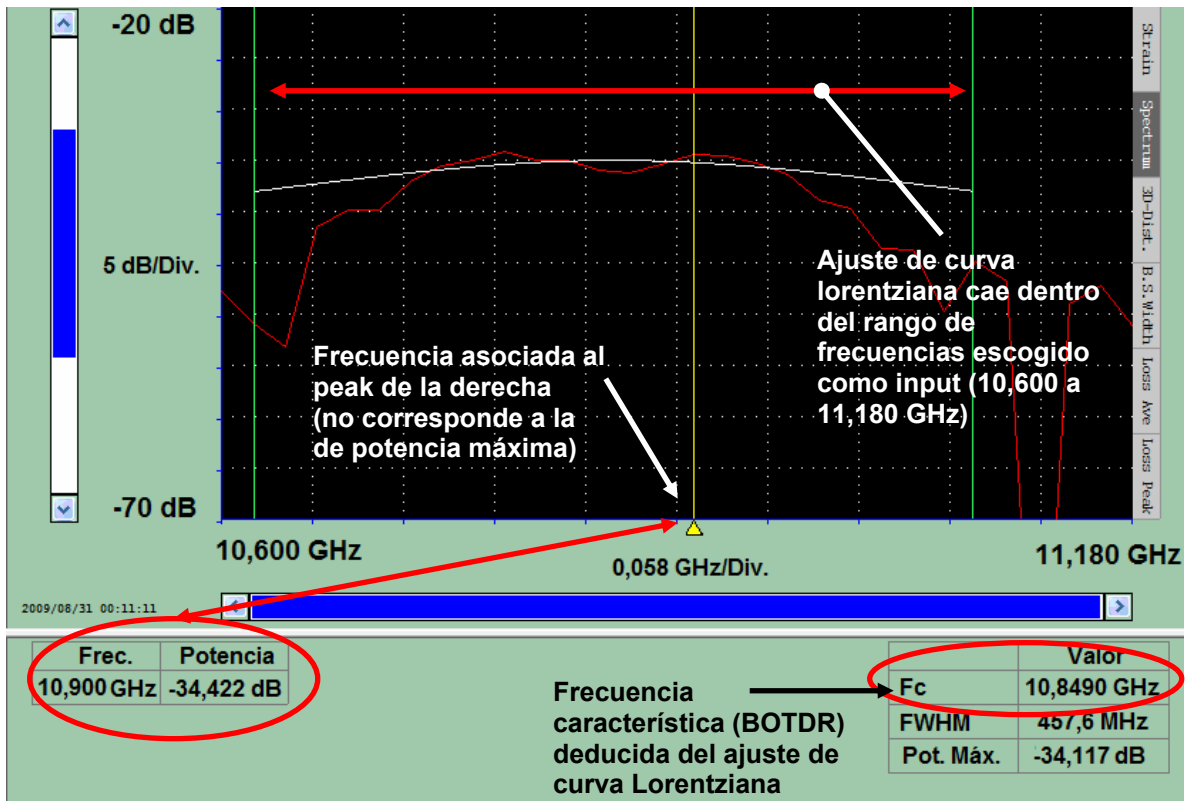


Fig. 5.34: Explicación métodos b1 y b2. Ensayo L 26-dic-2007, 12000Kgf, paso 20MHz.

La Fig. 5.35 muestra uno de los casos que definen al método b3, donde a pesar de que se distingue sólo un peak y la curva *lorentziana* fue ajustada dentro del rango, se escoge manualmente otra frecuencia, buscando estabilizar y mantener las deformaciones esperadas para el estado de cargas.

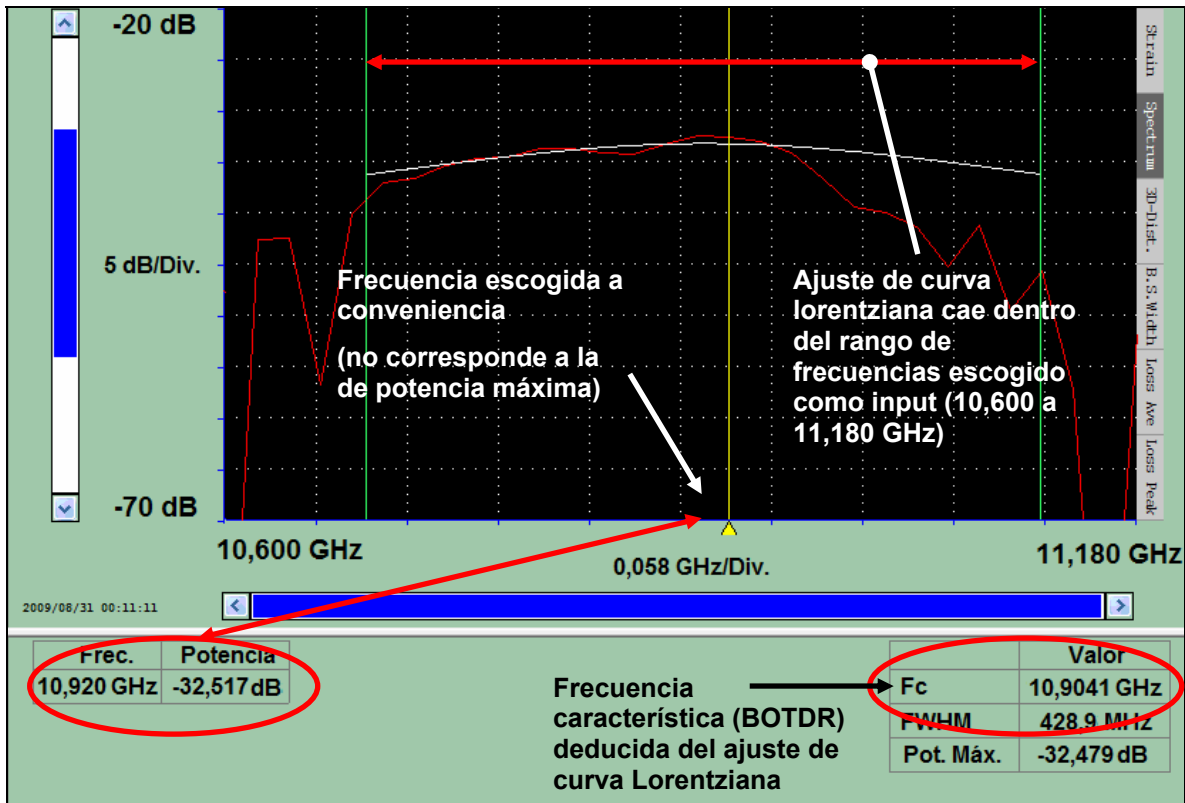


Fig. 5.35: Explicación métodos b3. Ensayo L 26-dic-2007, 6000Kgf, paso 20MHz.

La Fig. 5.36 muestra uno de los casos que definen al método c, donde se distinguen dos peaks, por lo cual se escoge el promedio de las frecuencias asociadas a cada uno de estos.

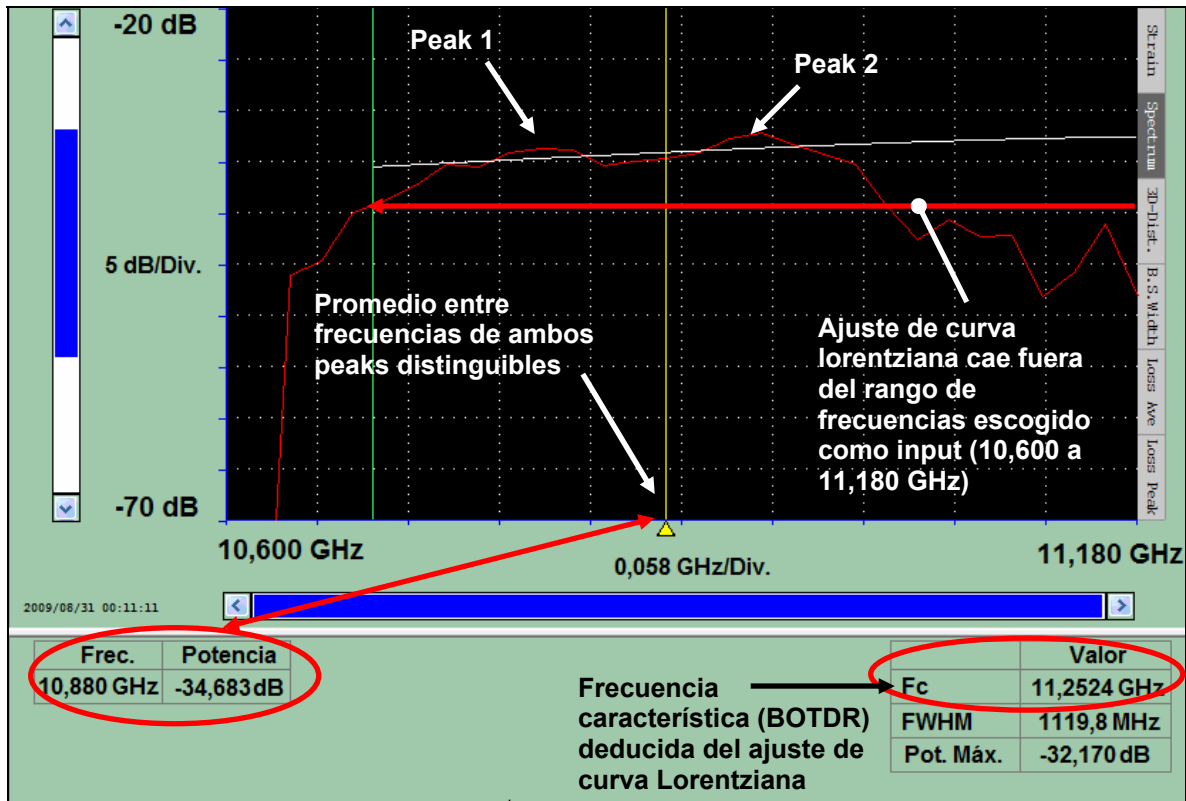


Fig. 5.36: Explicaci3n m3todos c. Ensayo L 26-dic-2007, 9000Kgf, paso 20MHz.

Desde la Fig. 5.37 a la Fig. 5.42, se muestran resultados de la aplicaci3n de los distintos m3todos de análisis manual en registros del ensayo L 26-dic-2007, donde se escogieron frecuencias características seg3n los criterios resumidos en la Tabla 5.7 mostrada anteriormente. En estas figuras se utilizaron datos con paso de frecuencia de 20 y 10 MHz, los cuales se distinguen entre sí por acompañar con una (a) o (b) al valor de la carga, respectivamente (por ejemplo: 6000Kgf – a, indica un paso utilizado de 20 MHz; 6000Kgf – b, indica un paso utilizado de 10MHz). Los casos donde no hay letra que acompañe al valor de la carga, indican que el paso asociado es de 20 MHz. Las líneas discontinuas horizontales indican el valor promedio de deformaci3n seg3n strain gages para cada nivel de carga aplicado durante el ensayo. Este valor promedio se asume constante a lo largo de toda la barra. Adicionalmente, se demarcan las zonas correspondientes al primer y segundo tramo de fibra adherida al perno, seg3n los datos del mapeo (ver anexo C), los cuales aparecen desplazados con respecto a la deformaci3n deducida, corroborando lo mencionado anteriormente sobre el desfase intrínseco y el mecanismo de integraci3n de este sistema. Como podrá observarse en las curvas, el nivel

inicial de deformación (sin carga) se fijó como deformación igual a cero. Sin embargo, hay curvas que aparecen más abajo de este nivel de deformación. Esto resulta porque el mismo sistema y/o método de análisis manual aplicado, entregó una frecuencia menor a aquella definida para el nivel inicial de deformación.

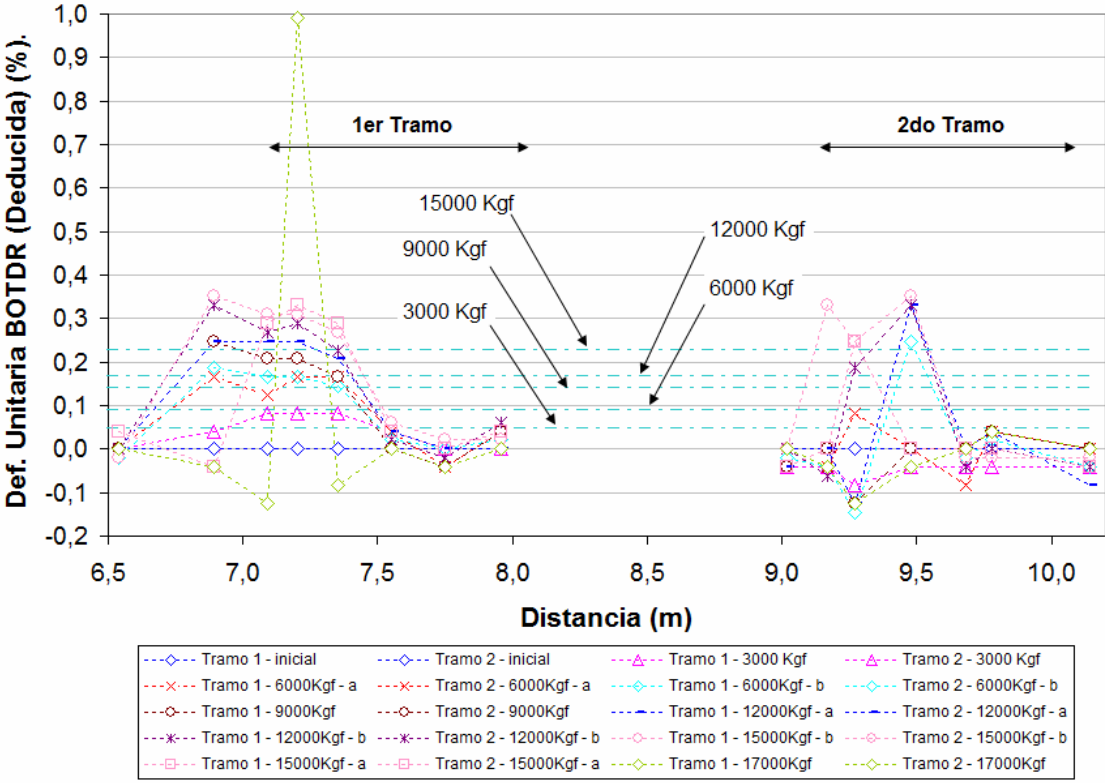


Fig. 5.37: Deformación unitaria mediante método a (ensayo L 26-dic-2007). Pasos 10 y 20MHz.

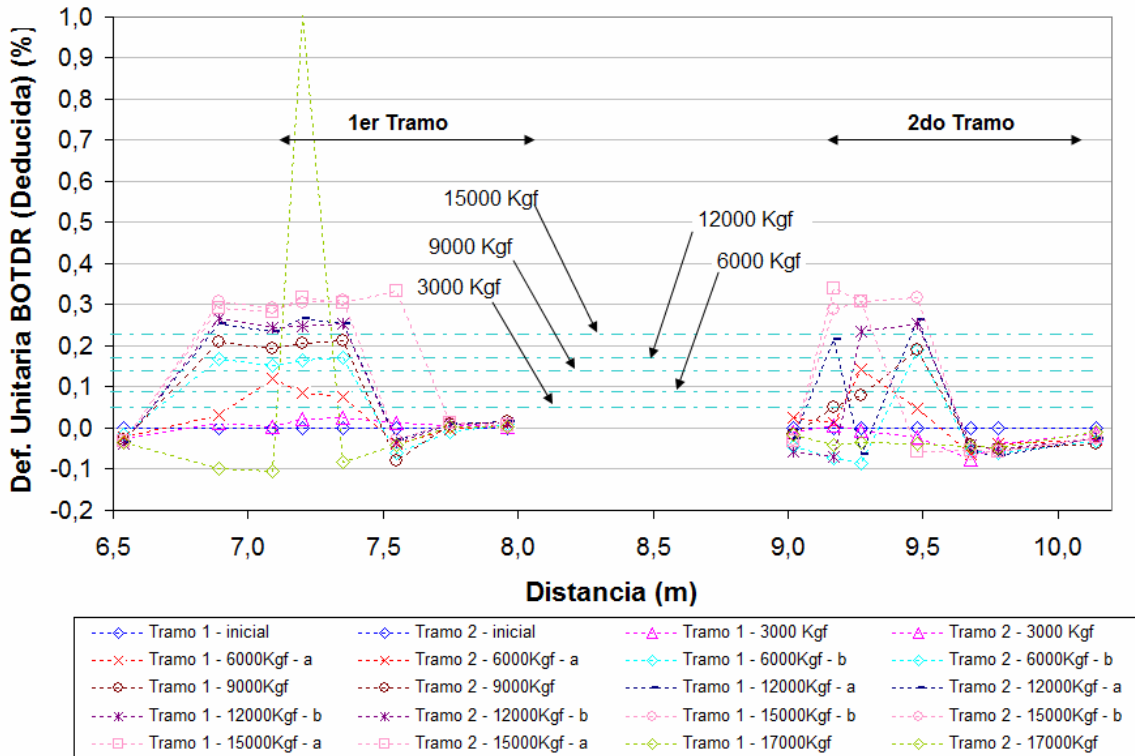


Fig. 5.38: Deformación unitaria mediante método b1 (ensayo L 26-dic-2007). Pasos 10 y 20MHz.

La deformación unitaria deducida mediante el método “a” (ver Fig. 5.37) muestra realtiva semejanza con los resultados entregados por strain gages, en cuanto al cambio de deformación obtenido para los distintos niveles de carga. En ella se distingue, al menos para el tramo 1, que los niveles de deformación obtenidos van creciendo en forma global según el nivel de carga aplicado, excepto para el último nivel de carga, donde la deformación deducida se aleja por completo del valor esperado. En el tramo 2 las mediciones resultan irregulares, y representan en menor medida los niveles de deformación medidos según strain gages. No se aprecia gran diferencia según el paso de frecuencia con el que se obtuvo cada medición. Los valores de deformación unitaria menores a cero ocurren cuando, en un determinado punto, el método escoge una frecuencia característica menor a la inicial en dicho punto. Como podrá verse, también se obtienen valores negativos en los otros métodos de la *Tabla 5.7*. En el método “b1” (ver Fig. 5.38), las variaciones en deformación resultan poco representativas para los niveles bajos de carga, situación que mejora para cargas altas. El último nivel de cargas muestra un incremento excesivo de deformación, lo que podría indicar la entrada en fluencia del

perno. Esta etapa también podría reconocerse al considerar las mediciones de strain gages, los cuales a ese nivel de cargas, mostraron un aumento drástico en sus lecturas, para luego dejar de medir, sufriendo quizás algún daño por la excesiva deformación. En general, los datos con paso de 10MHz parecieran ser más estables que los de 20MHz. El tramo 2, al igual que en el método anterior, muestra mediciones más irregulares.

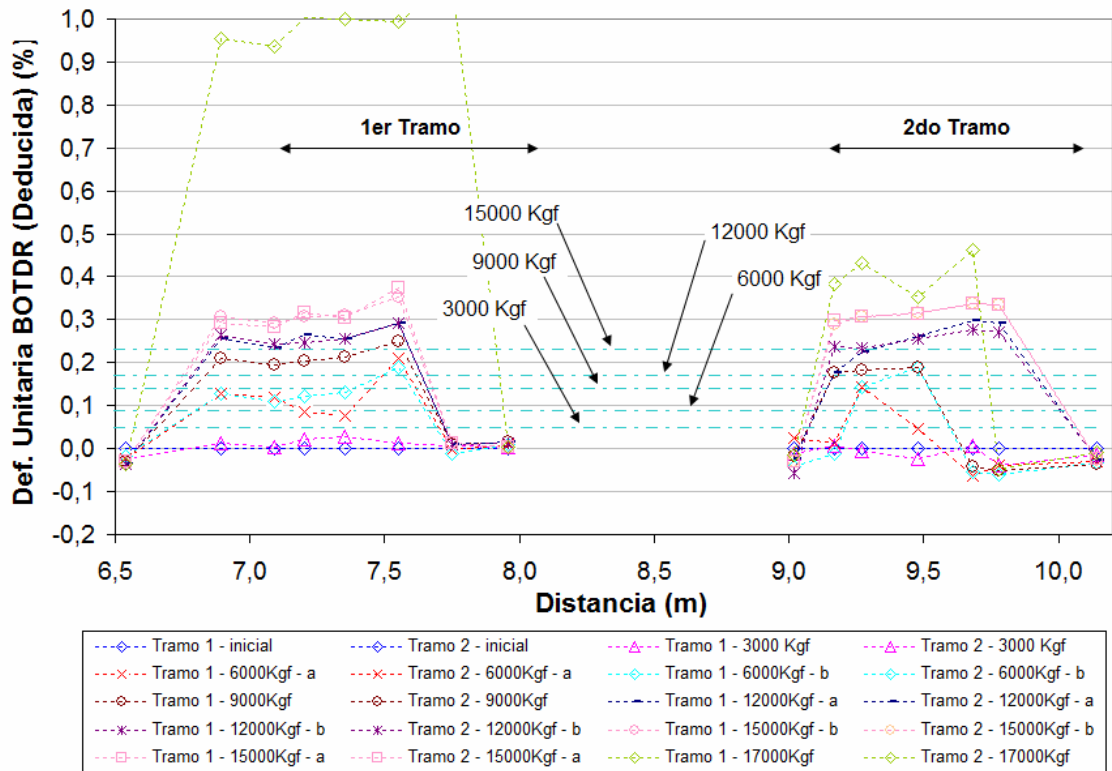


Fig. 5.39: Deformación unitaria mediante método b2 (ensayo L 26-dic-2007). Pasos 10 y 20MHz.

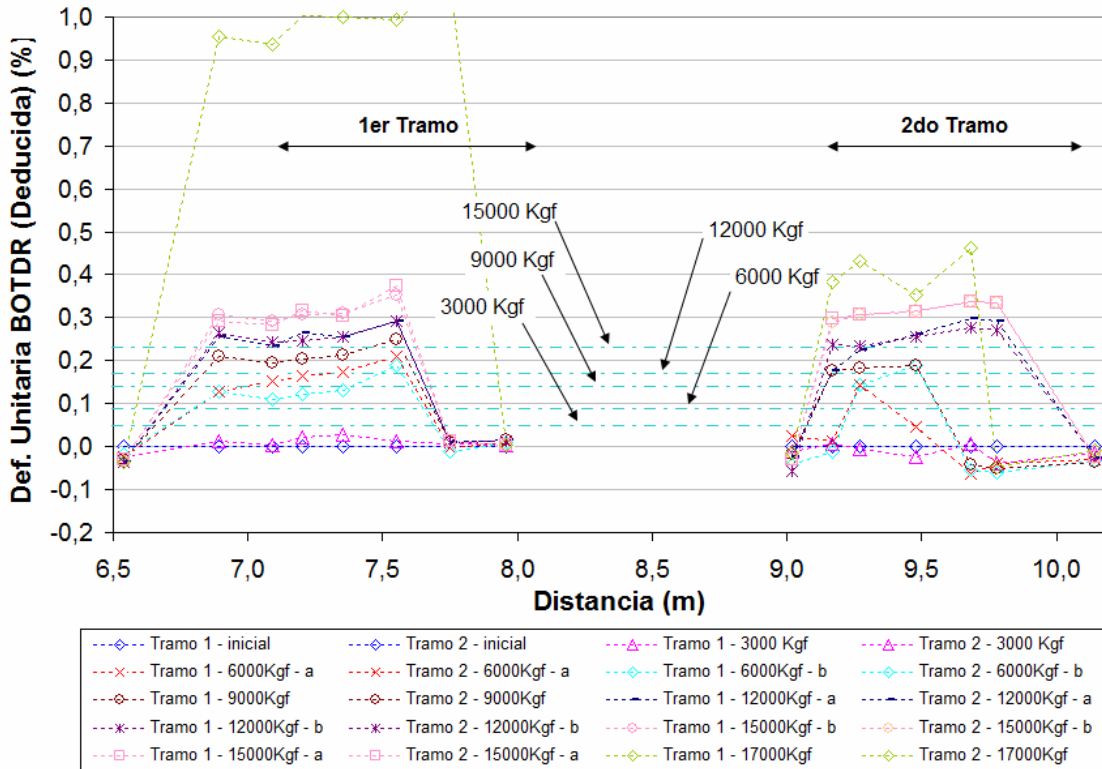


Fig. 5.40: Deformación unitaria mediante método b3 (ensayo L 26-dic-2007). Pasos 10 y 20MHz.

En los métodos “b2” y “b3” mostrados en la Fig. 5.39 y Fig. 5.40, respectivamente, se obtienen mediciones más estables para los distintos niveles de cargas, en ambos tramos. En el tramo 1 se aprecian incrementos similares a las deformaciones medidas por strain gages, desde los 6000Kgf. Además, el largo deformado según las mediciones, resulta mayor que en los métodos anteriores, acercándose al largo real, según mapeo, de los tramos 1 y 2 de fibra sensora. La deformación asociada al último nivel de cargas es más estable según estos métodos, indicando con mayor certeza la fase de fluencia del perno. En general, los resultados no muestran grandes diferencias según los pasos de frecuencias adoptados en las lecturas del analizador.

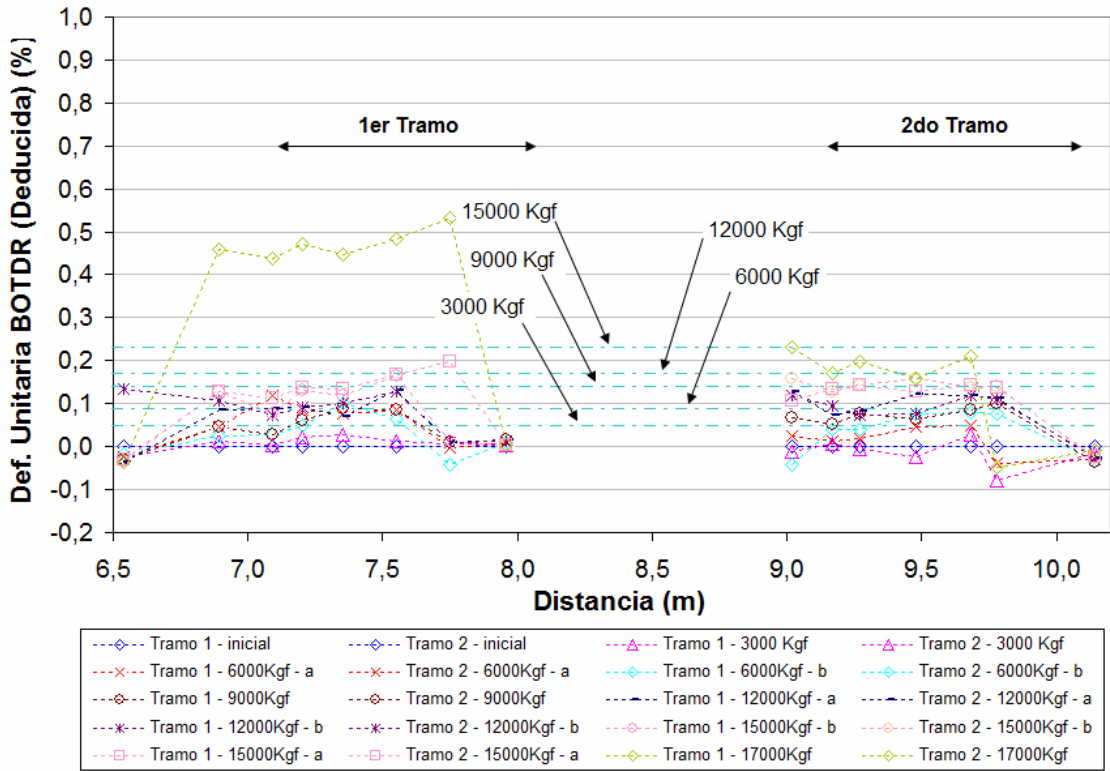


Fig. 5.41: Deformación unitaria mediante método c (ensayo L 26-dic-2007). Pasos 10 y 20MHz.

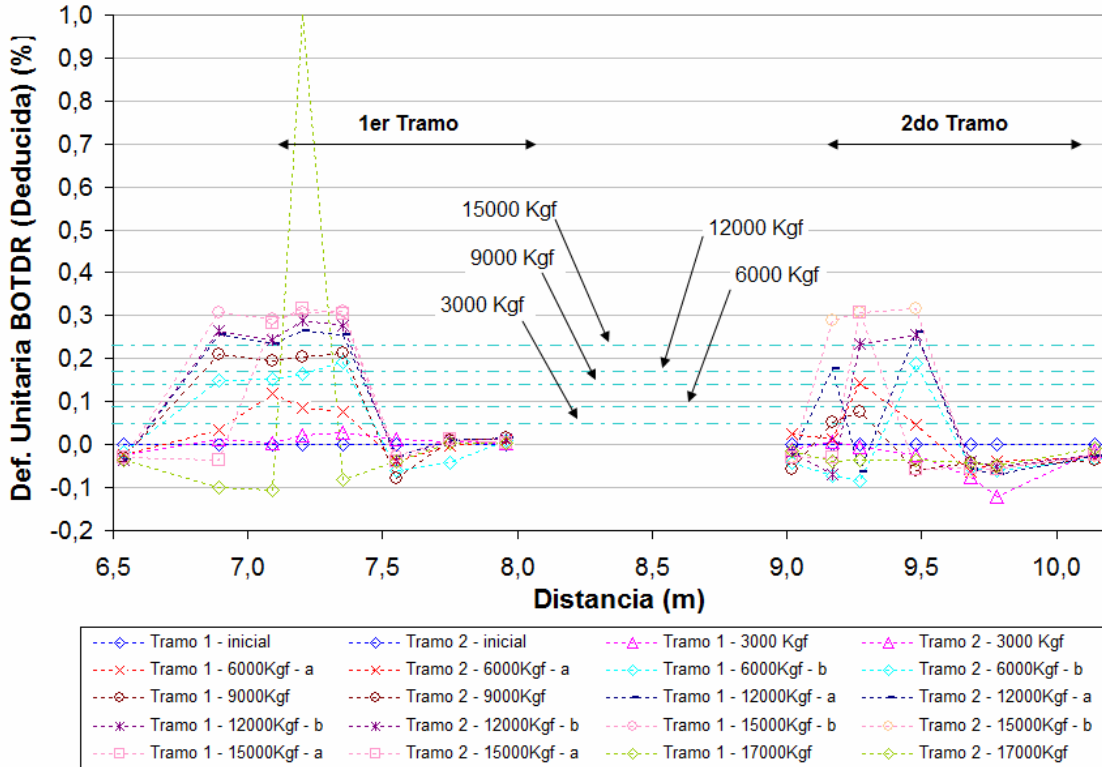


Fig. 5.42: Deformación unitaria mediante método d (ensayo L 26-dic-2007). Pasos 10 y 20MHz.

La Fig. 5.41 muestra los resultados de deformación mediante la aplicación del método “c”, los cuales difieren bastante de lo obtenido según strain gages al mostrar deformaciones muy bajas y con leves cambios entre los distintos niveles de carga. En la máxima carga aplicada se aprecia un incremento considerable que se mantiene estable, pero su magnitud es menor a lo obtenido según los métodos anteriores. No se aprecian grandes diferencias en los resultados según los pasos de frecuencia adoptados. La Fig. 5.42 muestra los resultados del método “d”, los cuales se asemejan a los obtenidos según el método “b1”, como era de esperarse, ya que sus definiciones son similares.

Los resultados de la aplicación de métodos manuales (Fig. 5.37 a la Fig. 5.42), parecen corroborar, en parte, lo mostrado por Zhang & Wu (2008) sobre la distorsión del largo real deformado (90cm aproximadamente en cada tramo, ver anexo C), donde el largo de la deformación medida muestra ser levemente mayor.

5.2.2. Análisis de resultados mediante observación de espectros

Los métodos manuales mostrados son complicados de sistematizar. Estos mejoran la lectura de deformaciones unitarias, pero manteniendo diferencias con las deformaciones reales en pernos. Se propone entonces un enfoque profundo hacia los espectros de potencia entregados por el sistema BOTDR, asumiendo que los resultados de strain entregados por éste, definitivamente no son confiables. Este nuevo análisis es motivado por la necesidad de evitar la confusión al no observarse un único y aislado *peak* de potencia (situación ideal en deformaciones uniformes de más de 1.0m de longitud) en las *curvas de espectro* estudiadas, lo que dificulta la determinación del verdadero nivel de deformación de la fibra sensora. El motivo de este fenómeno no es evidente, pero podría deberse al hecho de estar deformando tramos menores a la resolución espacial de 1.0m (Zhang & Wu, 2008) o a que las deformaciones en la fibra no son constantes en el tramo deformado.

Como se ha mencionado anteriormente, los niveles de cargas aplicados durante los ensayos, son visualizados en terreno mediante un manómetro análogo. Además, se cuenta con registros proporcionados por una celda de carga (ver Fig. 3.3), permitiendo obtener mayor precisión en las mediciones. Con un sistema independiente se miden deformaciones unitarias en, al menos, dos puntos conocidos de la barra. Esta información es utilizada para contrastar con mediciones mediante BOTDR.

Como antecedente se tiene que los datos del sistema BOTDR no muestran resultados satisfactorios en un 100% con los métodos de análisis anteriormente usados. Se propone entonces un nuevo análisis basado en el cálculo de áreas bajo las *Curvas de Espectro* (Potencia vs Frecuencia), las que pueden ser recuperadas del *software N8510*[®] para distintas posiciones en la fibra, y el posterior cálculo de frecuencias promedio utilizando las áreas anteriormente mencionadas (ver Fig. 5.43). Estas frecuencias promedio son una especie de centro de gravedad del área bajo la curva visto en el eje de las abscisas, que se ve desplazado hacia la derecha al ir aumentando la deformación de la fibra. Este corrimiento, sin embargo, no representa necesariamente la deformación (puntual) en una posición específica del perno, pero sí la tendencia promedio de aumento de deformación en la zona de fibra adherida a éste (tramos menores a 1m), y además es bastante menor al esperado cuando se examina el corrimiento de la frecuencia asociada a un *peak* de potencia en fibra deformada (ver Fig. 5.44). Sin embargo, en gran parte de los

casos, no es trivial o incluso posible, determinar un *peak* que corresponda a la zona deformada (ver Fig. 5.45 a Fig. 5.47).

En las figuras presentadas a continuación, se indican los valores de las cargas asociadas a los datos mostrados (leídas desde un manómetro), además del paso de frecuencia que es un parámetro ajustable en la toma de datos. Esto se explicará con detalle más adelante. Desde la Fig. 5.43 a la Fig. 5.47 se aprecia que las curvas poseen valores de decibeles positivos, ya que fueron trasladadas en 100dB con motivo de una de las alternativas de estudio presentadas posteriormente, por lo cual, el eje vertical indica que la potencia fue modificada.

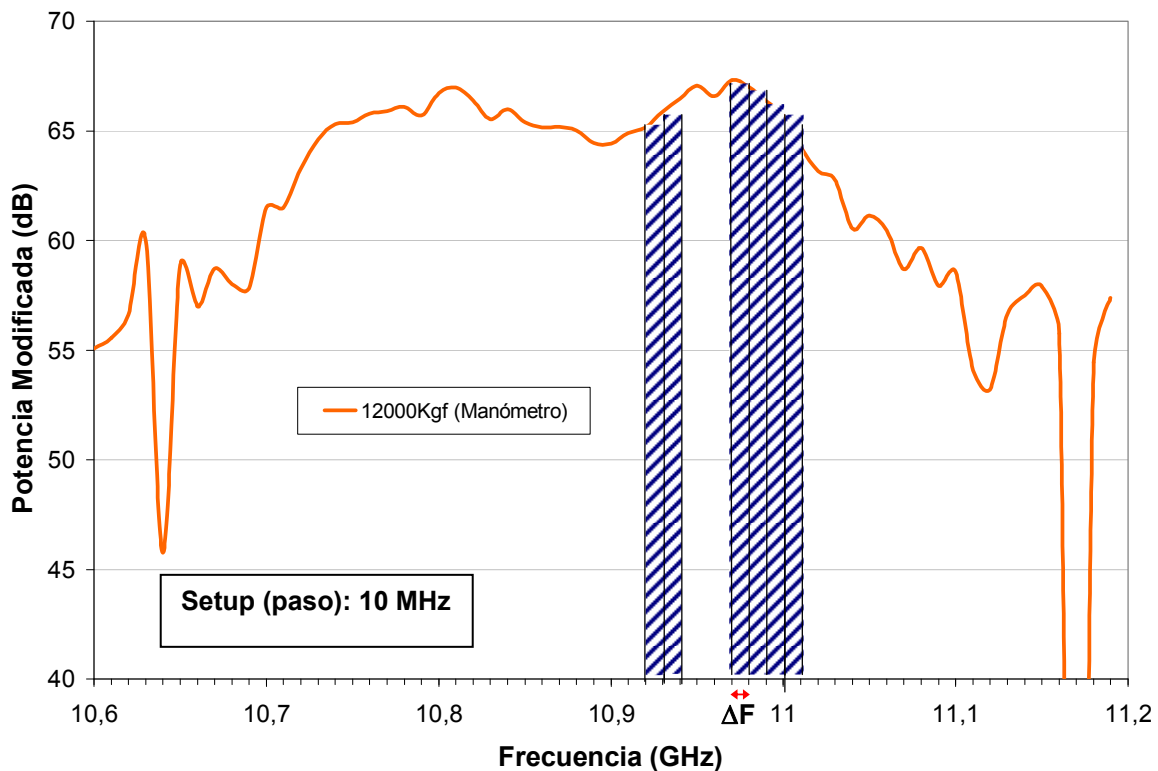


Fig. 5.43: Cálculo de área bajo las Curvas de Espectro. Potencia en decibeles (dB) versus frecuencias (GHz). Ver Ec. 5.1 y Ec. 5.2. Datos ensayo L 26-dic-2007.

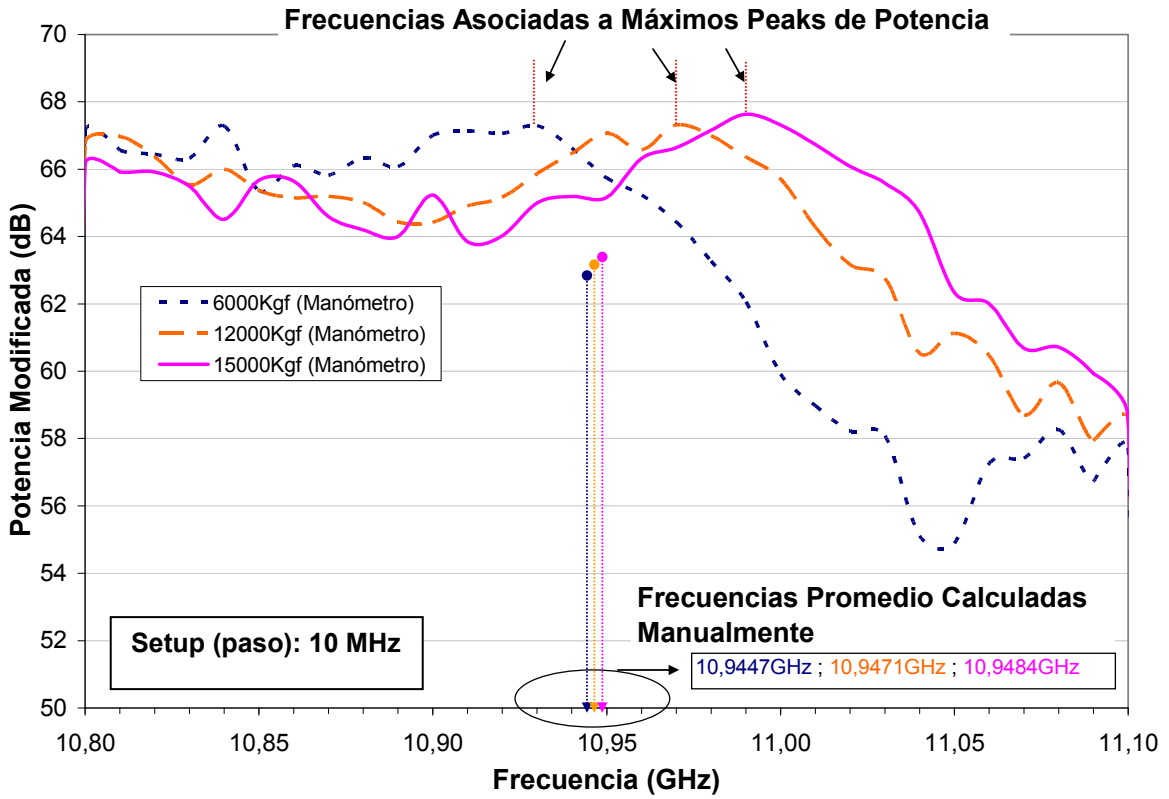


Fig. 5.44: Frecuencias Promedio calculadas como centros de gravedad (según alternativa 1, ver Fig. 5.54). Datos ensayo L 26-dic-2007

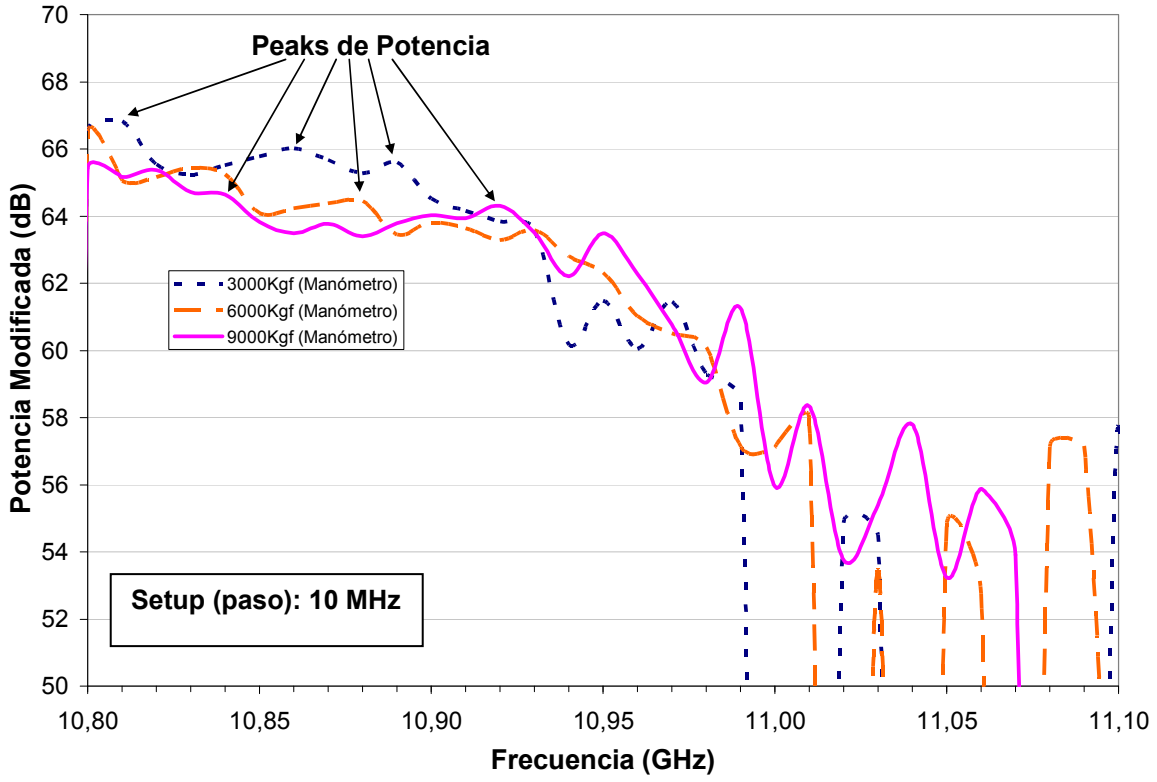


Fig. 5.45: Curvas de Espectro asociadas a 3 niveles de carga. Datos ensayo B 21-feb-2008

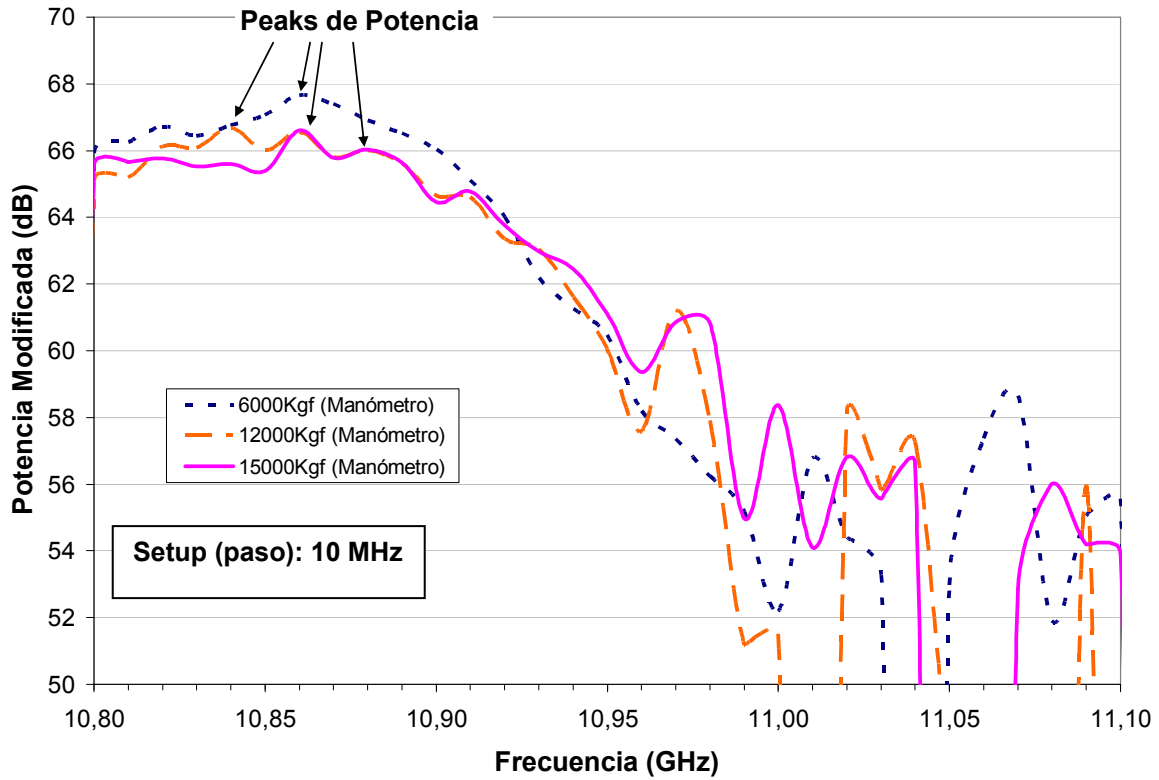


Fig. 5.46: Curvas de Espectro asociadas a 3 niveles de carga. Datos ensayo AH 26-feb-2008

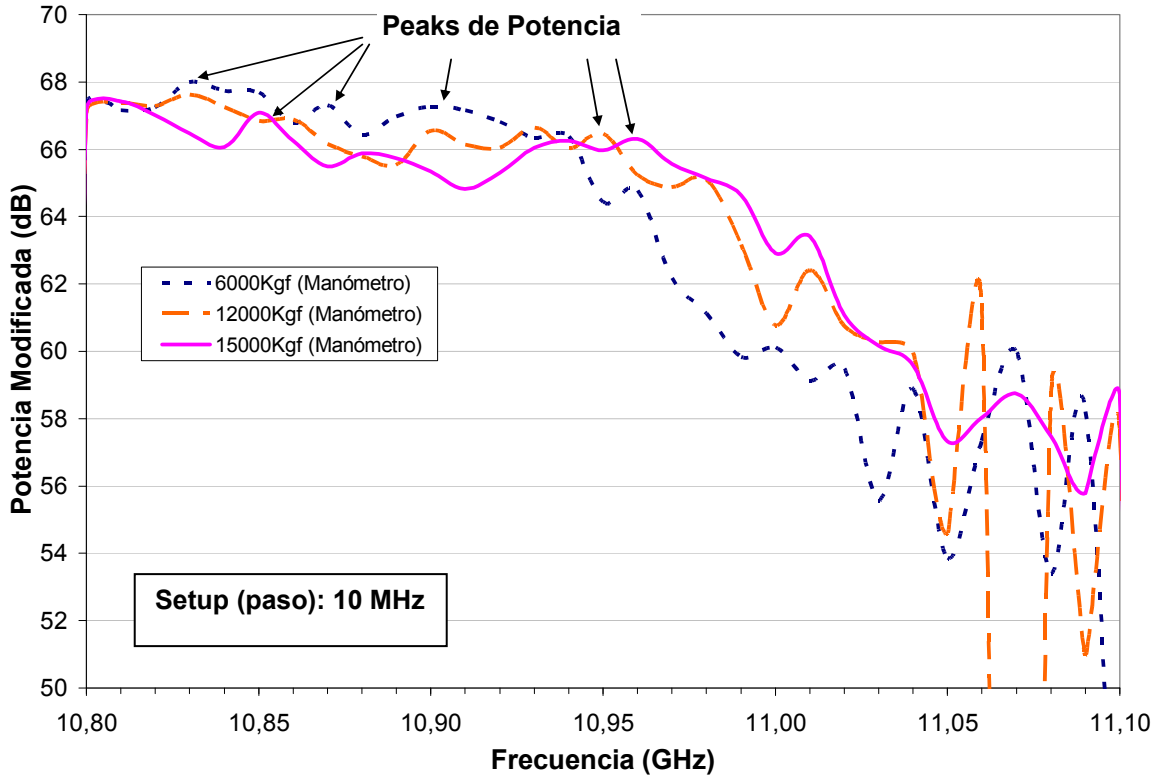


Fig. 5.47: Curvas de Espectro asociadas a 3 niveles de carga. Datos ensayo AR 08-sep-2008

Continuando con los métodos de análisis de datos recopilados por el sistema BOTDR se presenta en la siguiente etapa de investigación, un método que pretende determinar un desplazamiento global de la curva y no necesariamente los *peaks* que se presentan en ella. Es decir, si inicialmente existen diversas deformaciones o *peaks* de potencia en el espectro, al aplicar una deformación adicional, todos o gran parte de éstos se desplazarán a la derecha generando que el valor de frecuencia promedio sea mayor, según lo mostrado en la Fig. 5.44. En esta figura, por simplicidad, las curvas de espectro fueron trasladadas hacia arriba sumando 100dB, quedando con valores positivos en toda su extensión, lo cual no cambia la forma de las curvas. Las ecuaciones involucradas en este análisis son:

$$A_i = \Delta F \cdot dB_i$$

Ec. 5.1: Área *i*-ésima bajo la curva de espectro.

$$\bar{F} = \frac{\sum_i F_i \cdot A_i}{\sum_i A_i}$$

Ec. 5.2: Frecuencia Promedio

Con este análisis se espera obtener un aumento en frecuencias promedio con un aumento de cargas, lo que se traduce en correlaciones con pendiente positiva, como se muestra más adelante.

El *software N8510*[®] permite introducir como *input* ó *setup* el paso, en MHz, que genera la gama de frecuencias que abarca la curva de espectro, el que corresponde a ΔF en la curva de espectro (ver *Fig. 5.43*). Este parámetro, llamado *Step Frequency* en el *software*, afecta en forma considerable el tiempo de lectura de datos durante un ensayo, es decir, mientras menor es el paso (ΔF), mayor es el tiempo empleado en las mediciones. En este trabajo se utilizan lecturas con pasos de 10 y 20 MHz. Se considera, *a priori*, que los datos tomados con un paso de frecuencia de 20MHz son menos satisfactorios que aquellos con paso de 10MHz, por el hecho de hacer menos fina la partición al momento de calcular frecuencias promedio (ver *Fig. 5.48*) y por lo tanto, implicando un cálculo de áreas bajo la curva menos preciso. Además se observa que un paso menos refinado suaviza la curva de espectro haciendo desaparecer *peaks* de potencia con información sobre la deformación de la fibra, y no sólo ruido de la señal (ver *Fig. 5.48*). Usualmente se utilizan pasos de 10MHz y como verificación se consideraron pasos de 20MHz adicionales para un mismo estado de carga.

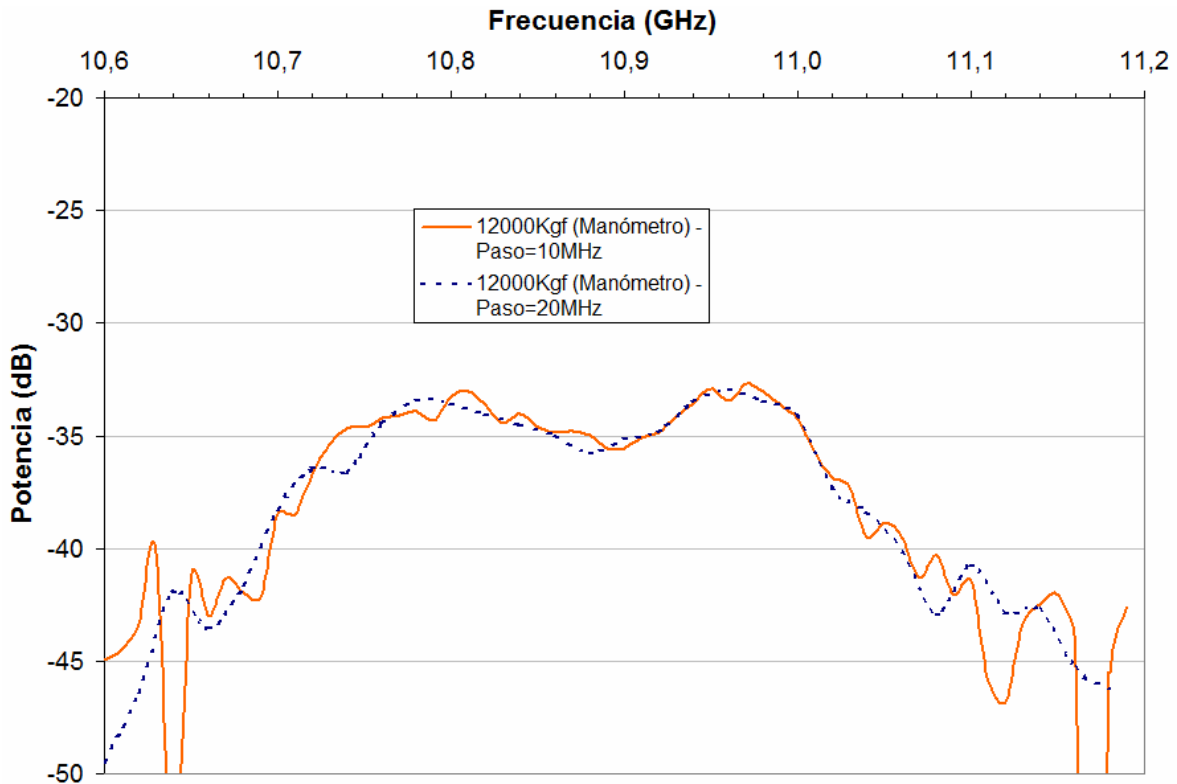


Fig. 5.48: Comparación entre curvas obtenidas con paso de frecuencia de 10MHz y 20MHz. Datos ensayo L 26-dic-2007.

En las *curvas de espectro* entregadas por el sistema BOTDR, se observan caídas fuertes de potencia para determinadas frecuencias (ver *Fig. 5.49* y *Fig. 5.53*), las que influyen bastante en los resultados obtenidos mediante el método de frecuencias promedio explicado anteriormente. Estas caídas son fácilmente detectables, ya que siempre alcanzan el valor mínimo de -100dB. Con el propósito de dejar fuera sectores irrelevantes de las curvas de espectro, donde sólo hay ruido o caídas fuertes, el rango de frecuencias que se consideró para el análisis desarrollado fue fijado en ciertos valores arbitrarios, comenzando desde una frecuencia de 10.8GHz, cercana a la frecuencia asociada al valor *peak* de potencia de la fibra sin tensión. El final del rango se fija tanto en 11.1GHz como en 11.0GHz, considerando que las frecuencias esperadas no superan estos valores (ver *Fig. 5.46* y *Fig. 5.47*).

Teniendo en cuenta esto y la forma de calcular frecuencias promedio, se evaluaron 8 alternativas de estudio resumidas en la

Tabla 5.8, las que se distinguen según el rango considerado, con las letras “a” (rango 10,8 a 11,1GHz) y “b” (rango 10,8 a 11,0GHz).

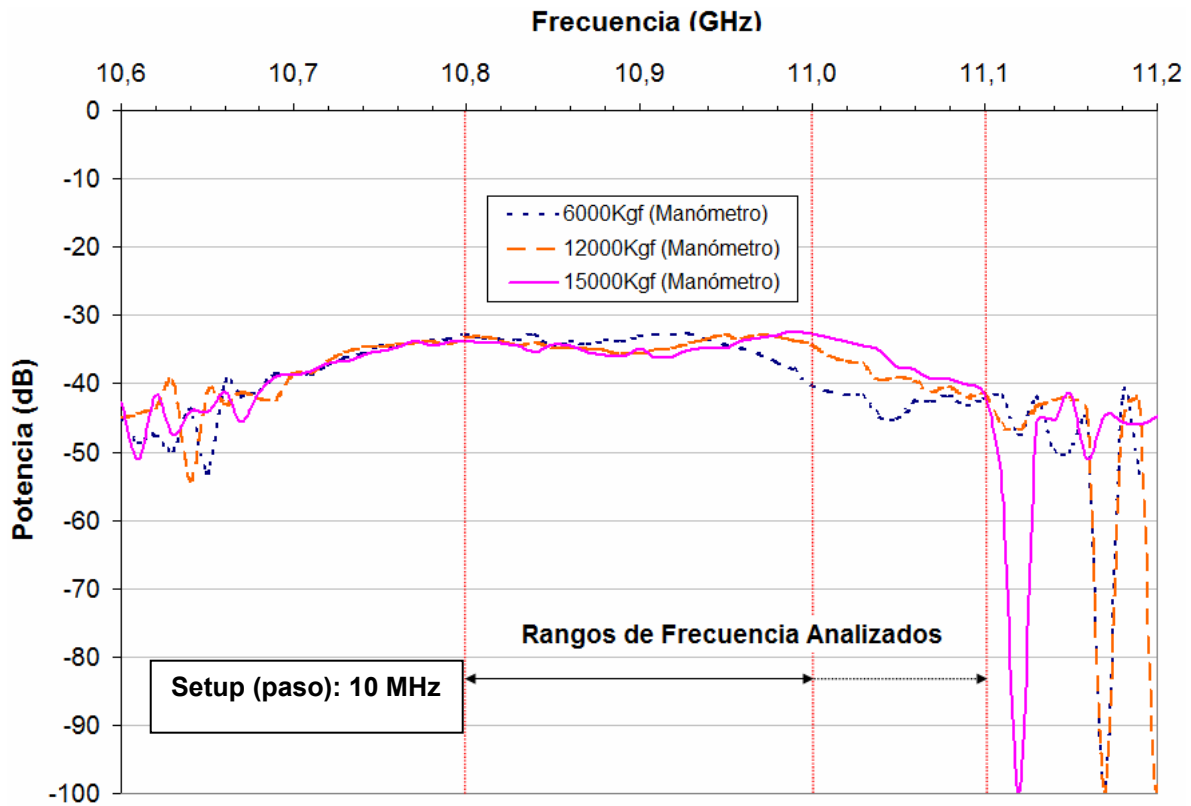


Fig. 5.49: Curva de espectro de frecuencia entregada por el software para una posición determinada. Datos ensayo L 26-dic-2007.

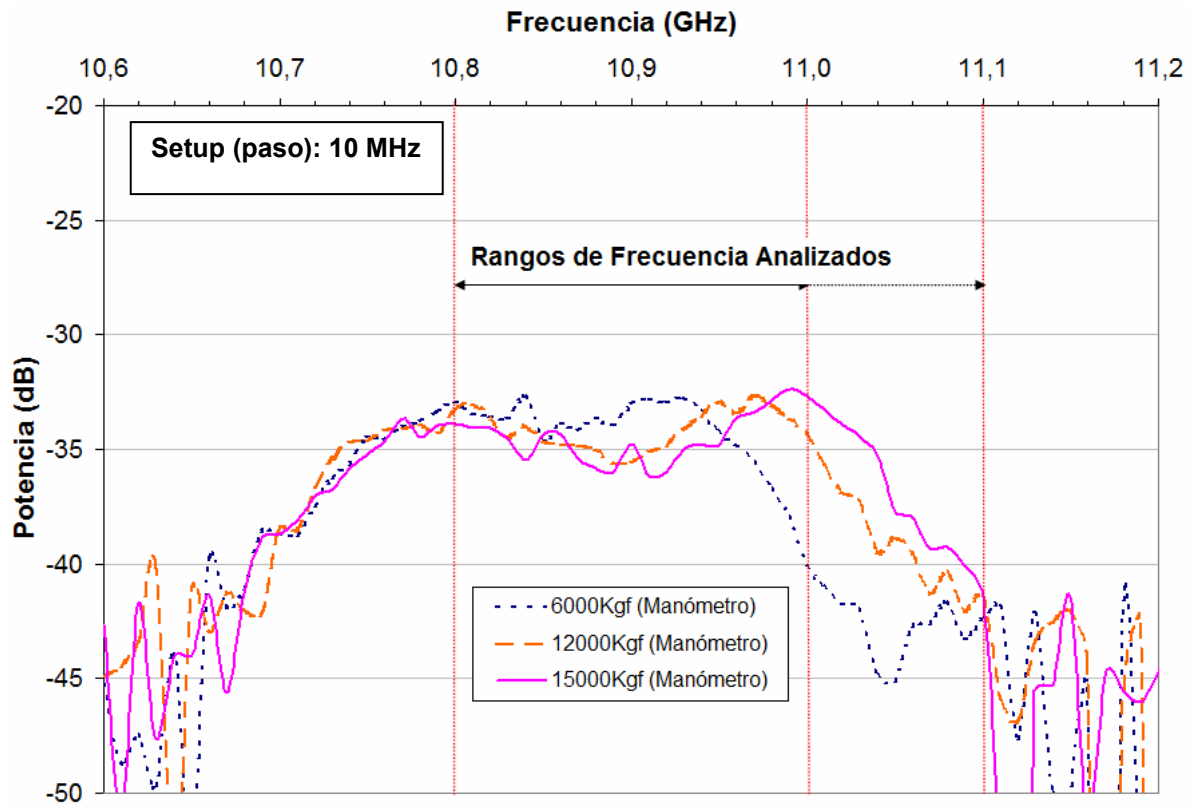


Fig. 5.50: Rangos de frecuencia (anchos de banda) analizados. Datos ensayo L 26-dic-2007.

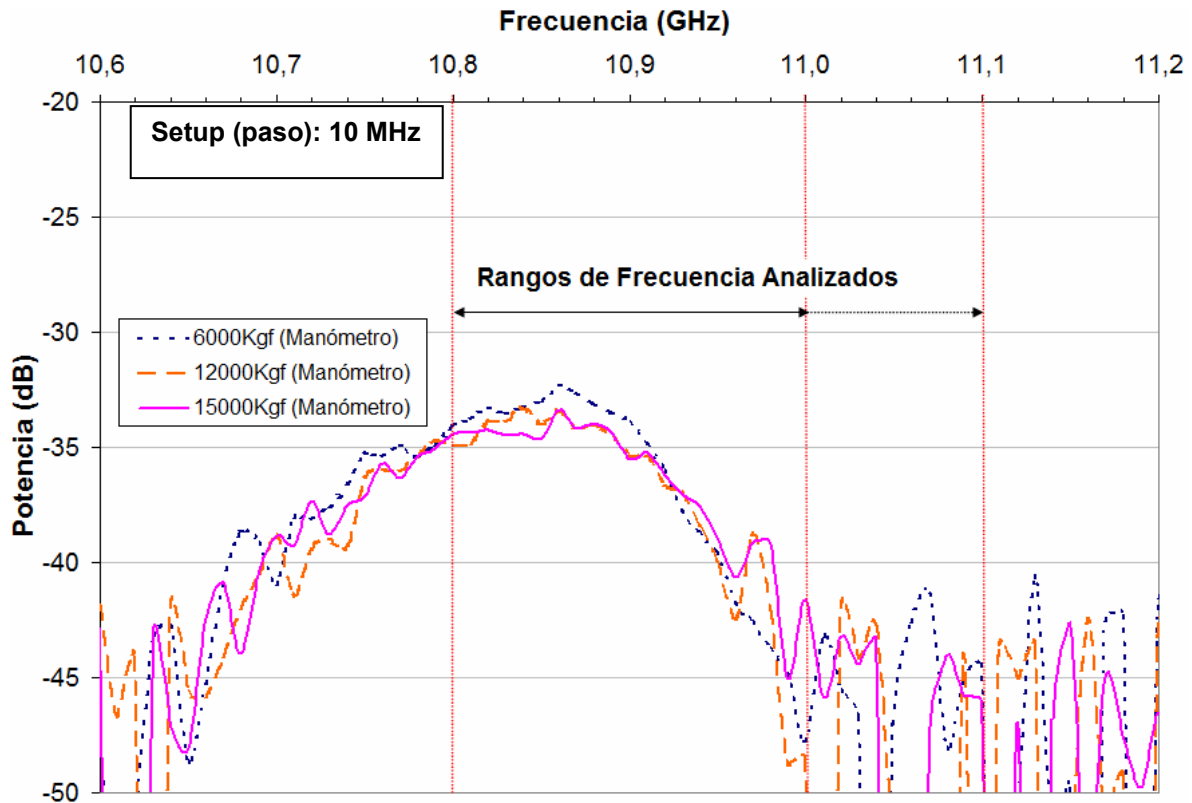


Fig. 5.51: Rangos de frecuencias analizados. Datos ensayo AH 26-feb-2008.

Estas alternativas además, consideran entre ellas, la influencia de aplicar una corrección (sólo a los datos dentro de los rangos sujetos a estudio), con el fin de intentar resolver casos donde no se obtuvieron las tendencias esperadas. Esta corrección consistió en reemplazar datos donde se alcanza un valor de potencia igual a -100dB por el último dato válido anterior al punto de la pérdida (ver Fig. 5.52 y Fig. 5.53). Las alternativas que incluyan la aplicación de esta corrección se marcan con el símbolo (*).

Potencia (dB) Original	Potencia (dB) Corregida
-55,0066	-55,0066
-100	-55,0066
-100	-55,0066
-45,3391	-45,3391

Fig. 5.52: Ejemplo de corrección de ruido o caídas en los datos analizados. Corrección efectuada sólo a los datos dentro de los rangos definidos.

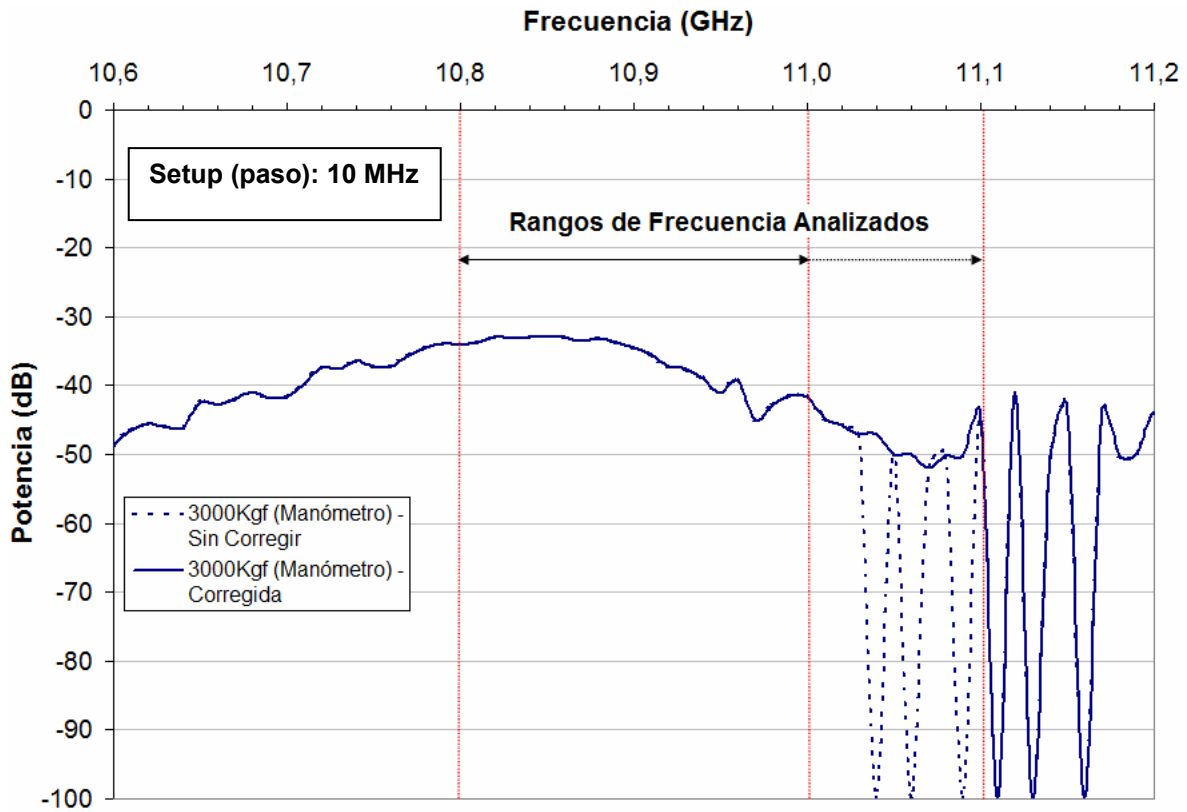


Fig. 5.53: Curvas de espectro con y sin corrección de ruido o caídas. Corrección efectuada sólo a los datos dentro de los rangos definidos. Datos ensayo AH 26-feb-2008.

En la siguiente tabla se resumen las 8 alternativas mencionadas, las que son descritas en detalle más adelante. Como se dijo anteriormente, la diferencia entre éstas depende de:

- la forma de modificar la curva de espectro para calcular frecuencias promedio,
- el rango considerado de frecuencias de la curva de espectro y
- utilización de datos con y sin corrección.

Tabla 5.8: Resumen de Alternativas de Deducción de Frecuencias Promedio

Alternativas	Rango 10,0 a 11,1GHz	Rango 10,0 a 11,0GHz	Curva Desplazada en 100dB	Curva sin Desplazar	Curva Desplazada en Mín. dB del Rango	Curva Aplicando Función Inversa	Corrección
1a	√		√				
1a*	√		√				√
1b		√	√				
1b*		√	√				√
2a	√			√			
2a*	√			√			√
2b		√		√			
2b*		√		√			√
3a	√				√		
3a*	√				√		√
3b		√			√		
3b*		√			√		√
4a	√					√	
4a*	√					√	√
4b		√				√	
4b*		√				√	√

- **Alternativas 1.a, 1.a*, 1.b, 1.b* (ver Fig. 5.54)**

Desplazar en una cantidad constante y arbitraria de 100dB cada punto de la curva, permitiendo que la curva posea valores positivos en toda su extensión, de forma independiente a la corrección de datos. Luego de esto se realizan los cálculos de rectángulos de áreas y su sumatoria dentro del rango de frecuencias seleccionado, para finalmente obtener las frecuencias promedio.

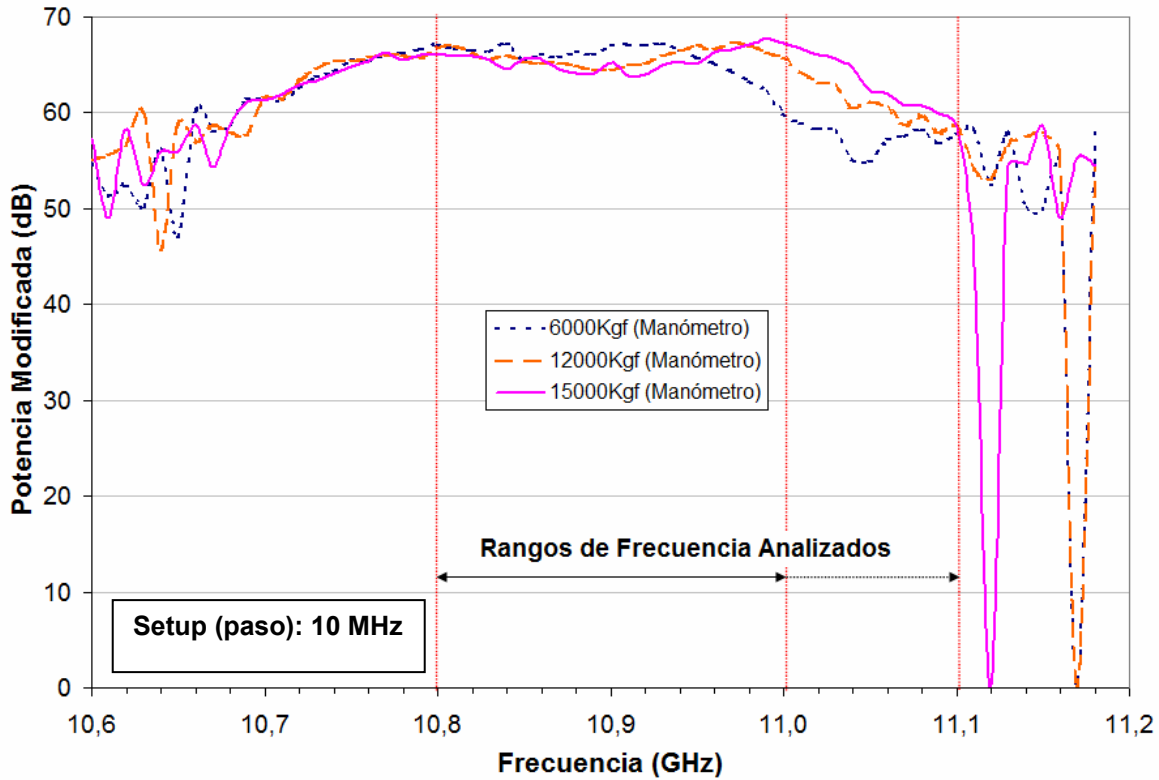


Fig. 5.54: Curva de espectro de frecuencia trasladada según Alternativas 1.a, 1.a*, 1.b, 1.b*. Datos ensayo L 26-dic-2007.

- **Alternativas 2.a, 2.a*, 2.b, 2.b*** (ver Fig. 5.49)

Dejar todos los valores de potencia tal cual son entregados por el software, manteniendo sus valores originales y calculándose entonces áreas y sumas negativas dentro del rango de frecuencias seleccionado, lo que entrega frecuencias promedio ordenadas inversamente respecto de la carga (notar que originalmente los dB tienen valor negativo). Luego se resta el extremo del rango usado (11,1GHz u 11,0GHz) menos la frecuencia promedio resultante. En adelante, al parámetro calculado de esta forma, se le llamará Δ frecuencia (ver Ec. 5.3 y Ec. 5.4).

$$\Delta\text{frecuencia} = 11,1 - \text{Frecuencia_Promedio} \quad [\text{GHz}]$$

Ec. 5.3: Δ frecuencia alternativas 2.a, 2.a*

$$\Delta \text{frecuencia} = 11,0 - \text{Frecuencia_Pr omedio} \quad [\text{GHz}]$$

Ec. 5.4: $\Delta \text{frecuencia}$ alternativas 2.b, 2.b*

- **Alternativas 3.a, 3.a*, 3.b, 3.b* (ver Fig. 5.55)**

Similar a las Alternativas 1.a, 1.a*, 1.b, 1.b* descritas, pero desplazando cada punto de la curva en una cantidad igual al valor mínimo del rango seleccionado. Este valor mínimo es el más negativo encontrado en los datos, sin considerar las caídas de -100dB. De esta manera, se desplaza la curva completa en dicho valor mínimo, haciendo positivos todos los puntos del rango (con excepción de aquellos donde haya una pérdida o ruido de valor -100dB, en caso de que no se haya efectuado corrección de datos). En la Fig. 5.55 sólo se muestra la zona de interés de las curvas, la que efectivamente queda con valores positivos. Fuera de los rangos analizados, esto ya no se cumple.

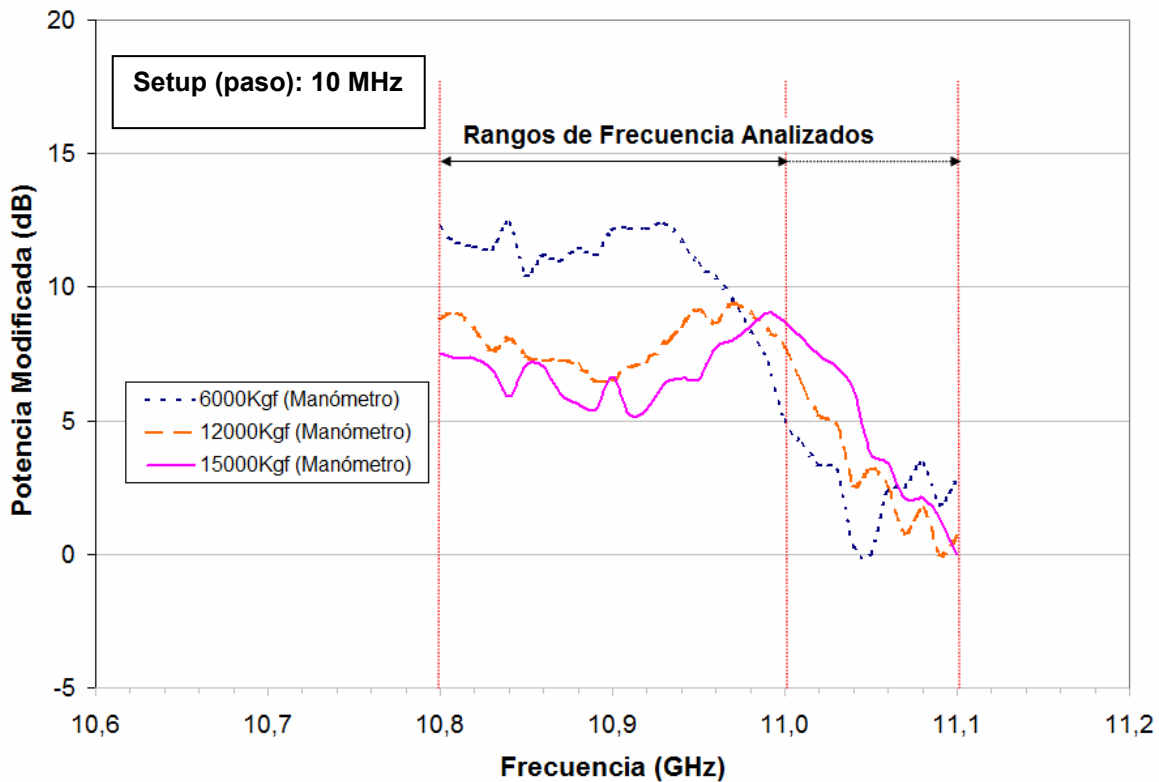


Fig. 5.55: Curva de espectro de frecuencia trasladada según Alternativas 3.a, 3.a*, 3.b, 3.b*. Datos ensayo L 26-dic-2007.

- **Alternativas 4.a*, 4.b* (ver Fig. 5.56)**

Transformar las curvas de espectro y devolverlas a su forma original en potencia, mediante la aplicación de la función inversa a la que define el decibel (ver *Ec. 2.20*). Luego, realizar el procedimiento de cálculo de frecuencias promedio con estas curvas.

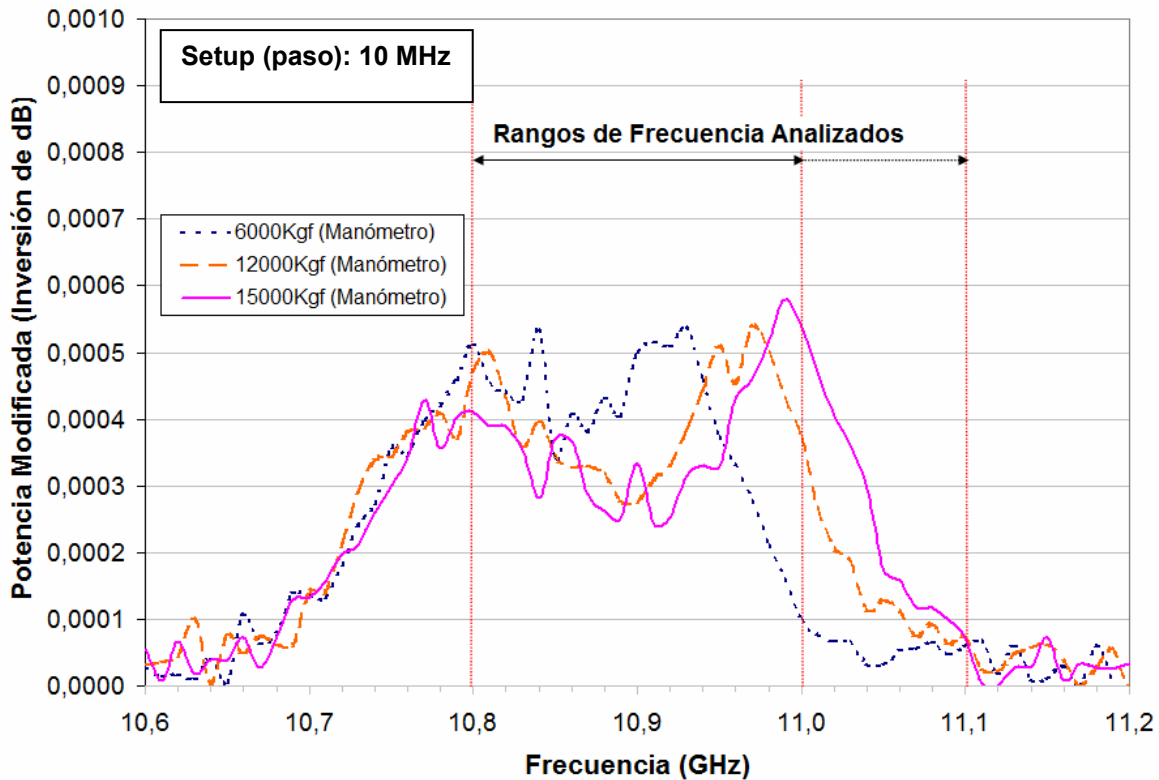


Fig. 5.56: Curva de espectro de frecuencia modificada según Alternativas 4.a, 4.a*, 4.b y 4.b*. Datos ensayo L 26-dic-2007.

5.3. Resultados de mediciones de Strain Gages y Celda de Carga

5.3.1. Consideraciones previas

Las siguientes tablas proporcionan un resumen de los datos obtenidos para cada ensayo, con lecturas de carga según manómetro y/o celda de carga, y deformación unitaria según strain gages. La numeración de strain gages parte desde el extremo superior del perno ensayado, según se indicó en la *Fig. 4.22*. Como se mencionó

anteriormente, los ensayos realizados cuentan con 1 a 3 strain gages incorporados, además de contar con un par de extensómetros en el ensayo L 26-nov-2007. Para medición de cargas, se utilizó celda de carga o manómetro, o ambos sistemas simultáneamente. Estas variantes se produjeron, por no contar con la celda de carga al comienzo de los ensayos. Para las mediciones de deformaciones, se utilizaron extensómetros (ya calibrados) con la finalidad de calibrar los strain gages. Además, se consideró suficiente para los objetivos planteados, la medición de deformación mediante estos sensores en dos puntos de la barra ensayada, entendiendo que la fibra sacará promedios en 1m. Los casos donde hubo mediciones de uno o ningún strain gage, se deben a la pérdida o daño de éstos antes o durante los ensayos.

En la *Tabla 5.9*, como referencia, se muestran valores teóricos de deformación de un perno de acero a tracción pura considerando sus propiedades mecánicas nominales.

Tabla 5.9: Deformación Teórica Perno de Acero a Tracción
(Diámetro Nominal Barra = 22mm; $E_{\text{acero}}=2.040.000\text{Kgf/cm}^2$)

Carga (Kgf)	Tensión (Kgf/cm ²)	Def. Unitaria (%)	Def. Unitaria (micro-strain)
0	0	0,00	0
3000	789	0,04	387
6000	1578	0,08	774
9000	2368	0,12	1161
12000	3157	0,15	1547
15000	3946	0,19	1934

5.3.2. Ensayos de Pernos tipo L, en Laboratorio.

En la *Tabla 5.10* se muestran los registros de deformación unitaria mediante strain gages del ensayo L 26-nov-2007. Es posible apreciar gran similitud en las lecturas de deformación unitaria según extensómetros y strain gages. La deformación máxima alcanzada de 0,25% es levemente superior a la teórica esperada considerando las propiedades del acero. Las diferencias entre lecturas de strain gages se encuentran dentro del error esperado. Los strain gages de este ensayo fueron dispuestos a 40cm entre sí como puede verse en el anexo C en la *Tabla C. 1*. El *strain gage 1* (SG-1) se ubicó a unos 40cm de una de las abrazaderas de la prensa hidráulica de tracción, mientras que el *strain gage 2* (SG-2) se ubicó a unos 20cm de la otra (ver *Fig. 4.19*).

Tabla 5.10: Ensayo L 26-nov-2007 (laboratorio). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.

Ensayo L 26-nov-2007						
Carga	ϵ (E-1)	ϵ (E-2)	ϵ (SG-1)	ϵ (SG-2)	Promedio Def. Unitaria	$\Delta\epsilon$
Celda	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
[Kgf]	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2885	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00
5842	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09	0,01
8788	0,13	0,13	0,14	0,13	0,13	0,01
11710	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,01
14631	0,22	0,23	0,25	0,24	0,25	0,02

En la *Tabla 5.11* se muestran los registros de deformación unitaria mediante strain gages del ensayo L 26-dic-2007. Se aprecian resultados similares al ensayo L 26-nov-2007, lo cual confirma los datos entregados por extensómetros y strain gages. Los strain gages de este ensayo fueron dispuestos a 20cm entre sí como puede verse en el anexo C en la *Tabla C. 2*¹. El *strain gage 2* (SG-2) se ubicó a unos 40cm de una de las abrazaderas de la prensa hidráulica de tracción; el *strain gage 4* (SG-4) se ubicó a unos 10cm de la otra (ver *Fig. 4.19*). El *strain gage 3* (SG-3) se ubicó entre medio de los otros dos dispositivos mencionados.

¹ El *strain gage 1* (SG-1) no obtuvo mediciones en este ensayo.

Tabla 5.11: Ensayo L 26-dic-2007 (laboratorio). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.

Ensayo L 26-dic-2007					
Carga	ϵ	ϵ	ϵ	Promedio Def.	$\Delta\epsilon$
Celda	(SG-2)	(SG-3)	(SG-4)	Unitaria	
[Kgf]	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0	0,00*	0,00*	0,00*	0,00	0,00
2750	0,05*	0,05*	0,05*	0,05	0,00
5682	0,09	0,09	0,09	0,09	0,00
8659	0,13	0,13	0,13	0,13	0,00
11590	0,17	0,17	0,17	0,17	0,00
14467	0,23	0,23	0,22	0,23	0,00

*: Datos obtenidos mediante interpolación, debido a que no se contó con los datos iniciales (sin carga) de los Strain Gages en este ensayo. Para esto se usaron los datos del ensayo L 26-nov-2007.

En la Fig. 5.57 se aprecia el estado del pegamento con el que se instaló la fibra en el perno luego de finalizar un ensayo a tracción pura. De esta forma, como se explicó anteriormente, fue posible escoger aquel pegamento que tuviera un mejor comportamiento durante todo el ensayo, permitiendo que la fibra se mantuviera adherida al perno para todos los niveles de carga aplicados.



Fig. 5.57: Perno instrumentado con fibra luego de finalizar el ensayo. Se observa el pegamento Poxipol agrietado

5.3.3. Ensayos de Pernos de Anclajes Tipo B, en Losa de H.A.

En la *Tabla 5.12* se muestran los registros de deformación unitaria mediante strain gages del ensayo B 23-ene-2008. Los strain gages de este ensayo fueron dispuestos a 20cm entre sí y a unos 20cm de los puntos de reacción o de aplicación de carga, como puede verse en la *Fig. 4.21*. Se visualizan menores deformaciones que en los ensayos de laboratorio para niveles similares de carga. Sin embargo debe considerarse que sólo se contó con medición de cargas según manómetro, lo que dificulta comparar de mejor forma con los ensayos de laboratorio. No fue posible la aplicación de cargas más altas debido a las deformaciones excesivas de las placas de sujeción (utilizadas en ambos extremos de la barra) pudiendo cortar la fibra (ver *anexo B*).

Tabla 5.12: Ensayo B 23-ene-2008 (terreno, falla tipo bloque). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.

Ensayo B 23-ene-2008				
Carga	ϵ	ϵ	Promedio Def.	$\Delta\epsilon$
Manómetro	(SG-1)	(SG-2)	Unitaria	
[Kgf]	(%)	(%)	(%)	(%)
0	-0,01	-0,01	-0,01	0,00
3000	0,02	0,01	0,02	0,01
6000	0,06	0,05	0,05	0,01
9000	0,09	0,08	0,08	0,01
12000	0,11	0,11	0,11	0,00
15000	-	-	-	-

En la *Tabla 5.13* se muestran los registros de deformación unitaria mediante strain gages del ensayo B 21-feb-2008. Los strain gages de este ensayo fueron dispuestos a 20cm entre sí y a unos 20cm de los puntos de reacción o de aplicación de carga, como puede verse en la *Fig. 4.21*. Se observan similares resultados a los del ensayo B 23-ene-2008, lo que era esperable por tratarse de un mismo tipo de ensayo, aplicando similares niveles de carga. Sin embargo, se aprecia que en la última carga aplicada, la deformación no cambia. No fue posible la aplicación de cargas más altas por deformaciones excesivas de las placas de sujeción.

Tabla 5.13: Ensayo B 21-feb-2008 (terreno, falla tipo bloque). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.

Ensayo B 21-feb-2008					
Carga		ϵ (SG-1)	ϵ (SG-2)	Promedio Def. Unitaria	$\Delta\epsilon$
Manómetro	Celda				
[Kgf]	[Kgf]	(%)	(%)	(%)	(%)
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
3000	2839	0,03	0,03	0,03	0,00
6000	5390	0,06	0,05	0,05	0,01
9000	7785	0,07	0,08	0,07	0,00
12000	10250	0,08	0,08	0,08	0,00
15000	11870	-	-	-	-

5.3.4. Ensayos de Pernos de Anclajes Tipo A, en Losa de H.A.

En la *Tabla 5.14*, se muestran los registros de deformación unitaria mediante strain gages del ensayo AH 26-feb-2008. El strain gage desde el que se rescataron mediciones (SG-2), fue ubicado a unos 50cm desde la superficie de la losa de hormigón (ver *Fig. 4.22* y *Tabla 4.8*). En los niveles más altos de carga de este ensayo, se aprecian deformaciones levemente menores que el ensayo B 23-ene-2008, sin embargo, alcanzó niveles superiores de carga debido a que la deformación de las placas de sujeción, que se encuentran en un sólo extremo, fue menor, permitiendo que el anclaje siga soportando cargas. Las deformaciones máximas obtenidas son menores que en los ensayos en laboratorio (a tracción libre) para similares niveles de carga. Esto era de esperar según la teoría, donde se establece que el material que ancla la barra (en este caso hormigón), por adherencia, se lleva parte de la tensión aplicada y por ende, de la deformación, lo que hace que ambos efectos se vayan disipando con la profundidad (Farmer, 1975). Si se considera además, que la medición de deformación del ensayo proviene del SG-2, que es el que se encuentra a mayor profundidad, esto debiera apreciarse con mayor claridad.

Tabla 5.14: Ensayo AH 26-feb-2008 (terreno, zona anclada en hormigón). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.

Ensayo AH 26-feb-2008					
Carga		ϵ (SG-1)	ϵ (SG-2)	Promedio Def. Unitaria	$\Delta\epsilon$
Manómetro	Celda				
[Kgf]	[Kgf]	(%)	(%)	(%)	(%)
0	0	-	0,00	0,00	-
3000	2882	-	0,03	0,03	-
6000	5318	-	0,04	0,04	-
9000	7891	-	0,07	0,07	-
12000	10343	-	0,09	0,09	-
15000	12786	-	0,11	0,11	-

En la *Tabla 5.15* se muestran los registros de deformación unitaria mediante strain gages del ensayo AH 18-jul-2008. Al igual que en el ensayo anterior, el strain gage del que rescataron mediciones (SG-2) fue ubicado a unos 50cm desde la superficie de la losa de hormigón (ver *Fig. 4.22* y *Tabla 4.8*). Este ensayo muestra resultados similares al ensayo AH 26-feb-2008, lo que era esperable por tratarse de igual tipo de ensayo.

Tabla 5.15: Ensayo AH 18-jul-2008 (terreno, tipo zona anclada en hormigón). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.

Ensayo AH 18-jul-2008					
Carga		ϵ (SG-1)	ϵ (SG-2)	Promedio Def. Unitaria	$\Delta\epsilon$
Manómetro	Celda				
[Kgf]	[Kgf]	(%)	(%)	(%)	(%)
0	0	-	0,00	0,00	-
3000	2814	-	0,04	0,04	-
6000	5144	-	0,06	0,06	-
9000	7546	-	0,07	0,07	-
12000	10166	-	0,08	0,08	-
15000	12712	-	0,12	0,12	-

En la *Tabla 5.16* se muestran sólo resultados de medición de cargas durante el ensayo AR 22-ago-2008. Los datos de strain gages mostrados pertenecen al ensayo AR 08-sep-2008, los cuales se utilizaron para el análisis en lugar de los strain gages del mismo ensayo AR 22-ago-2008, debido a pérdida de mediciones de estos últimos, como se muestra más adelante. La ubicación de los strain gages considerados, se indica a continuación.

Tabla 5.16: Ensayo AR 22-ago-2008 (terreno, tipo zona anclada en resina). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.

Ensayo AR 22-ago-2008					
Carga		ε ** (SG-1)	ε ** (SG-2)	Promedio Def. Unitaria	$\Delta\varepsilon$
Manómetro	Celda				
[Kgf]	[Kgf]	(%)	(%)	(%)	(%)
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
3000	2477	0,01	0,00	0,00	0,01
6000	5040	0,03	0,02	0,02	0,02
9000	7695	0,06	0,04	0,05	0,02
12000	10173	0,08	0,06	0,07	0,02
14500	11695	0,09	0,08	0,09	0,02

**.: Datos de strain gages del ensayo AR 08-sep-2008 para iguales niveles de carga.

En la *Tabla 5.17*, se muestran los registros de deformación unitaria mediante strain gages del ensayo AR 08-sep-2008. Los strain gages de este ensayo se ubicaron a 20cm entre sí y a unos 10cm (SG-1) y 30cm (SG-2) respectivamente, desde la superficie de la losa de hormigón (ver *Fig. 4.22* y *Tabla 4.8*). En forma general durante este ensayo se aprecian deformaciones menores que las de ensayos anteriores, alcanzando tan sólo la mitad de la deformación del ensayo de tracción en laboratorio para un mismo nivel de cargas. Se puede hacer un análisis similar al de los ensayos AH, e incluso argumentar que debido a una mayor rigidez de la resina, se producen menores deformaciones que en ensayos anclados en hormigón. Además, se aprecia que el strain gage más cercano a la superficie indica deformaciones mayores que aquel ubicado a mayor profundidad, lo que nuevamente concuerda con lo esperado según la teoría (Farmer, 1975)

Tabla 5.17: Ensayo AR 08-sep-2008 (terreno, tipo zona anclada en resina). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.

Ensayo AR 08-sep-2008					
Carga		ε (SG-1)	ε (SG-2)	Promedio Def. Unitaria	$\Delta\varepsilon$
Manómetro	Celda				
[Kgf]	[Kgf]	(%)	(%)	(%)	(%)
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
3000	2671	0,01	0,00	0,00	0,01
6000	5179	0,03	0,02	0,02	0,02
9000	7607	0,06	0,04	0,05	0,02
12000	10261	0,08	0,06	0,07	0,02
14500	11967	0,09	0,08	0,09	0,02

En la *Tabla 5.18* se muestran los registros de deformación unitaria mediante strain gages del ensayo AG1 25-nov-2008. Los strain gages de este ensayo se ubicaron a 20cm entre sí y a unos 10cm (SG-1) y 30cm (SG-2) respectivamente, desde la superficie de la losa de hormigón (ver *Fig. 4.22* y *Tabla 4.8*). Se observan deformaciones mayores que el ensayo AR 08-sep-2008 para similares niveles de carga, lo que puede explicarse por una mayor rigidez de la resina en comparación con la de la lechada de cemento o *grout*. Nuevamente se visualiza el efecto del confinamiento del material, en este caso *grout*, y su aumento en profundidad.

Tabla 5.18: Ensayo AG1 25-nov-2008 (terreno, tipo zona anclada en grout). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.

Ensayo AG1 25-nov-2008					
Carga		ϵ (SG-1)	ϵ (SG-2)	Promedio Def. Unitaria	$\Delta\epsilon$
Manómetro	Celda				
[Kgf]	[Kgf]	(%)	(%)	(%)	(%)
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
3000	2908	0,05	0,03	0,04	0,03
6000	5405	0,09	0,06	0,07	0,03
9000	7565	0,12	0,07	0,10	0,05
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

En la *Tabla 5.19* se muestran sólo resultados de medición de cargas del ensayo AG 22-ago-2008. Los datos de strain gages mostrados, pertenecen al ensayo AG1 25-nov-2008, los cuales se utilizaron para el análisis en lugar de los strain gages del mismo ensayo AG2 25-nov-2008, debido a mediciones deficientes de estos últimos. Además, estas mediciones se obtuvieron sólo hasta los 6000kgf, como se verá más adelante.

Tabla 5.19: Ensayo AG2 25-nov-2008 (terreno, tipo zona anclada en grout). Lecturas de Carga y Deformación Unitaria.

Ensayo AG2 25-nov-2008					
Carga		ϵ (SG-1)	ϵ (SG-2)	Promedio Def. Unitaria	$\Delta\epsilon$
Manómetro	Celda				
[Kgf]	[Kgf]	(%)	(%)	(%)	(%)
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
3000	2906	0,05	0,03	0,04	0,03
6000	5451	0,09	0,06	0,07	0,03
9000	7926	0,12	0,07	0,10	0,05
12000	10370	-	-	-	-
14500	11942	-	-	-	-

****:** Datos de strain gages del ensayo AG1 25-nov-2008 para iguales niveles de carga.

De las tablas anteriores se observa que en los ensayos a tracción pura (L y B), la diferencias entre las lecturas de strain gages (Δ Strain) son del orden del error estimado de éstos.

En los casos de los ensayos embebidos en material confinante, AR 08-sep-2008 y AG1 25-nov-2008, es posible apreciar que estas diferencias son mayores, lo que comprobaría el supuesto de que las deformaciones se concentran en la superficie del terreno (donde se aplica la carga) y se disipan con la profundidad del anclaje. En los ensayos tipo AH, anclados directamente al hormigón, esto no se puede confirmar con claridad, debido a que sólo se obtienen mediciones del strain gage ubicado a mayor profundidad.

A continuación, desde la Fig. 5.58 a la Fig. 5.61 se muestran, gráficamente, los resultados de deformación unitaria obtenidos con strain gages en función de la distancia (profundidad) a lo largo del perno en cada uno de los ensayos. A diferencia de las tablas mostradas anteriormente, se utilizan acá los registros de strain gages tal cual fueron obtenidos en cada ensayo, donde algunos de ellos fueron descartados para el resto de los análisis de esta investigación. Se presentan en forma separada los resultados para ensayos tipo AH, AR y AG. Los datos se muestran en forma de puntos, a los cuales se aplicó una regresión exponencial, de tal manera corroborar los resultados encontrados por Farmer (1975). Los parámetros que definen las regresiones exponenciales se adjuntan en tablas para cada ensayo. Las regresiones exponenciales asumen que a gran profundidad ($\geq 1\text{m}$), la tensión y deformación en el perno son completamente disipadas, por lo cual se impone una deformación nula. En casos donde existen datos de strain gages para dos

ensayos del mismo tipo, las regresiones exponenciales entre ambos se diferencian con líneas continuas o punteadas. En la *Fig. 5.58* se aprecia que existe sólo un punto por ensayo en cada nivel de carga ya que, como se mencionó anteriormente, en algunos casos se obtuvo sólo la medición de un strain gage (específicamente el SG-2 en la figura mencionada). En los ensayos AR y AG (ver *Fig. 5.59* y *Fig. 5.60*), se obtuvieron mediciones de ambos strain gages para cada ensayo realizado. Sin embargo, en los análisis se prefirió descartar algunos de los datos mostrados, ya sea porque éstos no alcanzaron mediciones para cargas altas o por poseer correlaciones exponenciales de menor calidad que en otros ensayos similares.

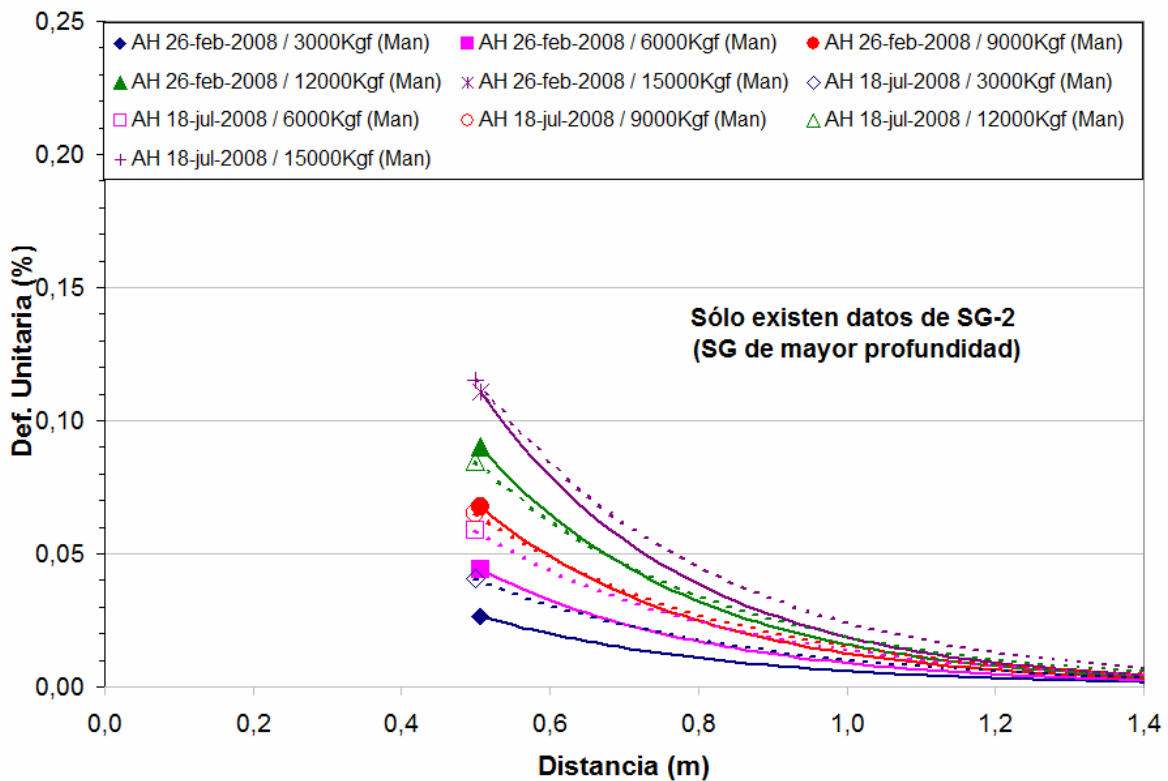


Fig. 5.58: Ensayos tipo AH. Deformación unitaria en distancia o profundidad en anclaje sometido a tracción. Datos entregados por los strain gages.

Las regresiones exponenciales trazadas sobre los datos son de la forma:

$$y = a \cdot e^{-(b \cdot x)}$$

Ec. 5.5: Relación exponencial para distribución de deformación de strain gages en profundidad. Ensayos tipo A (AH, AR, AG).

Donde a y b son constantes positivas y x indica la profundidad en el anclaje desde la superficie. La *Tabla 5.20* muestra los valores para los parámetros de cada curva de la *Fig. 5.58*, especificando el ensayo y nivel de carga según manómetro.

Tabla 5.20: Ensayos tipo AH (terreno, tipo zona anclada en hormigón). Parámetros decaimiento exponencial de deformación en profundidad (ver Ec. 5.5).

Ensayo / Carga (Man.)	Parámetro	
	a	b
AH 26-feb-2008 / 3000 Kgf	0,124	3,039
AH 26-feb-2008 / 6000 Kgf	0,228	3,236
AH 26-feb-2008 / 9000 Kgf	0,377	3,399
AH 26-feb-2008 / 12000 Kgf	0,533	3,511
AH 26-feb-2008 / 15000 Kgf	0,682	3,590
AH 18-jul-2008 / 3000 Kgf	0,162	2,770
AH 18-jul-2008 / 6000 Kgf	0,249	2,892
AH 18-jul-2008 / 9000 Kgf	0,282	2,928
AH 18-jul-2008 / 12000 Kgf	0,382	3,014
AH 18-jul-2008 / 15000 Kgf	0,548	3,117

En la *Fig. 5.59* se utilizan registros de strain gages de ambos ensayos tipo AR. Al observar la figura, es posible distinguir la baja calidad de los registros del ensayo AR 22-ago-2008 (en particular la curva para 6000Kgf). Además, los registros para la carga de 12000Kgf resultaron ser deficientes (ver anexo A), por lo cual no son incluidos en la figura. Por estas razones, se decide no considerar estas mediciones y utilizar los registros del ensayo AR 08-sep-2008 para futuros análisis en ambos ensayos. Por otra parte, se aprecia un par de puntos correspondientes al ensayo AR 08-sep-2008, nivel de carga 3000Kgf, donde no fue posible ajustar una curva exponencial ya que esta función es siempre positiva según su definición.

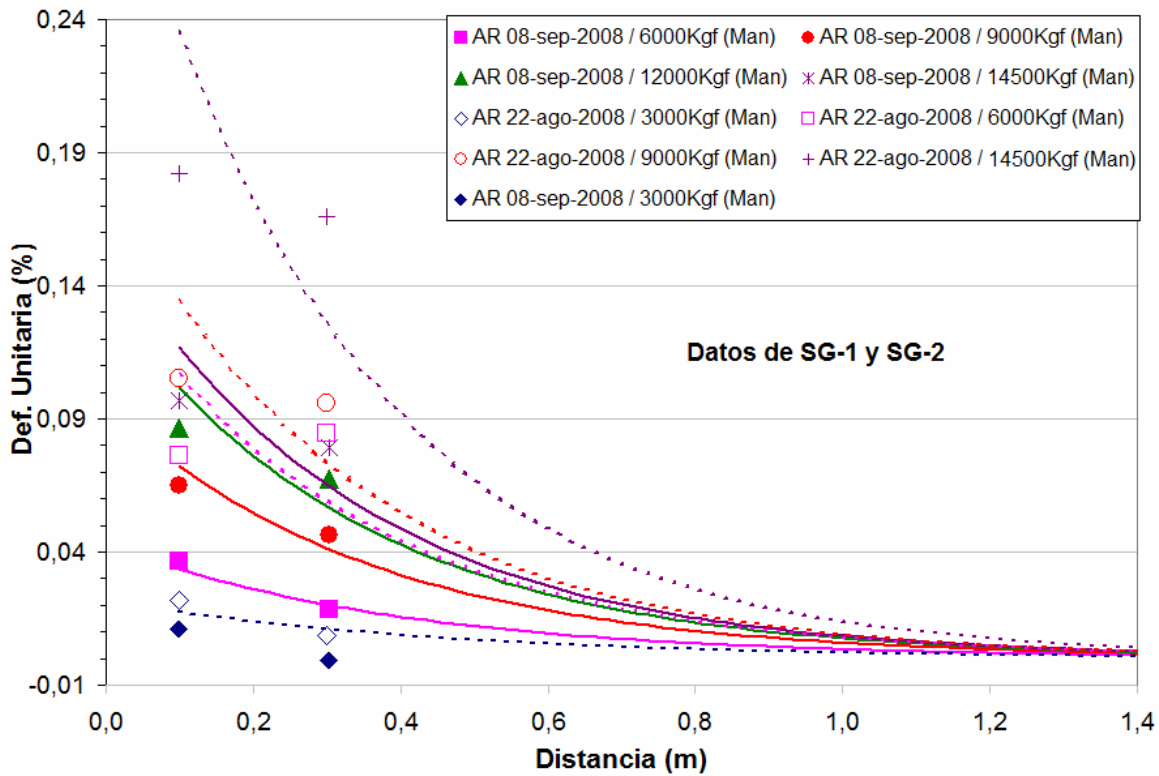


Fig. 5.59: Ensayos Tipo AR. Distribución de deformación unitaria en distancia o profundidad en anclaje sometido a tracción. Datos entregados por los strain gages.

La *Tabla 5.21* muestra los valores para los parámetros de cada curva de la *Fig. 5.59*, especificando el ensayo y nivel de carga según manómetro.

Tabla 5.21: Ensayos tipo AR (terreno, tipo zona anclada en resina). Parámetros decaimiento exponencial de deformación en profundidad (ver Ec. 5.5).

Ensayo / Carga (Man.)	Parámetro	
	<i>a</i>	<i>b</i>
AR 22-ago-2008 / 3000 Kgf	0,022	2,340
AR 22-ago-2008 / 6000 Kgf	0,142	2,890
AR 22-ago-2008 / 9000 Kgf	0,180	2,965
AR 22-ago-2008 / 14500 Kgf	0,323	3,141
AR 08-sep-2008 / 3000 Kgf	-	-
AR 08-sep-2008 / 6000 Kgf	0,038	2,495
AR 08-sep-2008 / 9000 Kgf	0,090	2,754
AR 08-sep-2008 / 12000 Kgf	0,130	2,865
AR 08-sep-2008 / 14500 Kgf	0,151	2,910

En la Fig. 5.60 se utilizan registros de strain gages de ambos ensayos tipo AG. Como puede observarse, el ensayo AG2 25-nov-2008 sólo posee mediciones hasta los 6000Kgf y las curvas exponenciales no se ajustan bien a los registros de strain gages de este ensayo. Por estas razones se decide no considerar estas mediciones y utilizar los registros del ensayo AG1 25-nov-2008 para futuros análisis en ambos ensayos.

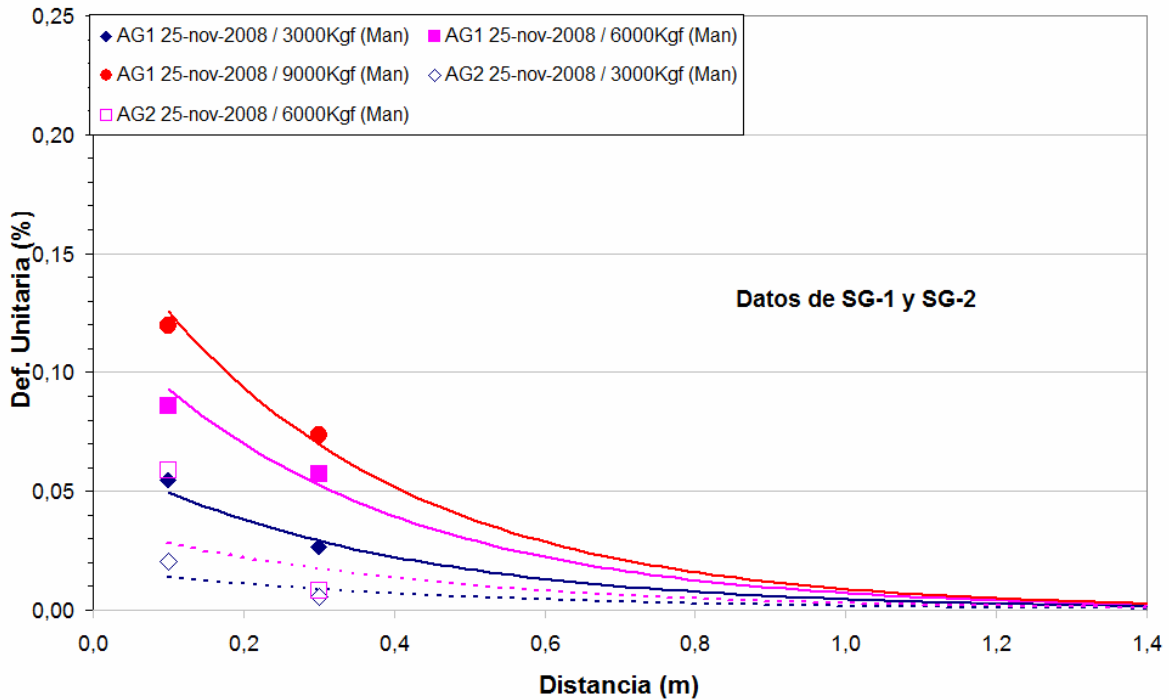


Fig. 5.60: Ensayos Tipo AG. Distribución de deformación unitaria en distancia o profundidad en anclaje sometido a tracción. Datos entregados por los strain gages.

La Tabla 5.22 muestra los valores para los parámetros de cada curva de la Fig. 5.60, especificando el ensayo y nivel de carga según manómetro.

Tabla 5.22: Ensayos tipo AG (terreno, tipo zona anclada en grout). Parámetros decaimiento exponencial de deformación en profundidad (ver Ec. 5.5).

Ensayo / Carga (Man.)	Parámetro	
	<i>a</i>	<i>b</i>
AG1 25-nov-2008 / 3000 Kgf	0,065	2,662
AG1 25-nov-2008 / 6000 Kgf	0,124	2,855
AG1 25-nov-2008 / 9000 Kgf	0,169	2,949
AG2 25-nov-20088 / 3000 Kgf	0,017	2,268
AG2 25-nov-2008 / 6000 Kgf	0,037	2,502

En la Fig. 5.61 se muestra un resumen de las figuras anteriores, incluyendo los tres tipos de ensayos tipo zona anclada.

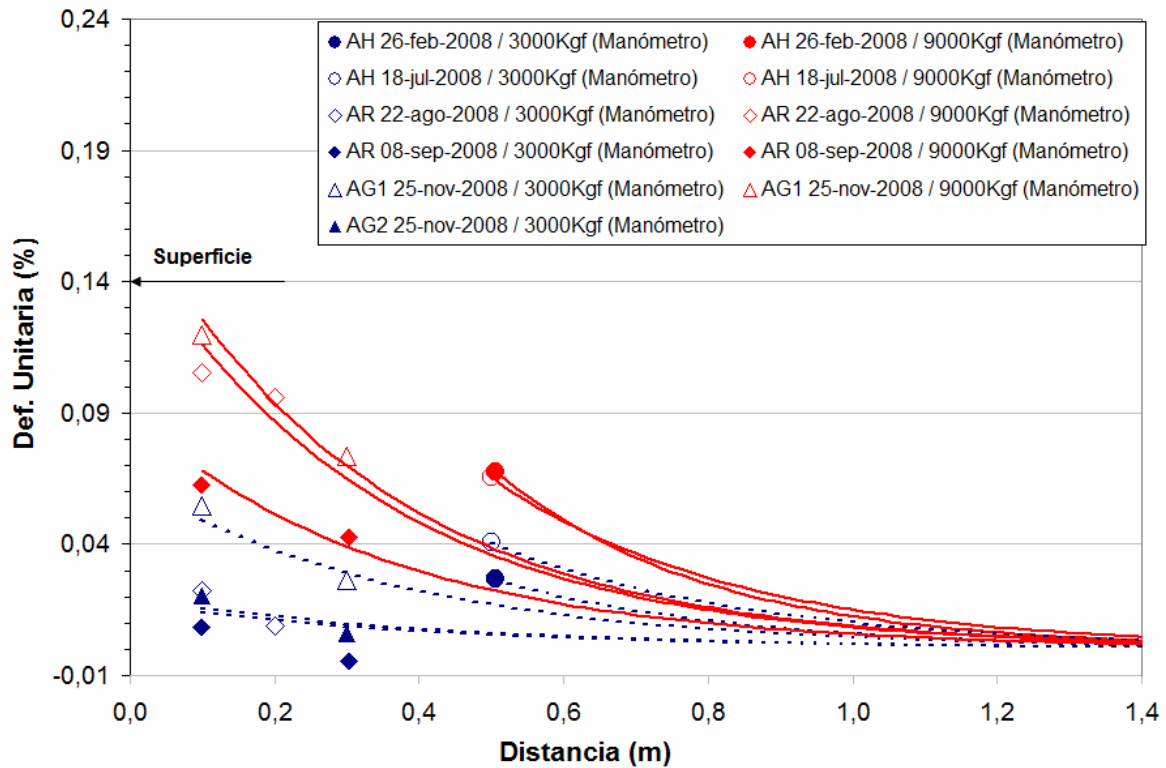


Fig. 5.61: Resumen. Distribución de deformación unitaria en distancia o profundidad en anclaje sometido a tracción. Datos entregados por los strain gages.

La Fig. 5.61 muestra su gran concordancia con lo esperado según la teoría que predice un decaimiento exponencial de las deformaciones con la profundidad al aplicar cargas al anclaje, según lo expuesto por Farmer (1975). Además, al considerar todos los ensayos tipo A, se puede concluir que el coeficiente “ b ” que acompaña a la variable de profundidad “ x ” dentro de la exponencial (coeficiente “ α ” según Farmer (1975)), varía en el rango (2,2 ; 3,6).

Tabla 5.23: Ensayos tipo AH, AR y AG (en terreno, tipo zona anclada). Parámetros decaimiento exponencial de deformación en profundidad (ver Ec. 5.5).

Ensayo / Carga (Man.)	Parámetro	
	<i>a</i>	<i>b</i>
AH 26-feb-2008 / 3000Kgf	0,124	3,039
AH 26-feb-2008 / 9000Kgf	0,377	3,399
AH 18-jul-2008 / 3000Kgf	0,162	2,770
AH 18-jul-2008 / 9000Kgf	0,282	2,928
AR 22-ago-2008 / 3000 Kgf	0,022	2,340
AR 22-ago-2008 / 9000 Kgf	0,180	2,965
AR 08-sep-2008 / 3000 Kgf	-	-
AR 08-sep-2008 / 9000 Kgf	0,090	2,754
AG1 25-nov-2008 / 3000 Kgf	0,065	2,662
AG1 25-nov-2008 / 9000 Kgf	0,169	2,949
AG2 25-nov-20088 / 3000 Kgf	0,017	2,268

A continuación, la *Fig. 5.62* y la *Fig. 5.63* muestran gráficamente los resultados de deformación unitaria obtenidos con strain gages en función de la tensión aplicada al perno en la superficie, para cada uno de los ensayos. Al igual que las figuras de distribución de deformación con la profundidad del anclaje, se utilizan acá los registros de strain gages tal cual fueron obtenidos en cada ensayo. La *Fig. 5.62* muestra por separado los resultados de los strain gages 1 y 2, para los ensayos donde se contó con ambos dispositivos midiendo, mostrando lo que ocurre en sus respectivas profundidades. En estos casos, la *Fig. 5.63* muestra el promedio de ambos strain gages y en los casos donde sólo se contó con un strain gage, se repiten los registros de la figura anterior. Los datos se muestran en forma de puntos, a los cuales se aplicó una regresión lineal, de tal manera corroborar los resultados encontrados por Farmer (1975). Los parámetros que definen estas regresiones lineales son: la pendiente de la relación lineal y el coeficiente de correlación R^2 . Los valores de estos se adjuntan en la *Tabla 5.24* y la *Tabla 5.25*.

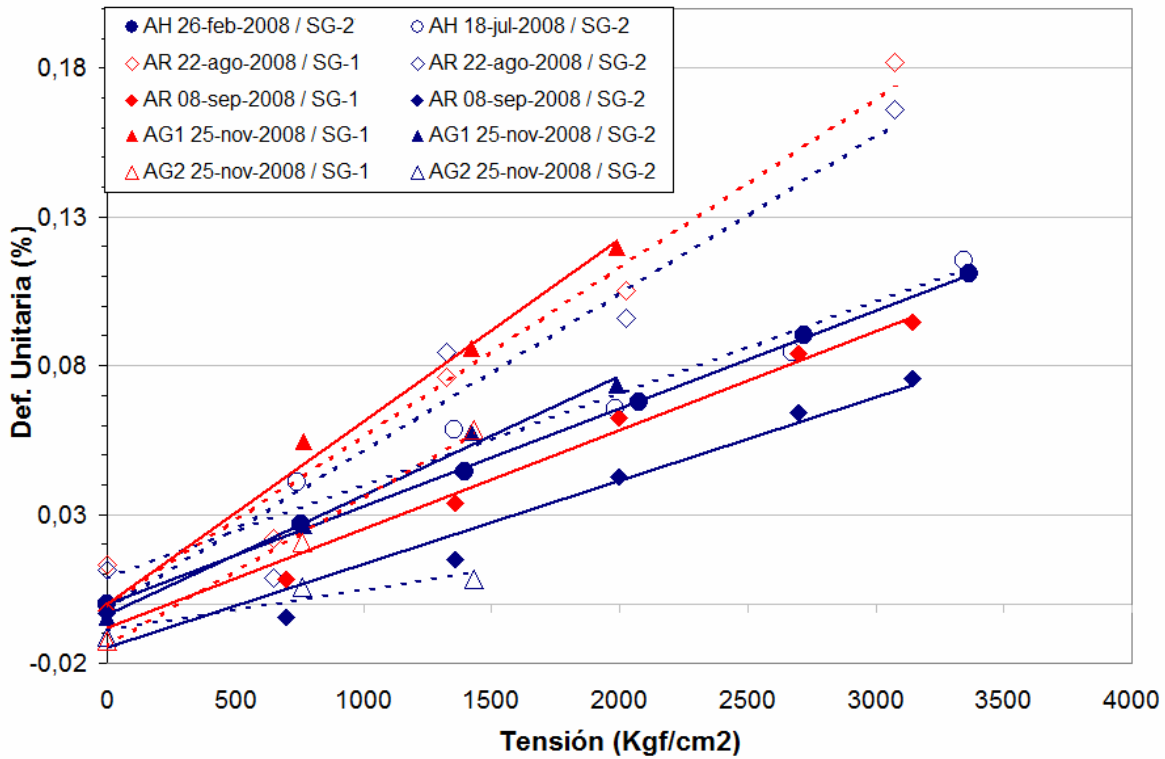


Fig. 5.62: Relación entre la tensión aplicada en el extremo libre del anclaje versus deformación unitaria a distintas profundidades. Datos entregados por los strain gages.

Tabla 5.24: Ensayos tipo AH, AR y AG (en terreno, tipo zona anclada). Parámetros relación lineal tensión-deformación. Datos de strain gage 1 y 2.

Ensayo / strain gage	Parámetro	
	pendiente	R ²
AH 26-feb-2008 / SG-2	$3,3 \times 10^{-5}$	0,999
AH 18-jul-2008 / SG-2	$3,1 \times 10^{-5}$	0,961
AR 22-ago-2008 / SG-1	$5,7 \times 10^{-5}$	0,972
AR 22-ago-2008 / SG-2	$5,3 \times 10^{-5}$	0,935
AR 08-sep-2008 / SG-1	$3,3 \times 10^{-5}$	0,986
AR 08-sep-2008 / SG-2	$2,8 \times 10^{-5}$	0,949
AG1 25-nov-2008 / SG-1	$6,1 \times 10^{-5}$	0,990
AG1 25-nov-2008 / SG-2	$4,0 \times 10^{-5}$	0,993
AG2 25-nov-2008 / SG-1	$5,0 \times 10^{-5}$	0,994
AG2 25-nov-2008 / SG-2	$1,4 \times 10^{-5}$	0,867

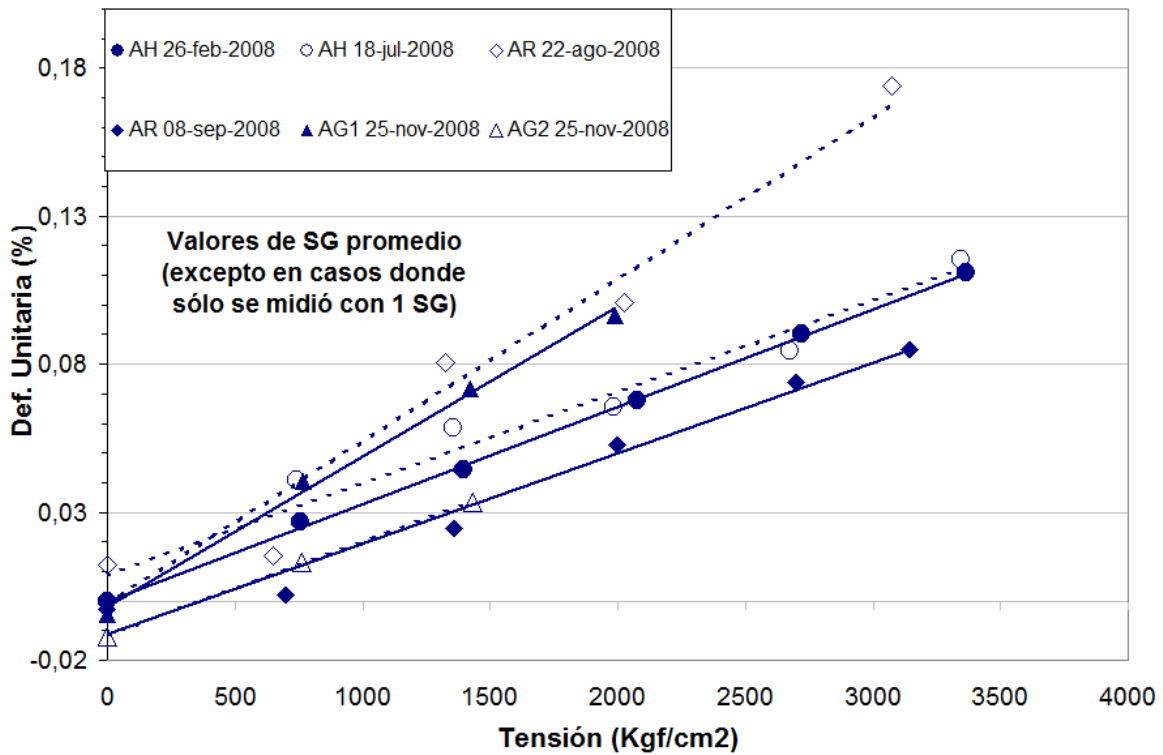


Fig. 5.63: Tensión aplicada en el extremo libre del anclaje versus deformación unitaria promedio obtenida. Datos entregados por los strain gages.

Tabla 5.25: Ensayos tipo AH, AR y AG (en terreno, tipo zona anclada). Parámetros relación lineal tensión-deformación. Promedio strain gages 1 y 2.

Ensayo	Parámetro	
	pendiente	R ²
AH 26-feb-2008	$3,3 \times 10^{-5}$	0,999
AH 18-jul-2008	$3,1 \times 10^{-5}$	0,961
AR 22-ago-2008	$5,5 \times 10^{-5}$	0,958
AR 08-sep-2008	$3,1 \times 10^{-5}$	0,973
AG1 25-nov-2008	$5,1 \times 10^{-5}$	0,995
AG2 25-nov-2008	$3,2 \times 10^{-5}$	1,000

La Fig. 5.62 y la Fig. 5.63 concuerdan también con lo esperado, mostrando la dependencia lineal del strain (en cualquier profundidad) con la tensión aplicada al anclaje, según Farmer (1975).

5.4. Resultados BOTDR

Desde la *Tabla 5.26* a la *Tabla 5.42* se presentan resultados obtenidos según lecturas de la fibra óptica sensora utilizando la metodología con alternativas antes descrita. Los datos corresponden a posiciones fijas en la fibra adherida a la barra, que se encuentran dentro de ambos tramos de fibra tensada, cercano a la ubicación de los Strain Gages. Se define así el *Punto 1*, que se encontrará en el primer tramo (tramo 1) donde además se encuentran instalados los strain gages y el *Punto 2* que se ubica en el segundo tramo (tramo 2), por el lado opuesto de los Strain Gages. La *Fig. 5.64*, similar a la *Fig. 4.22* mostrada anteriormente, detalla la zona de ubicación de estos puntos de observación (en algunas figuras y/o tablas se abrevian como Pto.1 y Pto.2). Es importante mencionar, que los *Puntos 1* y *2* fueron escogidos considerando además, el perfil de deformación visualizado a través del *software*. De esta forma, se escogieron posiciones que en lo posible se encontraran dentro del tramo deformado, no sólo según los datos del mapeo, sino que también considerando la lectura del sistema BOTDR. Se incluyen también resultados asociados a la vecindad del *Punto 1*, ubicados a 5cm y 10cm de éste (se les denomina *Punto 1+5cm* y *Punto 1+10cm*) en el sentido de avance de la fibra que comienza desde la salida del analizador BOTDR. Al estar en la vecindad del *Punto 1*, estos nuevos puntos quedan también dentro del primer tramo (tramo 1) de fibra sensora. Las correlaciones estudiadas en este capítulo, se efectuaron entre los datos de frecuencias promedio BOTDR y los registros de deformación promedio entregados por los strain gages. Al tomar el promedio de estos, se asume que existe la misma deformación en los *Puntos 1*, *1+5cm*, *1+10cm* y *2*; lo que deja de ser cierto particularmente en los ensayos tipo zona anclada, donde la deformación del perno, según la teoría, disminuye con la profundidad.

En las tablas mencionadas (*Tabla 5.26* a la *Tabla 5.42*), se muestra además una columna titulada "*Sigue Tendencia Si/No*". El caso "Si" indica que los datos de frecuencia promedio están ordenados monótonamente de menor a mayor según el incremento de cargas, por lo que se puede lograr una correlación entre ellos. Si en al menos un nivel de carga, se obtiene un valor de frecuencia promedio menor o igual que el asociado al nivel de carga anterior, se dice que el ordenamiento de frecuencias promedio no sigue la tendencia, es decir, se indica "No". La *Tabla 5.26* muestra un ejemplo de este procedimiento, en ella aparecen indicadas además las alternativas de deducción de

frecuencias promedio. Como se mencionó anteriormente, la alternativa 1 corresponde a frecuencias promedio de curvas desplazadas en 100dB; la alternativa 2, a una diferencia entre frecuencias (Δ frecuencia), restando la frecuencia máxima del rango y la frecuencia promedio de curvas sin desplazar. La alternativa 3 deduce frecuencias promedio de curvas desplazadas en la potencia mínima (dB) del rango. Finalmente, la alternativa 4 deduce frecuencias promedio de curvas transformadas mediante la función inversa que define el decibel.

El objetivo de este análisis es el poder recuperar, en un rango acotado, el valor de deformación existente en el anclaje, dada la frecuencia promedio deducida de la información proporcionada por el sistema BOTDR.

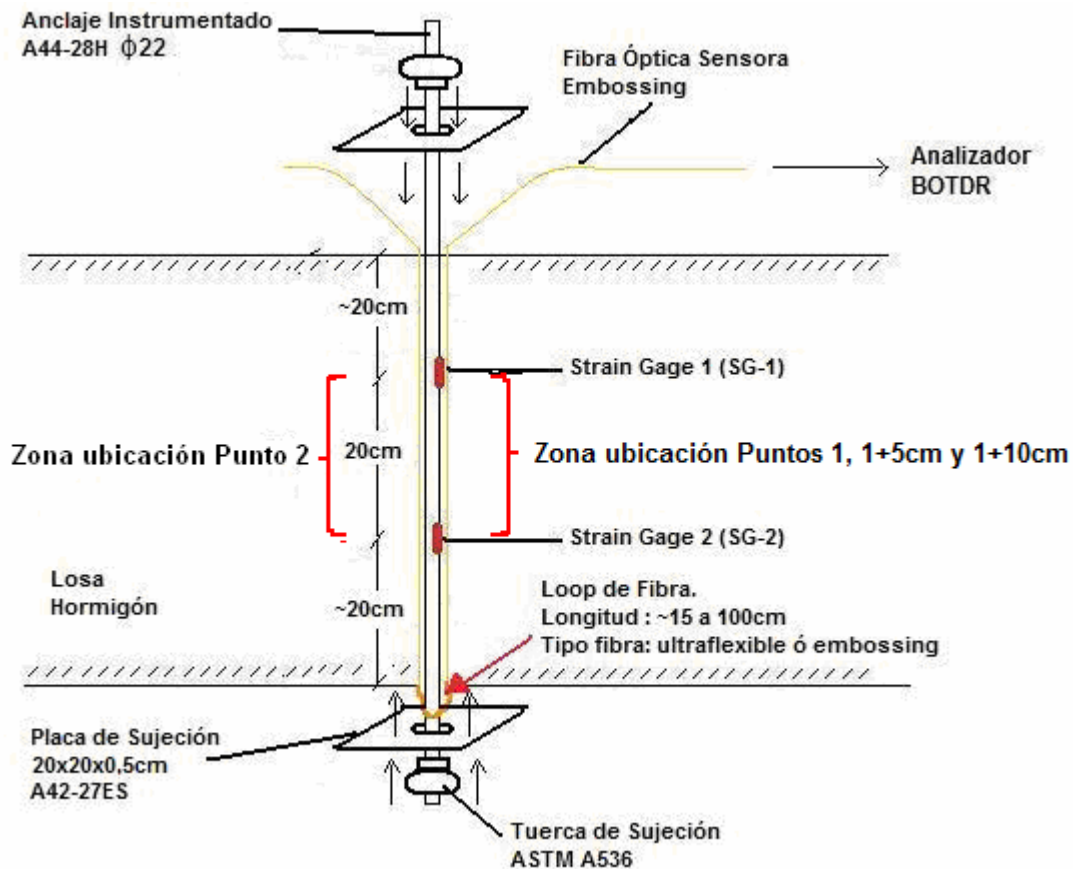


Fig. 5.64: Zonas de ubicación puntos de observación 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Tabla 5.26: Tendencias de frecuencias promedio según nivel de carga. Datos ensayo AR 08-sep-2008, paso 10MHz.

Rango Frecuencias (GHz)	Alter.	Frecuencias Promedio para Distintos Estados de Carga (GHz)						Sigue Tendencia Sí/No
		0Kgf	3000kgf	6000kgf	9000kgf	12000kgf	14500kgf	
10,8-11,1	1	10,9425	10,9433	10,9426	10,9432	10,9451	10,9456	No
10,8-11,1	2	0,1378	0,1390	0,1377	0,1387	0,1415	0,1424	No
10,8-11,1	3	10,9192	10,9139	10,9303	10,9149	10,9256	10,9147	No
10,8-11,1	4	10,8782	10,8835	10,8851	10,8941	10,9033	10,9062	Sí
10,8-11,0	1	10,8971	10,8975	10,8981	10,8987	10,8989	10,8993	Sí
10,8-11,0	2	0,0947	0,0954	0,0963	0,0974	0,0979	0,0987	Sí
10,8-11,0	3	10,8721	10,8752	10,8783	10,8863	10,8860	10,8849	No
10,8-11,0	4	10,8701	10,8737	10,8772	10,8838	10,8917	10,8930	Sí

Desde la Fig. 5.65 a la Fig. 5.67 se muestra la sensibilidad de las curvas de espectro con respecto a la posición de la fibra escogida. Se espera obtener resultados similares en el Punto 1 y su vecindad (i.e. Pto.1+5cm y Pto.1+10cm). En los datos se distinguen los parámetros de paso de frecuencia (*step frequency*), que alternan entre 10 ó 20MHz como se explicó anteriormente. Debido a que existen lecturas realizadas con distintos pasos, se prefiere comparar datos que hayan sido tomados con el mismo *setup*. En algunos ensayos, al no contar con datos de ambos pasos en cada nivel de carga, el cálculo de frecuencias promedio no tiene su respectiva réplica según nivel de carga. Por ejemplo, puede existir una lectura para una carga de 3000Kgf tomada con un paso de 10MHz, y no con un paso de 20MHz para el mismo nivel de cargas.

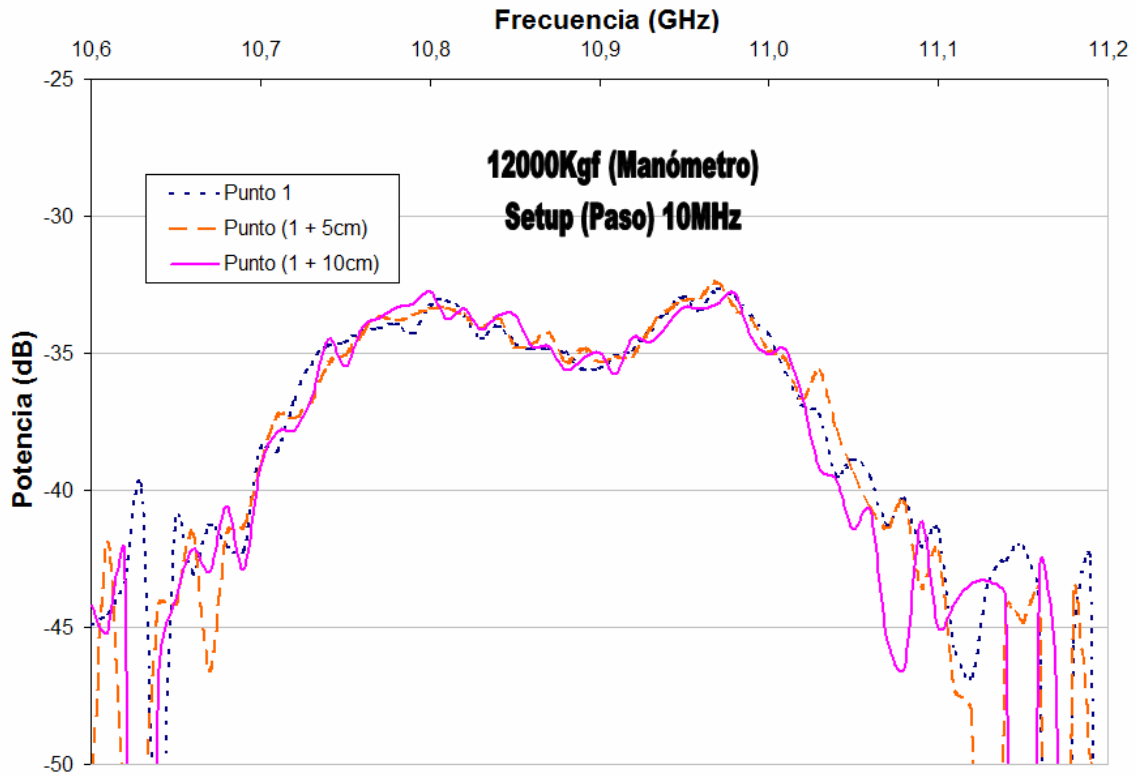


Fig. 5.65: Curvas de espectro en vecindad del punto 1 (a 5 y 10cm de éste). Datos de ensayo perno a tracción en laboratorio, L 26-dic-2007. Setup en 10MHz.

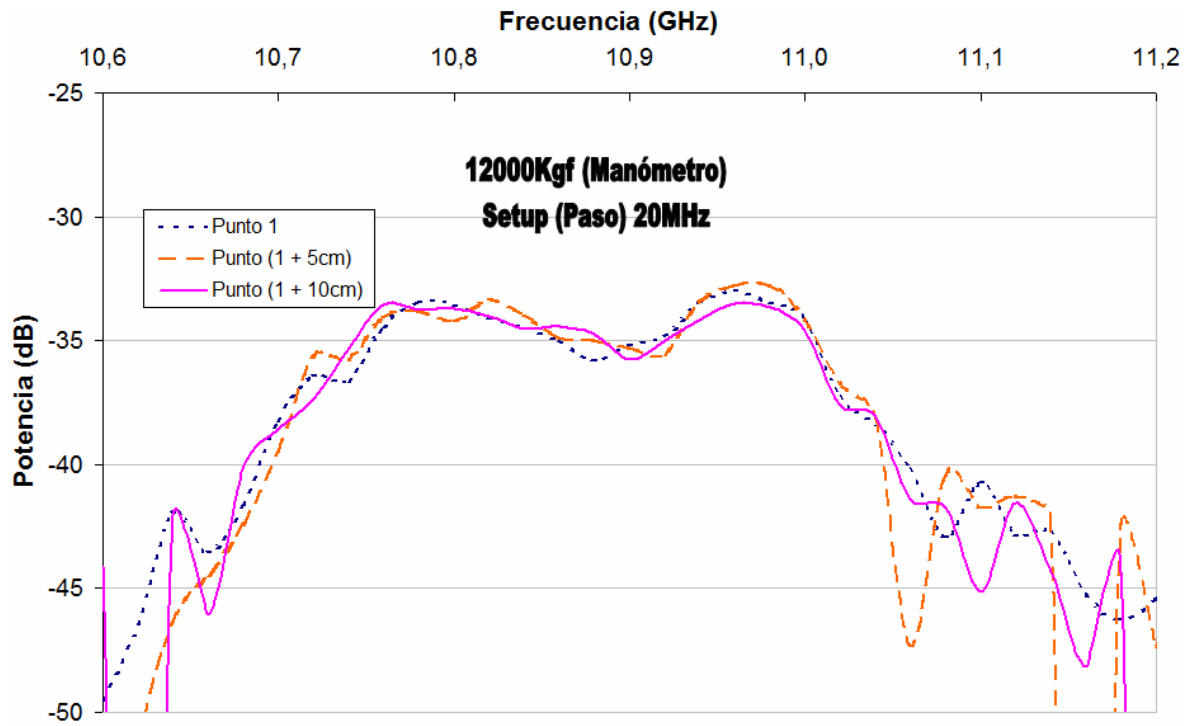


Fig. 5.66: Curvas de espectro en vecindad del punto 1 (a 5 y 10cm de éste). Datos de ensayo perno a tracción en laboratorio, L 26-dic-2007. Setup en 20MHz.

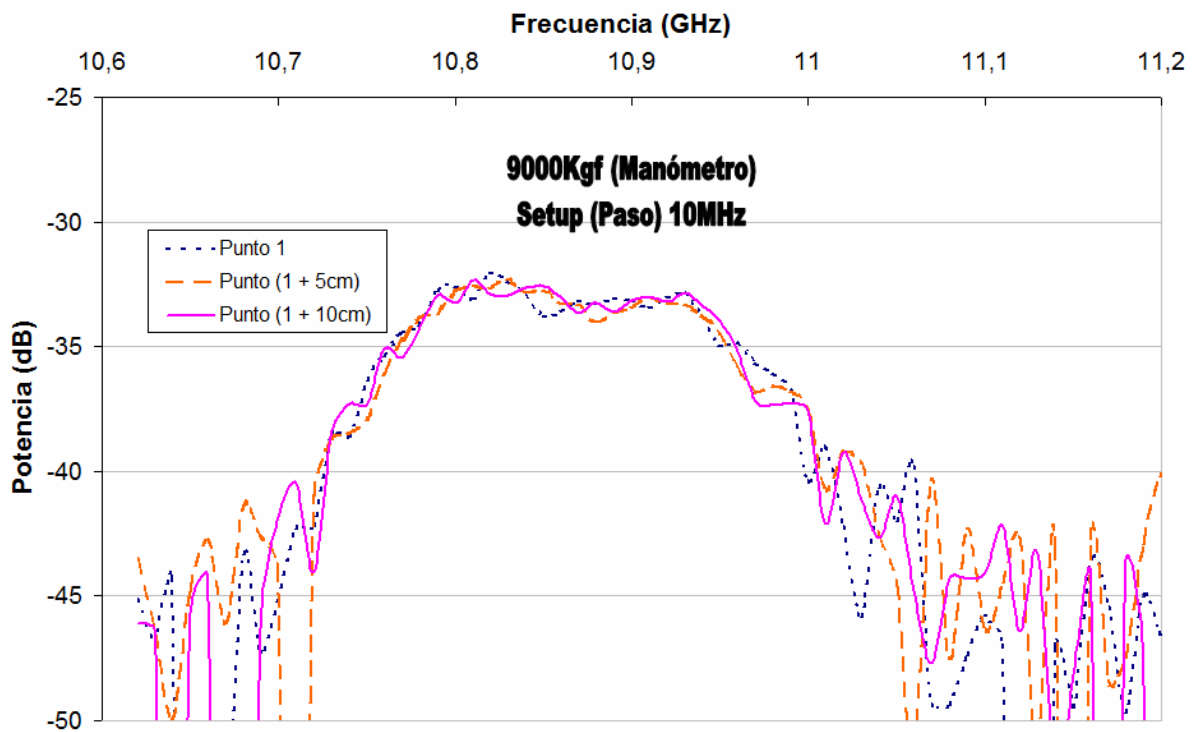


Fig. 5.67: Curvas de espectro en vecindad del punto 1 (a 5 y 10cm de éste). Datos de ensayo perno a tracción en laboratorio, AR 08-sep-2008. Setup en 10MHz.

A continuación, desde la *Tabla 5.27* a la *Tabla 5.38*, se presentan resultados obtenidos según lecturas de la fibra óptica sensora utilizando la metodología con alternativas antes descrita. Como se mencionó anteriormente, la columna titulada “Sigue tendencia Sí/No” indica si los datos de frecuencia promedio están ordenados monótonamente de menor a mayor según el incremento de cargas (caso “Sí”), o el caso contrario, cuando en al menos un nivel de carga, se obtiene un valor de frecuencia promedio menor o igual que el asociado al nivel de carga anterior (caso “No”). Posteriormente, desde la *Fig. 5.69* a la *Fig. 5.137*, se muestra en forma gráfica los resultados incluidos en las tablas mencionadas. Estas figuras incluyen algunos ejemplos de lo que ocurre en una vecindad del *Punto 1*. Se muestran figuras asociadas al rango 10,8GHz -11,0GHz, pero en las tablas se pueden observar resultados de ambos rangos (10,8GHz -11,0GHz y 10,8GHz -11,1GHz). Al final de este capítulo se expone un análisis estadístico más detallado, sobre la totalidad de los resultados.

Tabla 5.27: Punto1-Alternativa 1. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas desplazadas en 100dB versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.

Ensayo	Tipo Ensayo	Paso (MHz)	Frec. Prom. Curvas Desplazadas en 100dB			
			Rango Considerado (GHz)	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²
L 26-nov-2007 ¹	Laboratorio – Tracción	20	10,8-11,1	No	0,0124	0,6878
			10,8-11,0	Sí	0,0254	0,8801
L 26-dic-2007	Laboratorio – Tracción	10	10,8-11,1	Sí	0,0266	0,9960
			10,8-11,0	Sí	0,0108	0,9254
		20	10,8-11,1	Sí	0,0272	0,9503
			10,8-11,0	Sí	0,0191	0,8634
B 23-ene-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,0739	0,9787
			10,8-11,0	Sí	0,0187	0,9847
		20	10,8-11,1	No	0,0733	0,5721
			10,8-11,0	Sí	0,0331	0,8879
B 21-feb-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	No	0,0908	0,4575
			10,8-11,0	Sí	0,0359	0,6821
		20	10,8-11,1	Sí	0,0868	0,8027
			10,8-11,0	Sí	0,0627	0,9479
AH 26-feb-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,0033	0,0175
			10,8-11,0	No	0,0058	0,2388
		20	10,8-11,1	No	-0,0007	0,0004
			10,8-11,0	No	0,0027	0,0563
AH 18-jul-2008 ²	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,0216	0,4553
			10,8-11,0	No	0,0040	0,0903
AR 22-ago-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,0262	0,7619
			10,8-11,0	No	0,0223	0,9320
		20	10,8-11,1	No	0,0336	0,7356
			10,8-11,0	Sí	0,0305	0,8763
AR 08-sep-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,0311	0,7505
			10,8-11,0	Sí	0,0225	0,9731
		20	10,8-11,1	No	0,0091	0,2158
			10,8-11,0	Sí	0,0265	0,9801
AG1 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	0,0156	0,1534
			10,8-11,0	Sí	0,0209	0,9952
		20	10,8-11,1	No	0,0215	0,6023
			10,8-11,0	Sí	0,0164	0,9690
AG2 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	-0,0006	0,0009
			10,8-11,0	No	0,0100	0,7455
		20	10,8-11,1	Sí	0,0562	0,9740
			10,8-11,0	No	0,0219	0,9095

¹: En este ensayo sólo se tomaron lecturas con paso de 20MHz

²: En este ensayo sólo se tomaron lecturas con paso de 10MHz

Tabla 5.28: Punto1+5cm-Alternativa 1. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas desplazadas en 100dB versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.

Ensayo	Tipo Ensayo	Paso (MHz)	Frec. Prom. Curvas Desplazadas en 100dB			
			Rango Considerado (GHz)	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²
L 26-nov-2007	Laboratorio – Tracción	20	10,8-11,1	No	0,0149	0,8021
			10,8-11,0	Sí	0,0198	0,9077
L 26-dic-2007	Laboratorio – Tracción	10	10,8-11,1	Sí	0,0300	0,9668
			10,8-11,0	Sí	0,0101	0,9094
		20	10,8-11,1	No	0,0238	0,9189
			10,8-11,0	Sí	0,0183	0,8953
B 23-ene-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,0800	0,9795
			10,8-11,0	No	0,0233	0,5430
		20	10,8-11,1	No	0,0485	0,2755
			10,8-11,0	Sí	0,0239	0,9021
B 21-feb-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	No	0,1128	0,5818
			10,8-11,0	Sí	0,0450	0,8239
		20	10,8-11,1	No	0,0697	0,4964
			10,8-11,0	Sí	0,0447	0,8957
AH 26-feb-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,0046	0,0409
			10,8-11,0	No	0,0125	0,9063
		20	10,8-11,1	No	0,0021	0,0025
			10,8-11,0	No	0,0077	0,2383
AH 18-jul-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	-0,0156	0,5465
			10,8-11,0	No	-0,0057	0,0908
AR 22-ago-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,0183	0,8449
			10,8-11,0	No	0,0226	0,8838
		20	10,8-11,1	No	0,0381	0,8155
			10,8-11,0	Sí	0,0223	0,9595
AR 08-sep-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,0284	0,7558
			10,8-11,0	Sí	0,0300	0,9448
		20	10,8-11,1	No	0,0176	0,5520
			10,8-11,0	No	0,0294	0,9334
AG1 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	0,0154	0,3729
			10,8-11,0	Sí	0,0184	0,9859
		20	10,8-11,1	No	0,0210	0,6768
			10,8-11,0	Sí	0,0207	0,8656
AG2 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	0,0080	0,5640
			10,8-11,0	No	0,0180	0,8927
		20	10,8-11,1	No	0,0144	0,5178
			10,8-11,0	No	0,0164	0,9710

Tabla 5.29: Punto1+10cm-Alternativa 1. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas desplazadas en 100dB versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.

Ensayo	Tipo Ensayo	Paso (MHz)	Frec. Prom. Curvas Desplazadas en 100dB			
			Rango Considerado (GHz)	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²
L 26-nov-2007	Laboratorio – Tracción	20	10,8-11,1	Sí	0,0185	0,9566
			10,8-11,0	Sí	0,0244	0,8544
L 26-dic-2007	Laboratorio – Tracción	10	10,8-11,1	Sí	0,0327	0,9959
			10,8-11,0	Sí	0,0110	0,9377
		20	10,8-11,1	No	0,0303	0,7861
			10,8-11,0	Sí	0,0161	0,9049
B 23-ene-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,0800	0,9795
			10,8-11,0	No	0,0233	0,5430
		20	10,8-11,1	No	0,0485	0,2755
			10,8-11,0	Sí	0,0239	0,9021
B 21-feb-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,0977	0,5685
			10,8-11,0	Sí	0,0475	0,9239
		20	10,8-11,1	No	0,0587	0,3886
			10,8-11,0	Sí	0,0391	0,8561
AH 26-feb-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,0094	0,3155
			10,8-11,0	No	0,0093	0,5570
		20	10,8-11,1	No	0,0147	0,2074
			10,8-11,0	No	0,0110	0,7284
AH 18-jul-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	-0,0015	0,0097
			10,8-11,0	No	0,0026	0,0183
AR 22-ago-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,0075	0,2495
			10,8-11,0	Sí	0,0226	0,8496
		20	10,8-11,1	No	0,0113	0,1418
			10,8-11,0	No	0,0264	0,9130
AR 08-sep-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,0415	0,9705
			10,8-11,0	Sí	0,0266	0,9710
		20	10,8-11,1	No	0,0329	0,8638
			10,8-11,0	No	0,0343	0,9415
AG1 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	Sí	0,0184	0,6544
			10,8-11,0	Sí	0,0202	0,8807
		20	10,8-11,1	No	0,0182	0,2441
			10,8-11,0	Sí	0,0197	0,8995
AG2 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	0,0201	0,1915
			10,8-11,0	No	0,0086	0,9205
		20	10,8-11,1	No	-0,0198	0,2570
			10,8-11,0	No	0,0083	0,2898

Tabla 5.30: Punto2-Alternativa 1. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas desplazadas en 100dB versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.

Ensayo	Tipo Ensayo	Paso (MHz)	Frec. Prom. Curvas Desplazadas en 100dB			
			Rango Considerado (GHz)	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²
L 26-nov-2007	Laboratorio - Tracción	20	10,8-11,1	No	0,0069	0,4779
			10,8-11,0	Sí	0,0200	0,9801
L 26-dic-2007	Laboratorio - Tracción	10	10,8-11,1	Sí	0,0253	0,8377
			10,8-11,0	Sí	0,0193	0,9762
		20	10,8-11,1	No	0,0203	0,9413
			10,8-11,0	No	0,0196	0,9219
B 23-ene-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,0570	0,8181
			10,8-11,0	No	0,0106	0,0171
		20	10,8-11,1	No	0,0537	0,5998
			10,8-11,0	No	0,0547	0,7138
B 21-feb-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,1128	0,6200
			10,8-11,0	Sí	0,0627	0,9123
		20	10,8-11,1	No	0,0444	0,2159
			10,8-11,0	No	0,0329	0,7195
AH 26-feb-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,0138	0,2546
			10,8-11,0	Sí	0,0276	0,9158
		20	10,8-11,1	No	0,0019	0,0103
			10,8-11,0	No	0,0138	0,4226
AH 18-jul-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	-0,0284	0,6582
			10,8-11,0	No	-0,0059	0,0661
AR 22-ago-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,0224	0,8246
			10,8-11,0	No	0,0235	0,9042
		20	10,8-11,1	No	0,0161	0,5567
			10,8-11,0	No	0,0230	0,8490
AR 08-sep-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,0219	0,7626
			10,8-11,0	Sí	0,0249	0,9920
		20	10,8-11,1	No	0,0306	0,6924
			10,8-11,0	Sí	0,0230	0,9848
AG1 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	Sí	0,0185	0,8397
			10,8-11,0	Sí	0,0155	0,8946
		20	10,8-11,1	No	0,0363	0,8888
			10,8-11,0	No	0,0194	0,7241
AG2 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	Sí	0,0172	0,8482
			10,8-11,0	No	0,0134	0,5736
		20	10,8-11,1	No	0,0067	0,0416
			10,8-11,0	No	0,0184	0,8296

Tabla 5.31: Punto 1-Alternativa 2. Correlaciones entre Δ frecuencias (Máximo del rango – frecuencia promedio de curvas sin desplazar) versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.

Ensayo	Tipo Ensayo	Paso (MHz)	Delta Frec. Prom. Curvas Sin Desplazar (Negativas)			
			Rango Considerado (GHz)	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²
L 26-nov-2007	Laboratorio – Tracción	20	10,8-11,1	No	0,0161	0,6629
			10,8-11,0	Sí	0,0436	0,9045
L 26-dic-2007	Laboratorio – Tracción	10	10,8-11,1	Sí	0,0438	0,9987
			10,8-11,0	Sí	0,0206	0,9241
		20	10,8-11,1	Sí	0,0421	0,9501
			10,8-11,0	Sí	0,0356	0,8718
B 23-ene-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,0953	0,9751
			10,8-11,0	Sí	0,0317	0,9981
		20	10,8-11,1	No	0,0901	0,5813
			10,8-11,0	Sí	0,0484	0,8701
B 21-feb-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	No	0,1424	0,4754
			10,8-11,0	Sí	0,0630	0,6940
		20	10,8-11,1	Sí	0,1211	0,7443
			10,8-11,0	Sí	0,1014	0,9375
AH 26-feb-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,0051	0,0253
			10,8-11,0	No	0,0101	0,2671
		20	10,8-11,1	No	0,0010	0,0005
			10,8-11,0	No	0,0054	0,0917
AH 18-jul-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,0230	0,4245
			10,8-11,0	No	0,0036	0,0462
AR 22-ago-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,0344	0,7475
			10,8-11,0	No	0,0398	0,9410
		20	10,8-11,1	No	0,0424	0,7495
			10,8-11,0	Sí	0,0523	0,8951
AR 08-sep-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,0445	0,7050
			10,8-11,0	Sí	0,0412	0,9754
		20	10,8-11,1	No	0,0106	0,1578
			10,8-11,0	Sí	0,0483	0,9775
AG1 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	0,0215	0,1356
			10,8-11,0	Sí	0,0380	0,9916
		20	10,8-11,1	No	0,0296	0,5733
			10,8-11,0	Sí	0,0300	0,9645
AG2 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	-0,0001	0,0000
			10,8-11,0	No	0,0177	0,7319
		20	10,8-11,1	Sí	0,0716	0,9896
			10,8-11,0	No	0,0368	0,8905

Tabla 5.32: Punto 1+5cm-Alternativa 2. Correlaciones entre Δ frecuencias (Máximo del rango – frecuencia promedio de curvas sin desplazar) versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.

Ensayo	Tipo Ensayo	Paso (MHz)	Delta Frec. Prom. Curvas Sin Desplazar (Negativas)			
			Rango Considerado (GHz)	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²
L 26-nov-2007	Laboratorio – Tracción	20	10,8-11,1	No	0,0207	0,8126
			10,8-11,0	Sí	0,0350	0,9255
L 26-dic-2007	Laboratorio – Tracción	10	10,8-11,1	Sí	0,0484	0,9763
			10,8-11,0	Sí	0,0193	0,9072
		20	10,8-11,1	No	0,0372	0,9063
			10,8-11,0	Sí	0,0338	0,9046
B 23-ene-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,1020	0,9698
			10,8-11,0	No	0,0347	0,5869
		20	10,8-11,1	No	0,0643	0,3800
			10,8-11,0	Sí	0,0375	0,9025
B 21-feb-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,1672	0,5634
			10,8-11,0	Sí	0,0771	0,8256
		20	10,8-11,1	No	0,1014	0,4693
			10,8-11,0	Sí	0,0740	0,8845
AH 26-feb-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,0062	0,0517
			10,8-11,0	No	0,0203	0,8834
		20	10,8-11,1	No	-0,0128	0,0401
			10,8-11,0	No	0,0056	0,0430
AH 18-jul-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	-0,0201	0,6597
			10,8-11,0	No	-0,0087	0,1321
AR 22-ago-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,0233	0,7588
			10,8-11,0	No	0,0397	0,9010
		20	10,8-11,1	No	0,0497	0,8470
			10,8-11,0	Sí	0,0394	0,9536
AR 08-sep-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,0398	0,7168
			10,8-11,0	Sí	0,0549	0,9532
		20	10,8-11,1	No	0,0238	0,5389
			10,8-11,0	No	0,0531	0,9442
AG1 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	0,0211	0,3338
			10,8-11,0	Sí	0,0332	0,9810
		20	10,8-11,1	No	0,0313	0,6929
			10,8-11,0	Sí	0,0381	0,8624
AG2 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	0,0107	0,4376
			10,8-11,0	No	0,0307	0,8782
		20	10,8-11,1	No	0,0177	0,4858
			10,8-11,0	No	0,0283	0,9708

Tabla 5.33: Punto 1+10cm-Alternativa 2. Correlaciones entre Δ frecuencias (Máximo del rango – frecuencia promedio de curvas sin desplazar) versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.

Ensayo	Tipo Ensayo	Paso (MHz)	Delta Frec. Prom. Curvas Sin Desplazar (Negativas)			
			Rango Considerado (GHz)	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²
L 26-nov-2007	Laboratorio – Tracción	20	10,8-11,1	No	0,0248	0,9103
			10,8-11,0	Sí	0,0419	0,8719
L 26-dic-2007	Laboratorio – Tracción	10	10,8-11,1	Sí	0,0521	0,9901
			10,8-11,0	Sí	0,0209	0,9368
		20	10,8-11,1	No	0,0454	0,8151
			10,8-11,0	Sí	0,0302	0,9088
B 23-ene-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,1020	0,9698
			10,8-11,0	No	0,0347	0,5869
		20	10,8-11,1	No	0,0643	0,3800
			10,8-11,0	Sí	0,0375	0,9025
B 21-feb-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,1478	0,5587
			10,8-11,0	Sí	0,0811	0,9209
		20	10,8-11,1	No	0,0884	0,4038
			10,8-11,0	Sí	0,0666	0,8547
AH 26-feb-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,0123	0,2435
			10,8-11,0	No	0,0146	0,5964
		20	10,8-11,1	No	0,0185	0,2155
			10,8-11,0	No	0,0178	0,7304
AH 18-jul-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	-0,0035	0,0636
			10,8-11,0	No	0,0021	0,0084
AR 22-ago-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,0074	0,1307
			10,8-11,0	Sí	0,0397	0,8550
		20	10,8-11,1	No	0,0129	0,1037
			10,8-11,0	No	0,0462	0,9187
AR 08-sep-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,0596	0,9599
			10,8-11,0	Sí	0,0491	0,9756
		20	10,8-11,1	No	0,0457	0,8616
			10,8-11,0	No	0,0617	0,9522
AG1 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	Sí	0,0277	0,6261
			10,8-11,0	Sí	0,0371	0,8743
		20	10,8-11,1	No	0,0223	0,2079
			10,8-11,0	Sí	0,0362	0,8966
AG2 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	0,0281	0,2202
			10,8-11,0	Sí	0,0153	0,9293
		20	10,8-11,1	No	-0,0269	0,2463
			10,8-11,0	No	0,0148	0,2987

Tabla 5.34: Punto 2-Alternativa 2. Correlaciones entre Δ frecuencias (Máximo del rango – frecuencia promedio de curvas sin desplazar) versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.

Ensayo	Tipo Ensayo	Paso (MHz)	Delta Frec. Prom. Curvas Sin Desplazar (Negativas)			
			Rango Considerado (GHz)	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²
L 26-nov-2007	Laboratorio – Tracción	20	10,8-11,1	No	0,0086	0,4154
			10,8-11,0	Sí	0,0348	0,9770
L 26-dic-2007	Laboratorio – Tracción	10	10,8-11,1	Sí	0,0344	0,8417
			10,8-11,0	Sí	0,0332	0,9792
		20	10,8-11,1	No	0,0283	0,9184
			10,8-11,0	Sí	0,0332	0,9474
B 23-ene-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,0660	0,8856
			10,8-11,0	No	0,0163	0,0416
		20	10,8-11,1	No	0,0587	0,6457
			10,8-11,0	No	0,0610	0,7723
B 21-feb-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,1603	0,5952
			10,8-11,0	Sí	0,0997	0,9058
		20	10,8-11,1	No	0,0679	0,2600
			10,8-11,0	No	0,0544	0,7311
AH 26-feb-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,0217	0,3002
			10,8-11,0	Sí	0,0444	0,9013
		20	10,8-11,1	No	0,0072	0,0646
			10,8-11,0	No	0,0233	0,4184
AH 18-jul-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	-0,0308	0,6560
			10,8-11,0	No	-0,0081	0,0808
AR 22-ago-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,0275	0,8327
			10,8-11,0	No	0,0388	0,9208
		20	10,8-11,1	No	0,0180	0,4453
			10,8-11,0	No	0,0369	0,8224
AR 08-sep-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,0291	0,7441
			10,8-11,0	Sí	0,0438	0,9932
		20	10,8-11,1	No	0,0396	0,6833
			10,8-11,0	Sí	0,0401	0,9841
AG1 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	0,0210	0,7102
			10,8-11,0	Sí	0,0265	0,8585
		20	10,8-11,1	Sí	0,0464	0,8706
			10,8-11,0	No	0,0333	0,7296
AG2 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	0,0216	0,7777
			10,8-11,0	No	0,0229	0,5888
		20	10,8-11,1	No	0,0056	0,0200
			10,8-11,0	No	0,0290	0,8322

Tabla 5.35: Punto 1-Alternativa 3. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas desplazadas en mínimo dB del rango versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.

Ensayo	Tipo Ensayo	Paso (MHz)	Frec. Prom. Curvas Desplazadas en Mín. dB del Rango			
			Rango Considerado (GHz)	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²
L 26-nov-2007	Laboratorio – Tracción	20	10,8-11,1	No	0,0601	0,2684
			10,8-11,0	Sí	0,0871	0,8924
L 26-dic-2007	Laboratorio – Tracción	10	10,8-11,1	Sí	0,1715	0,9853
			10,8-11,0	Sí	0,1972	0,9829
		20	10,8-11,1	No	0,1088	0,8874
			10,8-11,0	No	0,1870	0,9138
B 23-ene-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,5072	0,9859
			10,8-11,0	No	0,0997	0,1329
		20	10,8-11,1	No	0,3957	0,4009
			10,8-11,0	No	0,0728	0,0647
B 21-feb-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	No	0,8322	0,4500
			10,8-11,0	Sí	0,5185	0,8420
		20	10,8-11,1	No	0,1640	0,2057
			10,8-11,0	No	0,2973	0,4717
AH 26-feb-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	-0,0358	0,1214
			10,8-11,0	Sí	0,1148	0,8059
		20	10,8-11,1	No	-0,1520	0,3818
			10,8-11,0	No	0,1029	0,4721
AH 18-jul-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,2421	0,6445
			10,8-11,0	No	0,0198	0,0412
AR 22-ago-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,1128	0,1830
			10,8-11,0	No	0,1036	0,7449
		20	10,8-11,1	No	0,1173	0,6615
			10,8-11,0	No	0,0484	0,1713
AR 08-sep-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	-0,0008	0,0000
			10,8-11,0	No	0,1528	0,8657
		20	10,8-11,1	No	0,2810	0,4697
			10,8-11,0	No	-0,0180	0,0152
AG1 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	0,1046	0,3329
			10,8-11,0	No	0,0797	0,4466
		20	10,8-11,1	No	0,1182	0,6096
			10,8-11,0	No	0,0731	0,3456
AG2 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	0,1545	0,5444
			10,8-11,0	No	0,0085	0,5954
		20	10,8-11,1	No	0,0316	0,1329
			10,8-11,0	No	-0,0610	0,2445

Tabla 5.36: Punto 1+5cm-Alternativa 3. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas desplazadas en mínimo dB del rango versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.

Ensayo	Tipo Ensayo	Paso (MHz)	Frec. Prom. Curvas Desplazadas en Mín. dB del Rango			
			Rango Considerado (GHz)	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²
L 26-nov-2007	Laboratorio – Tracción	20	10,8-11,1	No	0,0815	0,3182
			10,8-11,0	No	0,1183	0,9489
L 26-dic-2007	Laboratorio – Tracción	10	10,8-11,1	No	0,0804	0,5794
			10,8-11,0	Sí	0,1581	0,9391
		20	10,8-11,1	No	0,0861	0,5128
			10,8-11,0	Sí	0,2059	0,9100
B 23-ene-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	No	0,0955	0,1557
			10,8-11,0	No	0,2006	0,3308
		20	10,8-11,1	No	0,2911	0,4286
			10,8-11,0	Sí	0,1748	0,9470
B 21-feb-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	No	0,6618	0,5679
			10,8-11,0	Sí	0,4335	0,7087
		20	10,8-11,1	No	0,3533	0,4085
			10,8-11,0	No	0,2264	0,4685
AH 26-feb-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,0416	0,0303
			10,8-11,0	No	-0,0006	0,0001
		20	10,8-11,1	No	-0,0087	0,0057
			10,8-11,0	No	0,0273	0,0273
AH 18-jul-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	-0,0173	0,0055
			10,8-11,0	No	0,0174	0,0094
AR 22-ago-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,0899	0,0993
			10,8-11,0	Sí	0,1073	0,8764
		20	10,8-11,1	No	0,1207	0,1177
			10,8-11,0	No	0,0857	0,8386
AR 08-sep-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,1141	0,3794
			10,8-11,0	No	0,0439	0,1774
		20	10,8-11,1	No	0,2250	0,5518
			10,8-11,0	No	0,1079	0,6700
AG1 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	Sí	0,0849	0,7763
			10,8-11,0	Sí	0,1492	0,8918
		20	10,8-11,1	No	-0,0099	0,0051
			10,8-11,0	No	0,1205	0,3785
AG2 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	0,0151	0,0207
			10,8-11,0	No	-0,0798	0,6185
		20	10,8-11,1	No	-0,0091	0,0007
			10,8-11,0	No	-0,0727	0,9774

Tabla 5.37: Punto 1+10cm-Alternativa 3. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas desplazadas en mínimo dB del rango versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.

Ensayo	Tipo Ensayo	Paso (MHz)	Frec. Prom. Curvas Desplazadas en Mín. dB del Rango			
			Rango Considerado (GHz)	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²
L 26-nov-2007	Laboratorio – Tracción	20	10,8-11,1	No	0,0676	0,3095
			10,8-11,0	No	0,0755	0,8342
L 26-dic-2007	Laboratorio – Tracción	10	10,8-11,1	Sí	0,1235	0,9258
			10,8-11,0	Sí	0,1680	0,9983
		20	10,8-11,1	No	0,1120	0,4530
			10,8-11,0	Sí	0,1523	0,9337
B 23-ene-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	No	0,0955	0,1557
			10,8-11,0	No	0,2006	0,3308
		20	10,8-11,1	No	0,2911	0,4286
			10,8-11,0	Sí	0,1748	0,9470
B 21-feb-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	No	0,6409	0,5670
			10,8-11,0	No	0,3958	0,4755
		20	10,8-11,1	Sí	0,6183	0,9569
			10,8-11,0	Sí	0,3623	0,7936
AH 26-feb-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,0209	0,0192
			10,8-11,0	No	0,0053	0,0019
		20	10,8-11,1	No	-0,0089	0,0018
			10,8-11,0	No	0,0598	0,5427
AH 18-jul-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	-0,0194	0,0647
			10,8-11,0	No	-0,0790	0,5153
AR 22-ago-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,0930	0,1868
			10,8-11,0	No	0,0321	0,0848
		20	10,8-11,1	No	0,0663	0,0881
			10,8-11,0	No	0,1020	0,7793
AR 08-sep-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	-0,0171	0,0198
			10,8-11,0	No	0,0759	0,4916
		20	10,8-11,1	No	-0,0097	0,0037
			10,8-11,0	No	0,0289	0,1270
AG1 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	0,1066	0,1785
			10,8-11,0	Sí	0,0992	0,7084
		20	10,8-11,1	No	0,1378	0,3964
			10,8-11,0	No	0,1064	0,6612
AG2 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	-0,1045	0,6098
			10,8-11,0	No	0,0371	0,2793
		20	10,8-11,1	No	0,2650	0,4735
			10,8-11,0	No	0,0459	0,0568

Tabla 5.38: Punto 2-Alternativa 3. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas desplazadas en mínimo dB del rango versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.

Ensayo	Tipo Ensayo	Paso (MHz)	Frec. Prom. Curvas Desplazadas en Mín. dB del Rango			
			Rango Considerado (GHz)	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²
L 26-nov-2007	Laboratorio – Tracción	20	10,8-11,1	No	0,0984	0,6997
			10,8-11,0	Sí	0,1587	0,9189
L 26-dic-2007	Laboratorio – Tracción	10	10,8-11,1	Sí	0,0926	0,9227
			10,8-11,0	Sí	0,1808	0,9952
		20	10,8-11,1	No	0,1183	0,2979
			10,8-11,0	Sí	0,1890	0,9393
B 23-ene-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,5118	0,9904
			10,8-11,0	No	0,1303	0,0778
		20	10,8-11,1	No	0,4929	0,5524
			10,8-11,0	No	0,4373	0,6260
B 21-feb-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,4886	0,5334
			10,8-11,0	No	0,3594	0,5569
		20	10,8-11,1	No	0,3375	0,8008
			10,8-11,0	No	0,2655	0,6404
AH 26-feb-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,1233	0,4327
			10,8-11,0	No	0,1258	0,4731
		20	10,8-11,1	No	0,1105	0,2217
			10,8-11,0	No	0,0782	0,2286
AH 18-jul-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,0105	0,0031
			10,8-11,0	No	-0,0325	0,0522
AR 22-ago-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	-0,0169	0,0037
			10,8-11,0	No	-0,0391	0,2208
		20	10,8-11,1	No	-0,0381	0,0155
			10,8-11,0	No	0,0280	0,2591
AR 08-sep-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	-0,0131	0,0028
			10,8-11,0	No	0,0179	0,0327
		20	10,8-11,1	No	0,1424	0,6151
			10,8-11,0	No	0,0379	0,0472
AG1 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	-0,0165	0,0404
			10,8-11,0	No	-0,0103	0,2782
		20	10,8-11,1	No	0,0646	0,1102
			10,8-11,0	No	0,0766	0,4105
AG2 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	0,0186	0,0076
			10,8-11,0	No	0,0073	0,0060
		20	10,8-11,1	No	0,1604	0,6785
			10,8-11,0	No	0,0460	0,6732

Tabla 5.39: Punto 1-Alternativa 4. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas transformadas aplicando función inversa (transformando los datos de decibel a potencia, ver Ec. 2.20) versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.

Ensayo	Tipo Ensayo	Paso (MHz)	Frec. Prom. Curvas con Función Inversa Aplicada			
			Rango Considerado (GHz)	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²
L 26-nov-2007	Laboratorio – Tracción	20	10,8-11,1	Sí	0,1861	0,9573
			10,8-11,0	Sí	0,1795	0,9507
L 26-dic-2007	Laboratorio – Tracción	10	10,8-11,1	Sí	0,2700	0,9999
			10,8-11,0	Sí	0,1342	0,9655
		20	10,8-11,1	Sí	0,2592	0,9919
			10,8-11,0	Sí	0,1849	0,9367
B 23-ene-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,7668	0,8662
			10,8-11,0	No	0,2291	0,6297
		20	10,8-11,1	No	0,6718	0,5160
			10,8-11,0	No	0,2581	0,6637
B 21-feb-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,9507	0,5440
			10,8-11,0	Sí	0,4267	0,6990
		20	10,8-11,1	Sí	0,7435	0,6813
			10,8-11,0	Sí	0,4597	0,8503
AH 26-feb-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,0516	0,2591
			10,8-11,0	No	0,0616	0,7598
		20	10,8-11,1	No	0,0302	0,0754
			10,8-11,0	No	0,0441	0,7184
AH 18-jul-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,1361	0,5006
			10,8-11,0	No	0,0487	0,2709
AR 22-ago-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,2446	0,9159
			10,8-11,0	No	0,2006	0,9465
		20	10,8-11,1	Sí	0,2682	0,8880
			10,8-11,0	Sí	0,2216	0,9321
AR 08-sep-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	Sí	0,2807	0,9733
			10,8-11,0	Sí	0,2078	0,9660
		20	10,8-11,1	Sí	0,2559	0,9808
			10,8-11,0	Sí	0,2475	0,9933
AG1 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	Sí	0,2358	0,9054
			10,8-11,0	Sí	0,1861	0,9548
		20	10,8-11,1	Sí	0,1883	0,8838
			10,8-11,0	Sí	0,1516	0,8883
AG2 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	0,1111	0,5419
			10,8-11,0	No	0,0908	0,7446
		20	10,8-11,1	Sí	0,2731	0,9947
			10,8-11,0	No	0,1847	0,9820

Tabla 5.40: Punto 1+5cm-Alternativa 4. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas transformadas aplicando función inversa (transformando los datos de decibel a potencia, ver Ec. 2.20) versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.

Ensayo	Tipo Ensayo	Paso (MHz)	Frec. Prom. Curvas con Función Inversa Aplicada			
			Rango Considerado (GHz)	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²
L 26-nov-2007	Laboratorio - Tracción	20	10,8-11,1	Sí	0,1846	0,9429
			10,8-11,0	Sí	0,1725	0,9512
L 26-dic-2007	Laboratorio - Tracción	10	10,8-11,1	Sí	0,2630	0,9938
			10,8-11,0	Sí	0,1202	0,9461
		20	10,8-11,1	Sí	0,2610	0,9914
			10,8-11,0	Sí	0,1872	0,9433
B 23-ene-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,7859	0,7951
			10,8-11,0	No	0,4120	0,6319
		20	10,8-11,1	No	0,5845	0,5464
			10,8-11,0	No	0,2508	0,6993
B 21-feb-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	1,0558	0,6146
			10,8-11,0	Sí	0,4737	0,8175
		20	10,8-11,1	Sí	0,6912	0,5682
			10,8-11,0	Sí	0,4116	0,8082
AH 26-feb-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,0488	0,8039
			10,8-11,0	No	0,0484	0,6335
		20	10,8-11,1	No	0,0218	0,0404
			10,8-11,0	No	0,0446	0,6861
AH 18-jul-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	-0,0362	0,3748
			10,8-11,0	No	0,0118	0,0207
AR 22-ago-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,2060	0,9408
			10,8-11,0	No	0,1875	0,9119
		20	10,8-11,1	No	0,2506	0,9584
			10,8-11,0	No	0,1900	0,9445
AR 08-sep-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	Sí	0,3008	0,9712
			10,8-11,0	Sí	0,2540	0,9861
		20	10,8-11,1	Sí	0,2791	0,9720
			10,8-11,0	No	0,2494	0,9823
AG1 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	Sí	0,2028	0,8362
			10,8-11,0	Sí	0,1741	0,9568
		20	10,8-11,1	No	0,1904	0,7447
			10,8-11,0	No	0,1774	0,7474
AG2 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	0,1295	0,7558
			10,8-11,0	No	0,1268	0,7434
		20	10,8-11,1	Sí	0,1282	0,9354
			10,8-11,0	No	0,1191	0,9974

Tabla 5.41: Punto 1+10cm-Alternativa 4. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas transformadas aplicando función inversa (transformando los datos de decibel a potencia, ver Ec. 2.20) versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.

Ensayo	Tipo Ensayo	Paso (MHz)	Frec. Prom. Curvas con Función Inversa Aplicada			
			Rango Considerado (GHz)	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²
L 26-nov-2007	Laboratorio – Tracción	20	10,8-11,1	Sí	0,1928	0,9697
			10,8-11,0	Sí	0,1693	0,9328
L 26-dic-2007	Laboratorio – Tracción	10	10,8-11,1	Sí	0,2867	0,9976
			10,8-11,0	Sí	0,1337	0,9684
		20	10,8-11,1	Sí	0,2414	0,9880
			10,8-11,0	Sí	0,1695	0,9289
B 23-ene-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,7859	0,7951
			10,8-11,0	No	0,4120	0,6319
		20	10,8-11,1	No	0,5845	0,5464
			10,8-11,0	No	0,2508	0,6993
B 21-feb-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,9839	0,5945
			10,8-11,0	Sí	0,4830	0,8526
		20	10,8-11,1	Sí	0,6908	0,6033
			10,8-11,0	Sí	0,3879	0,8061
AH 26-feb-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,0782	0,6865
			10,8-11,0	No	0,0538	0,6888
		20	10,8-11,1	No	0,0815	0,6340
			10,8-11,0	No	0,0642	0,8134
AH 18-jul-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,0218	0,0326
			10,8-11,0	No	0,0193	0,0431
AR 22-ago-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	No	0,1803	0,8032
			10,8-11,0	Sí	0,1828	0,8726
		20	10,8-11,1	No	0,2106	0,8153
			10,8-11,0	No	0,2224	0,9012
AR 08-sep-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	Sí	0,3253	0,9887
			10,8-11,0	Sí	0,2438	0,9828
		20	10,8-11,1	No	0,2910	0,9747
			10,8-11,0	Sí	0,2591	0,9940
AG1 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	Sí	0,1995	0,7674
			10,8-11,0	Sí	0,1756	0,8231
		20	10,8-11,1	Sí	0,1987	0,9863
			10,8-11,0	Sí	0,1653	0,8642
AG2 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	No	0,1257	0,6948
			10,8-11,0	Sí	0,0728	0,9472
		20	10,8-11,1	No	0,0149	0,0186
			10,8-11,0	No	0,0807	0,7662

Tabla 5.42: Punto 2-Alternativa 4. Correlaciones entre frecuencias promedio de curvas transformadas aplicando función inversa (transformando los datos de decibel a potencia, ver Ec. 2.20) versus deformación asociada para distintos niveles de carga aplicada.

Ensayo	Tipo Ensayo	Paso (MHz)	Frec. Prom. Curvas con Función Inversa Aplicada			
			Rango Considerado (GHz)	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²
L 26-nov-2007	Laboratorio – Tracción	20	10,8-11,1	Sí	0,1830	0,9656
			10,8-11,0	Sí	0,2092	0,9967
L 26-dic-2007	Laboratorio – Tracción	10	10,8-11,1	Sí	0,2525	0,9747
			10,8-11,0	Sí	0,1956	0,9902
		20	10,8-11,1	Sí	0,2403	0,9743
			10,8-11,0	Sí	0,2116	0,9345
B 23-ene-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	0,6574	0,7955
			10,8-11,0	No	0,5213	0,2869
		20	10,8-11,1	No	0,6790	0,7351
			10,8-11,0	No	0,4855	0,7748
B 21-feb-2008	Terreno - Falla Tipo Bloque	10	10,8-11,1	Sí	1,1006	0,6530
			10,8-11,0	Sí	0,5530	0,8285
		20	10,8-11,1	No	0,5864	0,4746
			10,8-11,0	Sí	0,3430	0,6958
AH 26-feb-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	0,1884	0,6144
			10,8-11,0	No	0,1993	0,7251
		20	10,8-11,1	No	0,1283	0,3871
			10,8-11,0	No	0,1181	0,3672
AH 18-jul-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	10,8-11,1	No	-0,0673	0,5849
			10,8-11,0	No	-0,0011	0,0001
AR 22-ago-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	Sí	0,1699	0,8679
			10,8-11,0	Sí	0,1461	0,9187
		20	10,8-11,1	Sí	0,1454	0,9615
			10,8-11,0	Sí	0,1374	0,9584
AR 08-sep-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Resina	10	10,8-11,1	Sí	0,2037	0,9421
			10,8-11,0	Sí	0,1738	0,9545
		20	10,8-11,1	Sí	0,2487	0,9702
			10,8-11,0	Sí	0,1914	0,9777
AG1 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	Sí	0,1499	0,8377
			10,8-11,0	Sí	0,1168	0,7823
		20	10,8-11,1	Sí	0,1845	0,9320
			10,8-11,0	Sí	0,1430	0,7991
AG2 25-nov-2008	Terreno - Tipo Zona Anclada con Grout	10	10,8-11,1	Sí	0,1547	0,7442
			10,8-11,0	No	0,1007	0,8363
		20	10,8-11,1	No	0,1002	0,4638
			10,8-11,0	No	0,0773	0,6102

A continuación se presentan en forma gráfica, algunos de los resultados mostrados en las tablas anteriores, para cada tipo de ensayo. En la *Fig. 5.68* se ejemplifica el formato de las lecturas de strain gages incluidas en las figuras posteriores. Como se mencionó anteriormente, en las correlaciones fueron utilizados los valores promedio de deformación entregadas por estos dispositivos (en caso de existir mediciones de más de un strain gage), indicando mediante barras verticales los valores máximo y mínimo. De esta forma, se asume para los distintos puntos de observación (1, 1+5cm, 1+10cm y 2) el mismo nivel de deformación según strain gages.

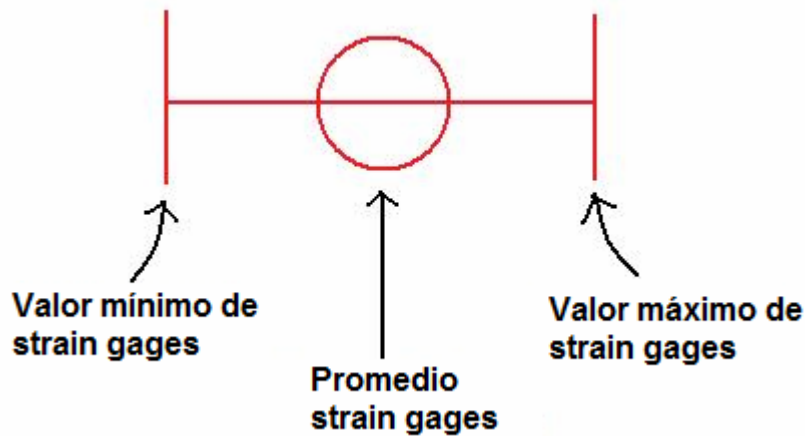


Fig. 5.68: Formato de datos de strain gages incluidos en figuras posteriores.

En las figuras presentadas a continuación, se especifica si para el análisis del ensayo se utilizan mediciones de deformación mediante strain gages del ensayo analizado, incluyendo el comentario “Ensayo con medición de SG” o, en caso contrario, incluyendo el comentario “Sin medición de SG” agregando además el ensayo de origen de los datos de SG mostrados como alternativa.

5.4.1. Ensayos de Pernos de Anclaje Tipo L, en Laboratorio.

A continuación desde la *Fig. 5.69* a la *Fig. 5.78*, se observan algunos de los resultados de ensayos de sollicitación a tracción pura, realizados sobre pernos de anclaje en laboratorio. En ellos se aprecian correlaciones aceptables, alcanzando valores del coeficiente de correlación cercanos a 1, donde las alternativas 3 y 4 normalmente

presentan las mejores correlaciones y las mayores pendientes de las regresiones lineales trazadas sobre los datos. La alternativa 1 en cambio, muestra ser la que presenta peores correlaciones de sus datos y las pendientes de sus regresiones lineales son aproximadamente 10 veces menores que las alternativas 3 y 4. Al respecto, se estima que pendientes bajas en las correlaciones no resultan convenientes, ya que de esta forma, pequeñas variaciones de la frecuencia promedio deducida, se traducen en variaciones muy grandes de deformación unitaria. En las figuras se observa además la poca variación en la deformación entregada por los strain gages, lo que está de acuerdo con la teoría sobre ensayos a tracción pura, donde la tensión y deformación se distribuye uniformemente en el perno.

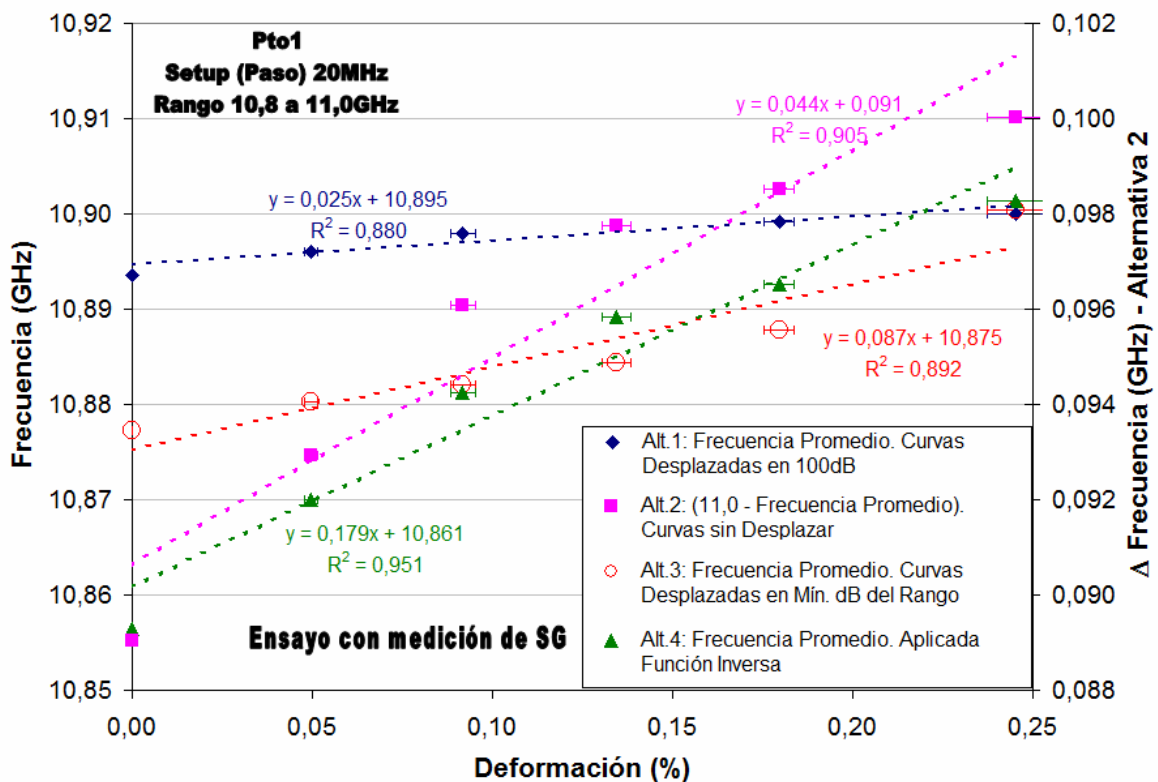


Fig. 5.69: Ensayo L 26-nov-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

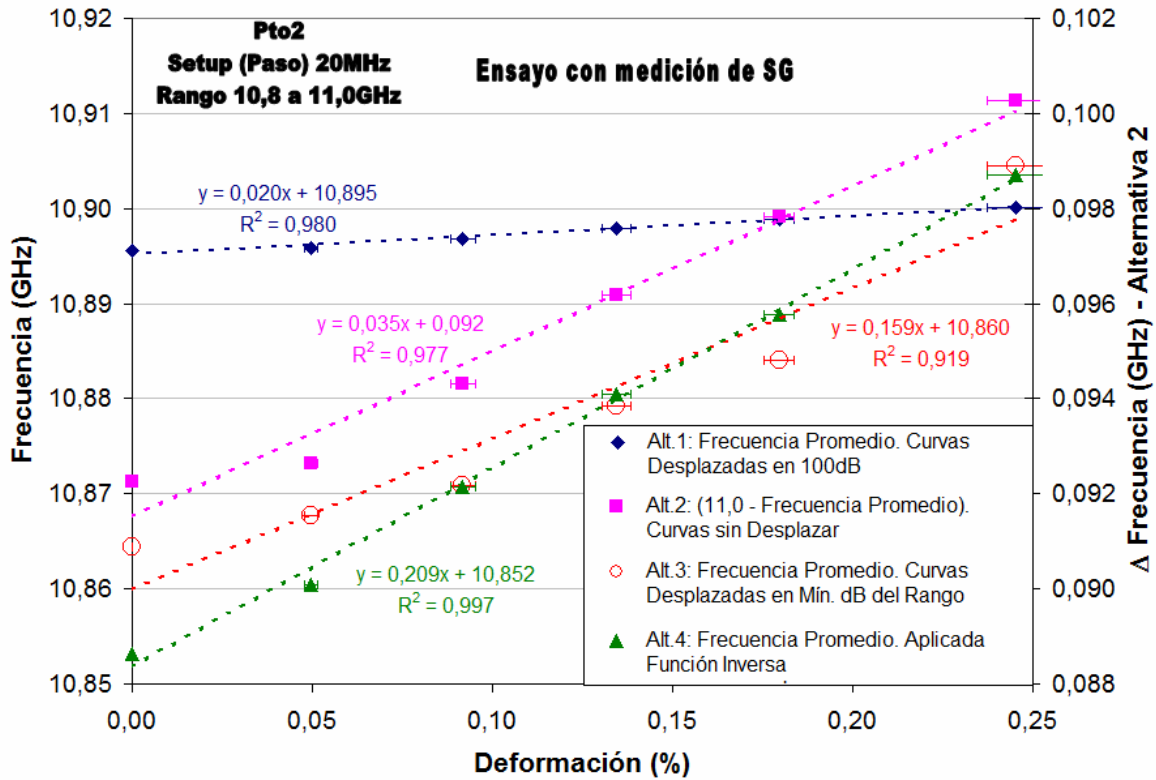


Fig. 5.70: Ensayo L 26-nov-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

Como se mencionó anteriormente, para algunos ensayos se incluyen figuras asociadas a una vecindad del *Punto 1*, específicamente en posiciones a 5 y 10cm de éste. Estas posiciones, al igual que el *Punto 1*, se encuentran en el primer tramo de fibra sensora. En el ensayo L 26-dic-2007, esto se observa desde la *Fig. 5.71* a la *Fig. 5.73* para un paso de 10MHz y desde la *Fig. 5.75* a la *Fig. 5.77* para un paso de 20MHz. En ellas se observa que existen cambios en las pendientes de las regresiones lineales y en los coeficientes de correlación. Entre las alternativas 3 y 4, que son las que presentan mejores resultados en este tipo de ensayos, la alternativa 4 es la que mantiene resultados más estables, con variaciones máximas de los 0.02GHz/% en las pendientes de sus regresiones lineales en torno a una vecindad del *Punto 1*.

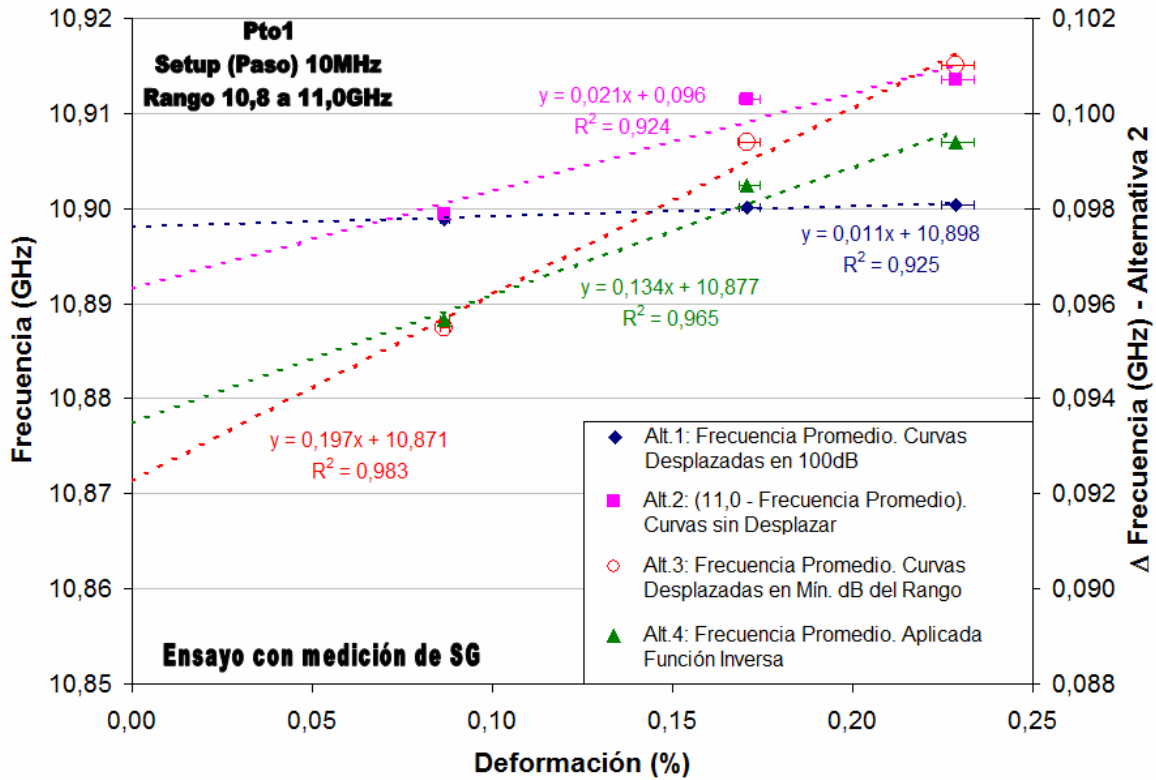


Fig. 5.71: Ensayo L 26-dic-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

Como se mencionó anteriormente, debido a que en los ensayos existen lecturas realizadas con distintos pasos (10 y 20 MHz), se prefiere comparar datos que hayan sido tomados con el mismo *setup*. En el caso del ensayo L 26-dic-2007 mostrado desde la Fig. 5.71 a la Fig. 5.74, sólo se aplicaron 3 niveles de carga con un paso de 10 MHz, por ende, se observan 3 puntos por cada alternativa.

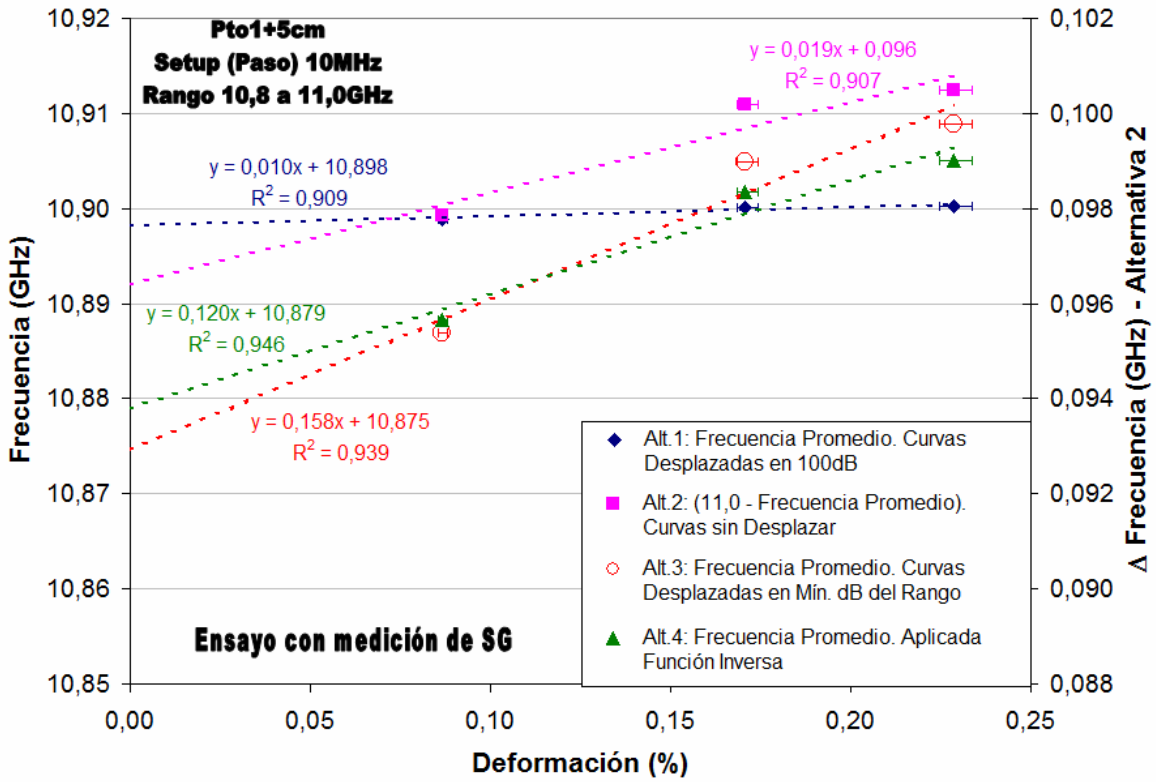


Fig. 5.72: Ensayo L 26-dic-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

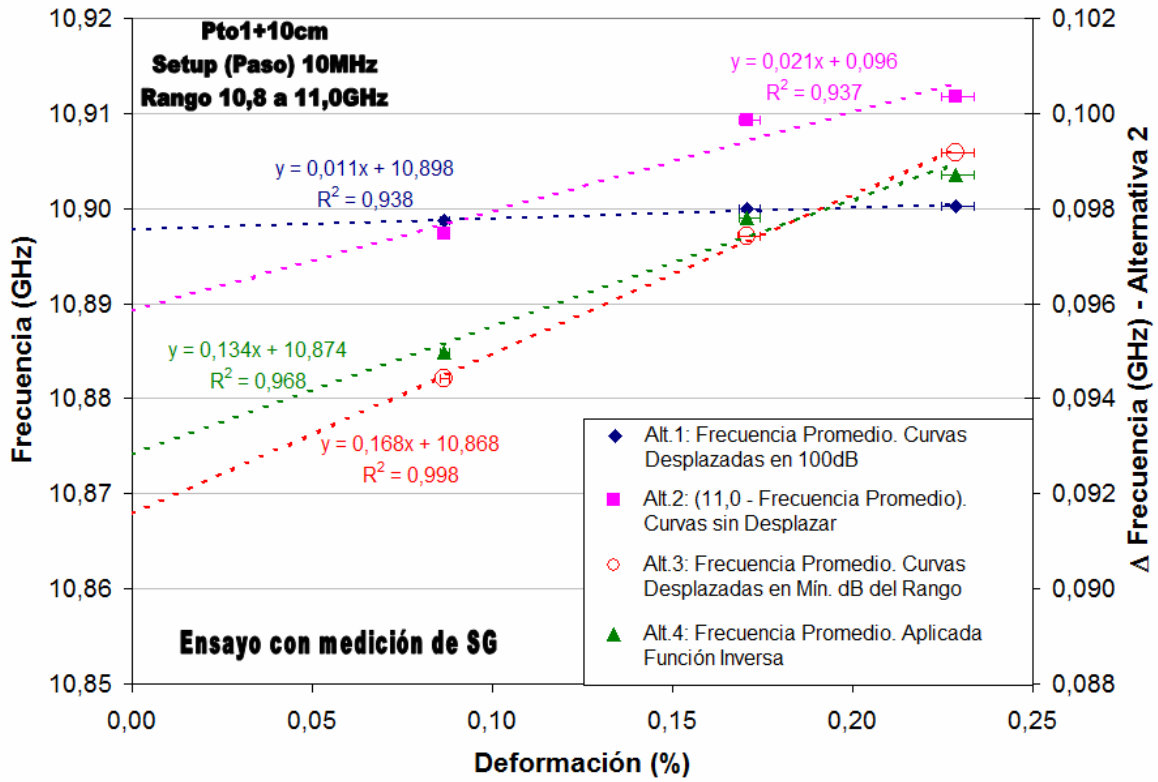


Fig. 5.73: Ensayo L 26-dic-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

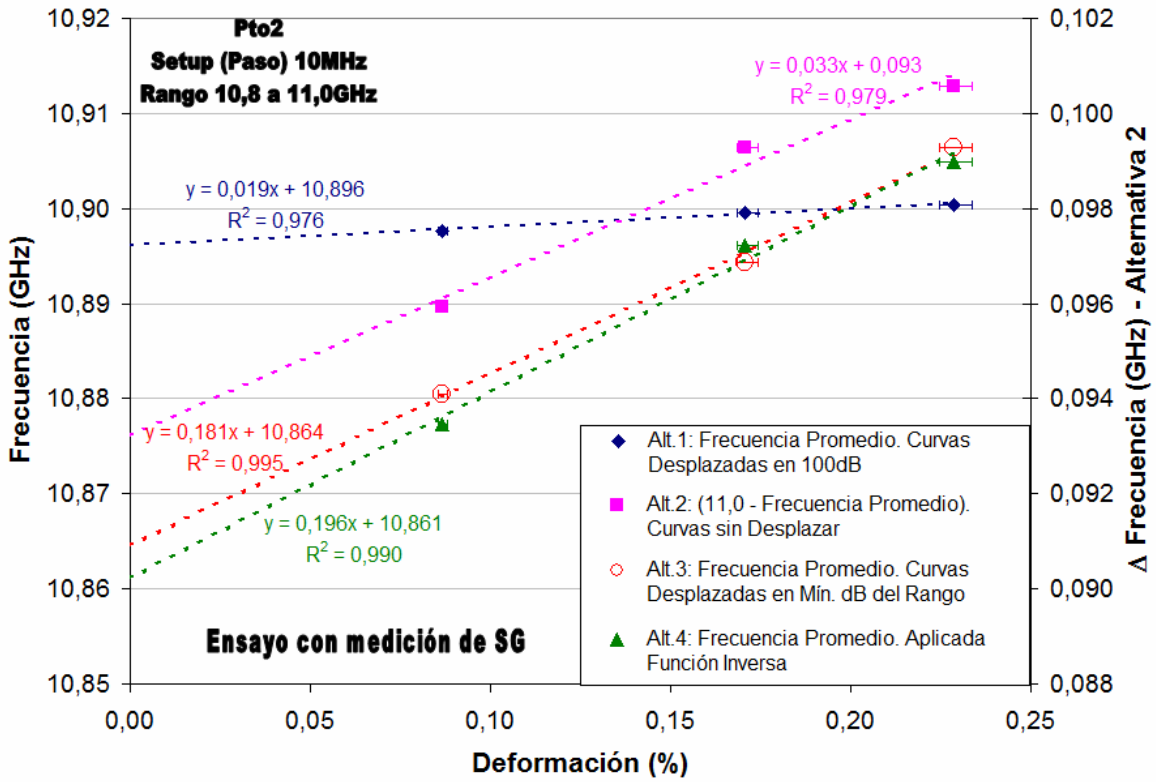


Fig. 5.74: Ensayo L 26-dic-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

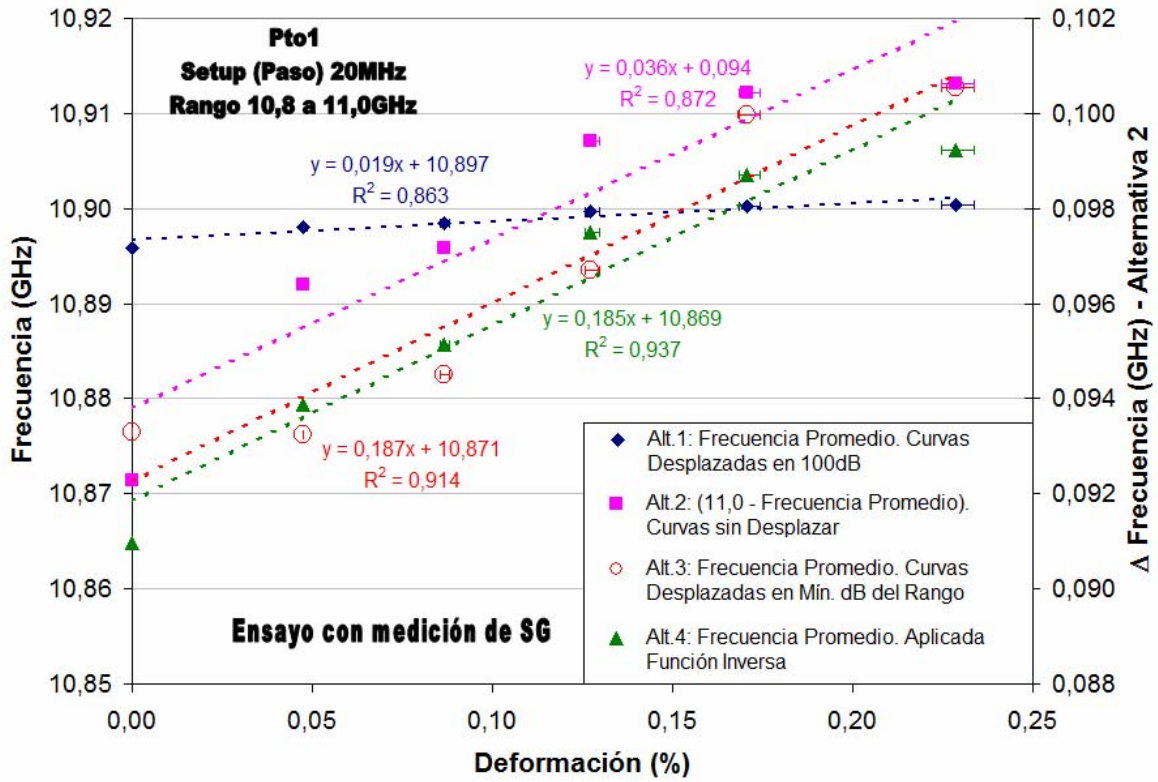


Fig. 5.75: Ensayo L 26-dic-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

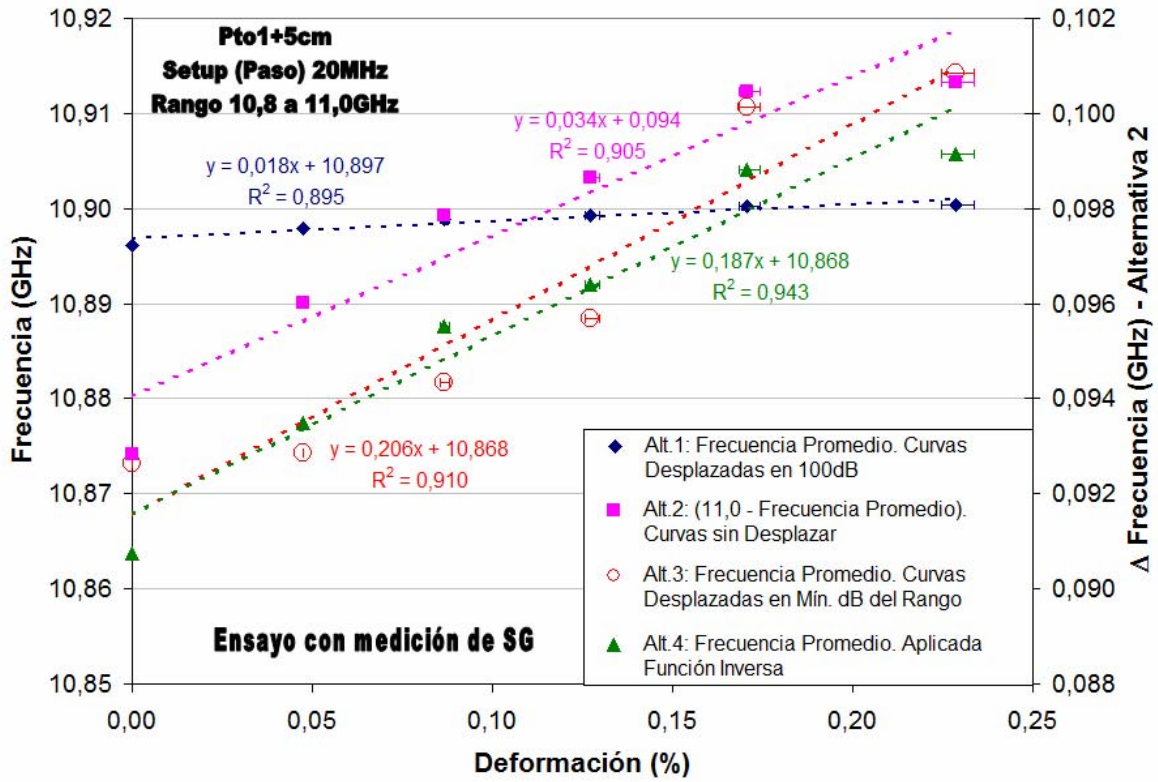


Fig. 5.76: Ensayo L 26-dic-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

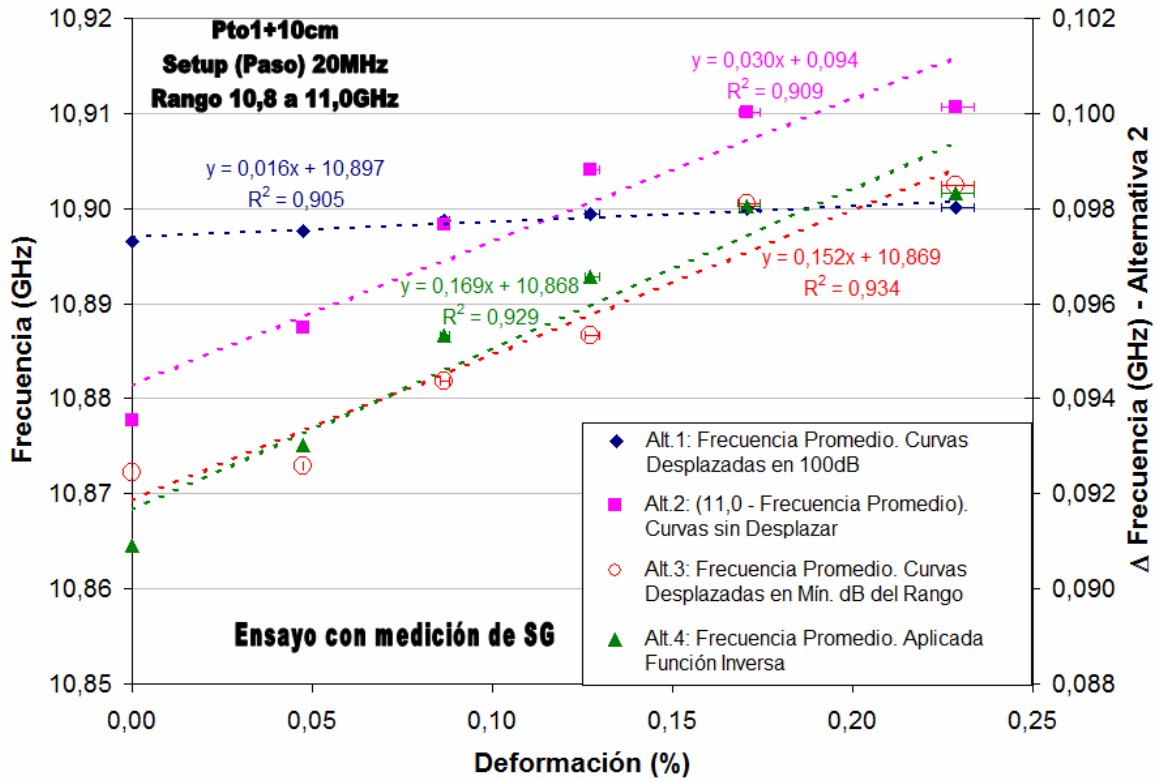


Fig. 5.77: Ensayo L 26-dic-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

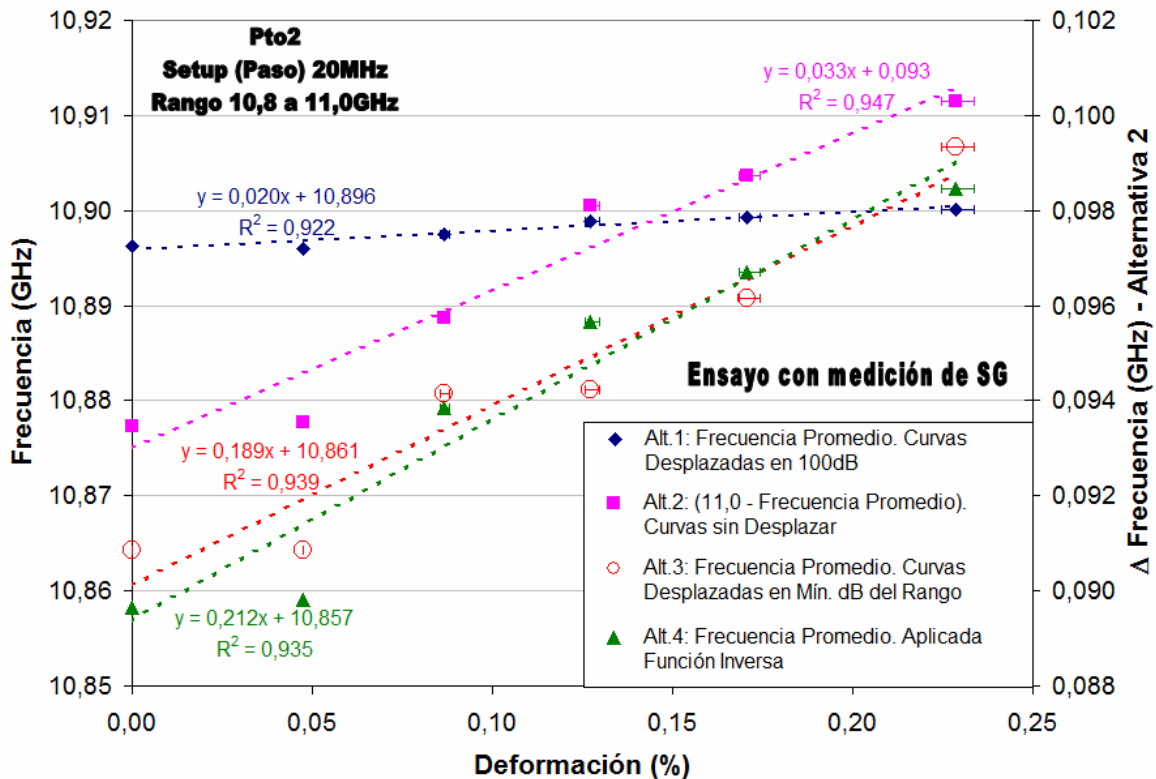


Fig. 5.78: Ensayo L 26-dic-2007 (en laboratorio). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

Con la finalidad de ordenar la información sobre las correlaciones mostradas en las figuras, tanto de este tipo de ensayos como de los posteriormente analizados, se presentan algunas tablas con los resultados más relevantes mostrados en ellas, además de otros datos adicionales. Debe recordarse que estas figuras no cubren todos los casos analizados y posteriormente ordenados en tablas. Los datos de referencia que no se encuentran en ellas, se adjuntan en el anexo F. El análisis de interés para cada ensayo, pasa por observar la variación y comportamiento de dos parámetros relevantes de las correlaciones mostradas, los cuales corresponden a:

- las pendientes de las regresiones lineales trazadas sobre los datos (en adelante “pendientes”) y,
- las frecuencias correspondientes a una deformación igual a 0%, es decir, los coeficientes de posición de estas regresiones lineales (en adelante “coeficientes”).

De esta manera, se desarrolló un análisis comparativo de estos parámetros para cada alternativa, estableciendo su variación entre ensayos de un mismo tipo y los distintos pasos de frecuencia y puntos de observación en la fibra sensora. En términos relativos, las alternativas con buen desempeño entregan poca variación de los parámetros al cambiar de posición y/o paso de frecuencia, como también al pasar de un ensayo a otro. La variación de los parámetros se muestra en términos porcentuales respecto del mayor valor que se está comparando. Además, se estimó la variación promedio ponderada entre la *pendiente* y el *coeficiente* para cada alternativa y tipo de ensayo, asignando arbitrariamente la misma importancia o peso a la variación individual de cada parámetro (ver *Tabla 5.43*). La sensibilidad sobre este grado de importancia no es de relevancia ya que no cambia significativamente el resultado global de las alternativas, donde la que presenta mejor desempeño, mantiene este comportamiento para distintas ponderaciones de ambos parámetros.

Tabla 5.43: Ponderación o grado de importancia considerado para la variación de los dos parámetros estudiados.

Importancia variación de la pendiente	50%
Importancia variación del coeficiente	50%

La estabilidad de parámetros en las correlaciones obtenidas para los ensayos tipo L, según las distintas alternativas, se presenta desde la *Tabla 5.44* a la *Tabla 5.59*. En primer lugar se presentan los resultados de la alternativa 1 (*Tabla 5.44* a la *Tabla 5.47*). La *Tabla 5.44* muestra los valores máximos y mínimos obtenidos para la pendiente y el coeficiente de las regresiones lineales, indicando el punto de observación, el paso y el ensayo en el cual se presenta dicho valor. La columna titulada “variación” resulta de restar el máximo y mínimo encontrado para cada parámetro, y dividir esta resta por el máximo valor. Luego, la columna titulada “Variación Prom. Pond.” promedia las variaciones de ambos parámetros según la ponderación indicada anteriormente y, de tal manera, reúne en un solo indicador la estabilidad de la alternativa analizada, considerando todos los puntos de observación, pasos de frecuencia y ensayos del tipo estudiado. La variación o estabilidad de la pendiente al cambiar de posición en la fibra sensora, tanto en pequeñas distancias (vecindad del punto 1), como en distancias mayores (entre puntos 1 y 2), es mostrada en la *Tabla 5.45* para el ensayo L 26-nov-2007. En el caso de la variación en la vecindad del punto 1, se escogen la máxima y mínima de las tres pendientes observadas

para obtener, de esta forma, la máxima variación. Ésta posteriormente se divide por la pendiente de mayor valor. La variación porcentual entre las pendientes de los puntos 1 y 2, también se calcula respecto de la pendiente de mayor valor. La tabla *Tabla 5.46* se confecciona de forma análoga a la tabla anterior, mostrando los resultados para el ensayo L 26-dic-2007. Finalmente, la *Tabla 5.47* contiene el promedio de las 2 tablas anteriores, de tal manera de combinar ambos ensayos y pasos de frecuencia utilizados.

El mismo procedimiento descrito, se repite para el resto de las alternativas y de igual forma en los otros tipos de ensayos, como se observará más adelante.

Tabla 5.44: Ensayos tipo L – Alternativa 1. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo L (laboratorio).

Parámetro		Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pend. (GHz/%)	Máx.	0,025	1	20	L 26-nov-2007	60,00%	30%
	Mín.	0,010	1+5cm	10	L 26-dic-2007		
Coef. (GHz)	Máx.	10,898	1, 1+5cm, 1+10cm	10	L 26-dic-2007	0,03%	
	Mín.	10,895	1, 1+10cm, 2	20	L 26-nov-2007		

Tabla 5.45: Ensayo L 26-nov-2007 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo L 26-nov-2007.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz*	-	-
20MHz	20,00%	20,00%

*: En este ensayo sólo se tomaron lecturas con paso de 20MHz

Tabla 5.46: Ensayo L 26-dic-2007 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo L 26-dic-2007.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	42,11%	9,09%
20MHz	5,00%	15,79%

Tabla 5.47: Ensayos tipo L – Alternativa 1. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo L (laboratorio).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	22%	15%

Tabla 5.48: Ensayos tipo L – Alternativa 2. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo L (laboratorio).

Parámetro	Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)	
Pend. (GHz/%)	Máx.	0,044	1	20	L 26-nov-2007	56,82%	31%
	Mín.	0,019	1+5cm	10	L 26-dic-2007		
Coef. (GHz)	Máx.	0,096	1, 1+5cm, 1+10cm	10	L 26-dic-2007	5,21%	
	Mín.	0,091	1, 1+10cm	20	L 26-nov-2007		

Tabla 5.49: Ensayo L 26-nov-2007 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo L 26-nov-2007.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz*	-	-
20MHz	20,45%	20,45%

*: En este ensayo sólo se tomaron lecturas con paso de 20MHz

Tabla 5.50: Ensayo L 26-dic-2007 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo L 26-dic-2007.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	36,36%	9,52%
20MHz	8,33%	16,67%

Tabla 5.51: Ensayos tipo L – Alternativa 2. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo L (laboratorio).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	22%	16%

Tabla 5.52: Ensayos tipo L – Alternativa 3. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo L (laboratorio).

Parámetro		Valor	Ocorre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pend. (GHz/%)	máxima	0,206	1+5cm	20	L 26-dic-2007	63,59%	32%
	mínima	0,075	1+10cm	20	L 26-nov-2007		
Coef. (GHz)	máximo	10,876	1+10m	20	L 26-nov-2007	0,15%	
	mínimo	10,860	2	20	L 26-nov-2007		

Tabla 5.53: Ensayo L 26-nov-2007 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo L 26-nov-2007.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz*	-	-
20MHz	45,28%	36,44%

*: En este ensayo sólo se tomaron lecturas con paso de 20MHz

Tabla 5.54: Ensayo L 26-dic-2007 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo L 26-dic-2007.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	8,12%	19,80%
20MHz	1,06%	26,21%

Tabla 5.55: Ensayos tipo L – Alternativa 3. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo L, en laboratorio.

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	18%	27%

Tabla 5.56: Ensayos tipo L – Alternativa 4. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo L (laboratorio).

Parámetro		Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pend. (GHz/%)	máxima	0,212	2	20	L 26-dic-2007	43,40%	22%
	mínima	0,120	1+5cm	10	L 26-dic-2007		
Coef. (GHz)	máximo	10,879	1+5cm	10	L 26-dic-2007	0,25%	
	mínimo	10,852	2	20	L 26-nov-2007		

Tabla 5.57: Ensayo L 26-nov-2007 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo L 26-nov-2007.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz*	-	-
20MHz	14,35%	5,59%

*: En este ensayo sólo se tomaron lecturas con paso de 20MHz

Tabla 5.58: Ensayo L 26-dic-2007 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo L 26-dic-2007.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	31,63%	10,45%
20MHz	12,74%	9,63%

Tabla 5.59: Ensayos tipo L – Alternativa 4. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo L (laboratorio).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	20%	9%

De las tablas mostradas es posible observar la superioridad de la alternativa 4 en cuanto a la estabilidad de sus parámetros, presentando menor variación promedio para ambos (22%), como también menores variaciones entre posiciones cercanas para distintos ensayos (9%). La alternativa 3 muestra mayor estabilidad, respecto del resto de

las alternativas, para las pendientes de los puntos 1 y 2 (18%). Esto puede explicarse por el origen de esta alternativa, que conlleva un procedimiento distinto a las otras al trasladar cada curva de espectro en distintas cantidades (mín. dB del rango) dependiendo del nivel de cargas. Las otras alternativas en cambio, surgen de aplicar una misma transformación a todas las curvas sin importar el nivel de carga asociado. Las alternativas 1 y 2 presentan comportamientos similares entre sí.

5.4.2. Ensayos de Pernos de Anclajes Tipo B, en Losa de H.A.

A continuación desde la *Fig. 5.79* a la *Fig. 5.90*, se observan algunos de los resultados de ensayos de sollicitación a tracción pura, realizados sobre pernos de anclaje en terreno, instalados en la losa de hormigón armado. La calidad de estos resultados es menor a la observada en el caso de los ensayos tipo L presentados anteriormente. Se aprecian en general, datos de baja correlación, alcanzando valores del coeficiente de R^2 muy lejanos a 1, excepto el caso de la *Fig. 5.79* (*Punto 1*; paso 10MHz; ensayo B 23-ene-2008), donde además ocurre una situación muy distinta a la de los ensayos de laboratorio, ya que son las alternativas 1 y 2 las que presentan coeficientes de correlación más cercanos a la unidad. Esto puede ocurrir debido a que las alternativas 1 y 2, por su definición, “suavizan” los cambios presentados en los valores de frecuencia promedio, ya sean producidos por la deformación percibida en la fibra sensora o por ruido del mismo ensayo. En cambio, las alternativas 3 y 4 destacan estos cambios. Debe tenerse en cuenta, que en este caso algunas correlaciones se efectuaron con sólo 3 puntos en cada caso (resultados con paso 10MHz). En las alternativas 3 y 4 aumentan, en general, las pendientes de las regresiones lineales trazadas sobre los datos. En las figuras se observa además una mayor variación en la deformación entregada por los strain gages, respecto de los ensayos en laboratorio, llegando incluso a mostrar valores negativos en algunos casos. Debido a que este tipo de ensayos también solicitan el anclaje en tracción pura, las deformaciones de ambos strain gages debieron resultar similares entre sí, como lo observado en los ensayos tipo L. Las mayores diferencias observadas en ensayos tipo B, sin embargo, están dentro del error de medición deducido anteriormente para los strain gages ($\pm 0,01\%$), por ende, no se les atribuye mayor importancia.

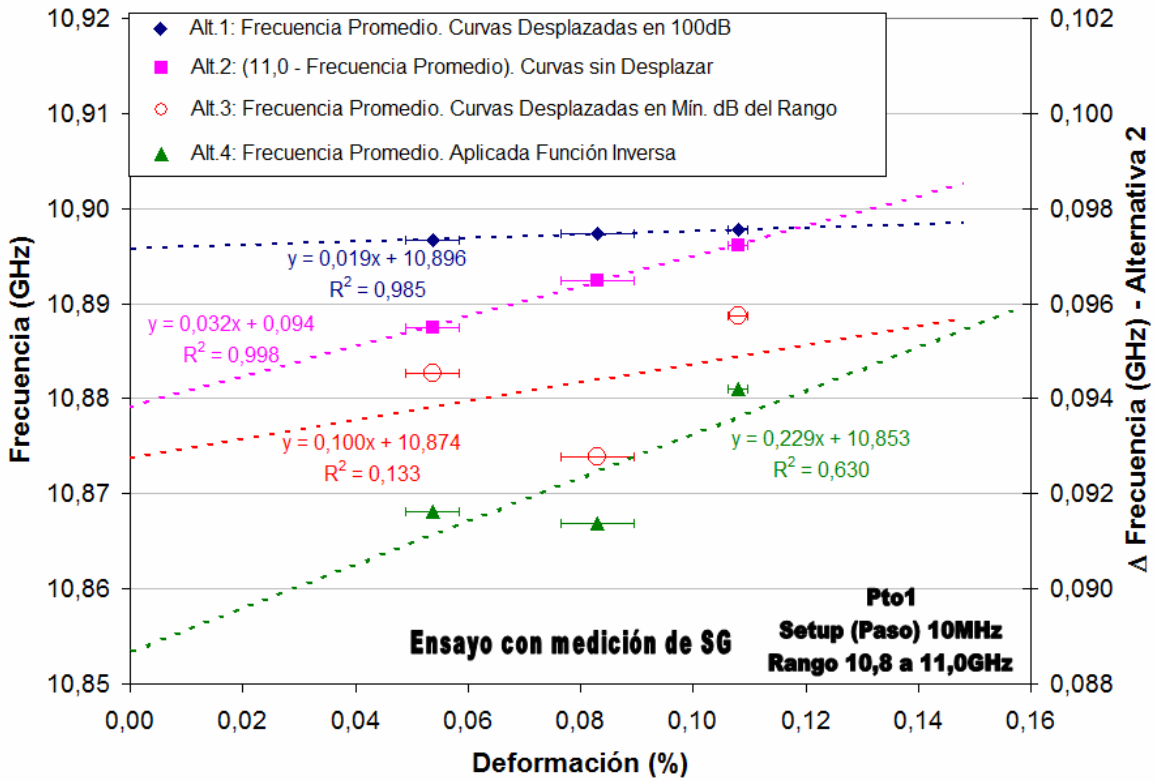


Fig. 5.79: Ensayo B 23-ene-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

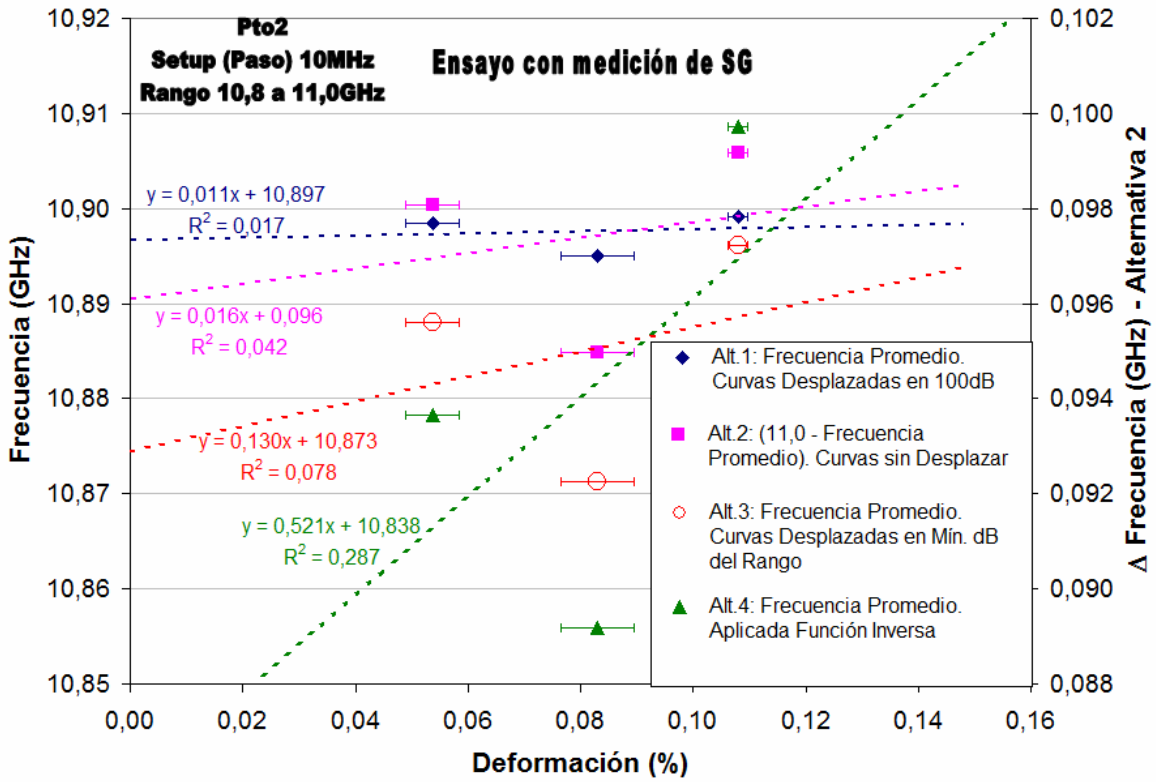


Fig. 5.80: Ensayo B 23-ene-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

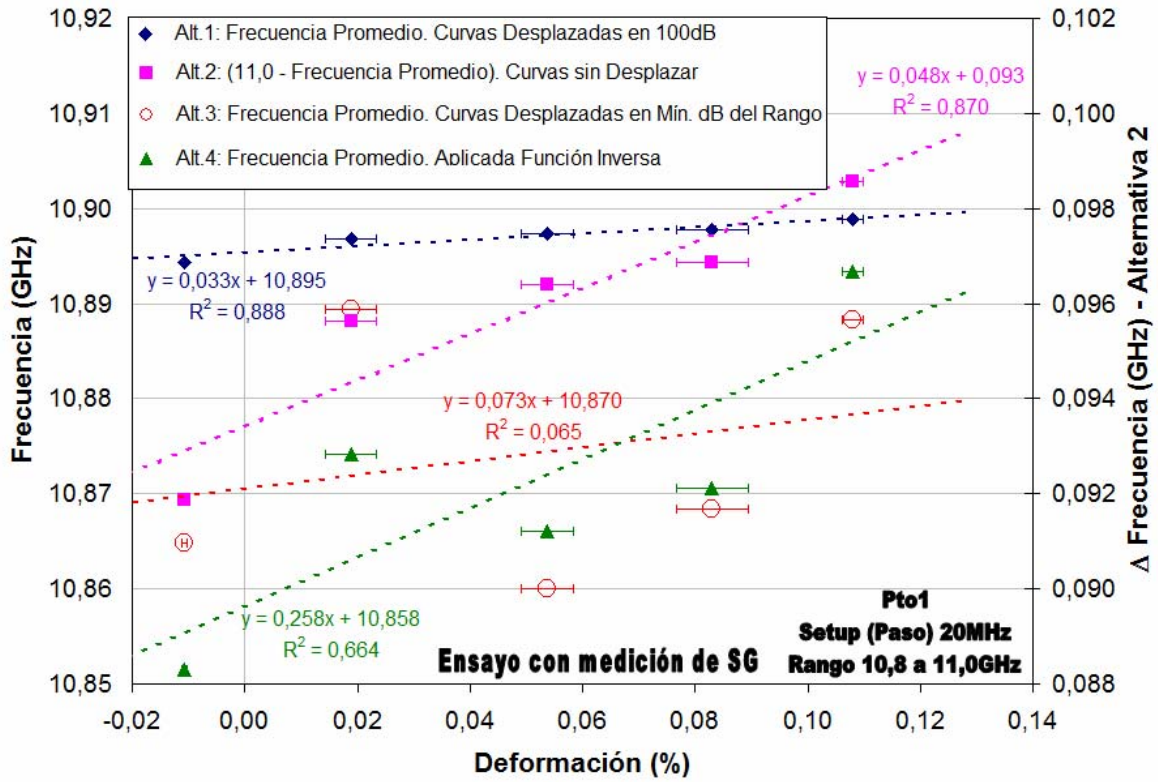


Fig. 5.81: Ensayo B 23-ene-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

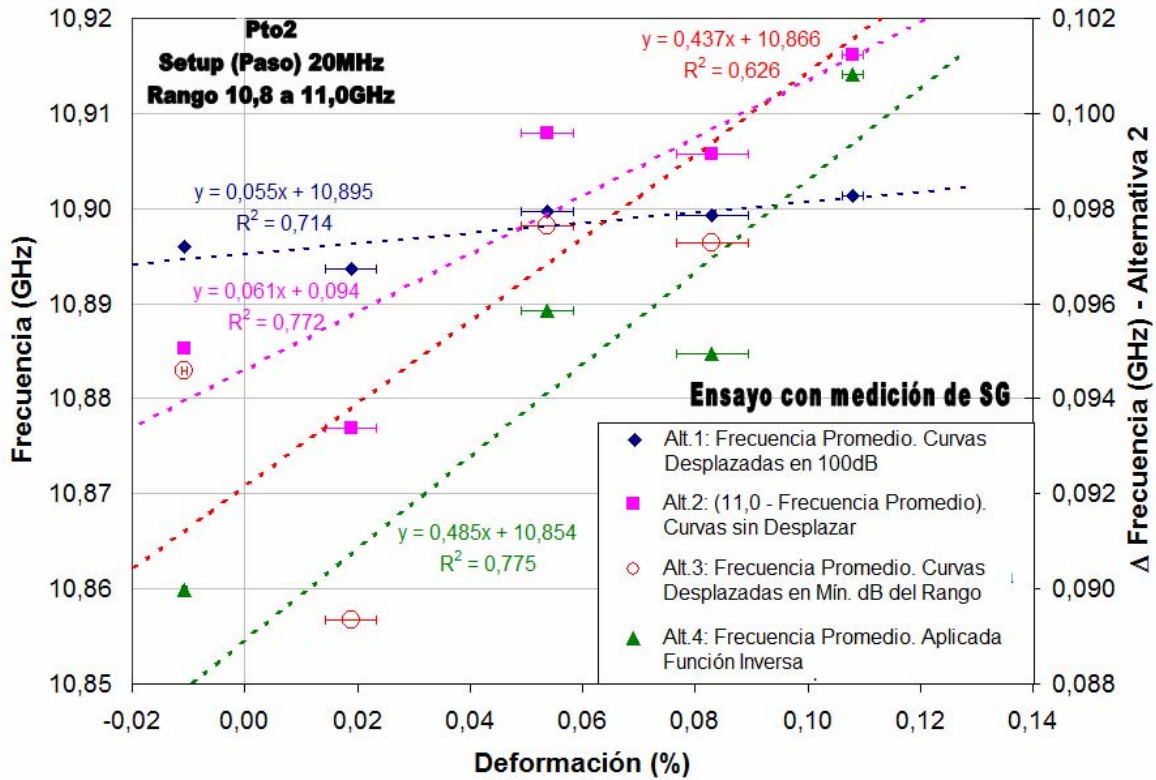


Fig. 5.82: Ensayo B 23-ene-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

Los resultados asociados al *Punto 1* y su vecindad son mostrados sólo para el caso del ensayo B 21-feb-2008, desde la *Fig. 5.83* a la *Fig. 5.85* con un paso de 10MHz y desde la *Fig. 5.87* a la *Fig. 5.89* para un paso de 20MHz. En ellas se observa que existen cambios aún mayores en las pendientes de las regresiones lineales y en los coeficientes de correlación en comparación con los ensayos de laboratorio.

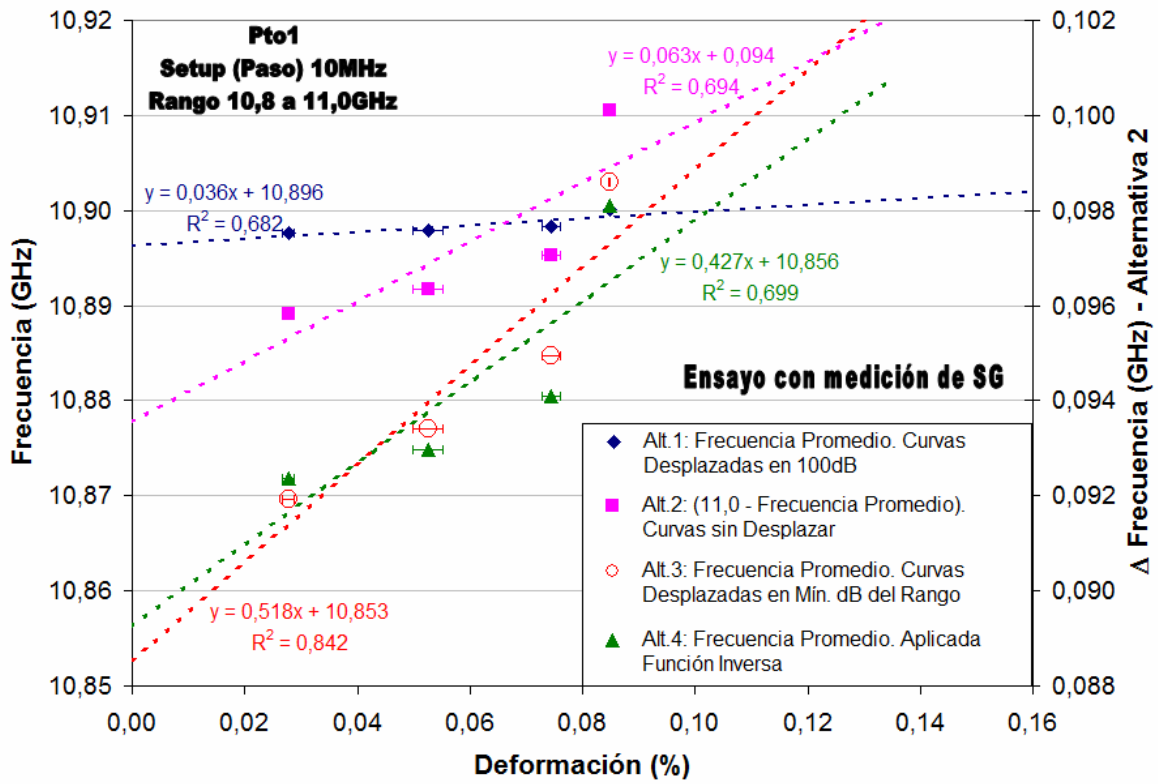


Fig. 5.83: Ensayo B 21-feb-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

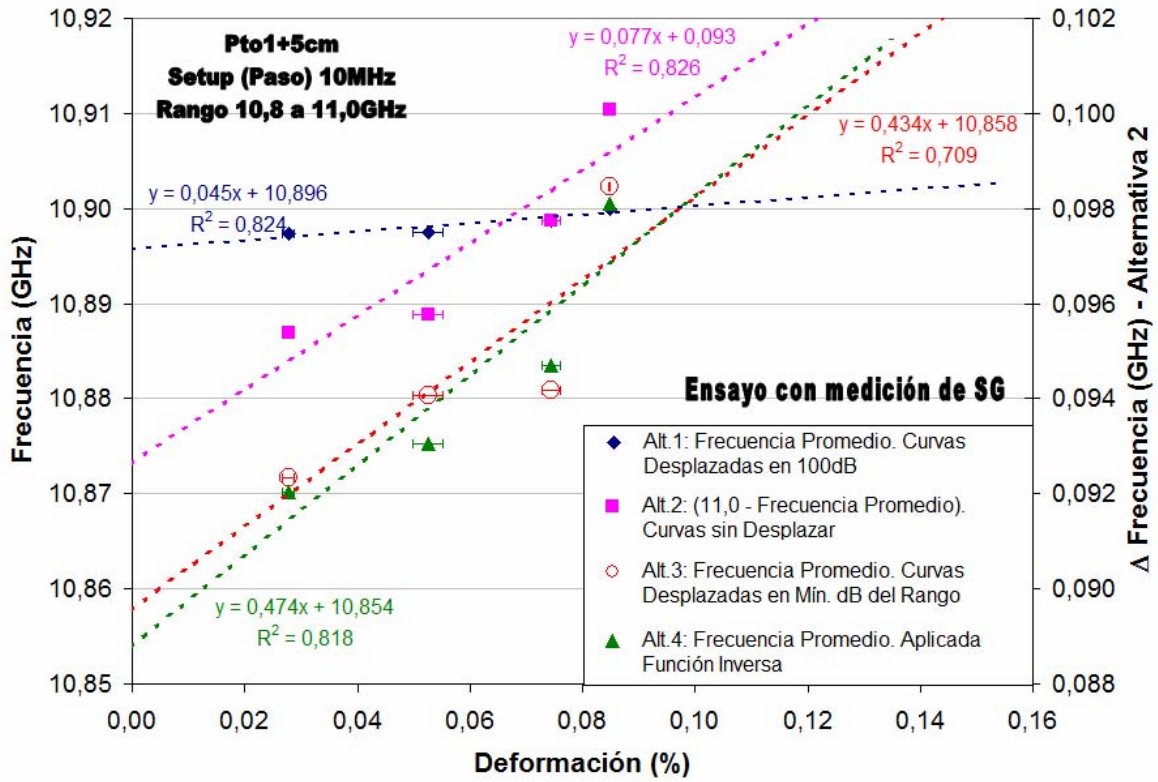


Fig. 5.84: Ensayo B 21-feb-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

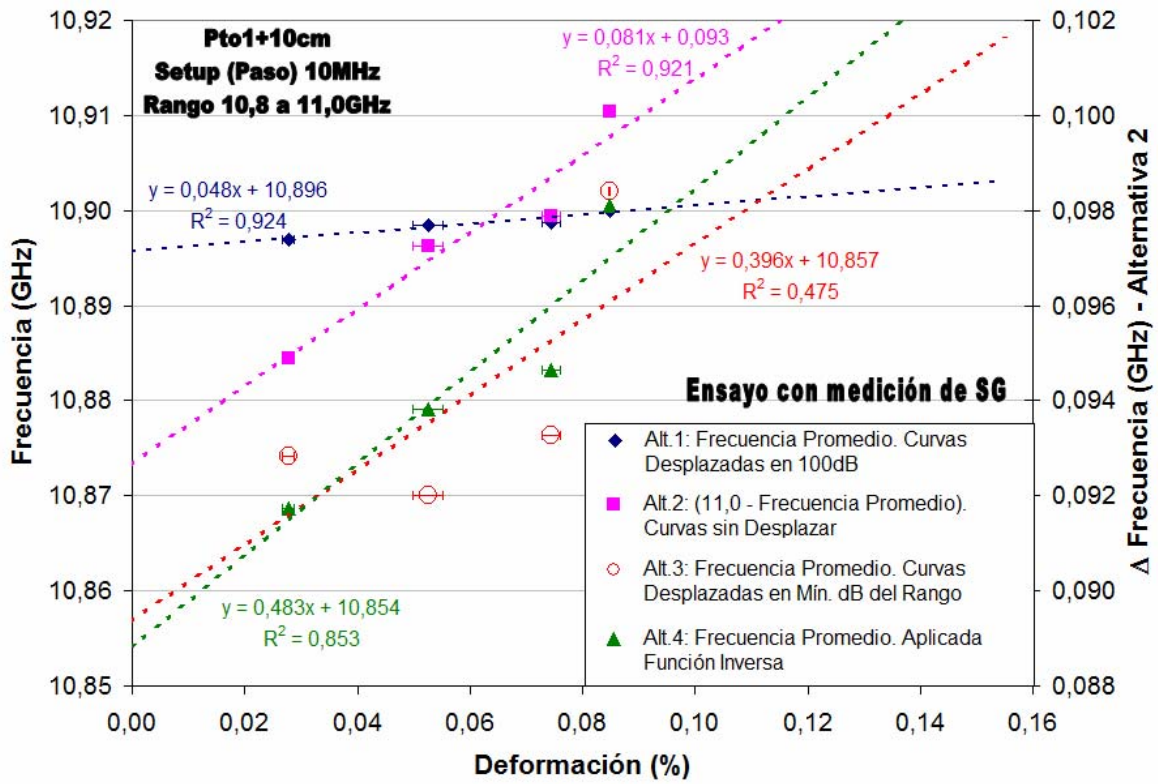


Fig. 5.85: Ensayo B 21-feb-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

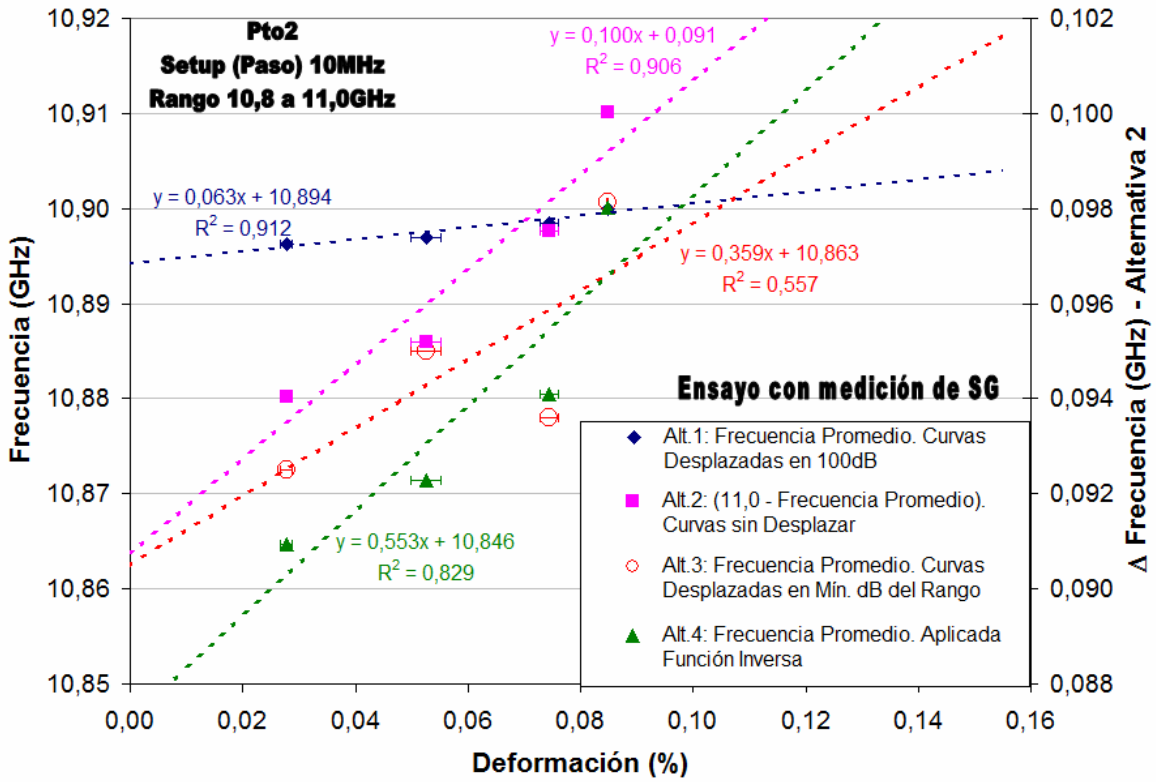


Fig. 5.86: Ensayo B 21-feb-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz

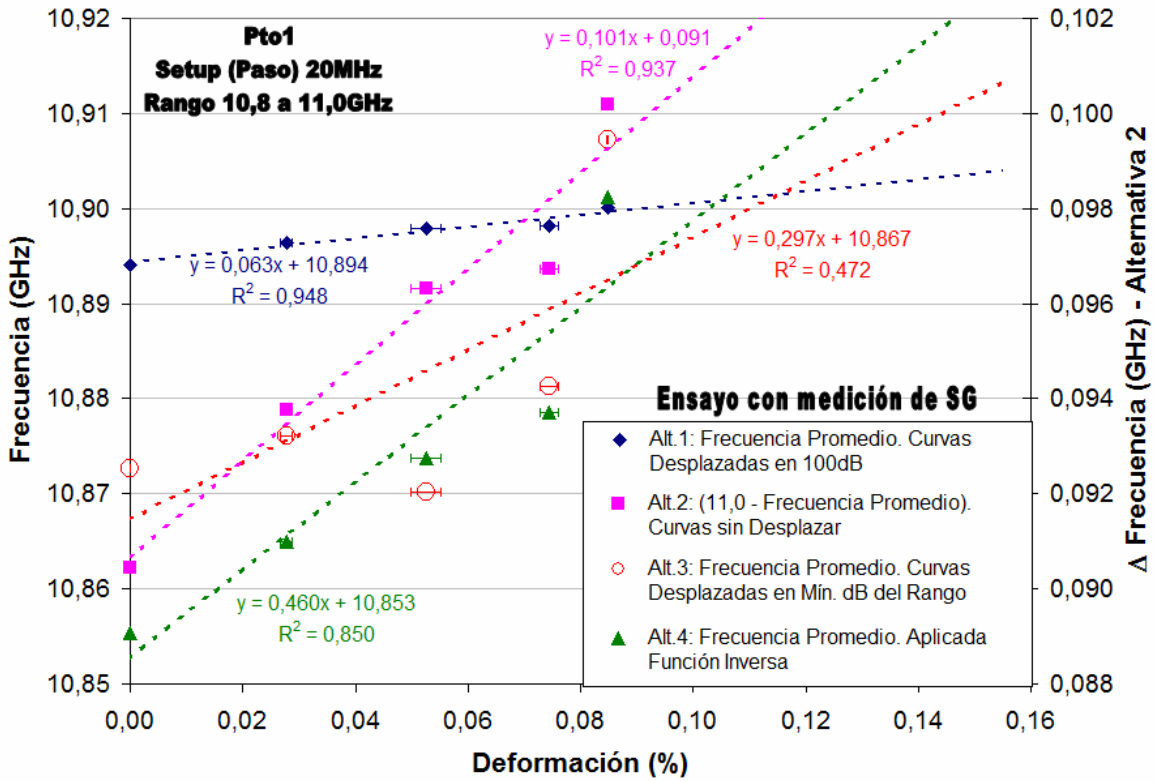


Fig. 5.87: Ensayo B 21-feb-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz

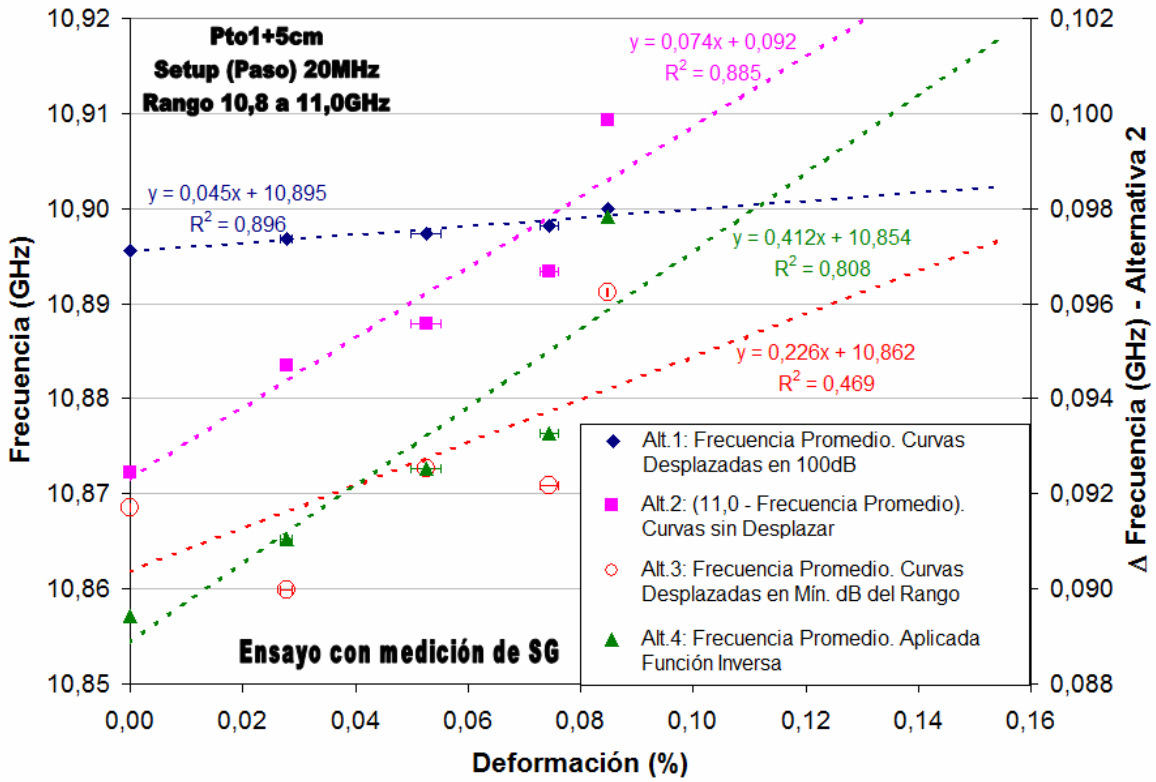


Fig. 5.88: Ensayo B 21-feb-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz

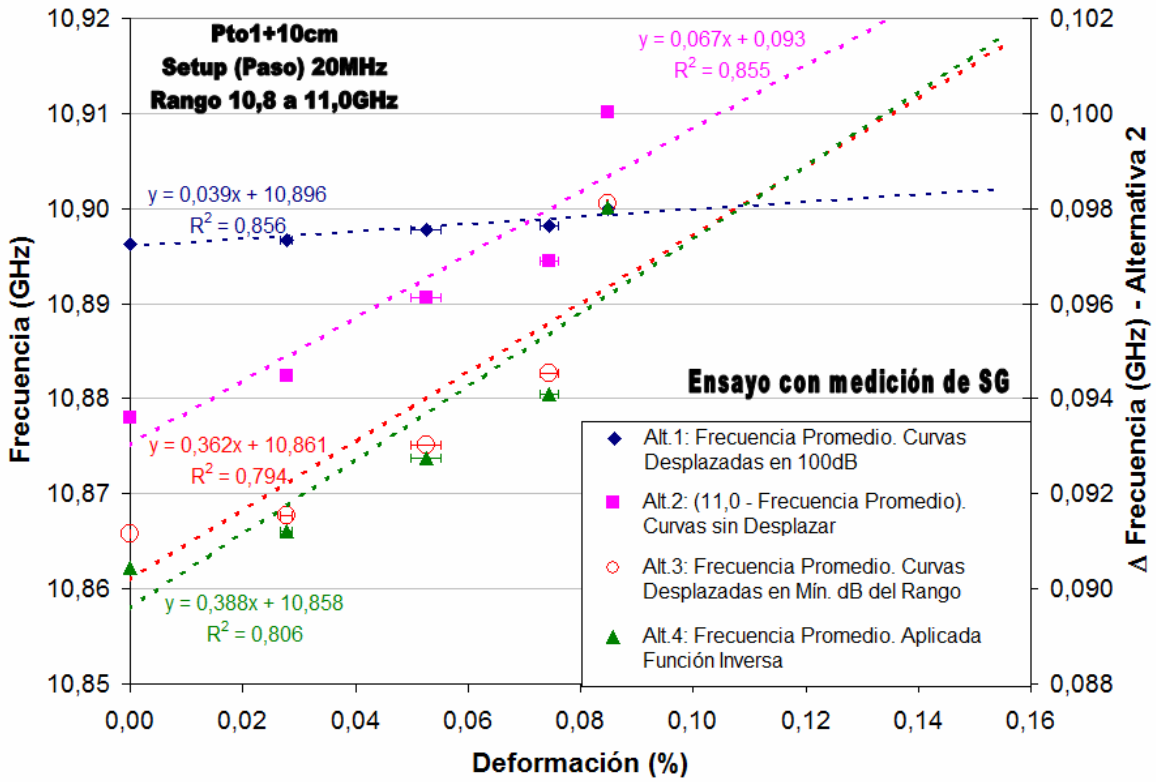


Fig. 5.89: Ensayo B 21-feb-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz

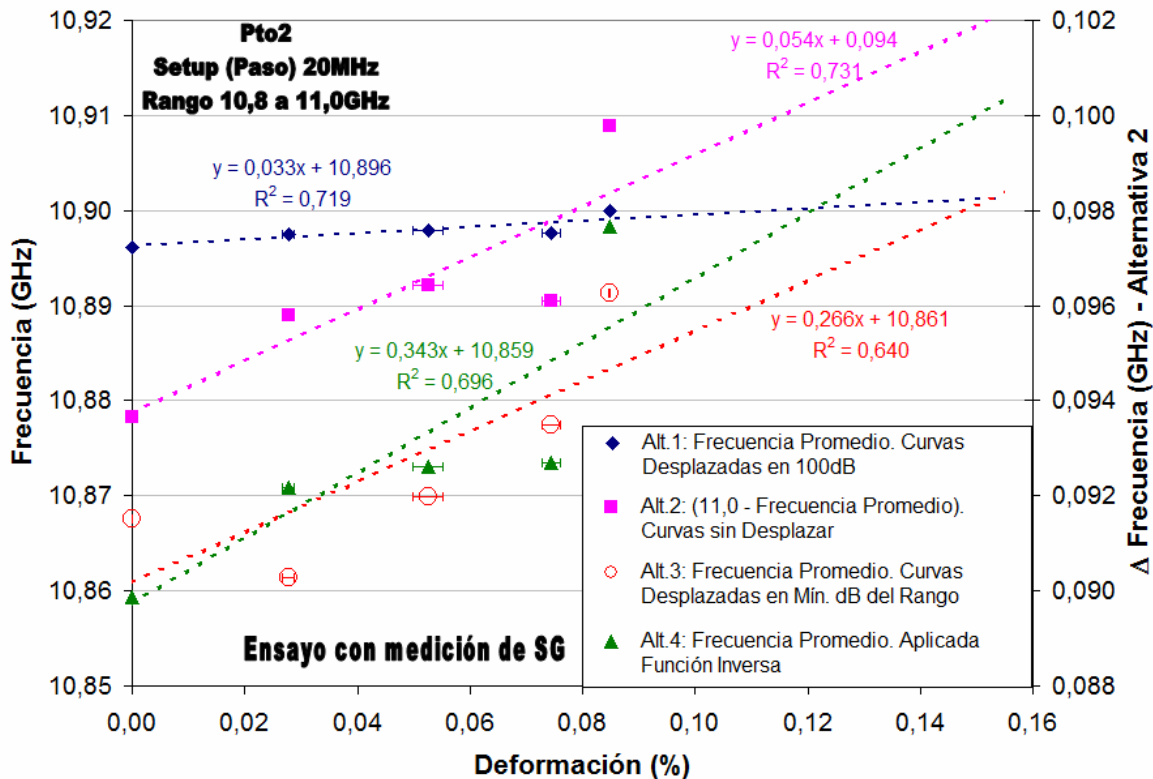


Fig. 5.90: Ensayo B 21-feb-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz

En los resultados presentados para ensayos tipo B, no se presenta una supremacía clara de alguna de las alternativas, obteniéndose una gran variabilidad en los resultados. La menor calidad obtenida en ellos (menor coeficiente de correlación, R^2), se explica por la utilización de tramos bastante menores a la resolución espacial del sistema BOTDR (60cm aprox.). Otro aspecto que puede influir en la calidad de estas correlaciones es la deformación en el tiempo observada en la placa de sujeción inferior en estos ensayos (ver Fig. B. 6). Este efecto, será discutido más adelante (ver capítulo 7).

La estabilidad de parámetros en las correlaciones obtenidas para los ensayos tipo B, según las distintas alternativas, se presenta desde la *Tabla 5.60* a la *Tabla 5.75*.

Tabla 5.60: Ensayos tipo B – Alternativa 1. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo B (en terreno, falla tipo bloque).

Parámetro		Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pend. (GHz/%)	máxima	0,063	1*, 2**	10, 20	B 21-feb-2008	82,54%	41%
	mínima	0,011	2	10	B 23-ene-2008		
Coef. (GHz)	máximo	10,897	2	10	B 23-ene-2008	0,03%	
	mínimo	10,894	1*, 2**	10, 20	B 21-feb-2008		

Tabla 5.61: Ensayo B 23-ene-2008 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo B 23-ene-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	42,11%	17,39%
20MHz	40,00%	27,27%

Tabla 5.62: Ensayo B 21-feb-2008 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo B 21-feb-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	42,86%	25,00%
20MHz	47,62%	38,10%

Tabla 5.63: Ensayos tipo B – Alternativa 1. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo B (en terreno, falla tipo bloque).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	43%	27%

Tabla 5.64: Ensayos tipo B – Alternativa 2. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo B (en terreno, falla tipo bloque).

Parámetro		Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pend. (GHz/%)	máxima	0,101	1	20	B 21-feb-2008	84,16%	45%
	mínima	0,016	2	10	B 23-ene-2008		
Coef. (GHz)	máximo	0,096	2	10	B 23-ene-2008	5,21%	
	mínimo	0,091	1*, 2**	10, 20	B 21-feb-2008		

Tabla 5.65: Ensayo B 23-ene-2008 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo B 23-ene-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	50,00%	8,57%
20MHz	21,31%	20,83%

Tabla 5.66: Ensayo B 21-feb-2008 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo B 21-feb-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	37,00%	22,22%
20MHz	46,53%	33,66%

Tabla 5.67: Ensayos tipo B – Alternativa 2. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo B (en terreno, falla tipo bloque).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	39%	21%

Tabla 5.68: Ensayos tipo B – Alternativa 3. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo B (en terreno, falla tipo bloque).

Parámetro		Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pendiente (GHz/%)	máxima	0,518	1	10	B 21-feb-2008	85,91%	43%
	mínima	0,073	1	20	B 23-ene-2008		
Coeficiente (GHz)	máximo	10,874	1, 2	10	B 23-ene-2008	0,19%	
	mínimo	10,853	1	10	B 21-feb-2008		

Tabla 5.69: Ensayo B 23-ene-2008 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo B 23-ene-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	23,08%	50,25%
20MHz	83,30%	58,29%

Tabla 5.70: Ensayo B 21-feb-2008 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo B 21-feb-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	30,69%	23,55%
20MHz	10,44%	37,57%

Tabla 5.71: Ensayos tipo B – Alternativa 3. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo B (en terreno, falla tipo bloque).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	37%	42%

Tabla 5.72: Ensayos tipo B – Alternativa 4. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo B (en terreno, falla tipo bloque).

Parámetro		Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pendiente (GHz/%)	máxima	0,553	2	10	B 21-feb-2008	58,59%	29%
	mínima	0,229	1	10	B 23-ene-2008		
Coeficiente (GHz)	máximo	10,859	2	20	B 21-feb-2008	0,19%	
	mínimo	10,838	2	10	B 23-ene-2008		

Tabla 5.73: Ensayo B 23-ene-2008 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo B 23-ene-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	56,05%	44,42%
20MHz	46,80%	2,71%

Tabla 5.74: Ensayo B 21-feb-2008 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo B 21-feb-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	22,78%	11,59%
20MHz	25,43%	15,65%

Tabla 5.75: Ensayos tipo B – Alternativa 4. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo B (en terreno, falla tipo bloque).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	38%	19%

De las tablas mostradas para los ensayos tipo B, nuevamente es posible observar una superioridad de la alternativa 4 en cuanto a estabilidad de sus parámetros, presentando menor variación promedio para ambos (30%), como también menores variaciones entre posiciones cercanas para distintos ensayos (19%). La alternativa 3,

muestra una estabilidad levemente mayor respecto del resto de las alternativas, para las pendientes de los puntos 1 y 2. Como se mencionó anteriormente, esto puede explicarse por el origen de esta alternativa. Las alternativas 1 y 2 mantienen comportamientos similares. Sin embargo, esta última posee mayor estabilidad en las pendientes al promediar ambos pasos de frecuencia y ensayos.

5.4.3. Ensayos de Pernos de Anclajes Tipo A, en Losa de H.A.

A continuación, se presentan algunos resultados de ensayos en pernos de anclaje tipo A (zona anclada), los cuales, como se mencionó anteriormente, fueron embebidos en una losa de hormigón con distintos materiales. Desde la *Fig. 5.91* a la *Fig. 5.100* se presentan resultados de ensayos tipo AH (anclados en hormigón); luego, desde la *Fig. 5.101* a la *Fig. 5.121* se presentan los correspondientes al tipo AR (anclados en resina epóxica) y, finalmente, desde la *Fig. 5.122* a la *Fig. 5.137* se muestran resultados de ensayos tipo AG (anclados en grout).

En los ensayos tipo A, se aprecia mayor variación (respecto al promedio) entre los valores de deformación proporcionados por los strain gages 1 y 2, lo que es de esperar según la teoría, la cual establece una disipación de deformaciones con la profundidad. Además, en algunos casos no se obtuvieron mediciones o éstas se consideraron muy defectuosas, por lo cual se especifica que las correlaciones se realizaron con datos de strain gages de otro ensayo.

Se aprecian en general, datos con correlaciones de menor calidad en comparación a las obtenidas en ensayos tipo L, lo que es esperable por la infinidad de variables adicionales con las que cuentan los ensayos tipo zona anclada. Entre los distintos métodos de anclaje, los resultados más deficientes se presentan en los ensayos tipo AH, obteniéndose bajos coeficientes de correlación, además de pendientes bajas en las regresiones lineales asociadas. Es necesario recalcar que este tipo de ensayos (AH), además de haber sido instalados previos a la confección de la losa (para quedar embebidos en el hormigón), fueron realizados en pernos instrumentados utilizando métodos preliminares al comienzo de la investigación, los que posteriormente, fueron reemplazados por alternativas de mejor desempeño. Entre estas diferencias está el método de instalación de fibra en el perno. En un primer tramo, la fibra se afirmó sólo

mediante amarras plásticas, estimándose que el hormigón puede ayudar a mantener la fibra solidaria al perno; mientras que en el segundo, se utilizó un pegamento distinto al escogido para los ensayos finales. Por otra parte, el *loop* utilizado fue de un largo cercano a 1m, utilizándose en él la misma fibra sensora embossing de los tramos pegados al perno. *Loops* de gran longitud como los mencionados, se consideraron poco convenientes por razones discutidas previamente. Éstas guardan relación con la forma en que el sistema integra sobre la resolución espacial, donde un *loop* largo influye considerablemente en la medición aportada por la fibra sensora sometida a deformación. De esta forma, en las cercanías del *loop*, la deformación medida sería disipada al estarla promediando con la zona sin deformación aportada por éste.

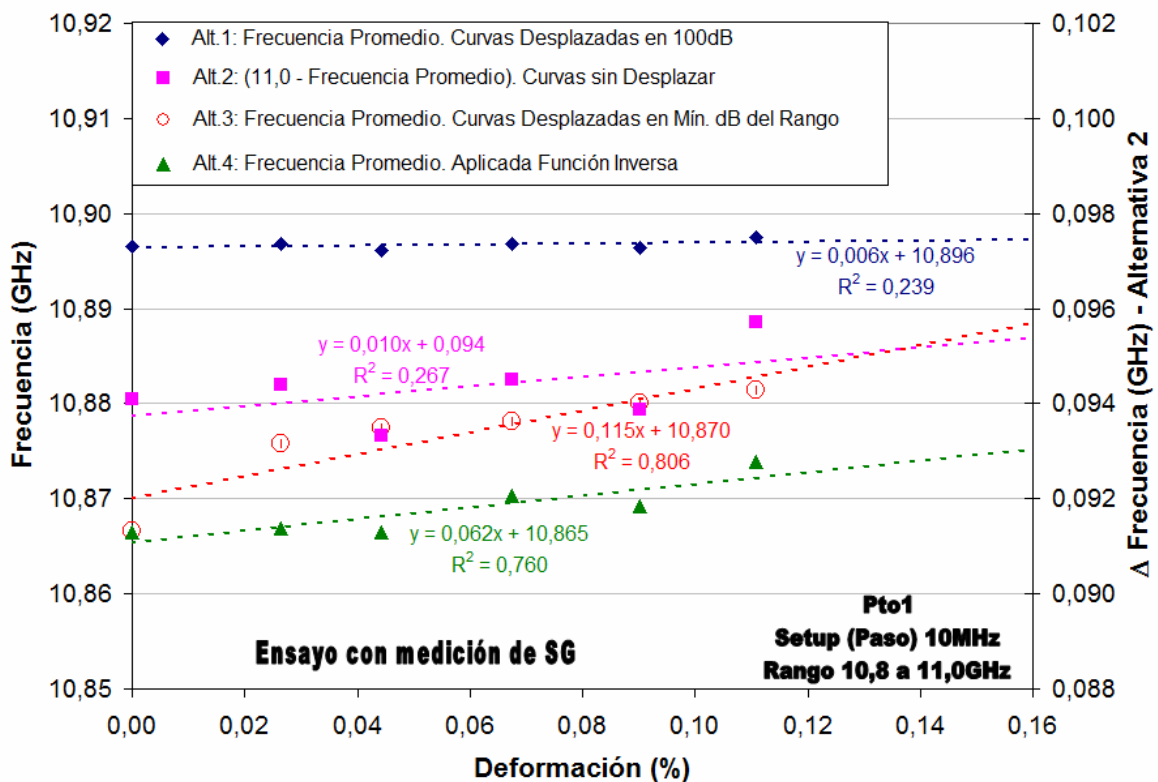


Fig. 5.91: Ensayo AH 26-feb-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

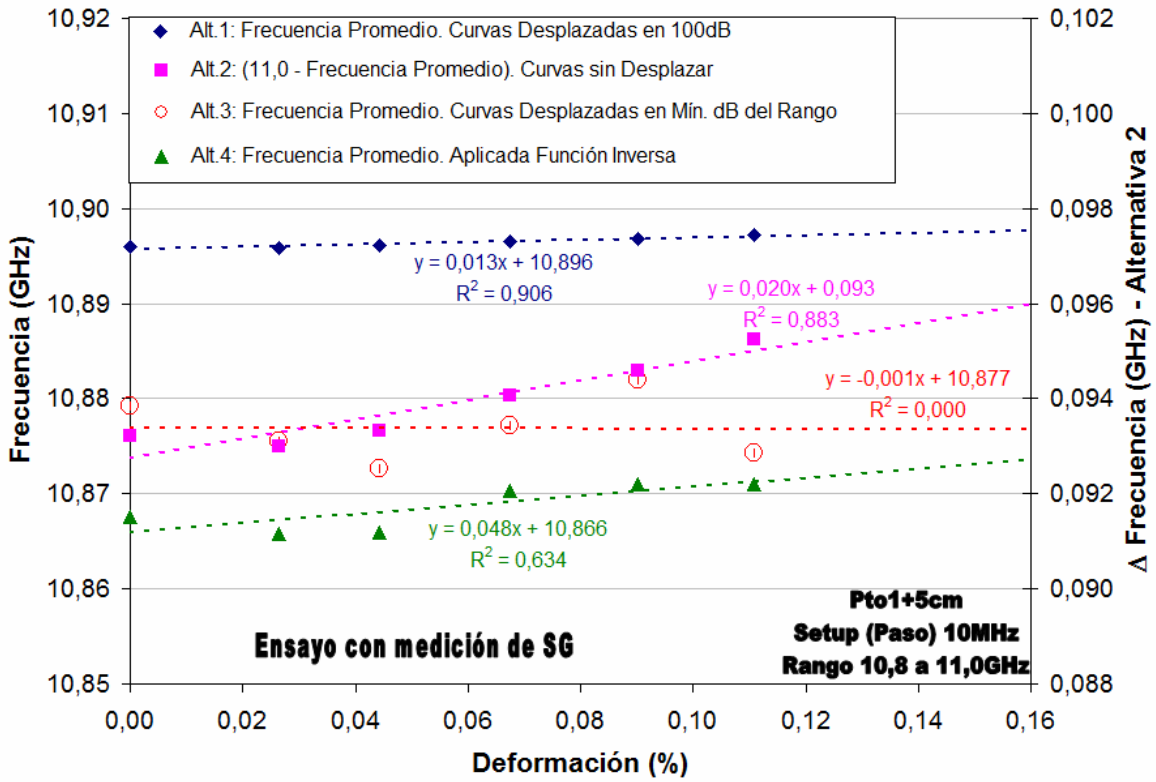


Fig. 5.92: Ensayo AH 26-feb-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

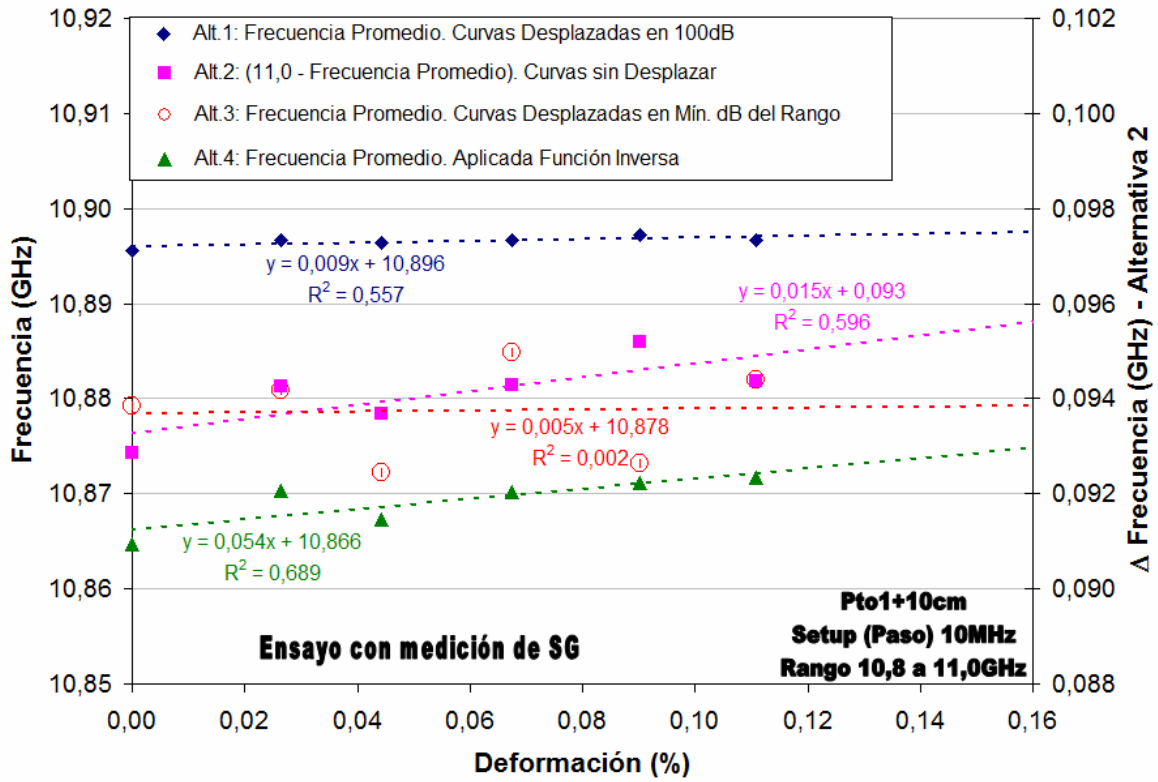


Fig. 5.93: Ensayo AH 26-feb-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

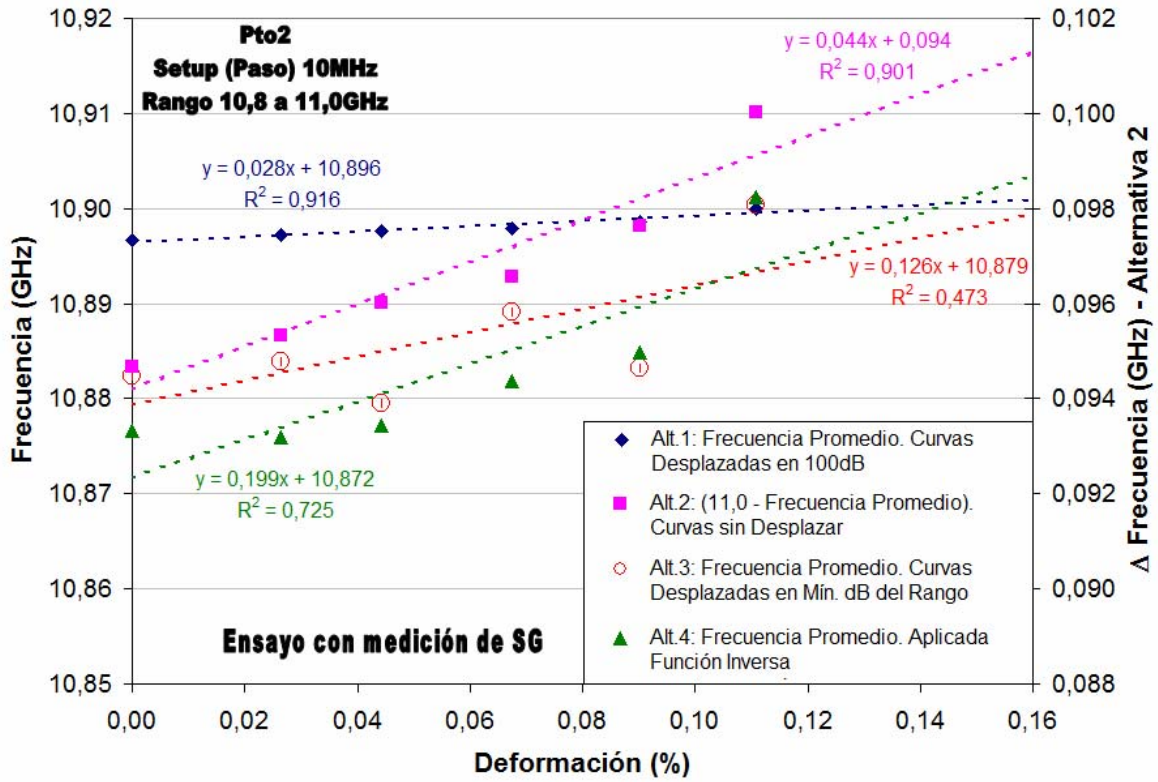


Fig. 5.94: Ensayo AH 26-feb-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

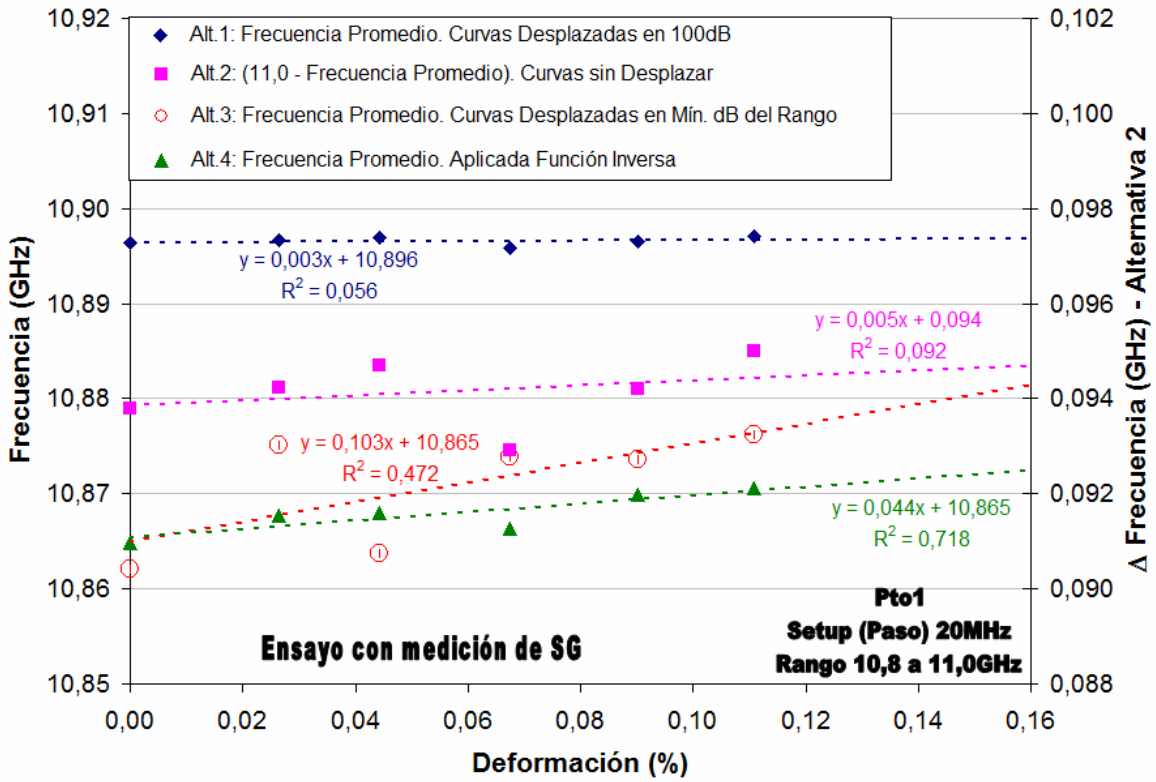


Fig. 5.95: Ensayo AH 26-feb-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

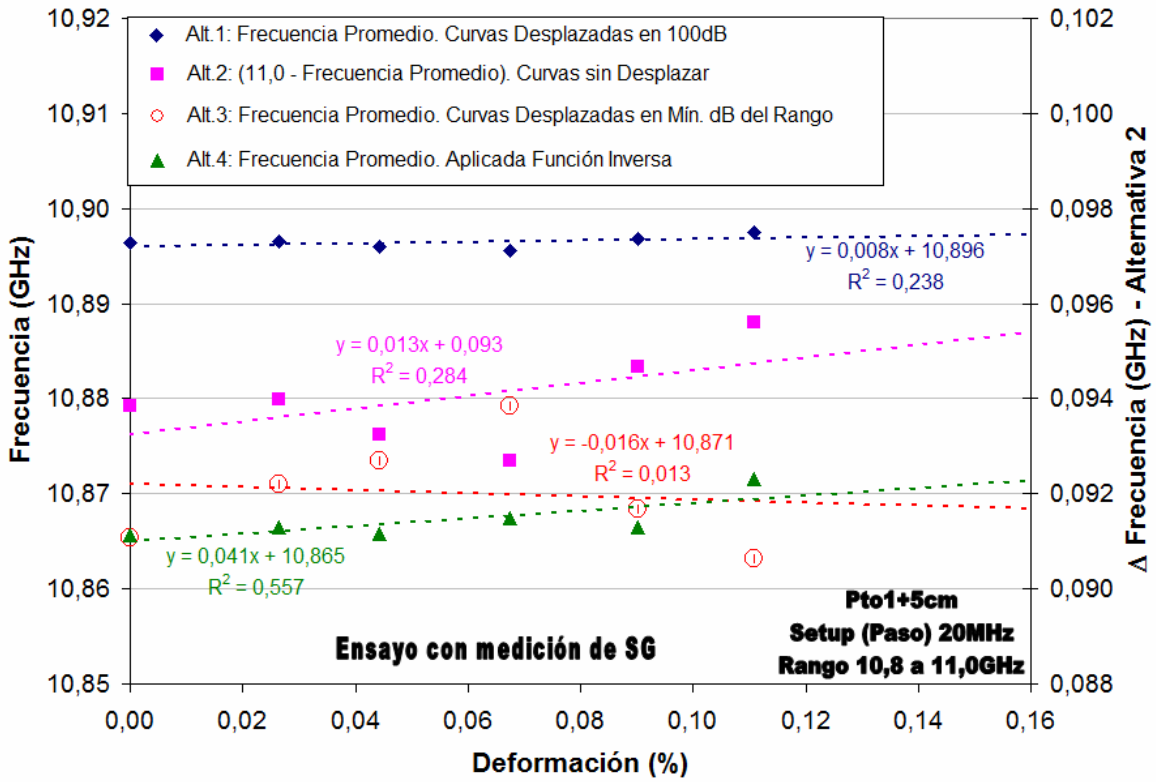


Fig. 5.96: Ensayo AH 26-feb-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

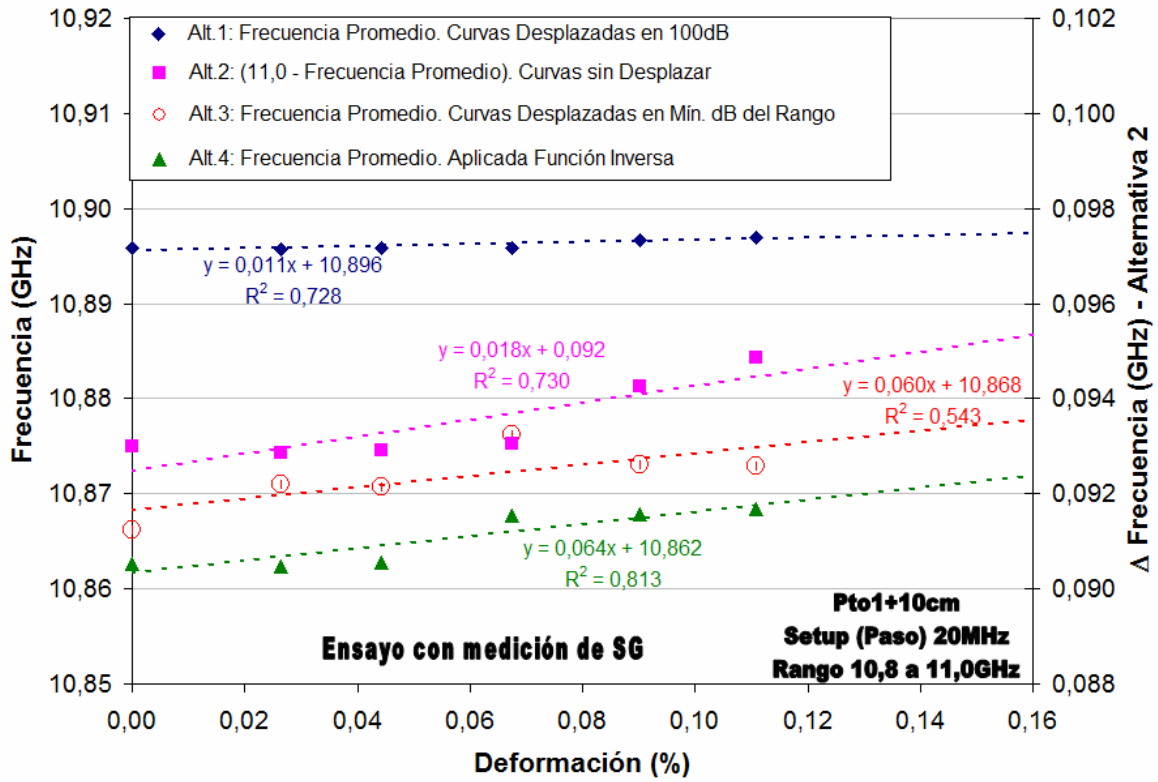


Fig. 5.97: Ensayo AH 26-feb-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

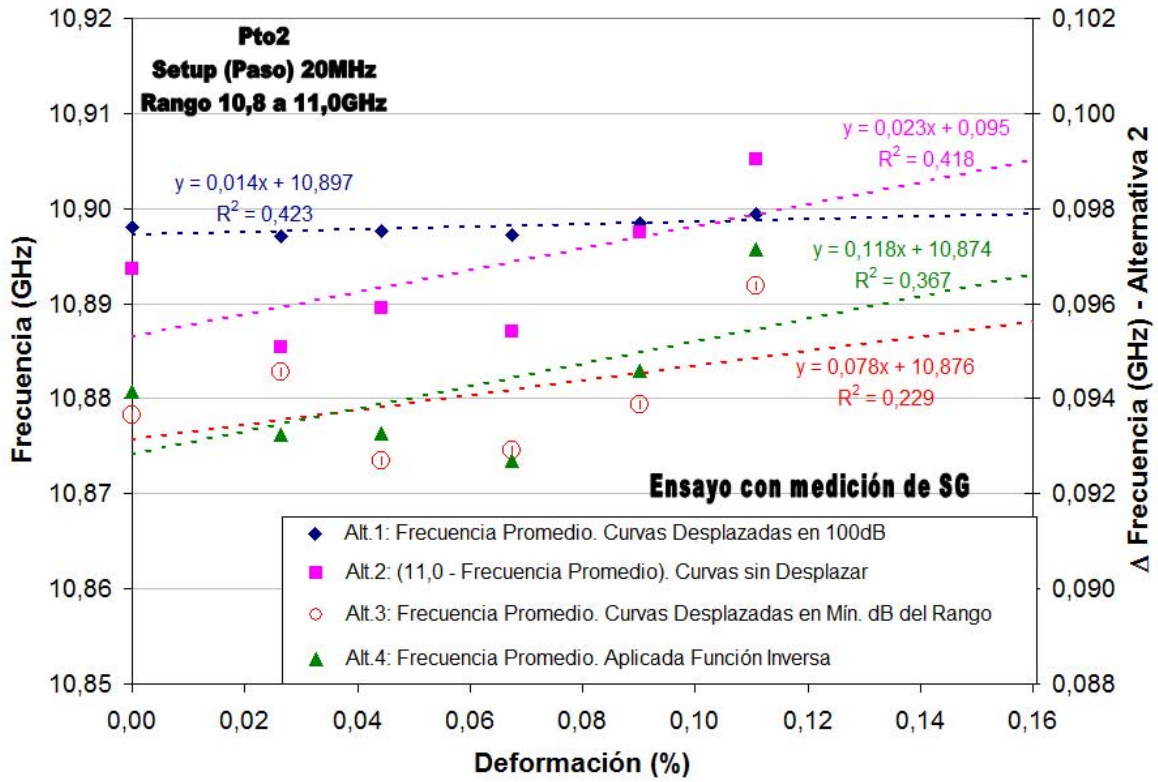


Fig. 5.98: Ensayo AH 26-feb-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

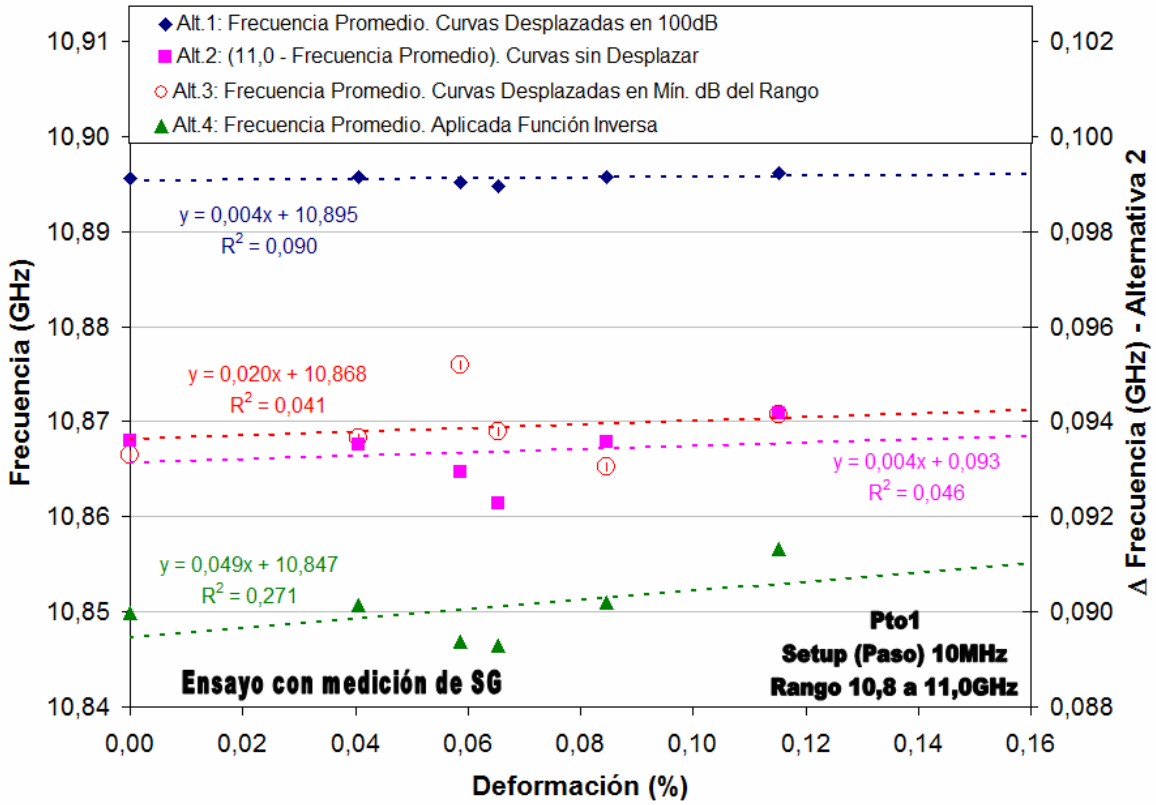


Fig. 5.99: Ensayo AH 18-jul-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

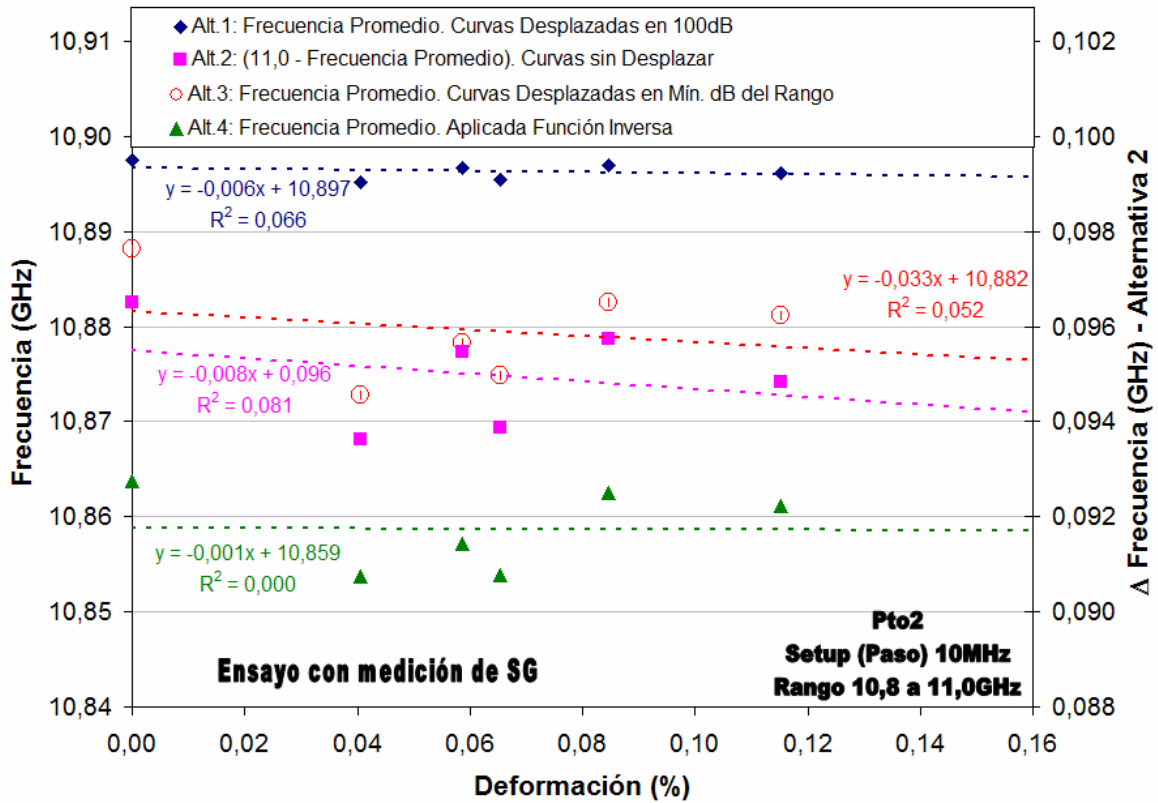


Fig. 5.100: Ensayo AH 18-jul-2008 (en terreno, tipo zona anclada en hormigón). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

La estabilidad de parámetros en las correlaciones obtenidas para los ensayos tipo AH, según las distintas alternativas, se presenta desde la *Tabla 5.76* a la *Tabla 5.91*.

Tabla 5.76: Ensayos tipo AH – Alternativa 1. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AH (en terreno, tipo zona anclada en hormigón).

Parámetro		Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pend. (GHz/%)	máxima	0,028	2	10	AH 26-feb-2008	121,43%	61%
	mínima	-0,006	1+5cm, 2	10	AH 18-jul-2008		
Coef. (GHz)	máximo	10,897	2	20	AH 26-feb-2008	0,02%	
			2	10	AH 18-jul-2008		
	mínimo	10,895	1, 1+5cm, 1+10cm	10	AH 18-jul-2008		

Tabla 5.77: Ensayo AH-26-feb-2008 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AH 26-feb-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	78,57%	53,85%
20MHz	78,57%	72,73%

Tabla 5.78: Ensayo AH-18-jul-2008 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AH 18-jul-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	166,67%	166,67%
20MHz*	-	-

*: En este ensayo sólo se tomaron lecturas con paso de 10MHz

Tabla 5.79: Ensayos tipo AH – Alternativa 1. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AH (en terreno, tipo zona anclada en hormigón).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	108%	98%

Tabla 5.80: Ensayos tipo AH – Alternativa 2. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AH (en terreno, tipo zona anclada en hormigón).

Parámetro		Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pend. (GHz/%)	máxima	0,044	2	10	AH 26-feb-2008	120,45%	62%
	mínima	-0,009	1+5cm	10	AH 18-jul-2008		
Coef. (GHz)	máximo	0,096	2	10	AH 18-jul-2008	4,17%	
	mínimo	0,092	1+10cm	20	AH 26-feb-2008		

Tabla 5.81: Ensayo AH-26-feb-2008 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AH 26-feb-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	77,27%	50,00%
20MHz	78,26%	72,22%

Tabla 5.82: Ensayo AH-18-jul-2008 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AH 18-jul-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	150,00%	144,44%
20MHz*	-	-

*: En este ensayo sólo se tomaron lecturas con paso de 10MHz

Tabla 5.83: Ensayos tipo AH – Alternativa 2. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AH (en terreno, tipo zona anclada en hormigón).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	102%	89%

Tabla 5.84: Ensayos tipo AH – Alternativa 3. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AH (en terreno, tipo zona anclada en hormigón).

Parámetro		Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pend. (GHz/%)	máxima	0,126	2	10	AH 26-feb-2008	162,70%	81%
	mínima	-0,079	1+10cm	10	AH 18-jul-2008		
Coef. (GHz)	máximo	10,882	2	10	AH 18-jul-2008	0,16%	
	mínimo	10,865	1	20	AH 26-feb-2008		

Tabla 5.85: Ensayo AH-26-feb-2008 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AH 26-feb-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto. 1 y 2	Entre vecindad Pto. 1
10MHz	8,73%	100,87%
20MHz	24,27%	115,53%

Tabla 5.86: Ensayo AH-18-jul-2008 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AH 18-jul-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto. 1 y 2	Entre vecindad Pto. 1
10MHz	160,61%	125,32%
20MHz*	-	-

*: En este ensayo sólo se tomaron lecturas con paso de 10MHz

Tabla 5.87: Ensayos tipo AH – Alternativa 3. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AH (en terreno, tipo zona anclada en hormigón).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto. 1 y 2	Entre vecindad Pto. 1
Promedio ambos ensayos	65%	114%

Tabla 5.88: Ensayos tipo AH – Alternativa 4. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AH (en terreno, tipo zona anclada en hormigón).

Parámetro		Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pend. (GHz/%)	máxima	0,199	2	10	AH 26-feb-2008	100,50%	50%
	mínima	-0,001	2	10	AH 18-jul-2008		
Coef. (GHz)	máximo	10,874	2	20	AH 26-feb-2008	0,25%	
	mínimo	10,847	1	10	AH 18-jul-2008		

Tabla 5.89: Ensayo AH-26-feb-2008 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AH 26-feb-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	68,84%	22,58%
20MHz	62,71%	35,94%

Tabla 5.90: Ensayo AH-18-jul-2008 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AH 18-jul-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	102,04%	75,51%
20MHz*	-	-

*: En este ensayo sólo se tomaron lecturas con paso de 10MHz

Tabla 5.91: Ensayos tipo AH – Alternativa 4. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AH (en terreno, tipo zona anclada en hormigón).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	78%	45%

De las tablas mostradas para los ensayos tipo AH, en general se observa una mayor variación de los parámetros respecto del resto de los ensayos. Sin embargo, se mantiene la tendencia vista en los ensayos anteriores, donde la alternativa 4 muestra

mayor estabilidad de sus parámetros, presentando menor variación promedio para ambos (50%), como también menores variaciones entre posiciones cercanas para distintos ensayos. La alternativa 3 muestra una estabilidad levemente mayor, respecto del resto de las alternativas, para las pendientes de los puntos 1 y 2. Como se mencionó anteriormente, esto puede explicarse por el origen de esta alternativa. Las alternativas 1 y 2 presentan comportamientos bastante similares entre sí, manteniéndose mayor estabilidad en las pendientes de la alternativa 2 al promediar ambos pasos de frecuencia y ensayos.

Las figuras asociadas a los ensayos tipo AR presentan resultados bastante aceptables y de calidad muy superior a los obtenidos en ensayos AH. En particular, la alternativa 4 muestra ser bastante efectiva en el análisis de resultados de este tipo de ensayos, obteniéndose en cada caso correlaciones altas y pendientes que permiten definir un rango de deformación aceptable, dada una frecuencia promedio obtenida. La alternativa 3 resulta ser bastante deficiente, mostrando bajas correlaciones entre sus datos. Las alternativas 1 y 2 mantienen correlaciones aceptables, pero sus bajas pendientes las hacen menos confiables para la deducción de deformaciones mediante una frecuencia promedio dada. La alternativa 4 muestra estabilidad en sus resultados en una vecindad del *Punto 1* y también al comparar entre pasos de 10 y 20MHz, como se aprecia en desde la *Fig. 5.105* a la *Fig. 5.107* y desde la *Fig. 5.109* a la *Fig. 5.111*, respectivamente.

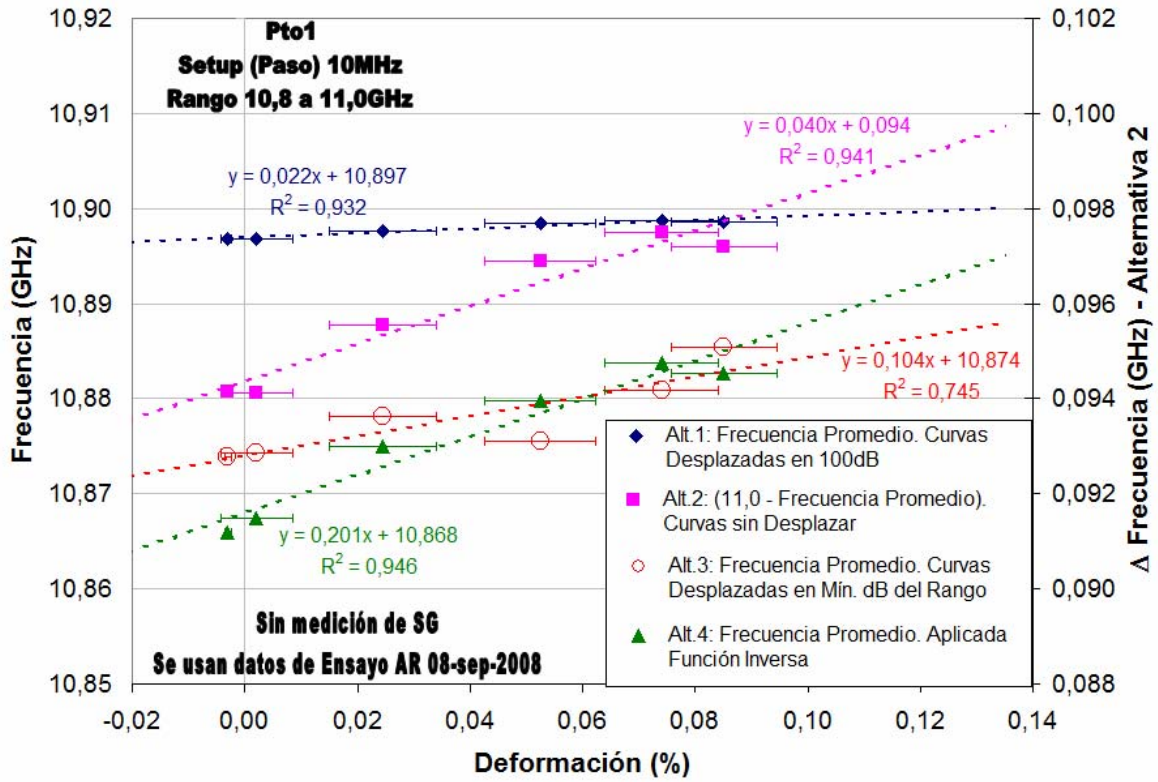


Fig. 5.101: Ensayo AR 22-ago-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

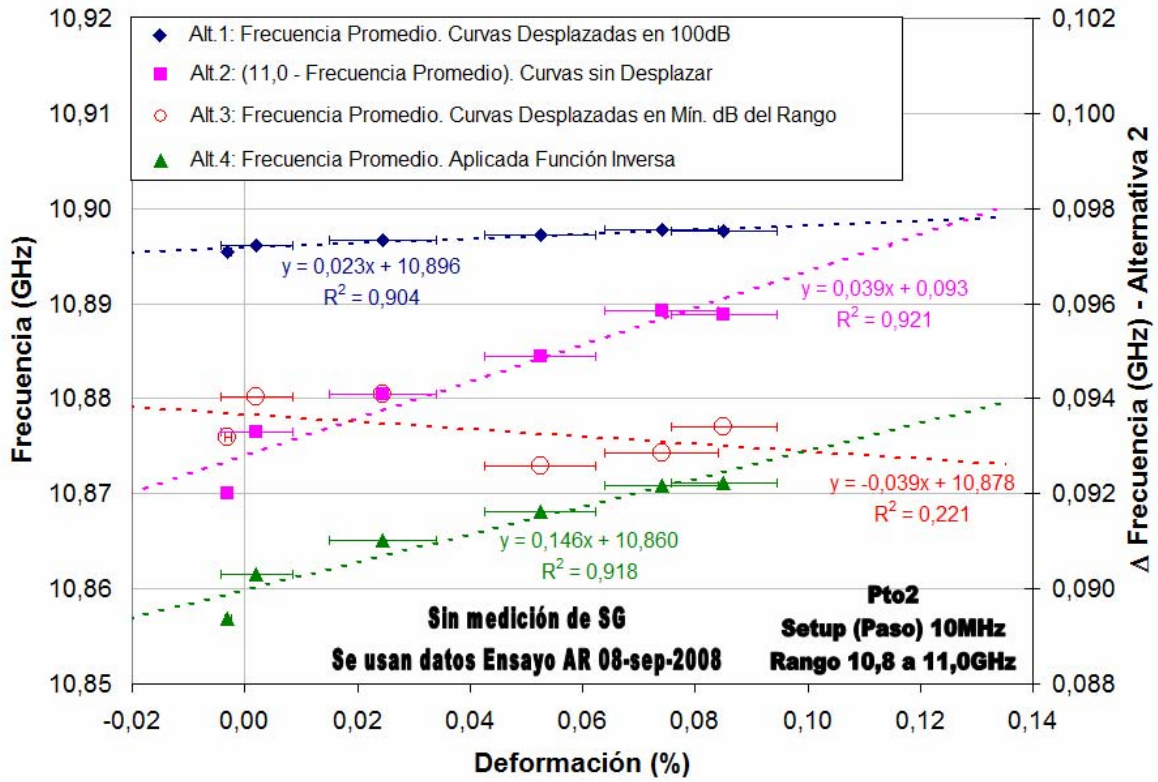


Fig. 5.102: Ensayo AR 22-ago-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

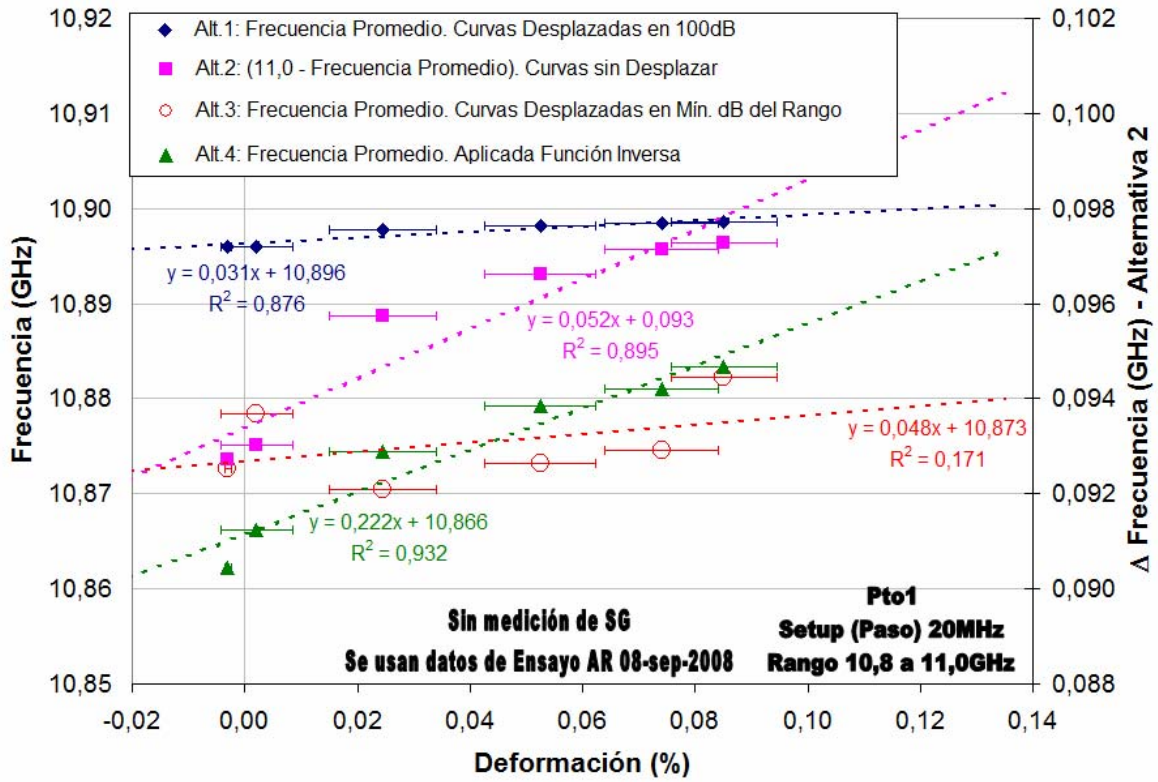


Fig. 5.103: Ensayo AR 22-ago-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

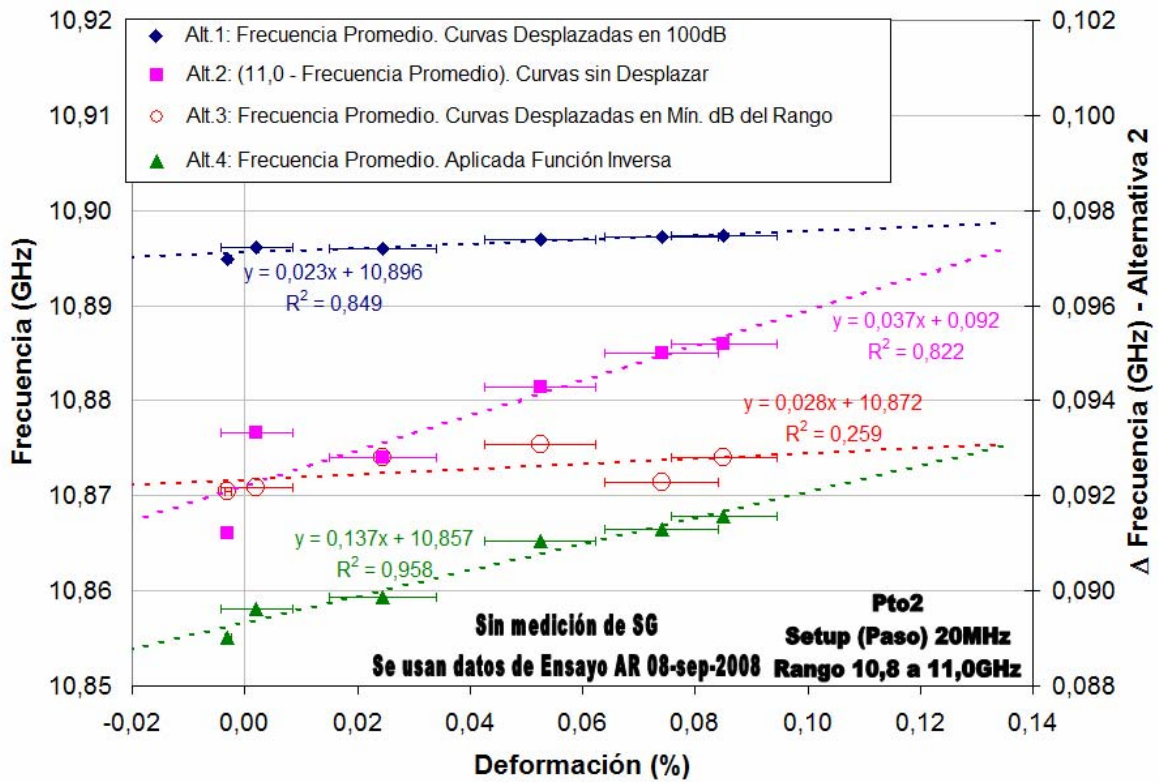


Fig. 5.104: Ensayo AR 22-ago-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

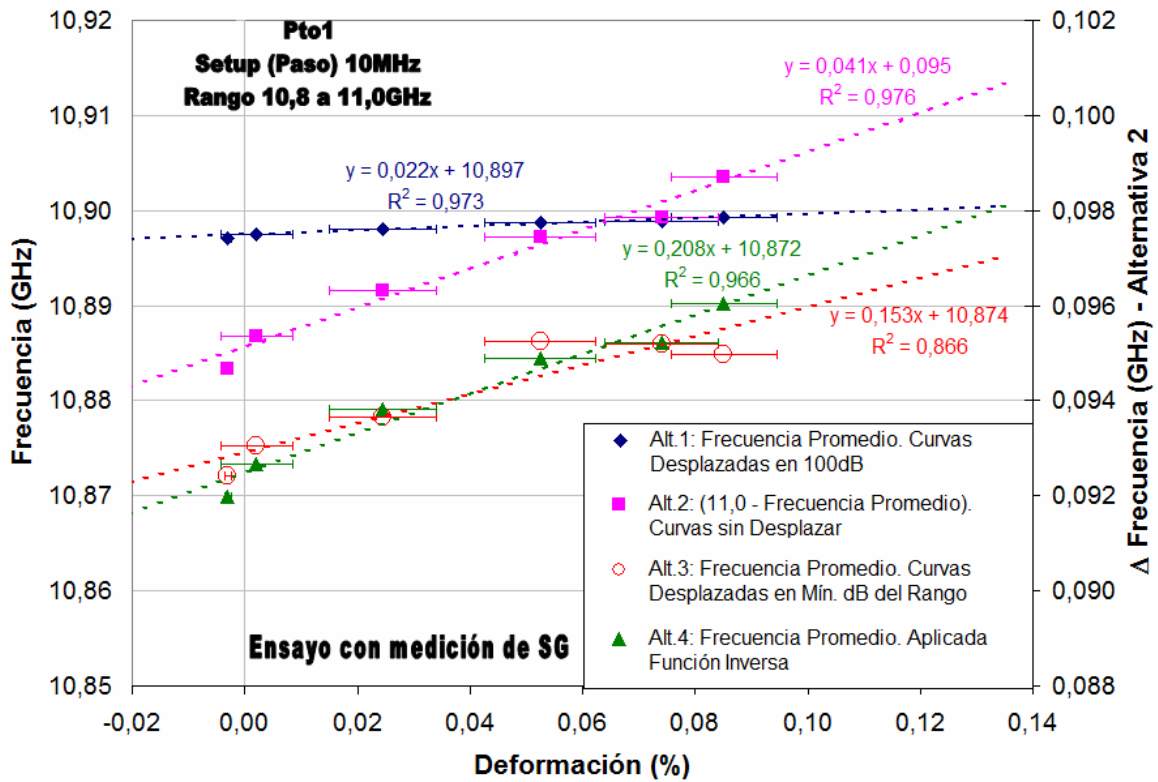


Fig. 5.105: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

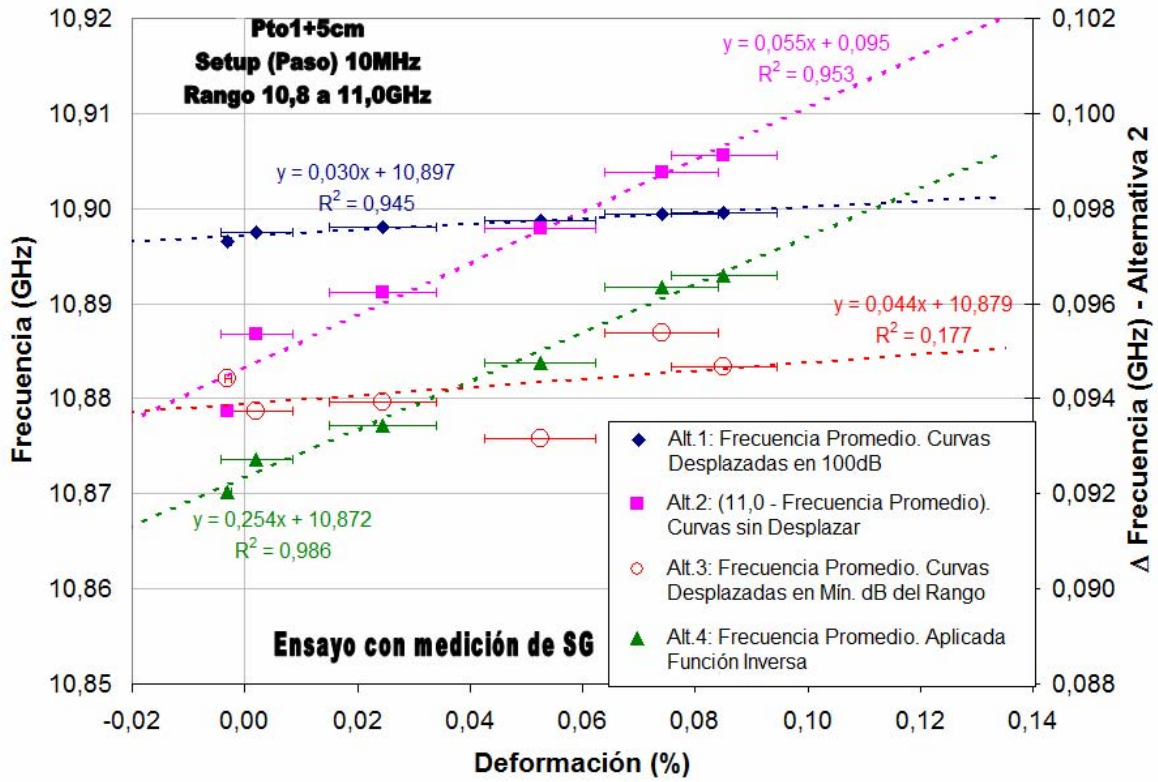


Fig. 5.106: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

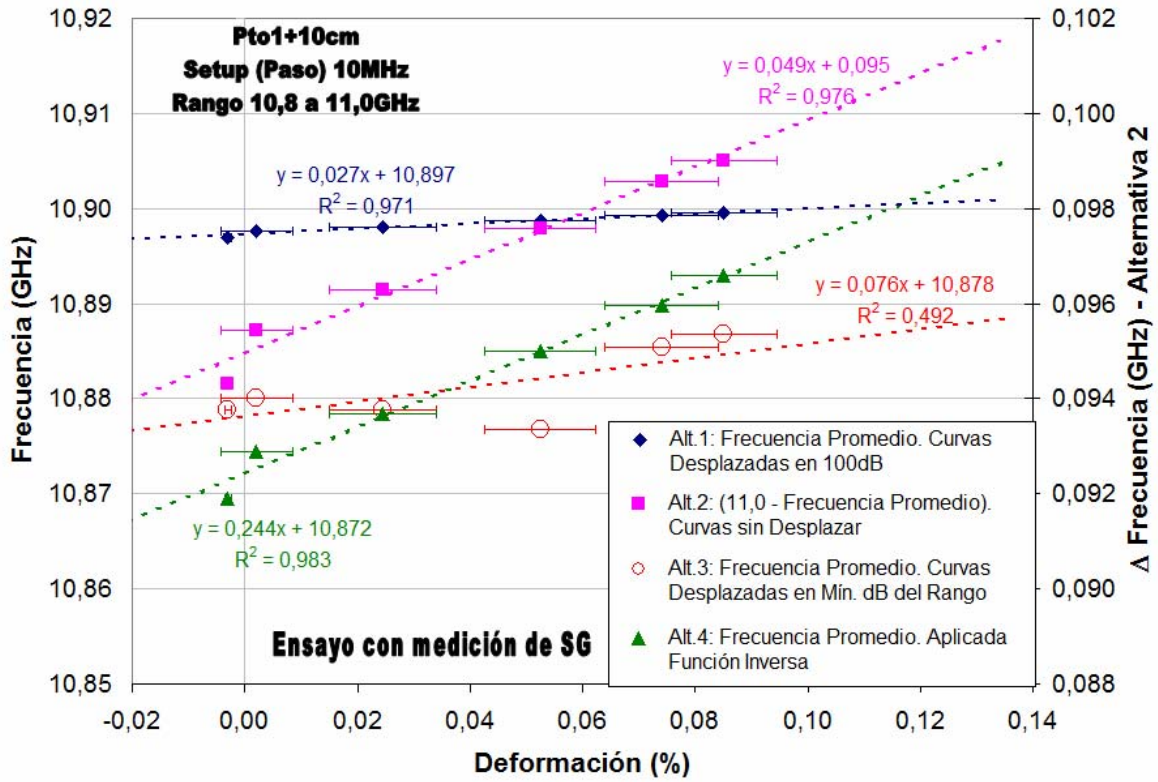


Fig. 5.107: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

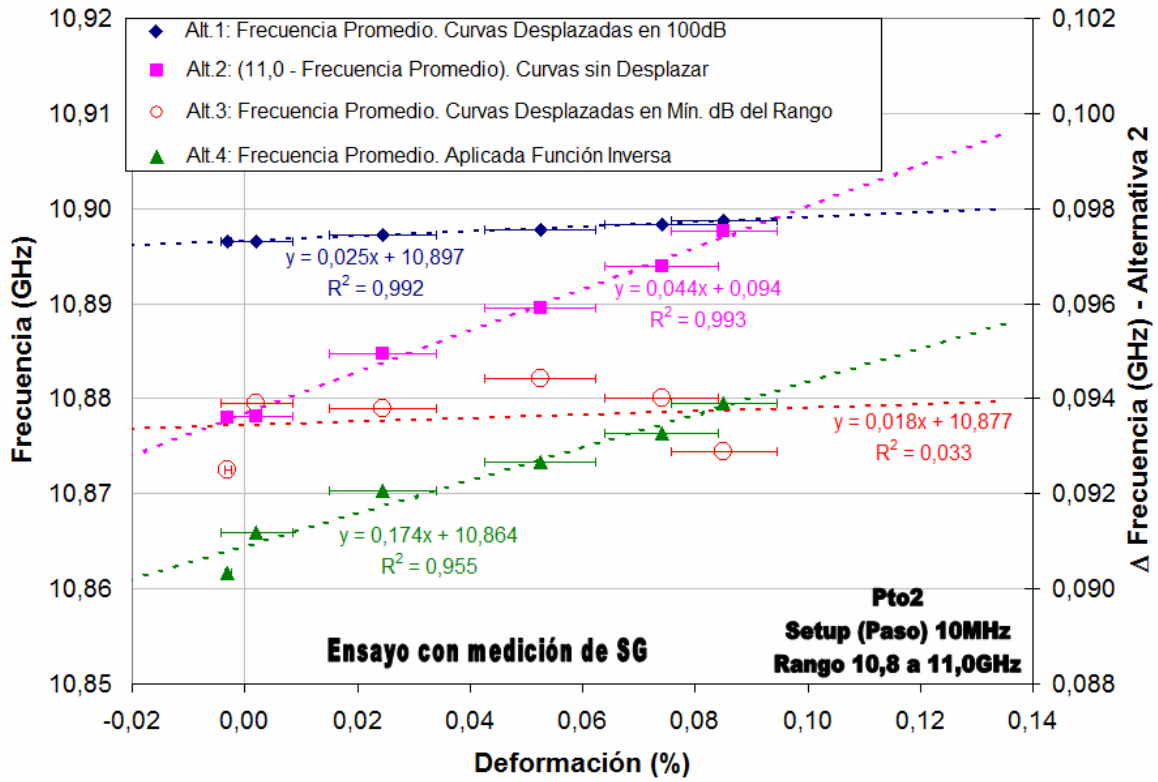


Fig. 5.108: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

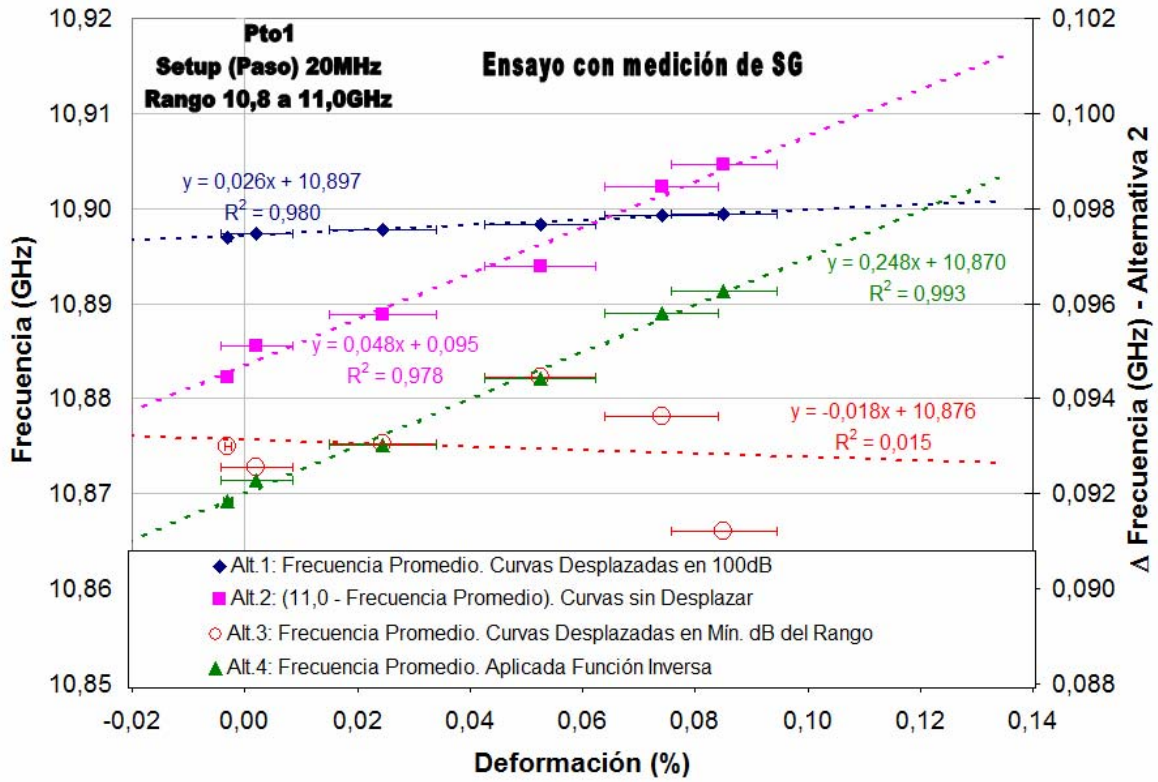


Fig. 5.109: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

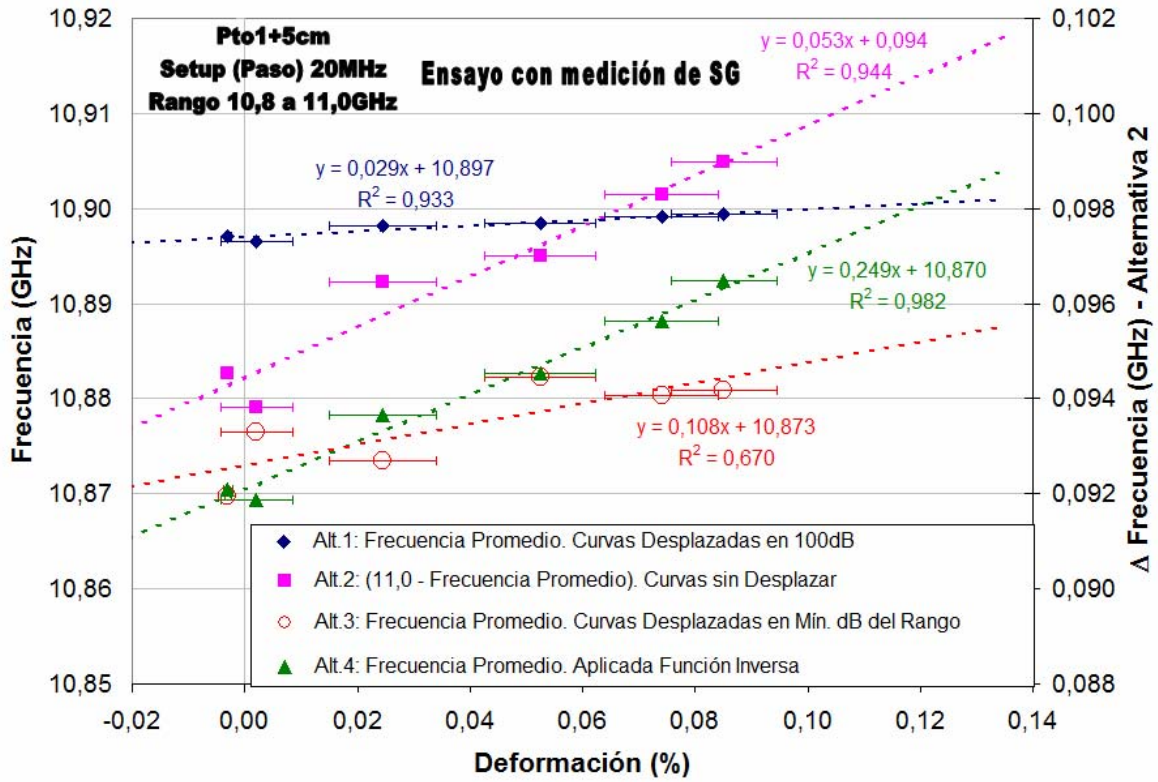


Fig. 5.110: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

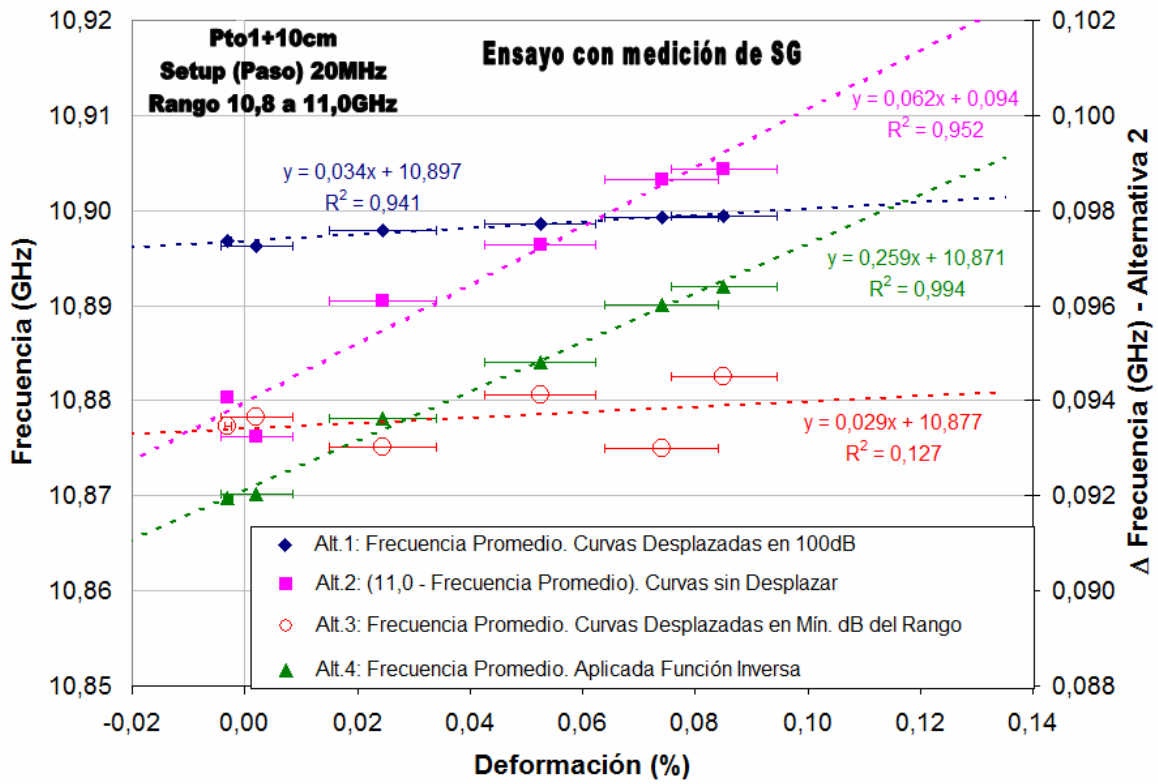


Fig. 5.111: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

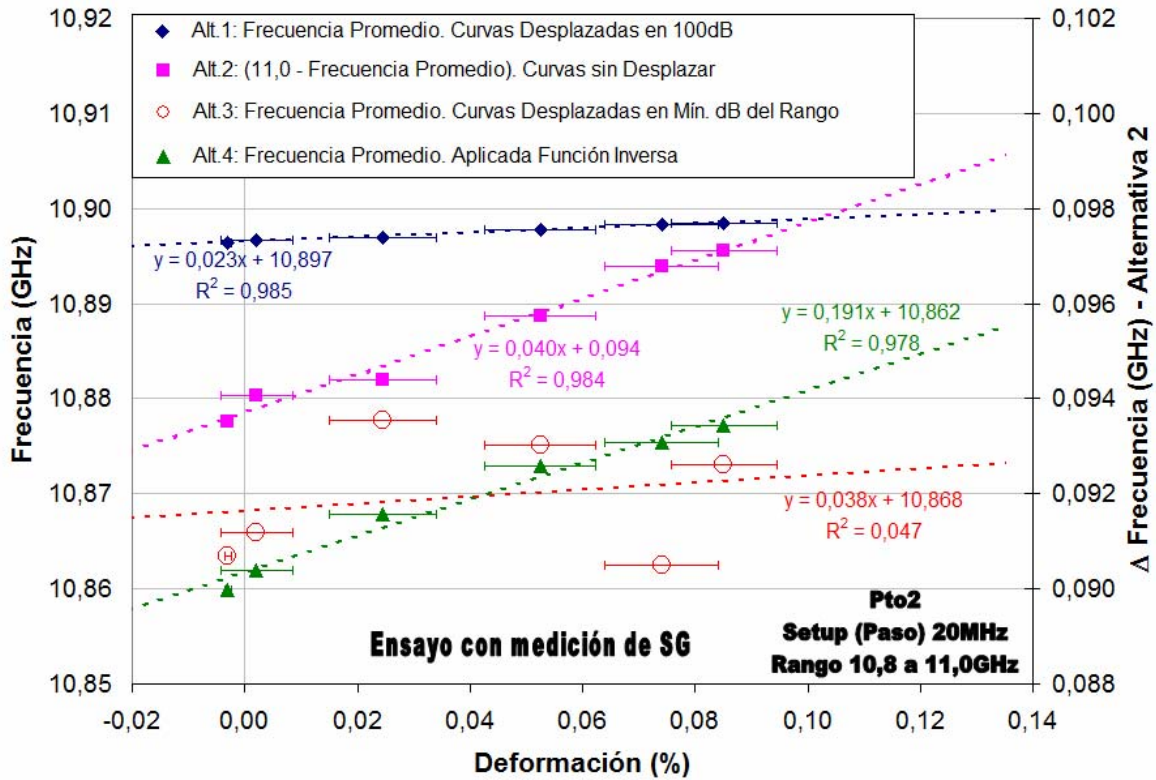


Fig. 5.112: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

A continuación, desde la Fig. 5.114 a la Fig. 5.121, se presentan resultados similares a los mostrados anteriormente, pero intercambiando los Puntos 1, 1+5cm, 1+10cm (ubicados en el tramo 1) y el Punto 2 (ubicado en el tramo 2) definidos en la Fig. 5.64, por posiciones en la fibra que coincidan (según mapeo) con la ubicación de los strain gages (SG-1 y SG-2), para ambos tramos de fibra pegada al perno (ver Fig. 5.113 y anexo C). Se definen de esta forma, cuatro puntos de interés adicionales. Los dos primeros, en el sentido de avance en la fibra desde el analizador, son aquellos que coinciden con la posición de los strain gage 1 y 2 en el tramo 1 de fibra, y los dos últimos, son los puntos donde la fibra pasa, en sentido contrario, junto a los strain gage 2 y 1 en el tramo 2.

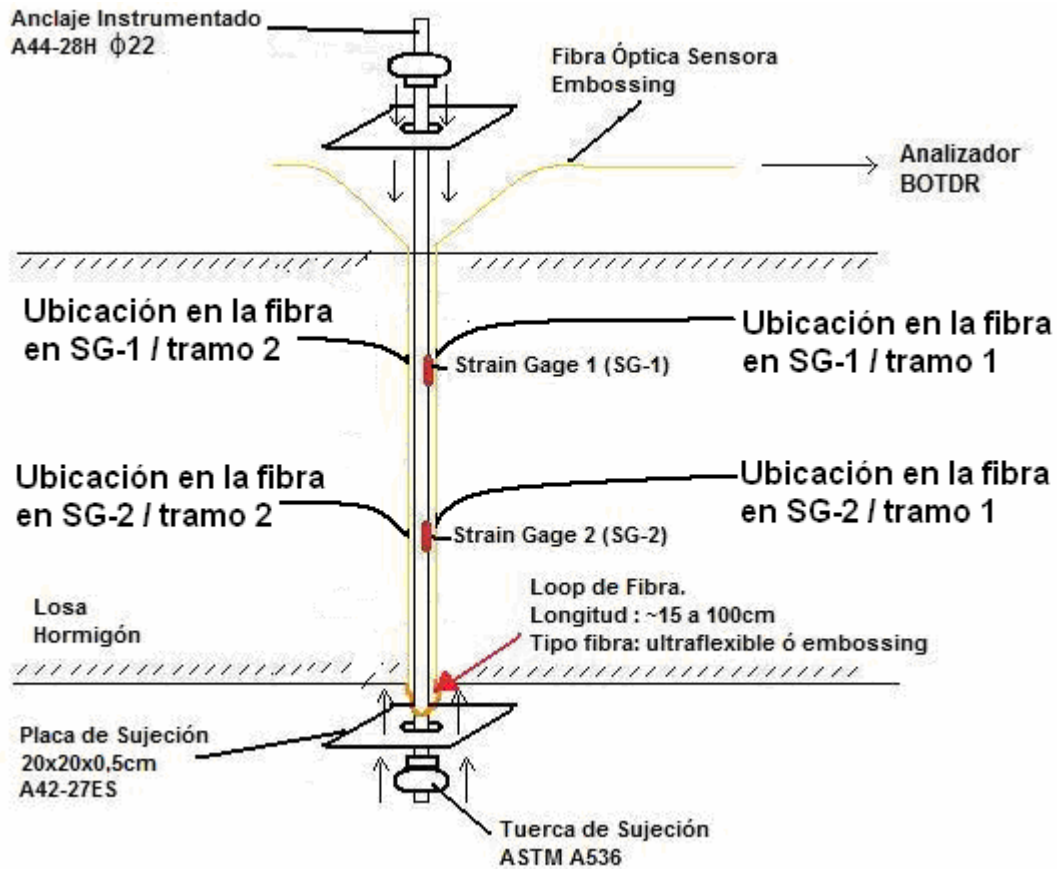


Fig. 5.113: Definición puntos adicionales de observación, contiguos a strain gages 1 y 2 (según mapeo).

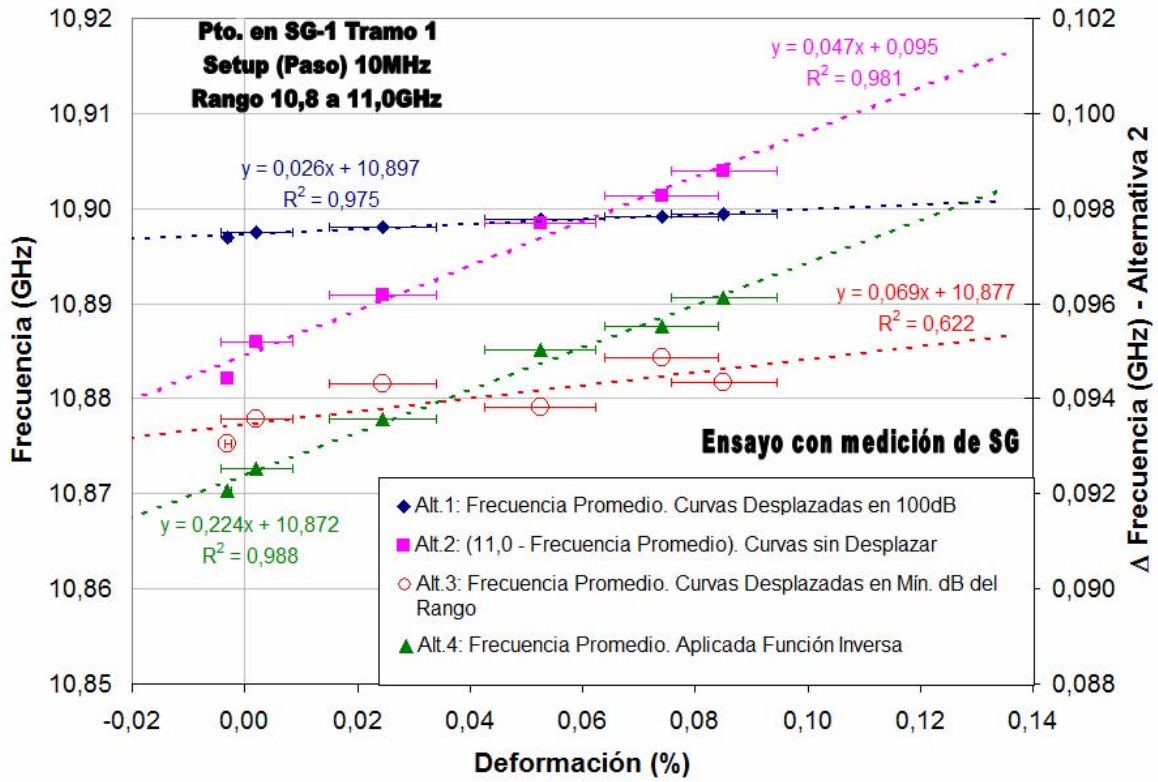


Fig. 5.114: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-1 Tramo 1, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

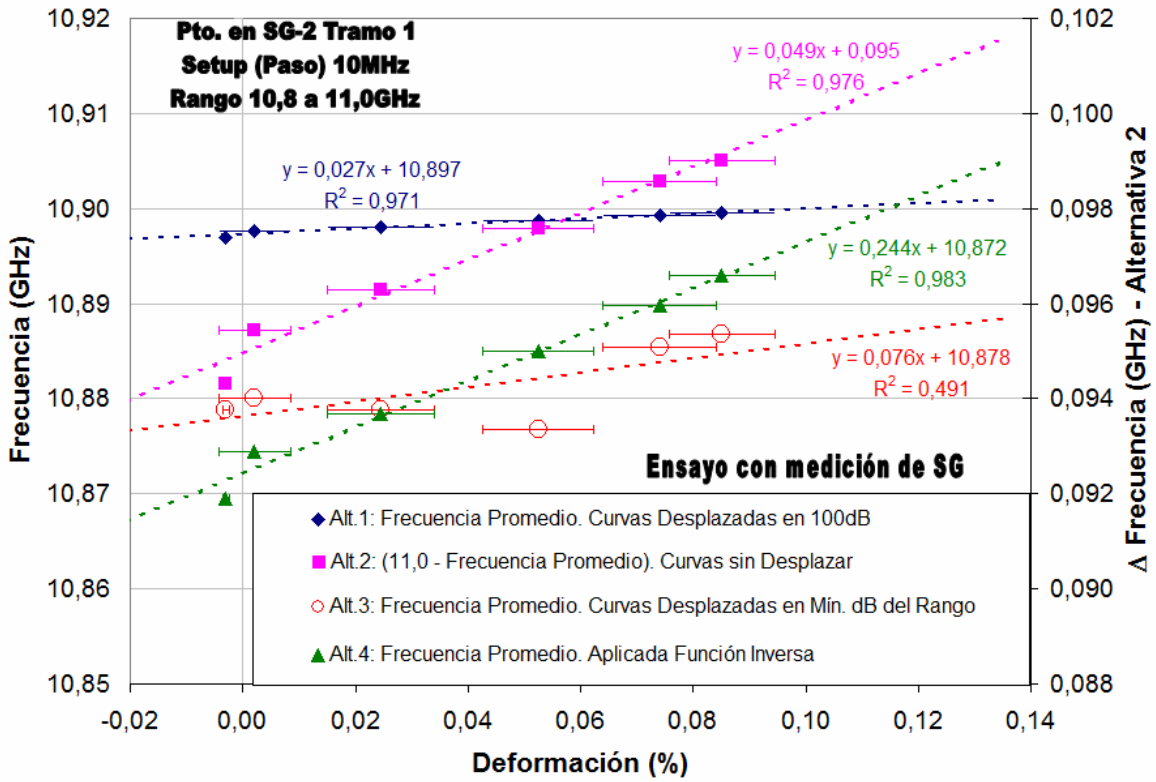


Fig. 5.115: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-2 Tramo 1, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

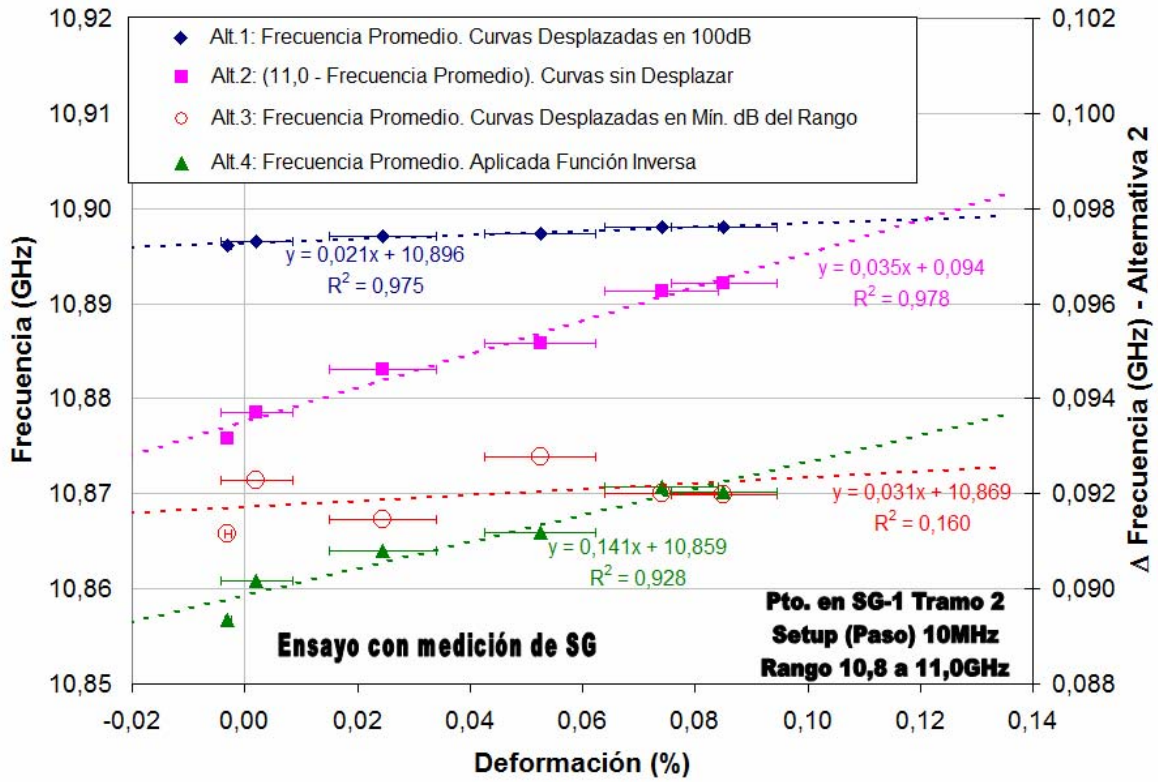


Fig. 5.116: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-1 Tramo 2, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

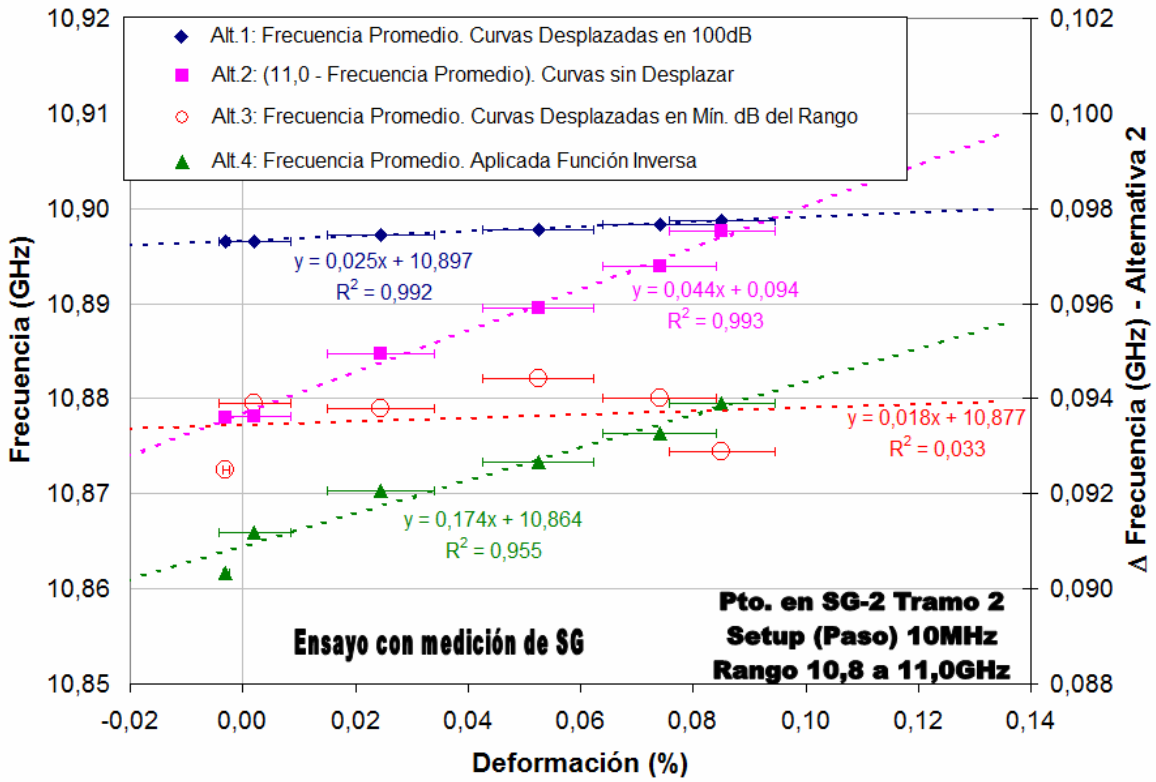


Fig. 5.117: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-2 Tramo 2, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

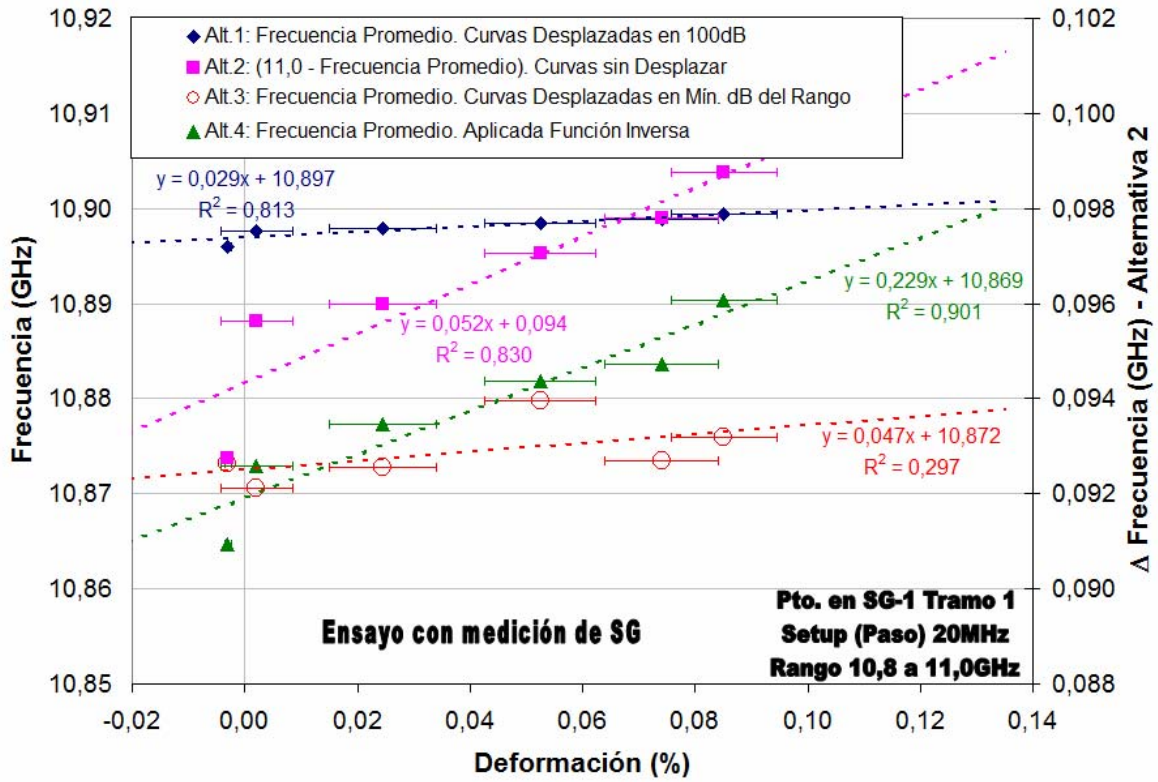


Fig. 5.118: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-1 Tramo 1, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

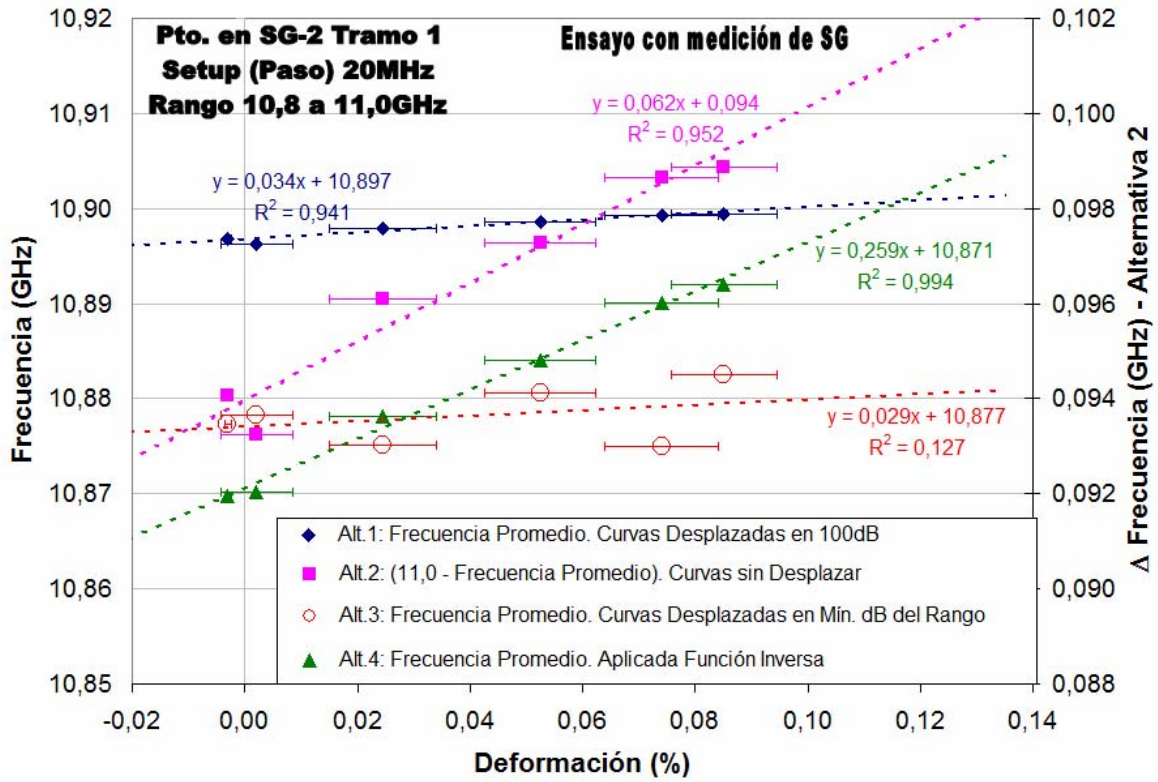


Fig. 5.119: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-2 Tramo 1, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

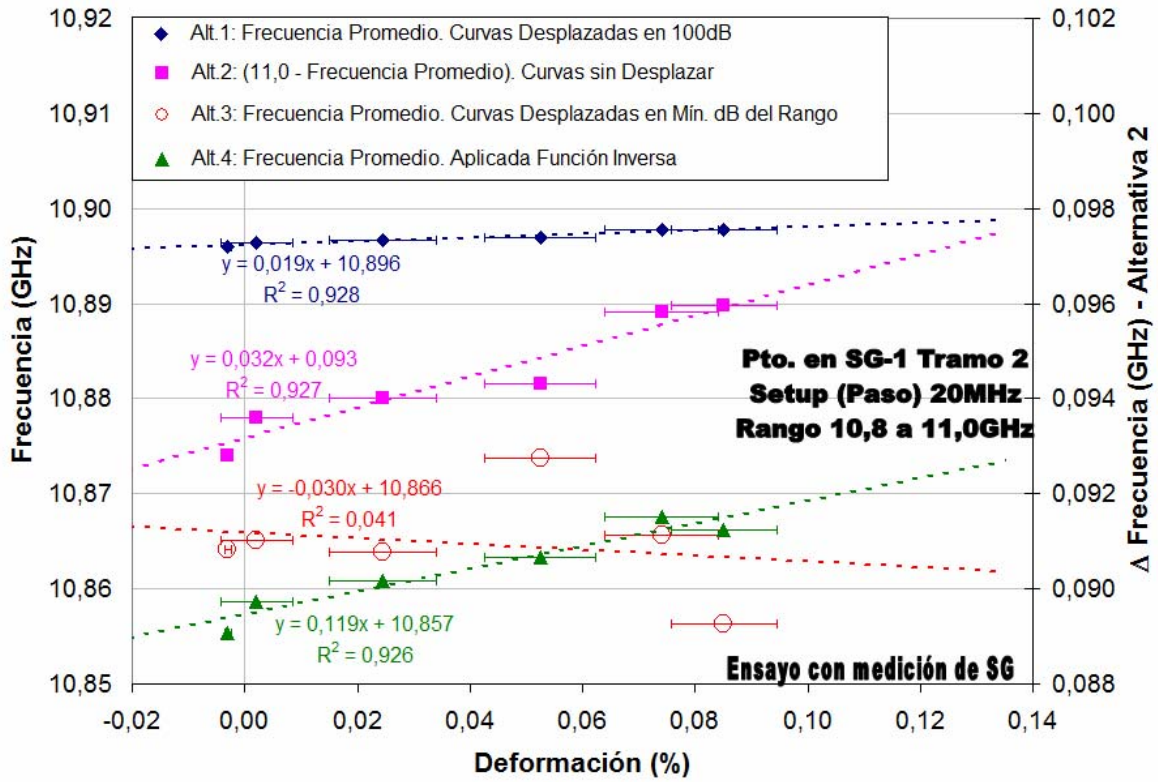


Fig. 5.120: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-1 Tramo 2, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

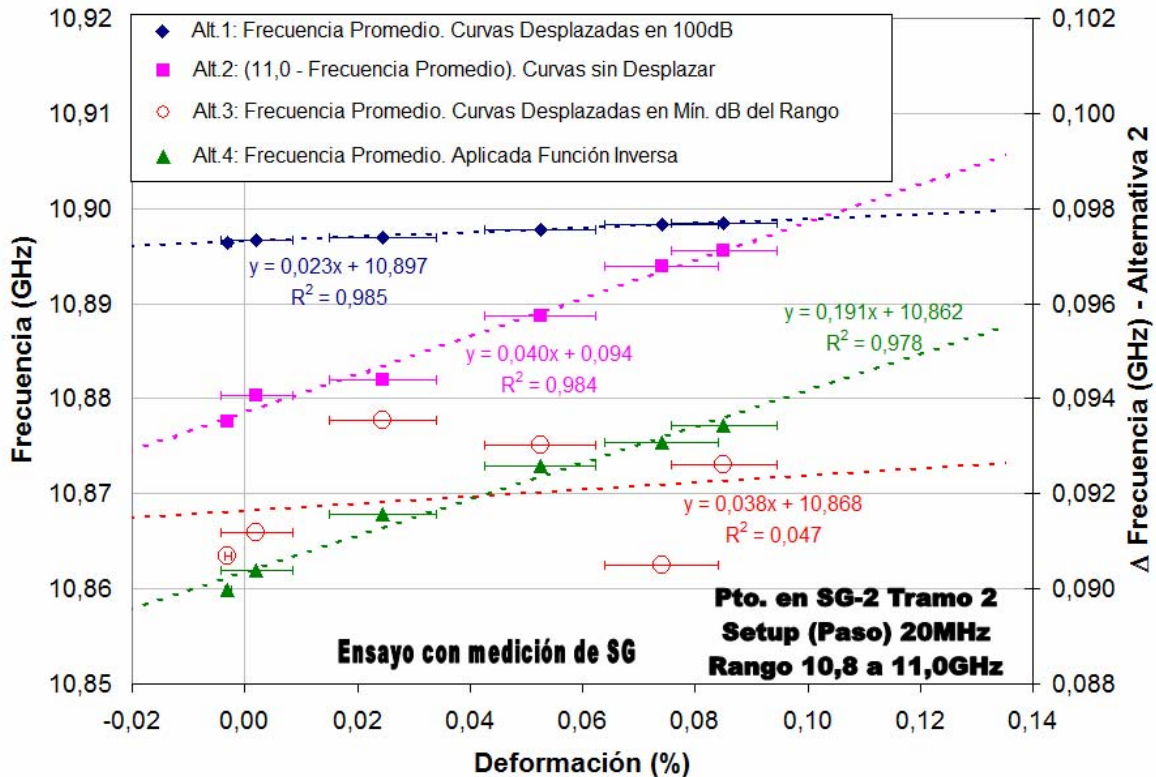


Fig. 5.121: Ensayo AR 08-sep-2008 (en terreno, tipo zona anclada en resina). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-2 Tramo 2, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

De las figuras recién mostradas, es posible apreciar que la alternativa 4 muestra buen desempeño al considerar distintas ubicaciones a lo largo de la fibra sensora en el perno. De esta forma, para las nuevas ubicaciones, contiguas a los strain gages, los resultados muestran correlaciones bastante aceptables, manteniendo en cada caso coeficientes de correlación cercanos a 1. Puede observarse además, que esta alternativa muestra variaciones al pasar del tramo 1 al 2, disminuyendo las pendientes de las regresiones lineales trazadas en los datos y la calidad de las correlaciones, mientras más cercano se esté del final del tramo 2 de fibra. Las alternativas 1 y 2, a pesar de mantener también correlaciones aceptables, son menos confiables por las razones explicadas anteriormente.

A continuación se analiza en tablas para cada alternativa los resultados mostrados en las figuras de ensayos tipo AR. Como podrá apreciarse, además de los puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2, en este caso también se observará la aparición de los puntos

contiguos a los strain gages y se indica su respectivo tramo. Por ejemplo, la ubicación contigua al *strain gage 1* en el *tramo 2*, se denota SG-1 T2.

Tabla 5.92: Ensayos tipo AR – Alternativa 1. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).

Parámetro		Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pend. (GHz/%)	Máx.	0,034	1+10cm, SG-2 T1	20	AR 08-sep-2008	56%	28%
	Mín.	0,015	SG-1 T2	20	AR 22-ago-2008		
Coef. (GHz)	Máx.	10,897	1*, 1+5cm, 1+10cm, SG-1 T1, SG-2 T1	10, 20	AR 22-ago-2008	0,02%	
			1, 1+5cm, 1+10cm, 2, SG-1 T1, SG-2 T1, SG-2 T2	10, 20	AR 08-sep-2008		
	Mín.	10,895	SG-1 T2	10	AR 22-ago-2008 AR 08-sep-2008		

Tabla 5.93: Ensayo AR 22-ago-2008 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AR 22-ago-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	4,35%	4,35%
20MHz	25,81%	29,03%

Tabla 5.94: Ensayo AR 08-sep-2008 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AR 08-sep-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	12,00%	26,67%
20MHz	11,54%	23,53%

Tabla 5.95: Ensayos tipo AR – Alternativa 1. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	13%	21%

Tabla 5.96: Ensayos tipo AR – Alternativa 2. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).

Parámetro		Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pend. (GHz/%)	Máx.	0,062	1+10cm, SG-2 T1	20	AR 08-sep-2008	62,90%	33%
	Mín.	0,023	SG-1 T2	20	AR 22-ago-2008		
Coef. (GHz)	Máx.	0,095	1, 1+5cm*, 1+10cm*, SG-1 T1*, SG-2 T1*	10, 20	AR 08-sep-2008	3,16%	
	Mín.	0,092	2**, SG-1 T2***	20, 10	AR 22-ago-2008		

*: Sólo en ensayo AR 08-sep-2008 con paso 10MHz

** : Sólo en ensayo AR 22-ago-2008 con paso 20MHz

***: Sólo en ensayo AR 22-ago-2008 con paso 10MHz

Tabla 5.97: Ensayo AR 22-ago-2008 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AR 22-ago-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	2,50%	0,00%
20MHz	28,85%	25,00%

Tabla 5.98: Ensayo AR 08-sep-2008 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AR 08-sep-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	6,82%	25,45%
20MHz	16,67%	22,58%

Tabla 5.99: Ensayos tipo AR – Alternativa 2. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	14%	18%

Tabla 5.100: Ensayos tipo AR – Alternativa 3. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).

Parámetro		Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pend. (GHz/%)	Máx.	0,153	1	10	AR 08-sep-2008	125,49%	63%
	Mín.	-0,039	2	10	AR 22-ago-2008		
Coef. (GHz)	Máx.	10,880	SG-1 T1	10	AR 22-ago-2008	0,15%	
	Mín.	10,864	SG-2 T2	20	AR 22-ago-2008		

Tabla 5.101: Ensayo AR 22-ago-2008 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AR 22-ago-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	137,50%	70,09%
20MHz	41,67%	52,94%

Tabla 5.102: Ensayo AR 08-sep-2008 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AR 08-sep-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	88,24%	71,24%
20MHz	147,37%	116,67%

Tabla 5.103: Ensayos tipo AR – Alternativa 3. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	104%	78%

Tabla 5.104: Ensayos tipo AR – Alternativa 4. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).

Parámetro		Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pend. (GHz/%)	Máx.	0,259	1+10cm, SG-2 T1	20	AR 08-sep-2008	62,16%	31%
	Mín.	0,098	SG-1 T2	20	AR 22-ago-2008		
Coef. (GHz)	Máx.	10,872	1, 1+5cm, 1+10cm, SG-1 T1, SG-2 T1	10	AR 08-sep-2008	0,17%	
	Mín.	10,854	SG-1 T2	10, 20	AR 22-ago-2008		

Tabla 5.105: Ensayo AR 22-ago-2008 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AR 22-ago-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	27,36%	8,96%
20MHz	38,29%	14,41%

Tabla 5.106: Ensayo AR 08-sep-2008 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AR 08-sep-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	16,35%	18,11%
20MHz	22,98%	4,25%

Tabla 5.107: Ensayos tipo AR – Alternativa 4. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	26%	11%

De las tablas mostradas para los ensayos tipo AR, se observa un comportamiento distinto al observado en ensayos anteriores, ya que en este caso las alternativas 1 y 2 presentan gran estabilidad de sus parámetros, mostrando una variación promedio muy

similar a la alternativa 4 (31%) e incluso menor a ésta en el caso de la alternativa 1 (28%). Esto podría explicarse por el tipo de ensayo (zona anclada), de naturaleza distinta a los anteriores (ensayos L y B a tracción pura), esto sin tomar en consideración los ensayos AH por sus resultados de menor calidad y por poseer distintos métodos de instrumentación del perno de anclaje. Por otra parte, es posible observar una superioridad de la alternativa 4 en cuanto a estabilidad de las pendientes de las correlaciones en una vecindad del punto 1, presentando una variación promedio para ambos ensayos y pasos de frecuencia, de tan sólo un 11%. Las alternativas 1 y 2, muestran mayor estabilidad entre pendientes de los puntos 1 y 2.

A continuación, desde la *Fig. 5.122* a la *Fig. 5.137*, se muestran resultados asociados a los ensayos tipo AG (anclados con *grout*). Se observan correlaciones de menor calidad a las obtenidas para los ensayos tipo AR, sin embargo, éstas se consideran aún aceptables. La alternativa 4 muestra ser la de mejor desempeño, por razones similares a las explicadas anteriormente, además de mostrar gran estabilidad en las pendientes de las regresiones lineales trazadas sobre los datos en una vecindad del punto 1. En general, los valores de estas pendientes muestran una disminución respecto de las obtenidas en los ensayos tipo AR.

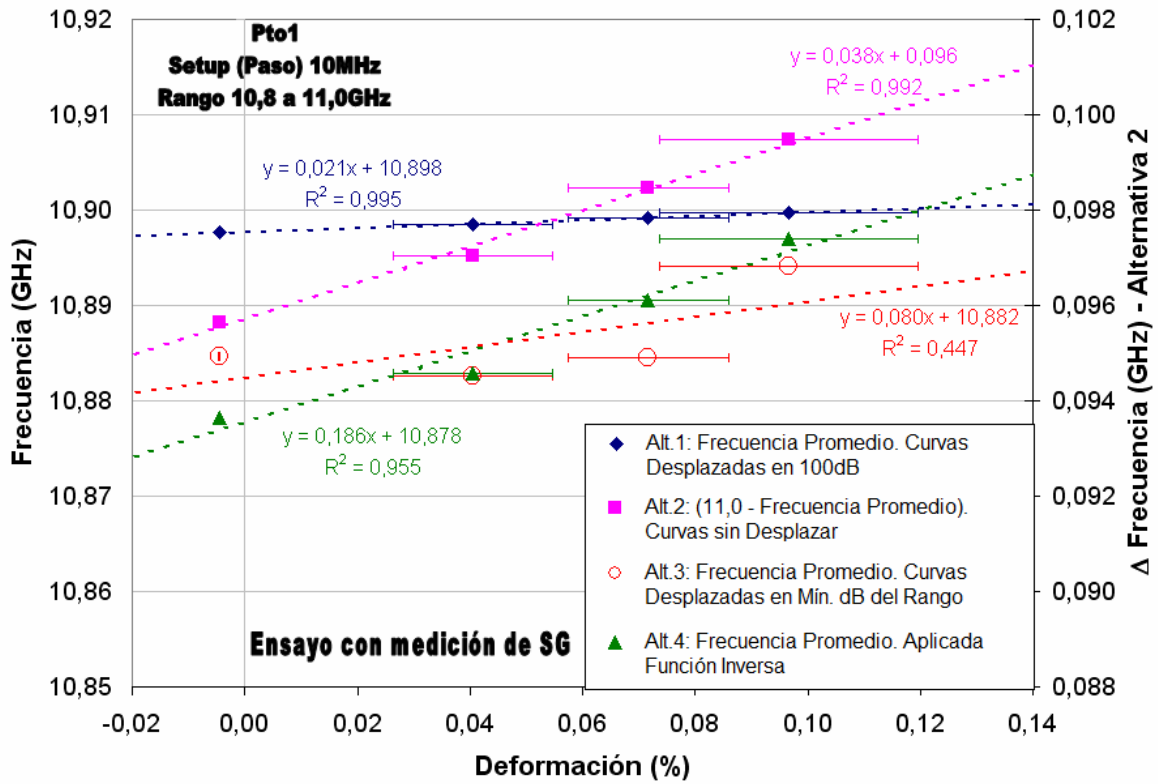


Fig. 5.122: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

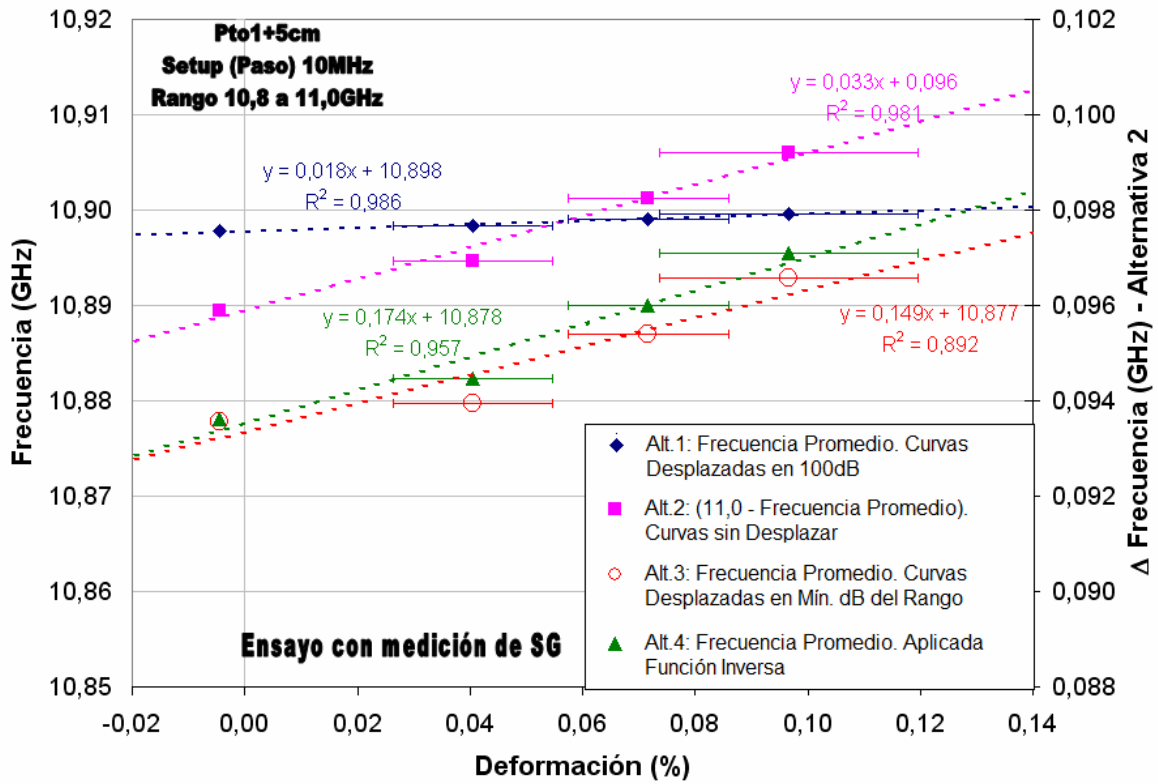


Fig. 5.123: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

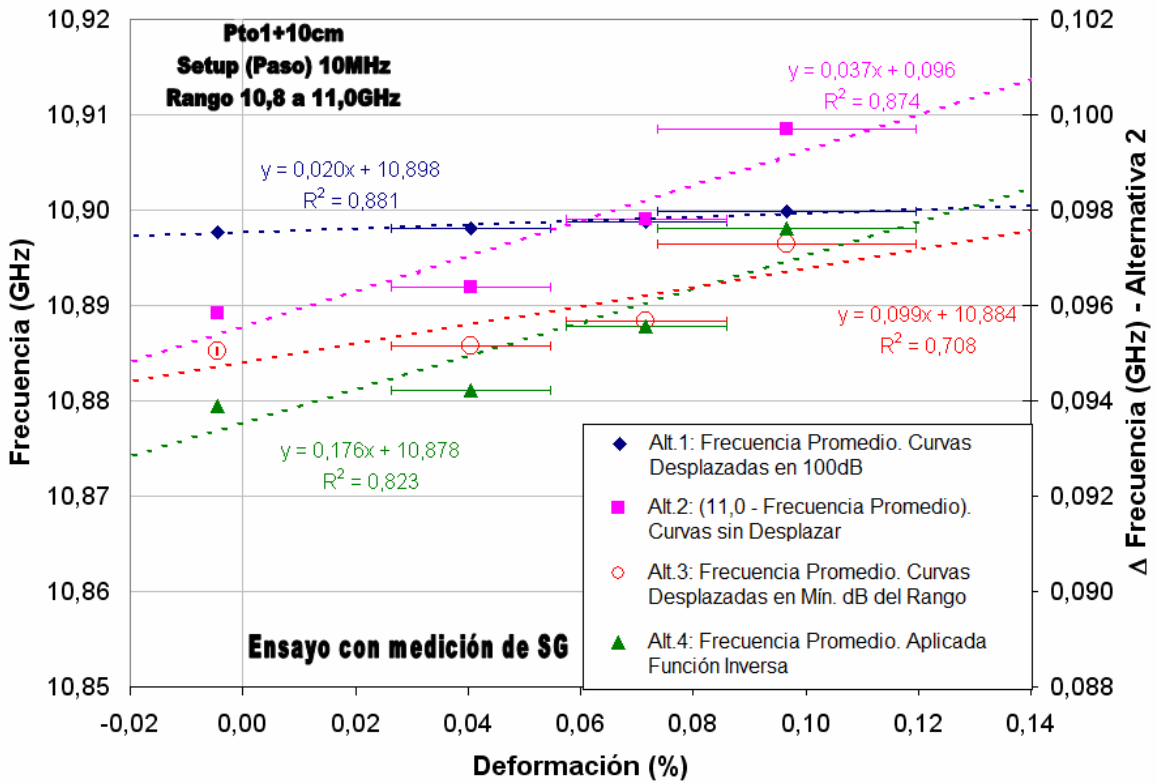


Fig. 5.124: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

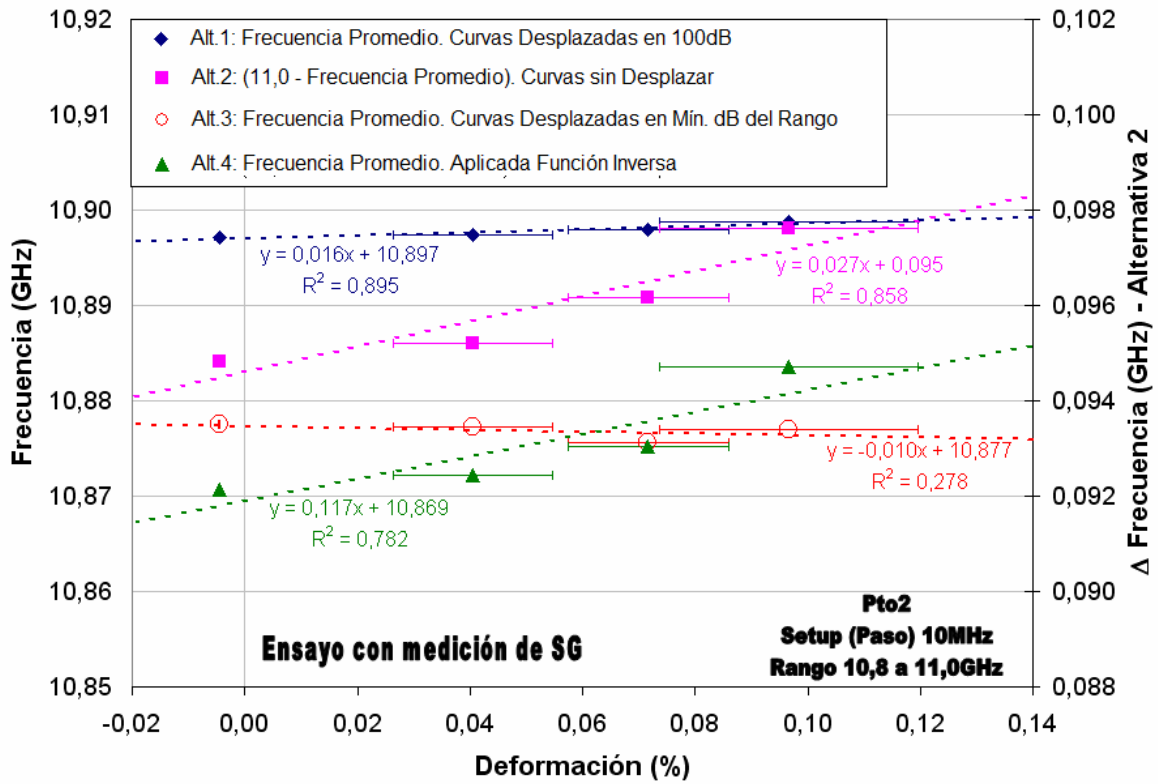


Fig. 5.125: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

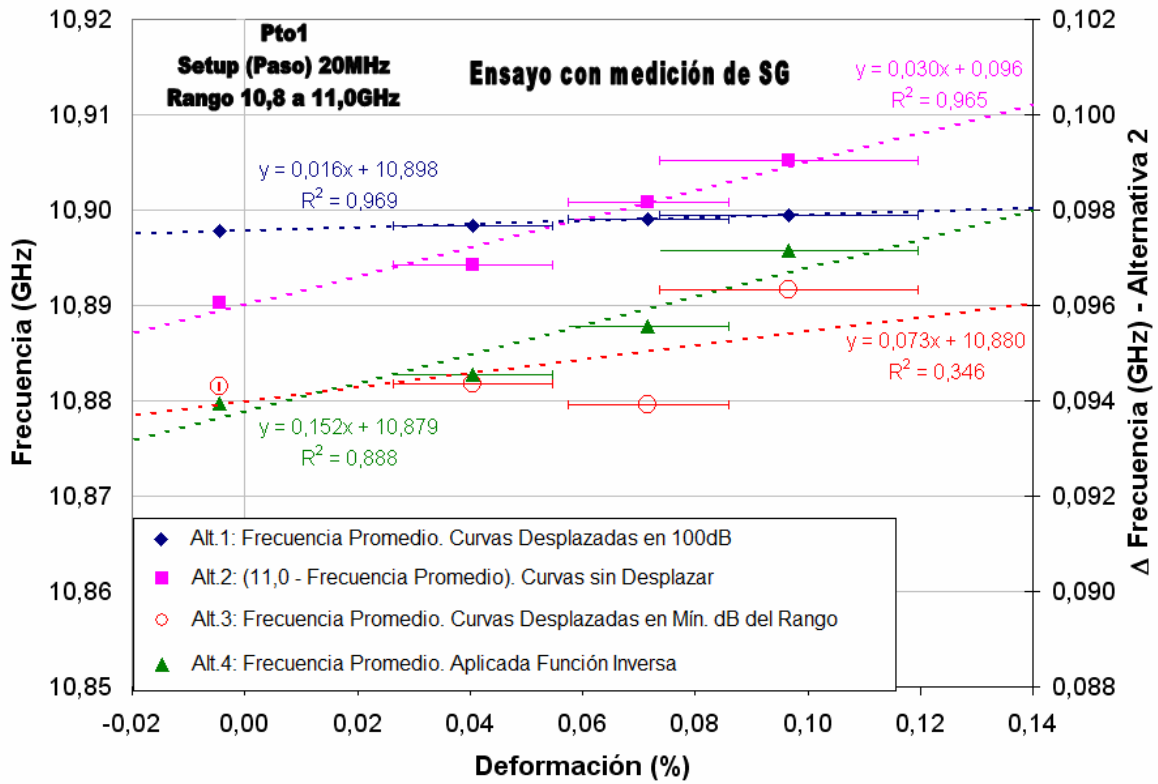


Fig. 5.126: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

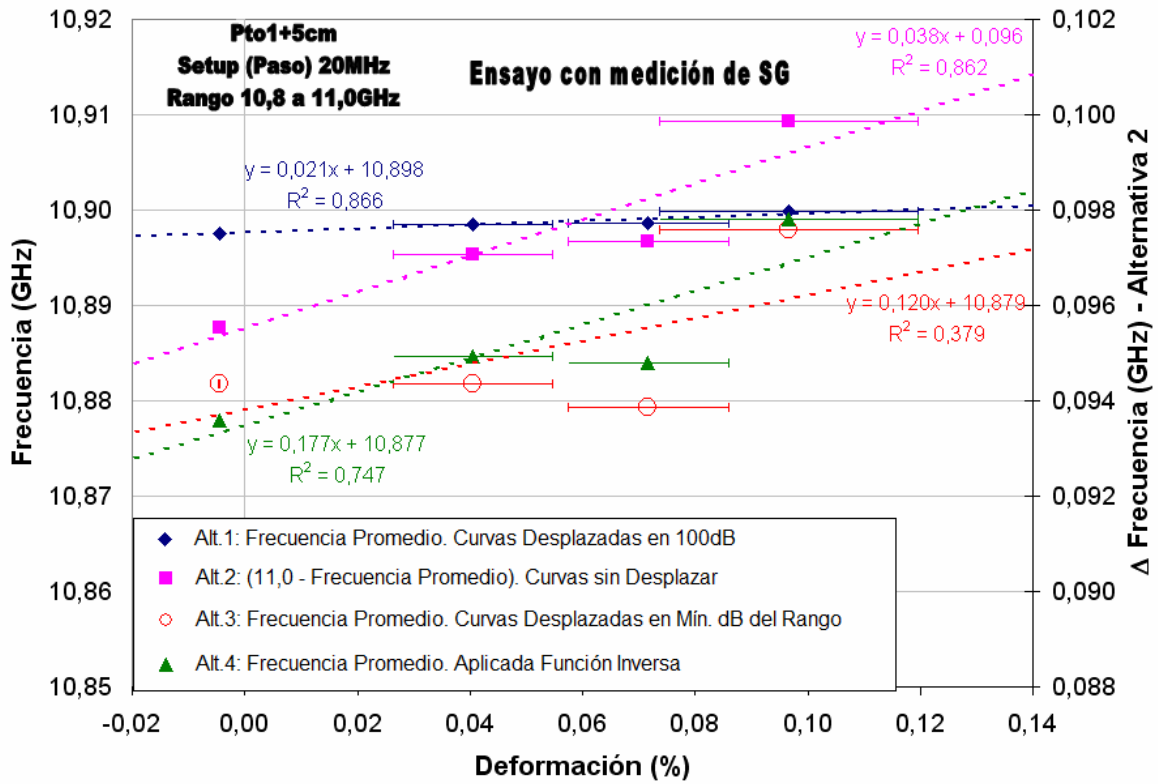


Fig. 5.127: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+5cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

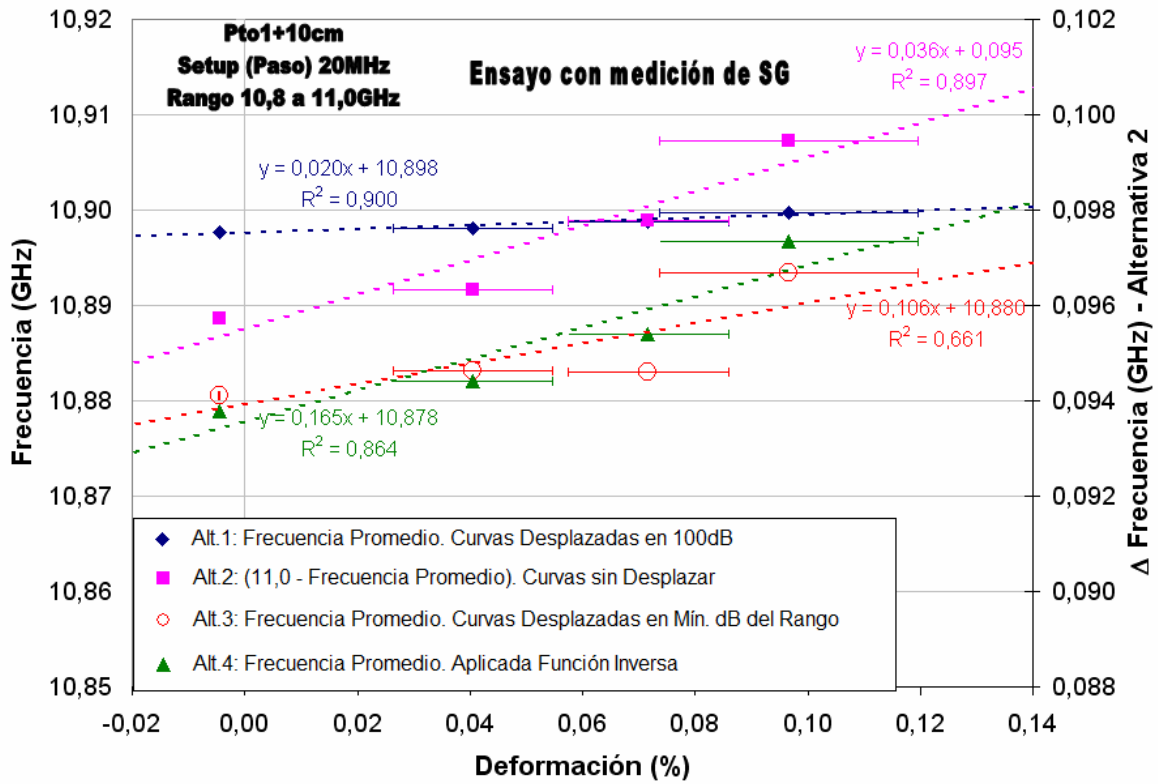


Fig. 5.128: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 1+10cm entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

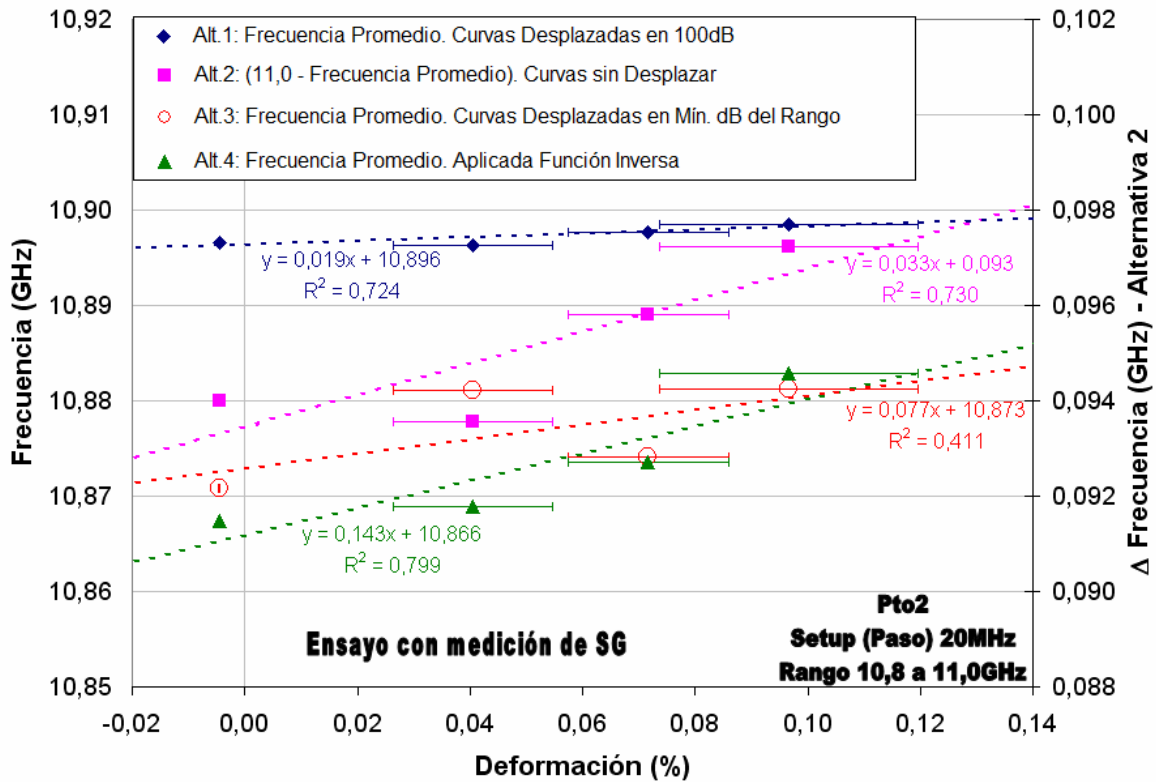


Fig. 5.129: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

En las figuras se puede observar una mayor influencia del paso con el cual se efectuó la medición, en comparación con lo observado para los ensayos tipo AR. De manera análoga a este tipo de ensayos, se presentan a continuación figuras asociadas a los puntos de observación adicionales definidos anteriormente, los cuales se encuentran ubicados en forma contigua a los strain gages instalados en los pernos de anclaje (ver Fig. 5.130 a la Fig. 5.133). En estas figuras se observa un comportamiento similar al obtenido en el tipo de ensayo anterior.

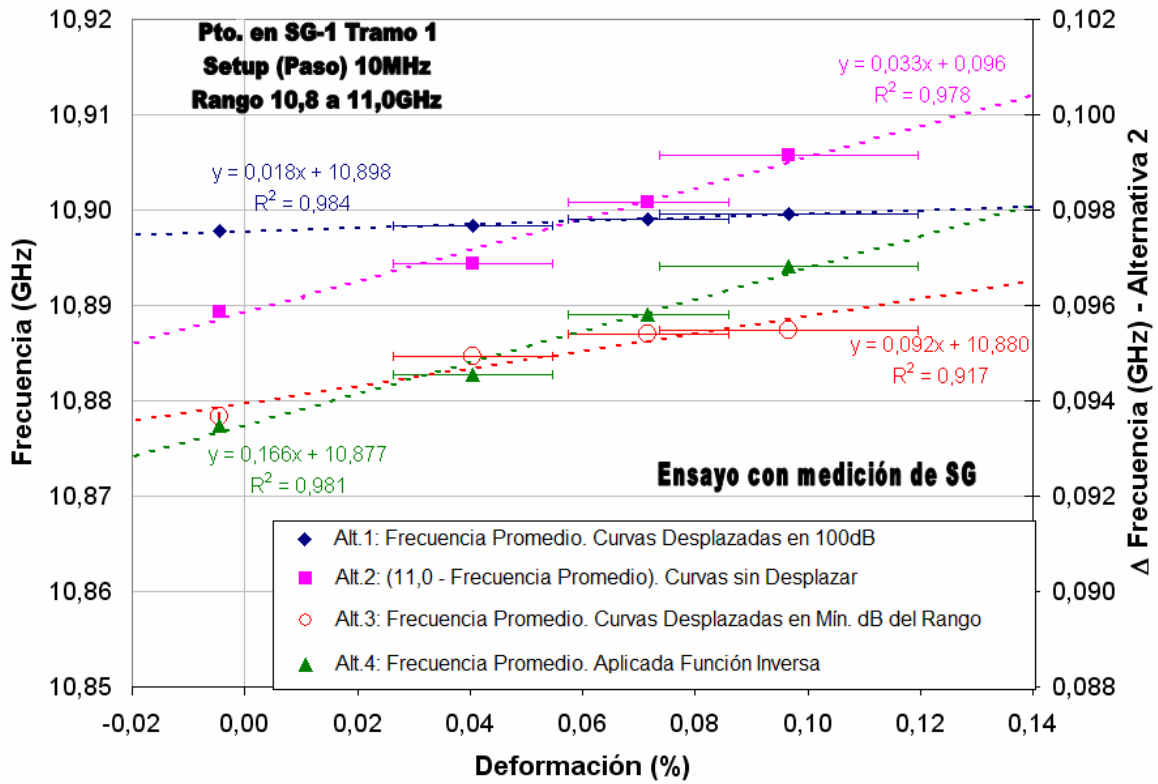


Fig. 5.130: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-1 Tramo 1, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

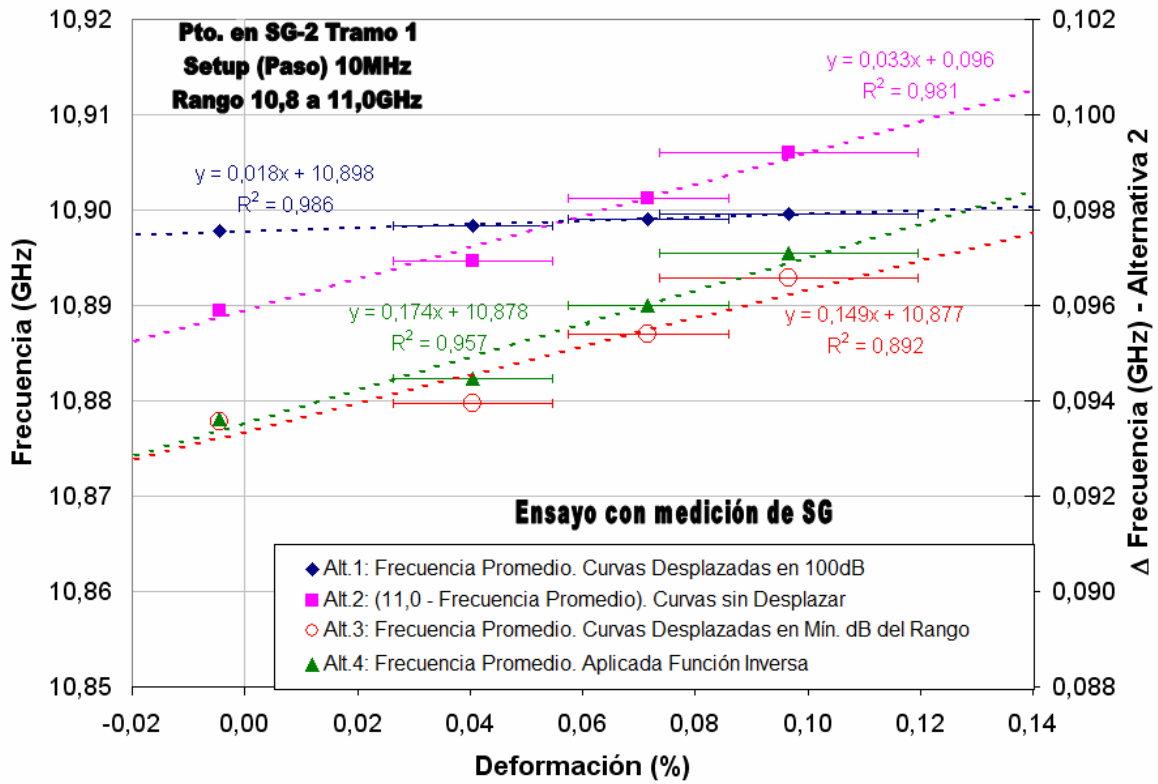


Fig. 5.131: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-2 Tramo 1, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

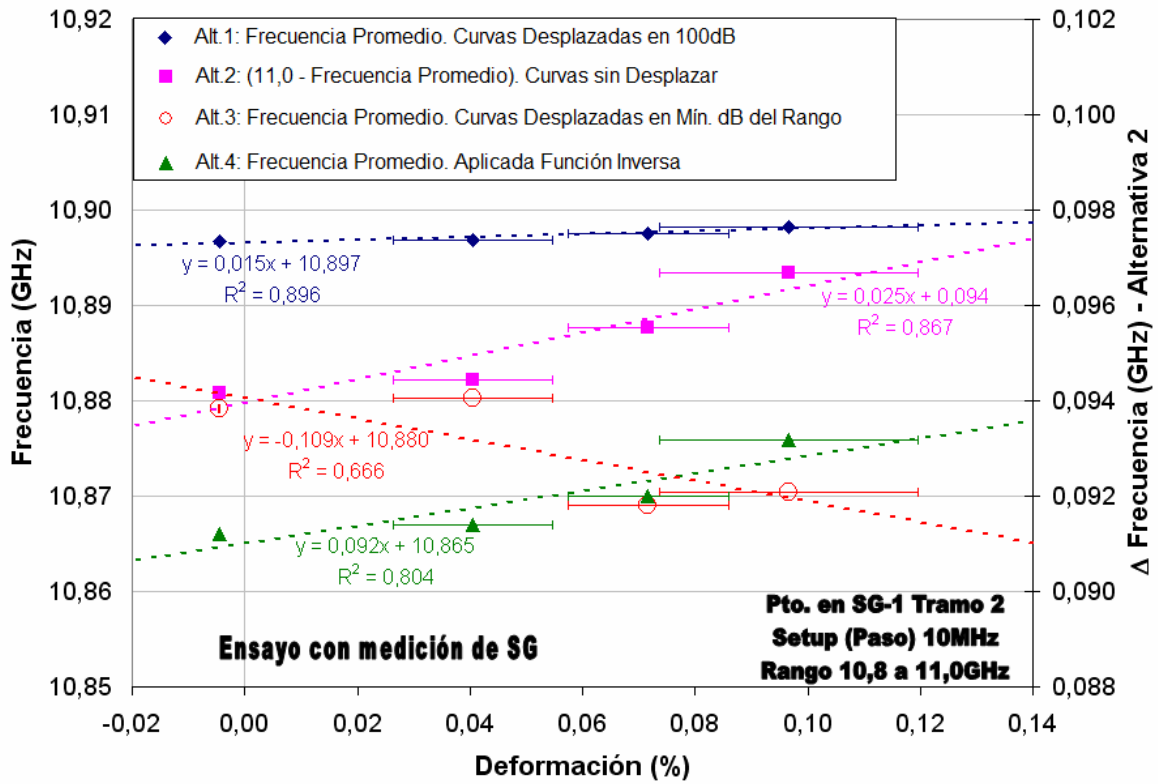


Fig. 5.132: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-1 Tramo 2, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

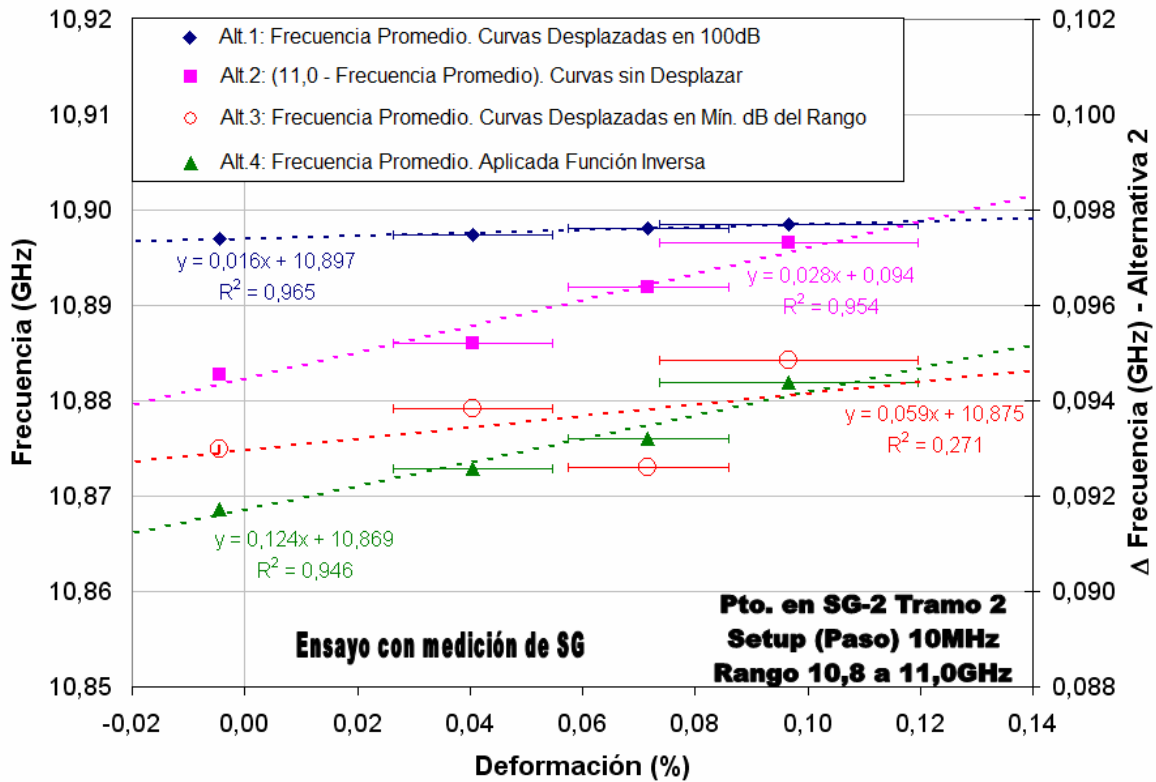


Fig. 5.133: Ensayo AG1 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en Punto en posición de SG-2 Tramo 2, entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

Los resultados del ensayo AG2 25-nov-2008 (ver Fig. 5.134 a la Fig. 5.137), muestran ser de menor calidad que los de su símil AG1, produciéndose en la mayoría de los casos, una disminución del coeficiente de correlación y de las pedientes de las regresiones lineales asociadas. Una de las razones que explican la menor calidad en los resultados en este caso, puede ser el haber utilizado resultados de deformación de strain gages obtenidos en otro ensayo.

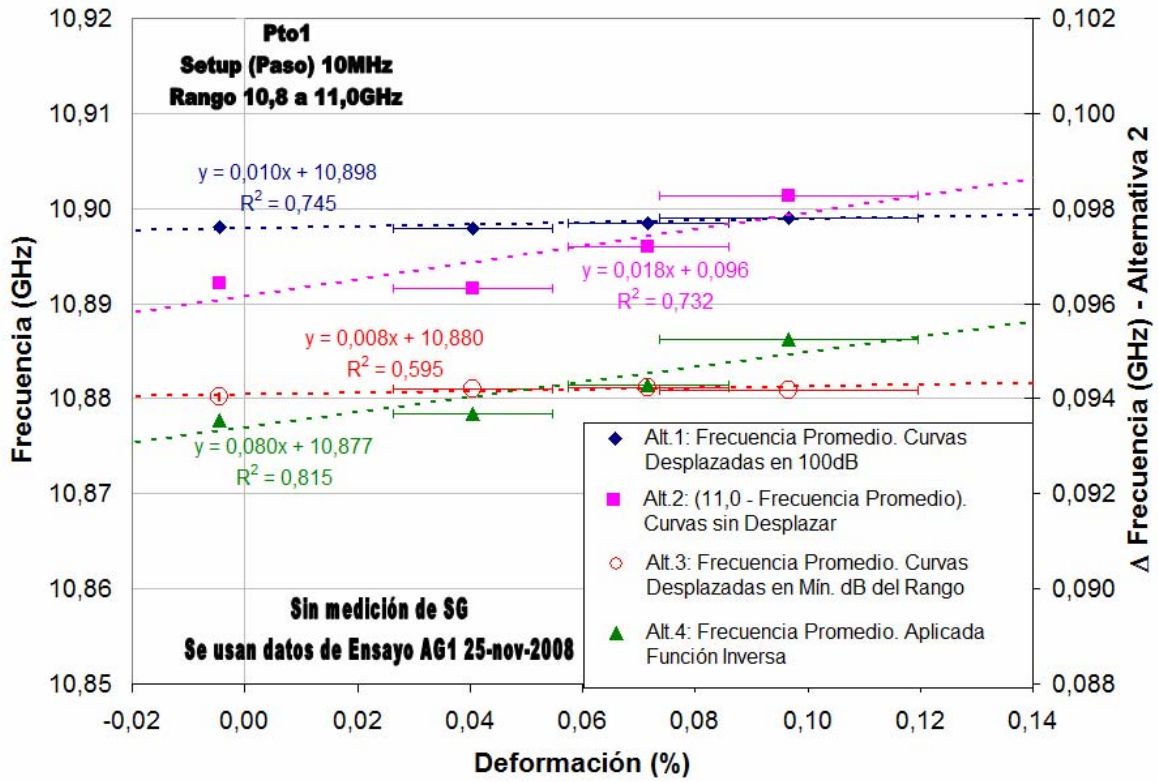


Fig. 5.134: Ensayo AG2 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

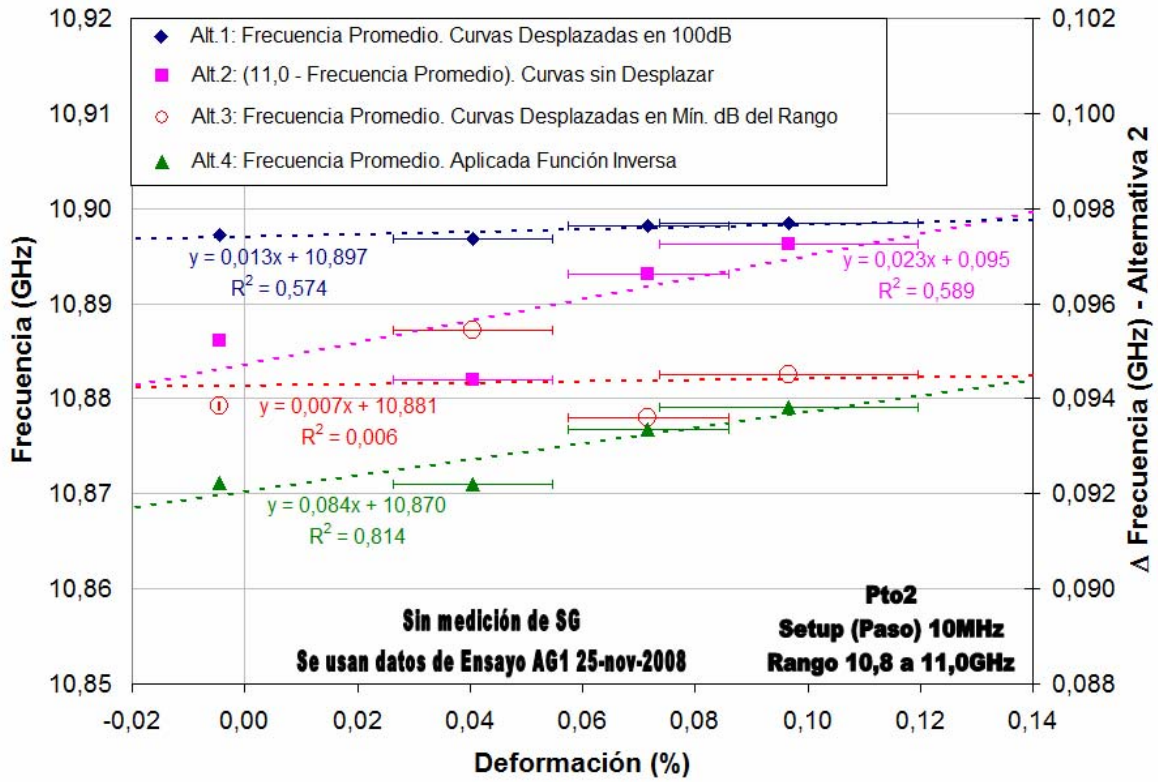


Fig. 5.135: Ensayo AG2 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 10MHz.

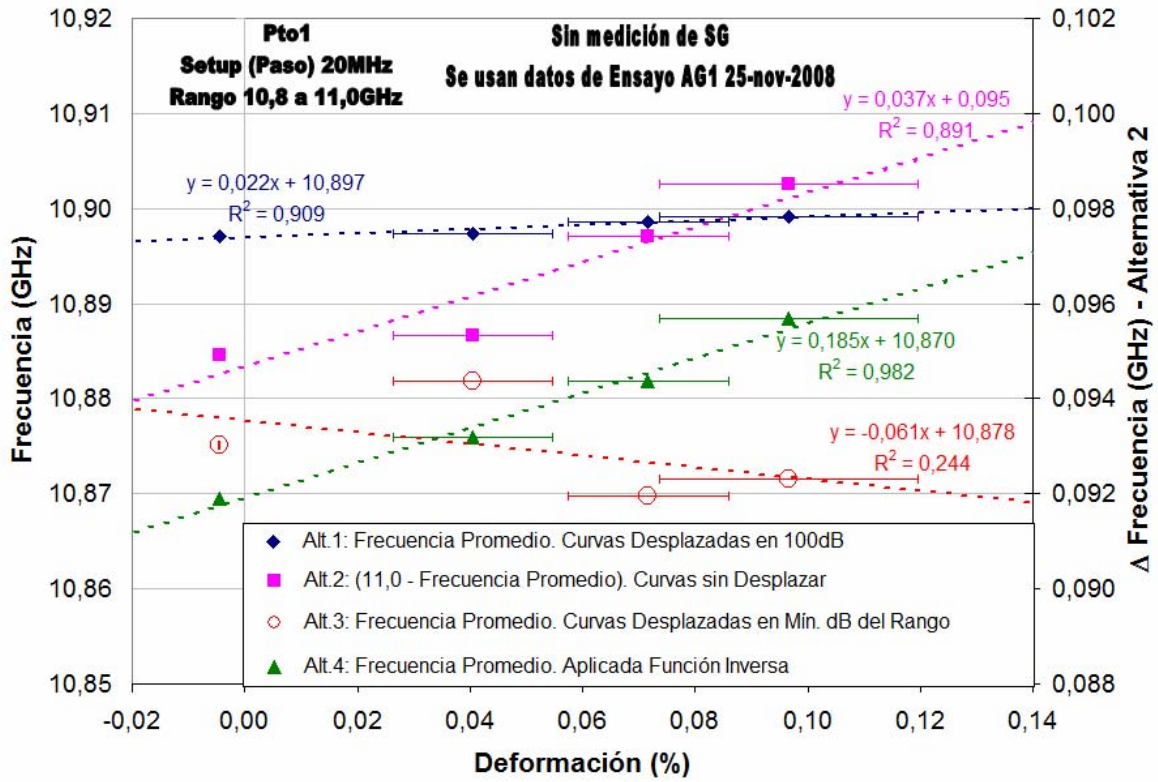


Fig. 5.136: Ensayo AG2 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

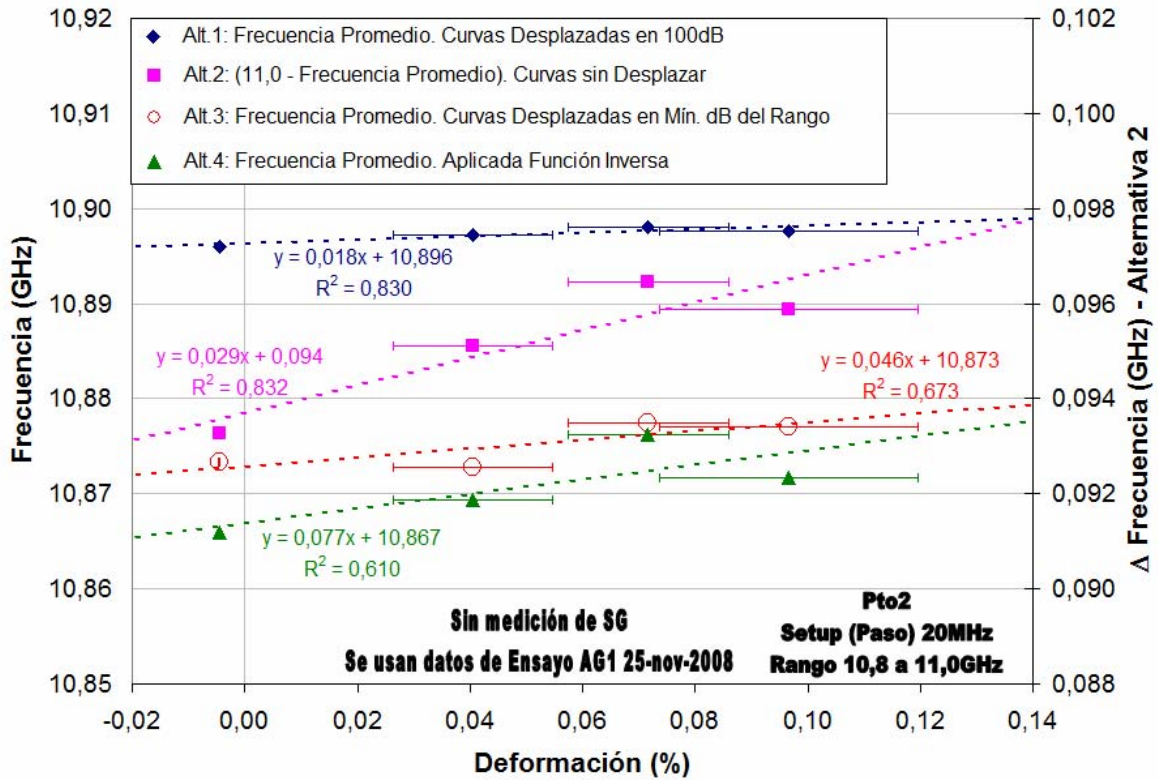


Fig. 5.137: Ensayo AG2 25-nov-2008 (en terreno, tipo zona anclada en grout). Correlaciones obtenidas en el Punto 2 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages. Setup en 20MHz.

La estabilidad de parámetros en las correlaciones obtenidas para los ensayos tipo AG, según las distintas alternativas, se analiza desde la *Tabla 5.108* a la *Tabla 5.123*.

Tabla 5.108: Ensayos tipo AG – Alternativa 1. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AG (en terreno, tipo zona anclada en grout).

Parámetro		Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pend. (GHz/%)	Máx.	0,038	SG-2 T1	20	AG2 25-nov-2008	78,95%	39%
	Mín.	0,008	1+10cm*, SG-1 T1**, SG-1 T2	10, 20	AG2 25-nov-2008		
Coef. (GHz)	Máx.	10,898	1, 1+5cm, 1+10cm, SG-1 T1, SG-2 T1	10, 20	AG1 25-nov-2008	0,03%	
			1**, 1+10cm**, SG-1 T1, SG-2 T1**	10, 20	AG2 25-nov-2008		
	Mín.	10,895	SG-1 T2	20	AG1 25-nov-2008		

*: Sólo en ensayo AG2 25-nov-2008 con paso 20MHz

** : Sólo en ensayo AG2 25-nov-2008 con paso 10MHz

Tabla 5.109: Ensayo AG1 25-nov-2008 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AG1 25-nov-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	23,81%	14,29%
20MHz	15,79%	23,81%

Tabla 5.110: Ensayo AG2 25-nov-2008 – Alternativa 1. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AG2 25-nov-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	23,08%	50,00%
20MHz	18,18%	63,64%

Tabla 5.111: Ensayos tipo AG – Alternativa 1. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	20%	38%

Tabla 5.112: Ensayos tipo AG – Alternativa 2. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AG (en terreno, tipo zona anclada en grout).

Parámetro		Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pend. (GHz/%)	Máx.	0,062	SG-2 T1	20	AG2 25-nov-2008	79,03%	42%
	Mín.	0,013	SG-1 T2	10, 20	AG2 25-nov-2008		
Coef. (GHz)	Máx.	0,096	1, 1+5cm, 1+10cm*, SG-1 T1, SG-2 T1	10, 20	AG1 25-nov-2008	4,17%	
			1**, 1+5cm***, 1+10cm, SG-1 T1, SG-2 T1**	10, 20	AG2 25-nov-2008		
	Mín.	0,092	SG-1 T2	20	AG1 25-nov-2008		

*: Sólo en ensayo AG1 25-nov-2008 con paso 10MHz

** : Sólo en ensayo AG2 25-nov-2008 con paso 10MHz

***: Sólo en ensayo AG2 25-nov-2008 con paso 20MHz

Tabla 5.113: Ensayo AG1 25-nov-2008 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AG1 25-nov-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	28,95%	13,16%
20MHz	9,09%	21,05%

Tabla 5.114: Ensayo AG2 25-nov-2008 – Alternativa 2. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AG2 25-nov-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	21,74%	51,61%
20MHz	21,62%	59,46%

Tabla 5.115: Ensayos tipo AG – Alternativa 2. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	20%	36%

Tabla 5.116: Ensayos tipo AG – Alternativa 3. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AG (en terreno, tipo zona anclada en grout).

Parámetro		Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pend. (GHz/%)	Máx.	0,149	1+5cm, SG-2 T1	10	AG1 25-nov-2008	242,95%	122%
	Mín.	-0,213	SG-2 T2	20	AG2 25-nov-2008		
Coef. (GHz)	Máx.	10,887	1+5cm	10	AG2 25-nov-2008	0,13%	
	Mín.	10,873	2, SG-1 T2 2, SG-1 T2	20 20	AG1 25-nov-2008 AG2 25-nov-2008		

Tabla 5.117: Ensayo AG1 25-nov-2008 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AG1 25-nov-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	112,50%	46,31%
20MHz	5,19%	39,17%

Tabla 5.118: Ensayo AG2 25-nov-2008 – Alternativa 3. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AG2 25-nov-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	12,50%	146,25%
20MHz	175,41%	163,01%

Tabla 5.119: Ensayos tipo AG – Alternativa 3. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	76%	99%

Tabla 5.120: Ensayos tipo AG – Alternativa 4. Estabilidad de parámetros en correlaciones de ensayos tipo AG (en terreno, tipo zona anclada en grout).

Parámetro		Valor	Ocurre en Punto	Con paso (MHz)	Ensayo	Variación (%)	Variación Prom. Pond. (%)
Pend. (GHz/%)	Máx.	0,186	1	10	AG1 25-nov-2008	83,87%	42%
	Mín.	0,030	SG-1 T2	10	AG2 25-nov-2008		
Coef. (GHz)	Máx.	10,879	1	20	AG1 25-nov-2008	0,17%	
	Mín.	10,861	SG-1 T2	20	AG1 25-nov-2008		

Tabla 5.121: Ensayo AG1 25-nov-2008 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AG1 25-nov-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	37,10%	6,45%
20MHz	5,92%	14,12%

Tabla 5.122: Ensayo AG2 25-nov-2008 – Alternativa 4. Estabilidad de la pendiente en correlaciones de ensayo AG2 25-nov-2008.

Paso	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
10MHz	4,76%	42,59%
20MHz	58,38%	56,22%

Tabla 5.123: Ensayos tipo AG – Alternativa 4. Estabilidad promedio de la pendiente en correlaciones entre ensayos tipo AR (en terreno, tipo zona anclada en resina).

	Variación de la pendiente (%)	
	Entre Pto.1 y 2	Entre vecindad Pto.1
Promedio ambos ensayos	27%	30%

En los ensayos tipo AG, es posible observar un comportamiento similar al presentado en los ensayos tipo AR. Sin embargo, las correlaciones obtenidas son de menor calidad que las obtenidas que este último tipo de ensayos. Esto puede explicarse, en parte, por los datos de strain gages obtenidos, donde en el caso de ensayos AG estos

entregan mediciones de mayor variación. Las alternativas 1 y 2 muestran buena estabilidad en sus parámetros, alcanzando una variación promedio de estos muy similar a la alternativa 4 (42%) e incluso menor a esta en el caso de la alternativa 1 (39%). Al igual que en los ensayos AR, este comportamiento puede explicarse por el tipo de ensayo, de naturaleza distinta a los de tracción pura como los ensayos L y B; esto sin tomar en consideración los ensayos AH por sus resultados de menor calidad y por poseer distintos métodos de instrumentación del perno de anclaje. Por otra parte, es posible observar una superioridad de la alternativa 4 en cuanto a estabilidad de las pendientes de las correlaciones en una vecindad del punto 1, presentando una variación promedio para ambos ensayos y pasos de frecuencia, de un 30%. Las alternativas 1 y 2 muestran mayor estabilidad entre pendientes de los puntos 1 y 2.

En forma resumida, los resultados presentados hasta aquí, muestran tendencias y correlaciones bastante aceptables en el caso de *ensayos en laboratorio* (L), según las cuatro alternativas usadas. En cada una de ellas, se obtienen coeficientes de correlación cercanos a 1. Los *ensayos tipo falla bloque* (B) muestran resultados de mayor aleatoriedad, siendo posible observar tendencias aceptables en menor cantidad de casos, sin mostrar una supremacía clara de alguna de las alternativas. Por otra parte, los resultados de *ensayos tipo zona anclada* (A) son satisfactorios sólo en el caso del anclaje en *resina epóxica* (AR) y *grout* (AG).

5.4.4. Bandas de correlaciones ensayos tipo A (AH, AR y AG)

Con las correlaciones mostradas, y mientras se cuente con mayor cantidad de resultados, es posible confeccionar figuras como las mostradas a continuación (Fig. 5.138 a Fig. 5.140), donde se define una banda de posibles correlaciones. Las figuras agrupan sólo correlaciones de los ensayos tipo A (AH, AR y AG), las que resultan de mayor interés por representar la condición del perno instalado en la roca. Sin embargo, pueden confeccionarse también para las correlaciones obtenidas en ensayos tipo L o B. De esta forma, es posible estimar el nivel de deformación existente para una determinada frecuencia promedio calculada según las alternativas vistas. Por otra parte, se muestran sólo los datos asociados a un paso de 10MHz por presentar, en general, mejores

resultados que aquellos con paso de 20MHz. Esto podrá observarse con mayor detalle más adelante. Las figuras se confeccionaron con aquellas rectas que tienen valores altos del coeficiente de correlación lineal R^2 (valores mayores a 0,700). Se omite la figura correspondiente a la Alternativa 3 por existir muy pocos casos donde se cumple con el requisito planteado.

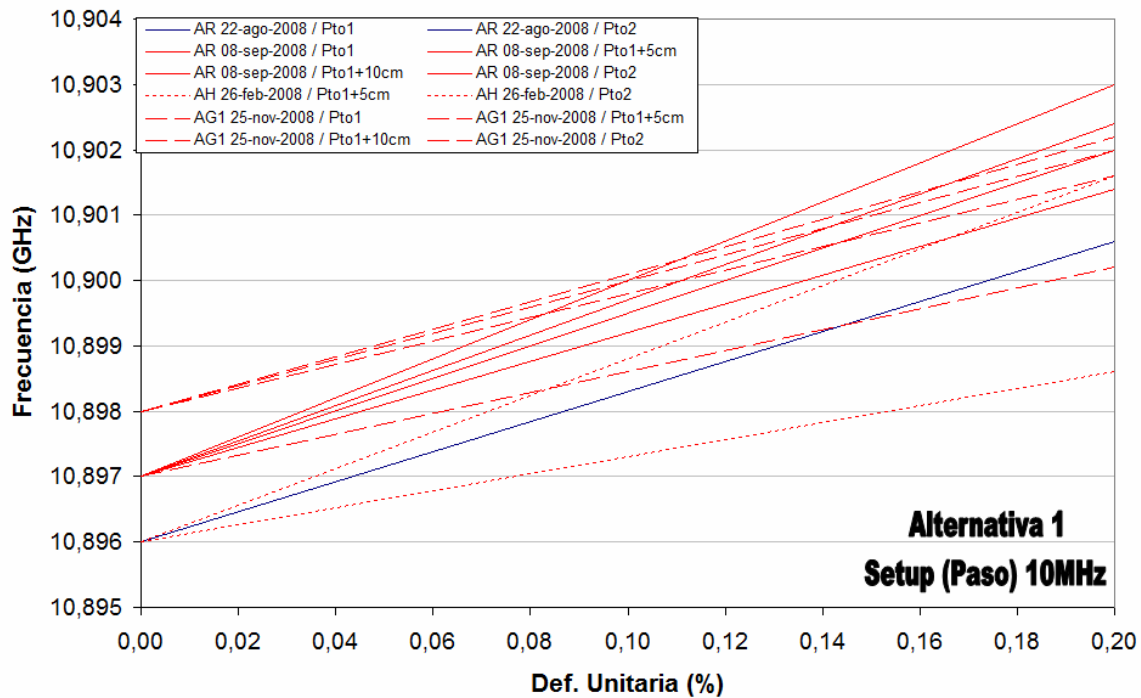


Fig. 5.138: Banda de Correlaciones de Frecuencias Promedio versus Deformación Unitaria asociada, según Alternativa 1. Ensayos tipo Zona Anclada (AH, AR y AG). Setup en 10MHz.

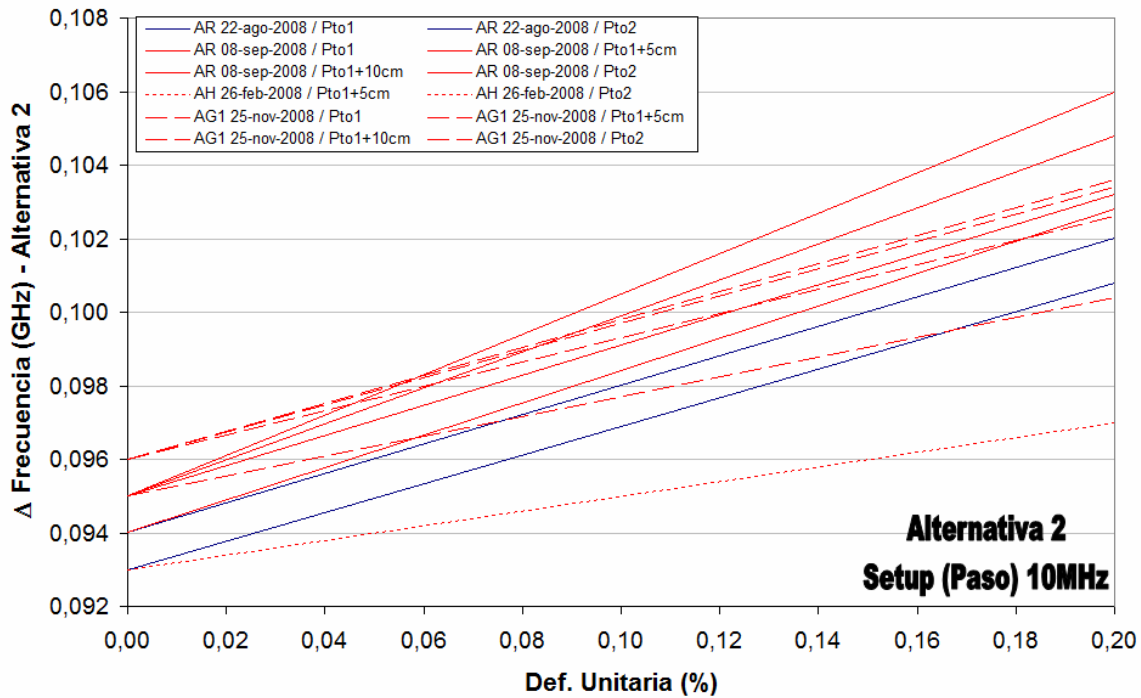


Fig. 5.139: Banda de Correlaciones de Frecuencias Promedio versus Deformación Unitaria asociada, según Alternativa 2. Ensayos tipo Zona Anclada (AH, AR y AG). Setup en 10MHz.

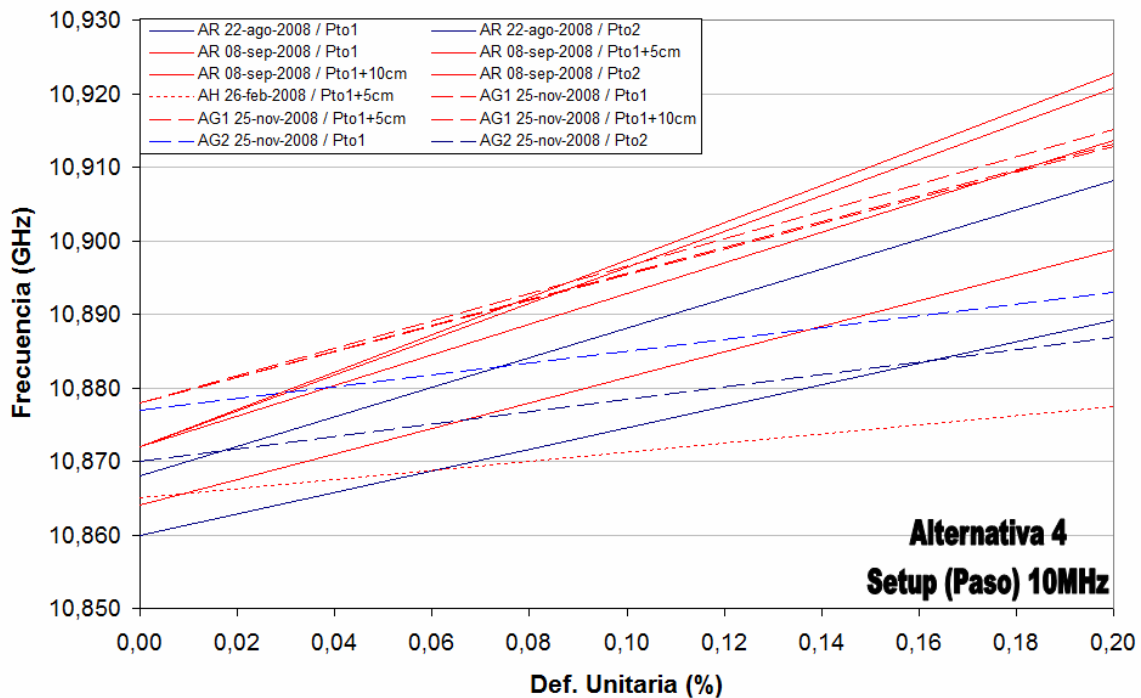


Fig. 5.140: Banda de Correlaciones de Frecuencias Promedio versus Deformación Unitaria asociada, según Alternativa 4. Ensayos tipo Zona Anclada (AH, AR y AG). Setup en 10MHz.

En las bandas de correlaciones mostradas (Fig. 5.138 a Fig. 5.140) es posible apreciar una desviación considerable de las rectas asociadas al ensayo AH 26-feb-2008, haciéndolas menos confiables que el resto de las rectas obtenidas.

Las bandas obtenidas para cada alternativa, pueden agruparse en una *línea promedio*, de tal forma de establecer una relación biunívoca entre la frecuencia promedio y la deformación unitaria asociada. La Fig. 5.141 a continuación, es idéntica a la Fig. 5.140 incorporando además la *línea promedio* deducida, la cual está determinada por los parámetros de la *Tabla 5.124*. El ejemplo mostrado corresponde a la Alternativa 4. Sin embargo, puede desarrollarse análogamente para el resto de las alternativas.

Tabla 5.124: Parámetros línea promedio sobre gráfico de bandas Alternativa 4, paso 10MHz.

Pendiente Promedio (GHz/%)	Coefficiente Promedio (GHz)
0,17	10,87

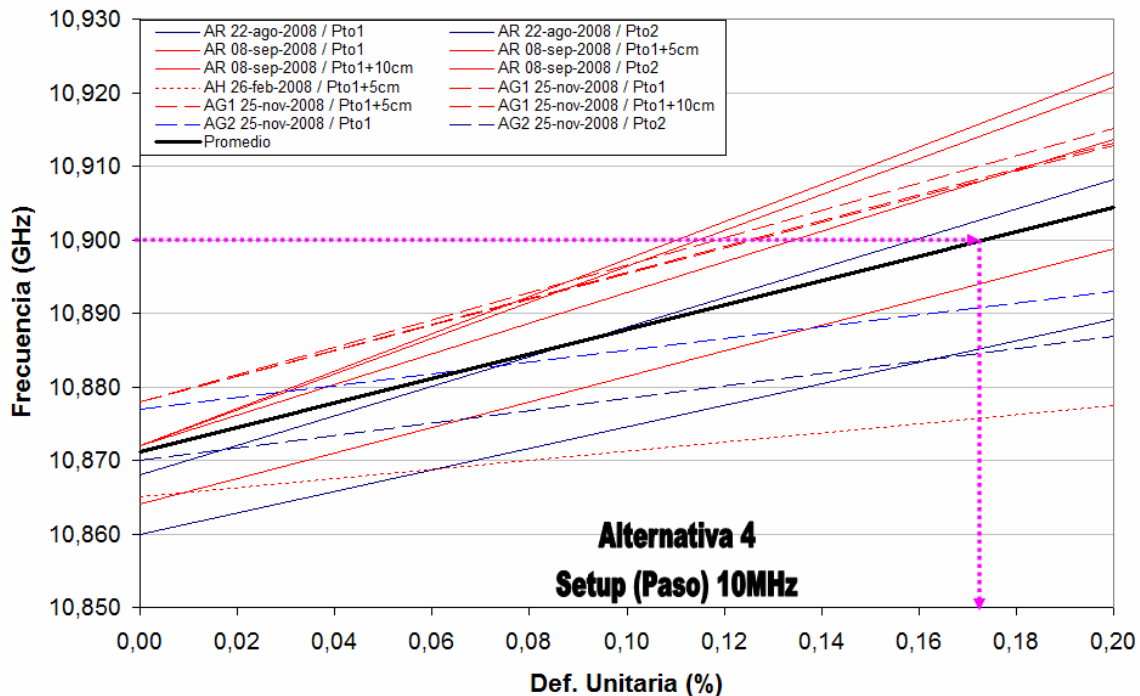


Fig. 5.141: Banda de Correlaciones y Línea Promedio versus Deformación Unitaria asociada, según Alternativa 4. Ensayos tipo Zona Anclada (AH, AR y AG). Setup en 10MHz.

Sobre la base de las deformaciones obtenidas durante los ensayos, es posible definir una deformación umbral de alarma de 0,2%. De esta forma, la *línea promedio* deducida en la Fig. 5.141, indica que una frecuencia promedio de 10,90GHz, presenta una deformación inferior a este umbral de alarma. Esta línea se puede utilizar además para confeccionar curvas carga versus deformación según el sistema BOTDR. Las frecuencias promedio, que fueron deducidas para cada nivel de carga en los ensayos, pueden ser ingresadas en la figura para calcular la deformación unitaria asociada. La Fig. 5.142 muestra un ejemplo de este procedimiento, evaluando para los distintos ensayos y sus respectivos niveles de carga, las frecuencias promedio obtenidas según la Alternativa 4 en el *Punto 1*. Todas las curvas muestran un aumento de la deformación con el aumento de cargas, coincidiendo con lo esperado. El ensayo AH 26-feb-2008 presenta una tendencia más errática y por lo tanto, menos confiable. El ensayo AG2 25-nov-2008 muestra una tendencia aceptable sólo hasta las 10 Tonf aproximadamente, presentando una caída de la frecuencia promedio obtenida y por lo tanto, de la deformación deducida, para el siguiente nivel de carga aplicado.

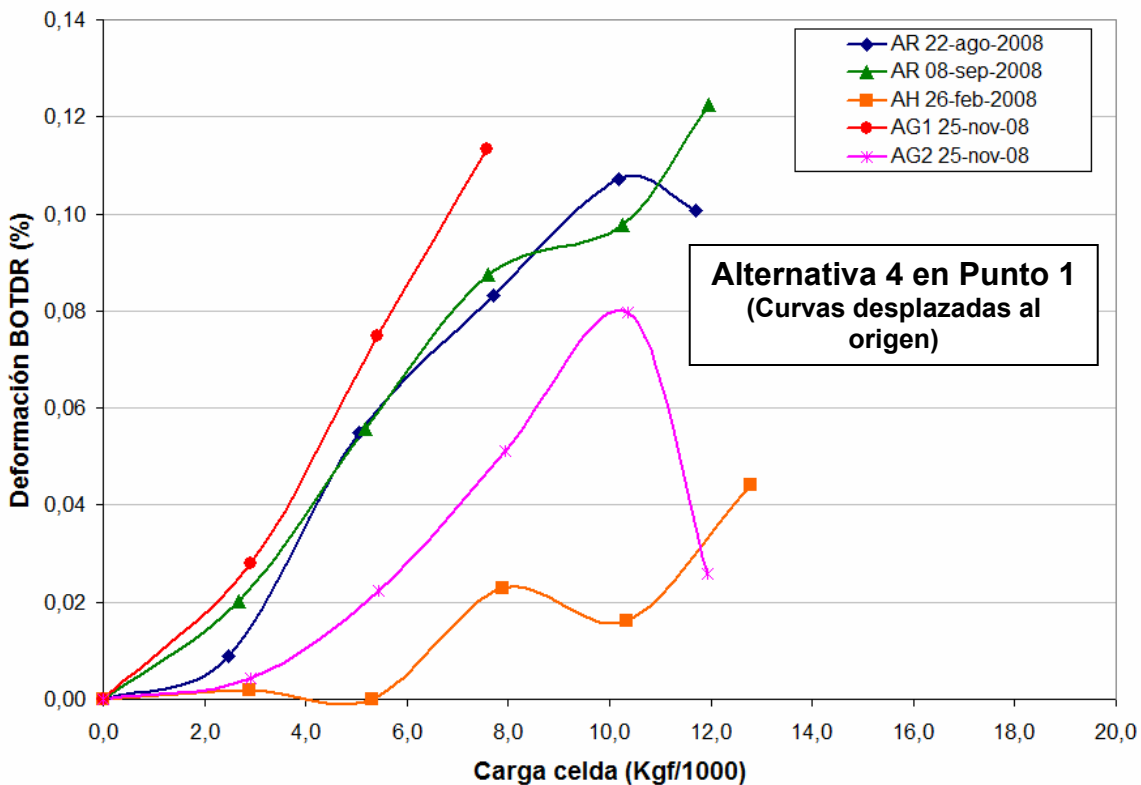


Fig. 5.142: Curvas deformación BOTDR versus carga según Alternativa 4. Ensayos tipo Zona Anclada (AH, AR y AG). Setup en 10MHz.

Como se mencionó anteriormente, puede desarrollarse el mismo procedimiento para cada una de las alternativas. La Fig. 5.143 presenta este resultado escogiendo uno de los ensayos mostrados en la figura anterior. Como puede apreciarse, la forma de las curvas resulta similar en las tres alternativas consideradas, siendo la alternativa 4 la que muestra mayor deformación para un mismo nivel de carga.

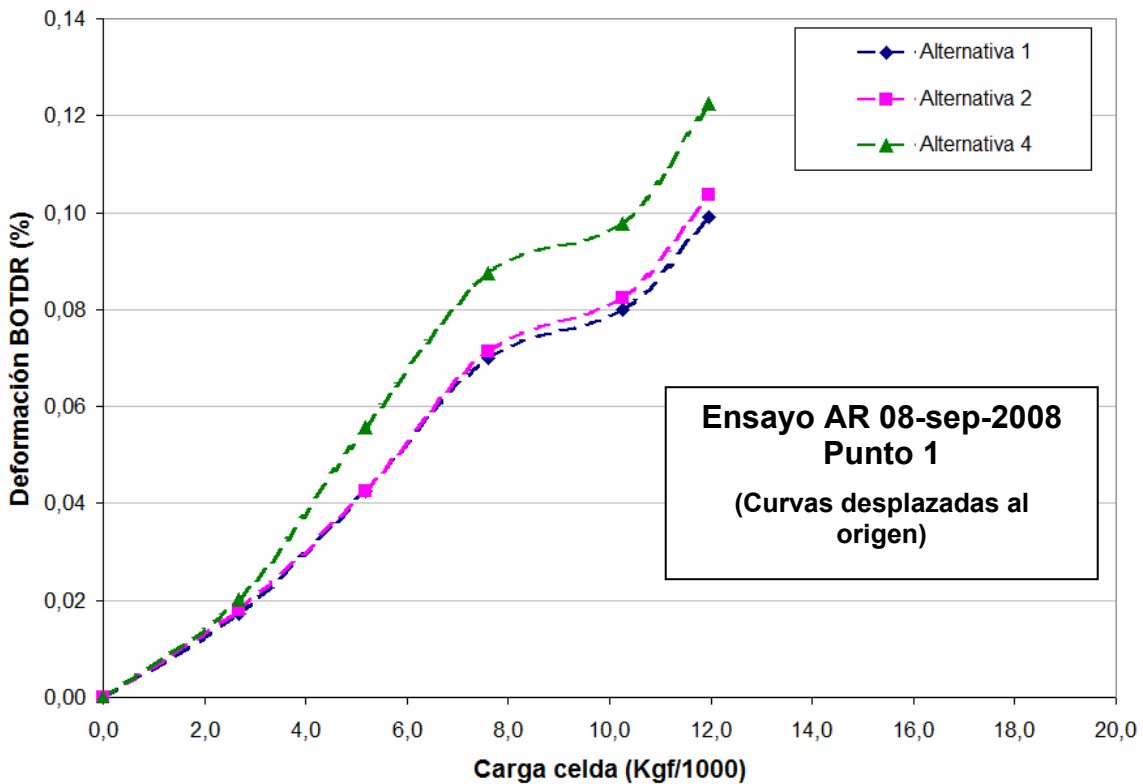


Fig. 5.143: Curvas deformación BOTDR versus carga para ensayo AR 08-sep-2008 según alternativas 1, 2 y 4. Setup en 10MHz.

Para un análisis más profundo de resultados, a continuación se presentan histogramas mostrando los cambios de pendientes de las regresiones lineales trazadas sobre los resultados de los ensayos (ver Fig. 5.144 a la Fig. 5.159). En estas figuras se indica además si se obtuvo o no la tendencia esperada de aumento monótono de

frecuencia promedio con el aumento de deformación (casos marcados con “Sí” y “No”, respectivamente).

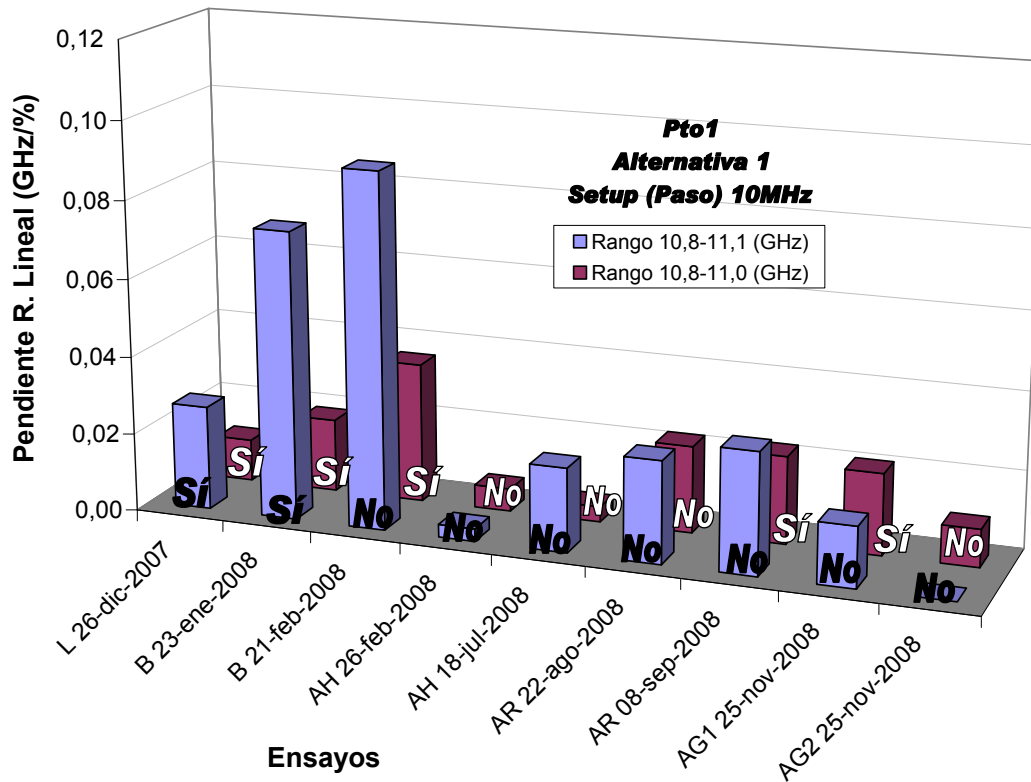


Fig. 5.144: Punto1- Alternativa 1. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 10MHz.

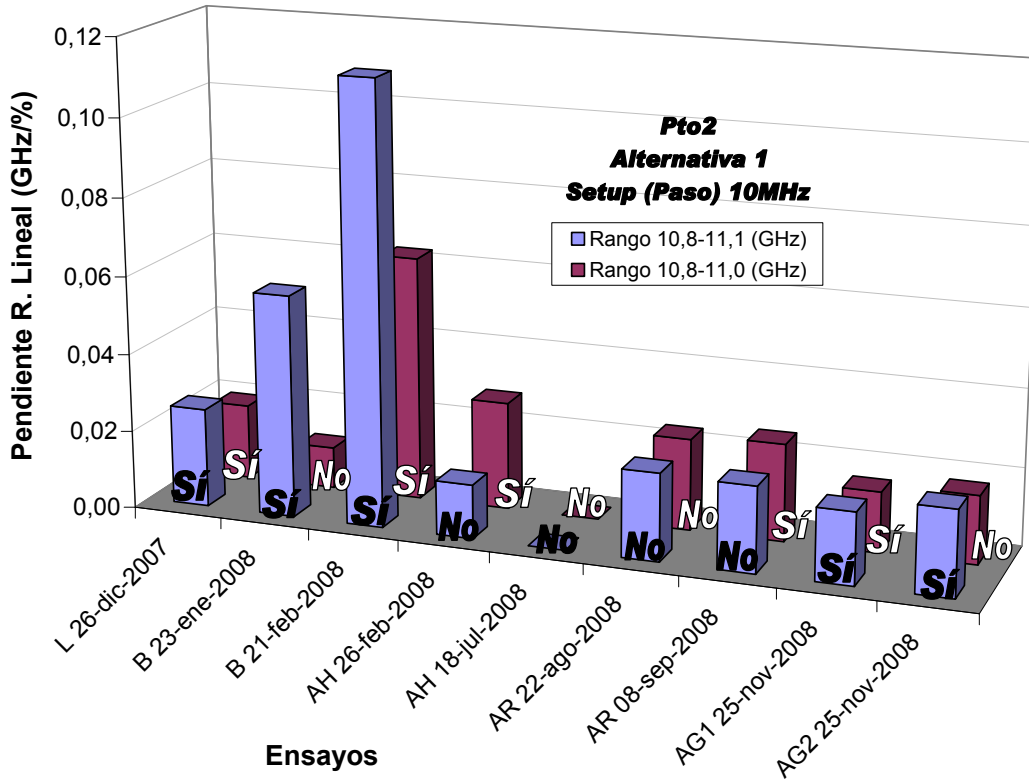


Fig. 5.145: Punto2- Alternativa 1. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 10MHz.

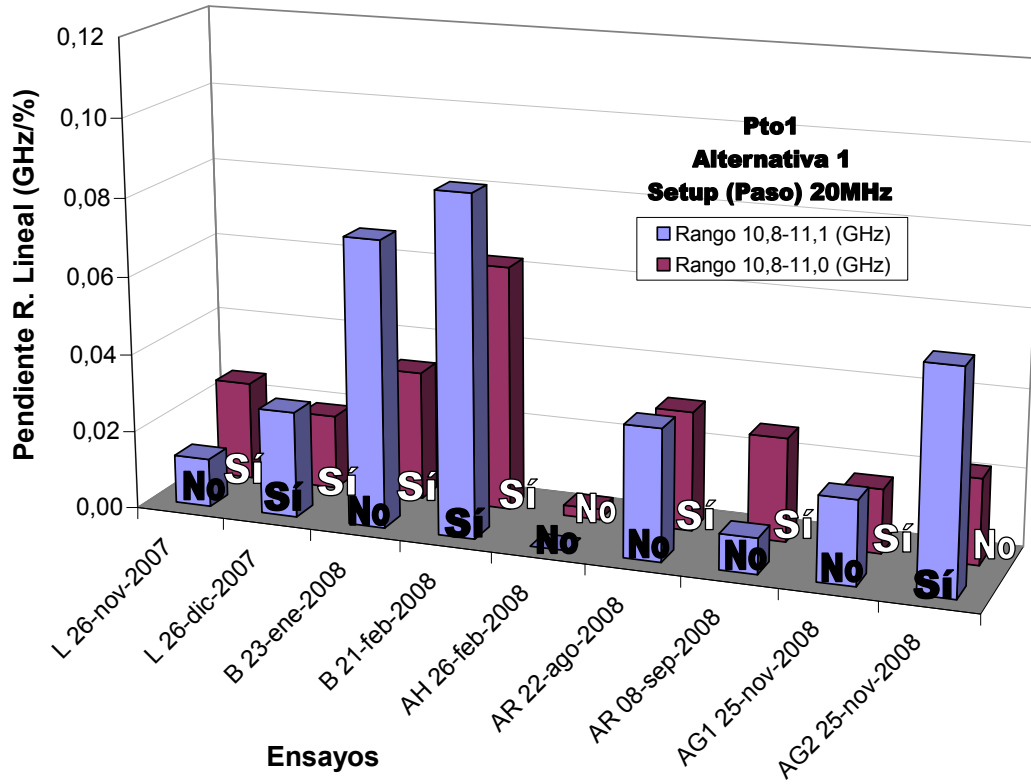


Fig. 5.146: Punto1- Alternativa 1. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 20MHz.

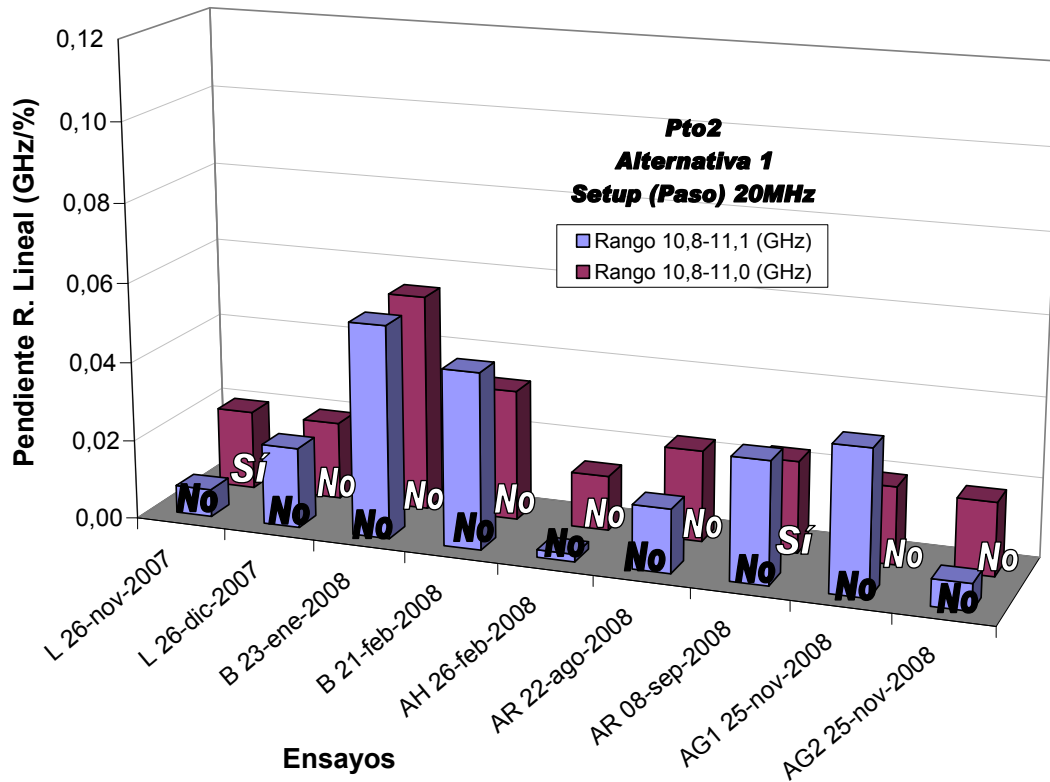


Fig. 5.147: Punto2- Alternativa 1. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 20MHz.

En las figuras mostradas (Fig. 5.144 a la Fig. 5.147), correspondientes a la alternativa 1, se aprecian mayores pendientes obtenidas en los ensayos tipo B, respecto del resto de los ensayos. Esto puede deberse a los tipos de pegamentos utilizados en estos ensayos, o al largo de fibra adherida al perno, que si bien es menor a la resolución espacial, supera a la utilizada en los ensayos tipo AR y AG. Las pendientes mostradas, en general, alcanzan mayores valores para el rango 10,8 a 11,1 GHz y las tendencias entre los distintos ensayos se mantienen, a grandes rasgos, al cambiar el rango y/o paso de frecuencia analizado, siendo más regular el comportamiento obtenido para el rango de 10,8 a 11,0 GHz.

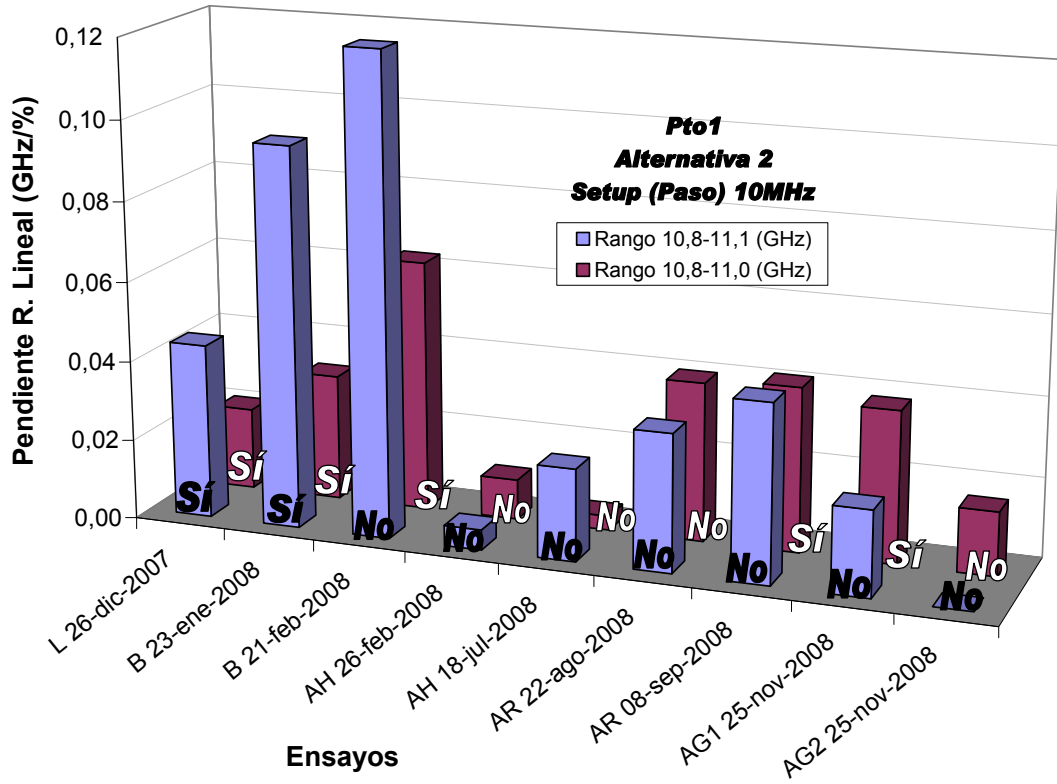


Fig. 5.148: Punto1- Alternativa 2. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 10MHz.

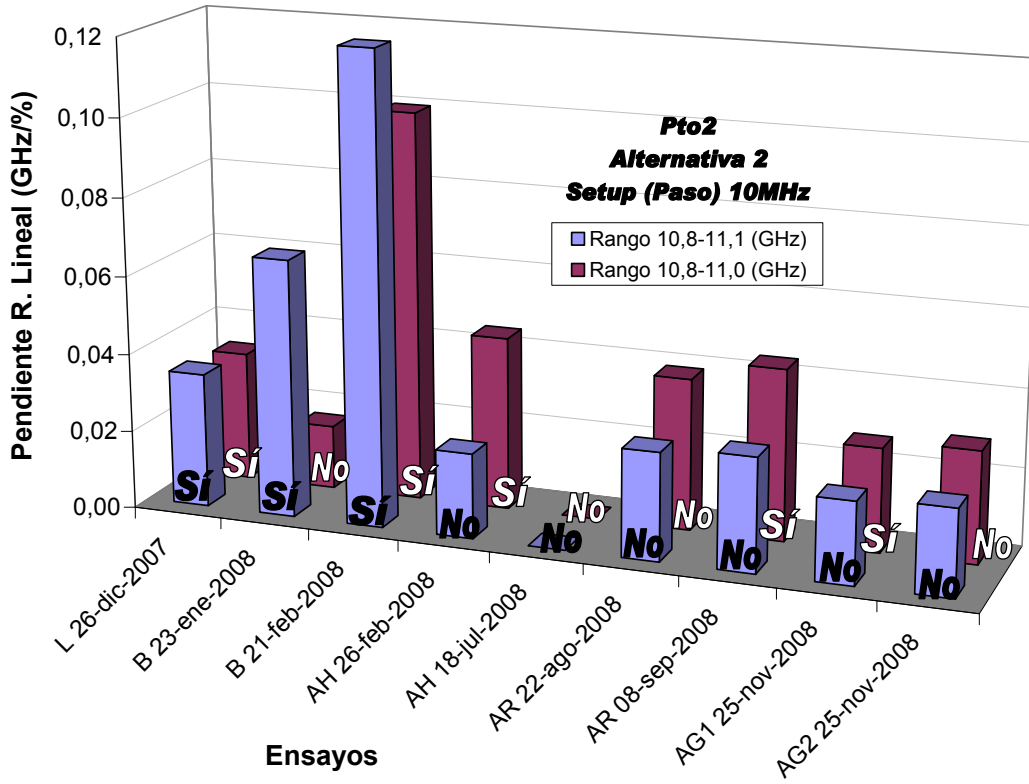


Fig. 5.149: Punto2- Alternativa 2. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 10MHz.

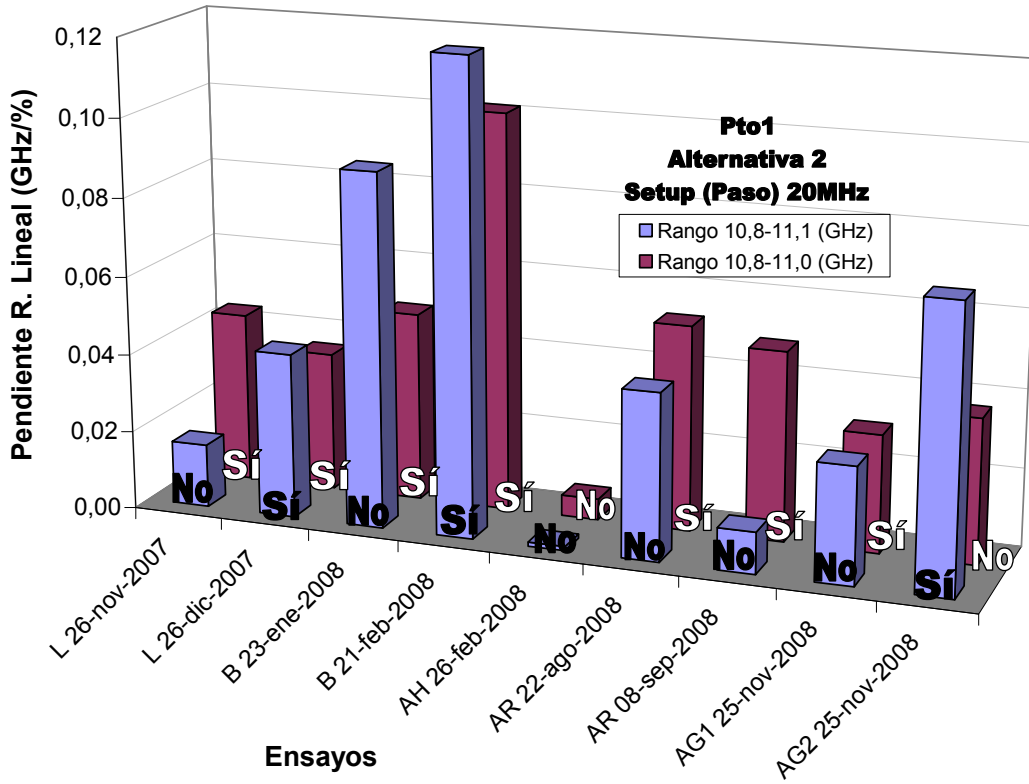


Fig. 5.150: Punto1- Alternativa 2. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 20MHz.

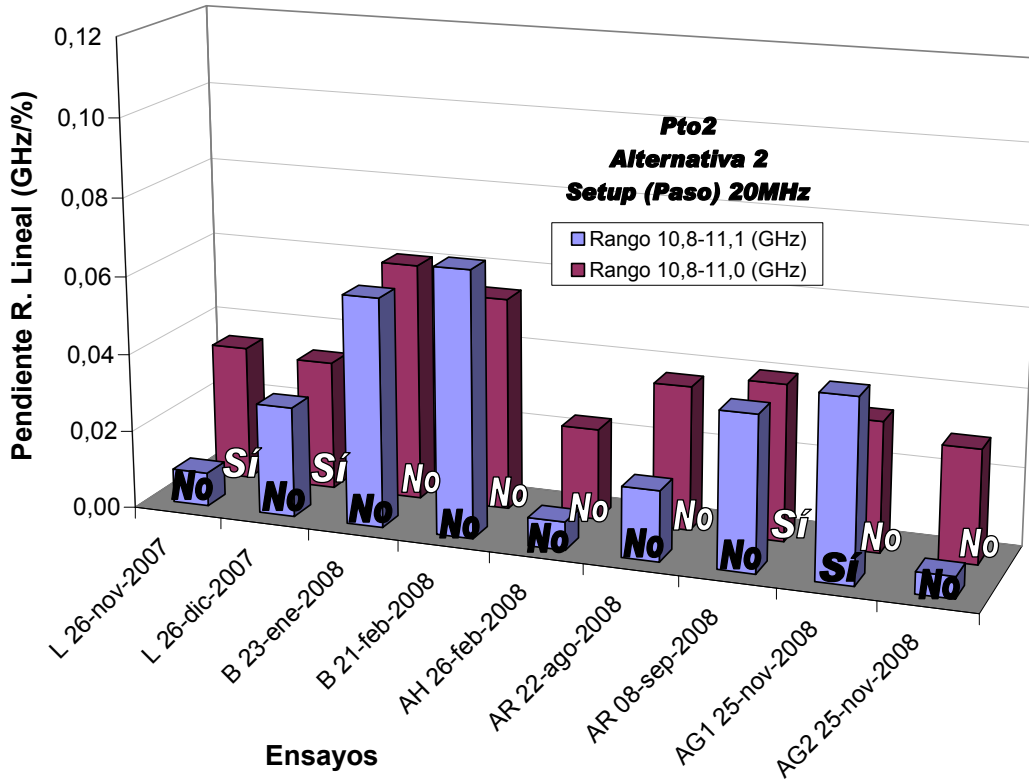


Fig. 5.151: Punto2- Alternativa 2. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 20MHz.

En las figuras mostradas (Fig. 5.148 a la Fig. 5.151), correspondientes a la alternativa 2, nuevamente se aprecian mayores pendientes en los ensayos tipo B, respecto del resto de los ensayos. Además, a diferencia de la alternativa anterior, las diferencias entre los valores de las pendientes para ambos rangos de frecuencia, disminuyen.

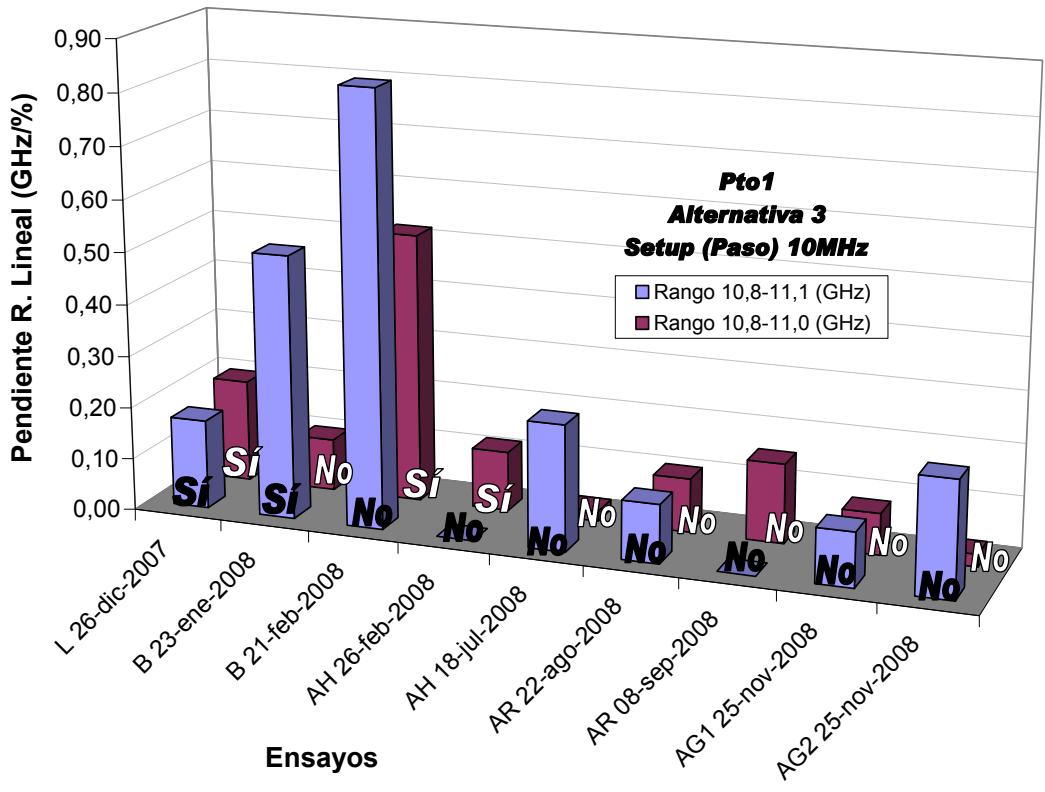


Fig. 5.152: Punto1- Alternativa 3. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 10MHz.

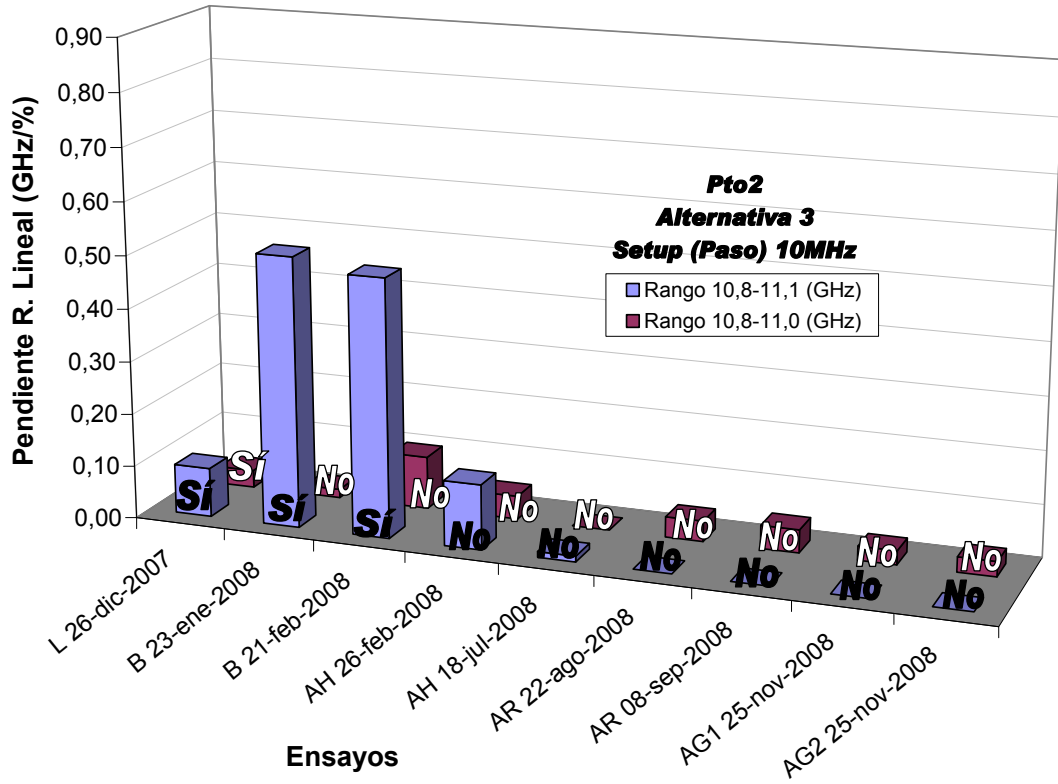


Fig. 5.153: Punto2- Alternativa 3. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 10MHz

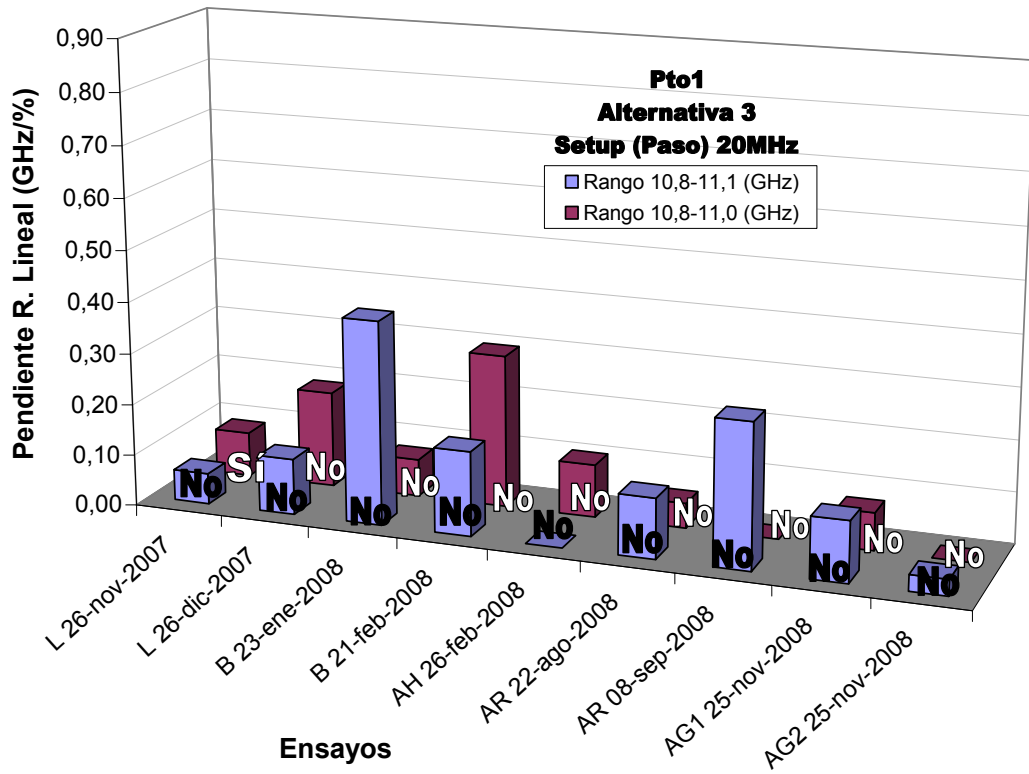


Fig. 5.154: Punto1- Alternativa 3. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 20MHz

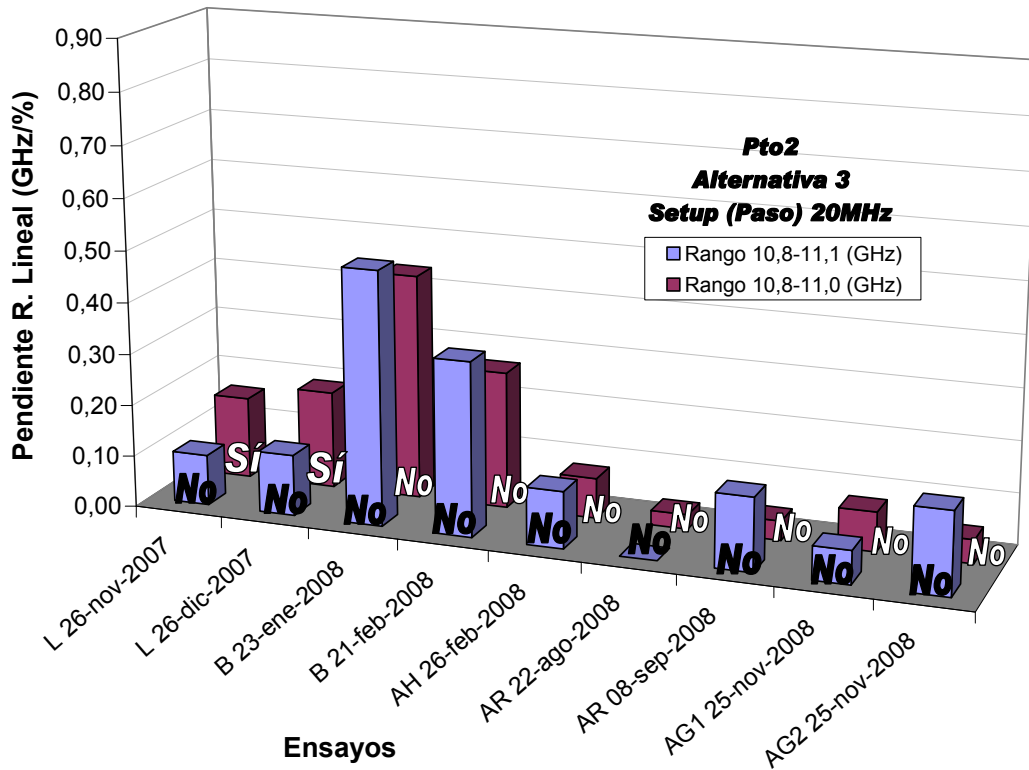


Fig. 5.155: Punto2- Alternativa 3. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 20MHz

En las figuras mostradas (Fig. 5.152 a la Fig. 5.155), correspondientes a la alternativa 3, se aprecian pendientes mayores en los ensayos tipo B, respecto del resto de los ensayos. Estas pendientes son además, mayores en orden de magnitud que las obtenidas en las dos alternativas anteriores. Se observa gran aleatoriedad entre distintos tipos de ensayos.

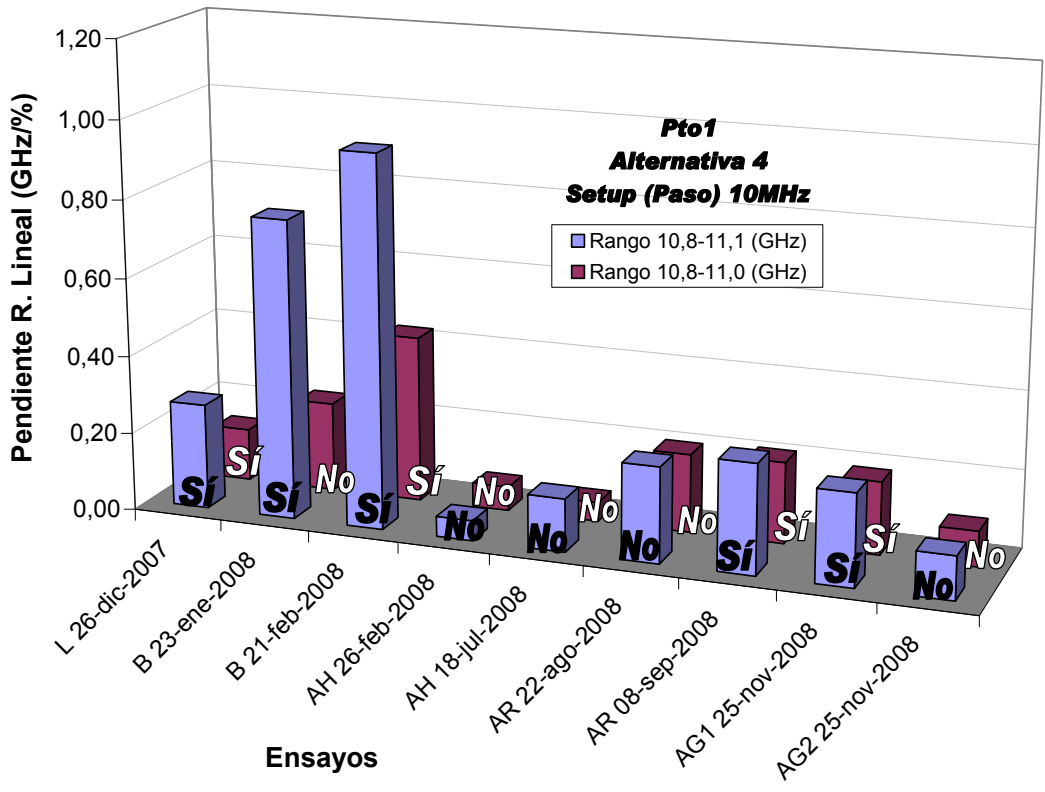


Fig. 5.156: Punto1- Alternativa 4. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 10MHz

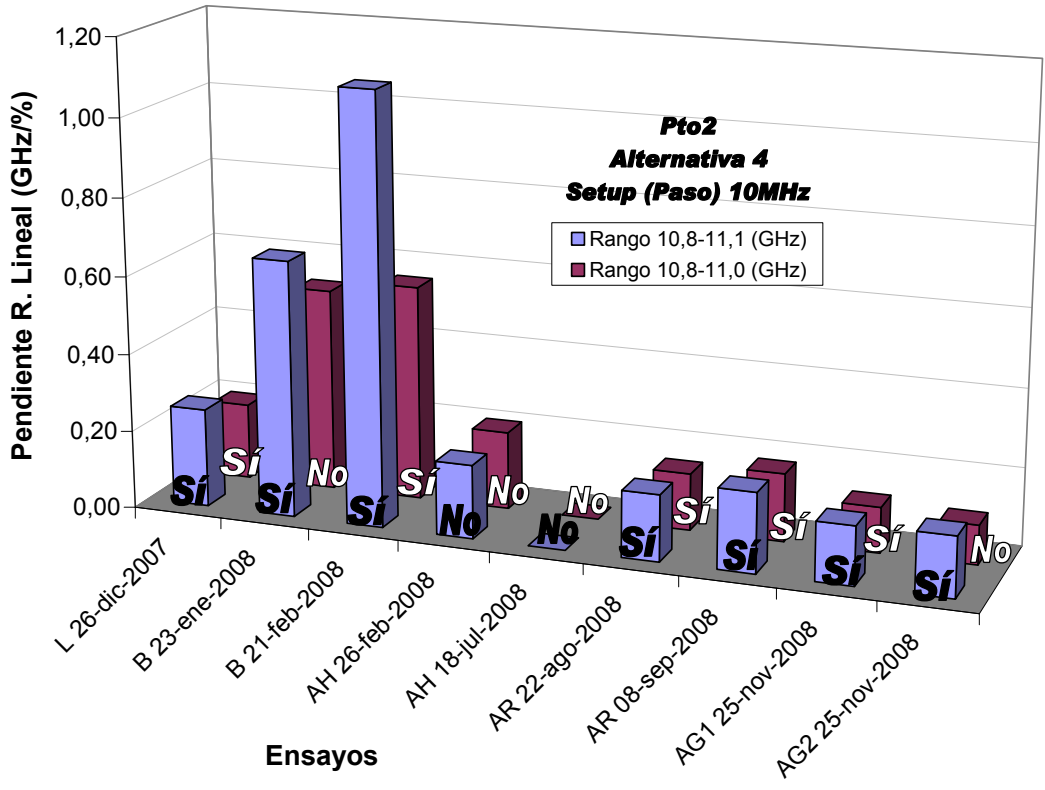


Fig. 5.157: Punto2- Alternativa 4. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 10MHz

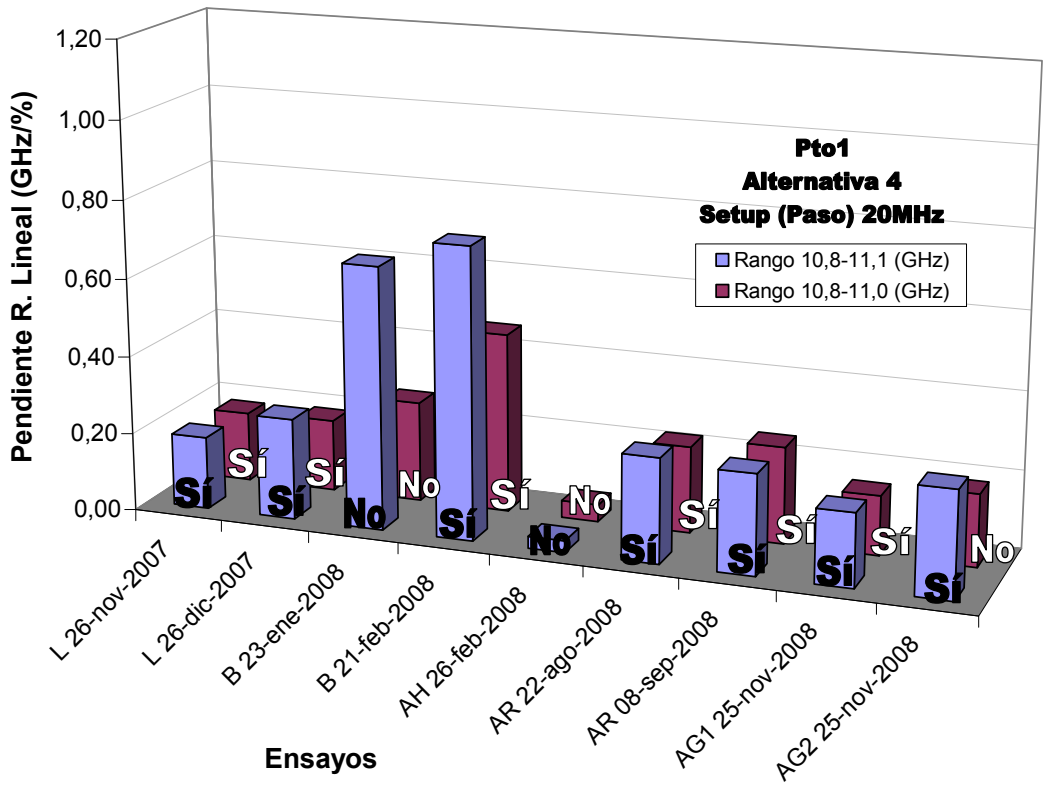


Fig. 5.158: Punto1- Alternativa 4. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 20MHz

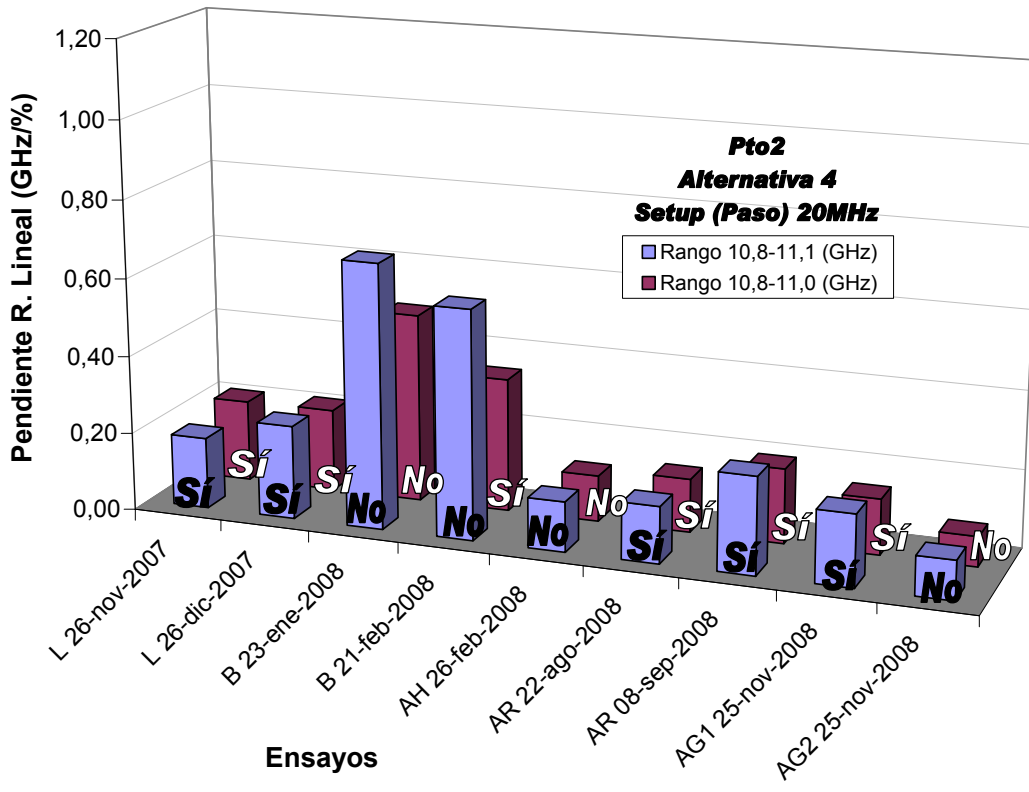


Fig. 5.159: Punto2- Alternativa 4. Pendientes R. Lineal para ambos rangos de frecuencias analizados. Setup en 20MHz.

En las figuras mostradas (Fig. 5.156 a la Fig. 5.159), correspondientes a la alternativa 4, nuevamente se aprecian pendientes mayores en los ensayos tipo B, respecto del resto de los ensayos, siendo además mayores en orden de magnitud que las obtenidas con las alternativas 1 y 2. Al observar las pendientes de ensayos tipo L, AR y AG, se puede apreciar la gran similitud entre ellos, corroborando la estabilidad de la alternativa 4 vista en detalle anteriormente. Esto indica además, que los resultados de estos tres tipos de ensayos, pueden considerarse confiables.

Las figuras anteriores (Fig. 5.144 a la Fig. 5.159) correspondientes a las cuatro alternativas analizadas, muestran que los ensayos tipo B presentan pendientes de regresiones lineales bastante mayores a las obtenidas en el resto de los ensayos. Se distingue una mayor estabilidad en los resultados según la alternativa 4, respecto a los obtenidos con el resto de las alternativas.

5.4.5. Resúmenes estadísticos de los resultados mostrados

A continuación se presentan gráficos y tablas que permiten analizar y concluir más fácilmente sobre los resultados hasta aquí mostrados. La *Fig. 5.160* grafica el conteo de casos “Sí” según el punto de observación en la fibra y según las 4 alternativas estudiadas, incluyendo datos con ambos pasos (10 y 20MHz) y rangos de frecuencia estudiados (10,8-11,0 GHz y 10,8-11,1 GHz). Se consideran datos corregidos, al igual que las figuras anteriores.

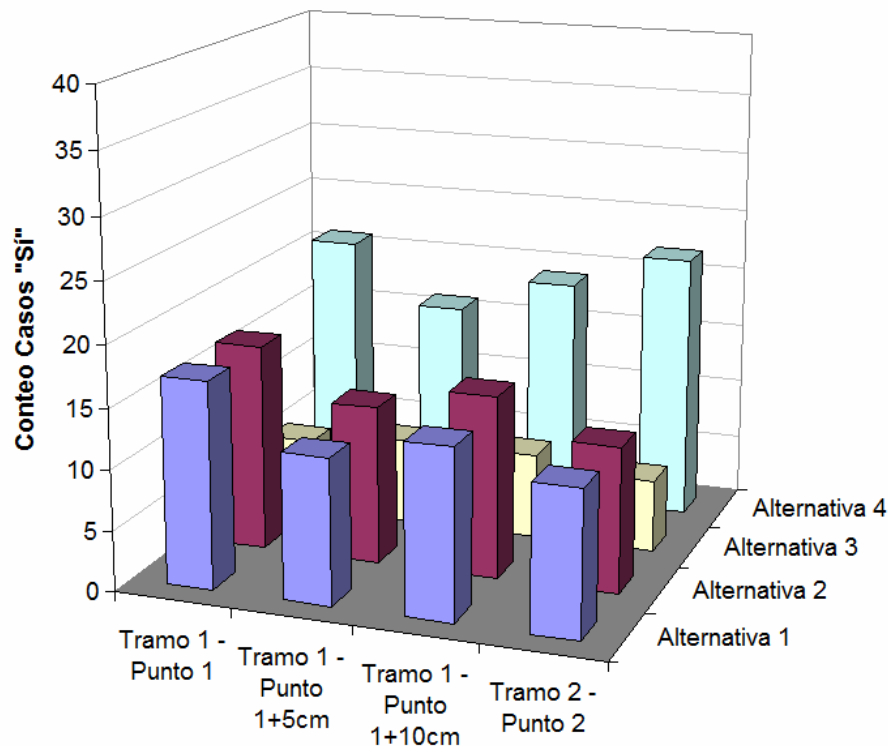


Fig. 5.160: Conteo de casos “Sí” según la ubicación en la fibra sensora y según alternativa de cálculo de frecuencia promedio. Datos Corregidos.

Para analizar el efecto de cada parámetro relevante en los ensayos, se consideran las figuras a continuación. La *Fig. 5.161* muestra el mismo conteo de casos “Sí” mostrado anteriormente, pero sin distinguir entre alternativas, por lo tanto, nuevamente incluye ambos pasos y rangos de frecuencia analizados.

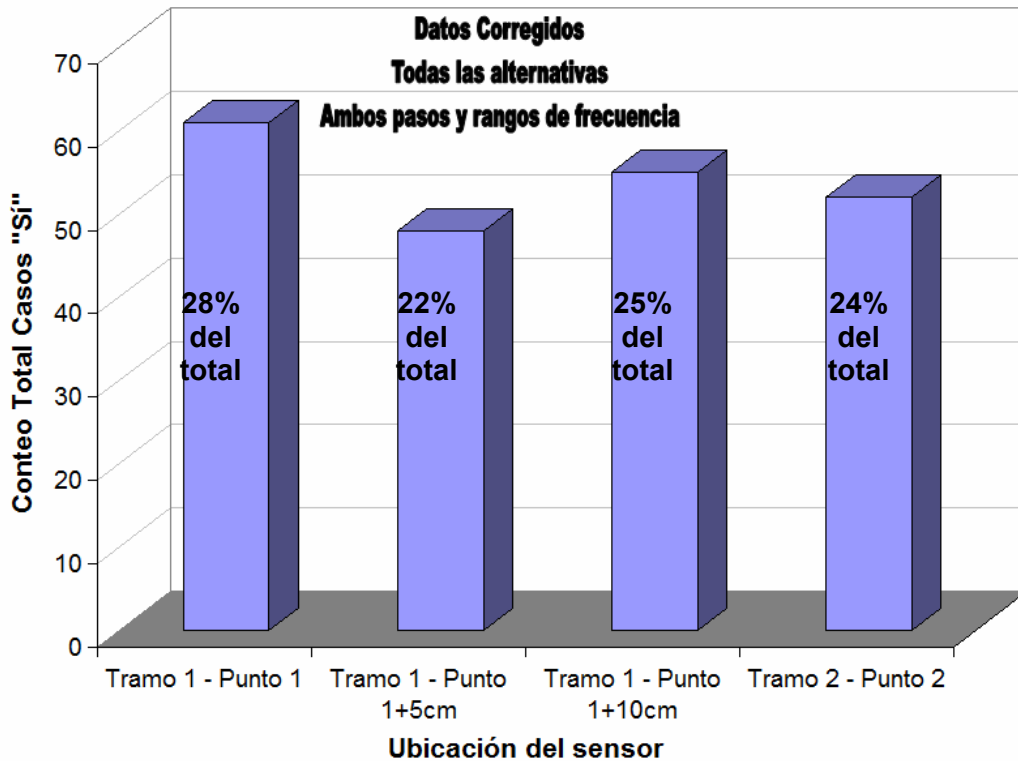


Fig. 5.161: Conteo casos "Si" según ubicación en la fibra, todas las alternativas, ambos pasos y rangos de frecuencia considerados.

La Fig. 5.162 presenta el conteo según alternativas, para todos los puntos de observación y para ambos pasos y rangos de frecuencia. La Fig. 5.163 considera sólo la distinción entre los 2 rangos de frecuencias considerados para el análisis (10,8 a 11,0GHz y 10,8 a 11,1GHz). La Fig. 5.164 considera sólo la distinción entre pasos de frecuencia utilizados en las lecturas mediante el analizador BOTDR. En las figuras se indica además, los resultados en forma porcentual, respecto del total de casos "Si" obtenidos.

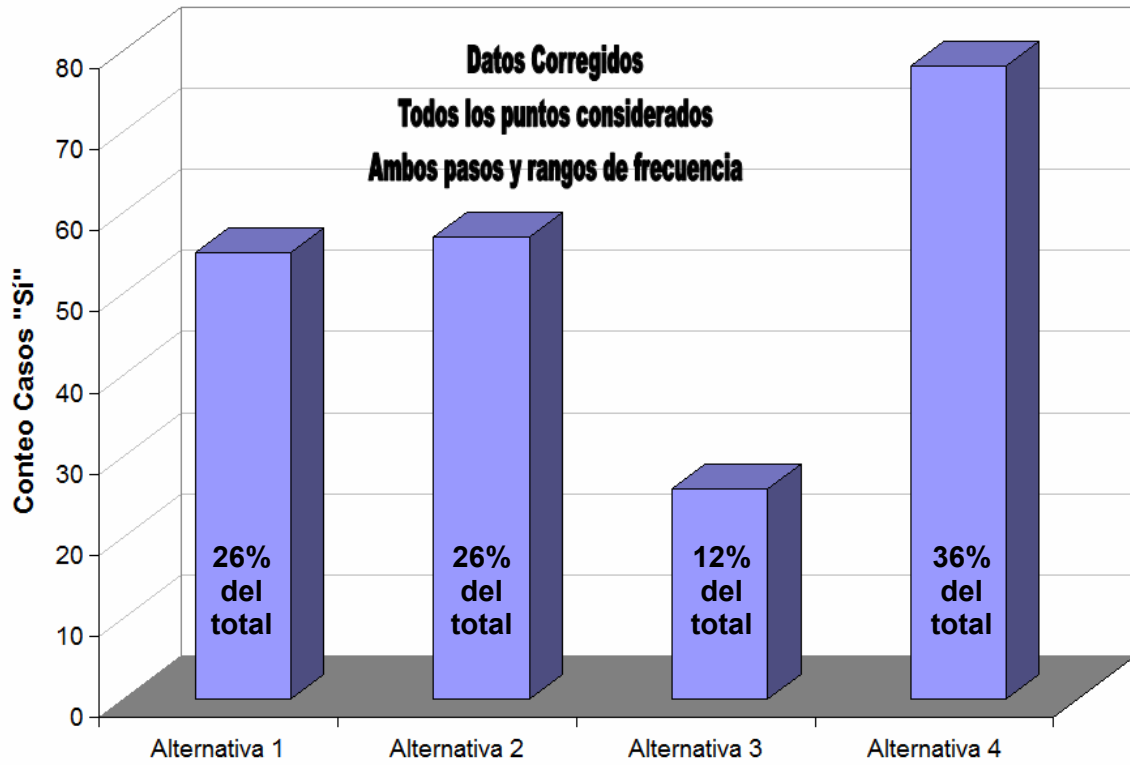


Fig. 5.162: Conteo casos "Si" según alternativas, todos los puntos, ambos pasos y rangos de frecuencia considerados.

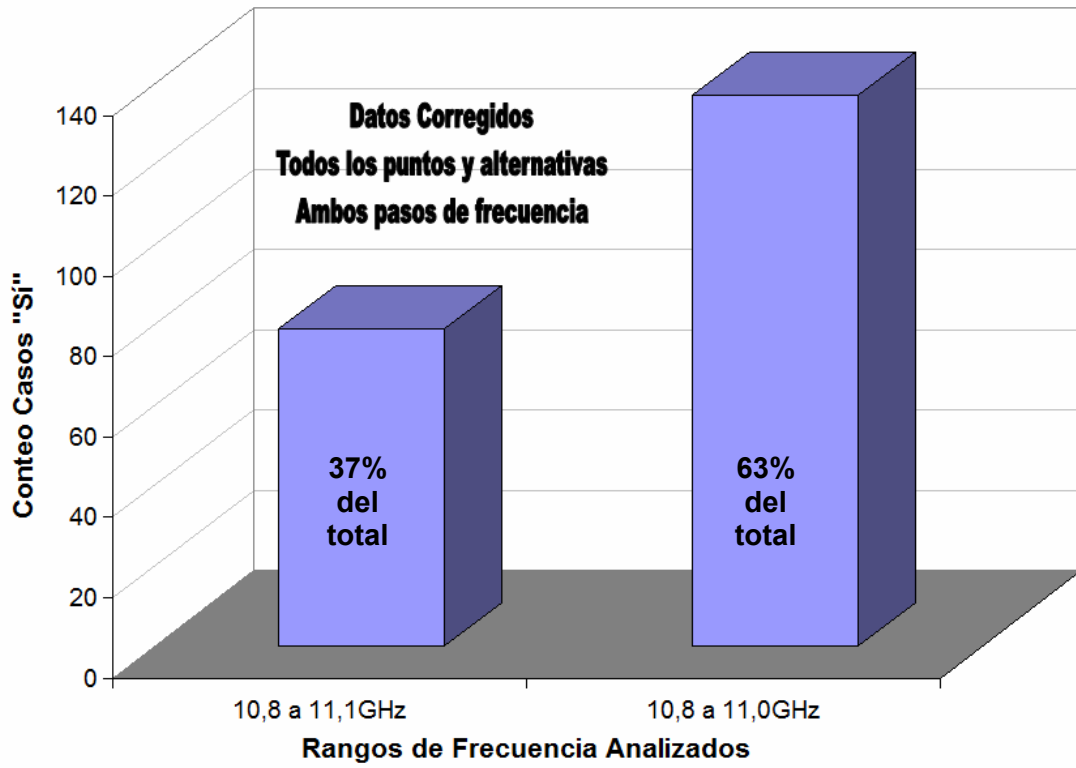


Fig. 5.163: Conteo casos "Si" según rango de frecuencia analizado, todos los puntos y alternativas; ambos pasos de frecuencia considerados.

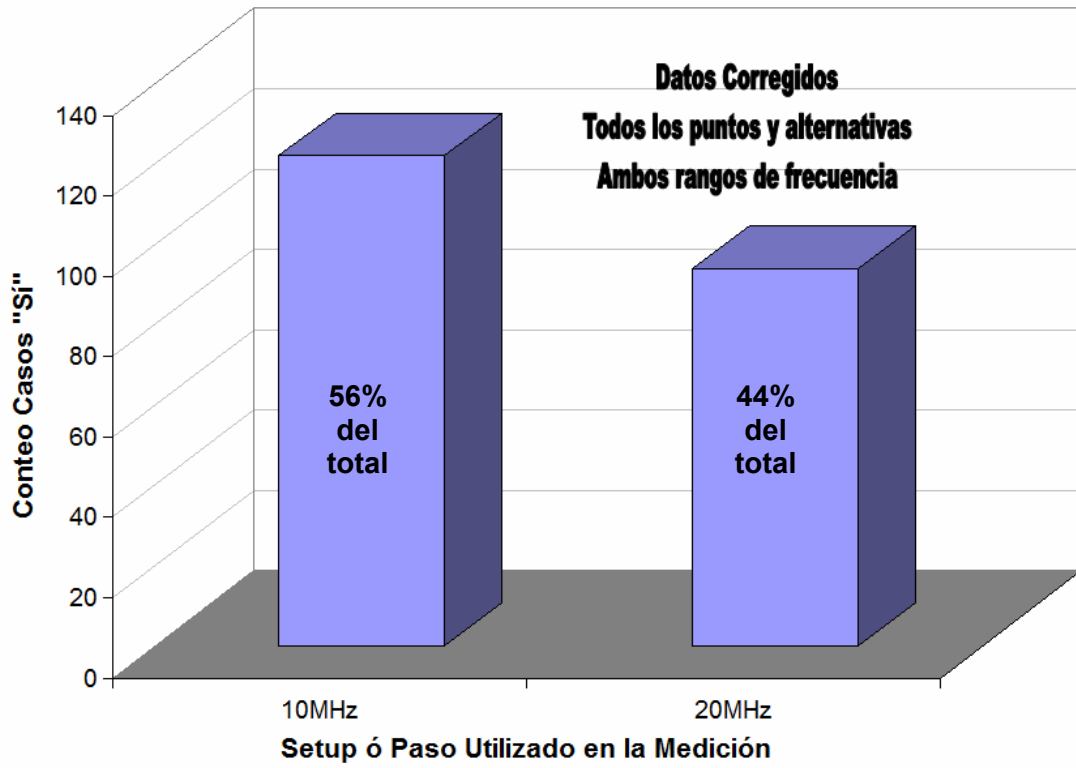


Fig. 5.164: Conteo casos "Si" según setup ó paso utilizado en la medición, todos los puntos y alternativas; ambos rangos de frecuencia considerados.

Las figuras mostradas utilizan datos corregidos, sin embargo desde la *Tabla 5.125* a la *Tabla 5.127* se distingue entre datos corregidos y no corregidos.

Tabla 5.125: Resumen Estadístico para Todos los Puntos de Ubicación en la Fibra. Datos Corregidos.

Todos los puntos						
Alternativas	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Totales	
Casos "Sí" por alternativa	55	57	26	78	216	
Casos "Sí" Setup 10MHz Rango 10,8 a 11,1GHz	13	12	7	22	54	
Casos "Sí" Setup 10MHz Rango 10,8 a 11,0GHz	19	20	10	19	68	
Casos "Sí" Setup 20MHz Rango 10,8 a 11,1GHz	3	4	1	17	25	
Casos "Sí" Setup 20MHz Rango 10,8 a 11,0GHz	20	21	8	20	69	
Conteo casos "Sí" por rango	10,8 a 11,1GHz	16	16	8	39	79
	10,8 a 11,0GHz	39	41	18	39	137
Conteo casos "Sí" por paso	10MHz	32	32	17	41	122
	20MHz	23	25	9	37	94

Tabla 5.126: Resumen Estadístico para Todos los Puntos de Ubicación en la Fibra. Datos Sin Corregir.

Todos los puntos - Datos Sin Corregir						
Alternativas	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Totales	
Casos "Sí" por alternativa	52	53	22	83	210	
Casos "Sí" Setup 10MHz Rango 10,8 a 11,1GHz	10	9	6	21	46	
Casos "Sí" Setup 10MHz Rango 10,8 a 11,0GHz	17	19	8	22	66	
Casos "Sí" Setup 20MHz Rango 10,8 a 11,1GHz	5	4	0	17	26	
Casos "Sí" Setup 20MHz Rango 10,8 a 11,0GHz	20	21	8	23	72	
Conteo casos "Sí" por rango	10,8 a 11,1GHz	15	13	6	38	72
	10,8 a 11,0GHz	37	40	16	45	138
Conteo casos "Sí" por paso	10MHz	27	28	14	43	112
	20MHz	25	25	8	40	98

La *Tabla 5.127* resume el conteo de casos "Sí" para datos corregidos y no corregidos. Posteriormente la *Tabla 5.128* y la *Tabla 5.129* muestran la calidad de las correlaciones entre frecuencias promedio y deformación según strain gages, para datos corregidos y no corregidos. Esto se estudia a través del parámetro R^2 , conocido como coeficiente de correlación, el cual alcanza valores entre 0 y 1. Como se mencionó anteriormente, una buena correlación de datos presenta un valor de R^2 cercano a 1, donde el valor 1 indica una correlación perfecta. Mientras R^2 se aleje de este valor, y por ende se acerque a 0, la calidad de la correlación disminuye.

Tabla 5.127: *Influencia de la Corrección ó No Corrección de Datos*

Casos "Sí" Totales	
Datos Corregidos	Datos Sin Corregir
216	210

Según la *Tabla 5.127*, no existe una diferencia sustancial al aplicar la corrección de caídas o pérdidas a los datos entregados por el sistema BOTDR. Por otra parte, al analizar la calidad de las correlaciones obtenidas (*Tabla 5.128* y *Tabla 5.129*) la influencia positiva de la corrección de datos se acentúa. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el parámetro R^2 no distingue si una correlación posee pendiente negativa o si esta es de un valor positivo pero muy cercano a cero, siendo ambos resultados poco convenientes según los objetivos del presente estudio. Como se explicó anteriormente, la tendencia buscada en las correlaciones estudiadas corresponde a un crecimiento de las frecuencias promedio con el aumento de la deformación aplicada sobre la fibra sensora.

Tabla 5.128: *Calidad de las correlaciones frecuencias promedio vs. deformación unitaria. Todos los puntos, ambos pasos y rangos de frecuencia considerados. Datos corregidos.*

R^2 mayor a	N° de casos con R^2 que cumplan la condición, según alternativas.			
	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4
0,9	46	47	19	61
0,8	75	72	29	82
0,7	86	86	35	100

Tabla 5.129: Calidad de las correlaciones frecuencias promedio vs. deformación unitaria. Todos los puntos, ambos pasos y rangos de frecuencia considerados. Datos sin corregir.

R ² mayor a	N° de casos con R ² que cumplan la condición, según alternativas.			
	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4
0,9	38	36	16	60
0,8	45	39	19	63
0,7	45	40	22	66

De las figuras y tablas mostradas, es posible concluir que existe una superioridad en el número de casos “Sí” obtenidos al considerar los siguientes parámetros y condiciones tanto en forma individual, como en conjunto:

- Alternativa 4
- Setup ó paso de 10MHz
- Rango frecuencias de 10,8 a 11,0GHz

Como consecuencia del análisis mediante frecuencias promedio, se determina que la alternativa 4 es aquella que presenta mejores resultados. Además, ésta prácticamente no depende del rango de frecuencia (ancho de banda) escogido ni del paso ingresado como input o setup. Las otras alternativas, en cambio, dependen fuertemente de estos parámetros, encontrándose mejores resultados para el rango entre 10,8 a 11,0 MHz y para un paso de 10MHz ingresado como *input* al software. Por otra parte, si bien no se aprecia una diferencia sustancial entre los resultados de datos corregidos y no corregidos, existen algunos indicadores que permiten inclinarse a favor de la corrección de datos según los objetivos del presente estudio (ver *Tabla 5.127* a la *Tabla 5.129*)

Considerando el análisis mediante frecuencias promedio recién expuesto, y las conclusiones derivadas de éste, es posible establecer un procedimiento de monitoreo de pernos de anclaje; el cual se resume en las siguientes etapas:

- 1) Escoger una determinada posición en la fibra sensora adherida a un perno de anclaje instalado en la roca, y efectuar mediante el sistema BOTDR una lectura del espectro de frecuencia correspondiente.

- 2) De esta forma, deducir la frecuencia promedio asociada.
- 3) Posteriormente, ingresar con esta frecuencia en ábacos o gráficos de banda previamente confeccionados utilizando la alternativa 4.
- 4) Intersectar la *línea promedio* trazada (de pendiente 0,17GHz/% y coeficiente 10,7GHz) sobre el gráfico y deducir el potencial estado de deformación.

Como puede apreciarse, este procedimiento requiere conocer previamente, con la mayor precisión posible, el mapeo de la fibra sensora y la ubicación de los pernos de anclaje a lo largo de esta.

De los resultados mostrados en este trabajo y las conclusiones emanadas de él, se desprende un resultado adicional, que forma parte de los objetivos iniciales de este estudio respecto a la búsqueda del método óptimo para la instalación de fibra óptica sensora en pernos de anclaje. Debido a que los ensayos tipo AR y AG presentaron resultados favorables según los distintos análisis, y considerando que fueron instrumentados mediante la *alternativa de instalación 3, con protección de resina en zona del loop*, es posible deducir que esta opción resulta efectiva, logrando proteger la fibra y permitiendo que ésta mantenga su capacidad de transmitir información. Además, el pegamento utilizado en estos ensayos, debido a su buen desempeño, corresponde a *Speedbonder H3151[®] de LOCTITE[®]*. Su formato es bi-componente y pertenece a la familia de los metacrilatos. En consecuencia, este pegamento es el recomendado a utilizar en investigaciones posteriores.

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Análisis de sensibilidad de las alternativas usadas

A continuación se muestra un desarrollo matemático que permite ahondar más en el origen de diferencias o similitudes al deducir frecuencias promedio según las alternativas planteadas.

Para efectuar un análisis de sensibilidad con respecto al dato en decibel o como función potencia, se toman la derivadas parcial de la funciones frecuencia promedio descritas en la *Ec. 2.21* y la *Ec. 2.22* respectivamente.

Esto entrega los siguientes resultados:

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial P_{Si}} = \frac{\partial}{\partial P_{Si}} \left[\frac{\Delta F}{A_{total}} \sum_i (10 \cdot \log(\frac{P_{Si}}{P_E})) \cdot F_i \right] = Cte_1 \cdot \sum_i \frac{1}{P_{Si}}$$

Ec. 6.1: Derivada parcial función potencia

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial dB_i} = \frac{\partial}{\partial dB_i} \left[\frac{\Delta F}{A_{total}} \sum_i (P_E \cdot 10^{\frac{dB_i}{10}}) \cdot F_i \right] = Cte_2 \cdot \sum_i 10^{\frac{dB_i}{10}}$$

Ec. 6.2: Derivada parcial función decibel

Según la *Ec. 6.1* es posible concluir que valores de potencia bajos, i.e. cercanos a cero (lo que se traduce en valores logarítmicos y de decibeles muy negativos), tienen gran influencia sobre el valor obtenido de la frecuencia promedio. Examinando los tipos de espectros entregados por el analizador, se observa que se está dando demasiada importancia a zonas sin relevancia de las *curvas de espectro*, ya que valores de potencia bajos, tienen mayor “peso” en el cálculo de la frecuencia promedio. Las variaciones entre las alternativas 1, 2 y 3 surgen sólo de los valores en las constantes en la función utilizada, que se escogen al definir la alternativa y además afectan las áreas bajo las curvas usadas en el cálculo. Por esto último, se obtiene que la alternativa 3 sufre en

general una mayor variación, ya que a diferencia de la alternativa 1 ó 2 (donde las curvas se trasladan en 100dB o en 0dB respectivamente), el traslado de curvas es variable en cada cálculo (recordar que en esta alternativa se traslada el espectro en una cantidad igual al mínimo decibel de la curva dentro del rango observado, y este mínimo es siempre distinto en cada curva según el ensayo, nivel de cargas o setup del software).

Según la *Ec. 6.2* es posible concluir que valores de potencia altos (que se traducen en valores logarítmicos y de decibeles menos negativos que en el caso anterior), tienen mayor influencia sobre el valor obtenido de la frecuencia promedio, lo que permite dar importancia a la zona de interés en las *curvas de espectro* entregadas por el sistema. Este efecto es el que se reproduce con la utilización de la Alternativa 4, entregando de ésta forma, mejores resultados que las alternativas anteriores.

6.2. Análisis de Deformaciones Absolutas

Se realizó otro tipo de análisis de resultados, motivado luego de observar las curvas de espectro (sin modificación) y notar que éstas comienzan a aplanarse notoriamente dentro del rango de 10,8 a 11,0GHz al aumentar el nivel de carga aplicada. Se puede apreciar entonces, que para los estados iniciales (sin carga o cargas bajas) las curvas de espectro se mantienen con un *peak* suave y centrados en la frecuencia original sin mostrar mayores cambios (ver *Fig. 6.1*). Luego en cargas intermedias, se comienza a formar una especie de meseta, que indica que se está trasladando el *peak*. Sin embargo, este corrimiento no es lo suficientemente grande como para notarse luego de la integración de las curvas de espectro realizadas por el sistema. Para cargas más altas aún, comienzan a distinguirse fácilmente dos *peaks*, uno centrado en la frecuencia original y el otro en una frecuencia desplazada debido al estado de deformaciones (Zhang & Wu, 2008). De aquí, surge la motivación de automatizar el proceso de elección de *peaks*, incorporando lo anterior. A continuación se estudia un método que permite lograr, en parte, este objetivo:

1. Buscar dentro del rango 10.8 a 11.0GHz de la curva de espectro, puntos donde se tengan máximos locales. Esto se hace comparando cada dato de potencia con su antecesor y sucesor. Si éste es mayor a ambos, cumple la primera condición.

2. Luego, se pide que este valor de potencia no sea menor a: máximo absoluto de la curva menos una constante arbitraria (por ej: 3.0dB, ver Fig. 6.5) que se ajustará convenientemente según el ensayo. Este último valor se exige para que no se esté considerando algún tramo irrelevante de la curva, lo que ocurriría en los estados iniciales, donde la curva empieza a decaer rápidamente sin mostrar una meseta ni un *peak* corrido a la derecha (ver Fig. 6.1 a Fig. 6.4).
3. Finalmente, se escoge la máxima frecuencia que cumple los requisitos impuestos.

A continuación se muestran figuras (Fig. 6.1 a Fig. 6.4) que permiten representar de mejor forma la motivación del procedimiento mencionado, utilizando los resultados del ensayo AR 08-sep-2008. Se consideran los datos asociados al punto de observación en la ubicación del SG-1 en el tramo 1 de fibra, para un paso de 10MHz. Por otra parte, debe tenerse en cuenta, que los valores de frecuencia asociados al estado de carga, dependen de la tensión inicial dada a la fibra al ser pegada al perno.

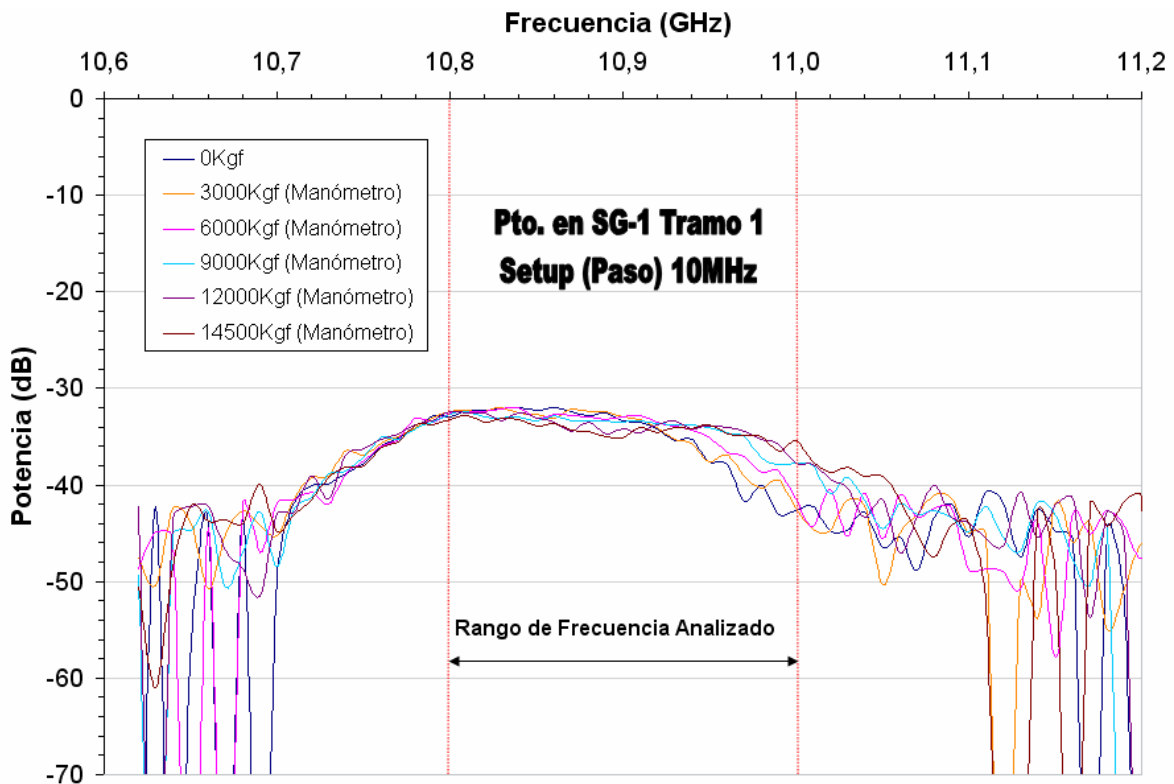


Fig. 6.1: Ensayo AR 08-sep-2008. Curvas de espectros de frecuencia para distintos niveles de carga en el Punto en posición de SG-1 Tramo 1. Setup en 10MHz.

De las curvas mostradas en la figura anterior, en la Fig. 6.2 se considera sólo la curva asociada al estado inicial (0Kgf). En ella se detalla con una línea horizontal, el nivel de potencia máximo en el espectro, definiendo la frecuencia característica asociada. Además, se destaca el decaimiento de la curva al aumentar la frecuencia. Fig. 6.3 muestra la curva asociada a una carga de 6000Kgf. En ella se observa un decaimiento más suave luego del nivel de potencia máxima, al aumentar la frecuencia. Finalmente, en la Fig. 6.4 no se aprecia un decaimiento de la curva dentro del rango, sino que, al contrario, esta vuelve a aumentar su nivel de potencia, comenzando a mostrar otro *peak* a la derecha del original.

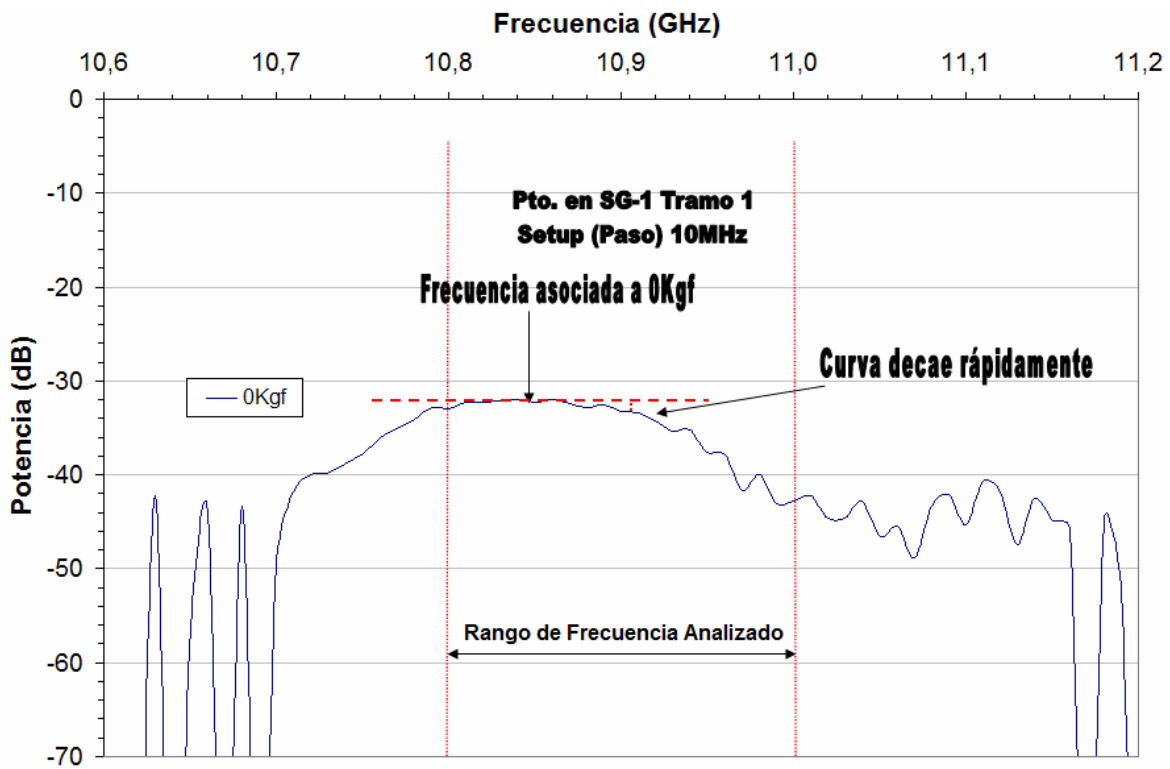


Fig. 6.2: Ensayo AR 08-sep-2008. Curvas de espectros de frecuencia para estado inicial (sin carga) en el Punto en posición de SG-1 Tramo 1. Setup en 10MHz.

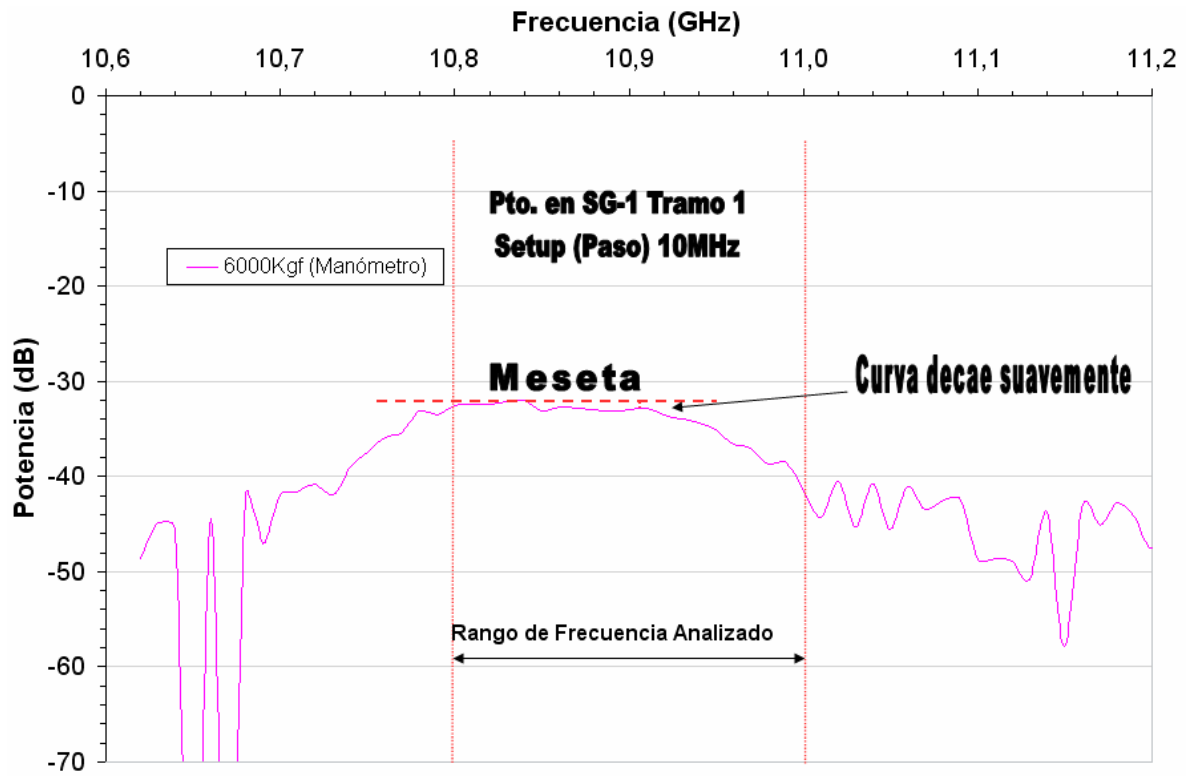


Fig. 6.3: *Ensayo AR 08-sep-2008. Curvas de espectros de frecuencia para estado de carga intermedia en el Punto en posición de SG-1 Tramo 1. Setup en 10MHz.*

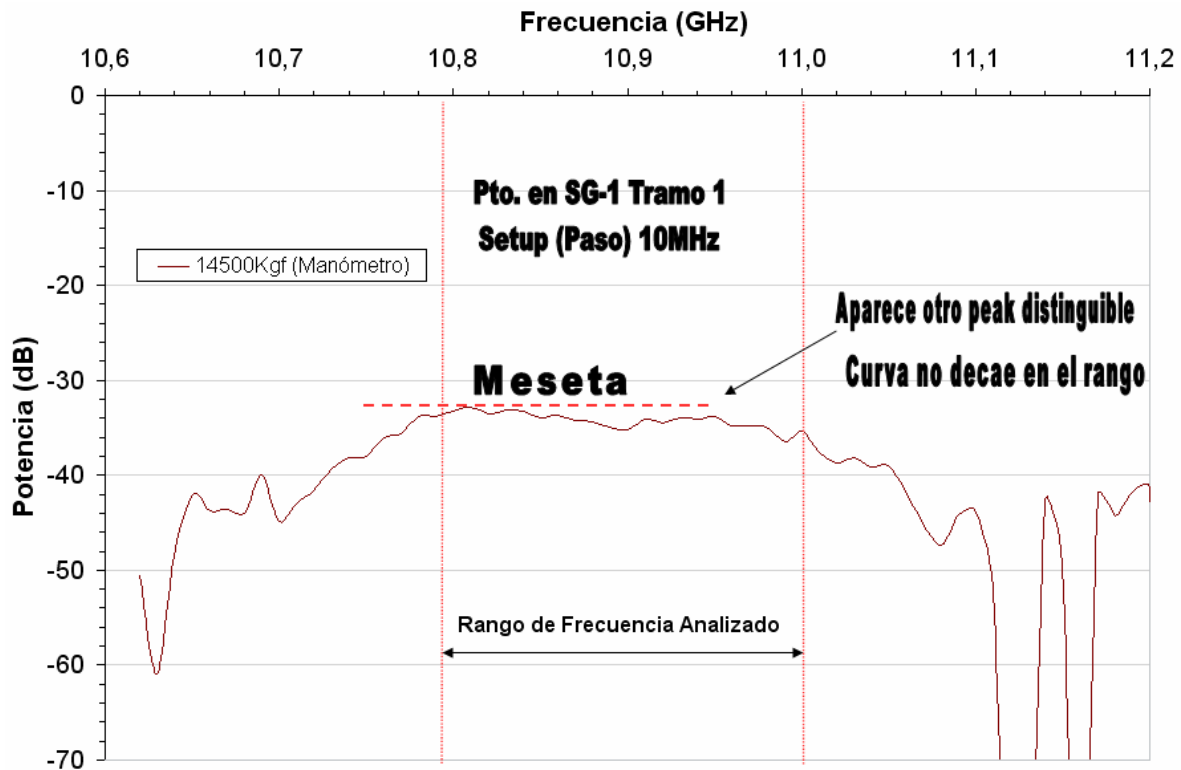


Fig. 6.4: *Ensayo AR 08-sep-2008. Curvas de espectros de frecuencia para estado estado final de carga en el Punto en posición de SG-1 Tramo 1. Setup en 10MHz.*

Mediante la correlación o calibración (aproximada) de frecuencia versus deformación unitaria utilizada por el *software ADVANTEST N8510®*, es posible calcular los valores asociados a las frecuencias obtenidas según el procedimiento explicado. Esta calibración es la siguiente:

$$\varepsilon(\%) = f(\text{GHz}) \cdot 2,0668 - 22,424$$

Ec. 6.3: *Calibración del software ADVANTEST N8510® para cálculo de deformación unitaria (ver Fig. 2.15)*

Desde la *Tabla 6.1* a la *Tabla 6.4* se muestran los resultados al aplicar el procedimiento recién descrito en el ensayo AR 08-sep-2008. En las dos primeras tablas aparecen los resultados para puntos de observación en el tramo 1 de fibra, contiguos a los strain gages 1 y 2 (según mapeo). Las dos tablas posteriores, muestran resultados en las ubicaciones análogas pero asociadas al tramo 2 de fibra sensora. Es posible apreciar

que todos los valores iniciales de deformación en las tablas son iguales a cero, lo que se logró intencionalmente al restar en cada columna, su respectivo valor de deformación inicial.

Tabla 6.1: Ensayo AR 08-sep-2008. Punto en SG-1 Tramo 1. Deformaciones unitarias calculadas según el procedimiento de recolección automática de frecuencias asociadas a peaks de potencia.

Carga (Manómetro)	Frecuencias asociadas al estado de carga según:		Deformación Unitaria (calculada según calibración BOTDR) ϵ (%)	
	BOTDR	Método propuesto	BOTDR	Método propuesto
	(GHz)	(GHz)	(%)	(%)
0Kgf	10,8462	10,89	0,00	0,00
3000kgf	10,8499	10,89	0,01	0,00
6000kgf	10,8426	10,91	-0,01	0,04
9000kgf	10,8613	10,94	0,03	0,10
12000kgf	10,8235	10,95	-0,05	0,12
14500kgf	-	11,00	-	0,23

Tabla 6.2: Ensayo AR 08-sep-2008. Punto en SG-2 Tramo 1. Deformaciones unitarias calculadas según el procedimiento de recolección automática de frecuencias asociadas a peaks de potencia.

Carga (Manómetro)	Frecuencias asociadas al estado de carga según:		Deformación Unitaria (calculada según calibración BOTDR) ϵ (%)	
	BOTDR	Método propuesto	BOTDR	Método propuesto
	(GHz)	(GHz)	(%)	(%)
0Kgf	10,8424	10,89	0,00	0,00
3000kgf	10,8486	10,92	0,01	0,06
6000kgf	10,8515	10,92	0,02	0,06
9000kgf	10,784	10,93	-0,12	0,08
12000kgf	10,6882	10,97	-0,32	0,17
14500kgf	10,8303	10,98	-0,03	0,19

Tabla 6.3: Ensayo AR 08-sep-2008. Punto en SG-1 Tramo 2. Deformaciones unitarias calculadas según el procedimiento de recolección automática de frecuencias asociadas a peaks de potencia.

Carga (Manómetro)	Frecuencias asociadas al estado de carga según:		Deformación Unitaria (calculada según calibración BOTDR) ϵ (%)	
	BOTDR	Método propuesto	BOTDR	Método propuesto
	(GHz)	(GHz)	(%)	(%)
0Kgf	10,8183	10,81	0,00	0,00
3000kgf	10,8189	10,90	0,00	0,19
6000kgf	10,8183	10,89	0,00	0,17
9000kgf	10,8146	10,86	-0,01	0,10
12000kgf	10,8077	10,85	-0,02	0,08
14500kgf	10,8069	10,81	-0,02	0,00

Tabla 6.4: Ensayo AR 08-sep-2008. Punto en SG-2 Tramo 2. Deformaciones unitarias calculadas según el procedimiento de recolección automática de frecuencias asociadas a peaks de potencia.

Carga (Manómetro)	Frecuencias asociadas al estado de carga según:		Deformación Unitaria (calculada según calibración BOTDR) ϵ (%)	
	BOTDR	Método propuesto	BOTDR	Método propuesto
	(GHz)	(GHz)	(%)	(%)
0Kgf	10,8118	10,88	0,00	0,00
3000kgf	10,8138	10,91	0,00	0,06
6000kgf	10,8020	10,92	-0,02	0,08
9000kgf	10,8015	10,95	-0,02	0,14
12000kgf	10,8100	10,94	0,00	0,12
14500kgf	10,8034	10,96	-0,02	0,17

Los resultados según el método propuesto parecen relativamente satisfactorios, al menos en el tramo 1, donde se aprecia un aumento en la deformación deducida al aumentar la carga aplicada. El resultado de menor confiabilidad se obtiene en el punto ubicado en SG-1 Tramo 2, el cual se encuentra más cercano al tramo de fibra libre final. Por razones mencionadas anteriormente, que guardan relación con el método de integración sobre la resolución espacial empleado por el sistema BOTDR, las mediciones en este punto se ven afectadas por el tramo libre que se encuentra posterior a él.

La Fig. 6.5 esquematiza lo que ocurre en el Tramo 1 del perno según el método propuesto. En ella se especifica el valor de la constante arbitraria escogida, según el procedimiento explicado anteriormente.

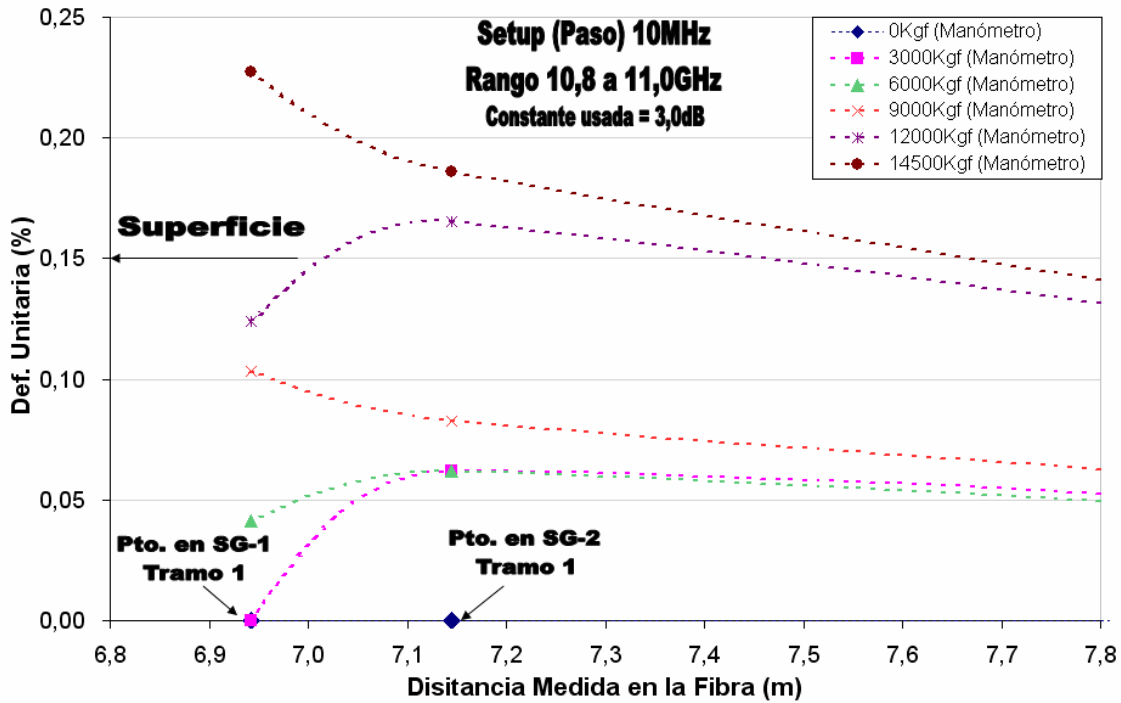


Fig. 6.5: Ensayo AR 08-sep-2008. Distribución de Deformación Unitaria en el perno de anclaje según método propuesto. Constante usada =3,0dB.

Desarrollando un análisis similar con datos del ensayo AG1 25-nov-2008 (ver Fig. 6.6), y manteniendo el mismo valor de la constante utilizada para el ensayo AR 08-sep-2008, no se obtienen resultados igualmente satisfactorios, en cuanto a reproducir aumento de deformaciones según el aumento de cargas o de obtener mayores deformaciones en el SG-1 que en el SG-2, que es lo esperado según el tipo de ensayo.

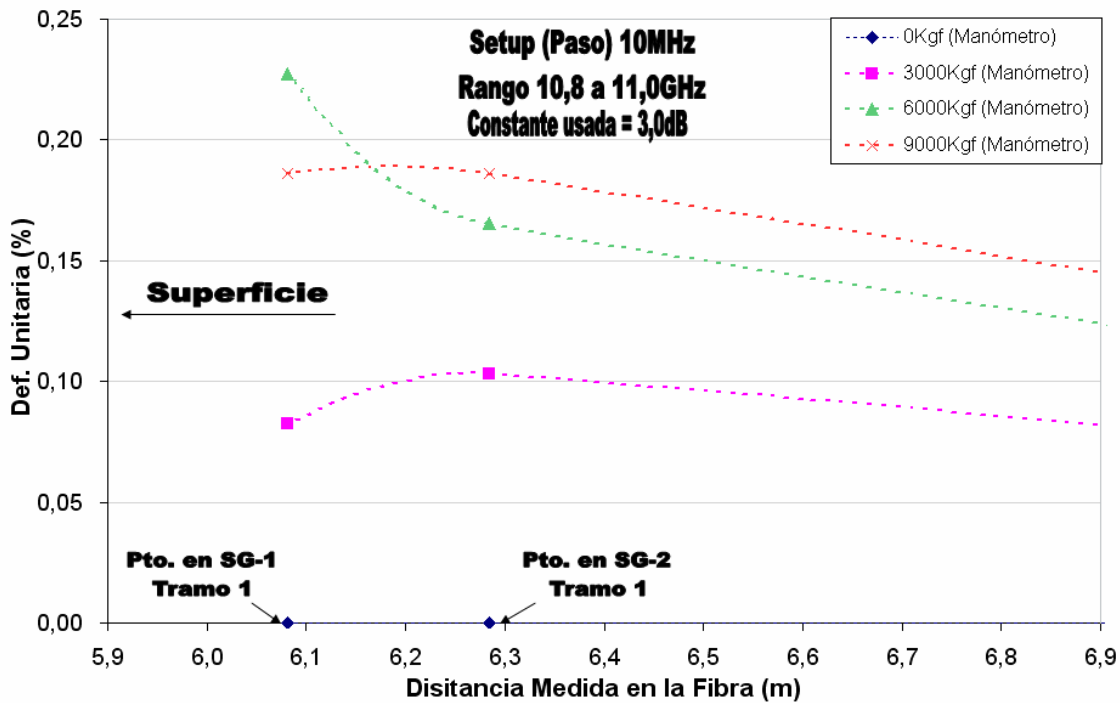


Fig. 6.6: Ensayo AG1 25-nov-2008. Distribución de Deformación Unitaria en el perno de anclaje según método propuesto. Constante usada =3,0dB.

Es posible evaluar el método propuesto utilizando distintos valores para la constante arbitraria, lo que presenta una desventaja del método. Sin embargo, es probable que esta constante se vea afectada por el tipo de grout utilizado en el anclaje, por lo cual el método mantiene cierta validez. La Fig. 6.7 muestra el resultado obtenido al utilizar una constante igual a 1,0dB. Este resultado muestra ser más satisfactorio que el caso anterior, al indicar un incremento en deformación unitaria según los niveles de carga aplicados y además, reproduce lo esperado en cuanto a mostrar deformaciones mayores en la ubicación del SG-1.

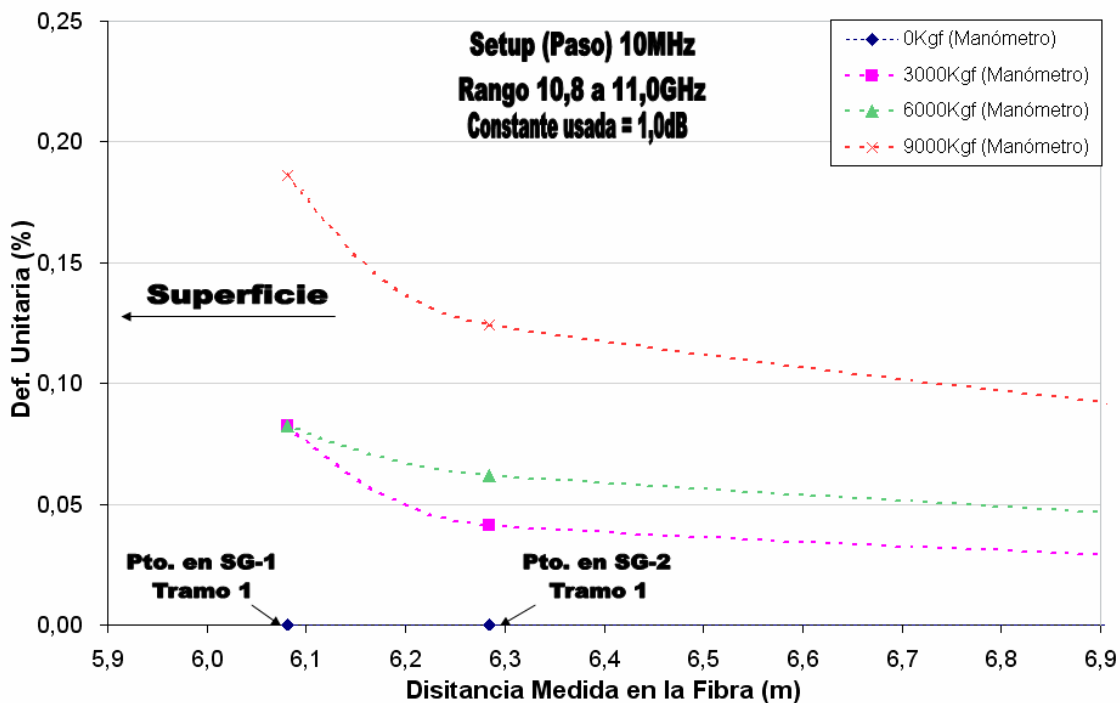


Fig. 6.7: Ensayo AG1 25-nov-2008. Distribución de Deformación Unitaria en el perno de anclaje según método propuesto. Constante usada =1,0dB.

Con la finalidad de proporcionar mayores datos con los cuales contrastar lo expuesto hasta aquí, se utilizan a continuación resultados experimentales de Farmer (1975), los cuales fueron mostrados anteriormente en el capítulo 2 de este trabajo. En la Fig. 6.8 (casi idéntica a la Fig. 2.34) se muestran las curvas: carga versus desplazamiento y distribución de deformación unitaria, obtenidas de un ensayo en anclaje de 500mm grouteado con resina, instalado en una perforación en concreto. En ella se destaca además, la distancia equivalente a la ubicación del strain gage 1 (SG-1) del ensayo AR 08-sep-2008, de tal manera de contrastar los valores de deformación unitaria obtenidos en dicho ensayo, con los resultados de Farmer. Cabe mencionar que en ambos ensayos no se aplicaron los mismos niveles de carga, por lo cual es necesario interpolar entre los datos de la figura para estimar los resultados buscados. Este análisis comparativo toma en cuenta el hecho de que ambos ensayos fueron anclajes grouteados con resina epóxica, pero debe considerarse que a la vez difieren en características como el tipo y diámetro del perno de acero, el largo de éste y el tipo de resina epóxica utilizada.

Según lo anterior, se obtienen los resultados presentados en la *Tabla 6.5*:

Tabla 6.5: Deformaciones unitarias calculadas utilizando resultados de estudios previos en anclajes en hormigón.

Carga Manómetro	Celda Carga ensayo AR 08-sep-2008	Carga (Farmer, 1975)	$\mu\epsilon$ (Farmer, 1975)	ϵ (Farmer, 1975)	Promedio strain gages ensayo AR 08-sep-2008	ϵ con método propuesto
(kgf)	(kgf)	(kN)	-	(%)	(%)	(%)
0	0	0	0	0,00	0,00	0,00
3000	2671	26	170	0,02	0,00	0,00
6000	5179	51	350	0,04	0,02	0,04
9000	7607	75	540	0,05	0,05	0,10
12000	10261	101	850	0,09	0,07	0,12
14500	11967	117	990	0,10	0,09	0,23

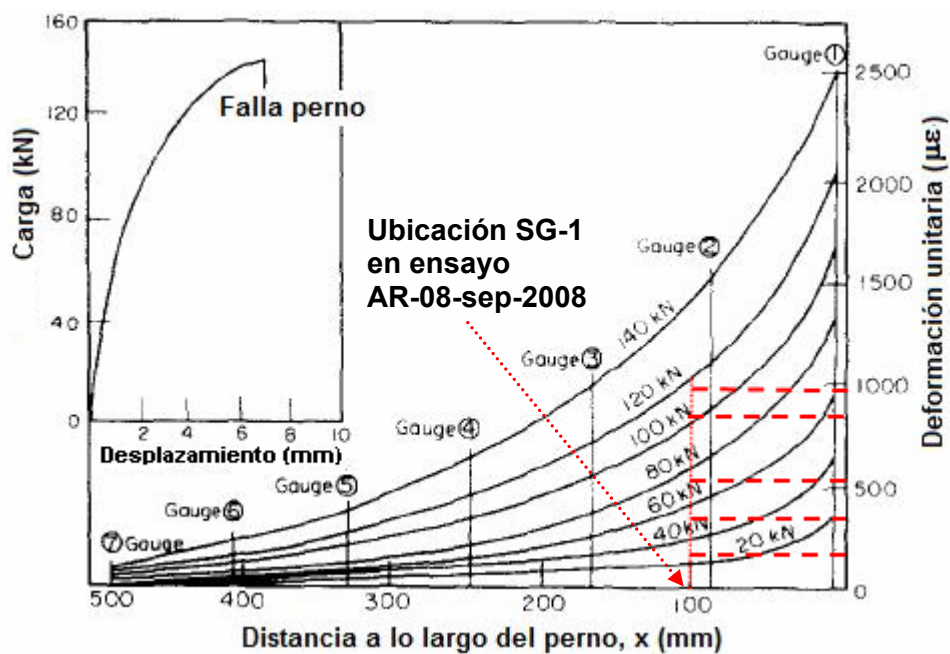


Fig. 6.8: Curva Carga-desplazamiento y Curvas de Distribución de Deformación a lo largo del perno. Largo anclaje = 500mm. (Farmer, 1975).

De la *Tabla 6.5* es posible apreciar la gran similitud entre los valores de deformación de strain gages obtenidos por Farmer y los resultantes del ensayo AR 08-sep-2008, pese a que la posición contigua al strain gage, es afectada por el desfase entre el mapeo y la posición según BOTDR. Los resultados de deformación deducidos mediante el método propuesto (que utiliza la información BOTDR) muestran ser mayores que los

entregados por los strain gages, llegando en varios casos a duplicar el valor entregado por estos últimos.

El *método de automatización en la búsqueda de peaks resulta efectivo*, al menos, en la determinación de la tendencia de aumento de deformación del anclaje con el incremento de carga al que está sometido. Sin embargo, tiene la desventaja de depender en gran medida de la constante arbitraria escogida como límite para nivel de decaimiento de las curvas de espectro analizadas.

6.3. Otros Métodos de Análisis Derivados de la Investigación

Algunos de los resultados obtenidos en la presente investigación, fueron utilizados en estudios paralelos relacionados. De esta forma, se desarrollaron métodos alternativos de análisis, interpretación y re-estimación de datos entregados por el sistema BOTDR. En particular, los análisis desarrollados por el Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile (CMM – CORFO Innova BOTDR, 2008) resultaron bastante satisfactorios. Estos análisis consisten en un manejo de los espectros entregados por el *software*, aplicando sobre éstos el *método de mínimos cuadrados*. De esta manera, al utilizar la teoría expuesta anteriormente, que permite deducir la forma de generar un espectro a partir de un perfil de deformación dado (Zhang & Wu, 2008), se pueden encontrar aquellos perfiles que generen el espectro que mejor reproduzca el entregado por el software, es decir, aquel que minimice la distancia entre el espectro medido por el sistema BOTDR y el espectro simulado. En las siguientes figuras (ver *Fig. 6.9* y *Fig. 6.10*) se exponen algunos de los resultados obtenidos mediante este análisis para el ensayo AR 08-sep-2008, los cuales muestran ser bastante satisfactorios, en cuanto a reproducir en forma aproximada la ubicación de la fibra tensada (instalada en el perno de anclaje) y los niveles de deformaciones esperados.

La *Fig. 6.9* compara el perfil de deformaciones deducido por el sistema BOTDR con el perfil re-estimado según el procedimiento explicado. La fibra deformada se encuentra en el tramo entre 6.7m a 7.4m aproximadamente.

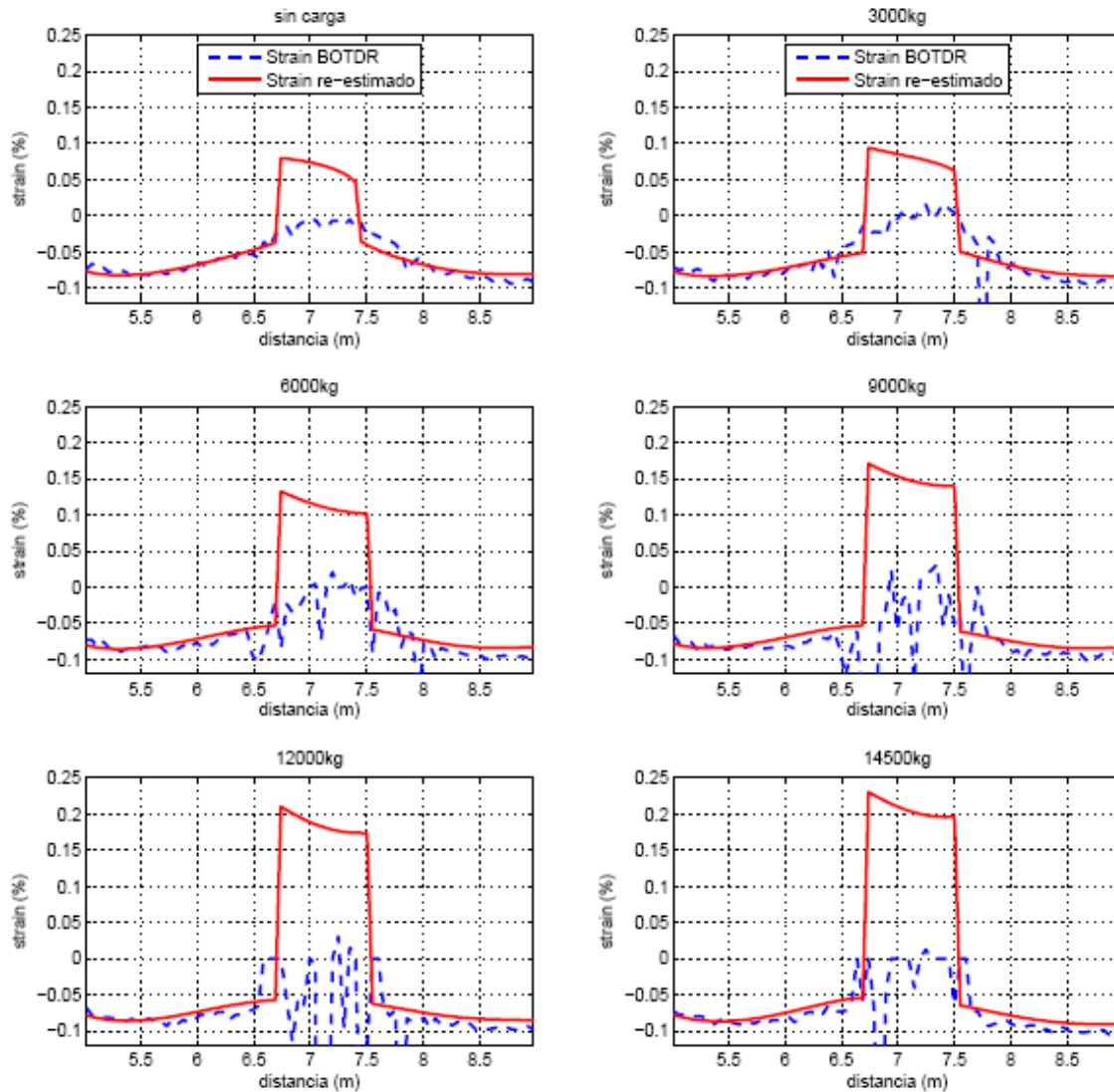


Fig. 6.9: Deformación unitaria versus distancia para distintos niveles de carga en ensayo AR 08-sep-2008. La fibra deformada se encuentra en el tramo entre 6,7 a 7,4m aproximadamente (CMM – CORFO Innova BOTDR, 2009)

La Fig. 6.10 compara los niveles de deformación unitaria (strain) obtenidos para cada nivel de carga, según: sistema BOTDR, strain gages y el procedimiento de re-estimación por mínimos cuadrados.

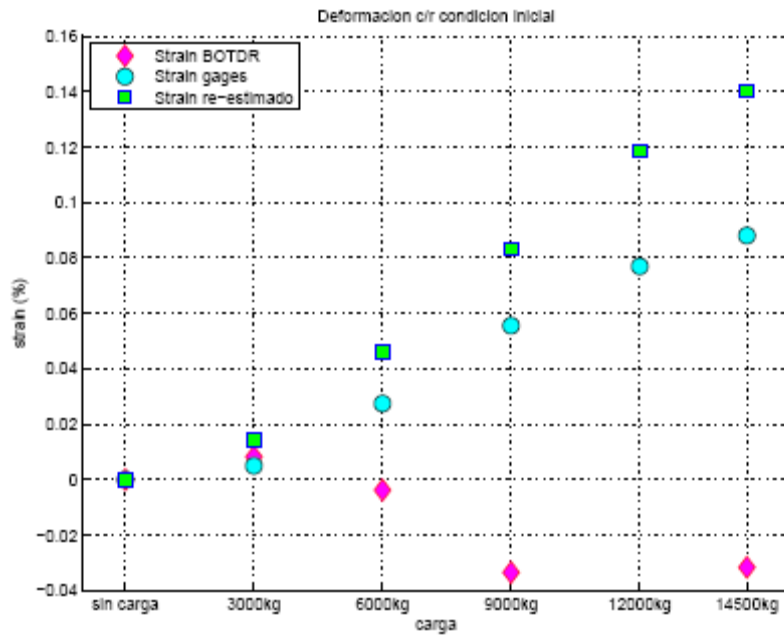


Fig. 6.10: Promedio de deformación en la zona deformada ensayo AR 08-sep-2008 (CMM - CORFO Innova BOTDR, 2009)

7. DISCUSIÓN

La cantidad de ensayos realizados con motivo del presente estudio resulta ser suficiente para elaborar técnicas de interpretación de los datos entregados por la tecnología BOTDR cuando ésta se aplica en condiciones distintas a las validadas por el fabricante para obtener datos confiables.

La alternativa adoptada para la instalación de fibra óptica en pernos muestra ser un aspecto relevante en la calidad de los resultados obtenidos. En particular, si se considera que los ensayos en terreno que utilizaron loops de largos mayores presentan resultados poco satisfactorios, es posible concluir sobre la poca conveniencia de que estos se construyan de tal forma. Podría contra-argumentarse, que los pernos de ensayos en laboratorio fueron instrumentados con largos de loops cercanos a 1m y, sin embargo, mostraron resultados bastante aceptables. Pero debe tenerse en cuenta que estos ensayos contaron con tramos de fibra pegada al perno, de largos cercanos o incluso superiores a 1m, por lo que permitieron un mejor comportamiento del sistema BOTDR, lo cual contrarrestaría el efecto del largo del loop utilizado. La ventaja de optar por utilizar loops cortos (fabricados con fibra ultra-flexible, para evitar daños por el curvado), es explicable considerando el método de lectura que efectúa el sistema, donde éste promedia o integra sobre la resolución espacial, como se mencionó anteriormente. Por lo tanto, cuando la medición se acerca al loop, mezcla datos de fibra suelta con los de la fibra sensora pegada al perno. Sí el largo de los loops crece, el grado de influencia que tienen sobre la medición es mayor.

El pretensado aplicado sobre la fibra instalada en pernos de anclaje, tiene el objetivo fundamental de permitir la detección de la zona de mayor interés en la fibra, que corresponde a aquella sometida a deformación durante los ensayos. Esto fue posible en mayor o menor medida dependiendo de la calidad del pegamento utilizado, y se efectuó en primera instancia, al momento de sacar el gancho y cargas utilizadas durante la instrumentación, observando, mediante lecturas iniciales del sistema BOTDR, la zona donde éste detectó deformación. Esto influyó además en la definición de los puntos de observación utilizados en el análisis de resultados BOTDR. El pegamento recomendado por esta investigación, permitió mantener el pretensado de la fibra instalada hasta el inicio de cada ensayo. Un objetivo adicional que justifica el pretensado sobre la fibra, es el acercarse más tempranamente a la condición presentada por Zhang & Wu (2008) para el

caso de deformación unitaria (ϵ) > 0,25%, donde el peak original de la curva de espectro y aquél asociado a la deformación aplicada, son claramente distinguibles.

La corrección aplicada a los datos cuando se observan pérdidas o caídas en las curvas de espectro, sólo en algunos casos produce una mejora en las tendencias buscadas, existiendo incluso otros donde las éstas empeoraron debido a la corrección. Según algunos indicadores, pareciera ser más confiable corregir estas caídas, pese a no ser una opción del todo efectiva.

El mecanismo de aplicación de cargas y deformaciones durante los ensayos en terreno, puede afectar las lecturas de la fibra óptica sensora. Sin embargo, los resultados obtenidos parecen mostrar que este efecto no impide recuperar información sobre el estado de deformaciones existente en el perno de anclaje.

Es ya conocido el resultado existente en la literatura sobre anclajes en roca o barras embebidas en estructuras, de que la tensión en el perno o barra de acero es disipada con la profundidad. Este conocimiento fue utilizado en la presente investigación al momento de confeccionar los gráficos de deformación versus la profundidad del perno, mostrados en el capítulo 5. La corroboración de éste fenómeno escapa a los alcances de este trabajo y, por ende, sólo se efectúa en forma simplificada a través de datos de 2 strain gages ubicados a distintas profundidades. Un estudio más prolijo requiere ubicar mayor cantidad de strain gages, en particular, cercanos al extremo situado a mayor profundidad del perno anclado.

Como se explicó anteriormente, las correlaciones poco satisfactorias entre frecuencias promedio y deformación de strain gages, obtenidas en los ensayos tipo B; pueden explicarse por la deformación en el tiempo producida en las placas de sujeción inferiores utilizadas en estos ensayos (ver Anexo B - *Fig. B. 6*). Este hecho se observó con claridad al pasar los 9000Kgf de carga aplicada. Su influencia sobre la medición BOTDR puede ser considerable, si se toma en consideración la forma de medición del sistema BOTDR, que toma mediciones del estado de la fibra en toda su longitud en intervalos de varios minutos de duración, dependiendo del setup ingresado. A continuación se muestran algunas figuras (*Fig. 7.1 a Fig. 7.3*) que permiten analizar la influencia de los altos niveles de carga en estos ensayos.

La *Fig. 7.1* muestra la relación obtenida entre la deformación entregada por strain gages y la carga aplicada. Asimismo se incluye la relación entre la carga y la frecuencia promedio BOTDR, calculada según la alternativa 4 propuesta en este trabajo.

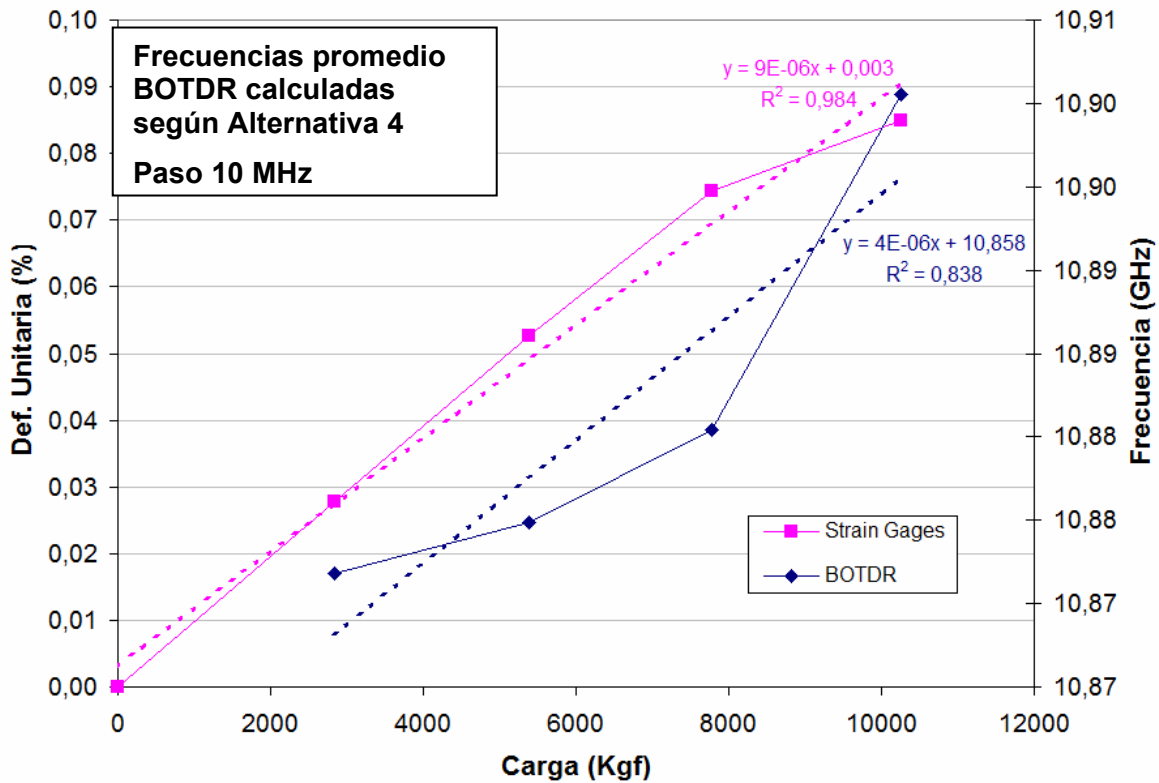


Fig. 7.1: Relación Strain Gages (%) y Frecuencia Promedio BOTDR (GHz) vs Carga (Kgf). Ensayo B 21-feb-2008

La Fig. 7.2 es análoga a la anterior, pero quitando el valor de deformación y frecuencia promedio, asociado al nivel más alto de carga ($\approx 10000\text{Kgf}$). Como puede observarse al efectuar este procedimiento, los coeficientes de correlación mejoran notoriamente.

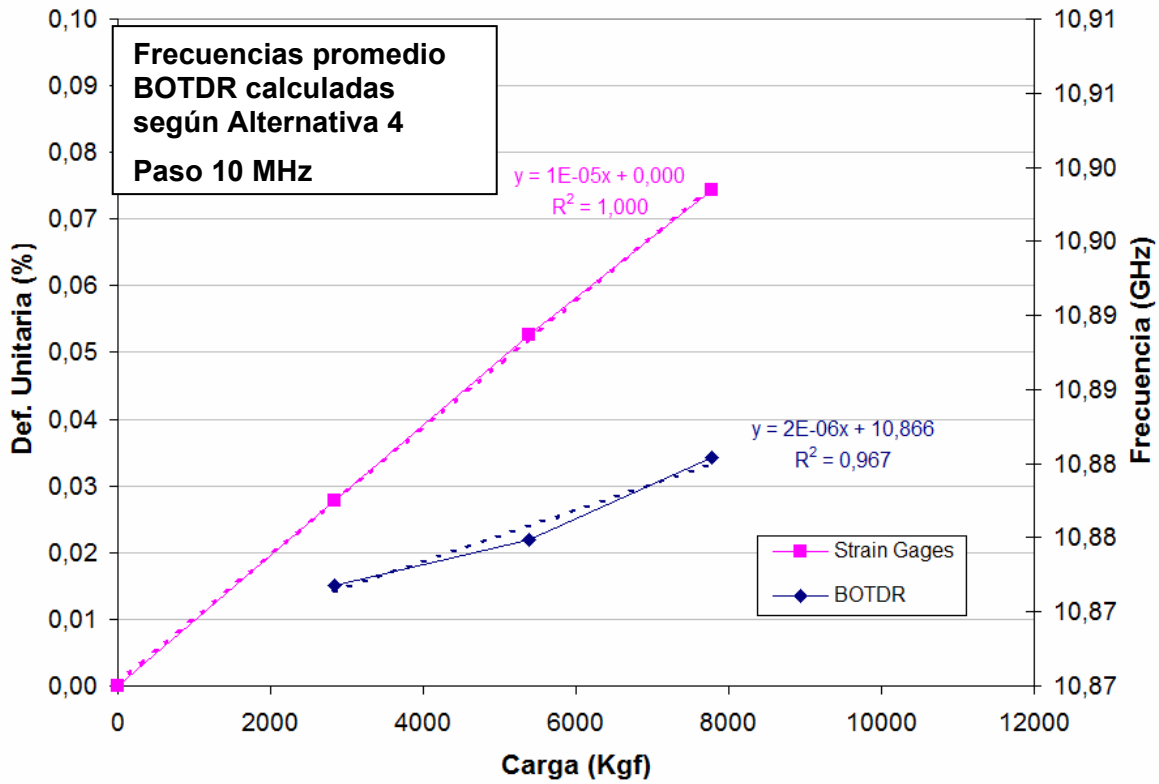


Fig. 7.2: Relación Strain Gages (%) y Frecuencia Promedio BOTDR (GHz) vs Carga (Kgf).
(Eliminando nivel más alto de carga). Ensayo B 21-feb-2008

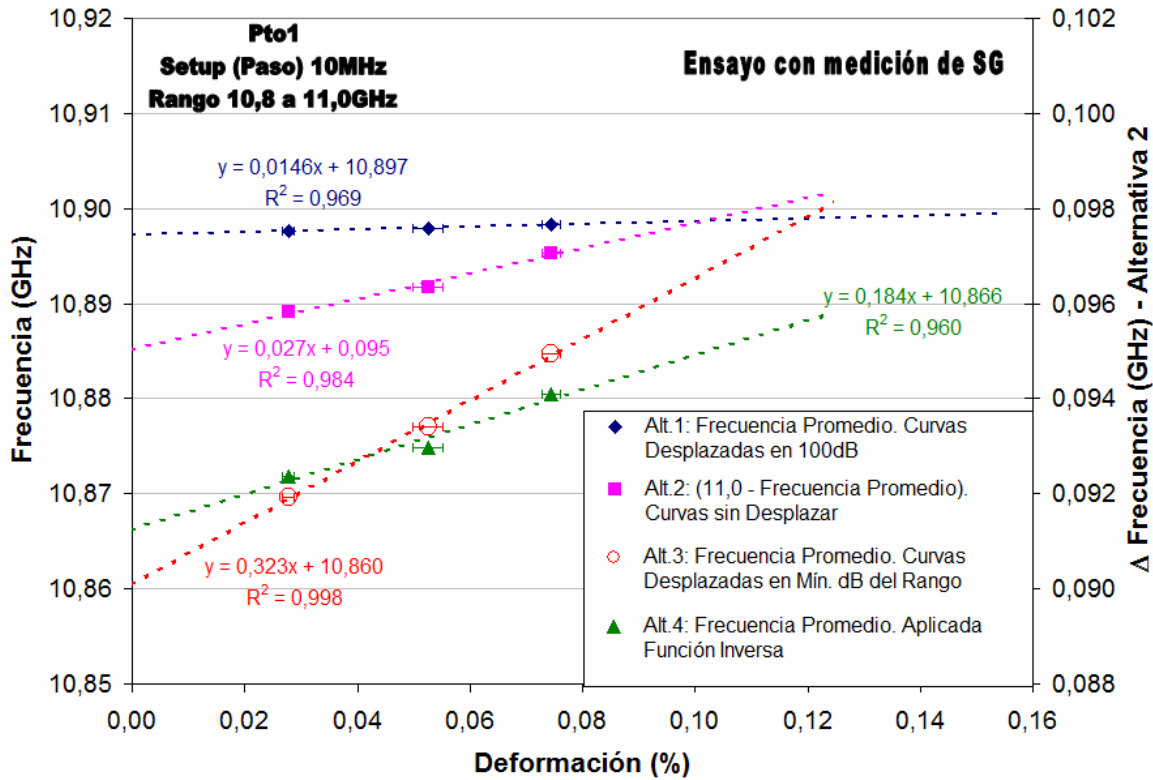


Fig. 7.3: Ensayo B 21-feb-2008 (en terreno, falla tipo bloque). Correlaciones obtenidas en el Punto 1 entre frecuencias promedio y deformación medida con Strain Gages, eliminando nivel más alto de carga. Setup en 10MHz.

Las bandas de correlaciones sólo permiten conocer, dado un valor de frecuencia promedio deducida, el valor aproximado de la deformación que puede esperarse en el anclaje. Esto se debe a la dispersión que hay entre datos para distintos tipos de ensayos, o entre distintos tramos de medición para un mismo tipo de ensayo. Por ejemplo, si se observan los datos del ensayo AG1 25-nov-2008, Paso 10MHz, alternativa 4, se encuentra que para una frecuencia promedio de 10,89GHz, las deformaciones del *Punto 1* y una vecindad de este, resultan del orden de 0.07%, en cambio, si se observa el *Punto 2*, esta deformación es del orden de 0.18% (ver Fig. 5.122 a Fig. 5.125 y Tabla 7.1). Este resultado no se considera confiable, si se asume una deformación uniforme en una sección transversal del perno, por lo cual se esperaría valores similares de deformación entre los *Puntos 1* y *2*, que en este caso se encuentran bastante cercanos entre sí, pero ubicados en superficies opuestas del manto del perno.

Tabla 7.1: Deducción de deformación unitaria mediante frecuencias promedio. Datos ensayo AG1 25-nov-2008 con paso 10MHz, alternativa 4.

Ubicación Relativa (Pto)	Frecuencia Promedio (GHz)	Def. Unitaria (%)	Pendiente R. Lineal (GHz/%)	Coef. Posición (GHz)
1	10,89	0,065	0,186	10,878
1+5cm	10,89	0,069	0,174	10,878
1+10cm	10,89	0,068	0,176	10,878
2	10,89	0,179	0,117	10,869

Una manera de reducir este rango de valores, puede lograrse realizando mayor cantidad de ensayos, para tener un registro estadístico más amplio y, además, fabricando figuras para un determinado tipo de grout y con datos de *Puntos 1 y 2* en forma separada. De tal manera, al momento de estudiar la evolución de anclajes en túneles, se escogería la curva (ábaco) según la ubicación estimada del punto en observación, para determinar los rangos de deformación que pueden esperarse en dicho punto. Además, como puede apreciarse desde la *Tabla 5.27* a la *Tabla 5.38*, se obtienen mejores correlaciones para el *Punto 1* y su vecindad. Por lo cual, un criterio práctico podría ser el considerar puntos de observación en lo posible ubicados en el tramo 1, considerando entonces ábacos confeccionados con datos para este tramo de fibra sensora. Sí se realiza dicho procedimiento con los datos de la *Tabla 7.1*, se estima una deformación de 0,07% para el perno en cuestión. El escoger la ubicación conveniente de puntos de observación, requiere contar con un mapeo bastante preciso de toda la longitud de la fibra.

La constante arbitraria utilizada en el método de automatización de búsqueda de *peaks*, puede estar correlacionada con propiedades del ensayo, por ejemplo, el grout utilizado en éste. De este modo, pueden definirse constantes dependiendo de este parámetro.

8. CONCLUSIONES

- Con el uso de fibra óptica BOTDR es posible medir deformaciones en pernos de anclaje a través del procedimiento de deducción de frecuencias promedio que modifica curvas de espectros invirtiendo la función decibel, es decir, aplicando la función $10^{\text{dB}/10}$ (alternativa 4).
- En base a las deformaciones obtenidas durante los ensayos, y siguiendo la alternativa 4, es posible definir una deformación umbral de alarma de 0,2%. De esta forma, una frecuencia promedio de 10,90GHz presenta una deformación inferior a este umbral.
- El procedimiento de monitoreo propuesto, para pernos de anclaje, consiste de las siguientes etapas:
 - 1) Escoger una determinada posición en la fibra sensora, la cual se encontrará adherida a un perno de anclaje instalado en la roca, y efectuar, mediante el sistema BOTDR, una lectura del espectro de frecuencia correspondiente.
 - 2) Modificar el espectro según la *alternativa 4* y deducir la frecuencia promedio asociada.
 - 3) Ingresar posteriormente con esta frecuencia en ábacos o gráficos de banda previamente elaborados utilizando la misma alternativa
 - 4) Intersectar la *recta promedio* trazada (de pendiente 0,17GHz/% y coeficiente 10,7GHz aproximadamente) sobre el gráfico, y deducir el potencial estado de deformación.
- El método propuesto para la instalación de fibra óptica sensora en pernos de anclaje (*alternativa de instalación 3, con protección de resina en zona del loop*), muestra ser satisfactorio, logrando proteger la fibra y permitiendo que ésta mantenga su capacidad de transmitir información. El pegamento finalmente escogido para adherir la fibra al perno, es de tipo metacrilato y se presenta en formato bi-componente.
- Los resultados del análisis mediante frecuencias promedio, muestran tendencias aceptables en el caso de ensayos en laboratorio (L), según las cuatro alternativas usadas, manteniendo en cada caso, coeficientes de correlación cercanos a 1. Los *ensayos tipo falla bloque* (B) muestran

resultados de mayor aleatoriedad, siendo posible observar tendencias aceptables en menor cantidad de casos, sin mostrar una supremacía clara de alguna de las alternativas. Por otra parte, los resultados de *ensayos tipo zona anclada* (A) son satisfactorios sólo en el caso del anclaje en resina epóxica y grout.

- Como consecuencia del análisis mediante frecuencias promedio, se determina que la alternativa 4 es aquella que presenta mejores resultados. Además, esta alternativa prácticamente no depende del rango de frecuencia (ancho de banda) escogido ni del *paso* ingresado como *input* o *setup* al sistema BOTDR. Las otras alternativas, en cambio, dependen fuertemente de estos parámetros, encontrándose mejores resultados para el rango entre 10,8 a 11,0 MHz y para un paso de 10MHz ingresado como input al software.
- El *método de automatización en la búsqueda de peaks* resulta efectivo, al menos, en la determinación de la tendencia de aumento de deformación del anclaje con el incremento de carga al que está sometido. Sin embargo, tiene la desventaja de depender en gran medida de la constante arbitraria escogida como límite para nivel de decaimiento de las curvas de espectro analizadas.

9. RECOMENDACIONES

9.1. Aplicación a Pernos de Anclaje

La aplicación práctica de la fibra óptica en pernos de anclaje y su instrumentación en túneles, puede efectuarse con un monitoreo central a través de una misma fibra óptica que permita obtener deformaciones en un conjunto de pernos. Estos deben instrumentarse independientemente y considerando las precauciones y metodología descrita en este trabajo. Finalmente, una vez instalados en terreno, incluyendo el ensamblaje de las placas de sujeción, los extremos libres de fibra óptica de estos pernos, son fusionados para formar un tramo continuo que incluya al conjunto.

9.2. De Futuros Estudios

Se deben estudiar estados más altos de carga-deformación en ensayos, los cuales no fueron posibles de alcanzar durante la presente investigación, debido al mecanismo de aplicación de carga y la consecuente deformación excesiva de placas de sujeción; induciendo el corte o daño de la fibra. Esto permitirá visualizar, con mayor profundidad, el tipo de resultados que se esperaran bajo una situación de alerta para el sistema de soporte monitoreado mediante la tecnología BOTDR.

Es necesario realizar pruebas en anclajes instalados en túneles de la mina El Teniente, para corroborar los resultados obtenidos mediante los modelos utilizados en la presente investigación. Adicionalmente, es recomendable continuar la realización de ensayos modelo, ya sean del tipo B (falla tipo bloque) o de los tipos AH, AR, AG (tipo zona anclada), con el mismo propósito mencionado. Debe tenerse en cuenta además, que en los ensayos tipo B y AH, no se utilizó el pegamento de mejor comportamiento según lo concluido mediante esta investigación, por lo cual resulta probable que los resultados presentados por este tipo de ensayos, mejoren al considerar esta incorporación.

Es de suma importancia contar además, con mayor cantidad de mediciones de strain gages, así como también incorporar sistemas de medición de deformación externos, de alta precisión, para tener una mayor base de comparación y contraste de resultados.

La metodología propuesta en esta investigación, que utiliza frecuencias promedio deducidas mediante la alternativa 4, no depende de parámetros que deban ser fijados manualmente. Por lo tanto es recomendable que sea automatizada, tanto para la obtención de correlaciones y confección de gráficos de banda, como para la utilización de estos gráficos en la evaluación de frecuencias promedio; obtenidas de anclajes instrumentados e instalados en la mina. De esta forma, es posible crear un sistema de monitoreo y alarma para estos dispositivos.

10. REFERENCIAS

1. Agrawal, G. P., (2001), "Nonlinear Fiber Optics", The Institute of Optics, University of Rochester, Academic Press.
2. Aydan, O., (1989), "The stabilization of engineering structures by rockbolts", D.Eng. thesis, Nagoya University, Japan.
3. Benado, D., (2009), Comunicación Privada, Codelco Chile, División El Teniente, Rancagua.
4. Benado, D., (2004), Informe Interno SGL-176-2004, Codelco Chile, División El Teniente, Rancagua.
5. Centro de Modelamiento Matemático (CMM), Universidad de Chile, Informe Interno a CORFO Innova Chile BOTDR (2008).
6. Centro de Modelamiento Matemático (CMM), Universidad de Chile, Informe Interno a CORFO Innova Chile BOTDR (2009).
7. Codelco Chile, División El Teniente, Rancagua, Plan de Negocios y Desarrollo, PND 2009, (2008).
8. Cotter, D., (1983), "Stimulated Brillouin scattering in monomode optical fiber", J. Opt. Commun., vol.4, no.1, pp.10-19.
9. DSI – Soprofint, sitio electrónico, extraído desde http://www.dsi-soprofint.cl/index_prod.html, (2008).
10. Farmer, I.W., (1975), "Stress distribution along a resin-grouted anchor", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. geomech. Abstr., 12, 1975, 347–51.
11. Gerdau Aza, sitio electrónico, extraído desde http://www.gerdauaza.cl/Prods_Helicoidal.asp, (2008).
12. Grupo Polpaico, sitio electrónico, extraído desde <http://www.holcim.cl/cl>, (2008).
13. Horiguchi, T. and Tateda, M., (1989), "BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory", IEEE/OSA Lightwave Technol., vol. LT-7, no.8, pp.1170-1176.

14. Horiguchi, T., Shimizu, K., Kurashima, T., Tateda, M., and Koyamada, Y., (1995), "Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering", *J. Lightwave Technol.*, vol.13, no.7, pp.1296-1302.
15. Horiguchi, T., Shimizu, K., Kurashima, T., Tateda, M., and Koyamada, Y., (1995), "Advances in distributed sensing techniques using Brillouin scattering", *Proc. SPIE*, vol.2507, pp.126-135.
16. Hornbeck, R. W., (1975), "Numerical Methods", Quantum, New York.
17. Hotate, K. and Hasegawa, T., (2000), "Measurement of Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber using a correlation-based technique-Proposal, experiment and simulation", *IEICE Trans. Electron.*, vol.E83-C, no.3, pp.405-412.
18. Hyett, A.J., Bawden, W.F. and Reichert, R.D., (1992), "The Effect of Rock Mass Confinement on the Bond Strength of Fully Grouted Cable Bolts", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr.*, Vol 29, no. 5, pp. 503-524.
19. Kurashima, T., Horiguchi, T., Izumita, H., Furukuwa, S. and Koyamada, Y., (1993), "Brillouin optical-fiber time domain reflectometry", *IEICE Trans. Commun.*, vol.E76-B, no.4, pp.382-390.
20. Kyowa, sitio electrónico, extraído desde <http://www.kyowa-ei.co.jp/english/products/gages/pdf/bridge.pdf>, (2008).
21. Laboratoire Léon Brillouin, sitio electrónico, extraído desde <http://www-llb.cea.fr/>, (2008).
22. Loctite, sitio electrónico, extraído desde <http://www.loctite.cl/>, (2008).
23. Mehra, J. and Rechenberg, H., (2001), "The Historical Development of Quantum Theory", Volume 5, Erwin Schrödinger and the Rise of Wave Mechanics. Part 2 Schrödinger in Vienna and Zurich, 1887-1925.
24. Mosseri, R. (1999), "Léon Brillouin, A la Croisée des Ondes", Belin.
25. Moosavi, M., Bawden, W.F. and Hyett, A.J., (2002), "Mechanism of bond failure and load distribution along fully grouted cable-bolts", *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Sect. A, Min. technol.*, 111.
26. Murayama, H., Kageyama, K., Naruse, H. and Shimada, A. (2004), "Distributed strain sensing from damaged composite materials based on shape variation of the

- Brillouin Spectrum”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 15, 17-25.
27. Naruse, H. and Tateda, M., (2001), “Optimum temporal pulse shape of launched light for optical time domain reflectometry type sensors using Brillouin backscattering”, Optical Review, vo.8, no.2, pp.126-132.
 28. National Instruments (NI), sitio electrónico, extraído desde <http://www.ni.com/es/>, (2008)
 29. Nippon Telegraph & Telephone Corporation Group (NTT), (2007), Informe Interno.
 30. Ohsaki, M., Tateda, M., Omatsu, T. and Ohno, H., (2002), “Spatial Resolution Enhancement of Distributed Strain Measurement Using BOTDR by Partially Gluing Optical Fiber”, IEICE Trans. Commun., Vol.E85-B, N°8.
 31. Oxford University Press, (2005), “A Dictionary of Science”, Market House Books Ltd., Great Britain.
 32. RP-Photonics, “Encyclopedia of Laser Physics and Technology”, sitio electrónico, extraído desde <http://www.rp-photonics.com/>, (2008).
 33. Stan Gibilisco, (2001), “The Illustrated Dictionary of Electronics”, McGraw-Hill, United States of America.
 34. Tokyo Sokki Kenkyujo, TML, sitio electrónico, extraído desde <http://www.tml.jp/e/>, (2008).
 35. Windsor, C.R., (1992), “Cable bolting for underground and surface excavations”, Rock support in mining and underground construction, Invited lecture.
 36. Wolfram MathWorld, sitio electrónico, extraído desde <http://mathworld.wolfram.com/>, (2008).
 37. Wu, Z., Xu, B., Hayashi, K. and Machida, A., (2006), “Distributed Fiber Optic Sensing for a Full-scale PC Girder Strengthened with Prestressed PBO Sheets”, Engineering Structures, 28(7), 1049-1059.
 38. Yablon, A. D., (2005), “Optical Fiber Fusion Splicing”, Springer-Verlag, Heidelberg, 2-13.

39. Zhang, D., Shi, B., Cui, H.L. and Xu, H.Z., (2004), "Improvement of spatial resolution of Brillouin optical time domain reflectometer using spectral decomposition", *Optica Applicata*, 34(2), 291-301.
40. Zhang, H. and Wu, Z., (2008), "Performance Evaluation of BOTDR-based Distributed Fiber Optic Sensors for Crack Monitoring", *Structural Health Monitoring OnlineFirst*, Department of Urban and Civil Engineering, Ibaraki University, Japan.

ANEXO A: Figuras Anexas de Resultados de Ensayos

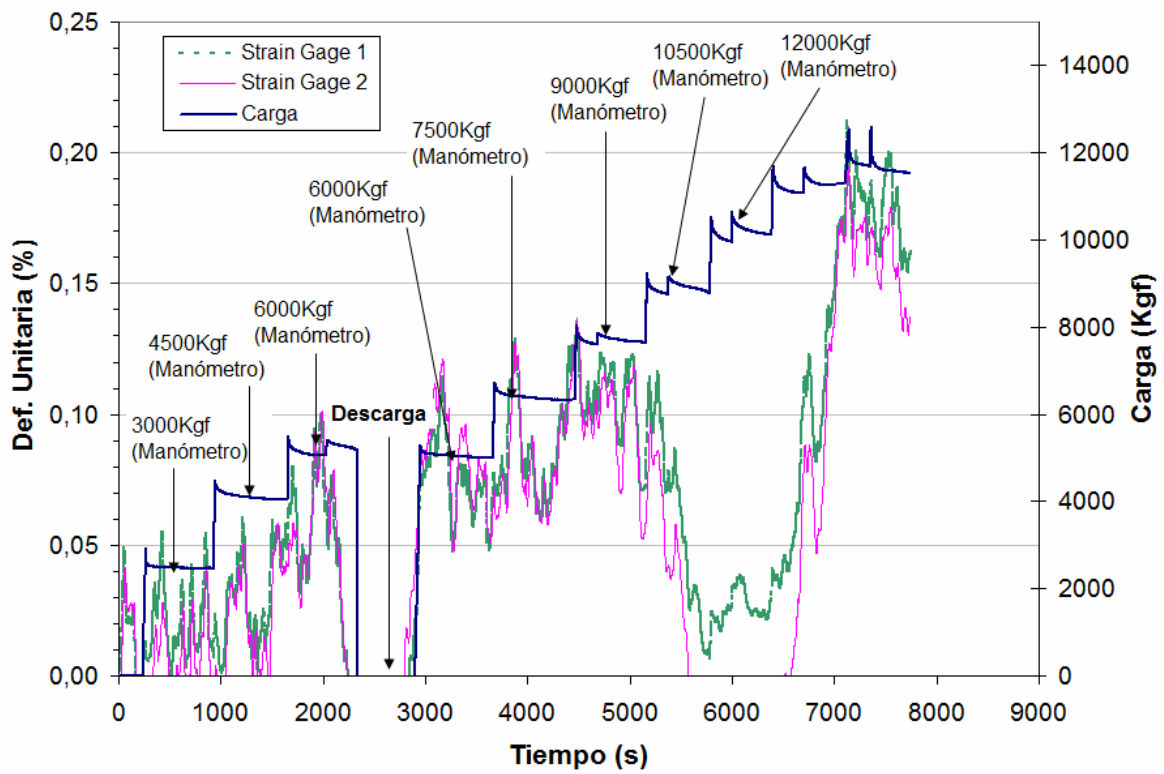


Fig. A. 1: Lecturas de strain gages y celda de carga durante ensayo AR 22-ago-2008.

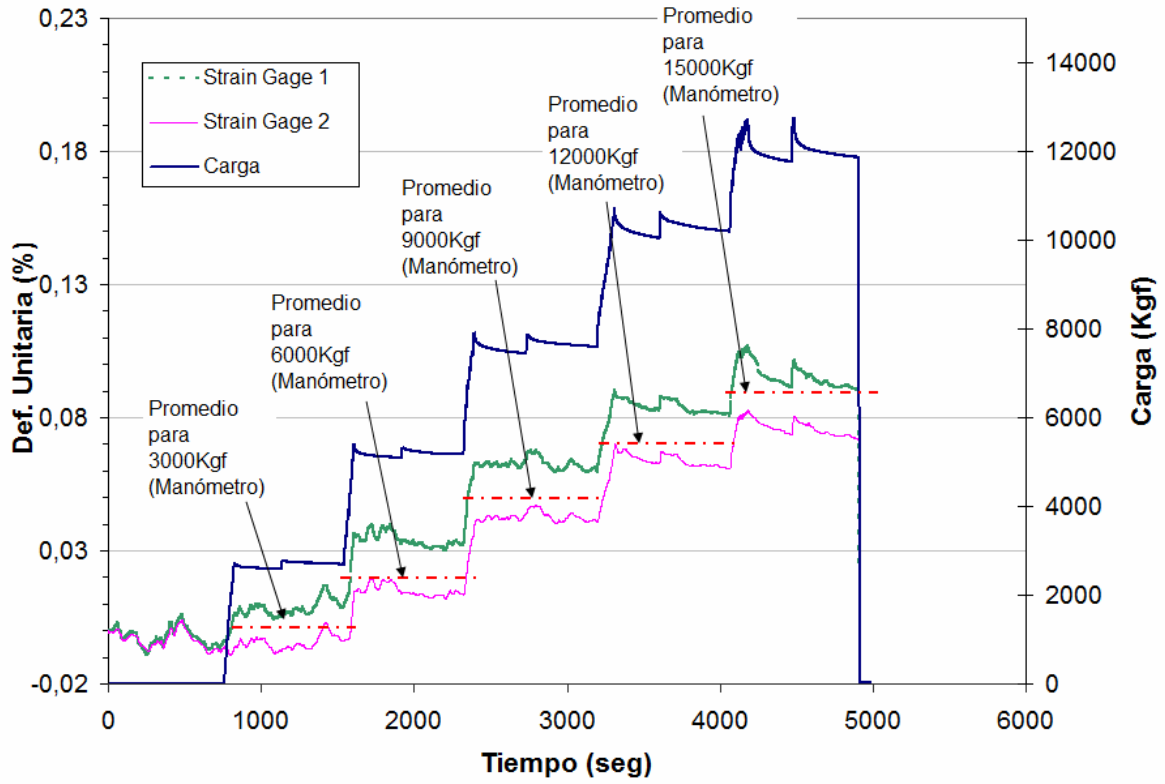


Fig. A. 2: Lecturas de strain gages y celda de carga durante ensayo AR 08-sep-2008.

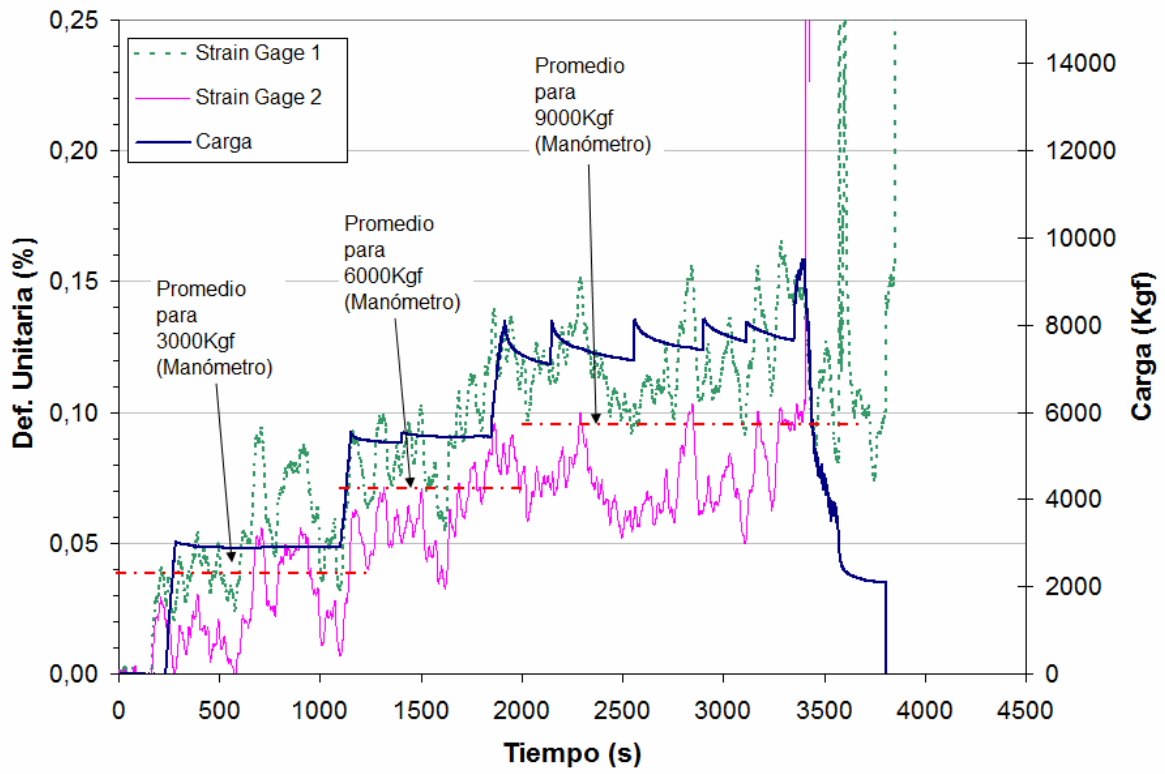


Fig. A. 3: Lecturas de strain gages y celda de carga durante ensayo AG1 25-nov-2008.

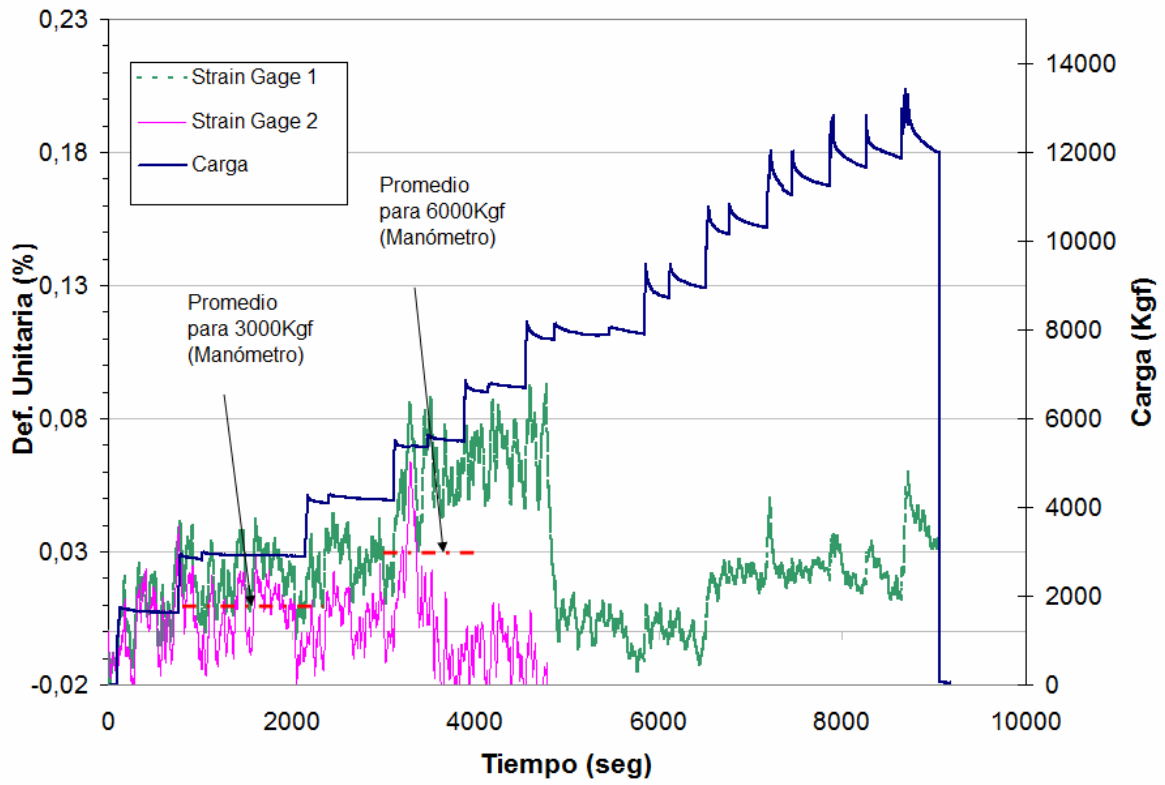


Fig. A. 4: Lecturas de strain gages y celda de carga durante ensayo AG2 25-nov-2008.

ANEXO B: Fotografías Anexas de la Investigación



Fig. B. 1: Armadura en losa de hormigón (7x2,6m). Barras A63-42H (Φ 18mm) con resalte.



Fig. B. 2: Hormigonado losa. Vista 1.



Fig. B. 3: Hormigonado losa. Vista 2.



Fig. B. 4: Hormigonado losa. Vista 3.



Fig. B. 5: Celda de carga



Fig. B. 6: Placa de sujeción deformada después de un ensayo en falla tipo bloque.

ANEXO C: Mapeos de la Instrumentación de Pernos

Tabla C. 1: Mapeo barra L1 para ensayo a tracción pura en laboratorio (ensayo L 26-nov-2007).

Barra L1. Instrumentada con sistema BOTDR		
Fecha ensayo	26 de noviembre de 2007	
Pegamento utilizado para pegar fibra	POXIPOL (y amarras)	
Tipo de loop	Loop largo de fibra embossing (Sin protección)	
Código ensayo	L 26-nov-2007	
Descripción	Tracción pura en laboratorio	
Sección o Tramo	Descripción	Posición absoluta (m)
Suelta	Fin fibra amarilla (no sensora) de conexión desde equipo ADVANTEST	2,12
Suelta	Fin fibra de acercamiento (no sensora)	4,52
Suelta	Fin tubo plástico de protección (zona fusionada)	4,81
Tramo 1: Amarras Plásticas	Fin fibra embossing suelta antes de barra - Inicio amarras	7,66
	1er Strain Gage	8,03
	2do Strain Gage	8,43
	Fin amarras - Inicio loop	8,57
Suelta	Loop de 0,77m de fibra embossing	
Tramo 2: POXIPOL	Fin Loop - Inicio pegamento	9,34
	2do Strain Gage (por detrás)	9,48
	1er Strain Gage (por detrás)	9,88
	Fin pegamento - Inicio fibra embossing suelta	10,23
Suelta	Fin fibra embossing suelta	10,66

Tabla C. 2: Mapeo barra L2 para ensayo a tracción pura en laboratorio (ensayo L 26-dic-2007).

Barra L2. Instrumentada con sistema BOTDR		
Fecha ensayo	26 de diciembre de 2007	
Pegamento utilizado para pegar fibra	Flexible, Polvo Gris, La Gotita, Poxipol.	
Tipo de loop	Loop largo de fibra embossing (Sin protección)	
Código ensayo	L 26-dic-2007	
Descripción	Tracción pura en laboratorio	
Sección o Tramo	Descripción	Posición absoluta (m)
Suelta	Fin fibra amarilla (no sensora) de conexión desde equipo ADVANTEST	2,12
Suelta	Fin fibra de acercamiento (no sensora)	5,02
Suelta	Fin tubo plástico de protección (zona fusionada)	5,29
Tramo 1a: Pegamento Flexible	Fibra Embossing Suelta Antes de Barra - Inicio pegamento flexible	7,11
	1er Strain Gage	7,35
	2do Strain Gage	7,55
	Fin pegamento flexible - Inicio pegamento polvo gris	7,61
Tramo 1b: Polvo Gris	3er Strain Gage	7,75
	4to Strain Gage	7,95
	Fin pegamento polvo gris - Inicio Loop	8,05
Suelta	Loop de 1,12m de fibra embossing	
Tramo 2a: La Gotita	Fin Loop - Inicio pegamento gotita	9,17
	4to Strain Gage (por detrás)	9,28
	3er Strain Gage (por detrás)	9,48
	Fin pegamento gotita - Inicio pegamento Poxipol	9,62
Tramo 2b: POXIPOL	2do Strain Gage (por detrás)	9,68
	1er Strain Gage (por detrás)	9,78
	Fin pegamento poxipol - Inicio Fibra Suelta	10,12
Suelta	Fin fibra embossing suelta	11,12

Tabla C. 3: Mapeo barra 4 para ensayo falla tipo bloque (ensayo B 23-ene-2008).

Barra 4. Instrumentada con sistema BOTDR		
Fecha ensayo	23 de enero de 2008	
Pegamento utilizado para pegar fibra	Polvo Metálico	
Tipo de loop	Loop largo de fibra embossing con fusión intermedia (Sin protección)	
Código ensayo	B 23-ene-2008	
Descripción	Falla tipo bloque	
Sección o Tramo	Descripción	Posicion absoluta (m)
Suelta	Fin fibra amarilla (no sensora) de conexión desde equipo ADVANTEST	2,12
Suelta	Fin fibra de acercamiento (no sensora)	5,00
Suelta	Fin tubo plástico de protección (zona fusionada)	5,27
Tramo 1: POLVO METÁLICO	Fin fibra embossing suelta antes de barra - Inicio pegamento	7,30
	1er Strain Gage	7,62
	2do Strain Gage	7,83
	Fin pegamento - Inicio loop	7,98
Suelta	Loop de: 0,46 m de fibra embossing + fusión + 0,50 m de fibra embossing	
Tramo 2: POLVO METÁLICO	Fin Loop - Inicio pegamento	8,94
	2do Strain Gage (por detrás)	9,09
	1er Strain Gage (por detrás)	9,29
	Fin pegamento - Inicio fibra embossing suelta	9,61
Suelta	Fin fibra embossing suelta	11,24

Tabla C. 4: Mapeo barra 8 (reutilizada) para ensayo falla tipo bloque (ensayo B 21-feb-2008).

Barra 8 (reutilizada). Instrumentada con sistema BOTDR		
Fecha ensayo	21 de febrero de 2008	
Pegamento utilizado para pegar fibra	Rígido	
Tipo de loop	Loop corto de fibra flexible (Sin protección)	
Código ensayo	B 21-feb-2008	
Descripción	Falla tipo bloque	
Sección o Tramo	Descripción	Posición absoluta (m)
Suelta	Fin fibra amarilla (no sensora) de conexión desde equipo ADVANTEST	2,12
Suelta	Fin fibra de acercamiento (no sensora)	4,78
Suelta	Fin tubo plástico de protección (zona fusionada)	5,06
Tramo 1: Pegamento Rígido	Fin fibra embossing suelta antes de barra - Inicio pegamento	5,72
	1er Strain Gage	5,99
	2do Strain Gage	6,20
	Fin pegamento - Inicio tubo plástico (zona fusionada)	6,26
	Fin tubo plástico (zona fusionada) - Inicio loop	6,45
Suelta	Loop de: 0,22 m de fibra flexible contenida en la barra	
Tramo 2: Pegamento Rígido	Fin Loop - Inicio Tubo 2 (zona fusionada)	6,67
	Fin Tubo 2 (zona fusionada) - Inicio pegamento	6,86
	2do Strain Gage (por detrás)	6,91
	1er Strain Gage (por detrás)	7,12
	Fin pegamento - Inicio Fibra	7,39
Suelta	Fin fibra embossing suelta	8,53

Tabla C. 5: Mapeo barra 01 para ensayo tipo zona anclada en hormigón (ensayo AH 26-feb-2008).

Barra 01. Instrumentada con sistema BOTDR		
Fecha ensayo	26 de febrero de 2008	
Pegamento utilizado para pegar fibra	POXIPOL (y amarras)	
Tipo de loop	Loop largo de fibra embossing (Sin protección)	
Código ensayo	AH 26-feb-2008	
Descripción	Zona anclada en hormigón	
Sección o Tramo	Descripción	Posición absoluta (m)
Suelta	Fin fibra amarilla (no sensora) de conexión desde equipo ADVANTEST	2,12
Suelta	Fin fibra de acercamiento (no sensora)	5,02
Suelta	Fin tubo plástico de protección (zona fusionada)	5,25
Tramo 1: Amarras Plásticas	Fin fibra embossing suelta antes de barra - Inicio amarras	8,27
	1er Strain Gage	8,61
	2do Strain Gage	9,01
	Fin amarras - Inicio loop	9,29
Suelta	Loop de 0,66m de fibra embossing	
Tramo 2: POXIPOL	Fin Loop - Inicio pegamento	9,95
	2do Strain Gage (por detrás)	10,23
	1er Strain Gage (por detrás)	10,63
	Fin pegamento - Inicio fibra embossing suelta	10,97
Suelta	Fin fibra embossing suelta	11,75

Tabla C. 6: Mapeo barra 02 para ensayo tipo zona anclada en hormigón (ensayo AH 18-jul-2008).

Barra 02. Instrumentada con sistema BOTDR		
Fecha ensayo	18 de julio de 2008	
Pegamento utilizado para pegar fibra	POXIPOL (y amarras)	
Tipo de loop	Loop largo de fibra embossing (Sin protección)	
Código ensayo	AH 18-jul-2008	
Descripción	Zona anclada en hormigón	
Sección o Tramo	Descripción	Posición absoluta (m)
Suelta	Fin fibra amarilla (no sensora) de conexión desde equipo ADVANTEST	2,12
Suelta	Fin fibra de acercamiento (no sensora)	5,02
Suelta	Fin Tubo plástico (zona fusionada)	5,28
Tramo 1: Amarras Plásticas	Fin fibra embossing suelta antes de barra - Inicio amarras	8,56
	1er Strain Gage	8,77
	2do Strain Gage	9,17
	Fin amarras - Inicio loop	9,45
Suelta	Loop de 0,64m de fibra embossing	
Tramo 2: POXIPOL	Fin Loop - Inicio pegamento	10,08
	2do Strain Gage (por detrás)	10,36
	1er Strain Gage (por detrás)	10,76
	Fin pegamento - Inicio fibra embossing suelta	10,95
Suelta	Fin fibra embossing suelta	11,55

Tabla C. 7: Mapeo barra 05 para ensayo tipo zona anclada con resina (ensayo AR 22-ago-2008).

Barra 05. Instrumentada con sistema BOTDR		
Fecha ensayo	22 de agosto de 2008	
Pegamento utilizado para pegar fibra	LOCTITE H3151	
Tipo de loop	Loop corto de fibra flexible (Con protección de resina)	
Código ensayo	AR 22-ago-2008	
Descripción	Zona anclada con resina	
Sección o Tramo	Descripción	Posicion absoluta (m)
Suelta	Fin fibra amarilla (no sensora) de conexión desde equipo ADVANTEST	2,12
Suelta	Fin fibra de acercamiento (no sensora)	4,82
Tramo 1: LOCTITE	Fin fibra embossing suelta antes de barra - Inicio pegamento	6,63
	1er Strain Gage	6,72
	2do Strain Gage	6,92
	Fin pegamento - Inicio loop	7,12
Suelta	Loop de: 0,15m de fibra embossing + 0,17m de fibra flexible+ 0,14m de fibra embossing	
Tramo 2: LOCTITE	Fin Loop - Inicio pegamento	7,58
	2do Strain Gage (por detrás)	7,74
	1er Strain Gage (por detrás)	7,94
	Fin pegamento - Inicio fibra embossing suelta	8,03
Suelta	Fin fibra embossing suelta	9,96

Tabla C. 8: Mapeo barra 06 para ensayo tipo zona anclada con resina (ensayo AR 22-ago-2008).

Barra 06. Instrumentada con sistema BOTDR		
Fecha ensayo	08 de septiembre de 2008	
Pegamento utilizado para pegar fibra	LOCTITE H3151	
Tipo de loop	Loop corto de fibra flexible (Con protección de resina)	
Código ensayo	AR 08-sep-2008	
Descripción	Zona anclada con resina	
Sección o Tramo	Descripción	Posicion absoluta (m)
Suelta	Fin fibra amarilla (no sensora) de conexión desde equipo ADVANTEST	2,12
Suelta	Fin fibra de acercamiento (no sensora)	5,02
Tramo 1: LOCTITE	Fin fibra embossing suelta antes de barra - Inicio pegamento	6,83
	1er Strain Gage	6,94
	2do Strain Gage	7,14
	Fin pegamento - Inicio loop	7,31
Suelta	Loop de: 0,15m de fibra embossing + 0,14m de fibra flexible + 0,16m de fibra embossing	
Tramo 2: LOCTITE	Fin Loop - Inicio pegamento	7,76
	2do Strain Gage (por detrás)	7,91
	1er Strain Gage (por detrás)	8,11
	Fin pegamento - Inicio fibra embossing suelta	8,22
Suelta	Fin fibra embossing suelta	10,06

Tabla C. 9: Mapeo barra 08 para ensayo tipo zona anclada con grout (ensayo AG1 25-nov-2008).

Barra 08. Instrumentada con sistema BOTDR		
Fecha ensayo	25 de noviembre de 2008	
Pegamento utilizado para pegar fibra	LOCTITE H3151	
Tipo de loop	Loop corto de fibra flexible (Con protección de resina)	
Código ensayo	AG1 25-nov-2008	
Descripción	Zona anclada con grout (lechada cemento)	
Sección o Tramo	Descripción	Posición absoluta (m)
Suelta	Fin fibra amarilla (no sensora) de conexión desde equipo ADVANTEST	2,12
Suelta	Fin fibra de acercamiento (no sensora)	4,15
Tramo 1: LOCTITE	Fin fibra embossing suelta antes de barra - Inicio pegamento	5,99
	1er Strain Gage	6,09
	2do Strain Gage	6,29
	Fin pegamento - Inicio loop	6,44
Suelta	Loop de: 0,15 m de fibra embossing + 0,14 m de fibra flexible + 0,14 m de fibra embossing	
Tramo 2: LOCTITE	Fin Loop - Inicio pegamento	6,87
	2do Strain Gage (por detrás)	7,07
	1er Strain Gage (por detrás)	7,27
	Fin pegamento - Inicio fibra embossing suelta	7,37
Suelta	Fin fibra embossing suelta	9,18

Tabla C. 10: Mapeo barra 09 para ensayo tipo zona anclada con grout (ensayo AG2 25-nov-2008).

Barra 09. Instrumentada con sistema BOTDR		
Fecha ensayo	25 de noviembre de 2008	
Pegamento utilizado para pegar fibra	LOCTITE H3151	
Tipo de loop	Loop corto de fibra flexible (Con protección de resina)	
Código ensayo	AG2 25-nov-2008	
Descripción	Zona anclada con grout (lechada cemento)	
Sección o Tramo	Descripción	Posicion absoluta (m)
Suelta	Fin fibra amarilla (no sensora) de conexión desde equipo ADVANTEST	2,12
Suelta	Fin fibra de acercamiento (no sensora)	4,54
Tramo 1: LOCTITE	Fin fibra embossing suelta antes de barra - Inicio pegamento	6,39
	1er Strain Gage	6,49
	2do Strain Gage	6,69
	Fin pegamento - Inicio loop	6,87
Suelta	Loop de: 0,14 m de fibra embossing + 0,17 m de fibra flexible + 0,15 m de fibra embossing	
Tramo 2: LOCTITE	Fin Loop - Inicio pegamento	7,33
	2do Strain Gage (por detrás)	7,50
	1er Strain Gage (por detrás)	7,70
	Fin pegamento - Inicio fibra suelta	7,81
Suelta	Fin fibra embossing	9,63

ANEXO D: Detalle Puntos 1 y 2 de Observación.

Tabla D. 1: Detalle ubicación Puntos 1 y 2 escogidos para análisis de resultados BOTDR.

Ensayo	Tipo Ensayo	Step Freq (MHz)	Largo por Tramo de Fibra Pegada (m)	Ubicación Puntos de Observación Según Mapeo (m)	
				Punto 1	Punto 2
L 26-nov-2007	Laboratorio – Tracción	20	0,9	7,804	9,476
L 26-dic-2007	Laboratorio – Tracción	10	0,95	7,348	9,274
		20			
B 23-ene-2008	Terreno – Falla Tipo Bloque	10	0,67	7,855	9,071
		20			
B 21-feb-2008	Terreno – Falla Tipo Bloque	10	0,73	6,233	6,892
		20			
AH 26-feb-2008	Terreno – Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	0,92	8,615	10,034
		20			
AH 18-jul-2008	Terreno – Tipo Zona Anclada en Hormigón	10	0,87	9,071	10,490
AR 22-ago-2008	Terreno – Tipo Zona Anclada con Resina	10	0,47	6,892	7,703
		20			
AR 08-sep-2008	Terreno – Tipo Zona Anclada con Resina	10	0,47	7,044	7,905
		20			
AG1 25-nov-2008	Terreno – Tipo Zona Anclada con Grout	10	0,48	6,233	7,044
		20			
AG2 25-nov-2008	Terreno – Tipo Zona Anclada con Grout	10	0,48	6,537	7,449
		20			

ANEXO E: Lecturas a través de *software N8510*[®]

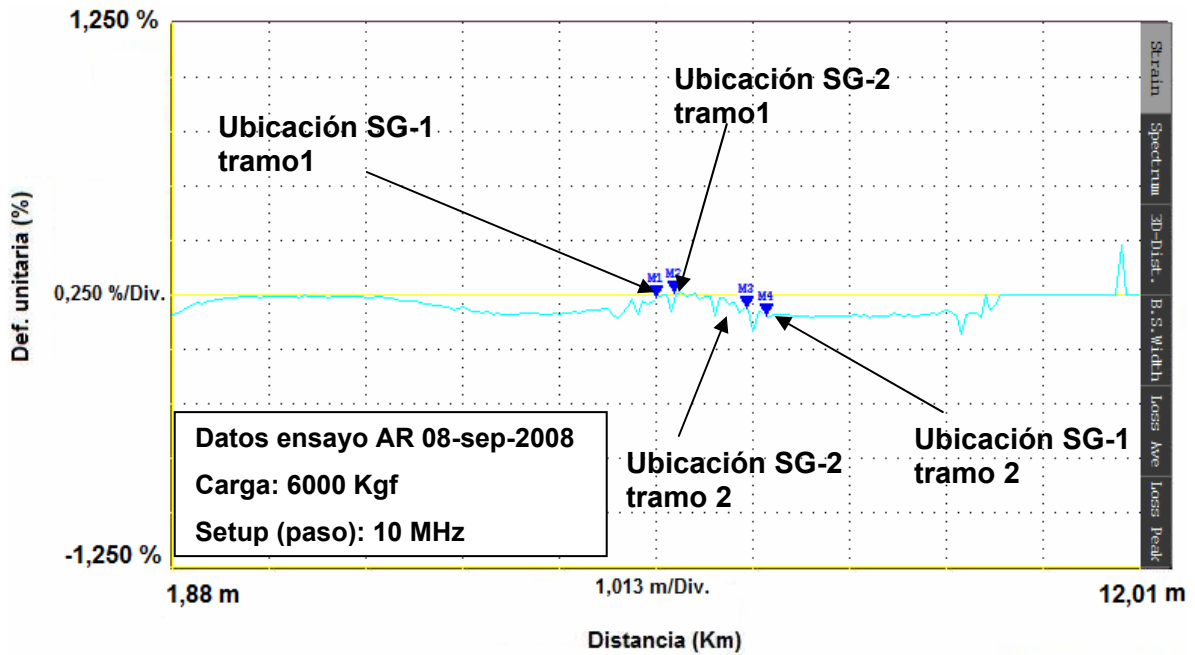


Fig. E. 1: Deformación unitaria versus distancia, entregada por sistema BOTDR. Datos ensayo AR 08-sep-2008, 6000Kgf.

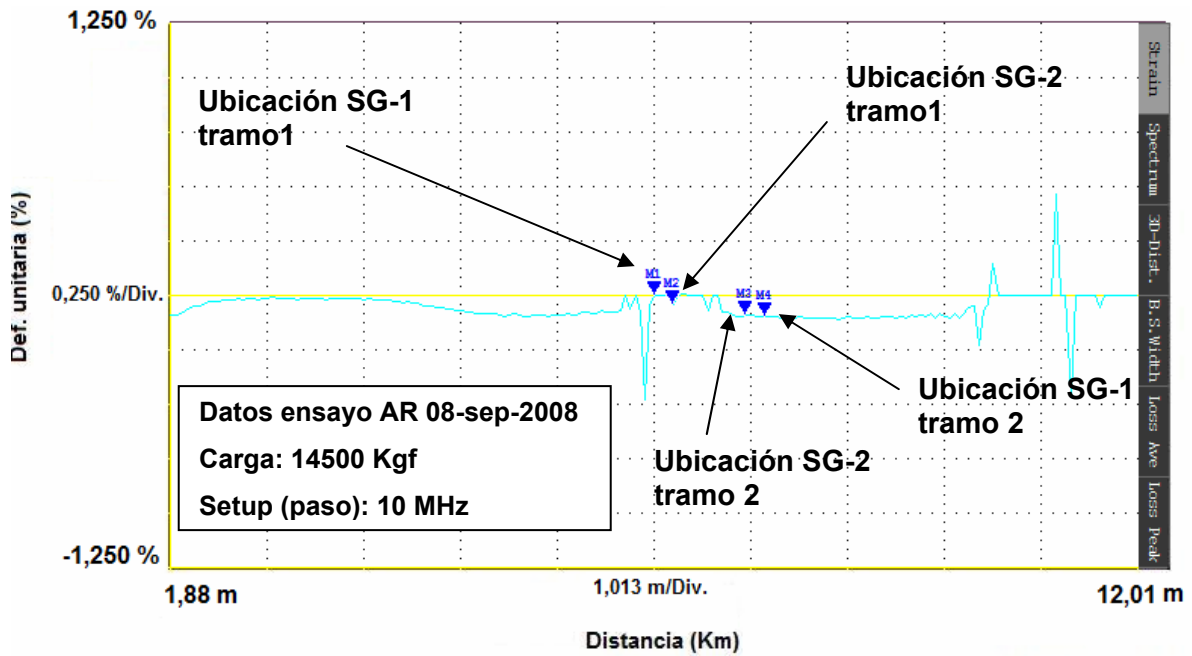


Fig. E. 2: Deformación unitaria versus distancia, entregada por sistema BOTDR. Datos ensayo AR 08-sep-2008, 14500Kgf.

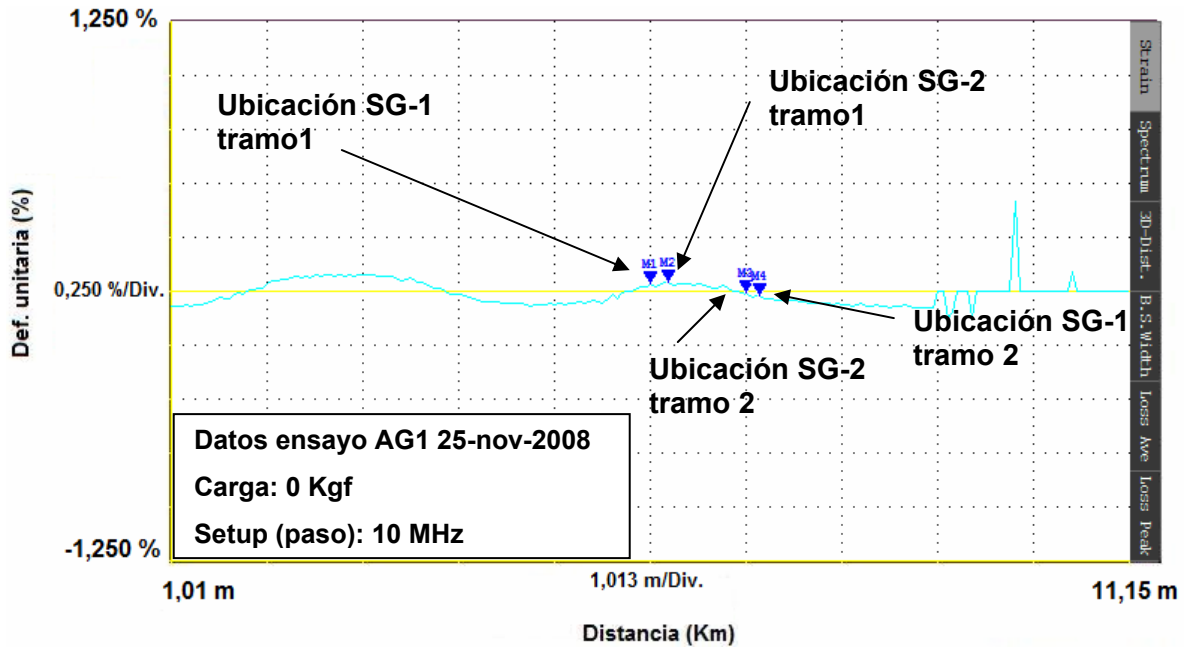


Fig. E. 3: Deformación unitaria versus distancia, entregada por sistema BOTDR. Datos ensayo AG1 25-nov-2008, sin carga (0Kgf).

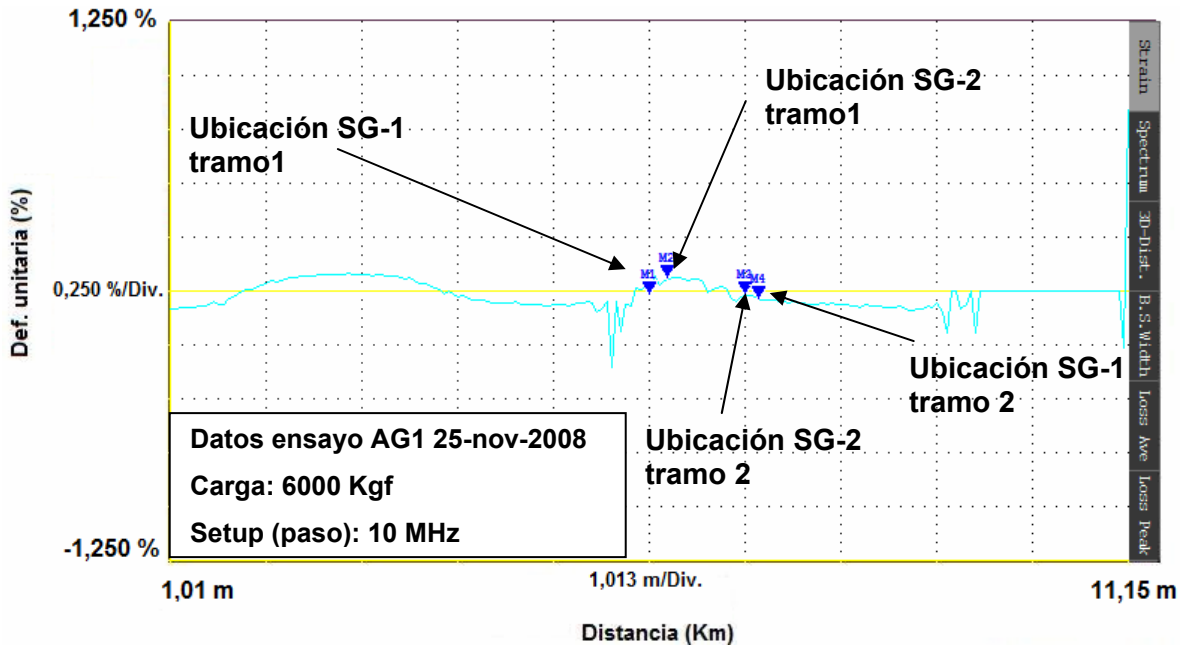


Fig. E. 4: Deformación unitaria versus distancia, entregada por sistema BOTDR. Datos ensayo AG1 25-nov-2008, 6000Kgf.

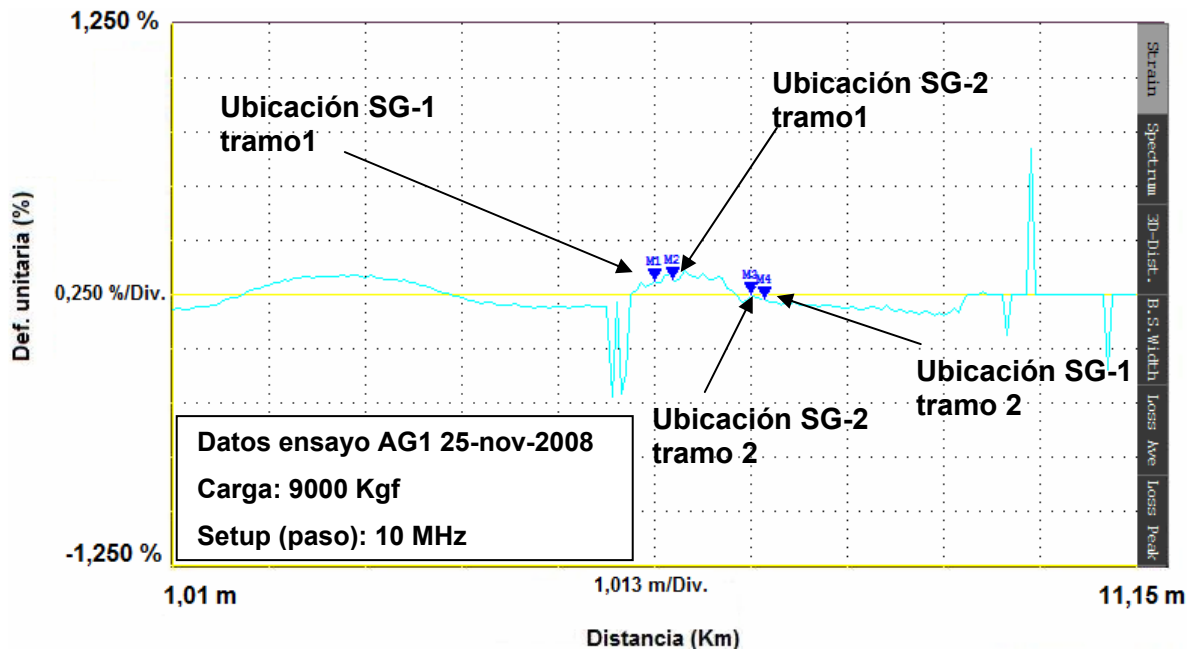


Fig. E. 5: Deformación unitaria versus distancia, entregada por sistema BOTDR. Datos ensayo AG1 25-nov-2008, 9000Kgf.

ANEXO F: Tablas con correlaciones de frecuencias promedio versus deformación unitaria de strain gages.

Tabla F. 1: Ensayo L 26-nov-2007, paso 20MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
Punto 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,025	0,880	10,895
		2	Si	0,044	0,905	0,091
		3	Si	0,087	0,892	10,875
		4	Si	0,179	0,951	10,861
Punto 1+5cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,020	0,908	10,896
		2	Si	0,035	0,926	0,092
		3	No	0,118	0,949	10,866
		4	Si	0,173	0,951	10,861
Punto 1+10cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,024	0,854	10,895
		2	Si	0,042	0,872	0,091
		3	No	0,075	0,834	10,876
		4	Si	0,169	0,933	10,862
Punto 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,020	0,980	10,895
		2	Si	0,035	0,977	0,092
		3	Si	0,159	0,919	10,860
		4	Si	0,209	0,997	10,852

Tabla F. 2: Ensayo L 26-dic-2007, paso 10MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
Punto 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,011	0,925	10,898
		2	Si	0,021	0,924	0,096
		3	Si	0,197	0,983	10,871
		4	Si	0,134	0,965	10,877
Punto 1+5cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,010	0,909	10,898
		2	Si	0,019	0,907	0,096
		3	Si	0,158	0,939	10,875
		4	Si	0,120	0,946	10,879
Punto 1+10cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,011	0,938	10,898
		2	Si	0,021	0,937	0,096
		3	Si	0,168	0,998	10,868
		4	Si	0,134	0,968	10,874
Punto 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,019	0,976	10,896
		2	Si	0,033	0,979	0,093
		3	Si	0,181	0,995	10,864
		4	Si	0,196	0,990	10,861

Tabla F. 3: Ensayo L 26-dic-2007, paso 20MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
Punto 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,019	0,863	10,897
		2	Si	0,036	0,872	0,094
		3	No	0,187	0,914	10,871
		4	Si	0,185	0,937	10,869
Punto 1+5cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,018	0,895	10,897
		2	Si	0,034	0,905	0,094
		3	Si	0,206	0,910	10,868
		4	Si	0,187	0,943	10,868
Punto 1+10cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,016	0,905	10,897
		2	Si	0,030	0,909	0,094
		3	Si	0,152	0,934	10,869
		4	Si	0,169	0,929	10,868
Punto 2	10,8 a 11,0	1	No	0,020	0,922	10,896
		2	Si	0,033	0,947	0,093
		3	Si	0,189	0,939	10,861
		4	Si	0,212	0,935	10,857

Tabla F. 4: Ensayo B 23-ene-2008, paso 10MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
Punto 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,019	0,985	10,896
		2	Si	0,032	0,998	0,094
		3	No	0,100	0,133	10,874
		4	No	0,229	0,630	10,853
Punto 1+5cm	10,8 a 11,0	1	No	0,023	0,543	10,896
		2	No	0,035	0,587	0,095
		3	No	0,201	0,331	10,867
		4	No	0,412	0,632	10,843
Punto 1+10cm	10,8 a 11,0	1	No	0,023	0,543	10,896
		2	No	0,035	0,587	0,095
		3	No	0,201	0,331	10,867
		4	No	0,412	0,632	10,843
Punto 2	10,8 a 11,0	1	No	0,011	0,017	10,897
		2	No	0,016	0,042	0,096
		3	No	0,130	0,078	10,874
		4	No	0,521	0,287	10,838

Tabla F. 5: Ensayo B 23-ene-2008, paso 20MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
Punto 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,033	0,888	10,895
		2	Si	0,048	0,870	0,093
		3	No	0,073	0,065	10,870
		4	No	0,258	0,664	10,858
Punto 1+5cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,024	0,902	10,896
		2	Si	0,038	0,903	0,094
		3	Si	0,175	0,947	10,870
		4	No	0,251	0,699	10,857
Punto 1+10cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,024	0,902	10,896
		2	Si	0,038	0,903	0,094
		3	Si	0,175	0,947	10,870
		4	No	0,251	0,699	10,857
Punto 2	10,8 a 11,0	1	No	0,055	0,714	10,895
		2	No	0,061	0,772	0,095
		3	No	0,437	0,626	10,871
		4	No	0,485	0,775	10,854

Tabla F. 6: Ensayo B 21-feb-2008, paso 10MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
Punto 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,036	0,682	10,896
		2	Si	0,063	0,694	0,094
		3	Si	0,518	0,842	10,853
		4	Si	0,427	0,699	10,856
Punto 1+5cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,045	0,824	10,896
		2	Si	0,077	0,826	0,093
		3	Si	0,434	0,709	10,858
		4	Si	0,474	0,818	10,854
Punto 1+10cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,048	0,924	10,896
		2	Si	0,081	0,921	0,093
		3	No	0,396	0,475	10,857
		4	Si	0,483	0,853	10,854
Punto 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,063	0,912	10,894
		2	Si	0,100	0,906	0,091
		3	No	0,359	0,557	10,863
		4	Si	0,553	0,829	10,846

Tabla F. 7: Ensayo B 21-feb-2008, paso 20MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coeficiente
Punto 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,063	0,948	10,894
		2	Si	0,101	0,937	0,091
		3	No	0,297	0,472	10,867
		4	Si	0,460	0,850	10,853
Punto 1+5cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,045	0,896	10,895
		2	Si	0,074	0,885	0,092
		3	No	0,226	0,469	10,862
		4	Si	0,412	0,808	10,854
Punto 1+10cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,039	0,856	10,896
		2	Si	0,067	0,855	0,093
		3	Si	0,362	0,794	10,861
		4	Si	0,388	0,806	10,858
Punto 2	10,8 a 11,0	1	No	0,033	0,719	10,896
		2	No	0,054	0,731	0,094
		3	No	0,266	0,640	10,861
		4	Si	0,343	0,696	10,859

Tabla F. 8: Ensayo AH 26-feb-2008, paso 10MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coeficiente
Punto 1	10,8 a 11,0	1	No	0,006	0,239	10,896
		2	No	0,010	0,267	0,094
		3	Si	0,115	0,806	10,870
		4	No	0,062	0,760	10,865
Punto 1+5cm	10,8 a 11,0	1	No	0,013	0,906	10,896
		2	No	0,020	0,883	0,093
		3	No	-0,001	0,000	10,877
		4	No	0,048	0,634	10,866
Punto 1+10cm	10,8 a 11,0	1	No	0,009	0,557	10,896
		2	No	0,015	0,596	0,093
		3	No	0,005	0,002	10,878
		4	No	0,054	0,689	10,866
Punto 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,028	0,916	10,896
		2	Si	0,044	0,901	0,094
		3	No	0,126	0,473	10,879
		4	No	0,199	0,725	10,872

Tabla F. 9: Ensayo AH 26-feb-2008, paso 20MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
Punto 1	10,8 a 11,0	1	No	0,003	0,056	10,896
		2	No	0,005	0,092	0,094
		3	No	0,103	0,472	10,865
		4	No	0,044	0,718	10,865
Punto 1+5cm	10,8 a 11,0	1	No	0,008	0,238	10,896
		2	No	0,013	0,284	0,093
		3	No	-0,016	0,013	10,871
		4	No	0,041	0,557	10,865
Punto 1+10cm	10,8 a 11,0	1	No	0,011	0,728	10,896
		2	No	0,018	0,730	0,092
		3	No	0,060	0,543	10,868
		4	No	0,064	0,813	10,862
Punto 2	10,8 a 11,0	1	No	0,014	0,423	10,897
		2	No	0,023	0,418	0,095
		3	No	0,078	0,229	10,876
		4	No	0,118	0,367	10,874

Tabla F. 10: Ensayo AH 18-jul-2008, paso 10MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
Punto 1	10,8 a 11,0	1	No	0,004	0,090	10,895
		2	No	0,004	0,046	0,093
		3	No	0,020	0,041	10,868
		4	No	0,049	0,271	10,847
Punto 1+5cm	10,8 a 11,0	1	No	-0,006	0,091	10,895
		2	No	-0,009	0,132	0,093
		3	No	0,017	0,009	10,876
		4	No	0,012	0,021	10,848
Punto 1+10cm	10,8 a 11,0	1	No	0,003	0,018	10,895
		2	No	0,002	0,008	0,093
		3	No	-0,079	0,515	10,875
		4	No	0,019	0,043	10,849
Punto 2	10,8 a 11,0	1	No	-0,006	0,066	10,897
		2	No	-0,008	0,081	0,096
		3	No	-0,033	0,052	10,882
		4	No	-0,001	0,000	10,859

Tabla F. 11: Ensayo AR 22-ago-2008, paso 10MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coefficiente
Punto 1	10,8 a 11,0	1	No	0,022	0,932	10,897
		2	No	0,040	0,941	0,094
		3	No	0,104	0,745	10,874
		4	No	0,201	0,946	10,868
Punto 1+5cm	10,8 a 11,0	1	No	0,023	0,884	10,897
		2	No	0,040	0,901	0,094
		3	Si	0,107	0,876	10,874
		4	No	0,188	0,912	10,869
Punto 1+10cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,023	0,850	10,897
		2	Si	0,040	0,855	0,094
		3	No	0,032	0,085	10,878
		4	Si	0,183	0,872	10,869
Punto 2	10,8 a 11,0	1	No	0,023	0,904	10,896
		2	No	0,039	0,921	0,093
		3	No	-0,039	0,221	10,878
		4	Si	0,146	0,918	10,860

Tabla F. 12: Ensayo AR 22-ago-2008, paso 20MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coefficiente
Punto 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,031	0,876	10,896
		2	Si	0,052	0,895	0,093
		3	No	0,048	0,171	10,873
		4	Si	0,222	0,932	10,866
Punto 1+5cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,022	0,959	10,897
		2	Si	0,039	0,954	0,094
		3	No	0,086	0,839	10,871
		4	No	0,190	0,944	10,868
Punto 1+10cm	10,8 a 11,0	1	No	0,026	0,913	10,897
		2	No	0,046	0,919	0,094
		3	No	0,102	0,779	10,872
		4	No	0,222	0,901	10,865
Punto 2	10,8 a 11,0	1	No	0,023	0,849	10,896
		2	No	0,037	0,822	0,092
		3	No	0,028	0,259	10,872
		4	Si	0,137	0,958	10,857

Tabla F. 13: Ensayo AR 22-ago-2008, paso 10MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos SG-1 T1, SG-2 T1; SG-1 T2 y SG-2 T2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coefficiente
SG-1 Tramo 1	10,8 a 11,0	1	No	0,019	0,928	10,897
		2	No	0,033	0,922	0,094
		3	No	0,036	0,142	10,880
		4	No	0,158	0,901	10,869
SG-2 Tramo 1	10,8 a 11,0	1	No	0,023	0,884	10,897
		2	No	0,040	0,901	0,094
		3	Si	0,107	0,876	10,874
		4	No	0,188	0,912	10,869
SG-1 Tramo 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,026	0,990	10,895
		2	Si	0,041	0,991	0,092
		3	No	0,014	0,009	10,875
		4	Si	0,129	0,936	10,854
SG-2 Tramo 2	10,8 a 11,0	1	No	0,016	0,812	10,896
		2	No	0,027	0,783	0,093
		3	No	0,090	0,414	10,871
		4	No	0,110	0,820	10,860

Tabla F. 14: Ensayo AR 22-ago-2008, paso 20MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos SG-1 T1, SG-2 T1; SG-1 T2 y SG-2 T2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coefficiente
SG-1 Tramo 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,024	0,986	10,897
		2	Si	0,042	0,992	0,094
		3	No	0,038	0,123	10,872
		4	Si	0,186	0,988	10,866
SG-2 Tramo 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,022	0,959	10,897
		2	Si	0,039	0,954	0,094
		3	No	0,086	0,839	10,871
		4	No	0,190	0,944	10,868
SG-1 Tramo 2	10,8 a 11,0	1	No	0,015	0,538	10,896
		2	No	0,023	0,488	0,093
		3	No	-0,008	0,004	10,868
		4	No	0,098	0,906	10,854
SG-2 Tramo 2	10,8 a 11,0	1	No	0,018	0,652	10,896
		2	No	0,028	0,671	0,093
		3	No	0,095	0,236	10,864
		4	No	0,125	0,845	10,857

Tabla F. 15: Ensayo AR 08-sep-2008, paso 10MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
Punto 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,022	0,973	10,897
		2	Si	0,041	0,975	0,095
		3	No	0,153	0,866	10,874
		4	Si	0,208	0,966	10,872
Punto 1+5cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,030	0,945	10,897
		2	Si	0,055	0,953	0,095
		3	No	0,044	0,177	10,879
		4	Si	0,254	0,986	10,872
Punto 1+10cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,027	0,971	10,897
		2	Si	0,049	0,976	0,095
		3	No	0,076	0,492	10,878
		4	Si	0,244	0,983	10,872
Punto 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,025	0,992	10,897
		2	Si	0,044	0,993	0,094
		3	No	0,018	0,033	10,877
		4	Si	0,174	0,955	10,864

Tabla F. 16: Ensayo AR 08-sep-2008, paso 20MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
Punto 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,026	0,980	10,897
		2	Si	0,048	0,977	0,095
		3	No	-0,018	0,015	10,876
		4	Si	0,248	0,993	10,870
Punto 1+5cm	10,8 a 11,0	1	No	0,029	0,933	10,897
		2	No	0,053	0,944	0,094
		3	No	0,108	0,670	10,873
		4	No	0,249	0,982	10,870
Punto 1+10cm	10,8 a 11,0	1	No	0,034	0,941	10,897
		2	No	0,062	0,952	0,094
		3	No	0,029	0,127	10,877
		4	Si	0,259	0,994	10,871
Punto 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,023	0,985	10,897
		2	Si	0,040	0,984	0,094
		3	No	0,038	0,047	10,868
		4	Si	0,191	0,978	10,862

Tabla F. 17: Ensayo AR 08-sep-2008, paso 10MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos SG-1 T1, SG-2 T1; SG-1 T2 y SG-2 T2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
SG-1 Tramo 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,026	0,975	10,897
		2	Si	0,047	0,981	0,095
		3	No	0,069	0,622	10,877
		4	Si	0,224	0,988	10,872
SG-2 Tramo 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,027	0,971	10,897
		2	Si	0,049	0,976	0,095
		3	No	0,076	0,492	10,878
		4	Si	0,244	0,983	10,872
SG-1 Tramo 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,021	0,975	10,896
		2	Si	0,035	0,978	0,094
		3	No	0,031	0,159	10,869
		4	No	0,141	0,928	10,859
SG-2 Tramo 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,025	0,992	10,897
		2	Si	0,044	0,993	0,094
		3	No	0,018	0,033	10,877
		4	Si	0,174	0,955	10,864

Tabla F. 18: Ensayo AR 08-sep-2008, paso 20MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos SG-1 T1, SG-2 T1; SG-1 T2 y SG-2 T2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
SG-1 Tramo 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,029	0,813	10,897
		2	Si	0,052	0,830	0,094
		3	No	0,047	0,297	10,872
		4	Si	0,229	0,901	10,869
SG-2 Tramo 1	10,8 a 11,0	1	No	0,034	0,941	10,897
		2	No	0,062	0,952	0,094
		3	No	0,029	0,127	10,877
		4	Si	0,259	0,994	10,871
SG-1 Tramo 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,019	0,928	10,896
		2	Si	0,032	0,926	0,093
		3	No	-0,030	0,041	10,866
		4	No	0,119	0,926	10,857
SG-2 Tramo 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,023	0,985	10,897
		2	Si	0,040	0,984	0,094
		3	No	0,038	0,047	10,868
		4	Si	0,191	0,978	10,862

Tabla F. 19: Ensayo AG1 25-nov-2008, paso 10MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
Punto 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,021	0,995	10,898
		2	Si	0,038	0,992	0,096
		3	No	0,080	0,447	10,882
		4	Si	0,186	0,955	10,878
Punto 1+5cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,018	0,986	10,898
		2	Si	0,033	0,981	0,096
		3	Si	0,149	0,892	10,877
		4	Si	0,174	0,957	10,878
Punto 1+10cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,020	0,881	10,898
		2	Si	0,037	0,874	0,096
		3	Si	0,099	0,708	10,884
		4	Si	0,176	0,823	10,878
Punto 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,016	0,895	10,897
		2	Si	0,027	0,858	0,095
		3	No	-0,010	0,278	10,877
		4	Si	0,117	0,782	10,869

Tabla F. 20: Ensayo AG1 25-nov-2008, paso 20MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
Punto 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,016	0,969	10,898
		2	Si	0,030	0,965	0,096
		3	No	0,073	0,346	10,880
		4	Si	0,152	0,888	10,879
Punto 1+5cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,021	0,866	10,898
		2	Si	0,038	0,862	0,096
		3	No	0,120	0,379	10,879
		4	No	0,177	0,747	10,877
Punto 1+10cm	10,8 a 11,0	1	Si	0,020	0,900	10,898
		2	Si	0,036	0,897	0,095
		3	No	0,106	0,661	10,880
		4	Si	0,165	0,864	10,878
Punto 2	10,8 a 11,0	1	No	0,019	0,724	10,896
		2	No	0,033	0,730	0,093
		3	No	0,077	0,411	10,873
		4	Si	0,143	0,799	10,866

Tabla F. 21: Ensayo AG1 25-nov-2008, paso 10MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos SG-1 T1, SG-2 T1; SG-1 T2 y SG-2 T2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
SG-1 Tramo 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,018	0,984	10,898
		2	Si	0,033	0,978	0,096
		3	Si	0,092	0,917	10,880
		4	Si	0,166	0,981	10,877
SG-2 Tramo 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,018	0,986	10,898
		2	Si	0,033	0,981	0,096
		3	Si	0,149	0,892	10,877
		4	Si	0,174	0,957	10,878
SG-1 Tramo 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,015	0,896	10,897
		2	Si	0,025	0,867	0,094
		3	No	-0,109	0,666	10,880
		4	Si	0,092	0,804	10,865
SG-2 Tramo 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,016	0,965	10,897
		2	Si	0,028	0,954	0,094
		3	No	0,059	0,271	10,875
		4	Si	0,124	0,946	10,869

Tabla F. 22: Ensayo AG1 25-nov-2008, paso 20MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos SG-1 T1, SG-2 T1; SG-1 T2 y SG-2 T2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
SG-1 Tramo 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,016	0,818	10,898
		2	Si	0,030	0,807	0,096
		3	No	0,090	0,679	10,878
		4	Si	0,149	0,784	10,877
SG-2 Tramo 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,021	0,866	10,898
		2	Si	0,038	0,862	0,096
		3	No	0,120	0,379	10,879
		4	No	0,177	0,747	10,877
SG-1 Tramo 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,023	0,999	10,895
		2	Si	0,037	0,996	0,092
		3	No	0,035	0,215	10,873
		4	Si	0,110	0,923	10,861
SG-2 Tramo 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,016	0,866	10,897
		2	Si	0,028	0,867	0,094
		3	No	-0,094	0,819	10,877
		4	Si	0,114	0,767	10,866

Tabla F. 23: Ensayo AG2 25-nov-2008, paso 10MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
Punto 1	10,8 a 11,0	1	No	0,010	0,745	10,898
		2	No	0,018	0,732	0,096
		3	No	0,008	0,595	10,880
		4	No	0,080	0,815	10,877
Punto 1+5cm	10,8 a 11,0	1	No	0,018	0,893	10,897
		2	No	0,031	0,878	0,095
		3	No	-0,080	0,618	10,887
		4	No	0,108	0,761	10,875
Punto 1+10cm	10,8 a 11,0	1	No	0,009	0,921	10,898
		2	Si	0,015	0,929	0,096
		3	No	0,037	0,279	10,879
		4	Si	0,062	0,965	10,878
Punto 2	10,8 a 11,0	1	No	0,013	0,574	10,897
		2	No	0,023	0,589	0,095
		3	No	0,007	0,006	10,881
		4	No	0,084	0,814	10,870

Tabla F. 24: Ensayo AG2 25-nov-2008, paso 20MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos 1, 1+5cm, 1+10cm y 2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
Punto 1	10,8 a 11,0	1	No	0,022	0,909	10,897
		2	No	0,037	0,891	0,095
		3	No	-0,061	0,244	10,878
		4	No	0,185	0,982	10,870
Punto 1+5cm	10,8 a 11,0	1	No	0,016	0,971	10,897
		2	No	0,028	0,971	0,096
		3	No	-0,073	0,977	10,881
		4	No	0,119	0,997	10,875
Punto 1+10cm	10,8 a 11,0	1	No	0,008	0,290	10,898
		2	No	0,015	0,299	0,096
		3	No	0,046	0,057	10,874
		4	No	0,081	0,766	10,876
Punto 2	10,8 a 11,0	1	No	0,018	0,830	10,896
		2	No	0,029	0,832	0,094
		3	No	0,046	0,673	10,873
		4	No	0,077	0,610	10,867

Tabla F. 25: Ensayo AG2 25-nov-2008, paso 10MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos SG-1 T1, SG-2 T1; SG-1 T2 y SG-2 T2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
SG-1 Tramo 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,008	0,795	10,898
		2	Si	0,014	0,756	0,096
		3	No	-0,046	0,896	10,881
		4	Si	0,061	0,817	10,876
SG-2 Tramo 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,012	0,956	10,898
		2	Si	0,021	0,950	0,096
		3	No	-0,016	0,117	10,883
		4	Si	0,101	0,975	10,877
SG-1 Tramo 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,008	0,991	10,897
		2	Si	0,013	0,999	0,094
		3	Si	0,043	0,976	10,876
		4	Si	0,030	0,895	10,864
SG-2 Tramo 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,022	0,945	10,896
		2	Si	0,035	0,959	0,093
		3	No	-0,071	0,410	10,884
		4	Si	0,064	0,983	10,867

Tabla F. 26: Ensayo AG2 25-nov-2008, paso 20MHz. Correlaciones entre frecuencias promedio según alternativas versus deformación unitaria de strain gages en puntos SG-1 T1, SG-2 T1; SG-1 T2 y SG-2 T2.

Punto analizado	Rango Frecuencia (GHz)	Alternativa	Sigue Tendencia Sí/No	Pendiente R. Lineal	R ²	Coficiente
SG-1 Tramo 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,010	0,978	10,898
		2	Si	0,018	0,969	0,096
		3	No	-0,047	0,242	10,875
		4	Si	0,082	0,959	10,876
SG-2 Tramo 1	10,8 a 11,0	1	Si	0,038	0,951	10,896
		2	Si	0,062	0,962	0,093
		3	No	-0,018	0,057	10,882
		4	Si	0,167	0,969	10,871
SG-1 Tramo 2	10,8 a 11,0	1	No	0,008	0,503	10,896
		2	No	0,013	0,504	0,094
		3	No	-0,057	0,766	10,873
		4	No	0,033	0,264	10,862
SG-2 Tramo 2	10,8 a 11,0	1	Si	0,015	0,916	10,897
		2	Si	0,025	0,884	0,095
		3	No	-0,213	0,750	10,875
		4	No	0,083	0,683	10,868

ANEXO G: Identificación del largo real deformado

G.1. Identificación Largo Real Deformado

Debido a la resolución espacial del sistema BOTDR, el largo de la distribución de deformación medida no coincide con el largo real del tramo de fibra óptica deformada. Esto implica la entrega de una falsa distribución de deformación de la estructura que se está observando y, por ende, una evaluación poco confiable del comportamiento de ésta. Por lo tanto, se hace necesario investigar la relación entre el largo de deformación medida y el largo real de fibra óptica deformada.

Murayama et al. (2004) y Zhang & Wu (2008) asumen que la adquisición de datos sobre la resolución espacial, se centran desde el punto analizado hacia atrás, es decir, abarcando desde el punto $(z - L)$ a z . En particular, la *Ec. 2.7* y la *Fig. G. 1* muestran que la integración (o promedio) de curvas lorentzianas se efectúa de esta forma. Sin embargo, se ha observado que esto no ocurre con el sistema BOTDR utilizado en el presente estudio, ya que al analizar la información entregada por el software, se concluye que éste detecta deformación por delante y detrás del punto analizado (ingresado a través del *software*). Este efecto es demostrado en datos no publicados (CMM – CORFO Innova, 2008), donde se estudió la forma de integración que realiza el sistema BOTDR, concluyendo que ésta se efectúa mayoritariamente hacia delante del punto de ubicación. Esta y otras evidencias se muestran con mayor profundidad en secciones posteriores de este estudio.

En la *Fig. G. 1* se muestra un esquema de fibra óptica sensora, donde se ha deformado en ella un tramo menor a la resolución espacial. Considerando esta condición, se describen distintas situaciones dependiendo de las ubicaciones posibles del punto de muestreo (punto analizado). Los parámetros de la figura son los siguientes:

- l : Largo real del tramo de fibra óptica deformada,
- d : Intervalo (espacial) de muestreo del sistema BOTDR, con $d < l$
- ε_r : Valor de deformación real aplicado al tramo de fibra óptica
- r : Razón de deformación parcial.

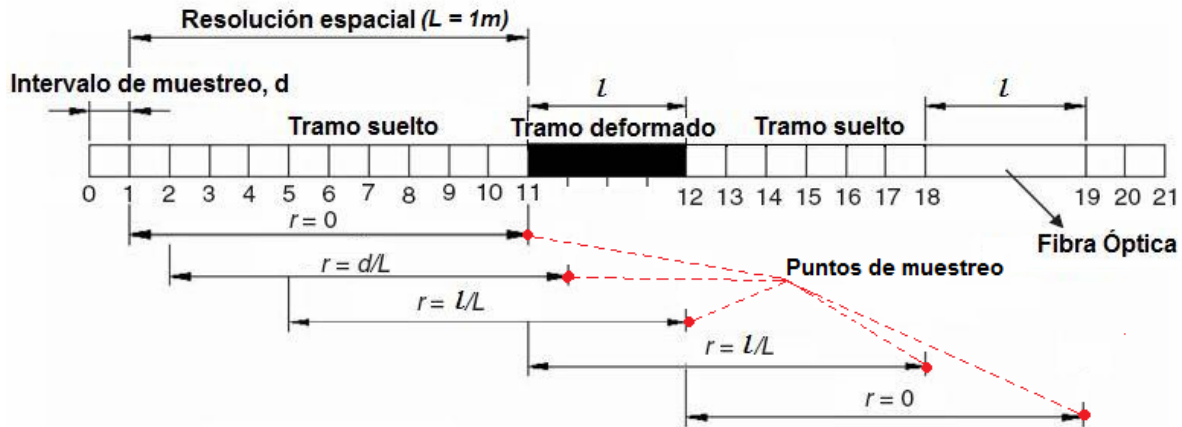


Fig. G. 1: Análisis de largos real y medido de distribución de deformación (Zhang & Wu, 2008).

Si el punto de muestreo en la fibra óptica se considera como el extremo derecho de las flechas (de largo L) mostradas en la Fig. G. 1, cuando éste se encuentra entre las secciones 11 y 19, su espectro Brillouin debiera incluir un espectro del tramo deformado, y el valor de la deformación medida debiera ser mayor a cero¹. Además, si el punto analizado está ubicado entre 12 y 18, su espectro Brillouin debiera incluir el espectro del tramo deformado completo, y el valor de la deformación medida debiera ser el mismo entre estas secciones. Entonces, cuando se tiene una distribución de deformación como la de la Fig. G. 1, con deformación real ε_r menor a $1000\mu\varepsilon$ (0,10%) y largo deformado l menor a la resolución espacial L , la distribución teórica medida por el sistema BOTDR debiera ser la misma que la mostrada en la Fig. G. 2. La línea roja continua es la distribución de deformación medida y la línea azul punteada es la distribución de deformación real.

¹ Notar que el tramo deformado l está subdividido en varios tramos de ancho d , por lo cual, se puede estar incluyendo una parte, o la totalidad, del tramo deformado en las mediciones.

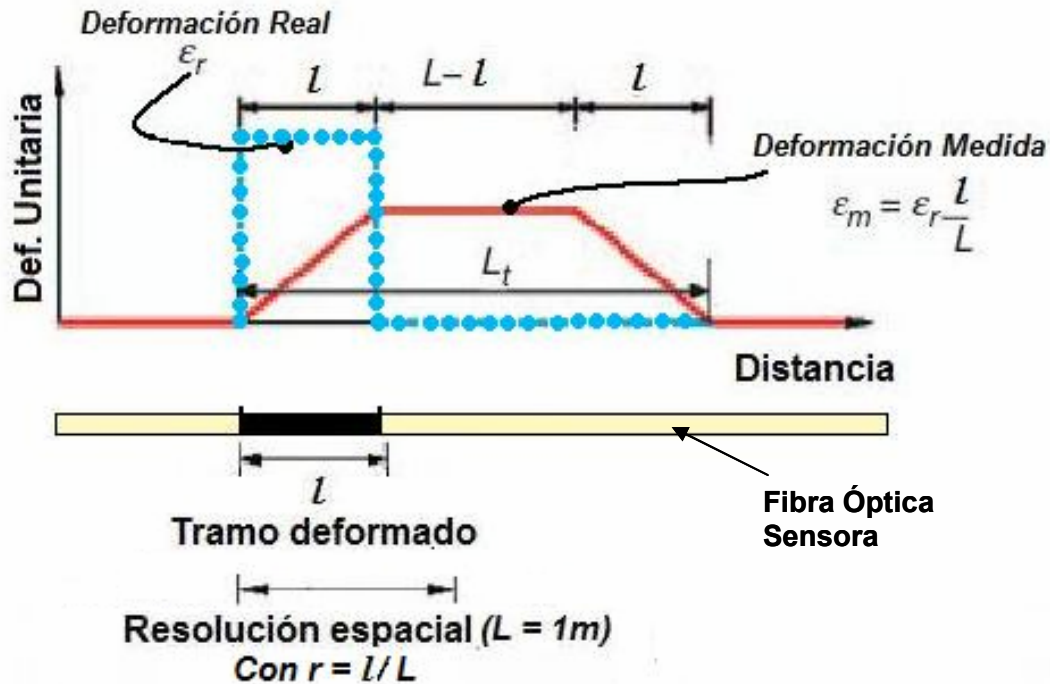


Fig. G. 2: Distribución de deformación real (línea azul punteada) y medida (línea roja continua) para $L > l$ y $\epsilon_r < 0,10\%$. (Zhang & Wu, 2008).

La Fig. G. 3 muestra nuevamente el caso de una distribución de deformación como la de la Fig. G. 1 con deformación real ϵ_r menor a $1000\mu\epsilon$ (0,10%), pero esta vez con largo deformado l mayor a la resolución espacial L . La línea roja continua es la distribución de deformación medida y la línea azul punteada es la distribución de deformación real.

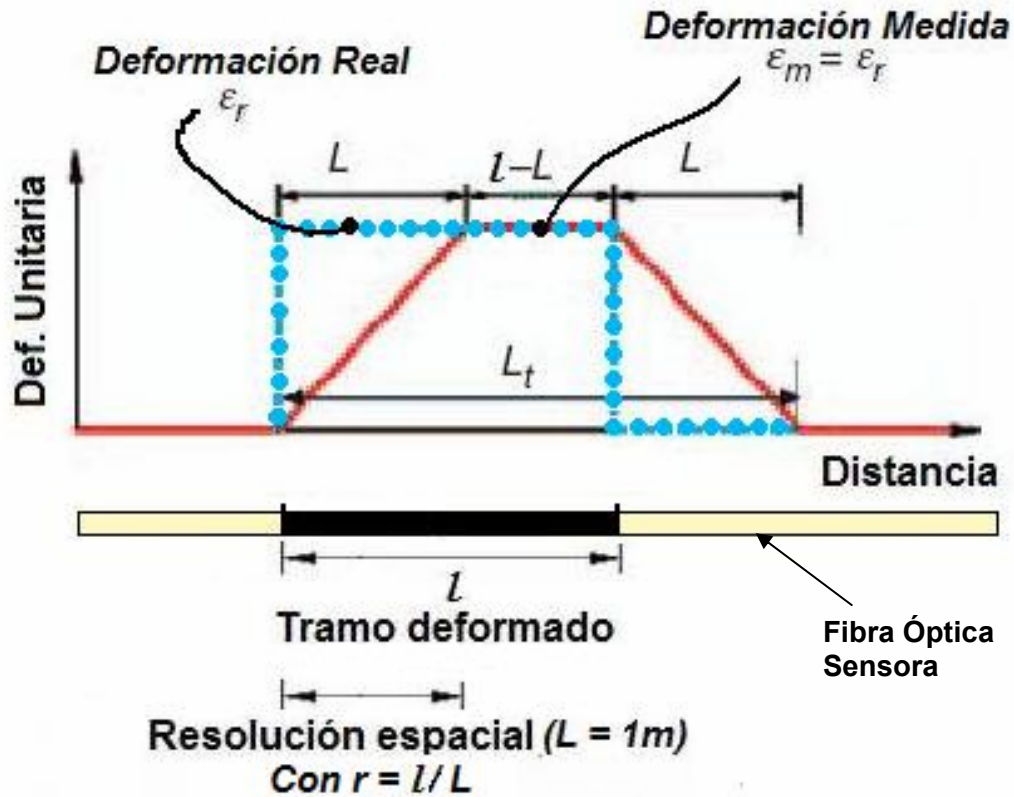


Fig. G. 3: Distribución de deformación real (línea azul punteada) y medida (línea roja continua) para $L < l$ y $\epsilon_r < 0,10\%$ (Zhang & Wu, 2008).

El largo de la distribución de deformación medida puede ser calculado de la siguiente forma:

$$L_t = L + l$$

Ec. G. 1: Largo de distribución de deformación medido con el sistema BOTDR

Donde:

- L_t : Largo de la distribución de deformación medida
- L : Resolución espacial
- l : Largo del tramo de fibra deformado

De esta manera, Zhang & Wu (2008) plantean que es posible obtener estimaciones del largo real del tramo deformado de fibra al restar del largo de distribución L_t , la resolución espacial L .

**ANEXO H: Resumen del proceso físico y análisis de
información BOTDR**

H.1. Resumen del proceso físico y análisis de información BOTDR

Para un mejor entendimiento del proceso físico BOTDR, así como del análisis de resultados entregados por el analizador y *software*¹ respectivos, a continuación se exponen figuras elaboradas por el Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile para CORFO Innova Chile (CMM – CORFO Innova BOTDR, 2009), las cuales muestran las distintas etapas que, teóricamente, se desarrollan para obtener la información en forma de espectros de potencia. La *Fig. H. 1* muestra un ejemplo de distribución de deformación unitaria en distancia a lo largo de la fibra óptica. El eje vertical no se considera en esta figura.

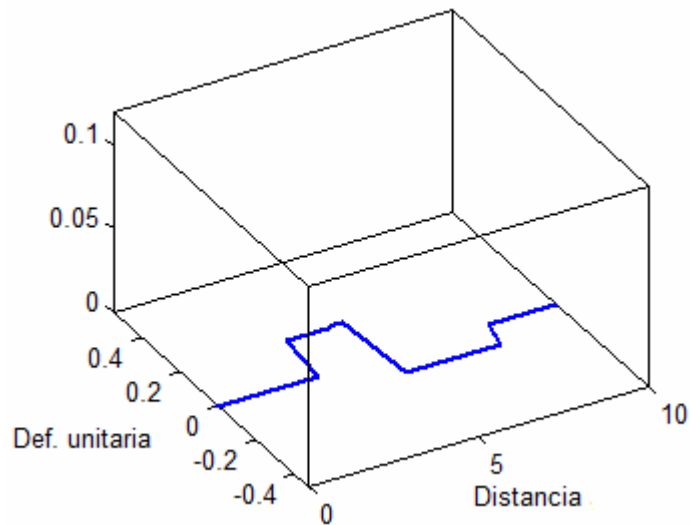


Fig. H. 1: Ejemplo de distribución de deformación a lo largo de la fibra óptica (CMM - CORFO Innova BOTDR, 2009).

La *Fig. H. 2* muestra la distribución de frecuencias características asociadas a cada posición en la fibra óptica, como resultado de la distribución de deformación mostrada en la figura anterior.

¹ La descripción y nombre tanto del analizador BOTDR como del software asociado, se detallan más adelante en este estudio.

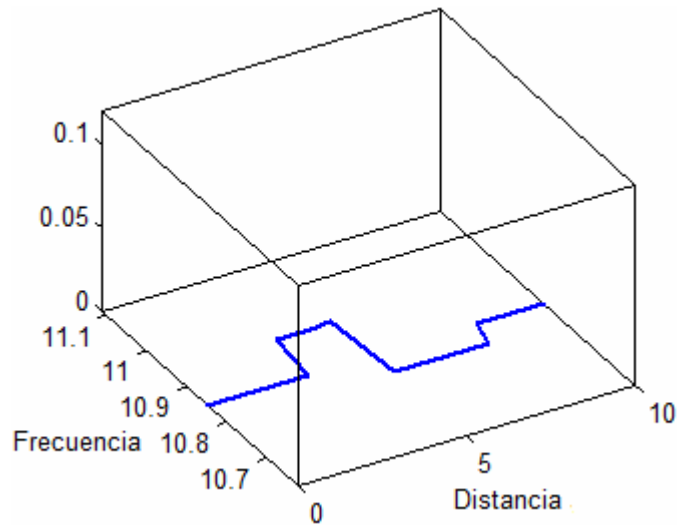


Fig. H. 2: Distribución de frecuencias características en cada posición (CMM - CORFO Innova BOTDR, 2009).

Como se mencionó anteriormente, la información obtenida de la *luz retrodispersada* (*backscattered light*), se representa como una sucesión o espectro de curvas lorentzianas que entregan, para cada frecuencia, su respectiva potencia o intensidad asociada. Esto puede observarse en la Fig. H. 3. Sin embargo, no es posible observar estas curvas, ya que el proceso físico no permite obtenerlas discretizadas para cada punto en el espacio, sino que las entrega luego de haberlas integrado (y promediado) en la resolución espacial (ver Fig. H. 4).

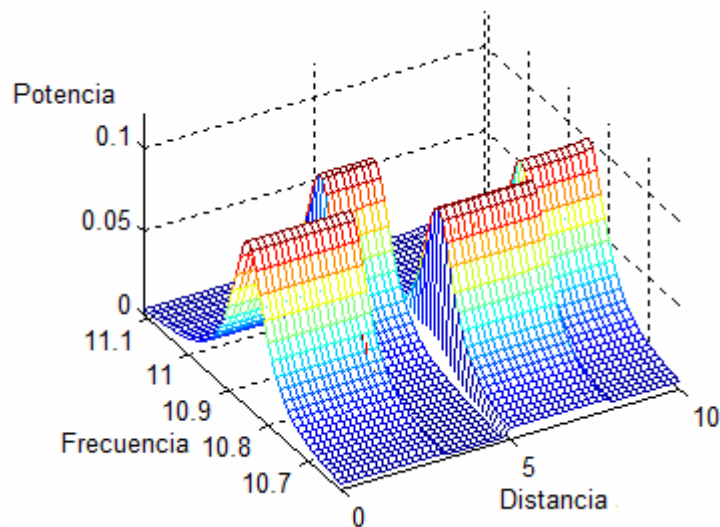


Fig. H. 3: Lorentzianas teóricas generadas (CMM - CORFO Innova BOTDR, 2009).

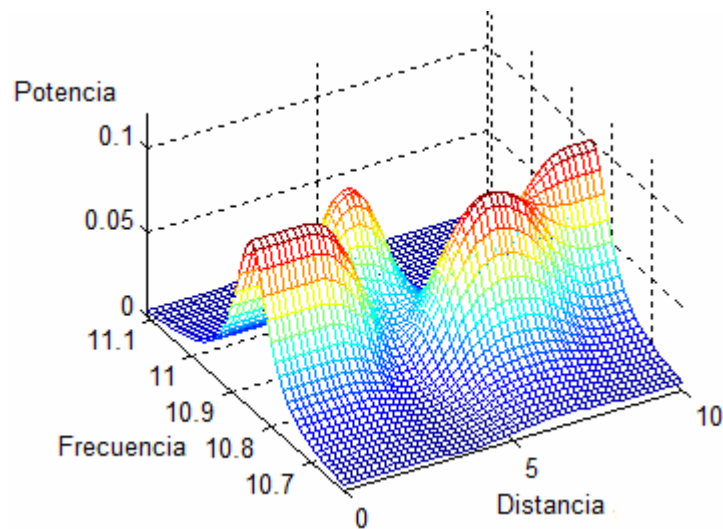


Fig. H. 4: Lorentzianas integradas sobre la resolución espacial (CMM - CORFO Innova BOTDR, 2009).

La fibra óptica, como se mencionó anteriormente, posee la ventaja de reducir el ruido presente en la señal transmitida a través de ella, en comparación con otros sensores comúnmente utilizados. Sin embargo, este ruido no puede eliminarse por completo, por lo cual, para asemejar de mejor forma las condiciones dadas en la práctica, se consideró la adición de ruido aleatorio a las lorentzianas mostradas en la Fig. H. 4. La Fig. H. 5 muestra el efecto que esto genera.

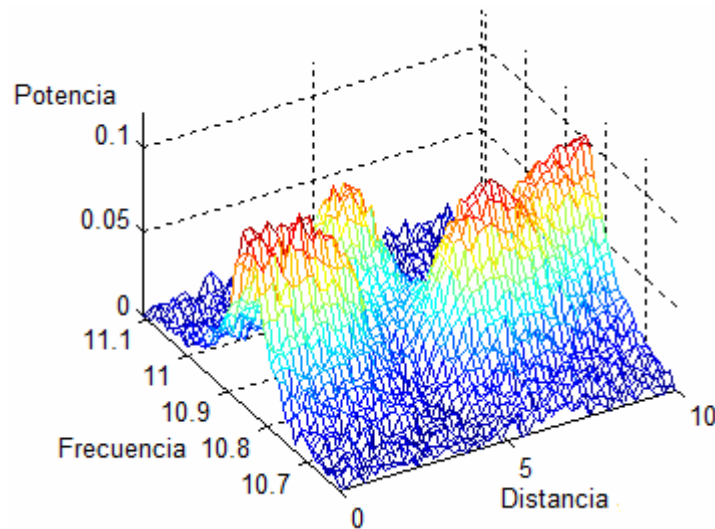


Fig. H. 5: Lorentzianas integradas con adición de ruido aleatorio (CMM - CORFO Innova BOTDR, 2009).

Al transformar a decibeles (ver *Ec. 2.18*) el espectro de curvas lorentzianas con ruido (ver *Fig. H. 5*), se obtiene el espectro tri-dimensional de la *Fig. H. 6*. Este espectro posee una forma bastante similar al espectro observado en la práctica, el cual se analizará con mayor detalle en secciones posteriores.

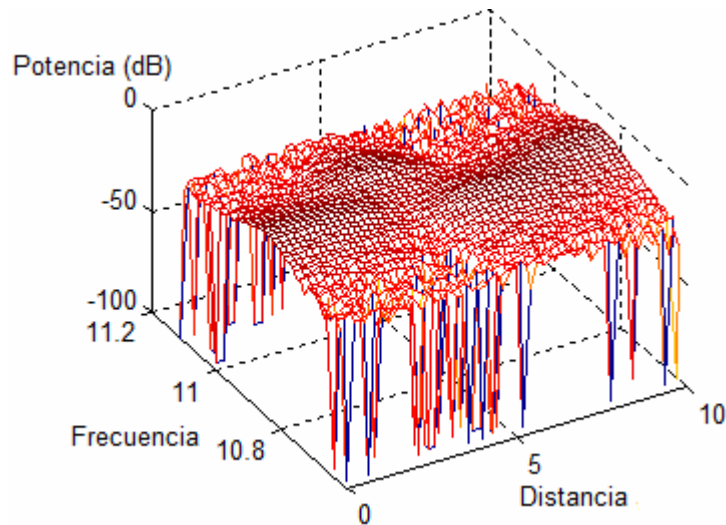


Fig. H. 6: Espectro tri-dimensional observado (lorentzianas+ruido+transformación a decibeles) (CMM - CORFO Innova BOTDR, 2009).

Por otra parte, si se efectúa el mismo procedimiento antes descrito, pero esta vez sin la inclusión de ruido, el espectro resultante mantiene una forma similar al espectro de curvas lorentzianas, por lo cual deja de asemejarse al observado en la práctica (ver *Fig. H. 7*)

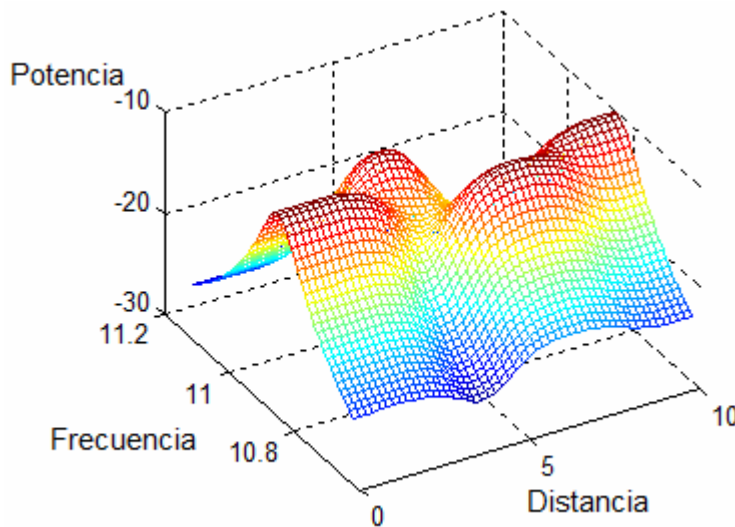


Fig. H. 7: Espectro tri-dimensional observado (lorentzianas+transformación a decibeles) (CMM - CORFO Innova BOTDR, 2009).

ANEXO I: Corrección de la influencia de la temperatura

I.1. Corrección de la influencia de la temperatura

La Fig. I. 1 muestra un esquema de la influencia de la temperatura en el valor de deformación medido y a continuación, la corrección propuesta por NTT (2007) para cancelar su efecto.

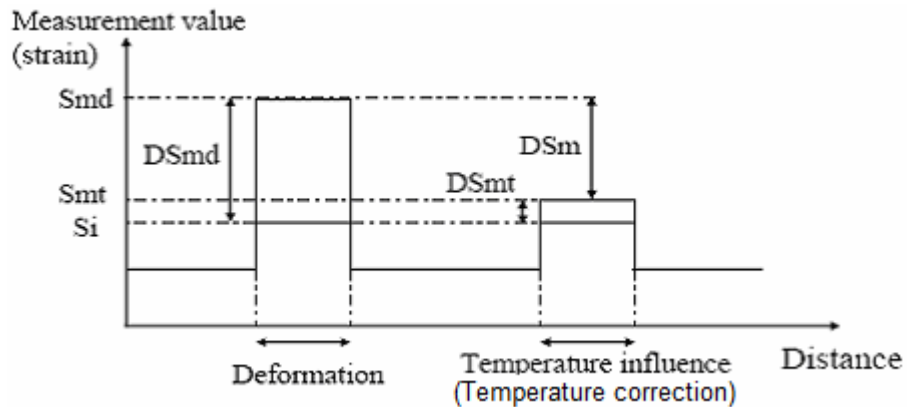


Fig. I. 1: Concepto de corrección de la influencia de la temperatura de a temperatura al valor de referencia. (NTT, 2007)

$$Dsm = Dsmd - Dsmt = (Smd - Si) - (Smt - Si) = Smd - Smt^1$$

Ec. I. 1: Corrección de la influencia de la temperatura (NTT, 2007).

Donde:

- Si : Valor inicial
- Smd : Valor de deformación
- Smt : Valor de influencia de la temperatura
- DSmd : Variación total por deformación
- DSmt : Variación de la influencia de la temperatura
- DSm : Deformación real

¹ Notar que en casos donde los valores iniciales de la deformación y de la corrección por temperatura difieren, la ecuación final mostrada más arriba no es válida.

**ANEXO J: Otras características y propiedades de la fibra
óptica**

J.1. Característica de Curvado de la Fibra Óptica

Debido a su fabricación, una fibra óptica en la actualidad no se quiebra fácilmente, incluso si es fuertemente curvada. En general, en un cable de fibra óptica, comienzan a exhibir pérdidas de luz o señal cuando éste es curvado en un radio menor o igual a 5cm (ver Fig. J. 1 y Fig. J. 2)



Fig. J. 1: Requisito de curvas suaves (radio mayor a 5cm) para evitar pérdidas de señal en la Fibra Óptica (NTT, 2007)

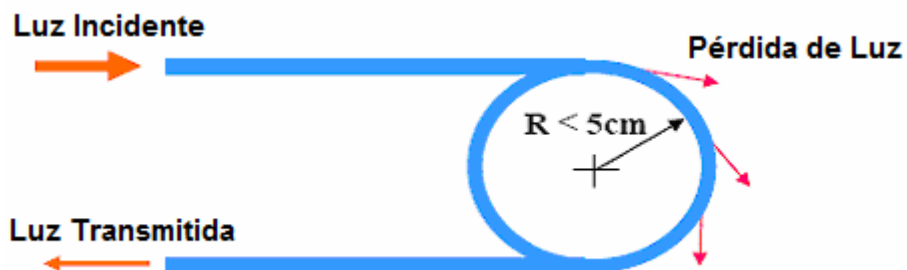


Fig. J. 2: Radio menor a 5cm, comienzan a haber pérdidas en la señal en la Fibra Óptica (NTT, 2007)

J.2. Métodos de las Tecnologías de Medición con Fibra Óptica

Existen variados métodos de medición con fibra óptica que, desde la perspectiva de su aplicación, éstos pueden ser clasificados en:

- A) Método continuo que usa la fibra óptica misma como un sensor. Es un método de medición y análisis por medio del cual la luz retro-dispersada (*backscattered*) del pulso de luz incidente es temporalmente desintegrada.
- B) Método discreto que usa el sensor de la porción procesada y la parte de los canales de transmisión. Mide y analiza la luz reflejada del pulso de entrada.
- C) Un método discreto que usa el sensor de la porción procesada y la parte de los canales de transmisión. Mide y analiza cambios en la intensidad de la luz transmitida.

De los métodos mencionados, el método A es adecuado cuando el punto a ser medido no es especificado y la medición ocurre sobre un amplio rango. BOTDR cae dentro de esta categoría.

Los métodos B y C son adecuados cuando los puntos a ser medidos pueden ser especificados y no hay muchos puntos a ser medidos.