



Análisis del comportamiento estructural de un pavimento de concreto estructuralmente reforzado continuo (PCERC)

**Víctor Manuel Bonilla Ureña
Juan Antonio Quintana Rodríguez
Francisco Javier Carrión Viramontes
Luis Álvaro Martínez Trujano
Jorge Alberto Hernández Figueroa
Héctor Miguel Gasca Zamora
Andrés Hernández Guzmán
Mario Montes Zea**

**Publicación Técnica No. 509
Sanfandila, Qro, 2017**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Análisis del comportamiento estructural de un
pavimento de concreto estructuralmente reforzado
continuo (PCERC)**

Publicación Técnica No. 509
Sanfandila, Qro, 2017

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el M. C. Víctor Manuel Bonilla Ureña, Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez, el Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes, el M. I. Luis Álvaro Martínez Trujano, el Ing. Jorge Alberto Hernández Figueroa, el Lic. Héctor Miguel Gasca Zamora, el Ing. Andrés Hernández Guzmán y Mario Alberto Montes Zea.

Esta investigación es el producto final del proyecto de tesis del M. C. Víctor Manuel Bonilla Ureña, de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Agradecemos la colaboración del Dr. Miguel Martínez Madrid, de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural.

Contenido

Índice de figuras.	v
Índice de tablas.	vii
Sinopsis.	ix
Abstract.	xi
Resumen Ejecutivo.	xiii
Introducción	1
1 Especificaciones del pavimento de concreto estructuralmente reforzado continuo.	5
1.1 Pavimentos.	5
1.1.1 Capas de un pavimento.	5
1.1.2 Pavimentos flexibles.	6
1.1.3 Pavimentos rígidos.	6
1.2 Aplicaciones de pavimentos continuos reforzados.	7
1.2.1 Caso Bélgica.	7
1.2.2 Caso E.U. (Rehabilitación).	8
1.2.3 Caso México (Tramo experimental).	8
1.3 Filosofías de diseño para pavimentos rígidos.	9
1.3.1 El método AASHTO para pavimentos rígidos.	9
1.3.2 Método de la PCA.	11
1.3.3 Programa ME de diseño.	12
1.3.4 Filosofías de diseño con respecto al PCERC.	13
1.3.5 Estándares de calidad de un pavimento.	16
1.4 Cargas de tránsito.	17
1.4.1 Análisis mecanísticos o estadísticos.	17
1.4.2 Soluciones cerradas.	19
1.4.3 Cartas de Influencia.	19
1.4.4 Elementos finitos.	22

1.5	Cargas por temperatura.	22
1.5.1	Perfil de temperatura en un pavimento.	22
1.5.2	Coeficiente de expansión térmica en un pavimento.	27
1.5.3	Deformación por temperatura.	27
1.6	Interacción suelo-estructura.	35
1.6.1	Módulo de resiliencia.	35
1.6.2	Modelo Winkler de FE para la interacción suelo-estructura.	36
2	Instrumentación y pruebas de campo.	39
2.1	Características de los materiales.	39
2.1.1	Materiales pétreos.	40
2.1.2	Cemento.	40
2.1.3	Acero.	41
2.1.4	Concreto.	42
2.2	Equipo.	42
2.2.1	Extensómetro para acero y extensómetro para concreto.	43
2.2.2	Sensor de temperatura.	43
2.2.3	Acelerómetro.	43
2.2.4	Cable de fibra óptica mono-modo.	44
2.2.5	Tubería galvanizada de 3 pulgadas.	44
2.2.6	Conectores lado A-B.	44
2.2.7	Interrogador.	45
2.2.8	Software ENLIGHT.	45
2.3	Modelo de monitoreo.	46
2.3.1	Descripción del modelo.	46
2.3.2	Construcción del tramo experimental.	48
2.3.3	Instrumentación del tramo.	48
2.3.4	Revisión bibliográfica.	53
2.3.5	Monitoreo durante 24 horas.	53
2.3.6	Análisis de datos experimentales.	54
2.3.7	Creación y calibración del modelo PCERC.	57

3	Conclusiones.	59
3.1	Esfuerzo-temperatura.	59
3.1.1	Sensores en el concreto.	59
3.1.2	Sensores en el acero.	63
3.2	Deformación del acero y el concreto.	65
3.3	Creación y calibración del modelo.	67
	Bibliografía.	73
Anexo1	Curva granulometría de material pétreo.	75
Anexo2	Certificado de calidad del cemento.	77
Anexo3	Certificado de calidad del acero.	79
Anexo4	Ensaye de cilindros de concreto.	81
Anexo 5	Ficha técnica del extensómetro.	83
Anexo 6	Ficha técnica del acelerómetro.	85
Anexo 7	Ficha técnica del sensor de temperatura.	87
Anexo 8	Ficha técnica del interrogador.	89
Anexo 9	Gráficas temperatura-esfuerzo sobre base hidráulica.	91
Anexo 10	Gráficas temperatura-esfuerzo sobre base cementada.	95
Anexo 11	Gráficas temperatura-esfuerzo sobre base cementada con grieta.	99
Anexo 12	Valor promedio del esfuerzo por grado centígrado para el sensor.	105

Índice de figuras

Figura 0.1	Sección transversal de la junta entre PCERC y pavimento existente	1
Figura 0.2	Ubicación de los sensores en concreto dentro del tramo carretero experimental.	2
Figura 1.3	Prueba de tres puntos	17
Figura 1.4	Carta de influencia	21
Figura 1.5	Perfil de temperatura	23
Figura 1.6	Registro de las microdeformaciones de una carga viva con peso conocido a diferentes temperaturas (sensor CH1BL)	23
Figura 1.7	Perfil de temperatura	24
Figura 1.8	Experimento para obtención de perfil de temperatura	24
Figura 1.9	Esquema de la obtención de perfil de temperatura en tres puntos	25
Figura 1.10	Superficie de temperatura del 15 de abril del 2015	26
Figura 1.11	Rangos producidos por las desviaciones estándar	31
Figura 1.12	Ciclo de deformaciones del sensor de concreto del día 15 de abril del 2013.	32
Figura 1.13	Esfuerzos en los diferentes monitoreos del sensor de concreto CH1BT.	33
Figura 1.14	Esfuerzo/°C, en sensor colocado en concreto en dirección longitudinal sobre la base hidráulica.	34
Figura 2.1	Sección de pavimento existente	39
Figura 2.2	Sección de PCERC	40
Figura 2.3	Mallas del PCERC	41
Figura 2.4	Resistencia promedio de los cilindros	42
Figura 2.5	Extensómetro de concreto y acero	43
Figura 2.6	Sensor de temperatura	43
Figura 2.7	Acelerómetro	44
Figura 2.8	Tubería galvanizada	44
Figura 2.9	Conector	44

Figura 2.10	Interrogador sm130-500.	45
Figura 2.11	Modelo de monitoreo del tramo experimental.	46
Figura 2.12	Sección a instrumentar que comprende al tramo experimental PCERC.	49
Figura 2.13	Distribución de extensómetros en la losa de concreto PCERC.	50
Figura 2.14	Distribución de los sensores de temperatura en la losa de concreto PCERC.	51
Figura 2.15	Plano que correlaciona la posición de los extensómetros en bloque de PCERC.	53
Figura 2.16	Algoritmo MATRIX3.	55
Figura 3.1	Esfuerzo-temperatura CH1BL.	60
Figura 3.2	Esfuerzo-temperatura CH2BT.	60
Figura 3.3	Esfuerzo-temperatura CH3BL.	61
Figura 3.4	Esfuerzo-temperatura CE1BL.	62
Figura 3.5	Esfuerzo-temperatura CE2BT.	62
Figura 3.6	Esfuerzo-temperatura CE3BL.	63
Figura 3.7	Esfuerzo-temperatura AE1BL.	64
Figura 3.8	Esfuerzo-temperatura AE2BT.	64
Figura 3.9	Esfuerzo-temperatura AEB3L.	65
Figura 3.10	Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el calentamiento del sistema en el sensor CHB1L.	66
Figura 3.11	Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el calentamiento del sistema en el sensor AHB1L.	66
Figura 3.12	Modelación del sensor CH1BL.	68
Figura 3.13	Modelación del sensor CE1BL.	68
Figura 3.14	Modelación del sensor CH2BT.	69
Figura 3.15	Modelación del sensor CE2BT.	69
Figura 3.16	Modelación del sensor CH3BL.	70
Figura 3.17	Modelación del sensor CE3BL.	70

Índice de tablas

Tabla 1.1	Acero mínimo para temperatura (ACI, 1995).	14
Tabla 1.2	Cuantías de acero de refuerzo en pavimentos PERC (malla 1).	15
Tabla 1.3	Cuantías de acero de refuerzo en pavimentos PERC (malla 2).	15
Tabla 2.1	Días de los monitores.	54

Sinopsis

En el presente trabajo, estudiamos el comportamiento estructural de un sistema de pavimento de concreto estructuralmente reforzado continuo (PCERC) a partir del análisis y evaluación de la información de sensores de fibra óptica embebidos en un tramo experimental construido en la autopista México-Querétaro, entre el km 166+000 y 166+300 en el carril de baja velocidad en el cuerpo B (sentido Querétaro-México) y un modelo de elemento finito utilizando ANSYS. El sistema de pavimento de concreto estructuralmente reforzado continuo (PCERC) consta de dos mallas de ingeniería MI-3.44, colocadas en lecho superior e inferior a 6 y 3 cm respectivamente; el cuál fue diseñado como una alternativa en la infraestructura empleada en carreteras de gran afluencia vehicular. Los datos experimentales analizados y el modelo de elemento finito generado muestran que el sistema PCERC es afectado estructuralmente, en un inicio, por los esfuerzos térmicos generados en el sistema continuo durante un ciclo térmico y que es necesario un rediseño para minimizar los efectos provocados por la temperatura.

Abstract

The present work studies the structural behaviour of a system of pavement of Concrete Structurally Reinforced Continuous (PCERC) from the analysis and evaluation of data of optical fibre sensors embedded in an experimental stretch built in the Mexico-Queretaro Highway km 166 + 000-166 + 300 on the track of low speed on the body B (meaning Queretaro - Mexico) and a model of finite element using ANSYS. The system of pavement of concrete structurally reinforced continuous (PCERC) consists of two MI-3.44 engineering meshes placed in bed and less than 6 and 3 cm respectively, which was designed as an alternative infrastructure employed in Road from big vehicular flow. Generated finite element model and experimental data analysed show that PCERC system is structurally affected initially by the excessive thermal stress generated in the continuous system during a heat cycle and requires a redesign to minimize the effects caused by temperature.

Resumen ejecutivo

Si bien la mayoría de las principales carreteras de nuestro país son construidas con base en un sistema de pavimento rígido con juntas o Jointed Plain Concrete Paviment (JPCP); la necesidad de crear nuevas opciones de pavimentos, con la capacidad de soportar un creciente volumen de tránsito y un mayor peso bruto vehicular, lleva a la búsqueda y generación de nuevos sistemas de pavimentos.

Los diseños empleados actualmente tienen el objetivo de disminuir el costo inicial y de mantenimiento de la infraestructura, sin perder de vista las condiciones de calidad estandarizadas (Índice internacional de rugosidad, mapeo de grietas, ancho de grietas y coeficiente de transferencia de carga).

El sistema pavimento de concreto estructuralmente reforzado continuo (PCERC) se fundamenta en el uso de dos mallas de ingeniería cuya finalidad es obtener un desempeño similar o mejor, a un menor costo. Para evaluar el desempeño estructural del PCERC, proponemos instrumentar un tramo de prueba, construido sobre la autopista México-Querétaro. El comportamiento estructural y la degradación del PCERC dependen de los efectos que provocan los gradientes térmicos y la interacción con la base (hidráulica o cementada).

El análisis y evaluación de los datos de respuesta del PCERC durante ciclos de enfriamiento y calentamiento se desarrolla mediante el algoritmo MATRIX3 y EXCEL. El modelo de elementos finitos del PCERC en ANSYS se calibra con la información obtenida en campo y algunos parámetros medidos en el laboratorio. Los resultados alcanzados con el modelo nos permiten analizar los efectos de la temperatura en el incremento y decremento de los esfuerzos provocados por cargas viva, así como los efectos de degradación (mapeo de grietas e índice internacional de rugosidad.) en el tiempo provocado por los esfuerzos de temperatura; a través de la información experimental de sensores de fibra óptica instalados en el tramo carretero.

Introducción

En la actualidad, la mayoría de las carreteras importantes del país están constituidas por un sistema de pavimento rígido con juntas o Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP) de acuerdo con lo referido en el Atlas de la Red Carretera de México realizado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y la unidad de Geotecnología Inteligente en Transporte y Sustentabilidad, del Instituto de Geografía de la UNAM (GITS); en los que establecen que en México existen 3,097.09 km de carreteras de pavimentos rígidos.

Si bien el sistema JPCP ha tenido un desempeño estructural aceptable; es importante evaluar otras opciones que puedan mejorar la solución actual con menores costos de mantenimiento y conservación, con el objetivo de mejorar la infraestructura carretera maximizando la inversión de los recursos financieros. Este tipo de estudios deben ser apoyados, con la finalidad de mejorar la infraestructura carretera en el país. Una propuesta de pavimento por parte de la empresa DEACERO para ser evaluada en las carreteras mexicanas con flujo vehicular alto, el cuál es definido por AASHTO (1993) como más de 50,000 ejes equivalentes diarios, de 18 Kips, es el sistema pavimento de concreto estructuralmente reforzado continuo (PCERC); el cuál se fundamenta en el uso de dos mallas de ingeniería MI-3.44 colocadas en lecho superior e inferior a 6 y 3 cm de los bordes respectivamente; cómo podemos observar en la figura 0.1, cuya finalidad es obtener un sistema de desempeño similar o mejor a un menor costo.

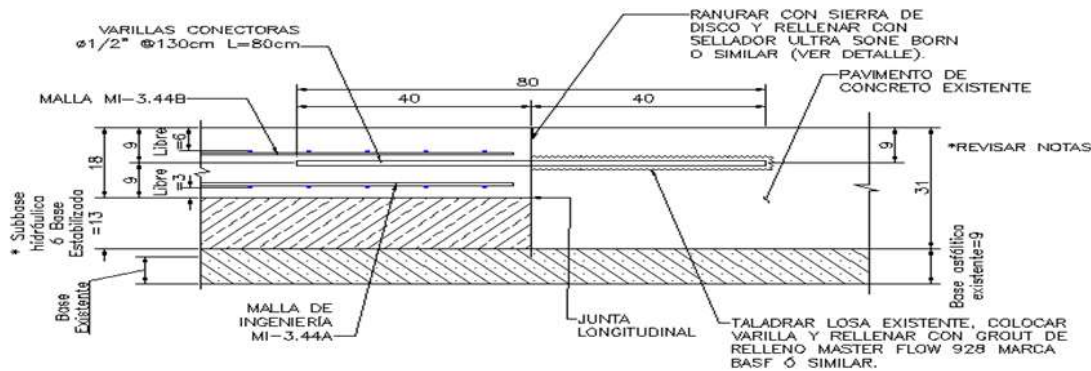


Figura 0.1 Sección transversal de la junta entre PCERC y Pavimento existente

Para evaluar el desempeño estructural de este sistema, propusimos instrumentar un tramo experimental en la carretera de la autopista México-Querétaro, entre el km 166+000 y 166+300 en el carril de baja velocidad en el cuerpo B (sentido Querétaro-México); adicionalmente, para analizar el efecto de la base sobre sistema PCERC,

colocamos una parte del sistema PCERC sobre una base hidráulica y el resto sobre una base estabilizada. La instrumentación se llevó a cabo mediante sensores de fibra óptica, distribuidos de una determinada manera (figura 0.2), acelerómetros colocados sobre la rodadura del lado derecho del conductor -uno para la base hidráulica y otro para la base estabilizada- cinco sensores de temperatura colocados en la base estabilizada, espaciados a cada 3 cm de profundidad, dos arreglos de seis sensores de deformación: dos sensores en la dirección longitudinal sobre la rodadura -uno para medir las deformaciones del acero y otro para medir deformaciones en el concreto-, dos sensores transversales al centro del PCERC; de igual forma, uno para medir las deformaciones del concreto y otro para medir deformaciones en el acero; y, finalmente, dos sensores longitudinales en la frontera del carril de baja velocidad con el carril de media velocidad distribuidos -de igual manera- uno para acero y otro para concreto; adicionalmente indujimos una grieta en la base estabilizada en el km 166+150; sobre este tramo fue colocado un arreglo de quince sensores: seis para medir las deformaciones longitudinales y transversales del concreto y nueve para medir las deformaciones longitudinales y transversales del acero (J. A. Gómez, datos sin publicar)

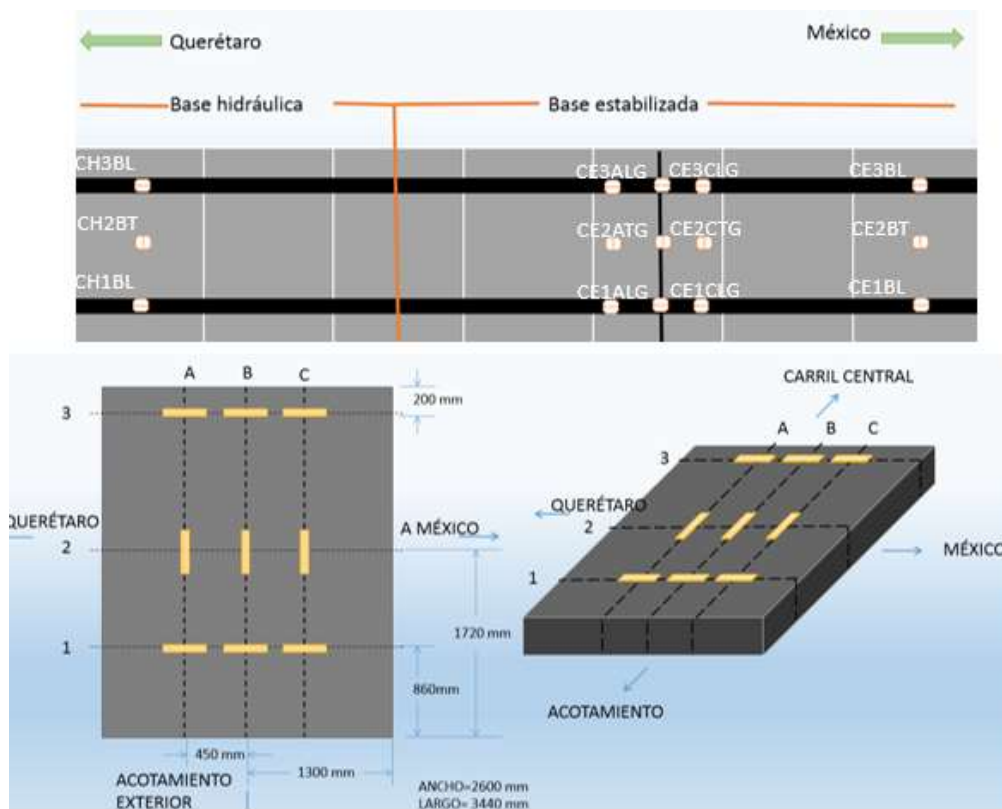


Figura 0.2. Ubicación de los sensores en concreto dentro del tramo carretero experimental

El tramo carretero experimental fue instrumentado en el año 2011, desde entonces ha sido monitoreado periódicamente considerando diferentes condiciones

ambientales y de tránsito; uno de los resultados obtenidos en este tiempo de monitoreo es el efecto térmico en el desempeño estructural del PCERC con las dos bases sobre las que descansa el sistema. Este efecto térmico provoca que en la base hidráulica se presenten condiciones de compresión en los sensores de deformación colocados sobre el concreto, y de tensión en los sensores colocados sobre acero; mientras que en la base estabilizada obtenemos mediciones de compresión, tanto en los sensores colocados en el acero como en el concreto (Quintana et al., 2013).

1 Especificaciones del pavimento de concreto estructuralmente reforzado continuo

1.1 Pavimentos

Los pavimentos pueden ser definidos como estructuras en capas, las cuáles son diseñadas para disipar la energía producida por las cargas de los vehículos, personas o medios de transporte; sin que esta rebase la capacidad de carga del terreno natural. La capa más importante es la de rodamiento, pues su calidad define -por un lado- la capacidad de carga del pavimento y -por otro- lado la velocidad media del tramo.

En México contamos con una red amplia de caminos pavimentados (aproximadamente 136,780.26 km), de los cuales 133,683.20 km son asfaltados y 3,097.09 km son de pavimento rígido (SCT y GITS, 2008)

1.1.1 Capas de un pavimento

Los pavimentos son sistemas diseñados por capas, cuya calidad del material es ascendente; por lo que resulta importante conocer sus características.

Capa de subrasante

Esta capa es la más ancha, está formada por el terreno natural o por material de relleno; en caso de que la geometría requiera un corte, la capa debe ser compactada; y en caso de terraplén, podemos utilizar el material producto del corte o bien material con mejor calidad, pero con una adecuada compactación.

Capa subbase

Es una capa de materiales pétreos, de buena graduación, construida sobre la subrasante. Esta capa, al igual que la anterior, deberá cumplir con los requisitos de compactación y calidad; es la que subyace a la base, en algunos casos, como por ejemplo en los pavimentos flexibles. Normalmente, la subbase es construida para lograr espesores menores de la capa de base. En el caso de pavimentos de concreto, en muchas ocasiones resulta conveniente colocar una capa de subbase cuando las especificaciones para pavimentos son más exigentes.

Base

Constituye la capa intermedia entre la capa de rodamiento y la subbase. Generalmente es usada en los pavimentos flexibles y compuesta de materiales pétreos con buena distribución granulométrica. Esta capa permite reducir los espesores de carpeta y los esfuerzos cortantes que se transmiten hacia las capas inferiores. Además, cumple una función para drenar el agua atrapada dentro del cuerpo del pavimento.

Carpeta

Superficie de rodamiento constituida por materiales endurecidos para minimizar los esfuerzos hacia las terracerías. Pueden ser materiales granulares con o sin liga; o más comúnmente de concreto asfáltico o hidráulico, en sus diferentes variantes. Constituye el área propiamente dicha por donde circulan vehículos y peatones.

1.1.2 Pavimentos flexibles

Son aquellos construidos con materiales asfálticos o pétreos; una alternativa para caminos con tránsito entre 10 mil y 50 mil vehículos diarios. Su sección está constituida por capas que mejoran su calidad de abajo para arriba; y su geometría se asienta en capas con mayor ancho en la base, pero menor calidad; como todo pavimento, su finalidad es la disipación de energía, sin que esta rebase la capacidad del terreno natural.

1.1.3 Pavimentos rígidos

Son aquellos construidos con cemento Pórtland y materiales granulares, cubren tránsitos de 5 mil hasta más de 50 mil vehículos diarios, de todos los tipos y en ambas direcciones. En todos los casos, consideramos una tasa de crecimiento de tránsito de 3% anual y utilización de concretos de 300 kg/cm² de módulo de ruptura a la tensión por flexión. Consta de una losa de concreto apoyada en una base de 15 a 20 cm, con un VRS de 50%.

1.1.3.1 Pavimentos rígidos con juntas

El pavimento rígido con juntas o Jointed Plain Concrete Paviment (JPCP), es el más usado; su característica distintiva es el uso de juntas que se interconectan por medio de barras de unión diseñadas con dos finalidades: la primera para mantener la losa unida y, la segunda, para transmitir la carga de una losa a otra (Choi y Won, 2009); estas juntas tienen la finalidad de disipar los esfuerzos laterales provocados por alabeo térmico. Como ya mencionamos, este tipo de pavimentos tiene un desempeño aceptable; pero la razón por la que se busca un pavimento continuo es debido al golpeteo en los extremos de las losas, que genera un despostillamiento, y una mala transmisión de la carga a la siguiente losa.

1.1.3.2 Pavimentos rígidos continuos reforzados

El Continuously Reinforced Concrete Paviment CRCP ha sido utilizado en varios países, con una reducción empírica del espesor de losa que va desde los 2.5 hasta los 5 cm; otra característica de los pavimentos reforzados es la aparición de grietas estrechamente apretadas por el esfuerzo, y no es concerniente a este si son uniformemente espaciadas. Los deterioros que ocurren muy frecuentemente en los pavimentos de concreto reforzado son por el golpeteo en el borde de la superficie. Este tipo de deterioro tiene lugar entre dos grietas transversales en paralelo y en la intersección de grietas, que forma una hendidura en Y. Estas fallas que ocurren en el bordo del pavimento generalmente se presentan en la junta (Garnica et al., 2002).

1.2 Aplicaciones de pavimentos continuos reforzados

Los casos más relevantes en diferentes países, para este estudio, fueron los siguientes:

1.2.1 Caso Bélgica

El Continuously Reinforced Concrete Paviment (CRCP) ha existido desde 1938 en Estados Unidos, pero en 1950 llegó a Bélgica y se popularizó en los años setenta y sigue vigente hasta la actualidad.

Un aspecto importante es que hicieron dos tipos de diseños básicos; el primero es una capa base seguida de una capa de bituminosos y posteriormente una capa de CRCP, y el segundo diseño es similar; con excepción de que no cuenta con la capa de bituminosos.

Lo que encontramos en estos pavimentos es la generación de grietas con espaciamientos entre 40 cm y 60 cm, después de veinte años de operación para el caso del primer tipo, y de 80 cm hasta 1 metro de espaciamiento para el segundo tipo; aunado a esto, encontramos que las varillas no sufren corrosión significativa, y que en general ambos tipos tienen una funcionabilidad aceptable, ya que estuvieron sometidos a incrementos considerables de carga y presentaron el agrietamiento ya mencionado.

Otro aspecto importante es el hecho de que, analizando la interacción entre capas, notamos una mayor erosión de la capa base del pavimento que no cuenta con el material bituminoso; en la actualidad este tipo de pavimentos es usual con las siguientes especificaciones: área de acero del 0.76% del área de pavimento, espesor de 23 cm y la capa bituminosa entre la base o el pavimento viejo y el CRCP (Rens, 2005).

1.2.2 Caso EE. UU. (Rehabilitación)

La rehabilitación fue realizada con un sistema similar al PCERC y al CRCP; el sistema con el nombre de CRBCO consiste en adicionar una capa superior a un pavimento ya existente de JPCP, con las características de diseño estipuladas por AASHTO 93, y con las características de refuerzo proporcionadas por el TxDOT; el cuál es un .65% de área de acero, del total del área de sección. El armado utilizado está al centro de peralte, además fue utilizada una malla en el área de las juntas con JPCP, y ganchos con cemento epóxico para la unión de ambas capas; este diseño proviene de análisis empíricos y relacionados con la práctica.

El tramo fue construido con un concreto de fraguado rápido cuyo módulo de elasticidad es 19.30 MPa, y tiene un coeficiente de expansión térmica constante de $8.08 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$.

Los resultados obtenidos hablan de un mejor comportamiento del pavimento CRBCO, con espaciamientos de grietas superiores a 1.5 m, las cuáles son normales en un CRCP, es probable que el sistema pueda cumplir con el aumento de tráfico programado, además de que sea una solución a largo plazo y evite mantenimientos a gran escala.

Gran parte del éxito de este tipo de pavimento es la compatibilidad de la capa inferior (JPCP), la cual actúa como una base estabilizada.

Otro aspecto interesante es la superioridad estructural que tiene el CRBCO frente a la colocación de una capa de concreto asfáltico, la cual refleja la junta de la superficie de rodamiento del JPCP.

El CRBCO fue instrumentado con la finalidad de monitorear el comportamiento del pavimento, con sensores puestos en el fondo del CRBCO.

Se pudo observar un ciclo térmico en el cuál por la mañana se va calentando y se comporta a tensión, y por las tardes se va enfriando y se comporta a compresión.

También se observó un régimen casi a compresión de los sensores; pero al surgir una grieta, el estado de esfuerzos cambia a tensión; esto puede ser debido a la liberación de esfuerzos que produce la grieta y tiene la función de una junta térmica.

Se observó que, durante los primeros días, la contracción producto del curado es casi despreciable.

Otra característica es la disminución del ancho de grietas a lo largo del día, lo cual es un comportamiento diferente al registrado por el CRPC.

1.2.3 Caso México (Tramo experimental)

EL PCERC ya ha sido construido con anterioridad en México; en las ciudades de Zacatecas, León, Guanajuato y en Cd. Obregón (J. A. Gómez, datos sin publicar).

En el caso de Zacatecas, se realizó un tramo experimental con características muy similares al instalado para este estudio y en el cuál fue analizado el desempeño estructural del PCERC en un corto plazo (Treviño y Olivares, 2006).

Hubo un proyecto de investigación sobre pavimento de concreto reforzado estructuralmente con mallas electrosoldadas de acero laminado en frío, instalado en la ciudad de Zacatecas, con el objetivo general de lograr una mejor comprensión de su comportamiento.

El tramo de prueba de concreto reforzado estructuralmente con mallas electrosoldadas de acero grado 60, de 105 m de longitud de 16 cm de espesor, con juntas transversales a cada 15 m y una sola junta longitudinal al centro de la calzada fue construido durante el mes de septiembre del 2005, intercalándolo dentro del libramiento de Zacatecas.

La instrumentación hecha con una losa localizada en la parte media del tramo experimental, de 7 m por 15 m, fue instrumentada internamente con:

- a) 35 extensómetros eléctricos adheridos al acero de refuerzo;
- b) 12 extensómetros embebidos en el concreto; y
- c) 10 sensores de temperatura.

Los datos obtenidos por medio de un modelo en SAP-2000 fueron corroborados. El diseño del modelo está basado en la hipótesis simplificada del modelo de cimentación de Winkler o líquido denso.

Hay que considerar que, al paso del tiempo, estas deformaciones son aditivas a las inducidas por alabeo y cambios volumétricos; por lo que parece razonable pensar que, en el corto plazo, el pavimento cambiará su régimen de comportamiento al de sección agrietada; lo cual podrá comprobarse en las siguientes etapas de prueba.

Al ocurrir el agrietamiento, las deformaciones y esfuerzos en ambos materiales se verán incrementados del orden de cinco a seis veces; y la función del acero de refuerzo será fundamental para mantener la anchura de las grietas.

Respecto a las mediciones de temperatura, su variación a través del espesor de la losa es congruente con la esperada para las horas del día en que se llevaron a cabo.

1.3 Filosofías de diseño para pavimentos rígidos

1.3.1 El método AASHTO para pavimentos rígidos

Es el método más utilizado en la práctica; consiste en determinar los daños producidos por la cantidad de ejes que circulan y circularán, de acuerdo con una tasa de incremento de flujo vehicular; sin embargo, este análisis se hace de forma

empírica y relacionándolo directamente la capacidad de la sección de resistir el paso del flujo vehicular.

La filosofía de diseño AASHTO sugiere la utilización de parámetros cualitativos y cuantitativos que hacen énfasis en el parámetro de número de ejes equivalentes, en el que este es el más importante; sin embargo, es digno de mencionar que varios de los parámetros cualitativos dependen exclusivamente de observaciones en campo, así como de la experiencia y la destreza del diseñador; el cuál debe hacer uso de una serie de monogramas y la ecuación 1 para la determinación del espesor o el número de ejes equivalentes, del pavimento, sin importar si este es un sistema con juntas reforzadas o continuo de concreto reforzado.

$$(1) \quad \log_{10}(W_{18}) = \left\{ z_r + S_0 + 7.35 \log_{10}(D + 1) - 0.006 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + \right. \\ \left. (4.22 - 0.32 \times Pt) \log_{10} \left\{ \frac{S'c \times Cd \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{Ec}{k} \right)^{0.25}} \right]} \right\} \right\}$$

Donde:

- W_{18} es el número de ejes equivalentes diarios.
- z_r es la desviación normal estándar en función de la confiabilidad.
- S_0 es el error estándar combinado en función de la confiabilidad.
- D es el espesor.
- ΔPSI es la serviciabilidad.
- P_t es la serviciabilidad final.
- $S'c$ es el módulo de ruptura.
- Cd es el coeficiente de drenaje.
- J es el módulo de transferencia de carga.
- Ec es el módulo de elasticidad.
- K es el módulo de reacción.

La diferenciación que sugiere el método AASHTO, para pavimento continuo de concreto reforzado, es que los coeficientes de transferencia de carga sean más pequeños que los de los pavimentos de concreto con juntas planas; por lo que los pavimentos continuos de concreto reforzado pueden tener como resultados espesores delgados, por el orden de 2.5 a 5 cm menos que pavimentos de concreto con juntas planas.

La cantidad de acero longitudinal puede ser diseñado para controlar el espaciamiento y el ancho de las fracturas y el esfuerzo máximo de acero.

1.3.2 Método de la PCA

Este método se basa en el concepto de resistencia utilizada para diferentes solicitaciones como cargas de tránsito y ambientales, básicamente consiste en comparar las cargas ejercidas por los ejes y con los esfuerzos resistentes del diseño.

Al igual que el método AASHTO; se basa en la utilización de monogramas y tablas, con la finalidad de obtener un espesor de losa o bien un numero de ciclos de carga de los ejes equivalentes, que sea capaz de resistir el pavimento.

Este método se basa en la siguiente ecuación:

$$(2) \quad \text{Log } N = 14.524 - 6.777(C_1P - 9.0)^{0.103}$$

Donde:

- N número de repeticiones permisibles para un índice de servicio presente de 3.0
- P proporción de trabajo o potencia= $268.7 \frac{p^2}{hk^{0.73}}$
- p presión sobre el apoyo de la esquina de la losa, en libras/pulgadas cuadrada
- ρ kw= caso de cimentación líquida (Winkler)
- h espesor de la losa en pulgadas
- k módulo de reacción del apoyo, en lb/plug³
- C₁ Factor de ajuste, 1 para subbases sin trata y 0.9 para subbases estabilizadas.

Aunada a esta ecuación, está la ecuación de daño por erosión.

$$(3) \quad \text{Daño por erosión, (\%)} = 100 \sum_{i=1}^m \frac{C_2 n_i}{N_i}$$

Donde:

$C_2 = 0.06$ pavimento sin acotamientos

$C_2 = 0.94$ pavimentos con acotamientos sujetos

Esencialmente el método maneja dos criterios:

- a) Criterio por fatiga: utilizado para mantener los esfuerzos inducidos a la losa de concreto de límites aceptables.
- b) Criterio por erosión: para limitar los efectos de la deflexión del pavimento en las zonas críticas (orilla y esquinas) inducida por erosión de la capa de apoyo en esquinas y orillas. Este enfoque también sirve para limitar problemas de fracturas en zona de juntas, especialmente en pavimentos sin pasajuntas.

1.3.3 Programa ME de diseño

La base del cálculo de este software es el proceso AASHTO, por lo que es conocido como Método empírico mecanizado (ME); que tiene, al igual que el método AASHTO (1993), como principales componentes el tráfico, el módulo de reacción del suelo, el carril de diseño y otros. Pero el programa además incluye otros parámetros como es el caso de propiedades térmicas del concreto, la relación agua cemento, el contenido de cemento, el acero de refuerzo y otros.

Algunos de los parámetros que utiliza el ME serán descritos a continuación:

El tráfico

En el AASHTO (1993) se usa como parámetro del tráfico diario medio anual, para determinar el número de ejes equivalentes; el programa ME utiliza el tráfico medio anual de camiones para tipificar el tipo de vehículos que pasan y los daños que estos provocan a fatiga.

Clima

Este factor es tomado en cuenta como parte esencial para el cálculo de los perfiles de temperatura, los parámetros pueden ser ingresados o utilizar parámetros de varias estaciones climáticas a lo largo de Estados Unidos.

Espesor de losa

Por medio de este parámetro, el programa hace simulaciones que arrojan como resultado los IRI; y en el despostillamiento simulado, que a su vez son parámetros para de comparación que son asociados a la calidad requerida según el tipo de vía.

Refuerzo de acero

Este parámetro permite agregar un área de acero y su ubicación en el programa, y esto a su vez simula los efectos que tiene este en IRI y en el despostillamiento.

Coefficiente térmico del concreto

Si bien este es un parámetro para medir directamente las dilataciones, el programa señala que gran parte de este en función del agregado utilizado.

Tipo y ancho de hombro

Esto se halla relacionado con el golpeteo que se presenta en esta zona.

Tipo de Base y fricción entre capas

El programa asemeja la reacción y la relación entre la base y la losa, por lo que este parámetro impacta directamente en el funcionamiento del pavimento.

El mes de construcción

Es importante en el sentido de que este determina algunas de las características del perfil de temperaturas.

1.3.4 Filosofías de diseño con respecto al PCERC

Si bien AASHTO 93 minimiza los efectos del acero de refuerzo, puesto que los limita a una disminución en el módulo de transferencia de carga J (Ecuación 1), el Software ME considera el acero de refuerzo como factor con gran impacto en el cálculo, pero minimiza los efectos térmicos; ya que los relaciona solo con la época del año en que fue construido el pavimento (FHWA, 2013).

Mientras que estudios como los de Qin y Hiller (2011) han determina una relación de esfuerzos térmicos por el orden de 0.3 MPa por cada 5°C de diferencia.

Estos esfuerzos debidos al gradiente térmico implican la necesidad de restringir los efectos que provocan, la forma más común de restringirlos es por medio de juntas térmicas, sin embargo se ha observado que las juntas térmicas generan pérdida de la capacidad de transferencia de carga entre la losa, lo que a su vez genera golpeteos; por lo que una posible solución para evitar golpeteos sea la generación de pavimentos continuos, pero la falta de juntas térmicas provocaría agrietamientos; estos pueden ser controlados con la adición de barras de acero, que tienen la facultad de absorber el esfuerzo generado a tensión por parte de los gradientes térmicos y el peso propio de la losa; pues aunque en general los sistema de pavimentos trabajan a compresión, debido al paso de vehículos, los cambios en los gradientes térmicos generan tensión.

Algunos de los trabajos para controlar el agrietamiento están dados en relacionar la cuantía de acero con el ancho de agrietamiento, como se observa en la siguiente expresión (ACI, 1995):

$$(4) \quad w = 0.10f_s \sqrt[3]{dcA10^{-3}}$$

Donde:

W Ancho de grieta en (pulg)

f_s esfuerzo calculado en el acero de refuerzo (ksi)

dc recubrimiento al centro de la barra (pulg)

A área efectiva promedio de concreto alrededor de una barra de refuerzo ($2dc \times$ espacio), (pulg).

De igual forma, el mismo reporte establece una cuantía de acero mínima para el control del esfuerzo a tensión en losas (tabla 1.1).

Tabla 1.1 Acero mínimo para temperatura (ACI, 1995)

Para losas donde se utilizan barras de refuerzo de grado 40 o 50	0.0020
Para losas con barras o malla electrosoldada grado 60	0.0018

También este reporte establece que la separación mínima en el acero no debe exceder 18 pulgadas, o bien 5 veces el peralte de la losa.

Las mismas normas técnicas complementarias del D.F. (*¿Ciudad de México?) establecen la siguiente formulación para establecer una cuantía de acero capaz de controlar las grietas.

$$(5) \quad a_{s1} = \frac{660 x_1}{f_y(x_1+100)}$$

Donde:

a_{s1} Área transversal del refuerzo colocado en la dirección que se considera, por unidad de ancho de la pieza (cm²/cm)

x_1 Dimensión mínima del miembro medida perpendicularmente al refuerzo, mm (cm)

Si x_1 no excede de 150 mm, el refuerzo puede ser colocado en una sola capa. Si excede de 150 mm, se debe colocar en dos capas, próximas a las caras de los elementos. La separación entre barras no excederá de 500 mm ni $3.5 x_1$.

Esta normativa establece que cuando la losa tenga características especialmente críticas, debemos proponer un factor de escalamiento de la cuantía de acero de 1.5.

Otra de las filosofías para el control de grietas por medio de acero es el caso de AASHTO (2007), la cuál establece una cuantía de acero de por lo menos 0.003 y una separación 30 cm como mínimo; otro aspecto es que esta cuantía puede ser distribuida en varios lechos, tal y como sucede en nuestro caso.

En la propuesta de pavimento del PCERC, la cuantía de acero se encuentra distribuida en dos mallas, como muestran las tablas 2.2 y 2.3

Tabla 1.2 Cuantías de acero de refuerzo en pavimento PCERC (malla 1)

Sentido	Ancho sección transversal (m)	Área transversal (cm ²)	No. de barras	Diám. de barra	Área por barra (cm ²)	Área total de acero (cm ²)	Cuantía de refuerzo ρ proporcionada
Longitudinal	2.6	4680	13	9.21mm	0.67	8.66	0.00185
Transversal	3.5	6300	25	9.21mm	0.67	16.75	0.002658

Tabla 1.3 Cuantías de acero de refuerzo en pavimento PCERC (malla 2)

Sentido	Ancho sección transversal (m)	Área transversal (cm ²)	No. de barras	Diám. de barra	Área por barra (cm ²)	Área total de acero (cm ²)	Cuantía de refuerzo ρ proporcionada
Longitudinal	2.6	4680	11	7.95mm	0.496	5.46	0.00116
Transversal	3.5	6300	18	7.95mm	0.496	8.928	0.00141

Se observa que cumple con los requerimientos de todas las normativas, sin embargo, el reporte ACI 224R-01 (2008) menciona que los porcentajes mínimos de acero de entre 0.18 y 0.20% establecidos en las normas ACI 318 generalmente no controlan los agrietamientos a límites “aceptables”; para llevarlas a límites “más aceptables” son necesarias cuantías mínimas de 0.60%.

Por lo que se puede observar que sea necesario replantear el modelo del PCERC; sin embargo, se tendría que hacer una valoración del costo-beneficio al incrementar las áreas de acero.

1.3.5 Estándares de calidad de un pavimento

Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

El IRI es una medida de confort y seguridad de un pavimento, se puede describir como el perfil de irregularidades a lo largo de una longitud; este es uno de los indicativos de calidad más usados en los pavimentos, ya que refleja en gran cantidad de sus virtudes y es uno de los principales criterios de aceptación y rechazo de un pavimento.

Según Akhter, et al. (2007); el módulo de ruptura, el tipo de material de la base, valor inicial del IRI afectan la tasa de degradación de este parámetro.

Mapeo de grietas

En general, es una característica que nos ofrece una visión del comportamiento estructural del pavimento y nos da un indicativo de la capacidad de resistencia del sistema; sin embargo, una característica que en los pavimentos continuos reforzados es que las cargas por temperatura son controladas por el agrietamiento transversal y el refuerzo de acero sigue permitiendo una transferencia adecuada de carga (Nam, et al., 2007).

Una característica positiva de los pavimentos continuos reforzados es la casi nula existencia de despostillamientos, lo que limita el fenómeno de bacheo; estos despostillamientos son dos grietas transversales unidos por una grieta longitudinal (Choi, et al., 2011).

Índice de transferencia de carga

El índice de transferencia de carga eficiente (LTE) se estudia en función de varios parámetros, (espesor de grieta, temperatura del concreto, espesor de losa y la estación), esto de acuerdo con la FWD. Es uno de los parámetros esenciales para el diseño mecanizado ME.

Won (2011) mediante un estudio, realizado en Texas, mostró que todas las grietas tienen un LTE arriba del 90%, en los CRCP; también pudo observar que la hipótesis de partida de que existe una correlación casi lineal entre el ancho de grieta y la separación de estas no es del todo cierta; por lo que mostró que casi no hay correlación entre estos parámetros, por lo que es necesario reevaluar la función LTE, en función de estos hallazgos.

También se encontró que el LTE varía en función de la temperatura; lo que quiere decir que, a mayor temperatura, mayor LTE; y a menor temperatura, menor LTE; lo que explica porque la función LTE de la FWD pierde validez en climas extremos o que no van de acuerdo con la media nacional.

Este comportamiento también hace una clara diferenciación entre el JCP y CRCP, puesto que el primero tiene la capacidad de absorber el cambio volumétrico por la

junta, mientras que el segundo, no; lo que indica un comportamiento totalmente diferente en el parámetro LTE.

También se observó que la mayoría de los hundimientos y baches son provocados por la erosión del hombro; pero también, que en bases estabilizadas no se tiene esta erosión. Sin embargo, se concluyó que la mayoría de los hundimientos no son provocados por deficiencias estructurales del CRCP sino por la socavación que produce una deflexión excesiva.

Se encontró, por medio de la extracción de núcleos, que las grietas longitudinales están ubicadas en la zona del acero longitudinal; además se observó que estas grietas llegan hasta la zona del acero, y después el núcleo es sólido en la parte inferior; se menciona que no se encontró un núcleo que fuese atravesado por una grieta del lecho inferior, sino hasta el superior.

1.4 Cargas de tránsito

1.4.1 Análisis mecánicos o estadísticos

Según Salazar (1998) es el factor más importante en el diseño de pavimentos. El aspecto del tránsito debe considerar tanto la geometría de las cargas o la configuración de vehículos, como la distribución estadística e intensidad de cargas. En los análisis mecánicos, AASHTO (1993) y Portland Cement Association (1984) es relativamente común asociar el daño por fatiga, producido por el tránsito, con el agrietamiento y se define en términos de un índice de agrietamiento IA, el daño por fatiga es calculado por medio de la prueba estipulada en la norma ASTM C78, para vigas de concreto simple, y ASTM C1609 para vigas de concreto reforzadas con fibra; esto mediante el uso de una viga simple con carga al tercio de claro, como muestra la figura 1.3.



Figura1.1 Prueba de tres puntos

Se puede obtener el número de repeticiones con las siguientes formulas:

$$(6) \quad \text{Log } N_f = f_1 - f_2 \left(\frac{\sigma}{M_r} \right)$$

Donde:

N_f Número de repeticiones permisibles

σ Esfuerzo de flexión en la losa

M_r Módulo de ruptura del concreto

f_1 y f_2 Constantes de fatiga a determinar en laboratorio.

$$(7) \quad \sigma = \frac{3 a P}{b h^2}$$

Donde:

σ Esfuerzo de flexión en la losa

a Un tercio del claro de la viga

P Carga aplicada a la viga

b Ancho de la viga

h Peralte de la viga

Por medio del número de repeticiones en la viga, se puede calcular el módulo de ruptura; que finalmente nos permite el cálculo de espesor de la losa a (Altoubat et al., 2008).

$$(8) \quad M_r = \frac{P L}{b h^2}$$

Donde:

M_r Módulo de ruptura.

P Carga aplicada a la viga

L Claro de la viga

b Ancho de la viga

h Peralte de la viga

1.4.2 Soluciones cerradas

Fórmulas de soluciones cerradas (principalmente los trabajos de Westergaard): aplicables solo a una carga producida por una rueda, cuya área de contacto puede tener una configuración circular, semicircular, elíptica o semielíptica.

$$(9) \quad \sigma = \frac{3p}{h^2} \left[\frac{I - (a\sqrt{2})^6}{I} \right]$$

Donde:

- σ Esfuerzo de la losa
- P Carga que se aplica en la losa
- a Radio del círculo de la carga que se aplica
- I Radio de rigidez relativa

$$(10) \quad I = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-u)k}}$$

Donde:

- E Módulo de elasticidad
- u Relación de Poisson
- k Módulo de reacción

1.4.3 Cartas de Influencia

Son las desarrolladas por Pickett y Ray, y con ellas se puede aplicar una configuración de varias llantas. Tanto en este caso como en el anterior, la superficie de apoyo se tipifica como una cimentación "líquida" o elástica, en una losa muy grande.

Este método se utiliza para el diseño del pavimento en estudio, empleando una variante del método de diseño Brasileiro (Firme y Rocha, 1997) para pavimentos de concreto reforzado. El método se basa en el empleo de monogramas para la obtención de los momentos flexionantes en la losa de diseño y con base en estos valores se calcula el contenido de acero estructural y por temperatura requerido

El método es un modelo propuesto por Westergaard y resuelto mediante el empleo de cartas de influencia por Pickett y Ray (Pickett y Ray, 1951). Como se ha mencionado, este es básicamente un método gráfico en el que se determinan los momentos actuantes en la losa, de acuerdo con el método PCA, a través de cartas de influencia. La metodología estima los momentos causados en el interior y el

borde de la losa por las cargas actuantes (vehículo de diseño), asumiendo una cimentación tipo Winkler o de líquido denso. Una vez que se conocen los momentos positivos presentes en la losa (interior y borde), se determina el acero de refuerzo necesario para resistirlos, que corresponde al acero del lecho inferior de la losa. Este es un procedimiento sencillo, que sigue los conceptos básicos del diseño de estructuras de concreto reforzado. Los momentos negativos, causados en el lecho superior de la losa son prácticamente nulos y pueden ser despreciados; además, pueden ser contrarrestados por el propio peso del concreto.

El método requiere de los siguientes pasos:

Cálculo de las propiedades elásticas del concreto

Se asume un módulo de ruptura del concreto (MR); y a partir de este valor, se deduce su resistencia a la compresión (f'_c) usando el valor crítico que resulte de aplicar las siguientes ecuaciones:

$$(11) \quad MR = 2.19\sqrt{f'_c}$$

$$(12) \quad MR = 0.13\sqrt{f'_c}$$

El valor del módulo de elasticidad (E_c) se obtiene empleando la relación mostrada en la ecuación 13, la cuál es una formula empírica usada universalmente y obtenida a partir de correlaciones.

$$(13) \quad E_c = 15100\sqrt{f'_c}$$

El radio de rigidez relativa, que es dependiente de las propiedades de la losa y de las características del suelo de cimentación, se estima empleando la teoría de diseño de pavimentos de Westergaard, conforme a la siguiente ecuación.

$$(14) \quad I = \sqrt[4]{\frac{E_c h^3}{12(1-V^2)k}}$$

Donde:

h Espesor de la losa de concreto

V Módulo de Poisson del concreto

k Módulo de reacción de la subrasante

Cálculo de momentos actuantes

La siguiente etapa consiste en el cálculo de los momentos actuantes en el interior y el borde de la losa. Ambos se obtienen usando la expresión mostrada en la ecuación 15 (Pickett y Ray, 1951).

$$(15) \quad M = \frac{Npl^2}{10000}$$

Donde:

- N Valor obtenido de la carta de influencia (figura 4)
- p Presión de inflado de la llanta de diseño
- l Radio de rigidez relativa.

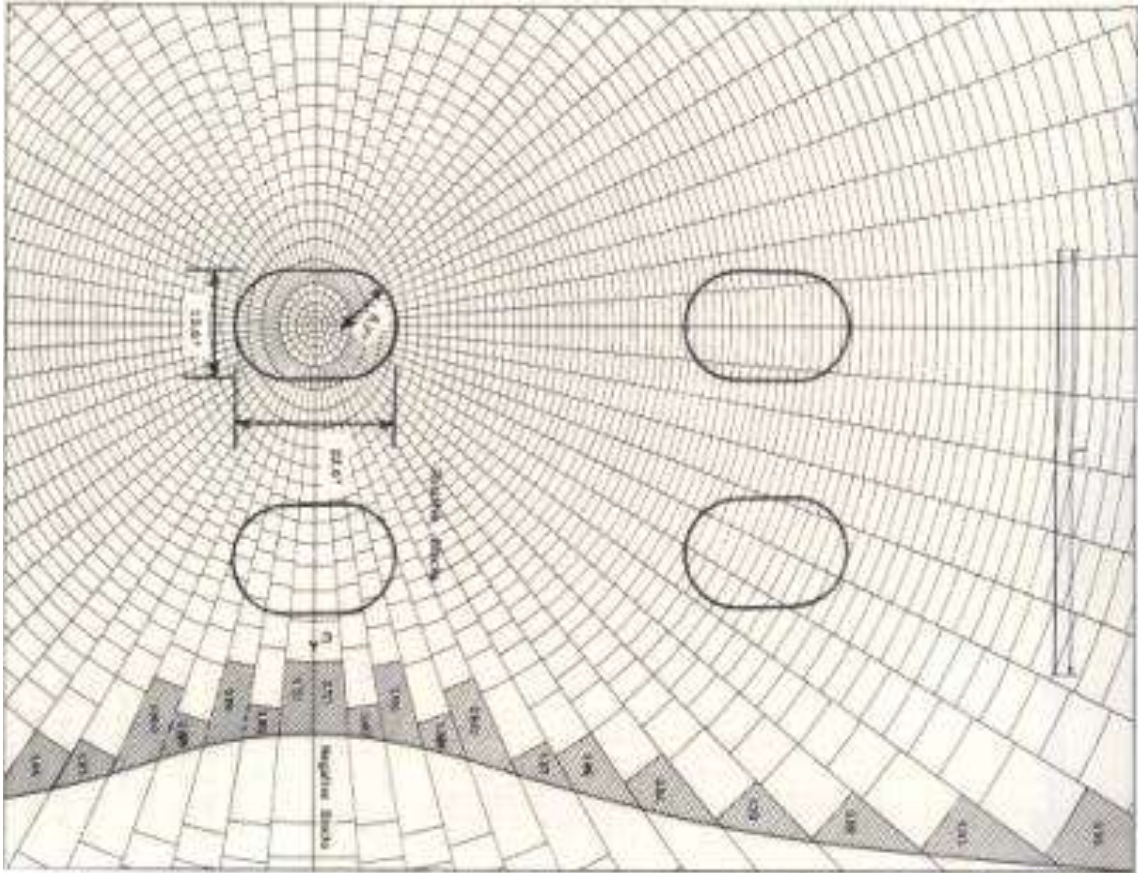


Figura 1.2 Carta de influencia

De este modo, valores de los momentos en el interior (M_i) y en el borde (M_b) se emplean para el diseño del contenido de acero de refuerzo por flexión (lecho inferior) y por efectos de temperatura (lecho superior).

Las ventajas del empleo de este método son:

- a) Es un método sencillo de aplicar y requiere un mínimo de parámetros de entrada de diseño.

- b) Puede ser usado principalmente para el diseño de pavimentos rígidos en zonas donde el tránsito pesado es limitado, como las zonas urbanas residenciales.
- c) Puede servir de manera de diseño preliminar cuando no existen mayores datos acerca de los materiales por emplear y del grado de confiabilidad del diseño requerido.

1.4.4 Elementos finitos

El método de elementos finitos es el enfoque más razonable cuando se desea hacer un análisis de una serie de capas apoyadas en una superficie líquida o de Winkler, con un mecanismo de transferencia de carga entre las juntas (pasajuntas en las juntas o fricción entre las paredes de las grietas). El apoyo "líquido" de las losas se asemeja a una serie de resortes independientes. De esta manera, la deflexión en un punto -debido a la carga aplicada en él- será independiente a la fuerza aplicada en otro punto.

1.5 Cargas por temperatura

1.5.1 Perfil de temperatura en un pavimento

Propiamente dicho, el perfil de temperatura no es más que una representación gráfica de la temperatura a diferentes profundidades y en diferente tiempo; además es un indicativo de la capacidad de disipar el calor por parte del material.

También es importante mencionar que la mayoría de los cálculos de los esfuerzos por temperatura parten del perfil de temperatura como referente al comportamiento del pavimento en sus diferentes profundidades.

Algunas de las características por considerar, según Balbo y Severi (2007), son que la variación entre la temperatura ambiente y la temperatura de la losa llega a ser de 10 °C; mientras que la variación entre la temperatura al borde de la losa y al centro no es significativa.

En el caso del pavimento en estudio, como consecuencia de las mediciones de temperatura realizadas en el año 2011, se observa que la temperatura en el interior de la losa de concreto es fluctuante, y alcanza un gradiente térmico desde la superficie hasta los 18 cm de profundidad; la que va desde 1 hasta más de 8 grados centígrados.

En la figura 1.5 se pueden ver algunos de los gradientes durante el transcurso del día. En la madrugada, la superficie se encuentra a menor temperatura.

Conforme transcurre el día, se invierten los patrones para que la superficie alcance la mayor medida y puedan ser cambiados por completo los gradientes térmicos entre 9:00 a.m. y 11:00 a.m. (Quintana, et al., 2013)

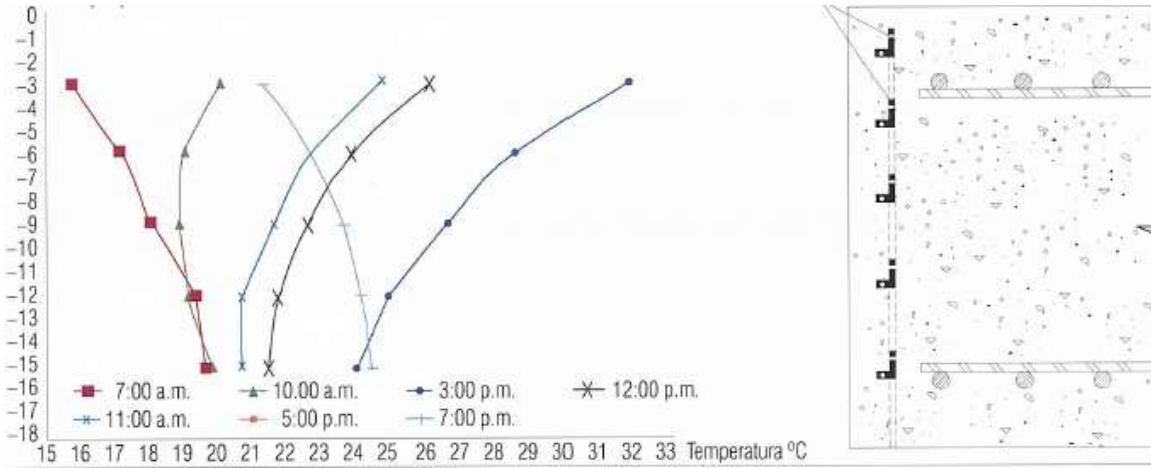


Figura 1.3 Perfil de temperatura

Una consecuencia de estos cambios térmicos en el comportamiento del PECERC es que durante el día la magnitud de las deformaciones registradas en el concreto no es igual ante el efecto de la misma carga (Quintana, et al., 2013); como puede apreciarse en la figura 1.6. Este efecto se corrobora haciendo circular un vehículo T3-S2 a diferentes horas del día, de este modo se observa la diferencia en las magnitudes de las deformaciones unitarias bajo estos escenarios.

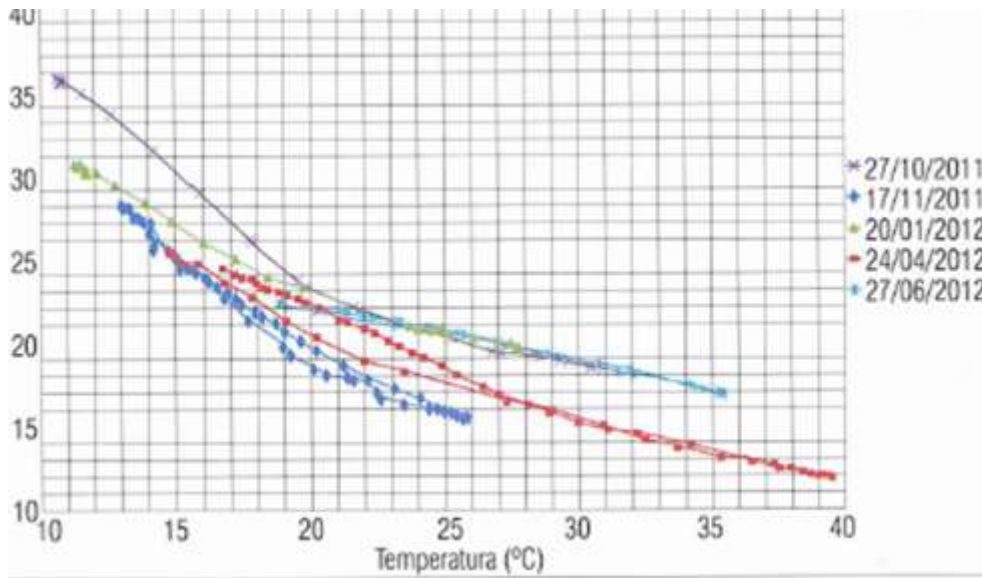


Figura 1.4 Registro de las microdeformaciones producidas por una carga viva de peso conocido a diferentes temperaturas empleado un (sensor CH1BL)

La figura 1.6 registra los cambios de magnitud de las Microdeformaciones y podemos observar variaciones del orden del 300 por ciento.

Maitra, et al. (2013) determinaron el gradiente termico (figura 1.7) mediante la medición de la temperatura en dos cilindros de concreto de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. Una cara del cilindro se tapó y se sopló aire caliente en el otro extremo del cilindro; que es. El otro extremo se cubre con tierra. Termómetros de VIF se insertaron con intervalos iguales a lo largo de la longitud del cilindro para medir la temperatura en diferentes lugares (figura 1.8).

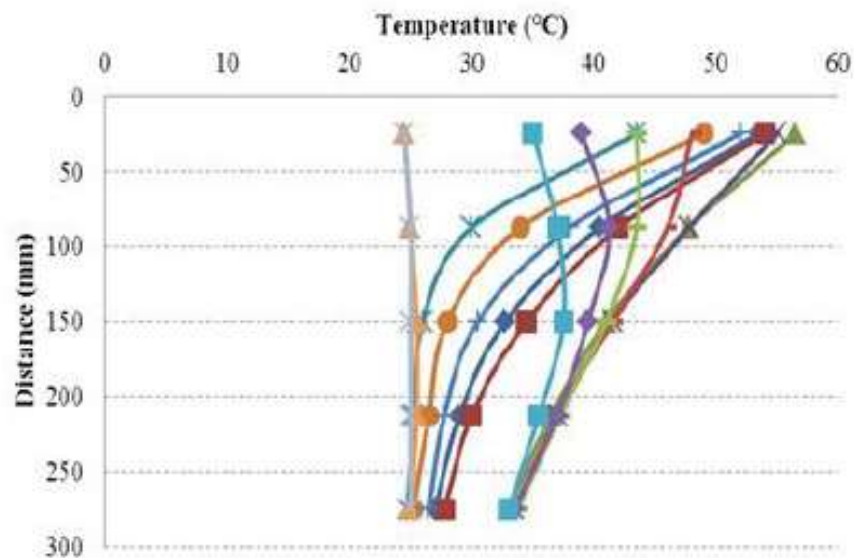


Figura1.5 Perfil de temperatura



Figura 1.6. Experimento para obtención de perfil de temperatura

Finalmente se procedió a calcular la variación de la temperatura, lo cual se hizo por medio de una interpolación uniendo las líneas en el centro, para obteniendo una ecuación a partir de los valores de la parte superior e inferior del perfil de temperatura.

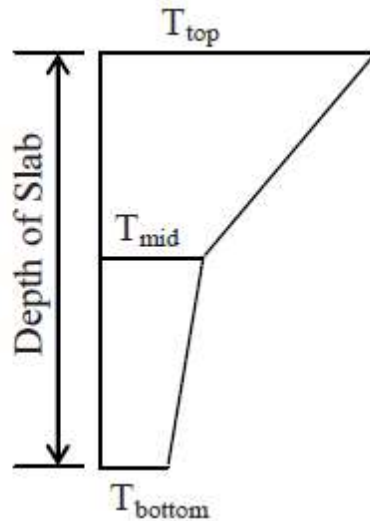


Figura 1.7 Esquema de la obtención de perfil de temperatura en tres puntos

$$(16) \quad T_{mid} = T_{bottom} + \frac{1}{3}(T_{top} - T_{bottom})$$

De este mismo principio de tres puntos de temperatura parten la mayoría de las investigaciones, pues hacen una relación entre la geometría de estos puntos de temperatura y la geometría de los esfuerzos que producen.

En el caso del presente trabajo, se realizó la obtención de los perfiles de temperatura casi de forma instantánea, pues el monitoreo permitía conocer los valores de la temperatura a cada 3 cm en un peralte de 18 cm, y solo habría que graficarlos y obtener una ecuación de estos por medio del programa Excel 2015.

Pero para el caso, se optó por ir un paso más adelante al obtener una superficie de temperaturas y una ecuación de esta, la que a su vez permitiera programar los perfiles de temperatura a diferentes horas del día; la finalidad de esto es obtener las diferentes temperaturas en diferentes profundidades, a lo largo de todo el día.

Esto se logró importando los valores de las mediciones en horas del día previamente seleccionadas, en forma de vectores, donde por medio de la ayuda de Matlab, se obtiene una superficie de puntos de la temperatura donde en el eje X tenemos la profundidad, en el eje Y la hora del día y en el eje Z tenemos las temperaturas (Pérez, 2002).

Posteriormente por medio del comando $sf = fit([x, y], z, 'poly45')$ obtenemos una superficie de ajuste a los puntos mencionados anteriormente (MathWorks, INC, 2015). Donde los ejes X y Y son valores fijos y el eje Z es el valor de la temperatura en esta superficie de ajuste, pero este comando también nos proporciona la ecuación 17, donde se obtiene el valor de la temperatura en un punto indicado cuyas únicas variables son los valores de profundidad y hora del día.

$$(17) \quad z = p00 + p10*x + p01*y + p20*x^2 + p11*x*y + p02*y^2 + p30*x^3 + p21*x^2*y + p12*x*y^2 + p03*y^3 + p40*x^4 + p31*x^3*y + p22*x^2*y^2 + p13*x*y^3 + p04*y^4 + p41*x^4*y + p32*x^3*y^2 + p23*x^2*y^3 + p14*x*y^4 + p05*y^5$$

Donde:

- z Temperatura a cierta hora del día y a cierta profundidad
- x La profundidad donde se ubica la temperatura
- y La hora del día en que se desea conocer la temperatura.
- P00 a p45 Constantes del polinomio que forma la superficie de temperatura.

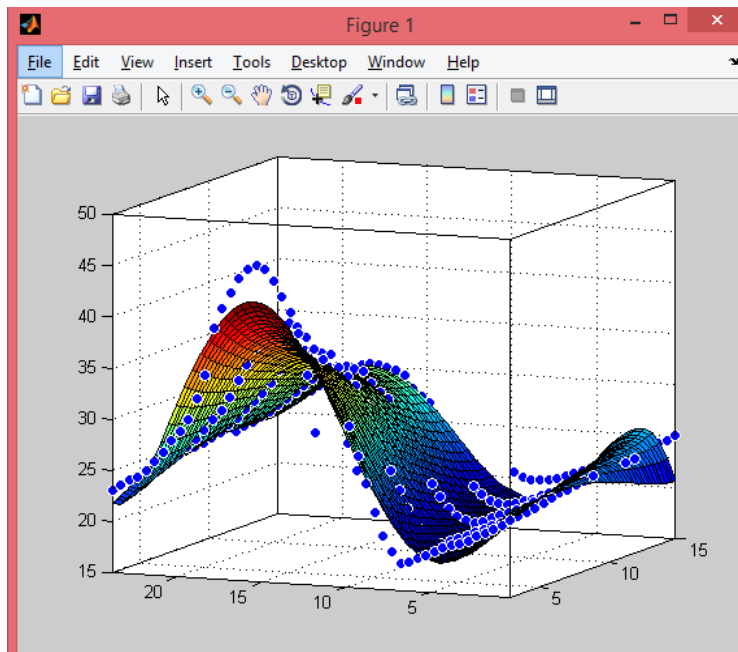


Figura 1.8 Superficie de temperatura del 15 de abril del 2015

La finalidad de la obtención de esta ecuación es su posterior programación en Ansys; para poder determinar los esfuerzos producidos por las diferentes temperaturas, en diferentes profundidades, a diferentes horas del día en estudio y su posterior comparación con los datos experimentales.

1.5.2 Coeficiente de expansión térmica en un pavimento

El coeficiente de expansión térmico es uno de los aspectos importantes de la deformación producida por la temperatura, y el esfuerzo que produce el ciclo térmico ya que está íntimamente ligado a la deformación axial (Woon, 2005).

El cambio del valor del CTE (Coefficient of Thermal Expansion), a lo largo del tiempo, es atribuible a los cambios de hidratación en edades tempranas, que provocan microfisuración; la que a su vez abre paso a agentes corrosivos (Yeon, et al., 2013).

Para el caso del modelo, se seleccionaron CTE de la literatura (Gere y Goodno, 2010), cuyos valores en el caso del concreto es $10 \frac{1E^{-6}}{c^{\circ}}$; y para el caso del acero, se consideró $11 \frac{1E^{-6}}{c^{\circ}}$; estos valores fueron utilizados para la obtención de la información experimental y para la modelación

1.5.3 Deformación por temperatura

1.5.3.1 Deformación axial

Es la producida directamente sobre el eje de acción medido, debida a la expansión térmica y el efecto normal que esta provoca.

Hay dos formas de obtenerla; una consiste en la obtención de su deformación por medio de la ecuación 18, la cual parte de las deformaciones obtenidas a diferentes profundidades de la losa.

$$(18) \quad N^* = \int_{-h/2}^{h/2} \varepsilon(z) dz$$

Que su vez por medio de la expresión 19 se puede obtener la deformación axial producida por la temperatura.

$$(19) \quad \text{Deformación axial} = \frac{N^*}{h}$$

Donde:

N^* Cociente de deformación Axial

h Peralte de la losa

$\varepsilon(z)$ Deformación de la losa en una profundidad determinada.

z Profundidad de la losa

La otra forma consiste en obtener la temperatura axial por medio de una regresión lineal (ecuación 20) como en el caso de Liu y Fwa (2003), el cuál contaba con tres temperaturas de su perfil de temperaturas a diferentes profundidades.

$$(20) \quad t = A_t + B_t z + C_t z^2$$

Donde:

$$A_t = t_m$$

$$B_t = \frac{t_t - t_b}{h}$$

$$C_t = \frac{2(t_t + t_b - t_m)}{h^2}$$

Finalmente obtienen la temperatura axial

$$(21) \quad t_{axial} = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} (A_t + B_t z + C_t z^2) dz = A_t + \frac{C_t h^2}{12}$$

Donde:

- t La temperatura en esa profundidad en °C
- z Profundidad del punto en la losa
- h Peralte de la losa
- tt Temperatura en la parte superior de la losa
- tm Temperatura en la parte media de la losa
- tb Temperatura en la parte inferior de la losa

Finalmente, al multiplicar esta temperatura por el coeficiente de expansión térmico del material y el módulo de elasticidad, obtenemos el esfuerzo axial por temperatura.

En el caso del modelo, no se hicieron consideraciones especiales para esta deformación; ya que, al asignar temperaturas y una temperatura de referencia, en automático ANSYS simula la deformación axial.

1.5.3.2 Deformación lineal

Lineal: Es debido a la diferencia de temperatura entre la parte superior y la parte inferior creando un momento flexionante.

De igual forma que la deformación axial, hay dos formas de obtenerla la primera parte de las deformaciones obtenidas a lo largo de la losa, como muestra la ecuación 22.

$$(22) \quad M^* = \int_{-h/2}^{h/2} \varepsilon(z) z dz$$

Que su vez, por medio de la expresión 23, se puede obtener la deformación lineal producida por la temperatura.

$$(23) \quad \text{Deformación lineal} = \frac{M^*}{h^3} \quad (23)$$

Donde:

M^* Cociente de deformación lineal

h Peralte de la losa

$\varepsilon(z)$ Deformación de la losa en una profundidad determinada.

z Profundidad de la losa

De igual forma que la deformación axial, esta puede ser calculada por medio de la temperatura que causa la deformación lineal con las expresiones de Liu y Fwa (2003).

$$(24) \quad M^* = \int_{-h/2}^{h/2} (B_t z + C_t z^2 - \frac{C_t h^2}{12}) dz = \frac{B_t h^3}{12} \quad (24)$$

$$M^* = \frac{B_t h^3}{12} = t_{lineal} \left(\frac{h^2}{6} \right)$$

Finalmente, como en el caso de la temperatura axial, de igual forma podemos obtener el esfuerzo lineal multiplicando la temperatura lineal por el módulo de elasticidad y el coeficiente térmico.

Para el modelo, se consideró la programación de la ecuación 25 y se obtiene el esfuerzo multiplicándolo por las propiedades del material; este esfuerzo se convierte a una presión vertical asignada a una profundidad.

$$(25) \quad t_{lineal} = B_t z$$

1.5.3.3 Deformación no lineal

Es producido por unas restricciones internas entre los elementos de la losa, con el objetivo de equilibrar los esfuerzos en la losa

De igual forma que las deformaciones anteriores, hay dos formas de calcular la deformación no lineal; pero parten de un principio similar que consiste en restar a la deformación o temperatura obtenida directamente de la medición, las temperaturas o deformaciones axiales y lineales.

$$(26) \quad \varepsilon_{no\ lineal} = \left[-\varepsilon(z) + \frac{12M^*}{h^3} z + \frac{N^*}{h} \right]$$

$$(27) \quad t_{no-lineal} = t_{total} - t_{lineal} - t_{axial}$$

Por lo que algunos autores simplemente consideran esta deformación en función del esfuerzo total, como un porcentaje de este.

Como el caso Tsubokawa, et al. (2008) en el cuál dedujeron que el esfuerzo provocado por la temperatura no lineal era un 30% del valor de la temperatura lineal en su punto máximo, y este caso aplicaba para losas de 25 a 20 cm.

Y con un número similar es el mencionado por Nishizawa, et al. (2009); quienes señalan un 30%, pero del total de los esfuerzos internos para losas menores a a 25 cm.

Por lo que es claro que parece ser una aproximación adecuada decir que el esfuerzo producido por la temperatura no lineal está en el orden de 30% del valor de los otros esfuerzos.

Para el modelo, se optubo la temperatura no lineal y se multiplico por el coeficiente de dilatación térmico del material y por el módulo de elasticidad.

1.5.3.4 Interacción con el suelo producida por la temperatura

Como lo describen Zokae-Ashtiani, et al. (2013) la temperatura juega un papel importante en la interacción del suelo y la estructura, principalmente debido a que cuando hay una mayor temperatura en la parte superior de la losa hay un encorvamiento hacia debajo de la losa; solo la parte de los extremos tiene contacto con la base por lo que la falta de contacto en la parte central produce una disminución de los efectos de la fricción sobre los esfuerzos de contracción lo que provoca que sea la losa la que absorba todo el efecto de encorbamiento, sin contraponerse la base a esta.

En el caso contrario, cuando la temperatura menor está en la parte superior, hay un encorvamiento hacia arriba de la losa, solo la parte central de esta mantiene contacto con la base; por lo que este contacto se contrapone al encorvamiento y produce una neutralización de esfuerzos, pero las orillas de la losa pierden contacto; lo que produce un aumento de su esfuerzo, basado en la idea de que no es neutralizado por la fricción.

1.5.3.5 Obtención de deformaciones del tramo experimental

Para llevar a cabo la obtención de las deformaciones del tramo experimental, procedió a la discriminación de las deformaciones obtenidas por temperatura, de las provocadas por cargas de tránsito.

Lo que se realizó fue tomar los datos de 2 min, de cada 30 min de monitoreo; de estos minutos se obtiene la media y la desviación estándar de las mediciones de cada sensor y se procede a discriminar los eventos producidos por cargas de tránsito, comparando la diferencia entre la medición menos la media; si esta diferencia es mayor a dos desviaciones estándar, entonces se considera que es provocada por una carga viva. Y su valor es sustituido por la media, posteriormente

se saca una nueva media con los valores ya discriminados, que es el valor en ese punto de tiempo.

Se tomaron dos desviaciones estándar, ya que la medición de los esfuerzos producidos por la parte térmica genera una señal casi una distribución casi uniforme (Devore, 2008); por lo que se tomó en cuenta como parte del ciclo térmico aproximadamente 96% de los datos, y discriminar el resto como datos de las deformaciones producidas por la carga de tránsito, como se muestra en la figura 1.11.

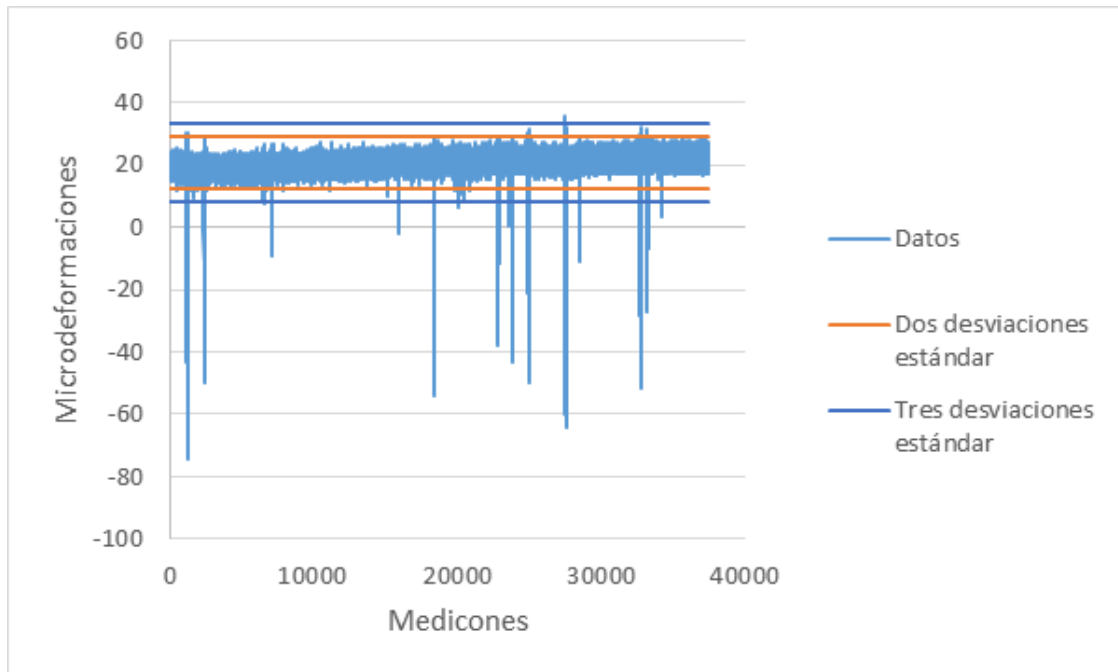


Figura1.9 Rangos producidos por las desviaciones estándar

Con este criterio se procedió al análisis de los datos experimentales por medio del algoritmo matrix 2 de Matlab, que será explicado en el capítulo siguiente, y del cual se obtiene las deformaciones de una hora específica del día y por consiguiente de una temperatura específica, así fue posible obtener el ciclo térmico y las deformaciones en esta figura 1.12.

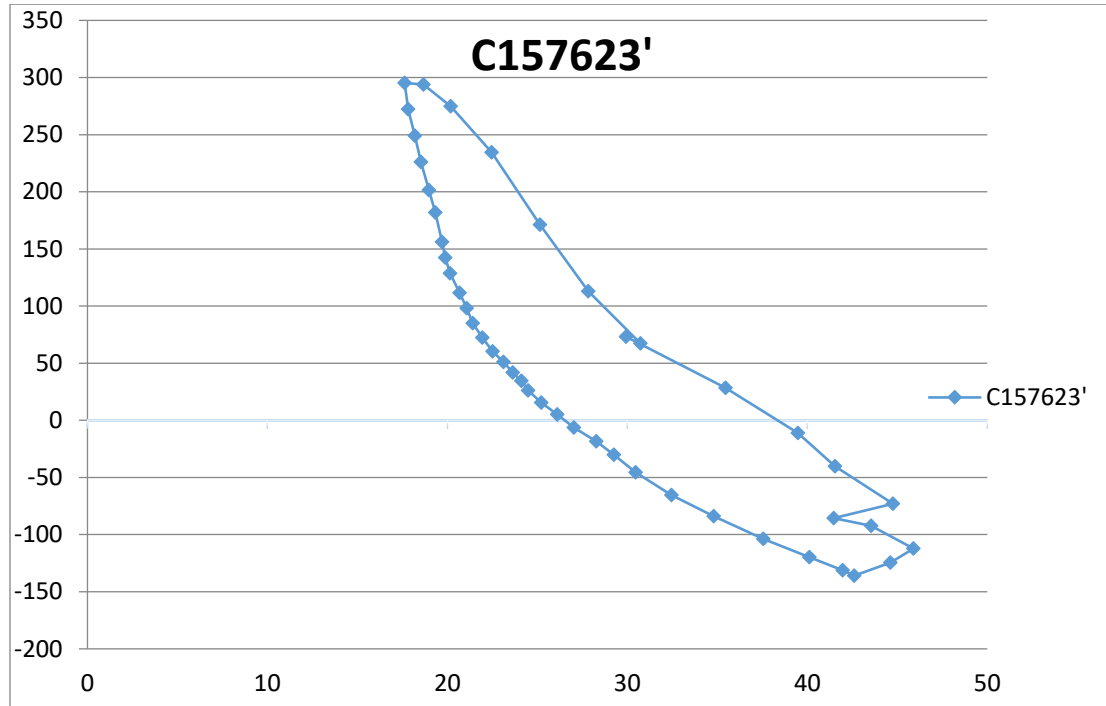


Figura 1.10 Ciclo de deformaciones del sensor de concreto C157623 del día 15 de abril del 2013

Posteriormente, estas deformaciones se convierten en esfuerzo por medio de la ecuación 28.

$$(28) \quad \sigma = E\varepsilon$$

Donde:

σ Esfuerzo

E Módulo de elasticidad

ε Deformación

Finalmente obtenemos la gráfica de temperatura esfuerzo (figura 1.13).

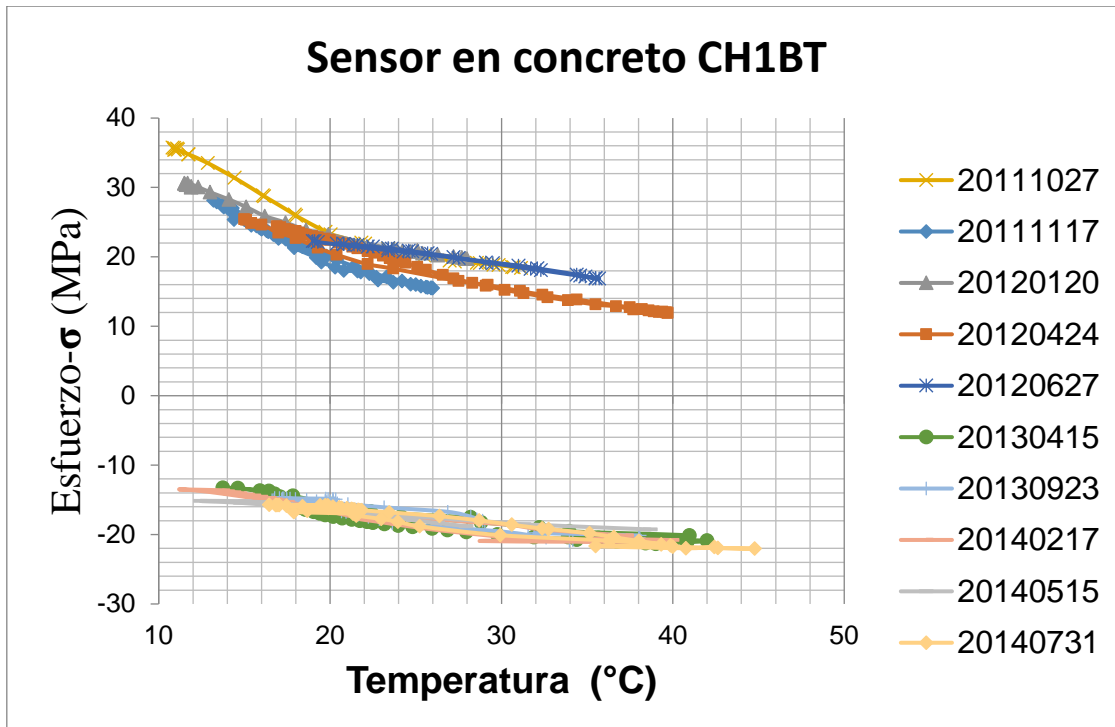


Figura1.11 Esfuerzos en los diferentes monitoreos del sensor de concreto CH1BT

Si juntando los diferentes días de medición, obtenemos la variación en los ciclos térmicos del pavimento.

Si tomamos en cuenta la relación entre la apertura del ciclo térmico (esfuerzos) y la apertura de la temperatura, obtendremos la figura 1.14.



Figura 1.12 Esfuerzo/°C, en sensor colocado en concreto en dirección longitudinal sobre la base hidráulica

1.5.3.6 Modelación de la deformación y el esfuerzo

La modelación fue realizada por medio del software ANSYS, y con los elementos ya mencionados, SOLID 185, utilizado para modelar el concreto de la losa; REINF264, utilizado para modelar el refuerzo de la malla; y CONTAC178, utilizado para modelar la interacción con la base.

La forma general del modelo consiste en la utilización del elemento SOLID185, para modelar la losa de interés, así como las losas del carril de alta velocidad y el acotamiento generando un volumen de concreto; con diferencias en el espesor de losa.

Posteriormente, por medio del elemento REINF264, se procedió a modelar el armado de la losa de interés, ubicando y dimensionando las barras.

Después se procedió a la modelación de la interacción suelo-estructura por medio del elemento CONTAC178, el cual interactúa como un elemento resorte, donde genera presiones siempre que la losa esté en contacto con la base; cuando esta pierde contacto por el rizado térmico este elemento no genera ninguna reacción.

El otro aspecto importante es la asignación de la temperatura por medio del comando BF, que permite asignar temperaturas y aceleraciones (gravedad y carga por peso propio) en nodos seleccionados; esto es importante, pues permite asignar la temperatura en las diferentes profundidades del pavimento; el valor de estas

temperaturas se obtiene al programar la ecuación de la superficie de temperatura, tras asignar el valor de la profundidad, por medio de la ubicación del nodo y la hora en que se desea conocer los valores de deformación y esfuerzo; por medio de una interacción con el usuario, quien es capaz de asignar la hora del día y por consiguiente los esfuerzos y las deformaciones a esa hora.

Otro aspecto importante es que la selección de la temperatura base, de la cuál parte para sacar el diferencial de temperatura, fue obtenida por medio de la observación de los comportamientos de los perfiles de temperatura durante el día del experimento; puesto que se seleccionó la temperatura donde el perfil de temperatura sigue una tendencia de línea recta, ya que esto indica que las temperaturas a diferentes profundidades tienden a ser iguales y por consiguiente no existiría diferencial de temperatura, ni deformaciones provocadas por la temperatura.

1.6 Interacción suelo-estructura

1.6.1 Módulo de resiliencia

Uno de los aspectos ya mencionados es la deformación de los materiales de la base, Garnica et al (2002) nos refieren a Paute (1996), quien utilizó un modelo matemático para expresar las deformaciones permanentes granulares; el cuál se basó en pruebas triaxiales de compresión de confinamiento cíclica y 80,000 repeticiones de carga.

Anteriormente Pappin (1979) describía la deformación permanente axial en función del número y duración de las aplicaciones de carga con un esfuerzo desviador. Yoder y Witczak (1975) proponen módulo de resiliencia (MR) en materiales granulares, el cuál es de uso en la práctica para caracterizar materiales de base y subbase.

El índice de MR, tanto de la subrasante como del material utilizado, es primordial para establecer los límites permisibles de carga o bien los del espesor de las capas que disipen la energía, sin llegar al límite del terreno natural (Saurabh et al., 2003).

$$(29) \quad M_R = K_a \left[\frac{\theta}{P_0} \right]^{kb} \left[\frac{\sigma_d}{P_0} \right]^{Kc}$$

Donde:

$\theta = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ Suma de los esfuerzos principales

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ Esfuerzo desviador

P_0 Unidad de presión de referencia

Ka, Kb y Kc Constantes del material obtenidas por una prueba triaxial con carga repetida en materiales granulares.

El problema en análisis también refiere a materiales cementados, por lo que es necesario calcular los esfuerzos y deformaciones en el material cementado (Garnica et al., 2002); los suelos tratados con cemento son susceptibles a la falla por fatiga después de aplicaciones repetidas de esfuerzos mayores que el valor límite. La falla por fatiga a tensión es de interés debido a su impacto en el agrietamiento de pavimentos. Nussbam y Larsen (1965) desarrollaron un método para la estimación de la fatiga. En este análisis, la vida por fatiga se expresa en términos de la proporción que involucra el radio de curvatura (R) bajo carga repetida, del tipo de suelo y del espesor del espécimen.

Otra relación utilizada en Australia se expresa en función del número de cargas permisibles y la deformación horizontal máxima a tensión.

En el caso del tramo experimental se cuenta con los valores de 90 MPa de módulo de resiliencia en la base hidráulica y en la base cementada cuenta con un valor de 120 MPa

1.6.2 Modelo Winkler de FE para la interacción suelo-estructura

Winkler propone que la deflexión, w , en cualquier punto de la superficie del suelo de soporte es linealmente proporcional a la presión de contacto q en ese punto, e independiente de los esfuerzos de contacto en otros puntos; esto es, el suelo de soporte consiste en un sistema de elementos resortes lineales mutuamente independientes, es decir:

$$(30) \quad q(x, y) = k_1 w(x, y) \quad (1)$$

Donde:

k_1 módulo de balasto del suelo o medio soportante (su unidad es esfuerzo por unidad de longitud).

En este modelo, los desplazamientos de una región cargada uniformemente serían constantes; o independientes si la viga es infinitamente flexible o infinitamente rígida.

La inhabilidad de este modelo para deformarse fuera del área cargada restringe su aplicabilidad a los suelos o medios con alguna cohesión o con capacidad a cortante. Sin embargo, existen muchos problemas en la ingeniería para los cuáles este modelo representa una idealización adecuada y precisa de las condiciones de soporte existentes, tales como miembros flotantes (vigas, entramados, capas de hielo) que son una consecuencia simple del principio de Arquímedes.

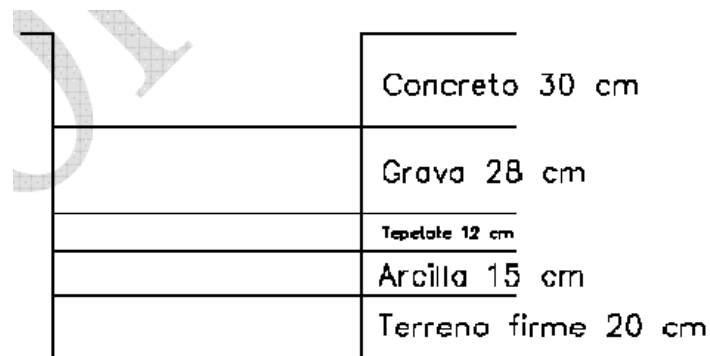
Para el caso del modelo se seleccionó el elemento CONTAC178 definido como un resorte de tipo Winkler.

2 Instrumentación y Pruebas de campo

2.1 Características de los materiales

La construcción del tramo experimental, como todo pavimento, se basa en un sistema multicapas, compuestos con materiales que van mejorando su rigidez de acuerdo con la proximidad a la superficie, iniciando con capas de base compuesta por materiales pétreos; mientras que otra parte del tramo, con materiales pétreos y 5% de cemento. Finalmente, la carpeta, la cual está reforzada con las mallas de ingeniería 3.44-A y 3.44-B.

Como podemos observar en la figura 2.1, la estructura tradicional de un pavimento rígido con juntas consta de una sección, en este caso de 30 cm; mientras que si observamos la figura 2.2 veremos una sección de 18 cm que pertenece al diseño del PCERC, cuya finalidad o ventaja radica en la reducción del espesor de la losa, así como la reducción del costo.



	Concreto 30 cm
	Grava 28 cm
	Tepalcate 12 cm
	Arcilla 15 cm
	Terreno firme 20 cm

Figura 2.1 Sección de pavimento existente

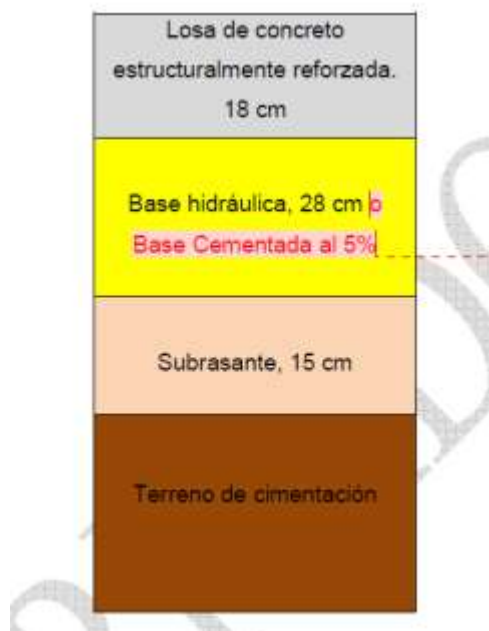


Figura 2.2 Sección de PCERC

2.1.1 Materiales pétreos

Este material fue extraído del banco Las Brujas, ubicado en la comunidad de Apaseo el Grande, el cuál es propio para su utilización en bases; pues cuenta con las características necesarias y la granulometría adecuada que satisface la normativa M-MMP-1-11/08. Algunas de sus principales características, como la curva de granulometría, aparecen en el anexo 1; también es importante mencionar que su V.S.R. es de 103 %, lo que nos daría una equivalencia de $k = 4 \text{ Kg/cm}^2$, tiene un peso específico seco de 1750 kg/m^3 y una humedad optima de 4.5 %; además cuenta con un contenido de arenas de 70.7 % y dado sus características de límite líquido, límite plástico e índice plástico, podemos observar que se trata de un material con bajo contenido de arcillas expansivas ideal para la formación de bases.

2.1.2 Cemento

El cemento es el producto final de la mezcla de los pétreos, esta mezcla nos da como resultado el concreto; que es la capa superficial o carpeta y representa la sección la capa más importante y de mejor calidad.

El material empleado es de marca Apasco, que cuenta con un certificado de calidad (anexo 2). Dicho material consta de un cemento tipo Portland Compuesto Clase Resistencia 40 (CPC 40).

2.1.3 Acero

El acero utilizado en este tramo experimental forma las mallas de ingeniería MI-3.44-A y MI-3.44-B (figura 2.3), que fue diseñado con base en las cartas de influencia ya mencionadas en el capítulo 2.

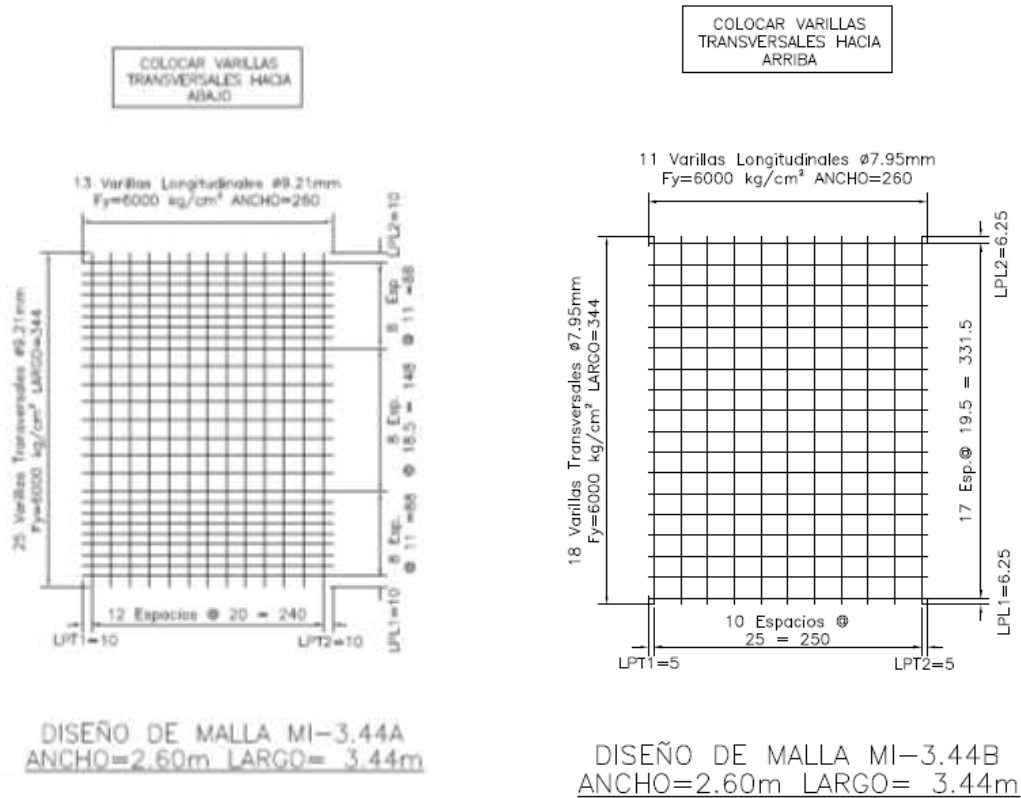


Figura 2.3 Mallas del PCERC (Gómez, 2013)

Este acero de refuerzo consta de varillas de acero con un esfuerzo de fluencia (F_y) de 600 kg/cm^2 y un diámetro de 9.21 mm (MI-44A) y 7.95 mm (MI-3.44B), las características de cada malla son las siguientes:

Malla MI-3.44-A

Colocada en lecho inferior, cuenta con 25 varillas transversales de 9.21 mm de diámetro, espaciadas de la siguiente manera: en los primeros 98 cm , las varillas se ubican cada 11 cm y con un espacio de arranque de 10 cm ; utilizamos un total de ocho varillas. A partir de los 98 cm , y hasta los 246 , las varillas son colocadas cada 18.5 cm , utilizando un total de 9 varillas; mientras que desde los 246 a 344 cm se utiliza 8 varillas a cada 8 cm ; y en la última a 10 cm .

En sentido longitudinal se utilizan 13 varillas con espacio de arranque de 10 cm y separación de 20 cm .

Malla MI-3.44-B

Colocada en el lecho inferior, tiene una composición transversal de 18 varillas de 7.95 mm de diámetro; con un espacio de arranque de 6.25 cm y distribuidas cada 19.5 cm, en forma longitudinal consta de 11 varillas de 7.95 cm de diámetro con un espacio de arranque de 5 cm y una separación de 25 cm entre ellas.

El reporte de la calidad del acero aparece en el anexo 3, donde se encuentran las propiedades mecánicas y químicas del acero.

2.1.4 Concreto

Este es el material que compone la capa de rodamiento y, por lo tanto, el más importante; de este material se extrajeron cilindros para medir la resistencia a la compresión; el resultado fue un valor de 300 kg/cm². Para estas pruebas, se ensayaron dos cilindros por cada camión con concreto. En total, 16 cilindros se sometieron a compresión y su posterior destrucción. Los ensayos se hicieron conforme a la norma M-MMP-2-02-058-04, perteneciente a la SCT. En la figura 2.4 se muestran los resultados de los ensayos, el promedio obtenido de los cilindros ensayados es de 290 kg/cm². Se anexa uno de los ensayos (Anexo 4).

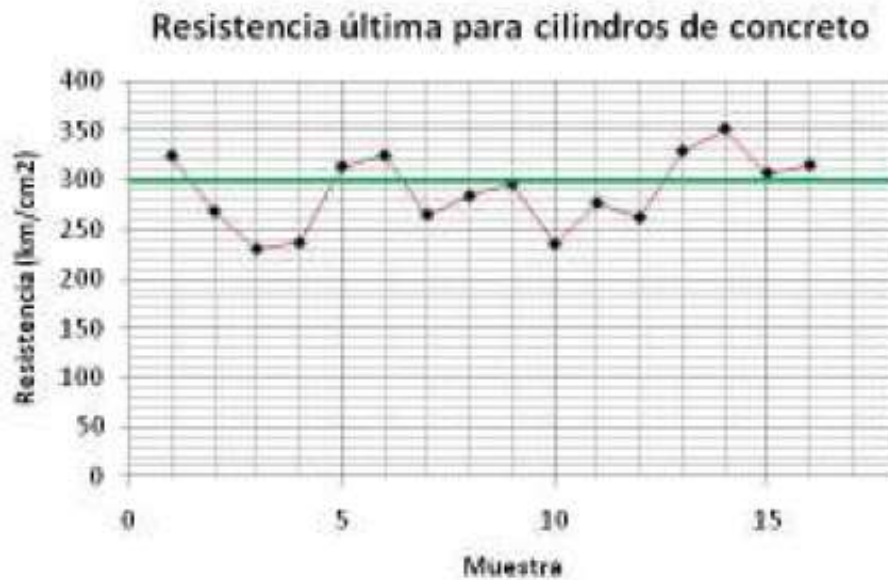


Figura 2.4 Resistencia promedio de los cilindros

2.2 Equipo

Para el monitoreo, se utilizan sensores de fibra óptica por rejilla de Bragg, los cuáles se basan en el cambio de longitud de onda, en nanómetros (nm), que sufre el haz de luz al ser expuesto a diferentes fenómenos físicos: temperatura, presión y deformación; lo que origina una contracción o dilatación de la rejilla y modifica la longitud de onda, (FBG-Sensing-Advantages., 2011).

Los diferentes instrumentos utilizados son los siguientes:

2.2.1 Extensómetro para acero y extensómetro para concreto

Estos sensores son básicos para el monitoreo, son instrumentos de marca MICRON-POTICS (figura 2.5); su función se basa en el principio de la rejilla de Bragg. Tienen un rango de operación de temperatura de -40° a 80°C . Su rango de deformación unitaria va de ± 2500 microdeformaciones y una sensibilidad a la temperatura de $23.8 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, la ficha técnica se muestra en el anexo 5.



Figura 2.5. Extensómetro de concreto y acero

2.2.2 Sensor de temperatura

De igual forma que los extensómetros, los sensores de temperatura se basan en el principio de la rejilla de Bragg. Los sensores empleados son de marca MICRON-OPTICS (figura 2.6) y tiene un rango de -40° a 250°C , con una sensibilidad de $\pm 1.7 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$; lo que indica que por cada grado de temperatura tiene una deformación de 1.7 pm , y por lo tanto un cambio de la longitud de onda; lo que permite calcular la temperatura. La ficha técnica del sensor se muestra en el anexo 6.



Figura 2.6. Sensor de temperatura

2.2.3 Acelerómetro

Los acelerómetros son sensores de movimiento (figura 2.7), igualmente son marca MICRO-OPTICS; tienen un rango de temperatura de -40° a 80°C , con una

sensibilidad de 16 pm/g y un rango de frecuencias de DC a 300 Hz. La ficha técnica aparece en el anexo 7.



Figura 2.7. Acelerómetro

2.2.4 Cable de fibra óptica mono-modo

Como su nombre lo indica, se trata de un cable de fibra óptica, marca FIBRAMEX, de 62.5/125 micrómetros de diámetro.

2.2.5 Tubería galvanizada de 3 pulgadas

La finalidad de esta tubería (figura 2.8) es garantizar el mantenimiento del buen estado de los cables de fibra óptica, durante el proceso de construcción, y la puesta en funcionamiento del tramo carretero.



Figura 2.8. Tubería galvanizada

2.2.6 Conectores Lado A-B

Son conectores de fibra óptica utilizados para conectarse directamente sobre el interrogador (figura 2.9).



Figura 2.9. Conector

2.2.7 Interrogador

El interrogador tiene la capacidad de medir las frecuencias del haz de luz y detectar variaciones, la forma física del interrogador aparece en la figura 2.10

El interrogador es de la marca MICRON OPTICS, con las siguientes características técnicas:

Modelo: sm130-500

Número de entradas: 2, expandibles a 4

El tipo de tecnología es de longitud de onda de luz láser para rejillas de Bragg, con una frecuencia de muestreo de 500 Hz.

Comunicación vía Ethernet a 100 Mbps

El tipo de alimentación es de 120 V de corriente alterna

El anexo 8 muestra sus especificaciones técnicas completas.



Figura 2.10. Interrogador sm130-500

2.2.8 Software ENLIGHT

El programa usado para el monitoreo y tratamiento de datos se llama ENLIGHT y está diseñado para ser usado con los instrumentos de la marca MICRON OPTICS, INC. Este paquete permite la introducción de imágenes o fotografías en la ventana de monitoreo, para visualizar desde la PC la ubicación de los sensores conectados al Interrogador. Todo esto con la finalidad de que el usuario vea los valores que indican los instrumentos en una imagen que simula la posición real de donde se suscitan las deformaciones; además de los cambios de temperatura y aceleraciones. Con esto se hace más amigable el programa de monitoreo y facilita la comprensión de los parámetros correspondiente a los fenómenos almacenados.

2.3 Modelo de monitoreo

La figura 2.11 muestra el diagrama del proceso de investigación, el cual está basado en la obtención de datos experimentales por medio del equipo antes mencionado y su posterior comparación con datos obtenidos de un modelo construido a partir de los perfiles de temperatura.

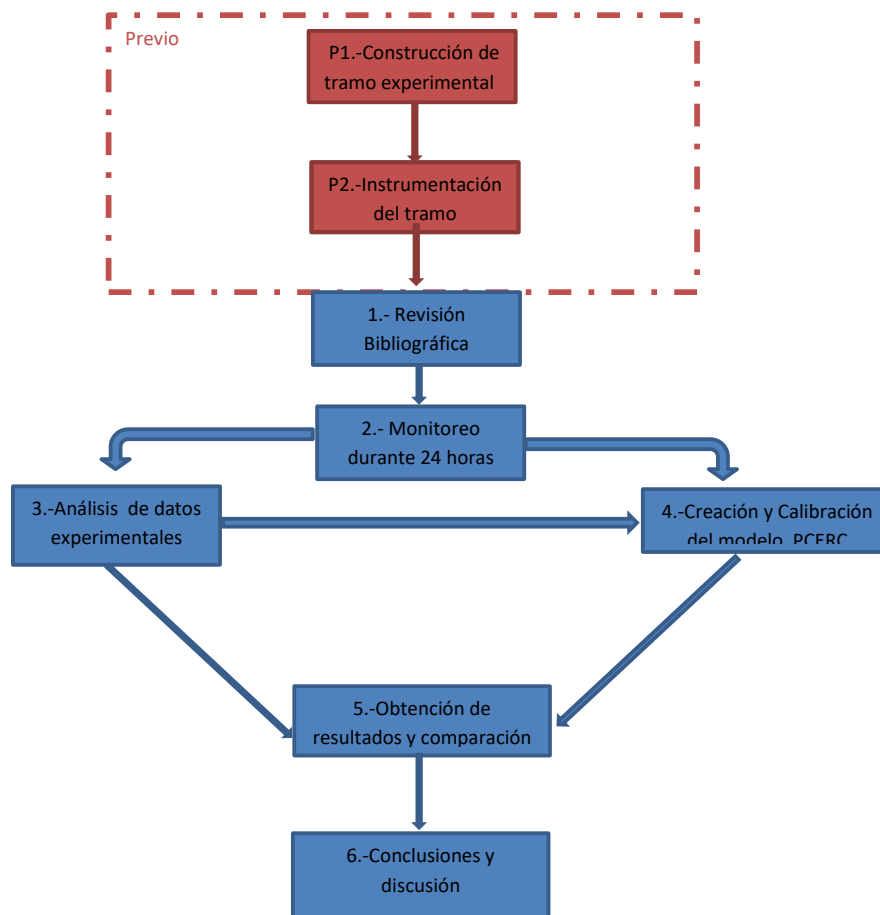


Figura 2.11. Modelo de monitoreo del tramo experimental

2.3.1 Descripción del modelo

P1. Construcción del Tramo experimental

El tramo experimental fue construido sobre la carretera México-Querétaro en el tramo localizado entre el km 166+000 y 166+300 en el carril de baja velocidad en el cuerpo B (sentido de Querétaro-México), con el sistema PCERC; el cual está basado en la utilización de las mallas de ingeniería MI-3.44-A y MI-3.44-A, una reducción de peralte de 32 cm a 18 cm. Este sistema fue construido sobre dos bases, una hidráulica y la otra cementada, con la finalidad de ver las diferentes reacciones que tiene el sistema ante diferentes bases.

P2. Instrumentación del Tramo

La instrumentación es elaborada con sensores de fibra óptica, la cuál es una tecnología relativamente nueva en nuestro país, y ha sido usada con éxito para el monitoreo de estructuras. Para la instrumentación, se utilizaron 12 extensómetros, colocados tanto en el acero como en el concreto; dos acelerómetros colocados cada uno en distintas bases y seis termómetros colocados sobre la base cementada; todo esto con la finalidad de medir el comportamiento estructural del pavimento, en condiciones de servicio y con los distintos cambios de temperatura.

1 Revisión bibliográfica.

La base del proyecto se fundamenta en la investigación bibliográfica, para de esta manera comprender mejor las técnicas existentes, así como los procedimientos en el análisis de la información.

2 Monitoreo durante 24 horas

El monitoreo se planea para llevarse a cabo por periodos de 24 horas, con la finalidad de obtener el comportamiento del pavimento durante los diferentes cambios de temperaturas del día; además, en diferentes épocas del año, para abarcar un mayor espectro de condiciones climáticas.

3 Análisis de datos experimentales

Para el análisis de los datos, se emplean varios criterios; en primer lugar, se separan las microdeformaciones causadas por la temperatura de las producidas por el tráfico, de esta forma se obtienen las gráficas de comportamiento de temperatura y deformaciones y, finalmente, las de temperatura y esfuerzos.

4 Modelación del sistema PEER

La modelación del sistema PCERC, se realiza en las plataformas informáticas ANSYS y MATLAB. MATLAB es empleada para la obtención de las superficies y ecuaciones del comportamiento de la temperatura a diferentes profundidades y a diferentes horas del día. Con las ecuaciones obtenidas se construye el modelo del comportamiento del sistema a diferentes horas del día y a diferentes valores de temperatura. El modelo se construye en la plataforma ANSYS.

5 Obtención de resultados y comparación

En esta etapa, se procede al análisis de los resultados. La información obtenida experimentalmente es comparada con los datos obtenidos con el modelo matemático. El resultado de la comparación se analiza y se emplea para la calibración del modelo.

6 Conclusiones y discusión.

Al final se discuten y sustentan las conclusiones y observaciones en relación con los resultados obtenidos, así como las recomendaciones relevantes obtenidas.

2.3.2 Construcción del tramo experimental

Para la construcción del tramo experimental fue necesaria la demolición del pavimento existente. La estratigrafía del tramo experimental se muestra en la figura 2.2. La construcción cuenta con la autorización de Caminos y Puentes Federales (CAPUFE), y se realiza conforme al PCERC. En la construcción se emplea una excavadora sobre orugas Caterpillar 320, equipada con rotomartillo. Posteriormente a la demolición de la capa de pavimento, el material producto de la demolición es extraído para evitar que obstruya la visibilidad en la autopista, para tal actividad se utilizan camiones de 7 m³ y la retroexcavadora Caterpillar. Finalmente, se continúa con el anclaje de las barras de amarre entre el pavimento existente en el carril de alta velocidad y el acotamiento.

El material pétreo es transportado desde el banco “Las Brujas”, y colocado en el tramo experimental de acuerdo con las especificaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT); que consisten en la colocación de la nueva base, 15 cm por debajo de donde se encuentre material firme; este proceso se lleva a cabo en la mitad del tramo y en la otra mitad se realiza un proceso similar; con la diferencia de que la base es mezclada con un 5% de cemento, para generar una base estabilizada, con una compactación de 100% de su peso volumétrico seco. Durante el proceso del tendido de la base se lleva a cabo la extracción de los cilindros de prueba, con la finalidad de verificar que el material tenga la calidad requerida por las especificaciones.

La siguiente etapa de construcción consiste en la colocación del riego de sello y poreo de la base, con la finalidad de permitir una correcta trabazón entre la base y la carpeta rígida.

Una vez concluida la etapa de sellado de la base, se procede a la colocación de las mallas de ingeniería de acuerdo con las especificaciones de proyecto. La cantidad y distribución del acero se lleva a cabo por medio del diseño basado en las cartas de influencia, para que la carpeta tenga la capacidad de absorber los momentos producidos por el tráfico vehicular. Justo en este momento, se instrumenta el tramo experimental, con la finalidad de medir las deformaciones tanto en el concreto como en el acero.

Finalmente, se procede al tendido del concreto de $f'c=300$ kg/cm², con un espesor de 18 cm y con la característica particular de la no existencia de juntas, por tratarse de un pavimento continuo.

2.3.3 Instrumentación del tramo

Con la instrumentación se tiene la capacidad de medir los siguientes parámetros:

- a) *Deformación unitaria en el concreto:* Ayuda a entender cómo se deforma (compresión o tensión) el concreto, cuando sobre él circulan vehículos de diferentes cargas, a diferentes velocidades y mientras la losa de concreto se encuentra a diferentes temperaturas.

- b) *Deformación unitaria en la malla de acero*: Permite conocer qué tanto se comprime o tensa la malla de ingeniería del PCERC, cuando sobre él circulan vehículos de diferentes cargas, a diferentes velocidades y mientras la losa de concreto se encuentra a diferentes temperaturas.
- c) *Gradiente de temperatura a lo largo del espesor de la losa de concreto*: Proporciona información de los cambios de temperatura que sufre el concreto durante el transcurso del día y la noche, lo que permite asociar esos cambios a las deformaciones sufridas por el concreto y por las varillas de acero.

Los sensores son colocados en un tramo de longitud de 16 m de los 300 m que consta el tramo de prueba y cercano al cambio de base hidráulica cementada. Para entender las deformaciones del concreto y la malla de acero de ingeniería, algunos extensómetros son colocados tanto transversal como longitudinalmente.

La figura 2.12 muestra la instrumentación del tramo, desde una vista superior; en ella observa la posición relativa de los sensores, el lugar del cambio de base para el pavimento, la grieta inducida, el encadenamiento al que se colocan los sensores y los canales de monitoreo que comprende los lazos de sensores usados en dicho tramo.

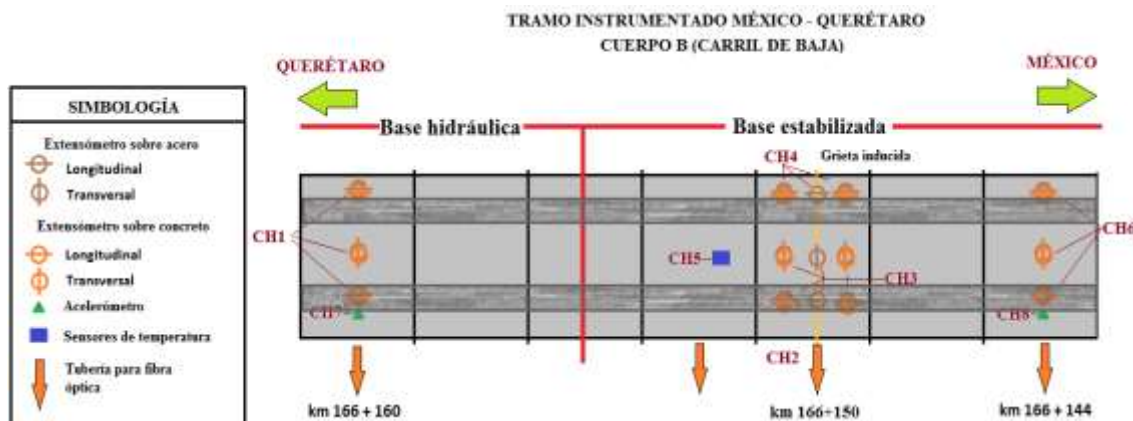


Figura 2.12 Sección instrumentada que comprende al tramo experimental PCERC

Para entender el comportamiento del PCERC sobre la base hidráulica o granular y la base estabilizada con cemento, se colocan dos juegos de sensores (cada uno en diferente base). Cada conjunto de sensores consiste en seis extensómetros (tres para medir las deformaciones en la malla de ingeniería MI-3.44A y otros tres para medir las deformaciones en el concreto).

Unos de los deterioros más comunes que sufre el pavimento son las fisuras y grietas; para obtener información sobre cómo se comporta el PCERC ante esta situación, se induce una grieta transversal a la dirección flujo de los vehículos.

Alrededor de la grieta se colocan 15 extensómetros, seis para medir deformaciones en el concreto y nueve para medir deformaciones en la malla de ingeniería.

En general, todos los extensómetros para acero son colocados sobre la malla de ingeniería MI-3.44A, con una separación entre las varillas de la malla y el instrumento de apenas unos cuantos milímetros. Todos los extensómetros para concreto son ubicados sobre la malla de ingeniería MI-3.44B con una separación entre el instrumento y la varilla de 30 mm. La figura 2.13 muestra un corte de la vista lateral desde el acotamiento, de un par de extensómetros colocados a diferentes profundidades. El eje horizontal del extensómetro en color amarillo va a 30 mm de profundidad y el eje del extensómetro en color rojo a 150 mm, desde la superficie. Como referencia, se muestran las varillas de las mallas de ingeniería.

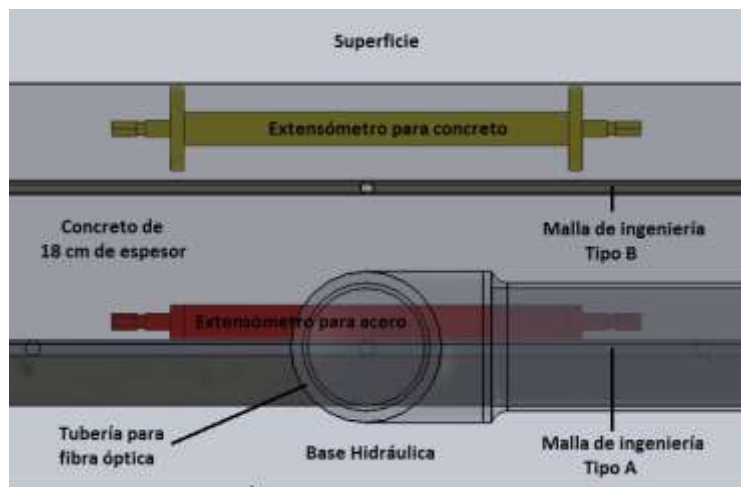


Figura 2.13 Distribución de extensómetros en la losa de concreto PCERC

Para medir el gradiente de temperatura, se coloca un grupo de sensores separados a una distancia de 30 mm uno del otro, en dirección vertical. De esta manera es posible medir la temperatura que presenta el espesor de la losa de concreto a diferentes profundidades. En la figura 2.14 se observa el conjunto de sensores para medir temperatura, en la izquierda una vista lateral desde el acotamiento y en la derecha, una imagen de los mismos sensores desde una vista isométrica.

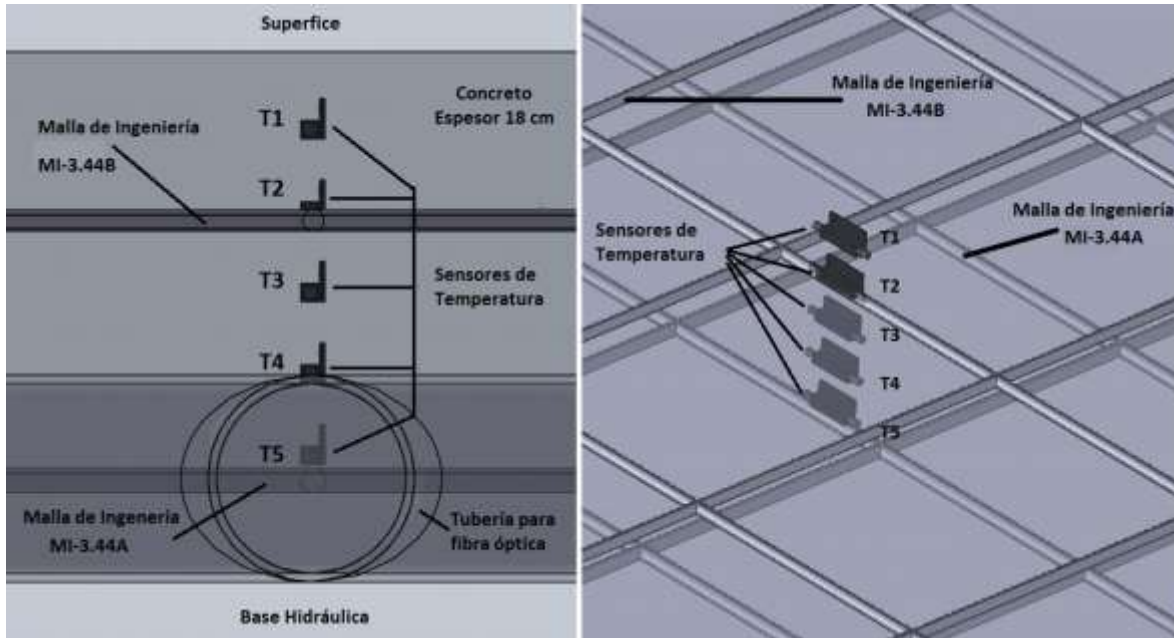


Figura 2.14. Distribución de los sensores de temperatura en la losa de concreto PCERC

Identificación de extensómetros

La nomenclatura de los extensómetros comprende seis caracteres

Carácter	1	2	3	4	5	6
----------	---	---	---	---	---	---

El primer carácter hace referencia al tipo de extensómetro:

- A:** Extensómetro que mide las deformaciones en las varillas de acero.
- C:** Extensómetro que mide las deformaciones en el concreto.

El segundo carácter hace alusión al tipo de base en que se encuentra:

- E:** Base estabilizada con cemento.
- H:** Base hidráulica.

El tercero y el cuarto caracteres están determinados de acuerdo con la ubicación del extensómetro según los ejes longitudinales y transversales, respectivamente. Se denominan con los números 1, 2 o 3, según la línea longitudinal imaginaria que les corresponde y con las letras A, B o C, de acuerdo con la línea transversal imaginaria; ambas respecto al flujo vehicular (figura 2.15). De esta manera, el tercer carácter siempre es un número mientras que al cuarto le corresponde una letra.

El quinto carácter indica la dirección en que fue colocado el sensor:

L: Longitudinal al flujo vehicular.

T: Transversal al flujo vehicular.

El sexto carácter, con la letra **G**, aplica a los extensómetros que están dentro del área en donde fue inducida la grieta; mientras que, para cualquier otro caso, le corresponde un espacio en blanco.

Identificación para sensores de temperatura

En este caso, los sensores de temperatura están en la base estabilizada sobre un solo punto distribuidos verticalmente con una separación de 30 mm entre los sensores contiguos (Figura 28). La nomenclatura es la siguiente:

T1: Sensor ubicado a 30 mm de profundidad.

T2: Sensor ubicado a 60 mm de profundidad.

T3: Sensor ubicado a 90 mm de profundidad.

T4: Sensor ubicado a 120 mm de profundidad.

T5: Sensor ubicado a 150 mm de profundidad.

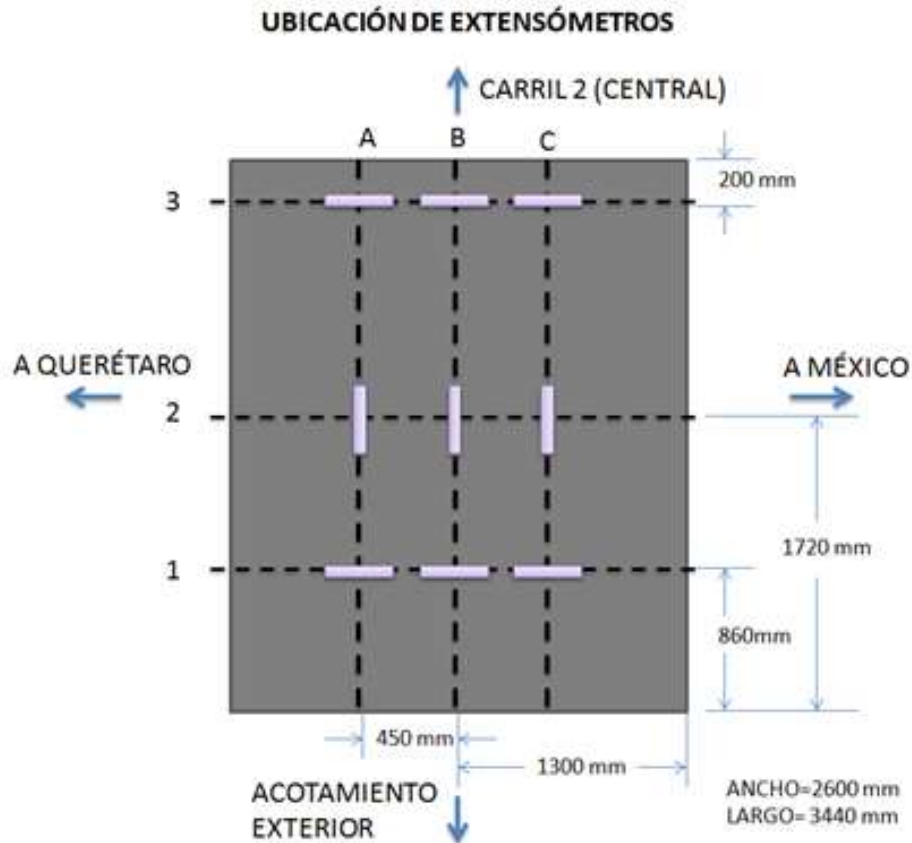


Figura 2.15. Plano que correlaciona la posición de los extensómetros en bloque de PCERC

2.3.4 Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica permite la interpretación y selección de los datos obtenidos en la experimentación, así como la selección de los parámetros deseados en la modelación del fenómeno y, de esta forma, alcanzar los objetivos deseados.

2.3.5 Monitoreo durante 24 horas

Para obtener mediciones bajo diferentes condiciones de carga por tráfico, ambientales y otros factores, se realizó el monitoreo en diferentes fechas. Estas se realizan durante 24 horas continuas con la finalidad de obtener los ciclos térmicos totales, tanto de enfriamiento como de calentamiento, para observar sus peculiaridades.

El monitoreo se lleva a cabo en condiciones reales, con la carga de tráfico real y los fenómenos climatológicos que se presenten. La tabla 2.1 muestra los resultados.

Tabla 2.1 Días de los monitoreos

Fecha	Prueba
20111117	Primera
20120424	Segunda
20120120	Tercera
20111027	Cuarta
20120627	Quinta
20130415	Sexta
20130923	Séptima
20130217	Octava
20140515	Novena
20140731	Décima
20141008	Onceava

2.3.6 Análisis de datos experimentales

El procesamiento de la información experimental se desarrolló por medio del algoritmo MATRIX3 y EXCEL, el cual se muestra en la figura 2.16.

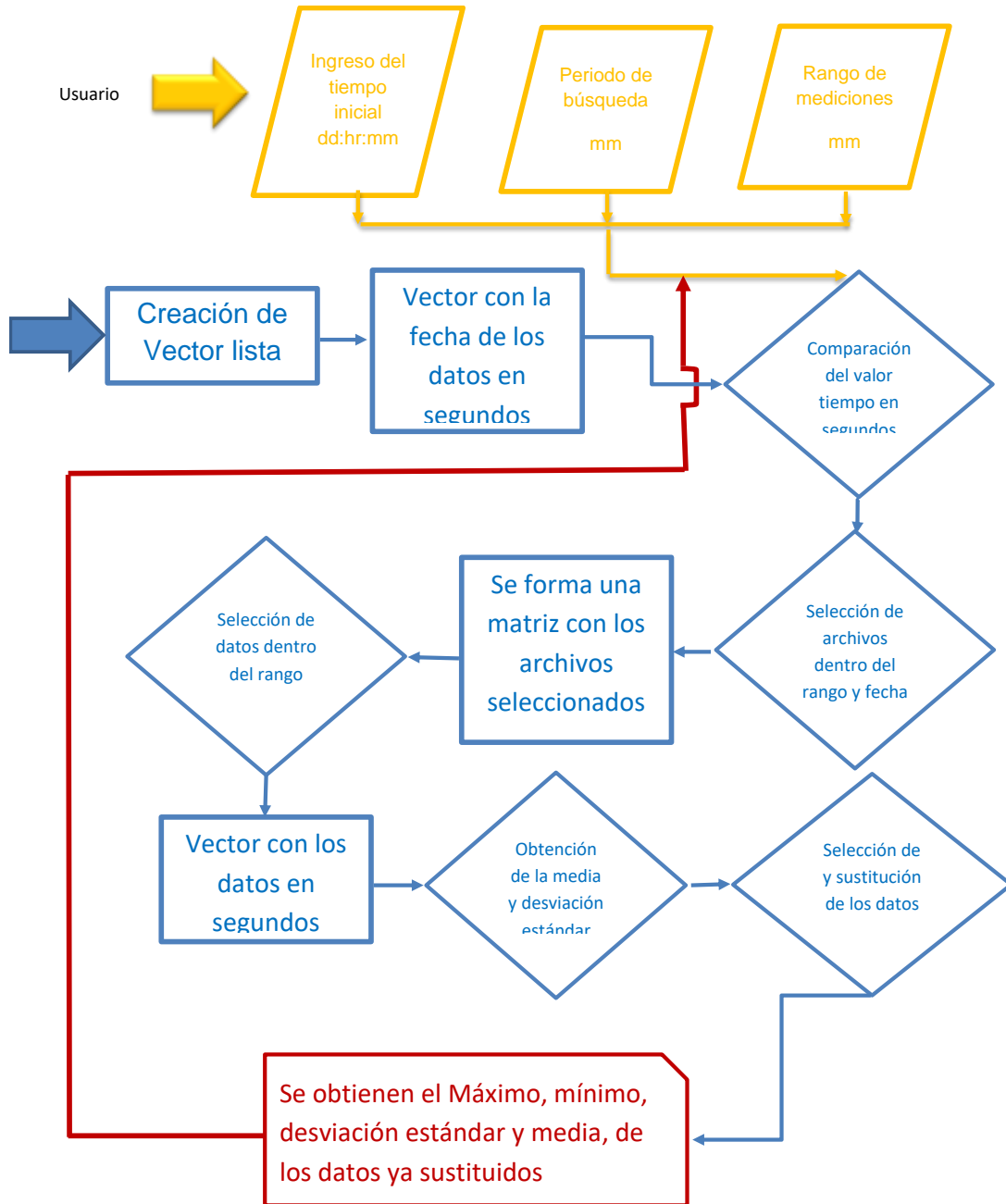


Figura 2.16 Algoritmo MATRIX3

Descripción del Algoritmo

Este algoritmo es una ayuda para el procesamiento de la información que se obtenida de las mediciones; ya que, debido a su cantidad, es necesario hacer un procesamiento de alto orden para poder reducirla a datos manejables. Para el manejo de los datos, estos se almacenan en un directorio en formato XT, de tal forma que sean fácilmente localizados por el algoritmo.

El algoritmo crea un vector lista con los nombres de los archivos localizados en el directorio señalado a MATLAB. El tiempo inicial es capturado en formato [dd:hr:mm]; esto representa el día, la hora y los minutos a partir de lo cuál se iniciaron las mediciones y se solicita en este formato debido a que se convierte en segundos. También se captura el periodo de búsqueda en formato mm, que es el incremento de tiempo en que se realizará la búsqueda de la información consistente en minutos y nuevamente será convertida en segundos. Finalmente, se ingresa el rango en que se tomara los datos.

En general, se solicita la hora inicial de búsqueda, el valor de incremento de la hora inicial de búsqueda y el rango, en tiempo, que toma obtener el valor de las medias.

El algoritmo convierte el nombre de los archivos en el vector LIST o, mejor dicho, la fecha de los archivos en segundos; toman en cuenta -del nombre- de los archivos el día, la hora y los minutos.

A continuación, el algoritmo toma del vector el nombre de los archivos convertidos a segundos y hace una comparativa con la hora buscada -también convertida en segundos- y procede a seleccionar un archivo anterior y posterior de la hora buscada; o bien un archivo con la misma cantidad de segundos, pues el nombre del archivo contiene la hora de medición. Estos archivos son importados y se genera una matriz de datos, de estos dos archivos seleccionados.

La columna de la matriz es convertida a segundos nuevamente y a partir de este vector se selecciona la posición de la fila, tomando en cuenta la mitad del rango de búsqueda seleccionado; esto quiere decir que se toma el número de fila de la hora seleccionada a la mitad del rango, en segundos, y el número de fila correspondiente a la mitad del rango, en segundos, más la hora seleccionada, y a partir de estas celdas se genera una nueva matriz; la que solo contiene las mediciones de estos dos minutos o la cantidad del rango que se desee. Se calcula la media y la desviación estándar de esta matriz y posteriormente se crea una matriz que contiene la discriminación consistente en la selección de la medición, si esta no rebasa en valor absoluto de dos desviaciones estándar; si las rebasa, se sustituye el valor de la medición por la media y posteriormente a esta matriz ya discriminada, se le obtiene la media; que es el valor que finalmente es comparativo y expresa únicamente las microdeformaciones provocadas por la temperatura.

Este algoritmo permite manejar con mayor facilidad la gran cantidad de información obtenida de las mediciones diarias, la cual podríamos decir que ronda cerca de 360 millones de datos obtenidos por día.

Procesamiento de la información obtenida del algoritmo

Una vez que se tiene la información de un tamaño manejable, se continúa con el procesamiento de datos en EXCEL, con la finalidad de obtener tablas y diferentes gráficos que permitan observar el comportamiento del fenómeno térmico en el pavimento

2.3.7 Creación y calibración del modelo PCERC

El modelo se realiza en ANSYS, con la finalidad de simular la temperatura diaria y observar los efectos que esta producen en el tramo de prueba. Este modelo se construye con la información del diseño del tramo experimental y con algunos parámetros obtenidos por laboratorios de control de calidad.

La primera parte del algoritmo del modelo consiste en la selección del tipo de elemento, sus constantes, las características del material; para el caso del tramo de prueba se utilizan tres elementos SOLID185, para la base y el concreto; uno del tipo CONTAC178, para la interacción suelo estructura y finalmente un REINF264 para simular el acero de refuerzo. En seguida se asignan las características particulares de cada elemento, para este caso de estudio; el único elemento que contiene características particulares es el elemento resorte CONTAC178, el cual trabaja como un resorte débil; esto con la finalidad de simular una interacción suelo estructura tipo Winkler. Posteriormente, a cada elemento se le asigna un tipo de material, con sus respectivas características; las que obtenemos del informe de laboratorio.

El siguiente paso es la creación de los nodos de contacto entre los diferentes materiales, así como los keypoint con la misma ubicación de estos. Al final, los nodos nos sirven para unir todos los elementos que son creados con sus geometrías particulares y posteriormente se unen entre sí. Esto origina el mallado del modelo. A continuación, se insertan las ecuaciones de temperatura, con lo que es posible generar los perfiles de temperatura dependiendo del día simulado y la hora simulada. También se inserta una temperatura de referencia, la cual es la que la mayoría de los sensores detectan y por tanto, tenderían a tener la misma deformación, es para tomar como referencia una temperatura en la que no hay gradiente térmico.

Se incluyen las ecuaciones de temperaturas, lineal y no lineal (Liu & Fwa, 2003); su nombre es la referencia al esfuerzo que provocan, los esfuerzos se obtienen al multiplicar el CTE y el módulo de elasticidad, para convertir este esfuerzo en una presión sobre cierta profundidad; es necesario hacer esto debido a que ANSYS solo contempla el esfuerzo producido por la temperatura en la dirección axial.

La solución del sistema por medio de los algoritmos de ANSYS contiene la información de los esfuerzos y la temperatura de la parte superior de un día en particular. Esta información se transforma en un archivo de EXCEL para graficar la temperatura y los esfuerzos obtenidos de las mediciones.

3 Conclusiones

3.1 Esfuerzo-temperatura

Los resultados obtenidos de las gráficas de esfuerzo-temperatura nos permiten visualizar los ciclos de enfriamiento y calentamiento, así como los esfuerzos que estos producen a lo largo de 24 horas

3.1.1 Sensores en el concreto

Estas primeras gráficas de resultados corresponden a los sensores ubicados a 3 cm de profundidad, muestran los valores de los esfuerzos producidos por el gradiente térmico a lo largo de las mediciones de 24 horas y durante tres años de monitoreo.

Los resultados obtenidos de las gráficas del sensor CH1BL (figura 3.1), el cual se encuentra localizado en la rodera derecha, nos permiten observar dos fenómenos: el primero es la compresión que tiene los sensores de concreto después del 15 de abril del 2013; y la otra es una disminución del rango de esfuerzos producidos por los ciclos térmicos, que rondan en una primera medición de 15 a 7 MPa aproximadamente en la última medición, Esta reducción y el desplazamiento de la gráfica hacia la zona de compresión pueden ser explicados por el agrietamiento que genera la liberación de esfuerzos de tensión.

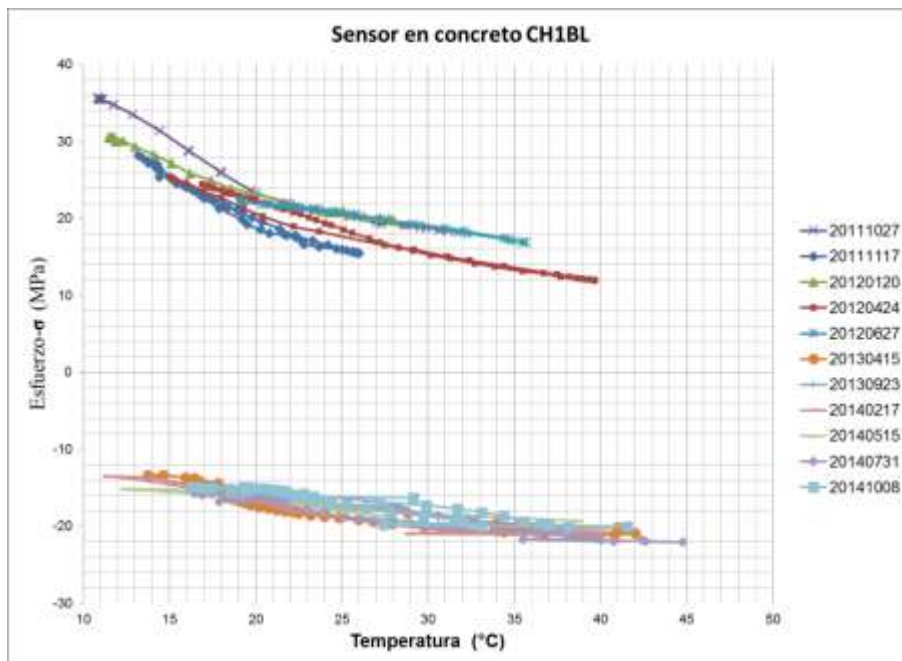


Figura 3.1 Esfuerzo-temperatura CH1BL

El siguiente análisis es el del sensor CH2BT (figura 3.2) en forma transversal y ubicado al centro de la losa, el cual tiene un comportamiento muy similar al primero; solo con la diferencia de que su desplazamiento hacia la zona de compresión es gradual, lo que puede ser explicado debido a que la aparición de grietas en sentido transversal es menos común.

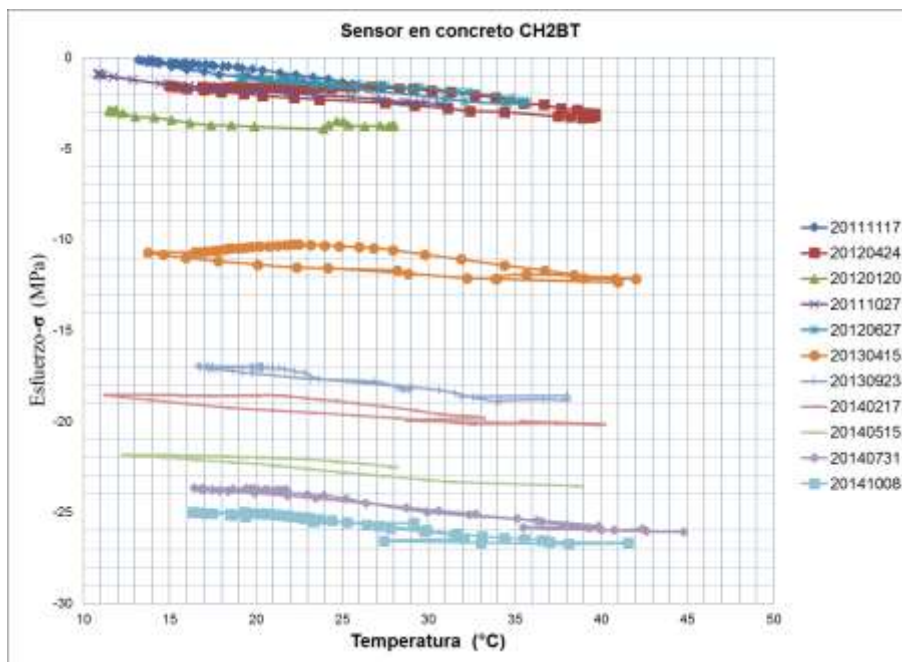


Figura 3.2 Esfuerzo-temperatura CH2BT

El sensor CH3BL se ubica cercano al carril de alta velocidad (figura 3.3), de igual forma tiene una tendencia similar; pero con la excepción de que el desplazamiento hacia la zona de compresión es mucho menor que el registrado en los dos otros sensores. Mientras que en los anteriores el rango de esfuerzos está 50 MPa, este sensor tiene un rango de esfuerzo de 7 MPa.

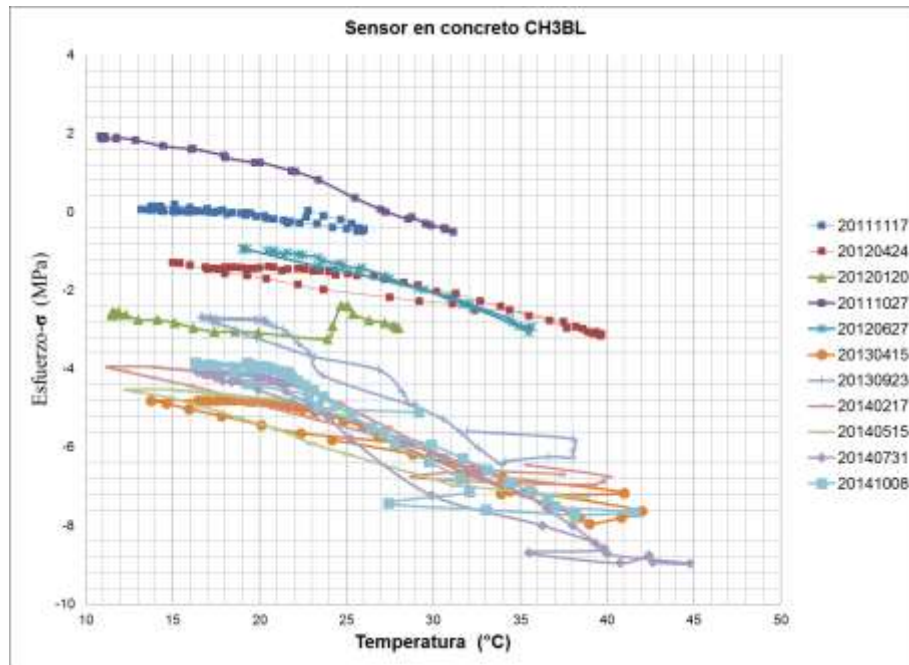


Figura 3.3 Esfuerzo-temperatura CH3BL

Para el caso de los sensores ubicados en la base cementada, en general tienen un comportamiento similar a los de la base hidráulica y su ubicación es similar; el sensor CE1BL (figura 3.4) se encuentra en la rodera del lado derecho a una profundidad de 3 cm; este sensor -como ya mencionamos- tiene un comportamiento similar al sensor de espejo en la base hidráulica, pero con la salvedad de los ciclos térmicos tienen un estado de 20 MPa más a compresión; esto puede ser debido a un mayor deterioro, su rango de apertura de los ciclos térmicos es similar al de la base hidráulica entre 3 y 15 MPa.

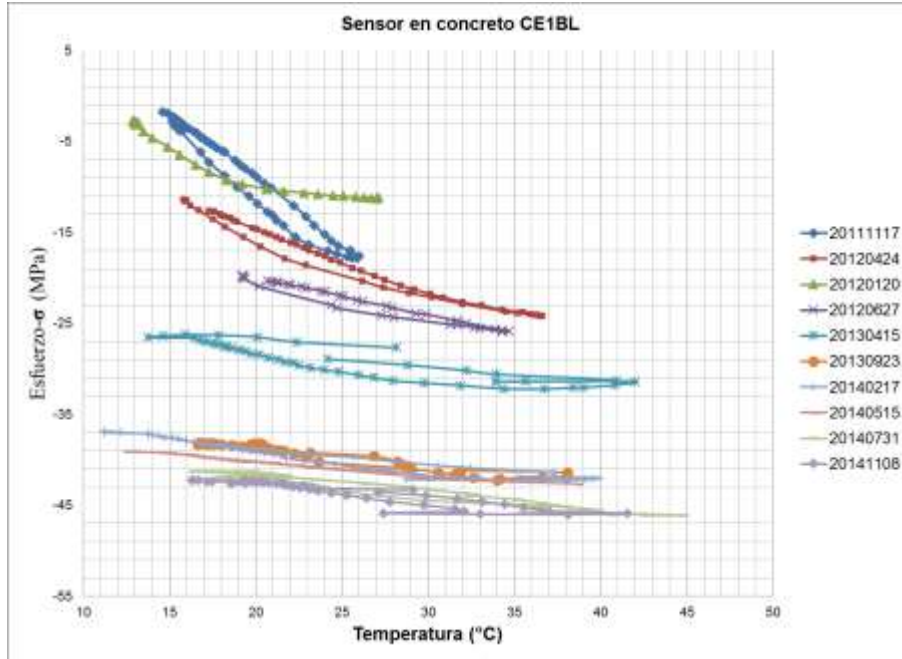


Figura 3.4 Esfuerzo-temperatura CE1BL

El sensor CE2BT (figura 3.5), es un dispositivo transversal ubicado al centro del carril de baja velocidad, este sensor es atípico a las demás mediciones pues presenta un cambio de estado de compresión a tensión, y viceversa, a lo largo del monitoreo; y su desplazamiento entre ambos estados no sobrepasa los 7 MPa.

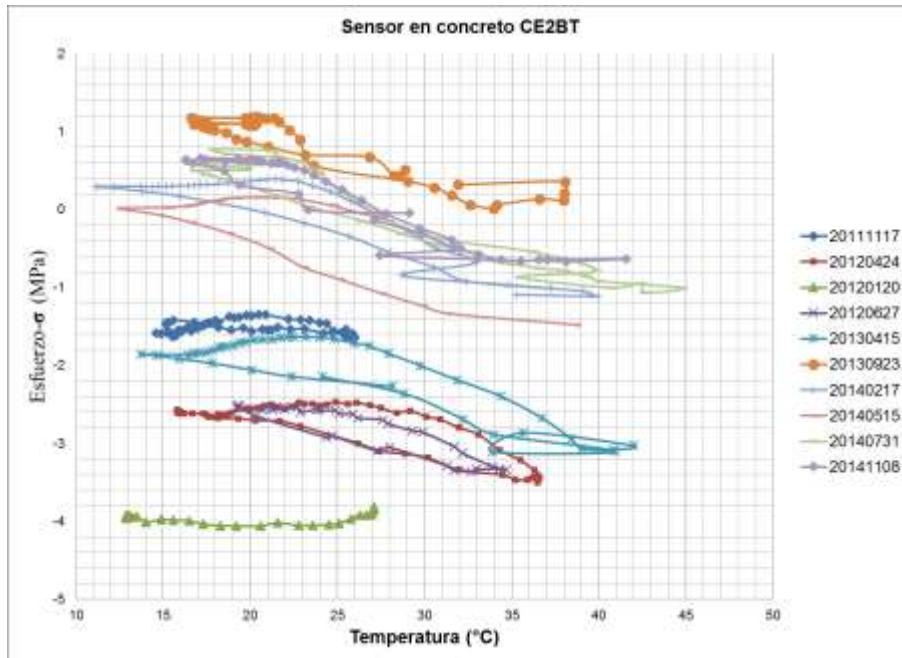


Figura 3.5 Esfuerzo-temperatura CE2BT

El ultimo sensor de concreto sobre la base estabilizada es el CE3BL (figura 3.6) es un dispositivo longitudinal ubica junto al carril de alta velocidad que tiene un comportamiento típico; pues su grafico se desplaza a estados de compresión, pero tiene un mayor rango de desplazamiento cerca de los 40 MPa.

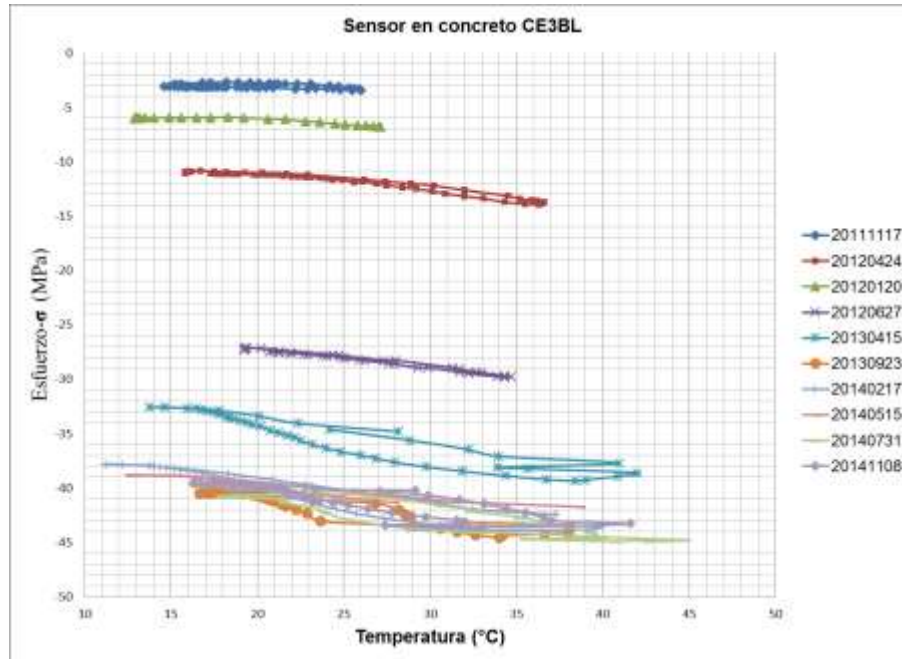


Figura 3.6 Esfuerzo-temperatura CE3BL

3.1.2 Sensores en el acero

El primer sensor es el localizado en la rodera del lado derecho a una profundidad 15 cm, el AE1BL (Figura 3.7); es muy similar su comportamiento al de la base hidráulica, pero con la diferencia de que la apertura de los ciclos disminuye bastante 40 MPa a comparación de los 120 MPa de su par en la base hidráulica.

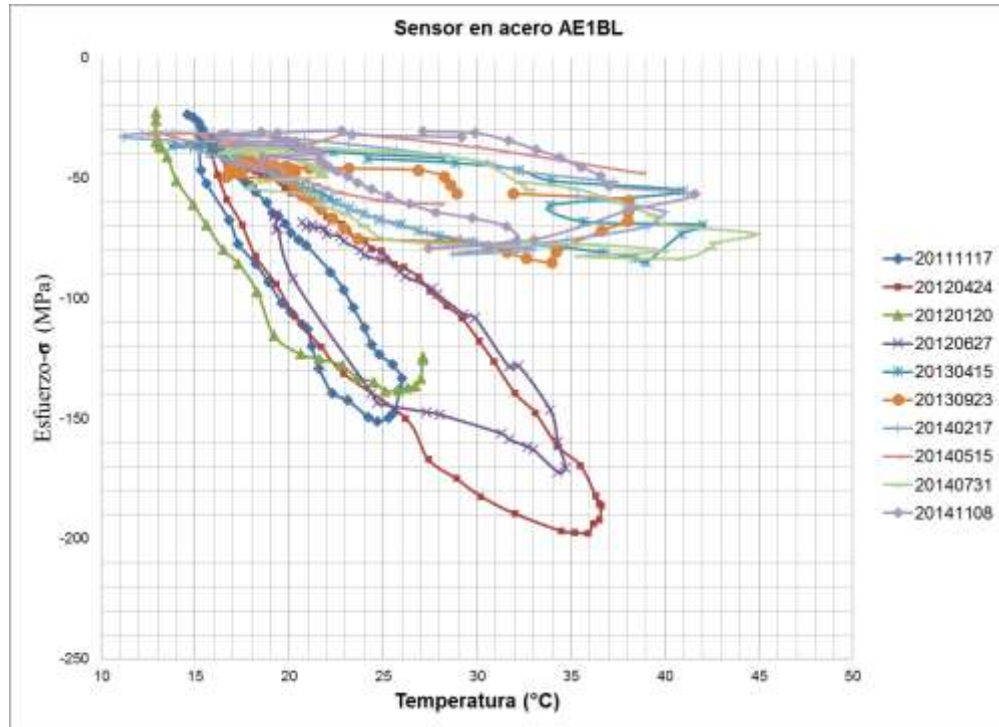


Figura 3.7 Esfuerzo-temperatura AE1BL

El sensor colocado de forma transversal AE2BT (figura 3.8) sigue este patrón se puede observar que se ha comprimido unos 200 MPa.

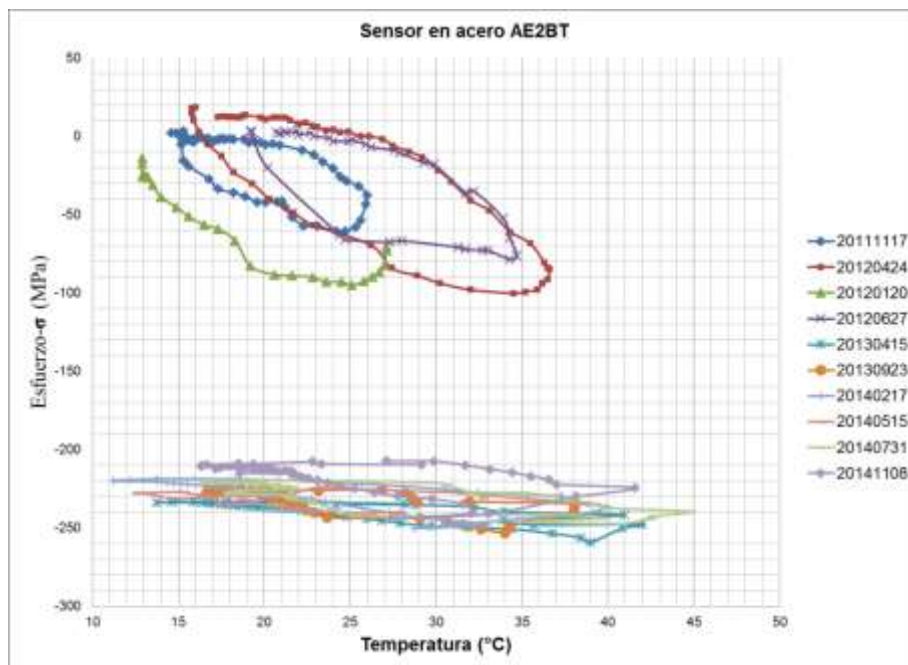


Figura 3.8 Esfuerzo-temperatura AE2BT

Para el sensor A3BL (figura 3.9) se puede observar que ha mantenido su esfuerzo en una misma zona, pero la apertura de su ciclo disminuye un 50% aproximadamente.

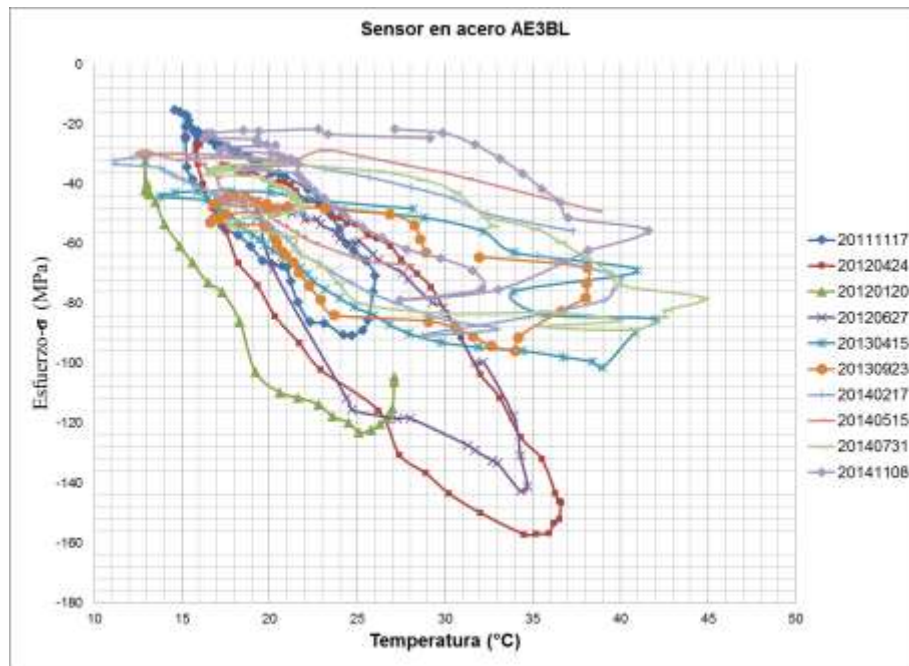


Figura 3.9 Esfuerzo-tTemperatura AEB3L

3.2 Deformación del acero y el concreto

El segundo análisis del monitoreo consiste en la evolución de la deformación del acero y el concreto por grado centígrado, con la finalidad de ver un comportamiento a lo largo de los tres años de mediciones (figura 3.10 y 3.11); en ambas figuras se observa un decremento del esfuerzo desde la primera medición hasta la última que va en el orden de hasta cinco veces; esto se debe a la pérdida de rigidez del sistema y a la segmentación y agrietamiento del PCERC.

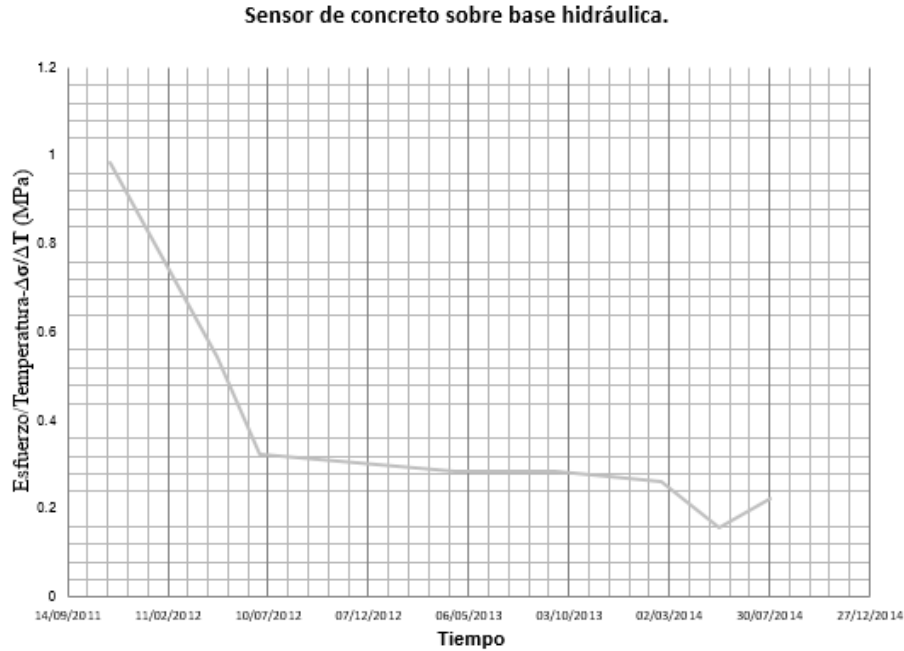


Figura 3.10 Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el calentamiento del sistema en el sensor CHB1L

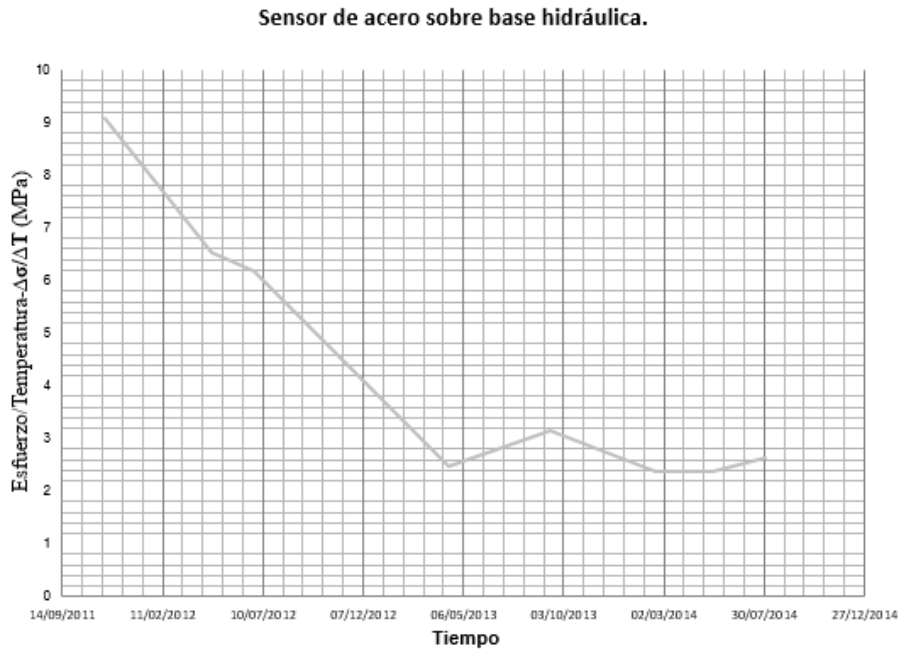


Figura 3.11 Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el calentamiento del sistema en el sensor AHB1L

En el análisis de los resultados de los sensores CEB1L y AEB1L se puede observar la misma tendencia, mientras en la primera medición para el caso del CEB1L se observa una lectura de 1.2 MPa, en la última se observan 0.2 MPa, lo cual

nuevamente nos habla de una pérdida de longitud o masa, que se ve reflejada en una menor excitabilidad del sistema.

En el caso del acero se observa el mismo patrón, pero con una medición inicial de 11MPa y una final de 2 MPa.

3.3 Creación y calibración de modelo

Parte de la evaluación del pavimento fue la generación de un modelo de elemento finito que provea la capacidad de simular los efectos térmicos en el PCER, que fueron calibrados con los datos experimentales; si bien estas simulaciones tienen diferencia con los datos experimentales se debe tomar en cuenta que intervienen una gran serie de factores externos y de cálculo, como es el caso de las ecuaciones de temperatura, que tienen un funcionamiento aceptable, hasta los valores frontera (mínimo y máximo), la simulación de los resortes; en los cuáles es difícil determinar su estado actual, pues no se cuenta con sensores en las bases, que nos indiquen si existe un total o parcial contacto.

De igual forma, cabe mencionar que el programa de elementos finitos con el que se modela el pavimento (ANSYS) no tiene en cuenta la consideración de los esfuerzos producidos por la temperatura lineal y no lineal; por lo que es necesario su programación con un algoritmo basado en las ecuaciones de tres puntos de los perfiles de temperatura, lo que nos genera cierta inconsistencia.

Finalmente, y pese a todas estas limitaciones, se genera un modelo de elementos finitos que lleva a cabo una simulación; aunque no del todo exacta, sí representa la tendencia de los ciclos térmicos.

Como podemos observar en las figuras 3.12 y 3.13, el modelo tiene una tendencia similar a la representada presentada por el ciclo térmico; sin embargo, este se ve limitado por las temperaturas asignadas según la superficie de temperaturas, pero aun con estas limitaciones podemos observar una cercanía al valor de los puntos coincidentes del modelo.

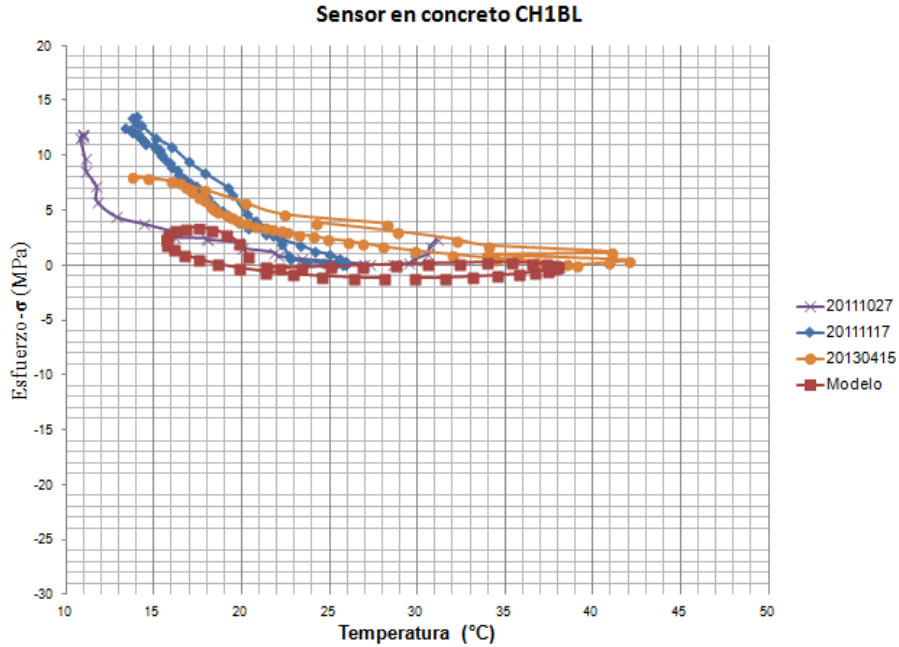


Figura 3.12 Modelación del sensor CH1BL

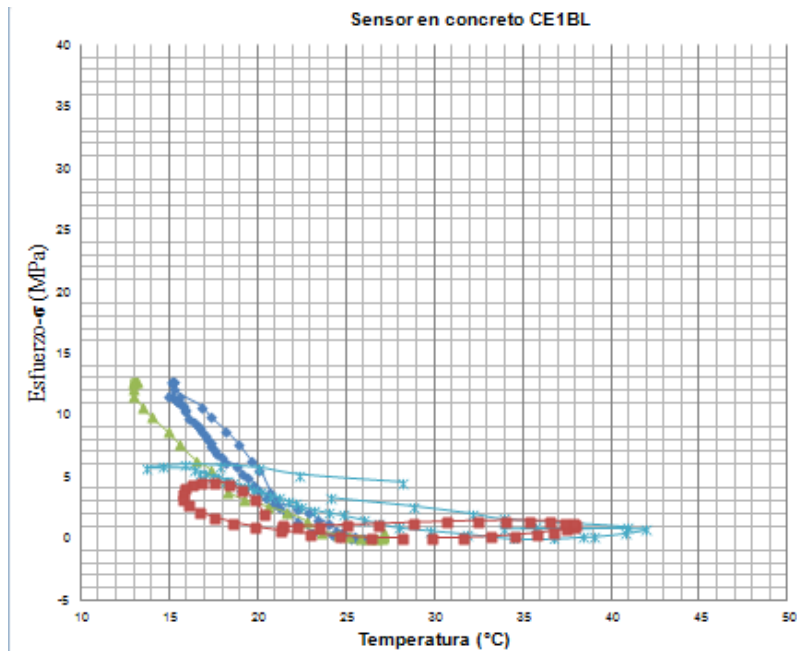


Figura 3.13 Modelación del sensor CE1BL

En el caso de los sensores colocados transversalmente, (figuras 3.14 y 3.15) se observa un inversión de los valores en la parte de enfriamiento así como una casi nula excitación del sensor; sin embargo, esto puede ser debido a la forma de modelar el contacto con los demás carriles pues estos generan una liberación de

energía al no estar restringidos; sin embargo, el hecho de restringirlos podría generar una sobre excitación del modelo y provocar valores extremadamente altos, también es digno de mencionar que en este caso el valor del modelo tiene un parecido mayor a la medición realizada el 17 de noviembre del 2011.

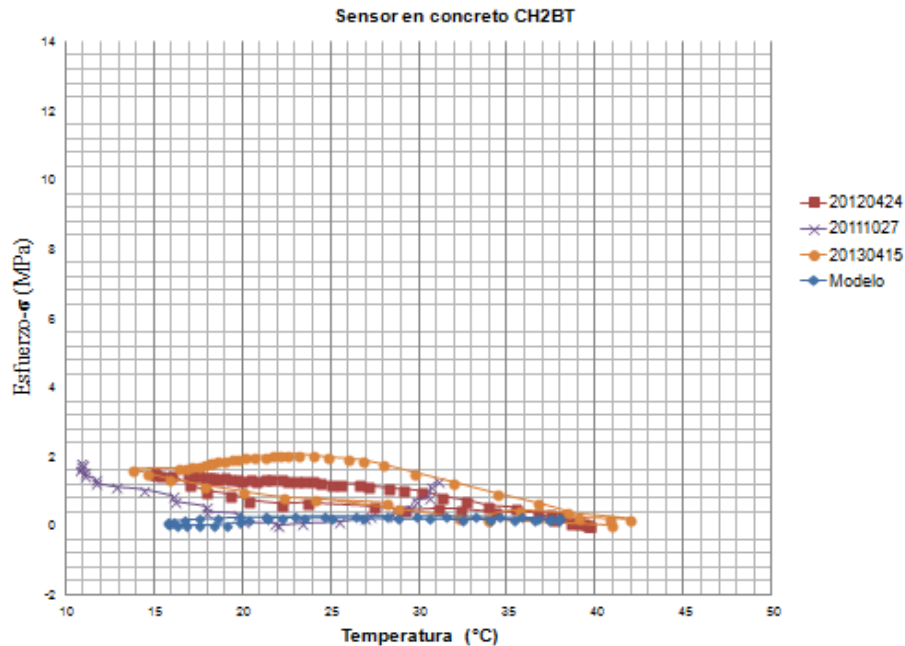


Figura 3.14 Modelación del sensor CH2BT

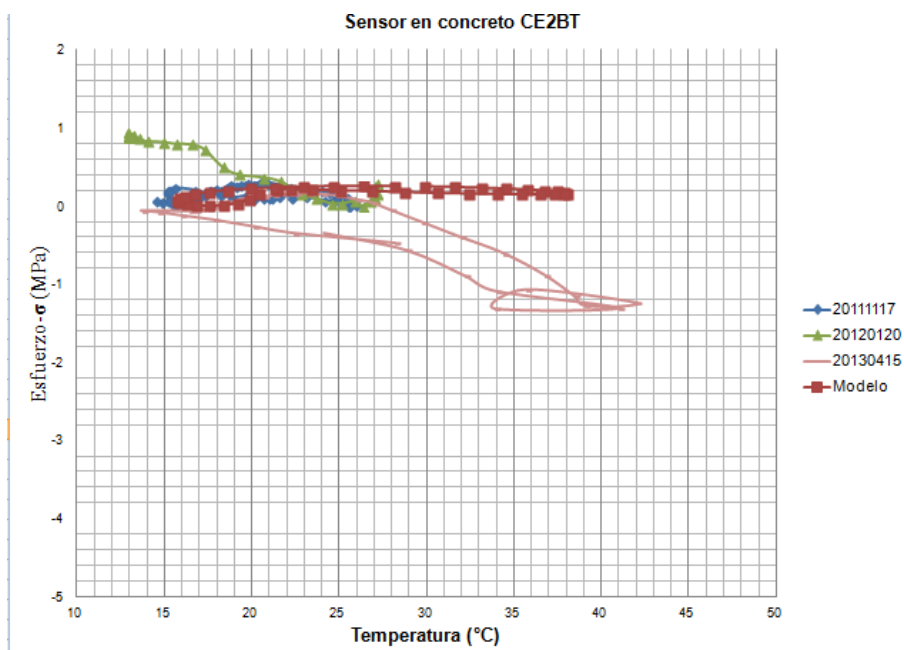


Figura 3.15 Modelación del sensor CE2BT

En el caso de los sensores CH3BL y CE3BL (figura 3.16 y 3.17), podemos observar una casi nula coincidencia; sin embargo, el rizado presente hacia la temperatura fría implica la tendencia a aumentar el valor a tensión de forma rápida, la que sí conserva el modelo.

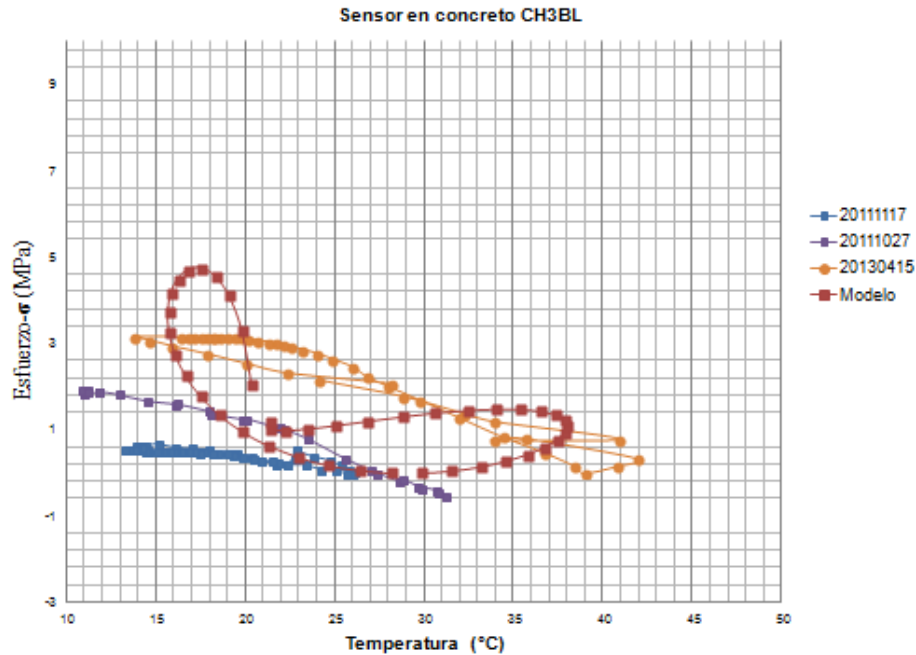


Figura 3.16 Modelación del sensor CH3BL

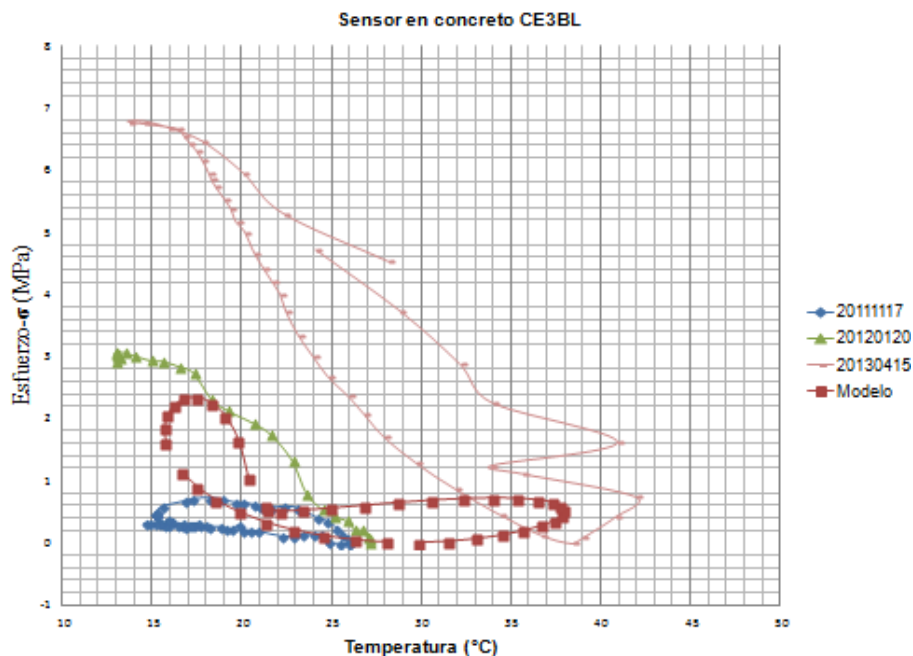


Figura 3.17 Modelación del sensor CE3BL

Finalmente es importante mencionar que en todos los análisis se habla de un esfuerzo en la superficie de rodamiento, y la repetición de este durante todos los días; lo que generaría la degradación del material y, finalmente, es lo que observamos como el agrietamiento.

Bibliografía

AASHTO, 2007. *Bridge Design Specifications SI Units*. Washington, DC. EUA: America Association of State Highway and Transportation Officials.

ACI, 1995. *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. EUA: American Concrete Institute.

Altoubat, S. A., Roesler, J. R., Lange, D. A. y Rieder, K. A., 2008. Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers. *Construction and Building MATERIALS*, Issue 22, pp. 384-393.

Ansys, INC., 2014. *Tutorials, Examples & Curriculum - Ansys*. [En línea] Available at: <http://www.ansys.com> [Último acceso: 25 Marzo 2015].

Aristizábal, J. D., 2000. Estructuras de vigas sobre suelos elásticos de rigidez variable. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil.*, 3(3), pp. 157-173.

Choi, S., Ha, S. y Won, M., 2011. Horizontal cracking of continuously reinforced concrete pavement under environment loading. *Construction Building and Materials*, Volumen Constr.Bulid.Mater.25, pp. 4260-4262.

Devore, J., 2008. En: *Probabilidad y Estadística para ingeniería y ciencias*. . s.l.:Cengage Learning.

FBG-Sensing-Advantages., T., 2011. *Smart Fibres.* [En línea] Available at: <http://www.smartfibres.com/FBG-sensing-advantages>

GERE, J. M. y Goodno, B. J., 2010. En: *Mecánica de materiales*. Ixtapaluca Ed. México: CENGAGE.

Gómez, J. A., 2013. *Instrumentación y monitoreo de un tramo de pavimento de concreto estructuralmente reforzado*, Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte.

Liu, W. y Fwa, T. F., 2003. Effects of nonlinear temperature distribution on thermal stressen in concrete pavements. *Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Volumen 5, pp. 1023-1033.

Madenci, E. y Ibrahim, G., 2006. *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS*. Primera ed. New York: Springer.

Maitra, S. R., Reddy, K. S. y Ramachandra, L. S., 2013. Estimation Of Critical Stress in Jointed Concrete Paviment. *Procedia, 2nd Conference of Transportation Research Group of India (2nd CTRG)*.

MathWorks, INC, 2015. <http://www.mathworks.com/>. [En línea] Available at: <http://www.mathworks.com> [Último acceso: 16 Diciembre 2014].

Moaveni, S., 2003. *Finite Element Analysis, Theory and Application with Ansys*. Segunda ed. s.l.:Prentice Hall.

Mohamed, A. y Hansen, W., 1995. Prediction of stresses in concrete pavement subjected to non-linear gradients.. *Cement and Concrete Composites*, Volumen Cement and Concrete Composites.18, pp. 381-387.

Nam, J., Kim, D., Choi, S. y Won, M., 2007. Variation of crack width over time in continuously reinforced concrete pavement. *Transportation Research Record*, Volumen Transport. Res. Rec.2037, pp. 3-11.

Pane, I., Hansen, W. y Mohamed, R., 1998. Three-dimensional finite element study on effects of linear temperature gradients in concrete pavement. *Transportation Research Record*, Volumen Transport.Res.Rec.1358, pp. 58-66.

Pérez, C., 2002. *MATLAB y sus aplicaciones en las ciencias y la ingeniería*. Primera ed. Madrid: Prentice Hall.

Quintana, J. A. y otros, 2013. Pavimento de concreto estructuralmente reforzado. *IC Ingenieria Civil*, Issue 534, pp. 26-30.

Rens, L., 2005. Continuouslyreinforced concrete-state-of-art in Belglum. *Betonzement*, pp. 32-35.

SCT y GITS, 2008. *Atlas de la red carretera de México*. s.l.:s.n.

Woon, M., 2005. Improvements of testing procedures for concrete coefficient of thermal expansion. *Transportation Research Record*, Volumen Transport.Res.1919, pp. 23-28.

Anexo 1 Curva granulometría de material pétreo

Instrumentación y monitoreo de un tramo de pavimento de concreto estructuralmente reforzado continuo.

		SERVICIOS TECNICOS DE INGENIERIA		<i>Laboratorio de Suelos y Concreto</i>	
		INFORME DE ENSAYE DE MATERIAL PARA BASE HIDRAULICA BANCO LAS BRUJAS "AGACEL AGREGADOS Y ASFALTOS S.A. DE C.V."			
OBRA:	RECONSTRUCCIÓN AUT. MEXICO-QUERÉTARO	REPORTE No.	01 - M Q/cal		
CONCEPTO:	CALIDAD DE MATERIAL PETREO P/BASE	FECHA DE ENSAYE:	07-sep-11		
BANCO:	LAS BRUJAS APASEO EL GRANDE	FECHA DE INFORME:	12-sep-11		
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA			PESOS ESPECIFICOS		
ENSAYE(S) No.	001	P.E.SECO SUELTO Kg/m ³	1750		
MUESTREADO:	OBRA	P.E.SECO MAXIMO Kg/m ³	2100		
MUESTRA NUM.	1	HUMEDAD OPTIMA %	4.5		
		HUMEDAD NATURAL %	3.2		
COMPOSICION GRANULOMETRICA	MALLA		% RETENIDO		
	Abertura mm	Designación	Porcentaje que pasa		
		2"			
	37.5	1 1/2"	100		
	25	1"	87		
	19	3/4"	75		
	9.5	3/8"	52		
	4.75	No. 4	36		
	2	No. 10	23		
	0.85	No. 20	15		
0.425	No. 40	11			
0.25	No. 60	9			
0.15	No. 100	7			
0.075	No. 200	5			
GRAFICA DE COMPOSICION GRANULOMETRICA					
					
PRUEBAS EN MAT. MAYOR QUE LA MALLA Núm. 9.5					
V.R.S (ESTANDAR) %		103.2	ESPECIF. 100 mIn.	ABSORCION %	1.29
EXPANSION %		0.0		DENSIDAD	2.62
EQUIVALENTE DE ARENA %		70.7	50 mIn.	DURABILIDAD	
PRUEBAS SOBRE MATERIAL TAMIZADO POR LA MALLA Núm. 0.425					
LIMITE LIQUIDO %		22.5	26 máx.	EQUIV. HUM. DE CAMPO %	
LIMITE PLASTICO %		INAP.		CONTRACCION LINEAL %	1.0
INDICE PLASTICO %		INAP.	6 máx.	CLASIFICACION SUCS.	

Anexo 2 Certificado de calidad del cemento



Cementos Apasco, S.A. de C.V.
Planta Tecoman
Carretera a Caleras Km. 1.5
C.P. 26139
Tecoman, Colima

CERTIFICADO DE CALIDAD

Cemento Portland Compuesto Clase Resistente 40

(CPC 40)

Periodo del Reporte 01.Aug.11 al 01.Sep.11

Especificaciones Físicas	Método de Prueba	Especificación de la Norma NMX-C-414-ORNDCE-2010		Resultado	Unidades	
		Mínimo	Máximo			
Resistencia a la Compresión	3 días	NMX-C-061	-	-	29.8	Mpa ²
	28 días*	NMX-C-061	40 Mpa ²	-	41.7	Mpa ²
Tiempo de Fregado	Inicial	NMX-C-050	45 minutos	-	109	minutos
	Final	NMX-C-050	-	600 minutos	291	minutos
Estabilidad de volúmenes en agua		NMX-C-062	- 0.20%	0.60 %	0.008	%
Expansión en barras sumergidas a 14 días		NMX-C-185	-	0.020%	0.011	%

Especificaciones Químicas	Método de Prueba	Especificación de la Norma NMX-C-414-ORNDCE-2010		Resultado	Unidades	
		Mínimo	Máximo			
Tiempo de Acido (SO3)		NMX-C-124	-	4.0%	4.0	%

* Resultado de una muestra entera.



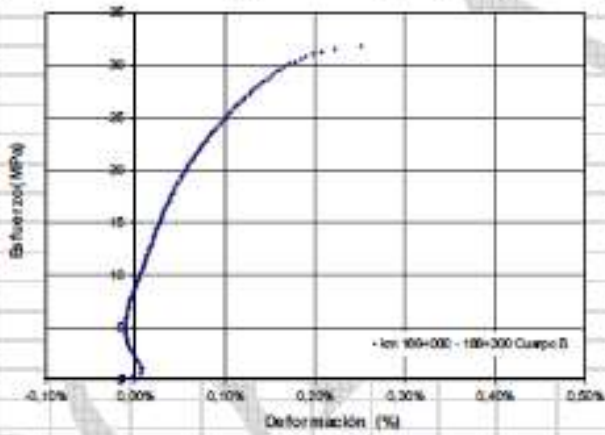

** De acuerdo a la norma NMX-C-414-ORNDCE vigente, el límite de sulfato de acido (SO3) permitido puede excederse si las exposiciones observadas en el ensayo de barras sumergidas en agua a 14 días, determinada conforme a la norma NMX-C-185-ORNDCE vigente, son menores a 0.020 % máximo establecido.

L.Q.A. Rogelio Ramirez Flores
Coordinador de Control de Calidad

Anexo 3 Certificado de calidad del acero

 CERTIFICADO DE CALIDAD / QUALITY CERTIFICATE					
Num. Certificado / Certificate : 12959					
Cliente / Customer : <u>MANTENIMIENTO Y CONSERVACION DE VIALIDADES SA DE C</u>					
Producto / Product : <u>S0271 - MALLA INGENIERIA 25 19,5cm 7,95 7,95 2,00m 3,44m</u>					
PROPIEDADES MECANICAS / MECHANICAL PROPERTIES					
Característica / Characteristic	Especificación / Specification	Resultado / Result	Unidad / Unit		
DIAM. ALAMBRE LONG. / LONG WIRE DIAMETER	7.71 ± 0.44	8.057	(mm)		
DIAM. ALAMBRE TRANS. / TRANS. WIRE DIAMETER	7.71 ± 0.44	8.10	(mm)		
R. TENSIÓN LONG. / LONG. TENSILE STRENGTH	70 Mínimo	77.30	(kg/mm ²)		
R. TENSIÓN TRANS. / TRANS. TENSILE STRENGTH	70 Mínimo	77.80	(kg/mm ²)		
R. FLUENCIA LONG. / LONG. YIELD STRENGTH	60 Mínimo	72.70	(kg/mm ²)		
R. FLUENCIA TRANS. / TRANS. YIELD STRENGTH	60 Mínimo	74.40	(kg/mm ²)		
ELONGACION LONG. / ELONGATION LONG.	3.95 Mínimo	11.2	(%) en 200 mm		
ELONGACION TRANS. / ELONGATION TRANS.	3.95 Mínimo	11.1	(%) en 200 mm		
ANCHO DE MALLA / WIDTH	2.595 ± 2.605	2.604	(m)		
LONGITUD DE MALLA / LENGTH	3.435 ± 3.445	3.44	(m)		
R. CORTE DE SOLDADURA / WELD SHEAR STRENGTH	1400 Mínimo	3200	(kg-f)		
ANÁLISIS QUÍMICO / CHEMICAL ANALYSIS					
UNS / SAE	% C	% Mn	% P	% S	% N
1050 SAE	0.15 - 0.18	0.30 - 0.40	0.04 Max	0.45 Max	0.10 - 0.20
ASESORAMIENTO DE CALIDAD / QUALITY DEPARTMENT					
					
Jefe de Calidad / Quality Chief					
DOCUMENTO PROPIEDAD DEL CLIENTE					
Este producto ha sido fabricado y probado de acuerdo con los requerimientos de especificación aplicable. We hereby certify that this product was Manufactured and inspected in accordance to specifications.					

Anexo 4 Ensayo de cilindros de concreto

 INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA DIVISIÓN DE LABORATORIOS MECÁNICA DE SUELOS <small>Km 2+000 carretera Querétaro-Galindo, Santandía, mpio de Pedro Escobedo, Querétaro 76700</small>		 Instituto Mexicano del Transporte	
REPORTE DE ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE EN ESPECÍMENES DE CONCRETO			
Clave del Servicio/Proyecto			IE-13/11
Datos del colifante			
Nombre colifante/proyecto:	DEACERO		
Representante:	Ing. Alberto Nolla Ortega		
Procedencia muestras:	Autopista México-Querétaro		
Datos de la muestra para realizar el espécimen de ensayo:			
Identificación de la muestra:	-		
Descripción de la muestra:	Determinación del f_c		
Localización de la muestra:	km 166+000 - 166+300 Cuerpo B		
Datos del espécimen realizado en laboratorio:			
Especimen No.:	1		
Diámetro espécimen:	101,81	mm	Altura espécimen: 199,95 mm
Peso volumétrico húmedo (γ_w)	2362,24739	kg/m ³	= 23,17 kN/m ³ $f_o = 31,76$ MPa
			
Fallo			
Observaciones:			
Calculó:			
José Antonio Gómez López			
Encargado del Área de Mecánica de Rocas y Agregados			

Anexo 5 Ficha técnica del extensómetro

Long Gage Strain Sensor | os3600

Specifications ^β

os3600

Performance Properties

Accuracy	± 0.5 % F.S.
Strain; Temperature Sensitivity ²	~ 1.2pm/με; 23.8 pm/°C
Gage Length	25.4 cm and 100 cm standard
Operating Temperature Range	-40 to 80°C
Strain Limits	± 2,500 με
Water Resistant	Suitable for wet, high humidity environments.

Physical Properties

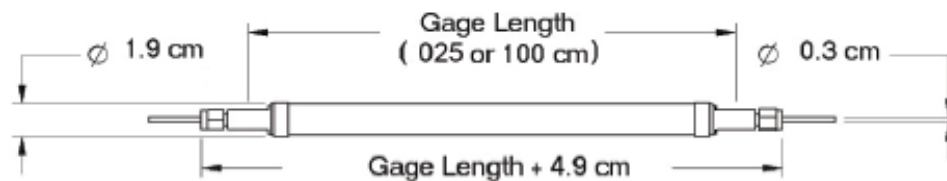
Dimensions	See Diagram Below
Weight	280 g
Material	Stainless steel/ Teflon construction
Cable Length	1 m (± 10 cm), each end
Cable Type	3 mm armored cable
Connectors	FC/APC with Connector Protection Fitting included, each end
Cable Bend Radius	≥ 17 mm
Fastening Methods ³	Bolt-on, Grout-in, Weldable, Embeddable

Optical Properties

Peak Reflectivity (R _{max})	> 70%
FWHM (-3 dB point)	0.25 nm (± .05 nm)
Isolation	> 15 dB (@ ± 0.4 nm around center wavelength)

Notes:

1. Denotes Beta product. For more details see www.mikronoptics.com/product_designation.php.
2. Actual gage factor provided with gage.
3. See http://www.mikronoptics.com/support_downloads/Sensors/ for installation details.



Anexo 6 Ficha técnica del acelerómetro

Accelerometer | os7100

Specifications 	os7100
Performance Properties	
Operating Temperature Range	-40 to 80°C
Reference Sensitivity ²	~16 pm/g
Frequency Response	See charts below
Frequency Range ³	DC to 300 Hz
Mounted Resonance Frequency	~700 Hz
Transverse Sensitivity	< 5% Reference Sensitivity
Temperature Transient Sensitivity	10.7 ms ² /°C
Maximum Operational Shock	100 g Peak
Physical Properties	
Dimensions ⁴	38 x 9 x 19 mm
Weight ⁴	28 g
Case Material / Plating	ASTM F-15 Kovar/Gold over electrolytic nickel
Cable Length	User specified, 1 m max (± 10 cm)
Fiber Type	SMF28-Compatible
Cable Bend Radius	≥ 17 mm
Cable Type	3 mm Armored Cable
Connectors	FC/APC optional
Mounting Method ⁵	10-32 Tapped Hole
Optical Properties	
Peak Reflectivity (Rmax)	> 70%
FWHM (-3 dB point)	0.25 nm (± .05 nm)
Isolation	> 15 dB (@ ± 0.4 nm around center wavelength)

Anexo 7 Ficha técnica del sensor de temperatura

Non-metallic Temperature Sensor | os4300



Specifications ^β

	os4310 Non-metallic	os4330 Non-metallic Epoxy Mount	os4350 Armored Cable, Flange Mount
Thermal Properties			
Operating Temperature Range	-40 to 120°C (-40 to 250°C for Single Ended version)		
Temperature Sensitivity	~10pm/°C (±1.7pm/°C)		
Cable Temperature Range	-40 to 250° C (FC/APC Connectors: -40 to 80°C)		
Response Time ²	0.7 seconds	4.6 seconds	4.2 seconds
Standard Calibration ³ (Included)	1.0°C Long Term Accuracy ⁴ 0.6°C Short-Term Accuracy, Typical ⁵		
Premium Calibration ³ (Optional)	0.5°C Long Term Accuracy ⁴ 0.2°C Short Term Accuracy, Typical ⁵		
Physical Properties			
Dimensions (L x W x H) ⁶	18.8 x 3.2 x 3.2 mm	31.8 x 7.6 x 7.6 mm	31.5 x 15.0 x 7.6 mm
Weight (including cable)	2.6 g	4.3 g	38 g
Housing Material	Alumina	Alumina	Anodized Aluminum
Cable Length	1 m (± 10 cm)		
Fiber Type	SMF28-Compatible		
Cable Bend Radius	≥ 17 mm		
Cable Type	1 mm Fiberglass Braid	1 mm Fiberglass Braid	3mm Armored Cable
FC/APC Connectors	Optional	Optional	Both connector and protection fittings optional
Fastening Methods ⁶	Bond Strain Reliefs only	Epoxy type	#6 Self Drilling Screws or Epoxy
Optical Properties			
Peak Reflectivity (Rmax)	> 70%		
FWHM (-3 dB point)	0.25 nm (±.05 nm)		
Isolation	> 15 dB (@ ± 0.4 nm around center wavelength)		

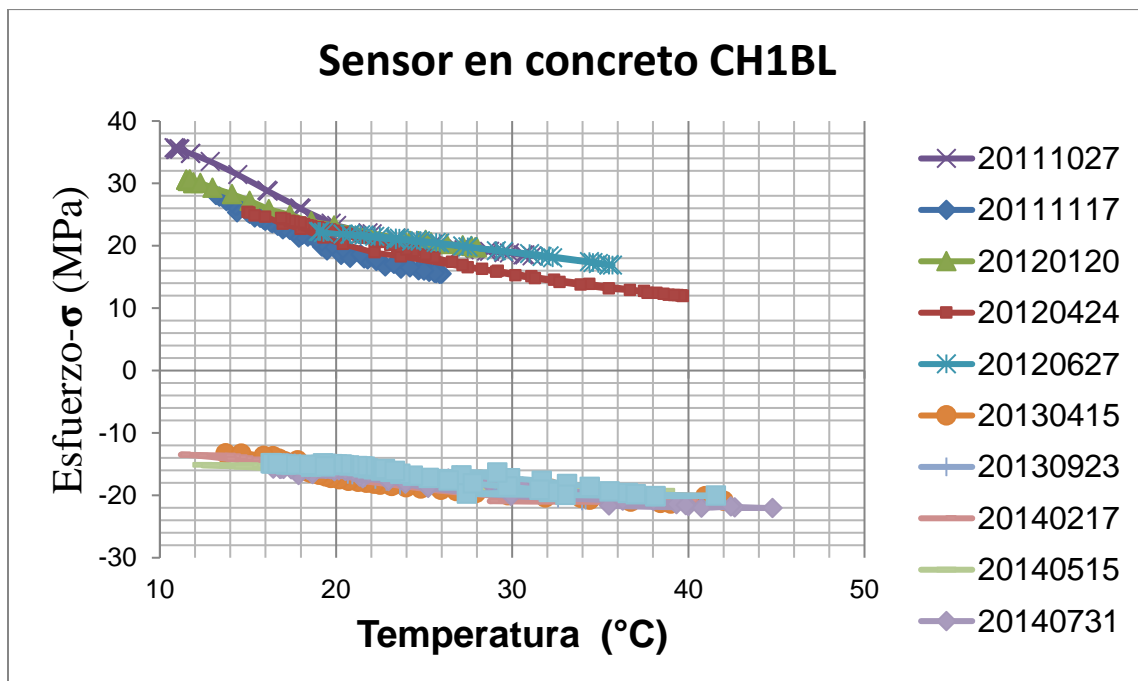
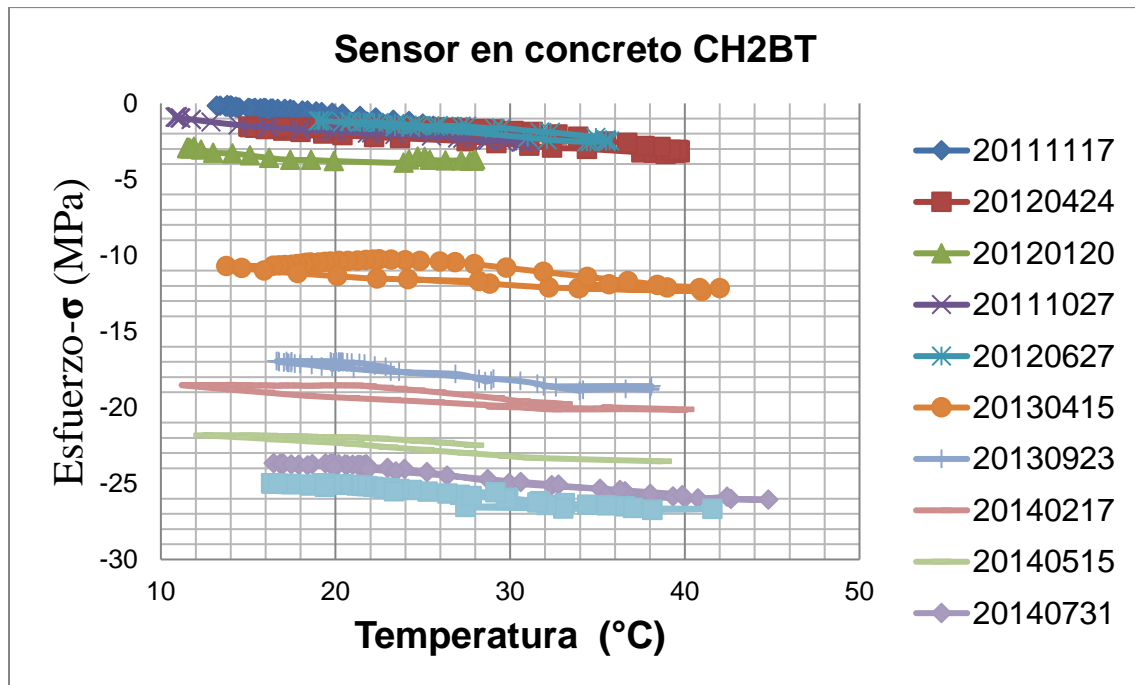
Anexo 8 Ficha técnica del interrogador

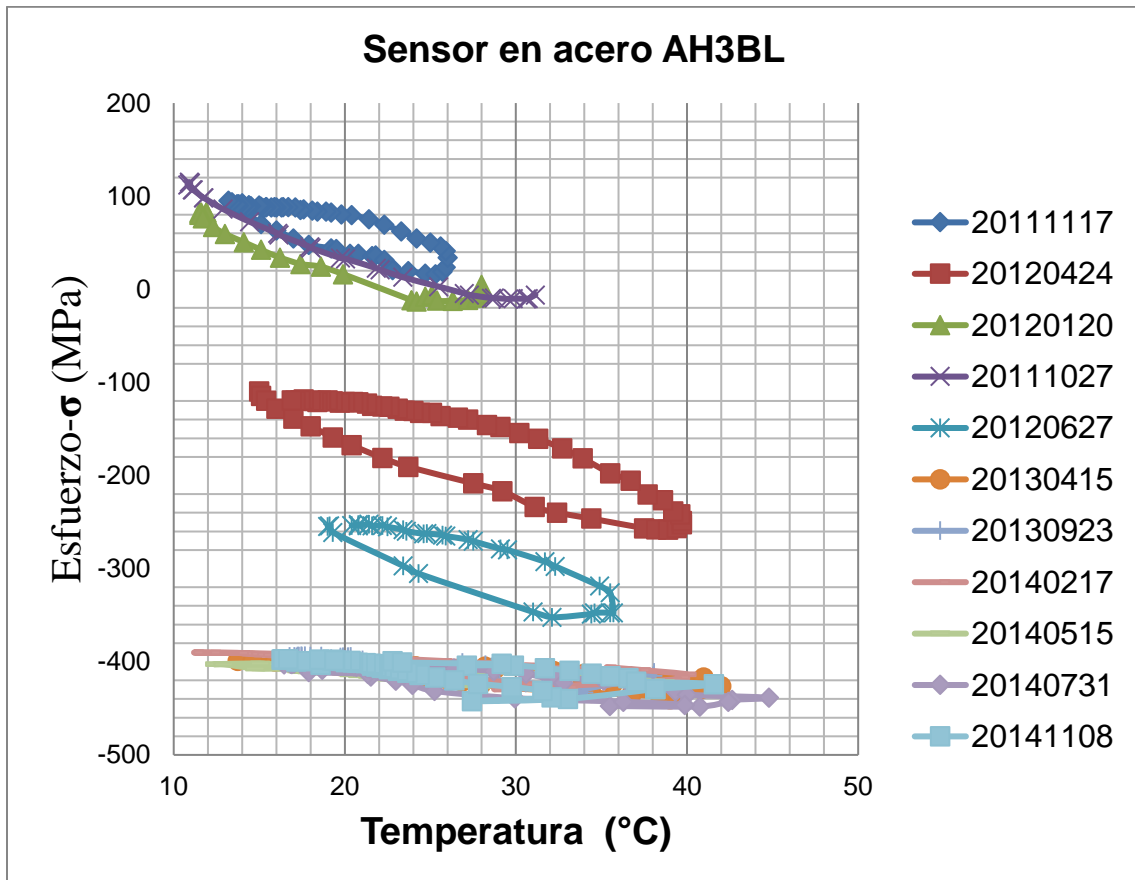
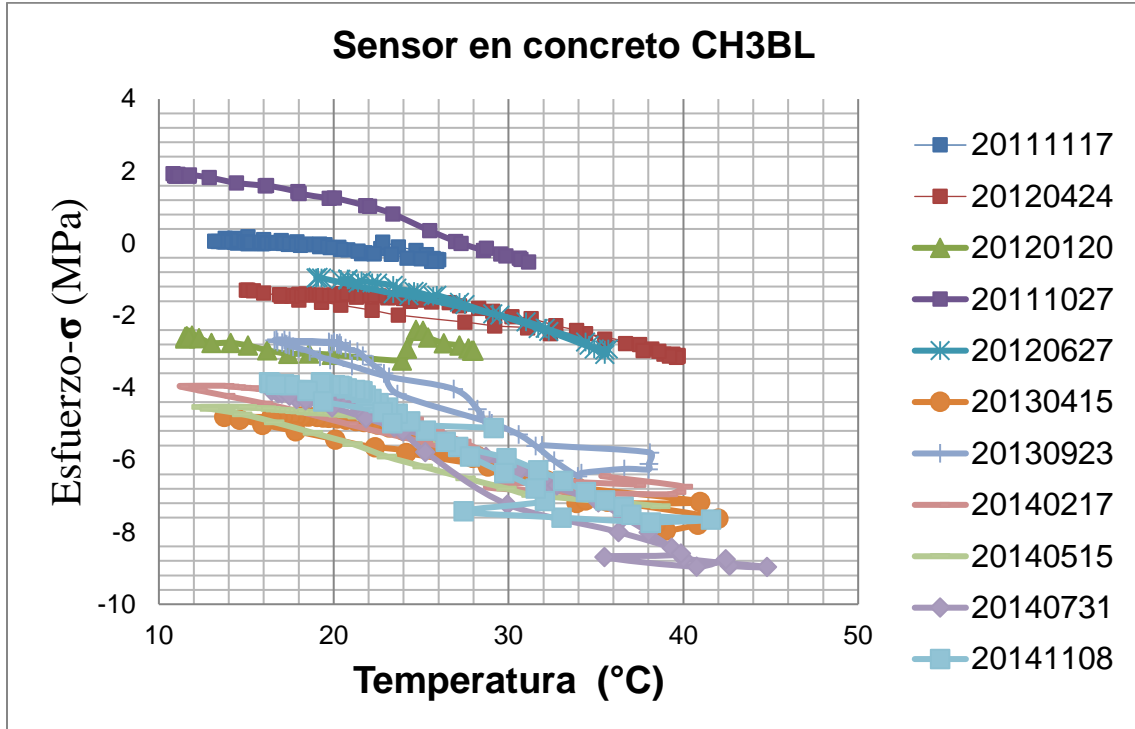
Optical Sensing Interrogator | sm130

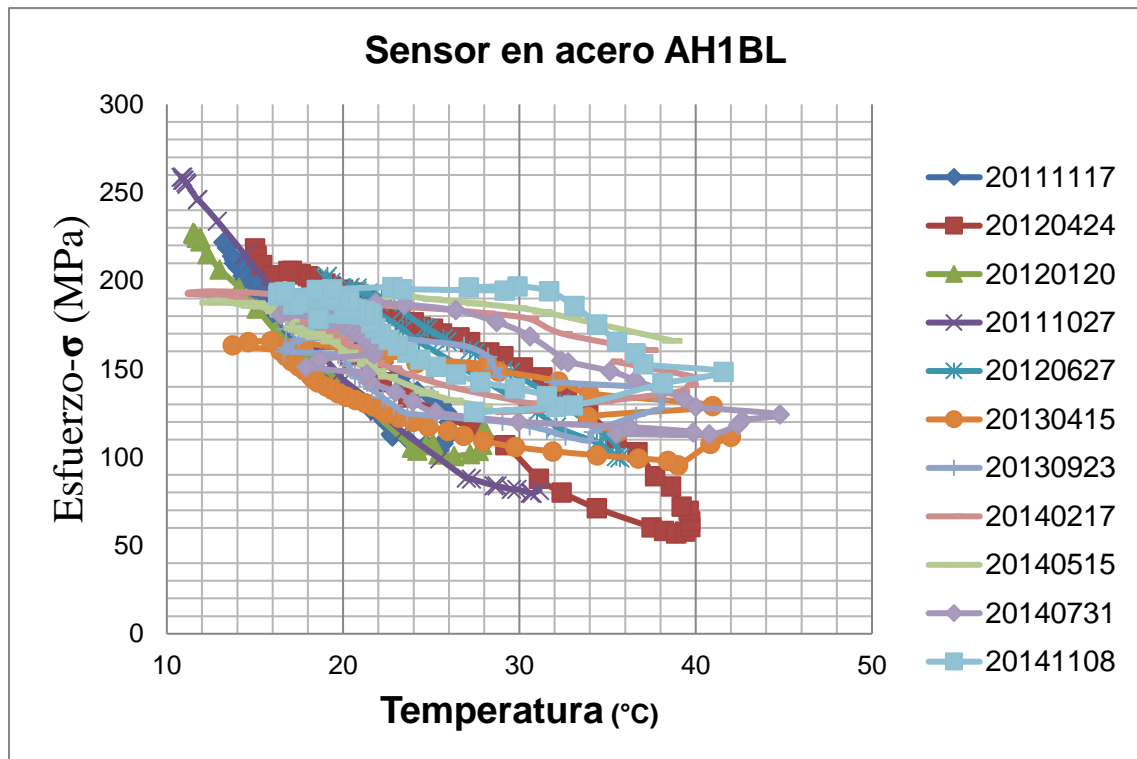
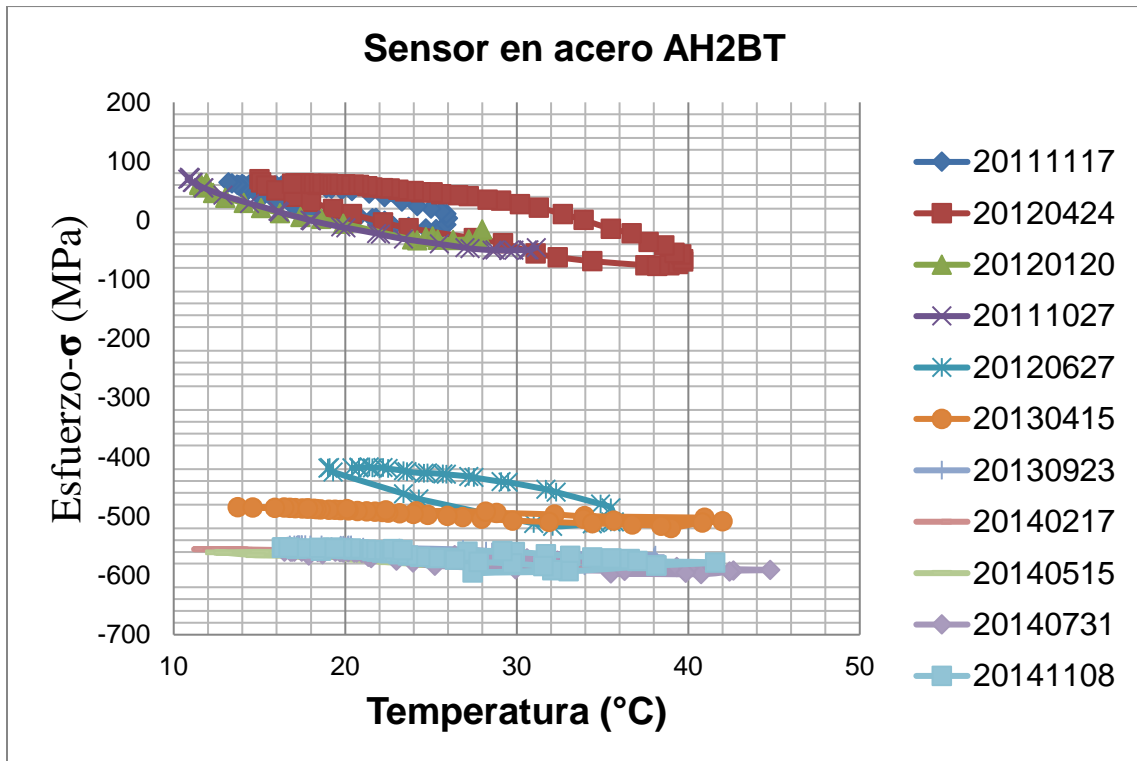


Specifications	sm130-200	sm130-500	sm130-700
Optical Properties			
Number of Optical Channels ²	1 (up to 16)	4 (up to 16)	4 (up to 16)
Scan Frequency	100 Hz	500 Hz	1 KHz
Wavelength Range	1510-1590 nm		
Wavelength Stability ²	2 pm typ, 5 pm max		
Wavelength Repeatability ⁴	1 pm, 0.05 pm with 1,000 averages		
Dynamic Range ⁵	25 dB with user-selectable gain		
Max FBGs per Channel	80 (up to 160 with expanded λ range)		
Internal Peak Detection	Included	Included	Included
Spectral Diagnostic View	Optional	Included	Included
Optical Connectors	FC/APC		
FBG Requirements ⁶	0.25 +/- 0.05 nm, FWHM (-3dB point); >15dB Isolation		
Data Processing Capabilities			
Interfaces	Ethernet - other interfaces available via an sp130 Sensing Processor Module		
Protocols	Custom Micron Optics protocol via Ethernet (others available)		
Remote Software	Peak detection, data logger, peak tracking, and instrument control		
LabVIEW™ Source Code	Allows for customization of remote software		
Enhanced Data Management	ENLIGHT Sensing Analysis Software		
Mechanical, Environmental, Electrical Properties			
Dimensions; Weight	122 mm x 267 mm x 135 mm; 2.5 kg (5.5 lbs)		
Operating Temperature; Humidity	0° to 50° C; 0 to 80%, non-condensing		
Storage Temperature; Humidity	-20° to 70° C; 0 to 95%, non-condensing		
Input Voltage	7-36 VDC; (100~240 VAC, 47~63 Hz), AC/DC converter included		
Power Consumption at 12V	25 W typ, 50 Max		
Options			
FBG Distance Measurement ^{1,7}	Optional	Optional	Included
8 or 16 Channel Expansion ²	Please see our 8 or 16 channel sm041 multiplexers		
2 kHz Scan Rate ¹	Available with 40nm λ range, (1525-1565nm)		
Expanded FBG Capacity ^{1,8}	λ range of 1460 - 1620nm doubles max FBGs to 160 per channel		
1310nm λ Range ¹	Available λ range of 1280-1360nm		

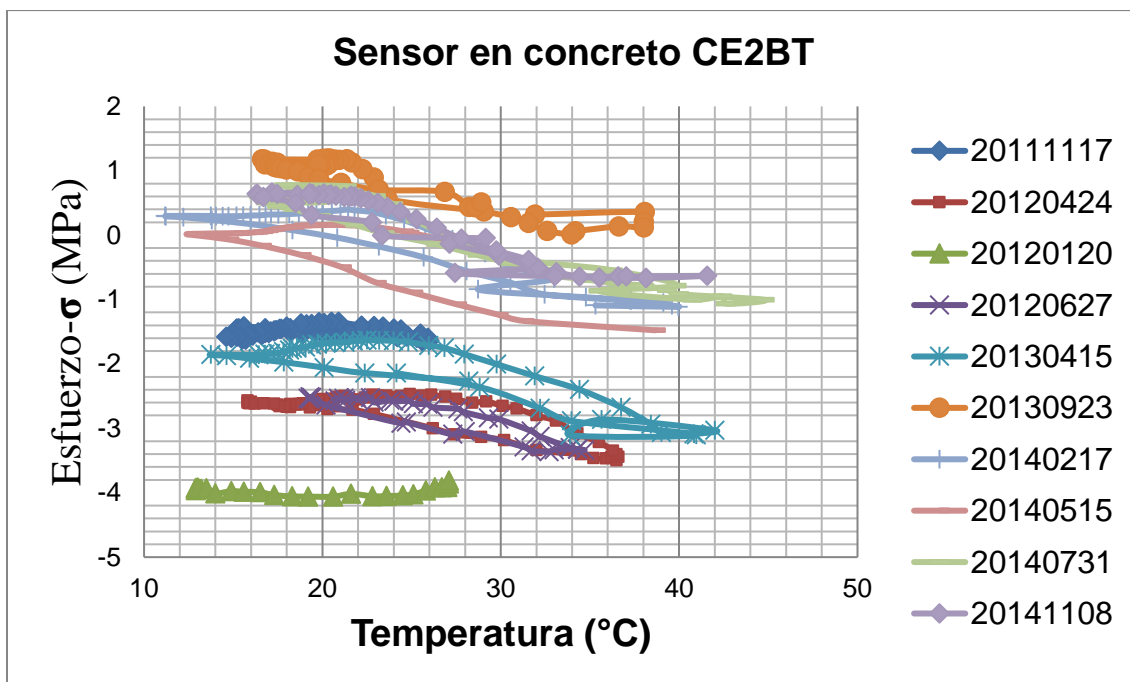
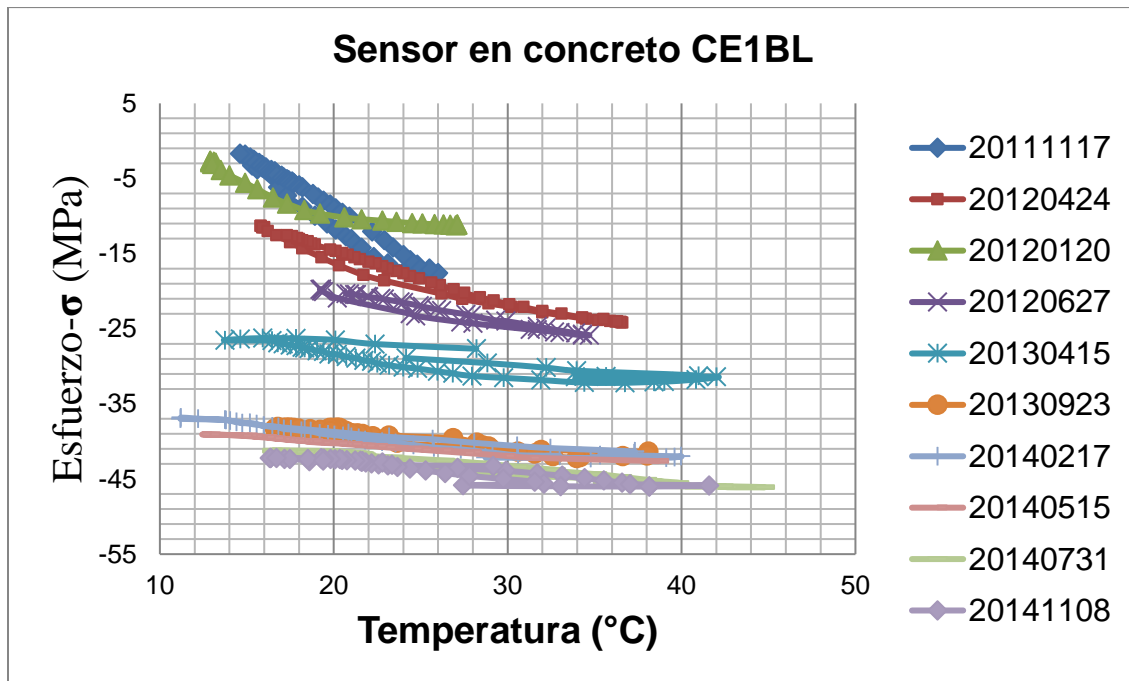
Anexo 9 Gráficas temperatura-esfuerzo sobre base hidráulica

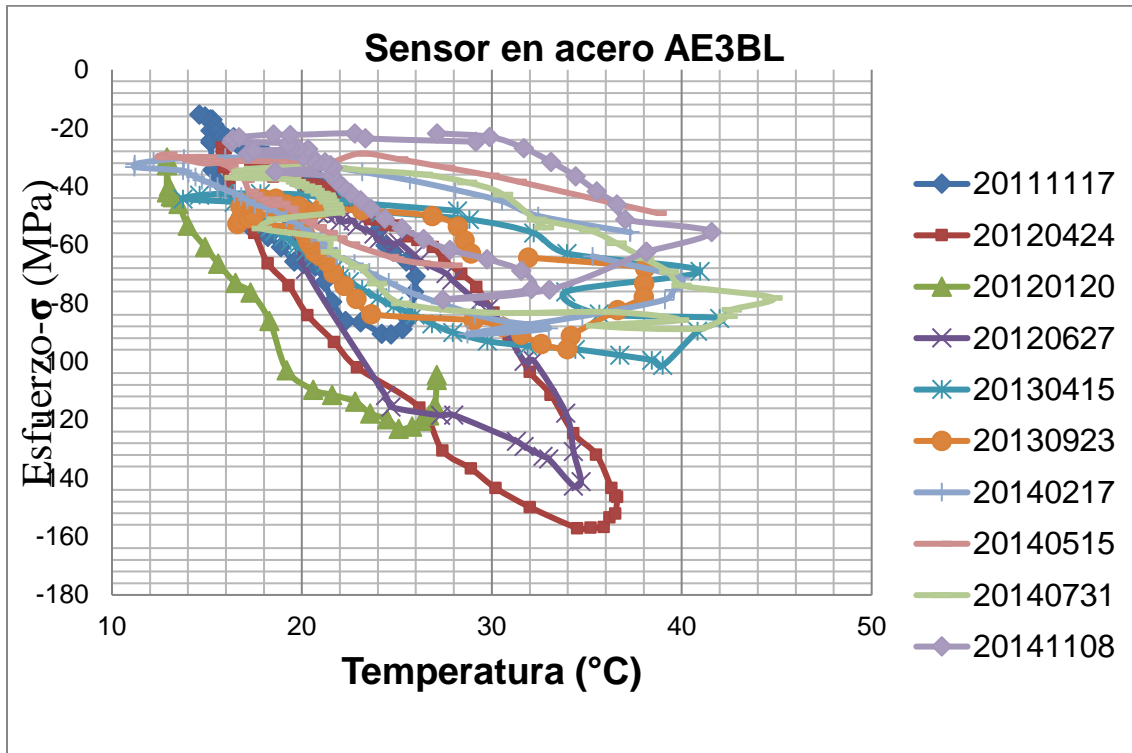
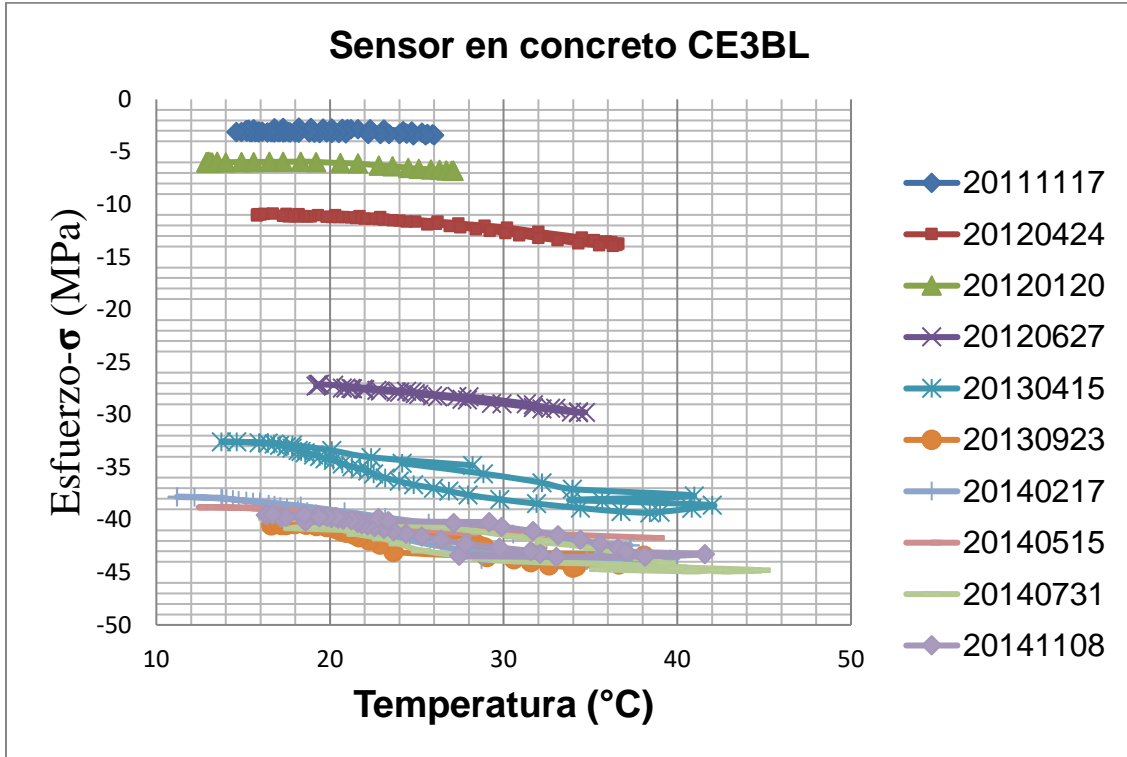


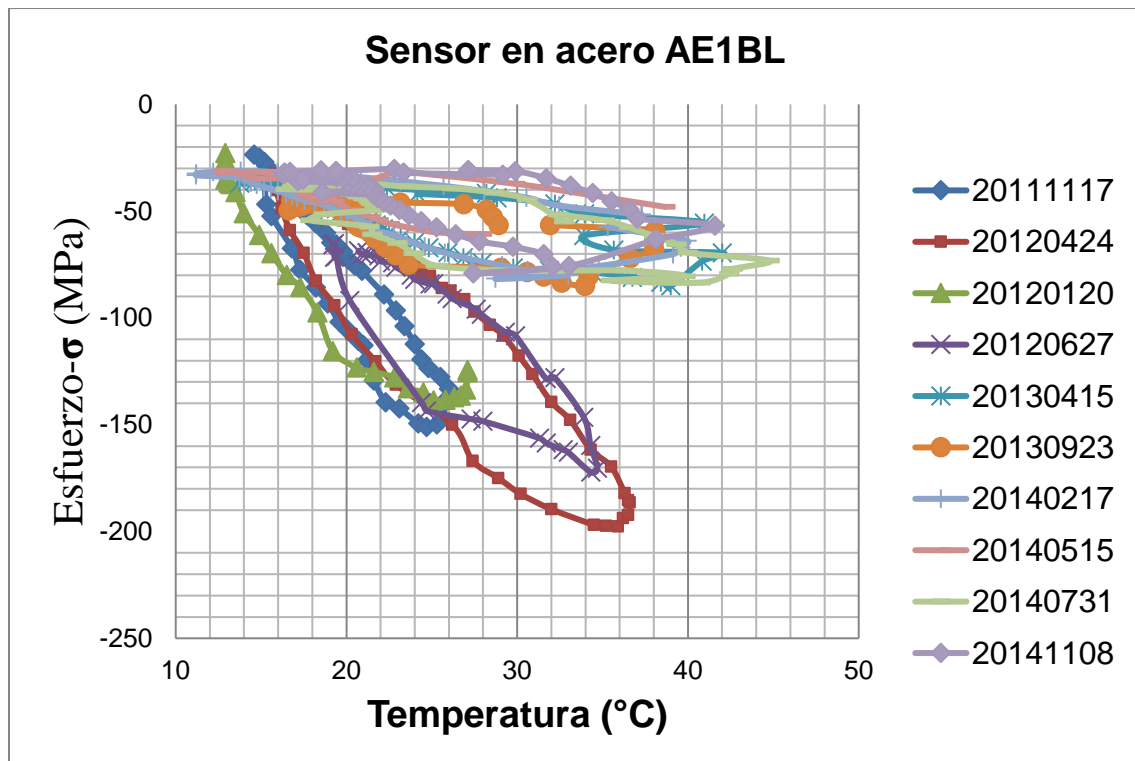
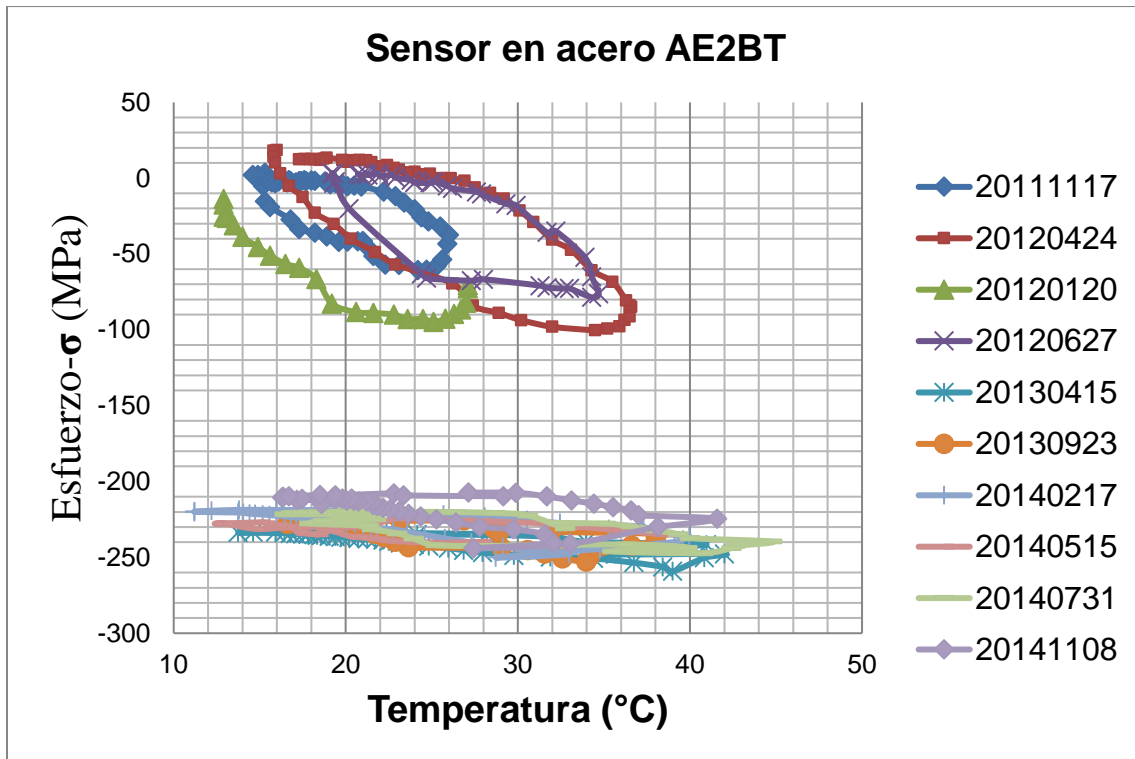




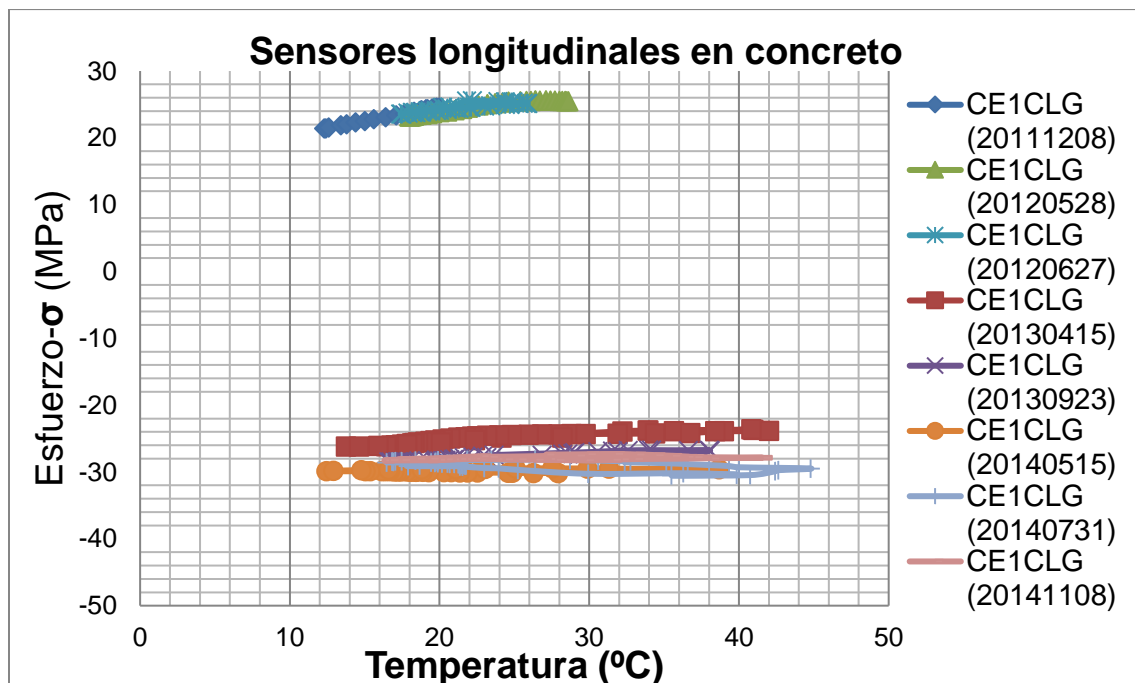
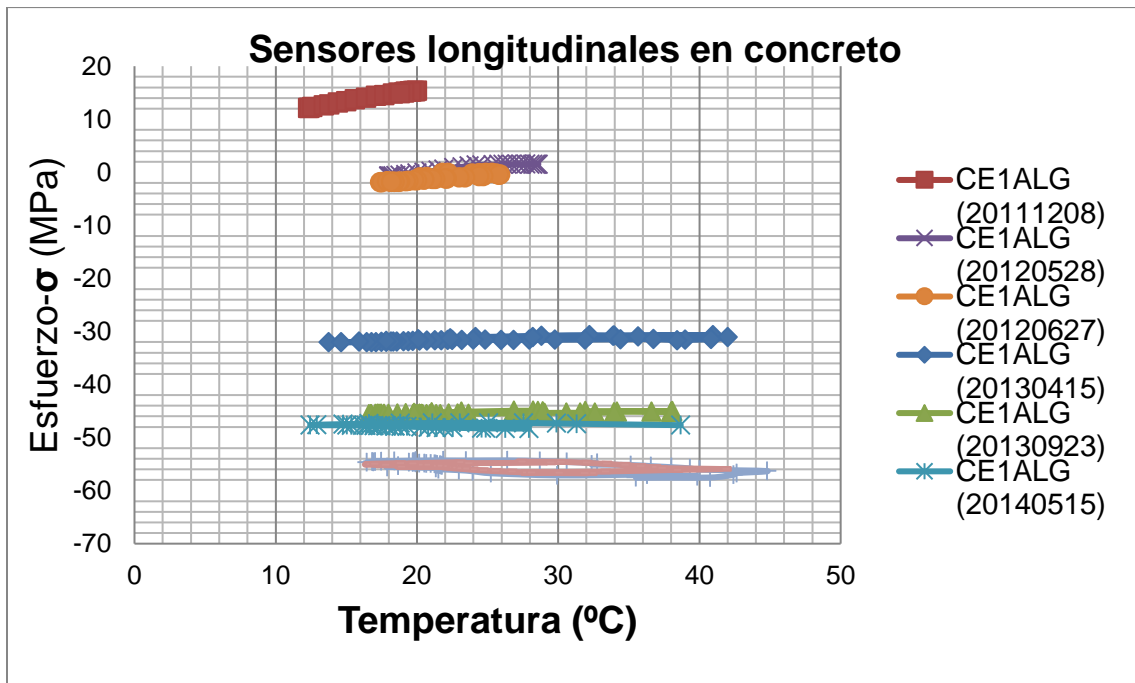
Anexo 10 Gráficas temperatura-esfuerzo sobre base cementada

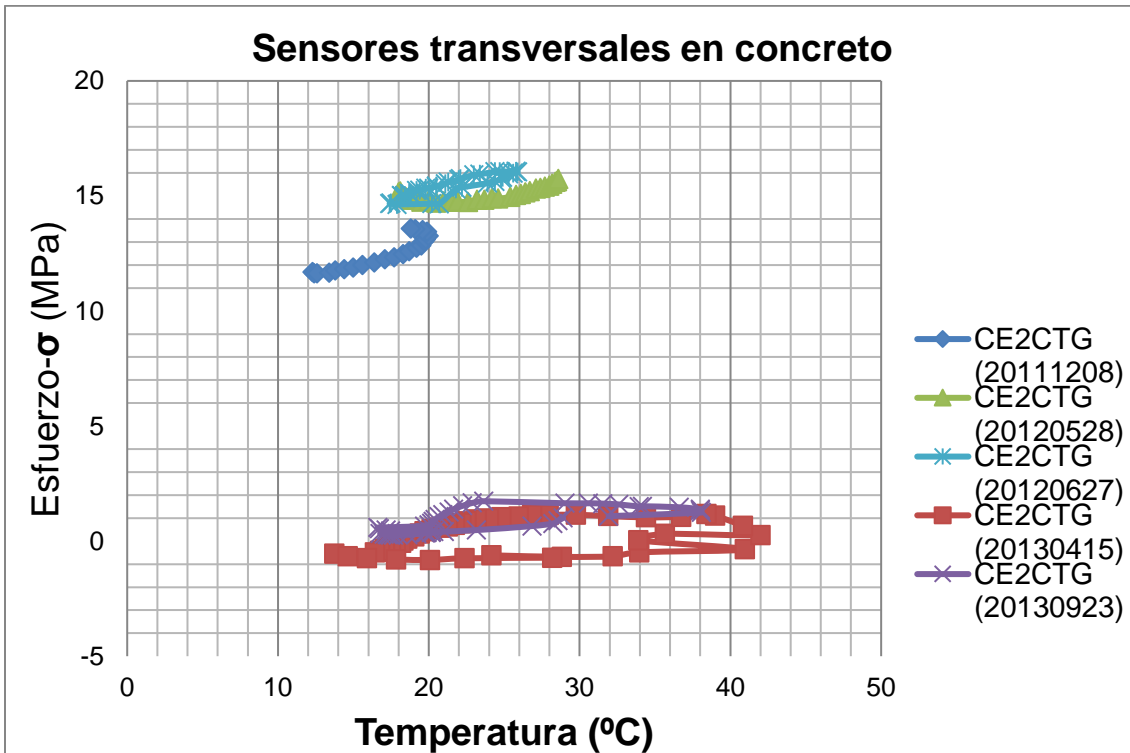
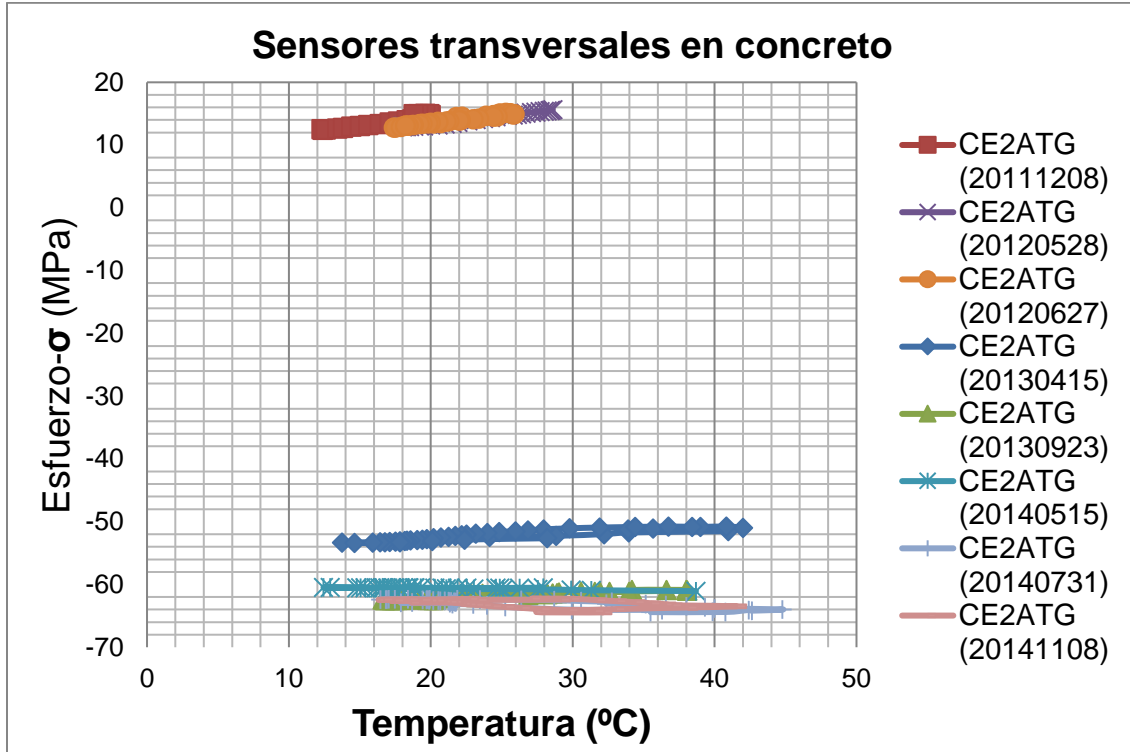


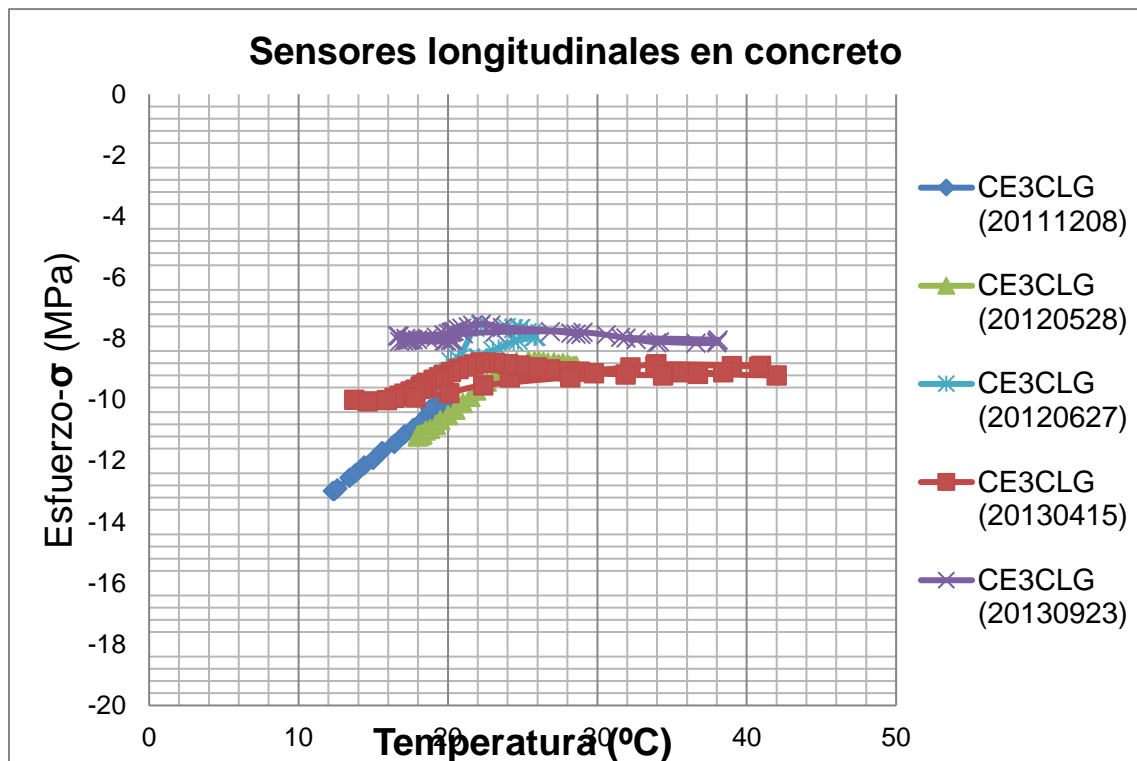
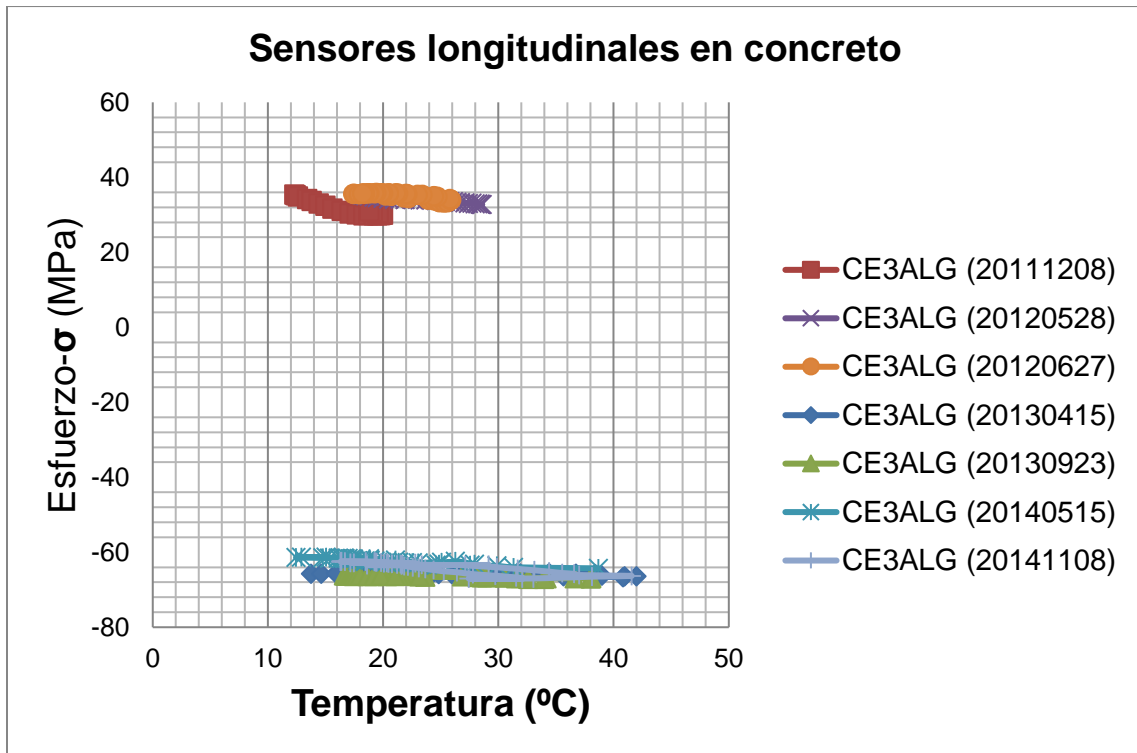


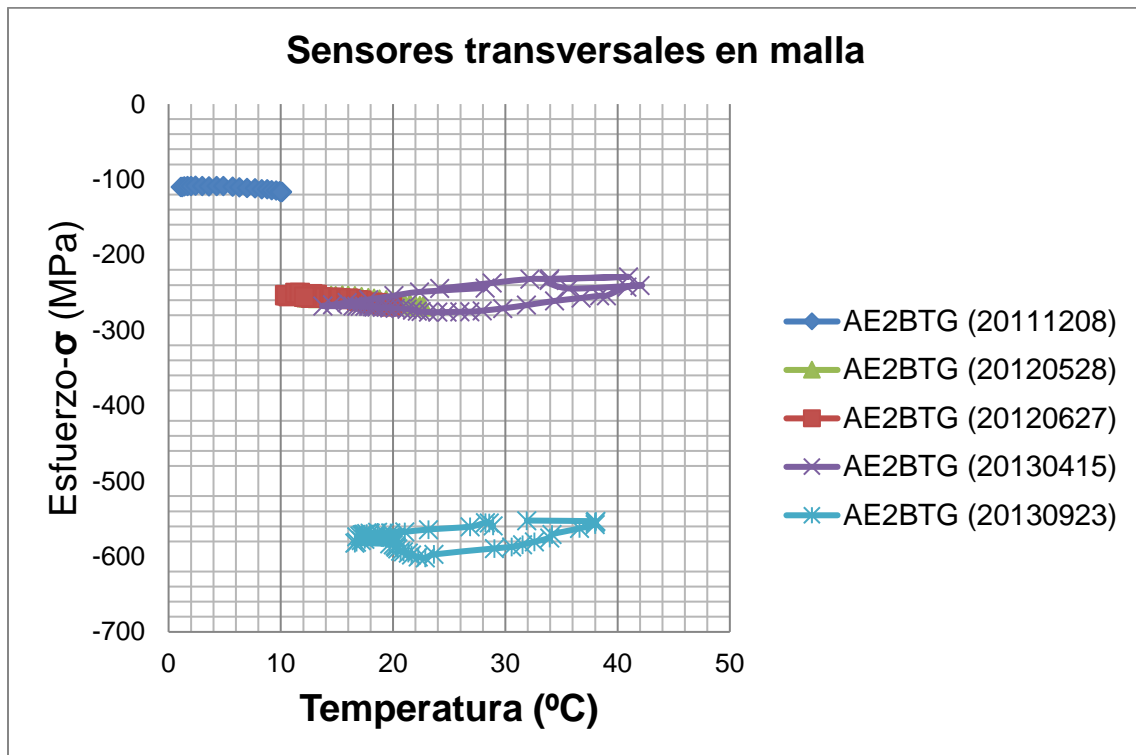
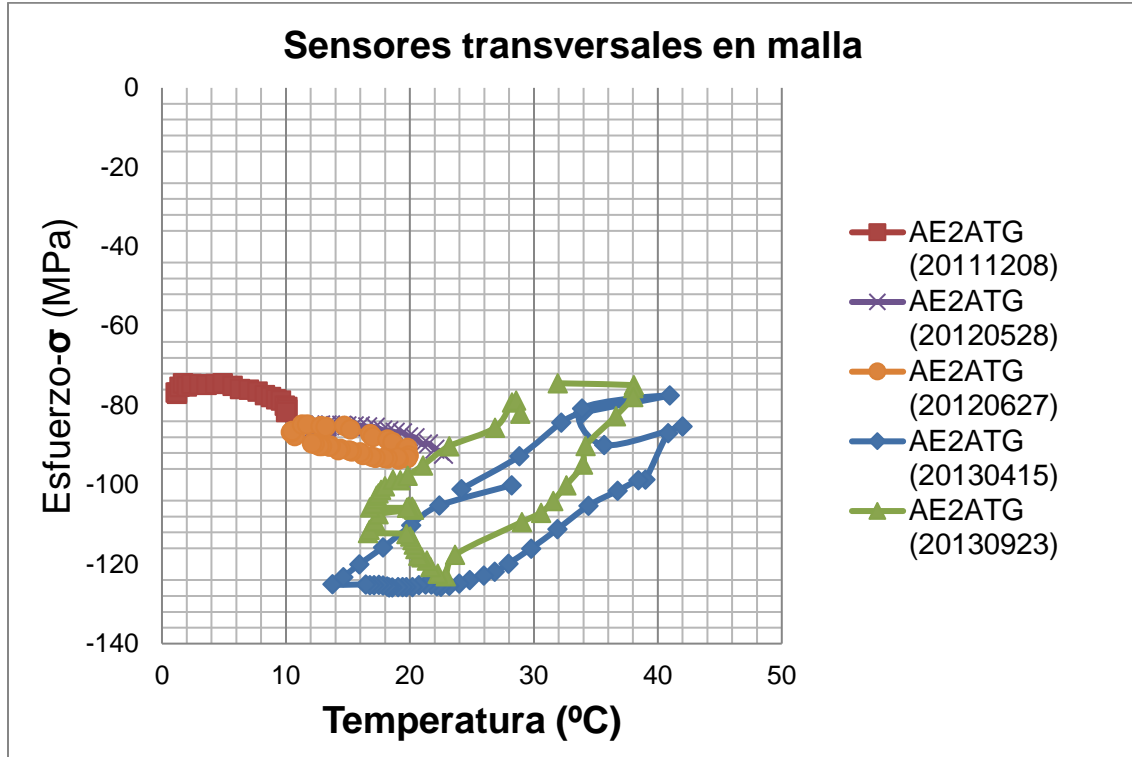


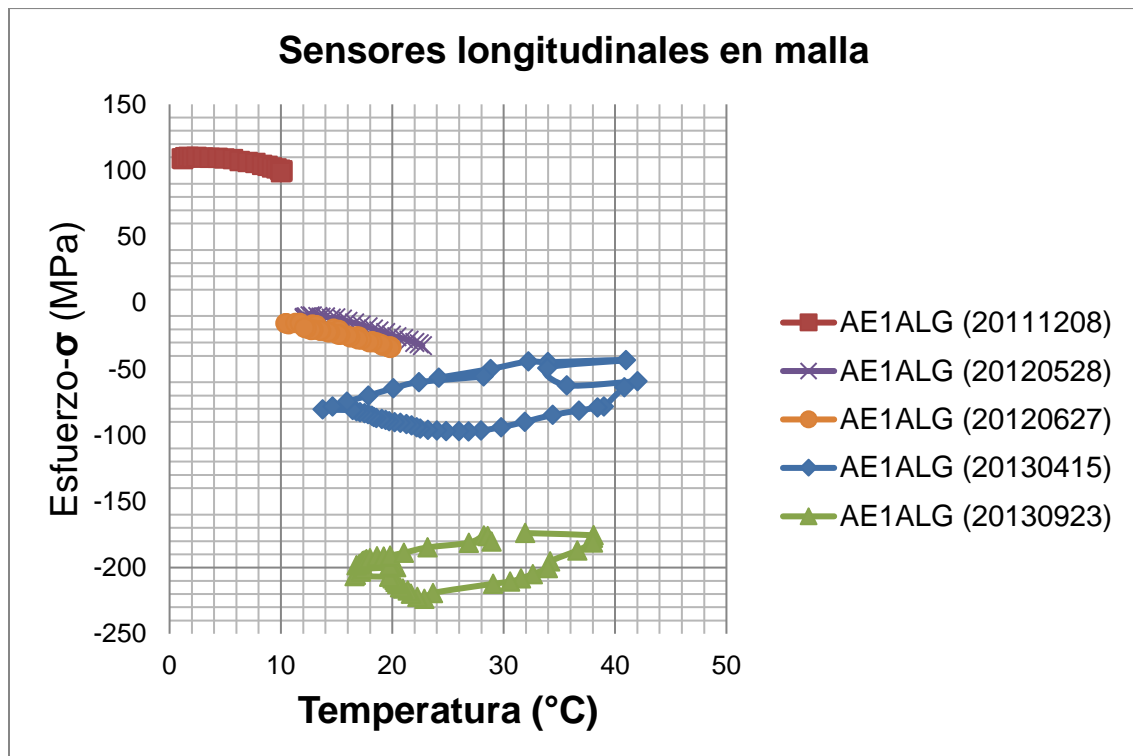
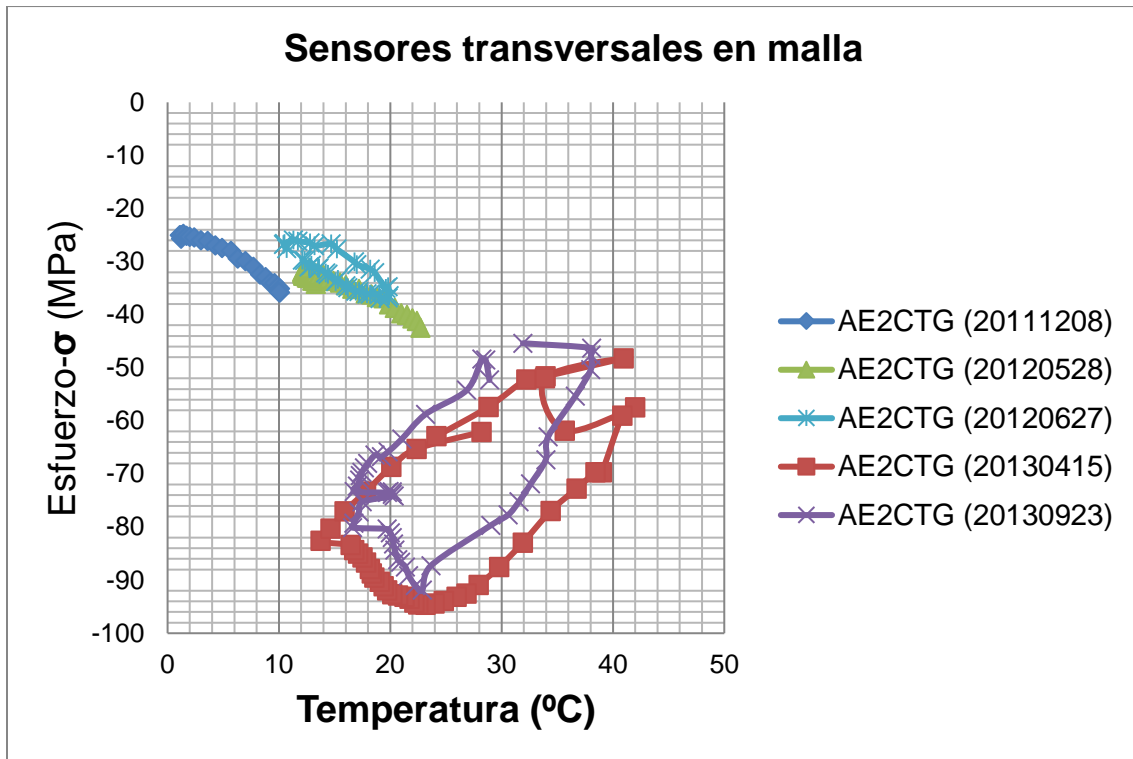
Anexo 11 Gráficas temperatura-esfuerzo sobre base cementada con grieta

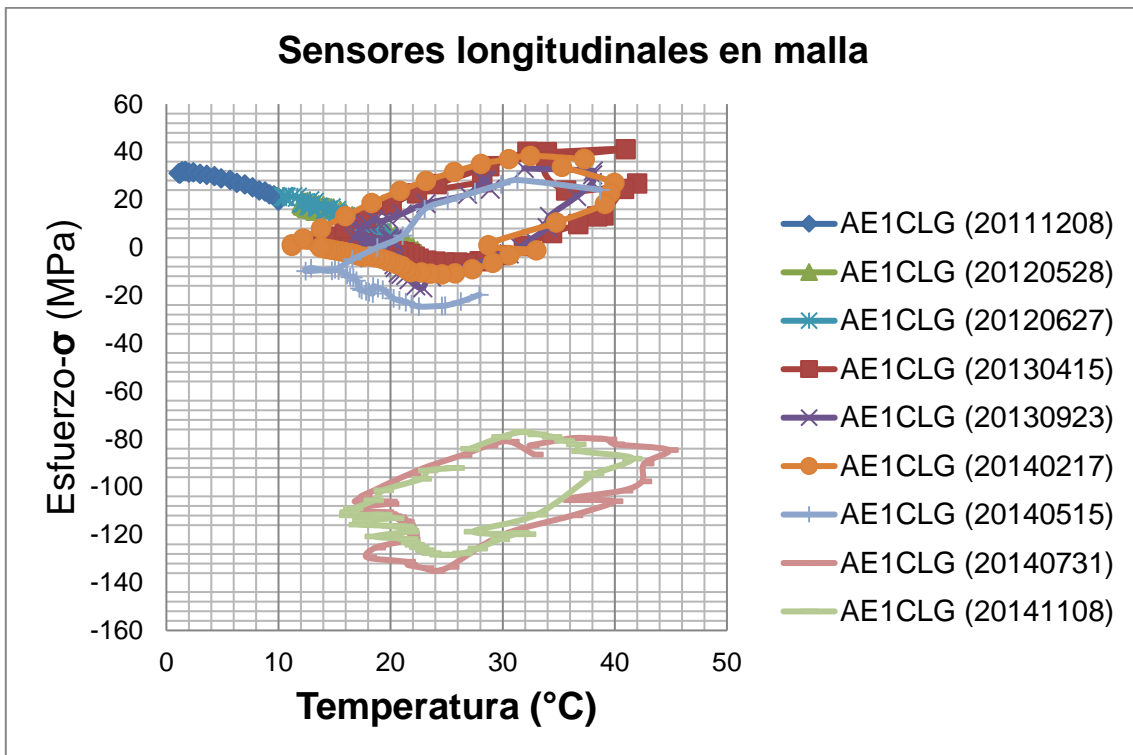
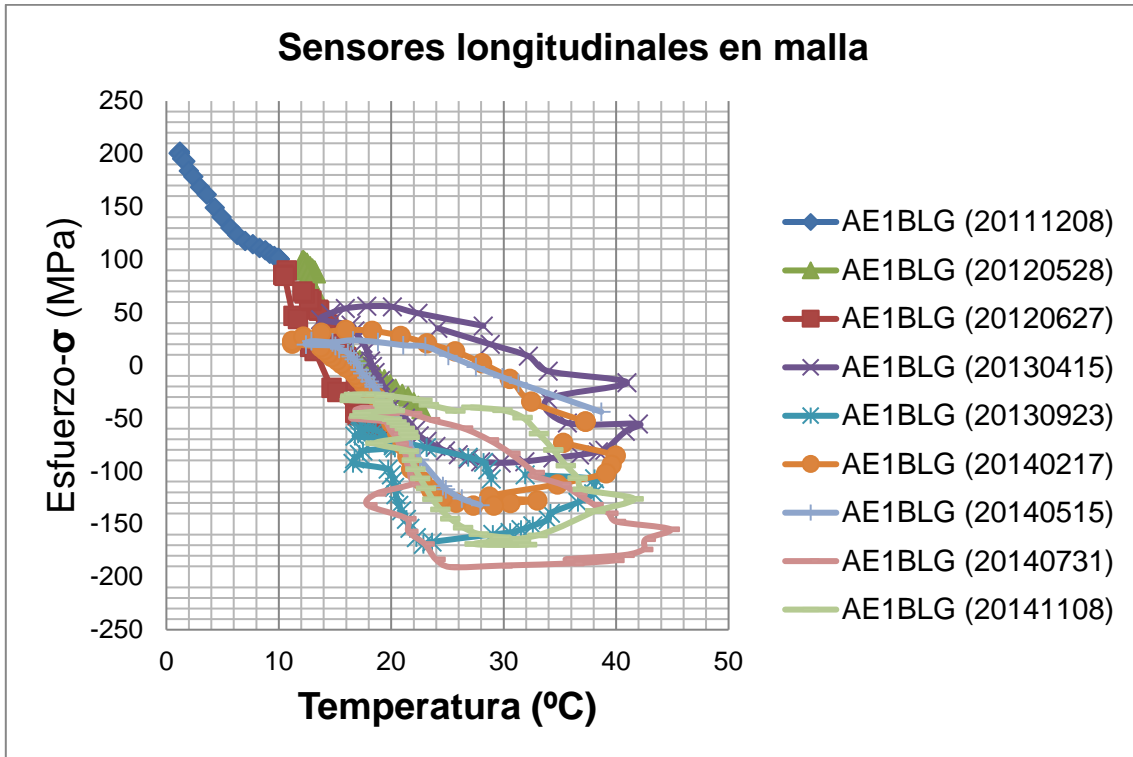






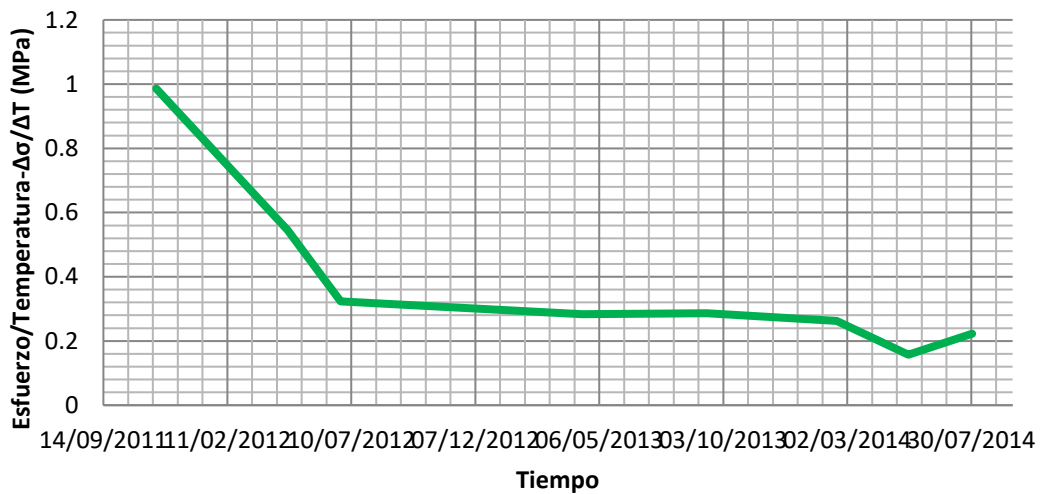




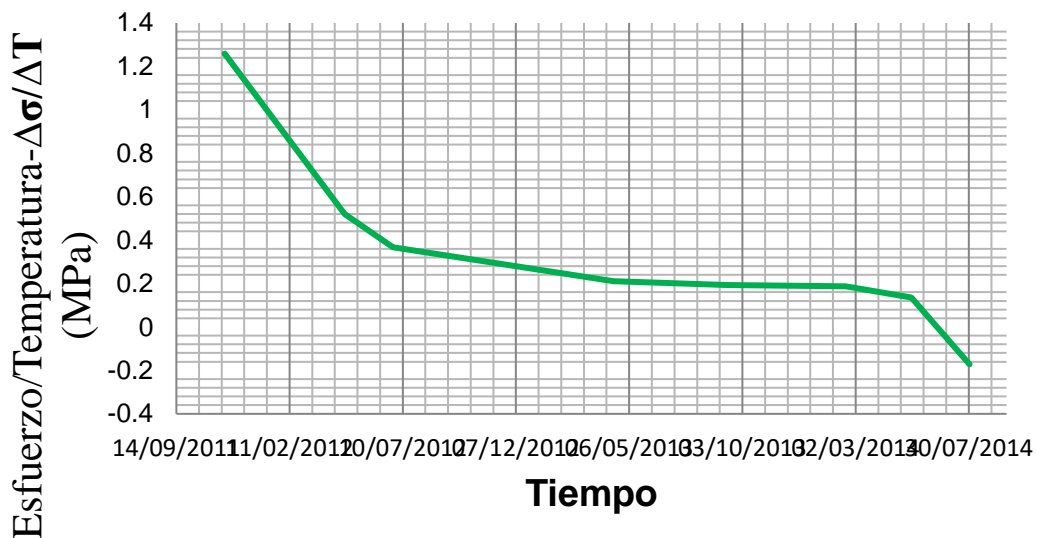


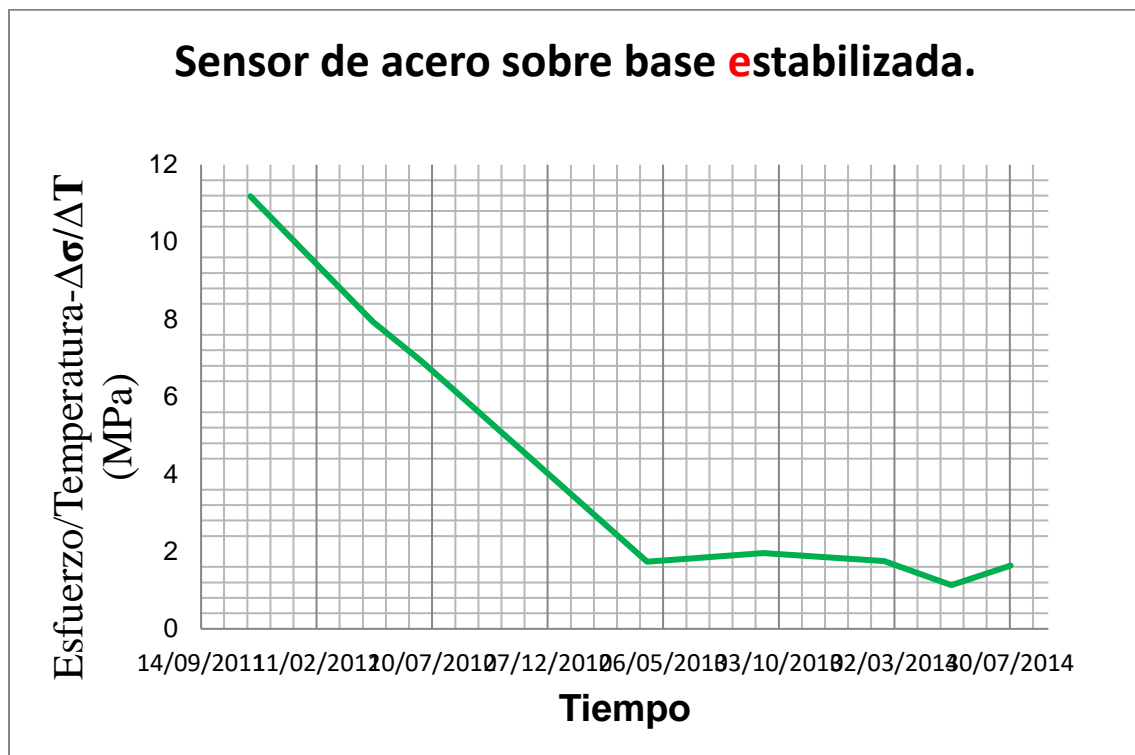
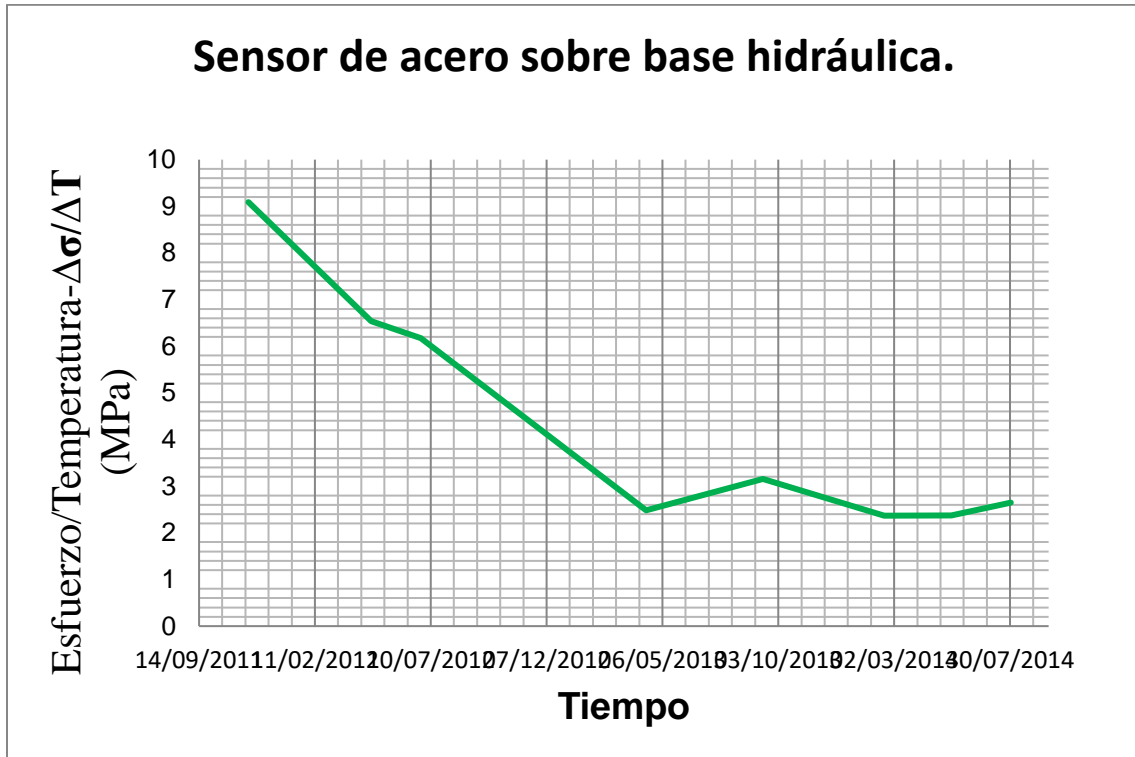
Anexo 12 Valor promedio del esfuerzo por grado centígrado para el sensor

Sensor de concreto sobre base hidráulica.



Sensor de concreto sobre base estabilizada







Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado-Galindo”
Parque Tecnológico San Fandila
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México
CP 76703
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad
certificada bajo la norma ISO 9001:2015