



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería.
Maestría.

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE UN PAVIMENTO DE CONCRETO
ESTRUCTURALMENTE REFORZADO CONTINUO PCERC.**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el diploma/grado de (o la)

Maestro en Ciencias.

Presenta:

Ing. Víctor Manuel Bonilla Ureña

Dirigido por:

Dr. Miguel A. Pérez Lara y Hernández
Director

Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez.
Co-director.

SINODALES

Dr. Miguel A. Pérez Lara y Hernández

Presidente Firma

Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez.

Secretario Firma

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras

Vocal Firma

Dr. Francisco Javier Carrión

Suplente Firma

Dr. Omar Chávez Alegría

Suplente Firma

Dr. Aurelio Domínguez González
Nombre y Firma
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Nombre y Firma
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Diciembre del 2015

Análisis del comportamiento estructural de un Pavimento de Concreto Estructuralmente Reforzado Continuo PCERC.

RESUMEN.

El presente trabajo estudia el comportamiento estructural de un sistema de Pavimento de Concreto Estructuralmente Reforzado Continuo (PCERC) a partir del análisis y evaluación de 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 cual 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 de 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.

Palabras clave: PCERC, ciclo térmico, microdeformaciones, esfuerzos, cargas por temperatura, cargas por tránsito.

SUMMARY

This work studies the structural behavior of a system Continuous Structural Reinforced Concrete Pavement (PCERC) from the analysis and evaluation of information used fiber optical sensors embedded in an experimental stage built on the Mexico-Queretaro highway between km 166+ 000 and 166 + 300 in the slow lane on the body B (sense Queretaro-Mexico) and a finite element model using ANSYS. The system Continuous Structural Reinforced Concrete Pavement (PCERC) consists of two meshes engineering MI-3.44 placed on top and bottom to 6 bed and 3 cm respectively, which was designed as an alternative to the infrastructure used in highly-trafficked road. Experimental data analyzed and the finite element model generated show that PCERC system is affected structurally initially by thermal stresses generated in the continuous system during a heat cycle and requires a redesign to minimize the effects caused by temperature.

Keywords: PCERC, thermal cycle, microdeformations, stress, temperature loads, traffic loads.

DEDICATORIAS.

A Dios que me permitió experimentar sus bendiciones a lo largo de toda mi vida.

A mis Maestros quienes siempre me orientaron y llevaron a la búsqueda del conocimiento.

A mi Padre que siempre fue un gran maestro, y me enseñó la virtud de la paciencia.

A mi Madre que me enseñó a tener la templanza necesaria para la vida y el nunca rendirse.

A mi Esposa que siempre me ha sido incondicional en las buenas y en las malas.

A mis Hermanas que me han acompañado y enseñado en la vida.

A la Universidad Autónoma de Querétaro que me dio la oportunidad de realizar mis estudios.

Al Instituto Mexicano del Transporte que me brindo gran apoyo y la oportunidad de realizar este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de sus estudios, así mismo al Instituto Mexicano del Transporte (IMT) por su disponibilidad en la asesoría y mediciones en campo.

Agradezco el apoyo brindado por el Gobierno del Estado de Querétaro, ofrecido por medio del Proyecto QRO-2012-C01-193364 de la Convocatoria FOMIX 2012-01: "Fortalecimiento a través de Laboratorios de la Maestría en Ciencias de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro".

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	15
1.2 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	15
<i>1.2.1 Hipótesis:.....</i>	15
<i>1.2.2 Objetivo General:.....</i>	15
<i>1.2.3 Objetivos Particulares:</i>	15
2. REVISIÓN LITERARIA.	16
2.1 Pavimento.	16
<i>2.1.1 Capas de un pavimento.....</i>	16
2.2 Tipos de pavimentos.....	17
<i>2.2.1 Pavimentos flexibles.....</i>	17
<i>2.2.2 Pavimentos Rígidos.....</i>	17
2.3 Aplicaciones de pavimentos continuos reforzados.	17
<i>2.3.1 Caso Bélgica.....</i>	18
<i>2.3.2 Caso E.U. (Rehabilitación).....</i>	18
<i>2.3.3 Caso México (Tramo experimental).....</i>	19
2.4 Filosofías de diseño para pavimentos rígidos.	20
<i>2.4.1 El método AASHTO para pavimentos rígidos.</i>	20
<i>2.4.2 Método de la PCA.....</i>	21
<i>2.4.3 Programa ME de diseño.</i>	22
<i>2.4.4 Filosofías de diseño con respecto al PCERC.....</i>	23
<i>2.4.5 Estándares de calidad de un pavimento.....</i>	25
2.5 Cargas de tránsito.....	26
<i>2.5.1 Análisis mecanísticos o estadísticos.</i>	26
<i>2.5.2 Soluciones cerradas.....</i>	28
<i>2.5.3 Cartas de Influencia.....</i>	29
<i>2.5.4 Elementos Finitos</i>	31

2.5.5	Obtención de deformaciones del tramo experimental por cargas de tránsito.....	31
2.6	Cargas por temperatura.	33
2.6.1	Perfil de temperatura en un pavimento.....	33
2.6.2	Deformación por temperatura.....	37
2.6.3	Obtención de deformaciones del tramo experimental por temperatura.....	41
2.7	Interacción suelo estructura.	45
2.7.1	Módulo de Resiliencia.....	45
2.7.2	Modelo MFE de interacción suelo estructura.....	46
3	METODOLOGÍA.....	47
3.1	Materiales.	47
3.1.1	Materiales pétreos.....	47
3.1.2	Cemento.....	48
3.1.3	Acero.	48
3.1.4	Concreto.....	50
3.2	Equipo.....	50
3.2.1	Extensómetro para acero / extensómetro para concreto – os3600.....	51
3.2.2	Sensor de Temperatura - os4350.....	51
3.2.3	Acelerómetro – os7100.....	52
3.2.4	Cable de fibra óptica Mono-modo.....	52
3.2.5	Tubería Galvanizada de 3 pulgadas.....	52
3.2.6	Conectores Lado A-B.....	52
3.2.7	Interrogador – sm130-500.....	53
	53
3.2.8	Software Enlight.....	53
3.3	Procedimiento.....	54
3.3.1	Descripción de la figura.....	55
3.3.2	P1. Construcción del Tramo experimental.....	56
3.3.3	P2. Instrumentación del Tramo.....	56

3.3.4	Revisión Bibliográfica.....	60
3.3.5	Monitoreo durante 24 horas.....	60
3.3.6	Análisis de datos experimentales.....	61
3.3.7	Creación y Calibración del modelo PCERC.....	64
4.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	66
4.1	Presentación de resultados por cagas de tránsito.....	66
4.2	Presentación de resultados por cagas de temperatura.....	70
4.3	Creación y calibración de modelo.....	80
4.4	Conclusiones.....	83
5	BIBLIOGRAFÍA.....	85
6	ANEXOS.....	88
	Anexo 1.- Curva granulometría de material pétreo.....	88
	Anexo 2.- Certificado de calidad del cemento.....	89
	Anexo 3.- Certificado de calidad del Acero.....	90
	Anexo 4.- Ensayo de cilindros de concreto.....	91
	Anexo 5.- Ficha técnica e extensómetro.....	92
	Anexo 6.- Ficha técnica de acelerómetro.....	93
	Anexo 7.- Ficha técnica sensor de temperatura.....	94
	Anexo 8.- Ficha técnica de interrogador.....	95
	Anexo 9.- Gráficas del valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el calentamiento y enfriamiento base hidráulica.....	96
	Anexo 10.- Gráficas del valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el calentamiento y enfriamiento base estabilizada.....	100
	Anexo12.- Gráficas Temperatura-Esfuerzo sobre base cementada.....	110
	Anexo 13.- Gráficas Temperatura-Esfuerzo sobre base cementada con grieta.....	116
	Anexo 14.- Valor promedio del esfuerzo por grado centígrado para el sensor.....	128

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1.- Acero mínimo para temperatura, (ACI, 1995).	23
Tabla 2.- Cuantía de acero del PCERC.	25
Tabla 3.- Días de los monitoreos.	61

ÍNDICE DE ECUACIONES.

Ecuación 1.- Número de ejes equivalentes, (AASHTO, 1993).	20
Ecuación 2.- Número de ejes equivalentes, (PCA, 1986).	21
Ecuación 3.- Erosión, (PCA, 1986).	21
Ecuación 4.- Ancho de Grieta, (ACI, 1995).	23
Ecuación 5.- Cuantía de acero,(NTC-RCDF,2004).	24
Ecuación 6.- Número de repeticiones, (Salazar, 1998).	27
Ecuación 7.- Esfuerzo a flexión en la losa, (Salazar, 1998).	27
Ecuación 8.- Módulo de ruptura, (Salazar, 1998).	28
Ecuación 9.- Esfuerzo según Westergaard.	28
Ecuación 10.- Radio de rigidez relativa.	28
Ecuación 11.- Módulo de ruptura, (Shielder y Childs).	29
Ecuación 12.- Módulo de ruptura, (D.J. McNeely y S.D. Lash).	29
Ecuación 13.- Módulo de Elasticidad.	29
Ecuación 14.- Radio de rigidez Relativa.	30
Ecuación 15.- Esfuerzo en función de la deformación y Módulo de elasticidad.....	31
Ecuación 16.- Obtención de la temperatura media (Maitra, et al., 2013).	35
Ecuación 17.- Superficie de temperaturas del 15 de Abril del 2015.	36
Ecuación 18.- Cálculo del cociente de deformación axial (Mohamed y Hansen, 1995)...	37
Ecuación 19.- Cálculo de la deformación axial (Pane, et al., 1998).	38
Ecuación 20.- Temperatura (Liu y Fwa, 2003).	38
Ecuación 21.- Temperatura axial (Liu y Fwa, 2003).	38
Ecuación 22.- Cálculo de la deformación axial (Mohamed & Hansen, 1995).	39
Ecuación 23.- Cálculo del de deformación lineal (Pane, et al., 1998).	39
Ecuación 24.- Cálculo del de deformación lineal (Liu & Fwa, 2003).	40
Ecuación 25.- Cálculo de la temperatura lineal (Liu & Fwa, 2003).	40
Ecuación 26.- Cálculo del de deformación no lineal (Pane, et al., 1998).	40
Ecuación 27.- Cálculo de la temperatura no lineal (Liu & Fwa, 2003).	40
Ecuación 28.- Esfuerzo en función de la deformación y Módulo de elasticidad.....	42
Ecuación 29.- Módulo de Resiliencia.	45
Ecuación 30.- Modelo Winlker (Aristizábal, 2000).	46

ÍNDICE DE FIGURAS.

FIGURA 1.- Sección transversal de la junta entre PCERC y Pavimento existente. (J. A. Gómez, Reporte interno).	13
FIGURA 2.- Ubicación de los sensores en concreto dentro del tramo carretero experimental.	14
FIGURA 3.- Prueba de tres puntos.	27
FIGURA 4.- Carta de influencia (Pickett y Ray, 1951).	30
FIGURA 5.- Análisis de carga de tránsito en sensor CHBL1 15 de Abril del 2013 en calentamiento.	32
FIGURA 6.- Esfuerzo/C°, en sensor CHBL1 (calentamiento).	32
FIGURA 7.- Perfil de temperatura (Quintana, et al., 2013).	33
FIGURA 8.- Registro de las microdeformaciones de una carga viva con peso conocido a diferentes temperaturas (sensor CH1BL) (Quintana, et al., 2013).	34
FIGURA 9.- Perfil de temperatura (Maitra, et al., 2013).	34
FIGURA 10.- Experimento para obtención de Perfil de temperatura (Maitra, et al., 2013).	35
FIGURA 11.- Esquema de la obtención de perfil de temperatura en tres puntos (Maitra, et al., 2013).	35
FIGURA 12.- Superficie de temperatura del 15 de Abril del 2015.	37
FIGURA 13.- Rangos producidos por las desviaciones estándar.	41
FIGURA 14.- Ciclo de deformaciones del sensor de concreto C157623 del día 15 de Abril del 2013.	42
FIGURA 15.- Esfuerzos en los diferentes monitoreos del sensor de concreto CH1BT.	43
FIGURA 16.- Esfuerzo/C°, en sensor colocado en Concreto en dirección longitudinal sobre la base hidráulica.	44
FIGURA 17.- Sección de pavimento existente (Gómez, 2013).	47
FIGURA 18.- Sección de PCERC (Gómez, 2013).	48
FIGURA 19.- Mallas del PCERC (Gómez, 2013).	49
FIGURA 20.- Resistencia promedio de los cilindros.	50
FIGURA 21.- Extensómetro de concreto y acero.	51
FIGURA 22.- Sensor de temperatura.	51
FIGURA 23.- Acelerómetro.	52
FIGURA 24.- Tubería Galvanizada.	52
FIGURA 25.- Conector.	52
FIGURA 26.- Interrogador sm130-500.	53
FIGURA 27.- Procedimiento.	54
FIGURA 28.- Sección a instrumentar que comprende al tramo experimental PCERC.	57
FIGURA 29.- Distribución de extensómetros en la losa de concreto PCERC.	58
FIGURA 30.- Distribución de los sensores de temperatura en la losa de concreto PCERC.	58
FIGURA 31.- Plano que correlaciona la posición de los extensómetros en bloque de PCERC.	59
FIGURA 32.- Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el calentamiento del sistema en el sensor CH1BL.	66
FIGURA 33.- Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el enfriamiento del sistema en el sensor CH1BL.	67

FIGURA 34.- Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el calentamiento del sistema en el sensor AH1BL.....	67
FIGURA 35.- Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el enfriamiento del sistema en el sensor AH1BL.....	68
FIGURA 36.- Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el calentamiento del sistema en el sensor CE1BL.....	68
FIGURA 37.- Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el enfriamiento del sistema en el sensor CE1BL.....	69
FIGURA 38.- Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el calentamiento del sistema en el sensor AE1BL.....	69
FIGURA 39.- Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el enfriamiento del sistema en el sensor AE1BL.....	70
FIGURA 40.- Esfuerzo Temperatura CH1BL.....	71
FIGURA 41.- Esfuerzo Temperatura CH2BT.....	71
FIGURA 42.- Esfuerzo Temperatura CH3BL.....	72
FIGURA 43.- Esfuerzo Temperatura CE1BL.....	73
FIGURA 44.- Esfuerzo Temperatura CE2BT.....	73
FIGURA 45.- Esfuerzo Temperatura CE3BL.....	74
FIGURA 46.- Esfuerzo Temperatura AH1BL.....	74
FIGURA 47.- Esfuerzo Temperatura AH2BT.....	75
FIGURA 48.- Esfuerzo Temperatura AH3BL.....	75
FIGURA 49.- Esfuerzo Temperatura AE1BL.....	76
FIGURA 50.- Esfuerzo Temperatura AE2BT.....	77
FIGURA 51.- Esfuerzo Temperatura AEB3L.....	77
FIGURA 52.- Valor promedio del esfuerzo por grado centígrado para el sensor CHB1L.....	78
FIGURA 53.- Valor promedio del esfuerzo por grado centígrado para el sensor AHB1L.....	78
FIGURA 54.- Valor promedio del esfuerzo por grado centígrado para el sensor CEB1L.....	79
FIGURA 55.- Valor promedio del esfuerzo por grado centígrado para el sensor AEB1L.....	79
FIGURA 56.- Modelación del Sensor CH1BL.....	80
FIGURA 57.- Modelación del Sensor CE1BL.....	81
FIGURA 58.- Modelación del Sensor CH2BT.....	81
FIGURA 59.- Modelación del Sensor CE2BT.....	82
FIGURA 60.- Modelación del Sensor CH3BL.....	82
FIGURA 61.- Modelación del Sensor CE3BL.....	83

1. 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 a 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 se establece que en México existen 3,097.09 km de carreteras de pavimentos rígidos. (SCT y GITS, 2008).

Si bien el sistema JPCP ha tenido un desempeño estructural aceptable, es importante evaluar otras alternativas 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 se deben apoyar con la finalidad de obtener mejor 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 cual es definido por AASHTO (1993) como más de 50,000 ejes equivalentes diarios de 18 Kips, es el sistema de Pavimento de Concreto Estructuralmente Reforzado Continuo (PCERC), que 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 como se observa en la figura 1, cuya finalidad es obtener un sistema de desempeño similar o mejor a un menor costo.

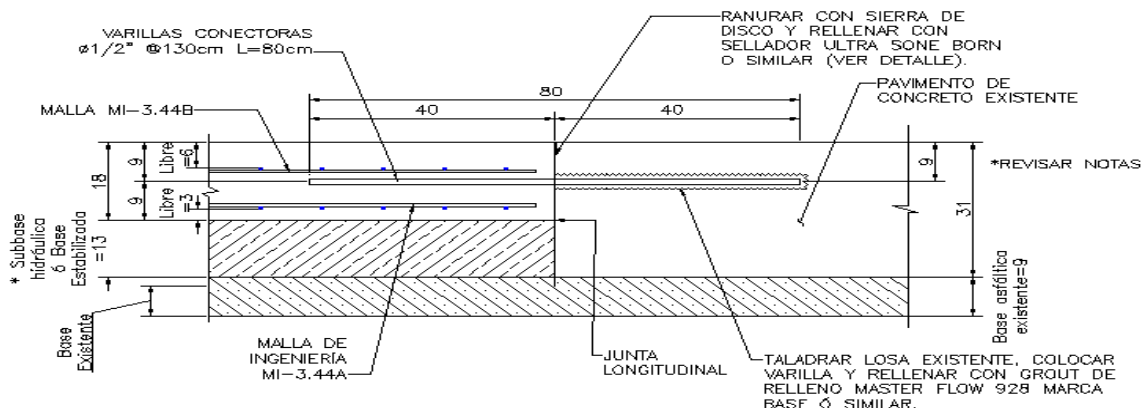


FIGURA 1.- Sección transversal de la junta entre PCERC y Pavimento existente. (J. A. Gómez, Reporte interno).

Para evaluar el desempeño estructural de este sistema se propuso 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 se colocó 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 la siguiente manera (figura 2): 2 acelerómetros colocados sobre la rodadura del lado derecho del conductor, uno para la base hidráulica y otro para la base estabilizada, 5 sensores de temperatura colocados en la base estabilizada a cada 3 cm respecto al espesor del sistema (3cm, 6cm, 9cm, 12cm y 15 cm), dos arreglos de seis sensores de deformación:

dos sensores en la dirección longitudinal sobre la rodera, 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 se indujo una grieta en la base estabilizada en el km 166+150, sobre este tramo se colocó un arreglo de 15 sensores: 6 para medir las deformaciones longitudinales y transversales del concreto y 9 para medir las deformaciones longitudinales y transversales del acero (J. A. Gómez, datos sin publicar).

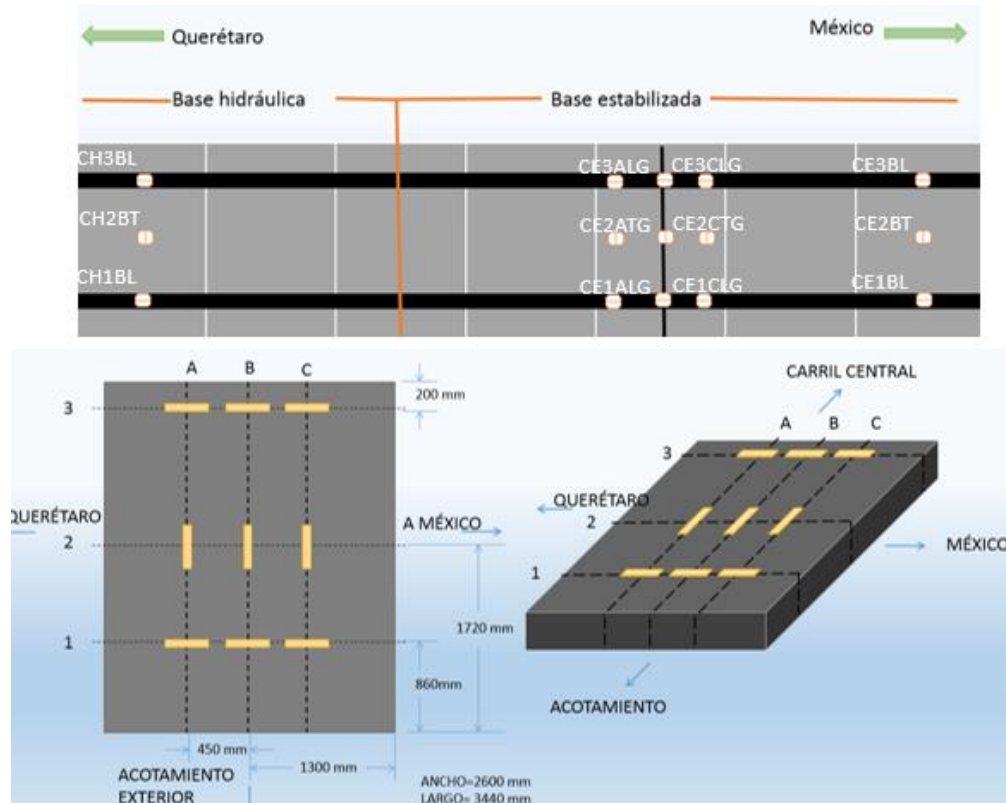


FIGURA 2.- Ubicación de los sensores en concreto dentro del tramo carretero experimental.

El tramo carretero experimental fue instrumentado en el año de 2011, desde entonces se ha monitoreado periódicamente considerando diferentes condiciones ambientales y de tráfico, 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 se obtienen mediciones de compresión tanto en los sensores colocados en el acero, como en el concreto (Quintana et al., 2013).

1.1 JUSTIFICACIÓN.

La necesidad de crear nuevas alternativas de pavimentos con la capacidad de soportar un creciente volumen de tráfico y un mayor peso bruto vehicular, lleva a la búsqueda y generación de nuevos sistemas de pavimentos que promueven la competitividad con los diseños actualmente empleados con el objetivo de disminuir el costo inicial y de mantenimiento (Ryu et al., 2013), sin perder de vista las condiciones de calidad estandarizadas (Índice internacional de rugosidad, mapeo de grietas, ancho de grieta y coeficiente de transferencia de carga).

Los sistemas tradicionales y los propuestos requieren de un análisis exhaustivo de las variables: temperatura, interacción de bases, humedad, tipo de cargas, drenaje, etc., con la finalidad de ir propiciando mejoras, que se vean reflejadas en nuevas versiones de pavimentos (Rens, 2005).

1.2 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.

1.2.1 *Hipótesis:*

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).

1.2.2 *Objetivo General:*

Analizar y evaluar los efectos de la temperatura e interacción con las bases (hidráulica y cementada) en la degradación de un Pavimento de Concreto Estructuralmente Reforzado Continuo (PCERC) a través de la información experimental de sensores de fibra óptica instalados en un tramo carretero de la autopista México-Querétaro entre el km 166+000 y 166+300 y un modelo de elemento Finito.

1.2.3 *Objetivos Particulares:*

- Analizar y evaluar la respuesta del PCERC durante ciclos de enfriamiento y calentamiento mediante el monitoreo continuo con diferentes condiciones ambientales durante mediciones de 24 horas.
- Analizar los efectos de la temperatura en el incremento y decremento de los esfuerzos provocados por cargas vivas, mediante información experimental obtenida de los sensores de fibra óptica instalados en el tramo experimental.
- Analizar y evaluar 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.
- Analizar la interacción del PCERC en función de la temperatura y el tipo de base, hidráulica o cementada.

- Corroborar las mediciones experimentales mediante simulación por elemento finito.

2. REVISIÓN LITERARIA.

2.1 Pavimento.

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

En México se cuenta 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 & GITS, 2008).

2.1.1 Capas de un pavimento.

Los pavimentos son sistemas diseñados por capas, cuya calidad del material es ascendente, por lo que es importante conocer las características de éstas.

Capa de subrasante.

Esta capa es la más ancha y es una capa 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 se puede utilizar el material producto del corte o bien material con mejor calidad, pero con una adecuada compactación.

Capa sub-base.

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, por ejemplo los pavimentos flexibles. Normalmente la sub-base se construye para lograr espesores menores de la capa de base. En el caso de pavimentos de concreto, frecuentemente resulta conveniente colocar una capa de sub-base cuando las especificaciones para pavimentos son más exigentes.

Base.

Constituye la capa intermedia entre la capa de rodamiento y la sub-base. Generalmente se usa en los pavimentos flexibles y se compone 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 la función de 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.

2.2 Tipos de pavimentos.

2.2.1 Pavimentos flexibles.

Son aquellos construidos con material asfáltico y material pétreo, son una alternativa para caminos con 10 mil, 30 mil y 50 mil vehículos diarios. Su sección está constituida por capas que mejoran su calidad de abajo hacia arriba y su geometría se basa 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.

2.2.2 Pavimentos Rígidos.

Son aquellos construidos con cemento Portland y materiales granulares, cubren tránsitos de 5 mil hasta más de 50 mil vehículos diarios de todos los tipos y ambas direcciones. En todos los casos se considera una tasa de crecimiento de tránsito de 3% anual y se utilizan concretos de 300 kg/cm² de módulo de ruptura a la tensión por flexión. Se compone de una losa de concreto apoyada en una base de 15 a 20 cm con un Valor Relativo de Soporte (VRS) de 50%.

Pavimentos rígidos con juntas.

El pavimento rígido con juntas o Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP), son los más usados y cuya característica distintiva es el uso de juntas, las cuales se interconectan por medio de barras de unión que son 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 función de disipar los esfuerzos laterales provocados por alabeo térmico. Este tipo de pavimentos tienen 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 (Garnica et al., 2002).

Pavimentos rígidos continuos reforzados.

El Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP) se ha utilizado en varios países con una reducción empírica del espesor de losa que va desde los 2.5 cm hasta los 5 cm. Se ha observado en los CRCP la aparición de grietas uniformemente espaciadas debido a los esfuerzos térmicos, sin embargo estas grietas pueden ser controladas con el espaciamiento entre los elementos de refuerzo.

2.3 Aplicaciones de pavimentos continuos reforzados.

Los casos más relevantes en diferentes países de la aplicación de pavimentos continuos reforzados son los siguientes:

2.3.1 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 70 hasta la actualidad.

Un aspecto importante es que se hicieron 2 tipos de diseños básicos: el primero consiste en una capa base seguida de una capa de bituminoso más una capa de Pavimento de Concreto Reforzado Continuo (CRCP) y el segundo diseño es similar con excepción de no contar con la capa de bituminoso.

Los hallazgos encontrados 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 hasta 80 cm a 1 metro de espaciamiento para el segundo tipo, aunado a esto se encontró 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 presentado el agrietamiento ya mencionado.

Otro aspecto importante es el hecho de que analizando la interacción entre capas se hace notar una mayor erosión de la capa base del pavimento que no cuenta con el material bituminoso. En la actualidad se generaliza este tipo de pavimentos con la utilización de una capa bituminosa de 23 cm de espesor y un área de acero del 0.76% del área de pavimento CRCP (Rens, 2005).

2.3.2 Caso E.U. (Rehabilitación).

La rehabilitación se llevó a cabo con un sistema similar al PCERC y al CRCP, llamado Continuously Reinforced Bonded Concrete Overlay (CRBCO) el cual consiste en adicionar una capa superior a un pavimento ya existente de JPCP con las características de diseño estipuladas por AASHTO 93 y los lineamientos de refuerzo proporcionados por el Texas Department of Transportation (TxDOT), que consisten en un 0.65% de área de acero del total del área de sección.

El armado utilizado está al centro del peralte, con una malla en el área de las juntas del JPCP, y se emplearon ganchos con cemento epóxido para la unión de ambas capas, este diseño proviene de análisis empíricos y relacionados con la práctica.

Los resultados obtenidos hablan de un mejor comportamiento del pavimento CRBCO, con espaciamientos de grietas superiores a 1.5 m, las cuales son normales en un CRCP. Se espera que el sistema pueda cumplir con el aumento de tráfico programado, además de que sea una solución a largo plazo evitando 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.

Se instrumentó el CRBCO con la finalidad de monitorear el comportamiento del pavimento con sensores puestos en el fondo del mismo, observando un ciclo térmico en el

cual 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 logró observar 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 la grieta produce, teniendo la función de una junta térmica.

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 (Ryu, et al., 2013).

2.3.3 Caso México (Tramo experimental).

EL PCERC ya se ha 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 cual se analizó el desempeño estructural del PCERC en un corto plazo (Treviño y Olivares, 2006).

Se realizó un proyecto de investigación sobre pavimento de concreto reforzado estructuralmente con mallas electro-soldadas de acero laminado en frío, instalado en la ciudad de Zacatecas, con el objeto 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 se realizó con una losa localizada en la parte media del tramo experimental, de 7m por 15m. Se monitoreó internamente con 35 deformímetros eléctricos adheridos al acero de refuerzo, 12 deformímetros embebidos en el concreto y 10 sensores de temperatura.

Se corroboraron los datos obtenidos por medio de un modelo en Sap- 2000 cuyo diseño 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 a 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 de cinco a seis veces y la función del acero de refuerzo será fundamental para mantener unido al sistema.

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.

2.4 Filosofías de diseño para pavimentos rígidos.

2.4.1 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 una proyección en el tiempo de los vehículos esperados de acuerdo con una tasa de incremento de flujo vehicular, sin embargo este análisis se hace de forma empirista y relacionando 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 haciendo énfasis en el parámetro de número de ejes equivalentes, siendo éste 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 cual debe hacer uso de una serie de monogramas y de 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.

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

Ecuación 1.- Número de ejes equivalentes, (AASHTO, 1993).

Donde:

W_{18} =Número de ejes equivalentes diarios.

z_r =Desviación Normal Estándar en función de la confiabilidad.

S_0 = Erro estándar combinado en función de la confiabilidad.

D = Espesor.

ΔPSI = Serviciabilidad.

Pt = Serviciabilidad final.

$S'c$ = Módulo de ruptura.

C_d = Coeficiente de drenaje.

J = Módulo de transferencia de carga.

E_c = Módulo de elasticidad.

k = 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 menores 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.

2.4.2 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 número de ciclos de carga de los ejes equivalentes que es capaz de resistir el pavimento.

Este método se basa en la siguiente ecuación:

$$\text{Log } N = 14.524 - 6.777(C_1 P - 9.0)^{0.103}$$

Ecuación 2.- Número de ejes equivalentes, (PCA, 1986).

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.

$\rho = kw$ = caso de cimentación líquida (Winkler).

h = espesor de la losa en pulgadas.

k = módulo de reacción del apoyo, en lb/plug³.

C_1 = 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.

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

Ecuación 3.- Erosión, (PCA, 1986).

Donde:

C_2 = 0.06 pavimento sin acotamientos.

$C_2 = 0.94$ pavimentos con acotamientos sujetos.

Esencialmente el método maneja dos criterios:

- Criterio por Fatiga: Se utiliza para mantener los esfuerzos inducidos a la losa de concreto en límites aceptables.
- Criterio por erosión: Para limitar los efectos de la deflexión del pavimento en las zonas críticas, orilla y esquinas, inducida por erosionabilidad de la capa de apoyo en esquinas y orillas. Este enfoque también se introduce para limitar problemas de fracturamiento en zona de juntas, especialmente en pavimentos sin pasa juntas.

2.4.3 Programa ME de diseño.

La base del cálculo de este software es el proceso AASHTO, por lo que se le denomina como Método Empírico mecanizado (ME), que tiene al igual que el método AASHTO (1993) como principales componentes el tráfico, 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:

AASHTO (1993) utiliza como parámetro de tráfico, el tráfico diario medio anual para determinar el número de ejes equivalentes mientras que 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 se toma en cuenta como parte esencial para el cálculo de los perfiles de temperatura. Dichos parámetros pueden ser ingresados manualmente o utilizar 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 el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) y el despostillamiento simulado, que a su vez son parámetros de comparación que están asociados a la calidad requerida según el tipo de vía.

Refuerzo de Acero:

Este parámetro consiste en agregar un área de acero y su ubicación en el sistema propuesto, esto permite simular los efectos que tiene el acero en el IRI y en el despostillamiento.

Coefficiente térmico del concreto:

Si bien este es un parámetro para medir directamente las dilataciones, el programa lo considera en función del agregado utilizado.

Tipo y ancho de hombro:

Esto está relacionado con el golpeteo que se presenta en la 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.

2.4.4 Filosofías de diseño con respecto al PCERC.

Si bien AASHTO 93, minimiza los efectos del acero de refuerzo limitándolos sólo 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, relacionando estos solo con la época del año en que fue construido el pavimento (FHWA, 2013).

Mientras que en estudios como los de Qin yHiller (2011), han determinado 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 éstos provocan y 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 losas que a su vez genera golpeteos, por lo que una posible solución para evitar golpeteos es la generación de pavimentos continuos, sin embargo la falta de juntas térmicas provoca agrietamientos, los cuales se pueden controlar con la incorporación de barras de acero, que tienen la facultad de absorber el esfuerzo generado a tensión originado por gradientes térmicos y el peso propio de la losa.

Análisis del porcentaje de Acero del PCERC.

Algunos de los análisis permiten controlar el agrietamiento por medio de la relación entre cuantía de acero y el ancho de agrietamiento, como se observa en la siguiente expresión (ACI, 1995):

$$w = 0.10f_s \sqrt[3]{dcA10^{-3}}$$

Ecuación 4.- Ancho de Grieta, (ACI, 1995).

Donde:

W=Ancho de grieta en (pulg).

fs = 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 x 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).

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

Tabla 1.- Acero mínimo para temperatura, (ACI, 1995).

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. establecen la siguiente formulación para una cuantía de acero capaz de controlar las grietas:

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

Ecuación 5.- Cuantía de acero, (NTC-RCDF, 2004).

Donde:

a_{s1} = área transversal del refuerzo colocado en la dirección que se considera, por unidad de ancho de la pieza (cm^2/cm).

x_1 = dimensión mínima del miembro medida perpendicularmente al refuerzo, mm (cm).

Si x_1 no excede de 150 mm, el refuerzo se puede colocar 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 $3.5 x_1$.

Dentro de esta normativa se establece que cuando la losa tenga características especialmente críticas se debe 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 cual establece una cuantía de acero de por lo menos 0.003 del área transversal y una separación 30 cm como mínimo, esta cuantía puede ser distribuida en varios lechos.

En la propuesta de pavimento del PCERC para este estudio la cuantía de acero se encuentra distribuida en dos mallas como se muestra en la tabla 2.

Cuantías de acero de refuerzo en pavimento PCERC							
Sentido	Ancho sección transversal (m)	Área transversal (cm²)	No. de barras	Diám. de barra	Área por barra (cm²)	Área total de acero (cm²)	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

Cuantías de acero de refuerzo en pavimento PCERC							
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

Tabla 2.- Cuantía de acero del PCERC.

De los datos de las tablas se puede observar que se cumplen 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 llevar el agrietamiento a límites “más aceptables” son necesarias cuantías mínimas de 0.60%.

Por lo que se puede observar que es necesario replantear el modelo del PCERC, sin embargo, se tendría que hacer una valoración del costo-beneficio del sistema debido a que se incrementarán las áreas de acero

2.4.5 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 indicadores de calidad más usados en los pavimentos ya que refleja una gran cantidad de características de operación, como son la velocidad de tránsito, la confortabilidad del usuario y la calidad de la superficie de rodamiento, aunado a esto es uno de los principales criterios de aceptación y rechazo de un pavimento.

Según Akhter, et al. (2007) la tasa de degradación del IRI se ve afectada por los parámetros iniciales tales como el módulo de ruptura, el tipo de material de la base y el valor inicial del IRI.

Mapeo de Grietas.

Es una característica que ofrece una visión del comportamiento estructural de los pavimentos, además es indicativo de la capacidad de resistencia del sistema, sin embargo, en el caso particular de los pavimentos continuos reforzados las cargas por temperatura son controladas por el agrietamiento transversal y el refuerzo de acero sigue permitiendo una transferencia adecuada de carga sin verse afectada por estas grietas (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 unidas por una grieta longitudinal (Choi, et al., 2011).

Won (2011) encontró por medio de la extracción de núcleos que las grietas longitudinales que están ubicadas en la zona del acero longitudinal de pavimentos reforzados continuos, no llegan hasta la zona del acero, y que el núcleo es sólido en la parte inferior. Asimismo no encontró un núcleo que fuese atravesado por una grieta del lecho inferior hasta el superior.

También observó que la mayoría de los hundimientos y baches son provocados por la erosión del hombro, sin embargo en las bases estabilizadas no se tiene esta erosión. Por lo que se concluyó que la mayoría de los hundimientos no son a causa de deficiencias estructurales del CRCP sino que son ocasionados por socavación que produce una deflexión excesiva.

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 del año), de acuerdo con la Federal Highway Administration (FHWA). Este índice es esencial 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 y encontró que el LTE varía en función de la temperatura, dicho así a mayor temperatura mayor LTE y a menor temperatura menor LTE, lo que explica por qué la función LTE de la FHWA pierde validez en climas extremos o que no van de acuerdo con la media nacional.

2.5 Cargas de tránsito.

2.5.1 Análisis mecánicos o estadísticos.

Según Salazar (1998) el factor de las cargas de tránsito es el más importante en el diseño de pavimentos. El aspecto del tránsito debe considerar tanto la geometría de las cargas o la configuración de vehículos, así como la distribución estadística e intensidad de cargas.

En el análisis mecánico AASHTO (1993) y Portland Cement Association (1984), es relativamente común asociar el daño por fatiga y el agrietamiento producidos por el tránsito, éstos a su vez son caracterizados por medio del módulo de ruptura.

El tránsito y el daño por fatiga se simulan a través 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 se muestra en la figura 3.

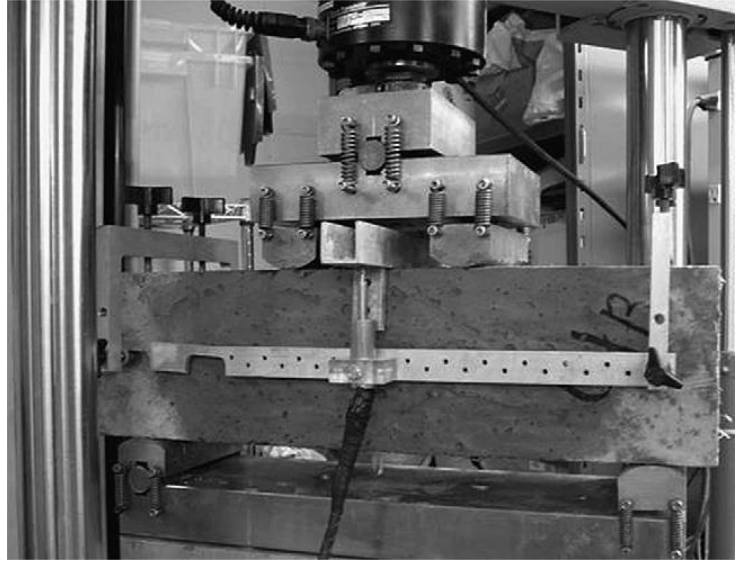


FIGURA 3.- Prueba de tres puntos.

Se puede obtener el número de repeticiones con la siguiente ecuación:

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

Ecuación 6.- Número de repeticiones, (Salazar, 1998).

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.

$$\sigma = \frac{3 a P}{b h^2}$$

Ecuación 7.- Esfuerzo a flexión en la losa, (Salazar, 1998).

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 permite el cálculo de espesor de la losa a (Altoubat et al., 2008).

$$M_r = \frac{P L}{b h^2}$$

Ecuación 8.- Módulo de ruptura, (Salazar, 1998).

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.

2.5.2 Soluciones cerradas.

Las fórmulas de soluciones cerradas (principalmente los trabajos de Westergaard), se aplican sólo a una carga producida por una rueda cuya área de contacto puede tener una configuración circular, semicircular, elíptica o semielíptica.

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

Ecuación 9.- Esfuerzo según Westergaard.

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.

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

Ecuación 10.- Radio de rigidez relativa.

Donde:

E=Módulo de elasticidad.

u=Relación de Poisson.

k =Módulo de reacción.

2.5.3 **Cartas de Influencia.**

Fueron desarrolladas por Picket y Ray. Con ellas se puede aplicar una configuración de una o varias llantas.

Este método fue utilizado por la empresa DEACERO para el diseño del pavimento en estudio, emplearon una variante del método de diseño Brasileño (Firme y Rocha, 1997) utilizado para pavimentos de concreto reforzado. El método de diseño empleado está basado en monogramas para la obtención de momentos flexionantes en la losa de diseño y en base a estos valores se calcula el contenido de acero estructural y por temperatura requerido.

Es un método gráfico en el que se determinan los momentos actuantes en la losa de acuerdo al 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 líquido denso. Una vez que se conocen los momentos positivos actuantes 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 despreciables y pueden ser contrarrestados por el propio peso del concreto.

El método requiere de los siguientes pasos:

Cálculo de las propiedades elásticas del concreto.

Se asumió un módulo de ruptura del concreto (MR) y a partir de este valor se obtuvo su resistencia a la compresión ($f'c$) usando el valor más crítico de entre las ecuaciones 11 y 12:

$$MR = 2.19\sqrt{f'c}$$

Ecuación 11.- Módulo de ruptura, (Shielder y Childs).

$$MR = 0.13\sqrt{f'c}$$

Ecuación 12.- Módulo de ruptura, (D.J. McNeely y S.D. Lash).

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

$$E_c = 15100\sqrt{f'c}$$

Ecuación 13.- Módulo de Elasticidad.

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

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

Ecuación 14.- Radio de rigidez Relativa.

Donde:

N= Valor obtenido de gráficamente de la carta de influencia (Figura 4)

p= Presión de inflado de la llanta de diseño

I= Radio de rigidez relativa.

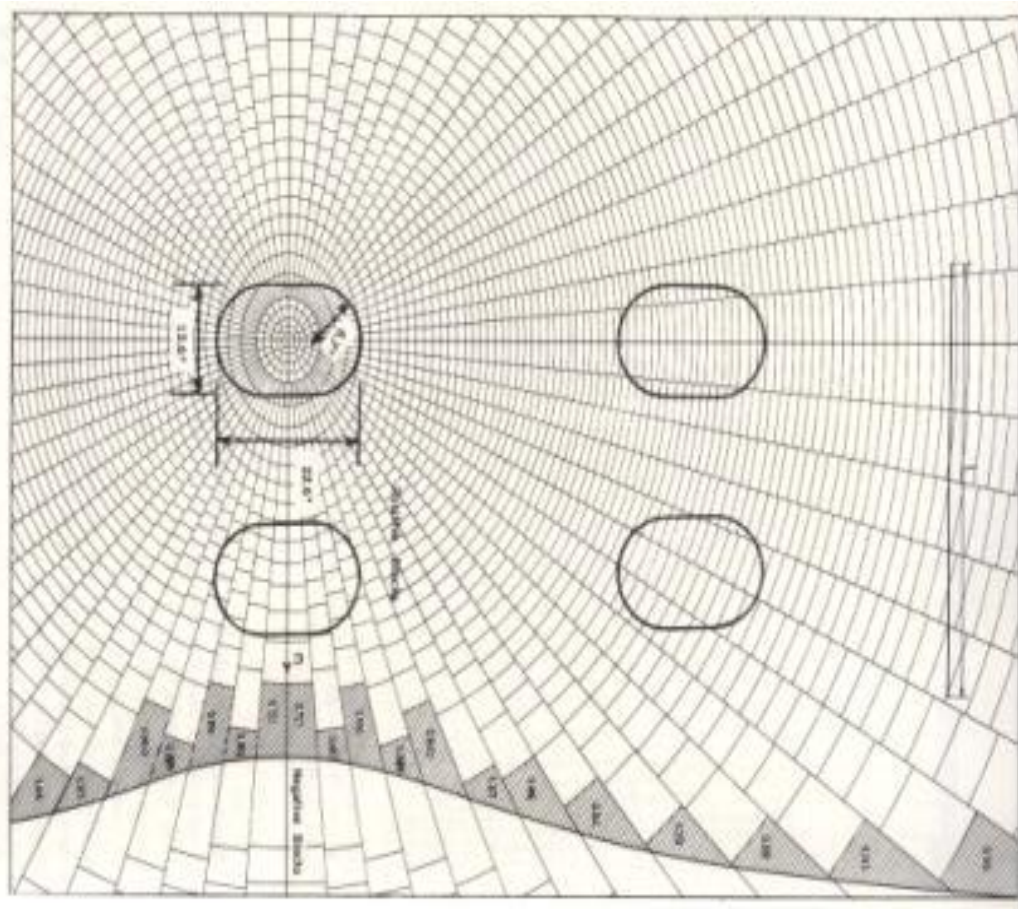


FIGURA 4.- Carta de influencia (Pickett y Ray, 1951).

Los momentos de interior (Mi) y de borde (Mb) fueron calculados y dichos valores se emplearon para el diseño del contenido de acero de refuerzo por flexión (lecho inferior) y por efectos de temperatura (lecho superior).

Algunas ventajas del empleo de este método son:

- Es un método sencillo de aplicar y que requiere un mínimo de parámetros de entrada de diseño.
- Se puede usar principalmente para diseños de pavimentos rígidos en zonas donde el tránsito pesado es limitado, como lo pueden ser zonas urbanas residenciales
- Puede servir de manera de diseño preliminar cuando no se tienen mayores datos acerca de los materiales a emplear y del grado de confiabilidad del diseño requerido.

2.5.4 Elementos Finitos

Este enfoque es más razonable en los casos en que se analice una serie de capas apoyadas en una superficie líquida o de Winkler. El apoyo "líquido" de las losas se puede asemejar a una serie de resortes independientes entre sí. De esta manera, las deflexiones en un punto, debido a las cargas aplicadas en él, serán sólo función directa a ésta última e independiente a las fuerzas aplicadas en otros puntos.

2.5.5 Obtención de deformaciones del tramo experimental por cargas de tránsito.

Para llevar a cabo la obtención de las deformaciones del tramo experimental, se procede a la discriminación de las deformaciones obtenidas por cargas de tránsito y de las provocadas por temperatura, por lo que con el total de los datos obtenidos en los monitoreos de 24 horas, se tomaran los datos de cada archivo con duración de 2 minutos, posteriormente 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 2.5 desviaciones estándar entonces se considera que es provocada por una carga de tránsito y se almacena en un vector que contenga estas mediciones a lo largo de todo el día. Este vector se convierte a esfuerzo por medio de la ecuación 15.

$$\sigma = E\varepsilon$$

Ecuación 15.- Esfuerzo en función de la deformación y Módulo de elasticidad.

Donde:

σ = Esfuerzo

E= Módulo de elasticidad

ε = Deformación

Por medio de un análisis estadístico de cada vector resultado a lo largo del día de monitoreo, se busca una distribución de frecuencias que tengan mayor coincidencia en los diferentes días del monitoreo, para posteriormente obtener la media de cada día. (Figura 5)

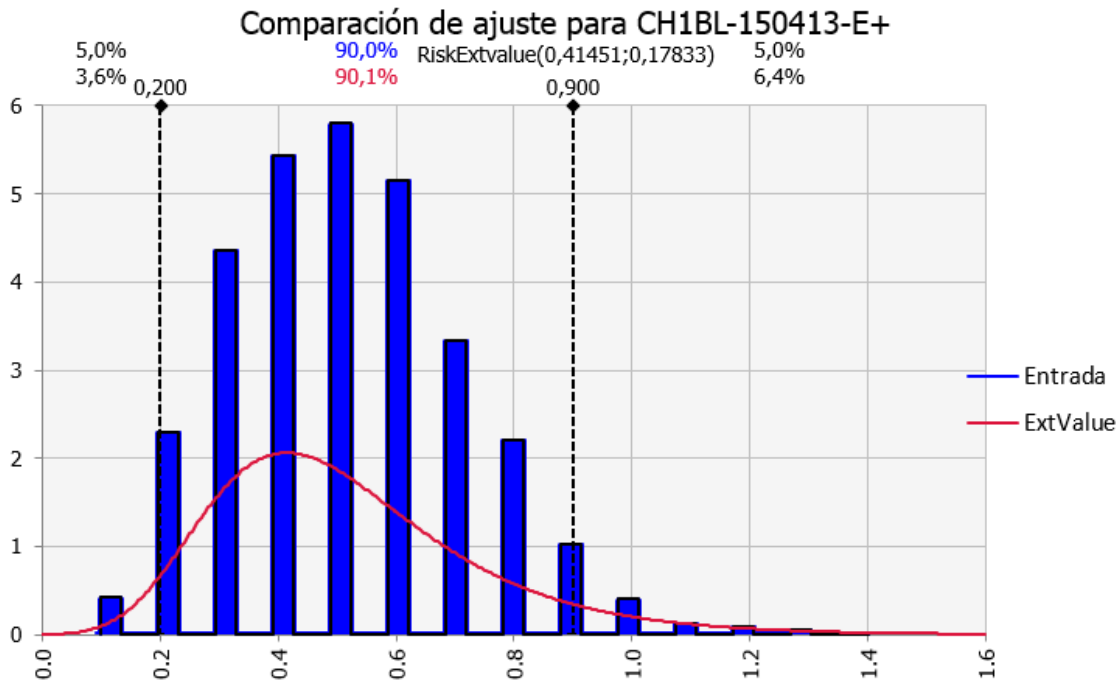


FIGURA 5.- Análisis de carga de tránsito en sensor CHBL1 15 de Abril del 2013 en calentamiento.

Una vez obtenida la distribución estadística que mejor ajuste presente en el transcurso de las diferentes mediciones, se procede al cálculo de la media de cada día a analizar y se condensan en la figura 6, en la que se observa el comportamiento de las cargas por tránsito a lo largo del tiempo del monitoreo.

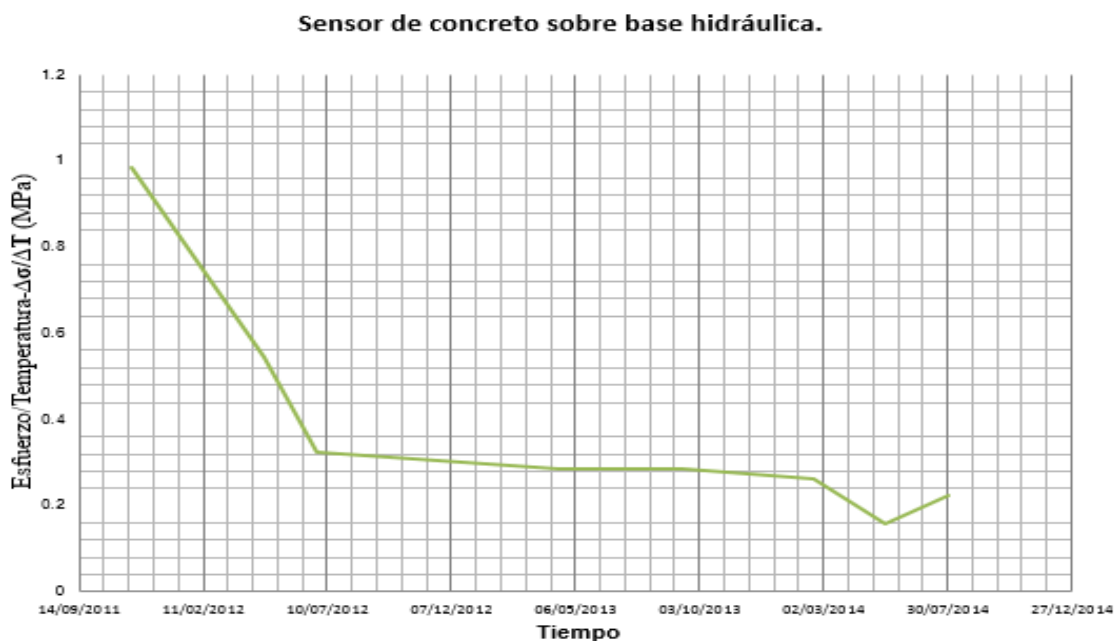


FIGURA 6.- Esfuerzo/ C° , en sensor CHBL1 (calentamiento).

2.6 Cargas por temperatura.

2.6.1 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 diferentes tiempos, 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 a considerar según Balbo y Severi (2007), son que la variación de la temperatura entre la temperatura ambiente y la temperatura de la losa llega a ser de 10°C , también se realizó una comparación entre medidas al borde de la losa y al centro y se encontró que realmente no tienen una diferencia significativa.

En el caso del pavimento en estudio en el 2011 se observó durante todo el día, 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 que va desde 1 hasta más de 8 grados centígrados.

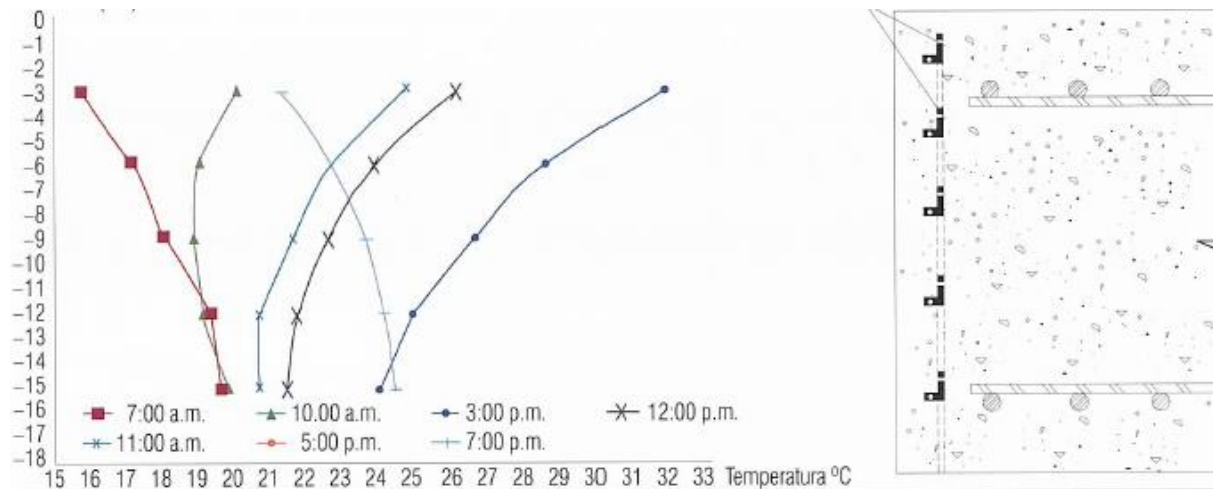


FIGURA 7.- Perfil de temperatura (Quintana, et al., 2013).

En la figura 7 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 temperatura y se cambien por completo los gradientes térmicos entre 9 am y 11 am. (Quintana, et al., 2013)

Una consecuencia de estos cambios térmicos en el comportamiento del PCERC es que durante el día la magnitud de las deformaciones registradas en el concreto no es igual ante el efecto de la misma carga. Para corroborar este efecto, se hizo circular un vehículo T3-S2 a diferentes horas del día y se observó la diferencia en las magnitudes de las deformaciones unitarias bajo estos escenarios.

En la gráfica 8 se registran los cambios de magnitud de las microdeformaciones y se observan variaciones del orden del 300 por ciento.

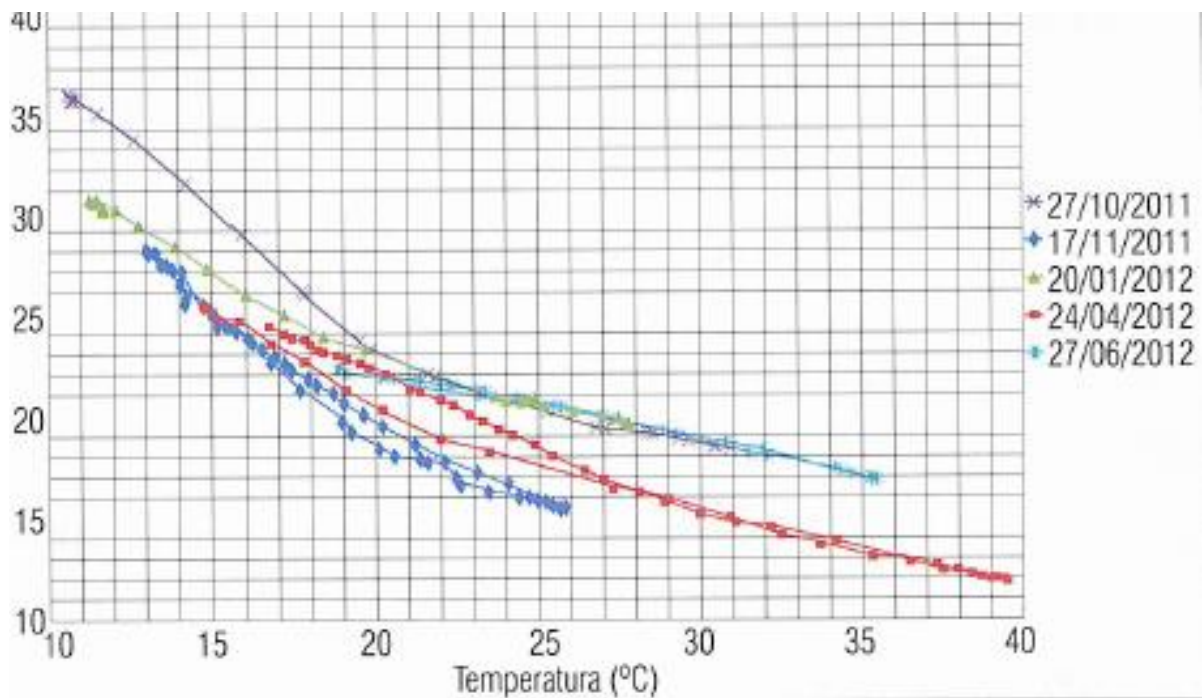


FIGURA 8.- Registro de las microdeformaciones de una carga viva con peso conocido a diferentes temperaturas (sensor CH1BL) (Quintana, et al., 2013).

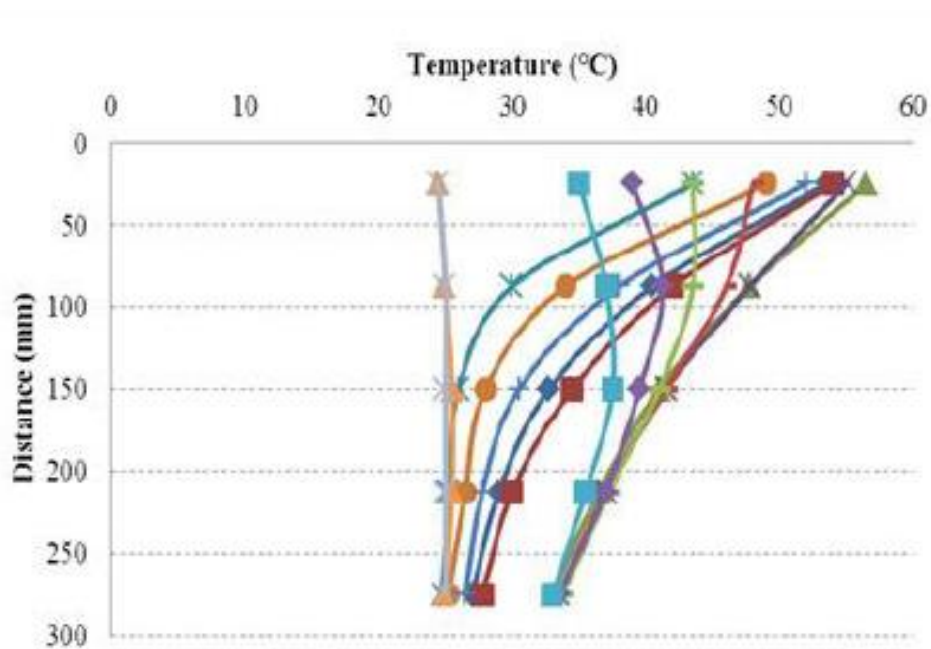


FIGURA 9.- Perfil de temperatura (Maitra, et al., 2013).



FIGURA 10.-Experimento para obtención de Perfil de temperatura (Maitra, et al., 2013).

En el 2013, (Maitra, et al., 2013) calcularon el perfil térmico (Figura 9) mediante la medición de la temperatura en dos cilindros de concreto de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, mismos que fueron elaborados en el laboratorio para este propósito. Una cara del cilindro se tapó y se sopló aire caliente en un extremo del cilindro. 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 8).

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 y obteniendo una ecuación a partir de los valores de la parte superior e inferior del perfil de temperatura (ecuación 16).

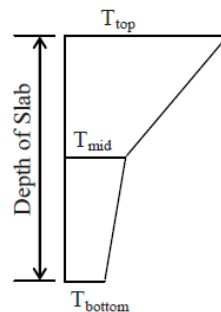


FIGURA 11.- Esquema de la obtención de perfil de temperatura en tres puntos (Maitra, et al., 2013).

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

Ecuación 16.- Obtención de la temperatura media (Maitra, et al., 2013).

De este mismo principio de 3 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 estas temperaturas.

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

Sin embargo para el presente estudio se optó por ir un paso más adelante al obtener una superficie de temperaturas y una ecuación de ésta 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 distintas profundidades a lo largo de todo el día.

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

Posteriormente por medio del comando $sf = fit([x, y], z, 'poly45')$ se obtiene una superficie de ajuste a los puntos mencionados anteriormente (MathWorks, INC, 2015). Donde los ejes X y Y son valores establecidos y el eje Z es el valor de la temperatura en esta superficie de ajuste, pero este comando también proporciona una ecuación, (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.

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

Ecuación 17.- Superficie de temperaturas del 15 de Abril del 2015.

Donde:

z= Temperatura a cierta hora del día y a cierta profundidad. (°C)

x= La profundidad donde se ubica la temperatura. (cm)

y= La hora del día en que se desea conocer la temperatura. (1 a 24 hrs)

P00 a p45= Constantes del polinomio que forma la superficie de temperatura.

La finalidad de obtener esta ecuación es su 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.

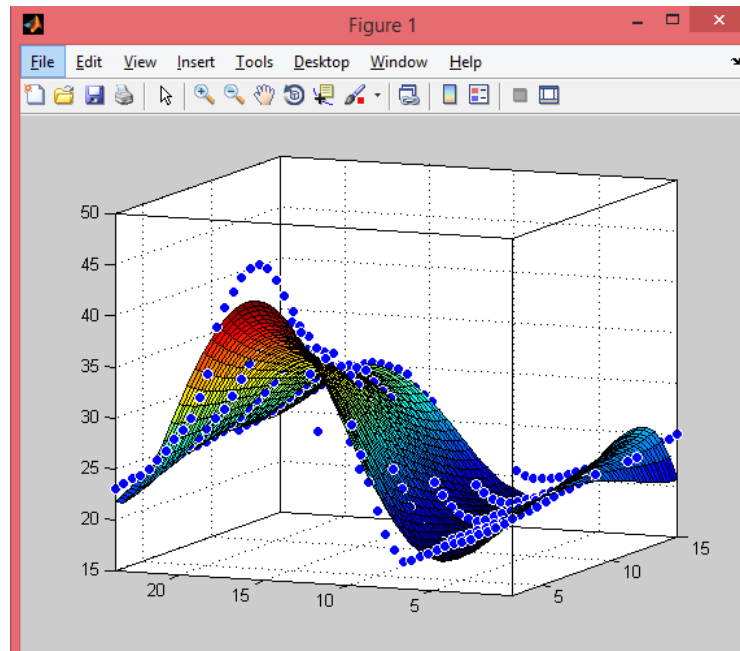


FIGURA 12.- Superficie de temperatura del 15 de Abril del 2015.

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).

Para el 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 acero se consideró $11 \frac{1E^{-6}}{c^{\circ}}$ estos valores se utilizaron para la obtención de la información experimental y para la modelación.

2.6.2 Deformación por temperatura.

Deformación Axial

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

Existen dos maneras de calcularla, 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.

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

Ecuación 18.- Cálculo del cociente de deformación axial (Mohamed y Hansen, 1995).

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

$$\text{Deformación axial} = \frac{N^*}{h}$$

Ecuación 19.- Cálculo de la deformación axial (Pane, et al., 1998).

Donde:

N^* = Cociente de deformación Axial.

h = Peralte de la losa.

$\epsilon(z)$ = 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 como en el caso de Liu y Fwa (2003) el cual contaba con tres temperaturas de su perfil de temperaturas a diferentes profundidades.

$$t = A_t + B_t z + C_t z^2$$

Ecuación 20.- Temperatura (Liu y Fwa, 2003).

Cuyos coeficientes se obtienen de la siguiente manera:

$$A_t = t_m$$

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

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

Finalmente obtienen la temperatura axial:

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

Ecuación 21.- Temperatura axial (Liu y Fwa, 2003).

Donde:

t = La temperatura en esa profundidad en unidades de temperatura.

z = Profundidad del punto en la losa en unidades de longitud.

h = Peralte de la losa en unidades de longitud.

t_t = Temperatura en la parte superior de la losa en unidades de temperatura.

t_m = Temperatura en la parte media de la losa en unidades de temperatura.

t_b = Temperatura en la parte inferior de la losa en unidades de temperatura.

Y al multiplicar esta temperatura por el coeficiente de expansión térmico del material y el módulo de elasticidad se obtiene 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.

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 se muestra en la ecuación 22.

$$M^* = \int_{-h/2}^{h/2} \varepsilon(z)z \, d_z$$

Ecuación 22.- Cálculo de la deformación axial (Mohamed & Hansen, 1995).

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

$$\text{Deformación lineal} = \frac{M^*}{h^3}$$

Ecuación 23.- Cálculo del de deformación lineal (Pane, et al., 1998).

Donde:

M^* = Cociente de deformación lineal.

h = Peralte de la losa en unidades de longitud.

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

z = Profundidad de la losa en unidades de longitud.

Y de igual forma que la deformación axial ésta se puede calcular por medio de la temperatura que causa la deformación lineal con las expresiones de Liu y Fwa (2003).

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

Ecuación 24.- Cálculo del de deformación lineal (Liu & Fwa, 2003).

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

$$t_{lineal} = B_t z$$

Ecuación 25.- Cálculo de la temperatura lineal (Liu & Fwa, 2003).

Finalmente como es el caso de la temperatura axial, se obtiene 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 y este esfuerzo se convierte a una presión vertical asignada a una profundidad.

Deformación No-lineal

Es producida por las restricciones internas entre los elementos de la losa con el fin de equilibrar los esfuerzos en la misma.

De igual forma que las deformaciones anteriores existen dos maneras de calcular la deformación no lineal, pero parten de un principio similar, que consiste en restar a la deformación (ecuación 26) o temperatura obtenida directamente de la medición (ecuación 27), las temperaturas o deformaciones axiales y lineales.

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

Ecuación 26.- Cálculo del de deformación no lineal (Pane, et al., 1998).

$$t_{no-lineal} = t_{total} - t_{lineal} - t_{axial}$$

Ecuación 27.- Cálculo de la temperatura no lineal (Liu & Fwa, 2003).

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

Como el caso Tsubokawa, et al. (2008) el cual dedujo 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.

Un número similar es el mencionado por Nishizawa, et al. (2009) que habla de un 30% del total de los esfuerzos internos para losas menores a 25 cm.

Por lo 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 obtuvo la temperatura no-lineal y se multiplicó por el coeficiente de dilatación térmico del material y por el módulo de elasticidad.

Interacción con el suelo producida por la temperatura.

Como lo describe 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 se presenta un encorvamiento hacia abajo de la losa. Sólo 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, esto genera que la losa absorba todo el efecto de alabeo sin contraponerse la base a ésta.

Y en el caso contrario cuando la temperatura menor está en la parte superior de la losa, se presenta un encorvamiento hacia arriba de la misma y sólo la parte central de ésta mantiene contacto con la base, por lo que este contacto se contrapone al alabeo y produce una neutralización de esfuerzos, sin embargo 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.

2.6.3 Obtención de deformaciones del tramo experimental por temperatura.

Para llevar a cabo la obtención de las deformaciones del tramo experimental, se procede a la discriminación de las deformaciones obtenidas por temperatura y de las provocadas por cargas de tránsito, por lo que se tomaron datos de 2 min de cada 30 min de monitoreo, y de estos dos minutos se obtiene la media y la desviación estándar de las mediciones de cada sensor, posteriormente se procede a discriminar los eventos producidos por cargas de tránsito, comparando la diferencia entre la medición menos la media, si ésta diferencia es mayor a 2.5 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 las mediciones de las microdeformaciones producidas por la parte térmica generan una señal con una distribución casi uniforme (Devore, 2008), debido a esto se toma en cuenta como parte del ciclo térmico aproximadamente el 96% de los datos y se discrimina el resto como pertenecientes a los datos de las deformaciones producidas por la carga de tránsito como se muestra en la figura 13.

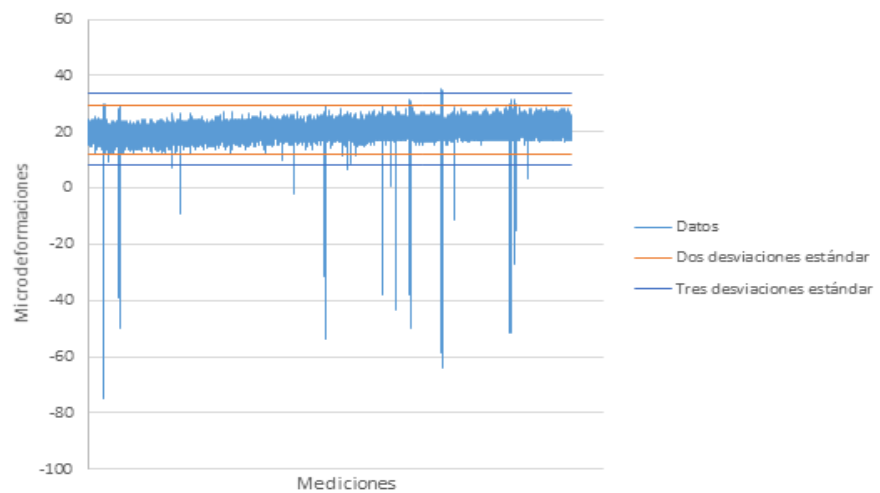


FIGURA 13.- Rangos producidos por las desviaciones estándar.

Con este criterio se procedió al análisis de los datos experimentales por medio del algoritmo matrix 3 de Matlab, del cual se obtienen las deformaciones de una hora específica del día y por consiguiente de una temperatura específica, así pues se puede obtener el ciclo térmico y las deformaciones (figura 14).

Posteriormente estas deformaciones se convierten en esfuerzo por medio de la ecuación 28 y se grafican como se muestra a continuación (figura 15).

$$\sigma = E\varepsilon$$

Ecuación 28.- Esfuerzo en función de la deformación y Módulo de elasticidad.

Donde:

σ = Esfuerzo (MPa).

E= Módulo de elasticidad (MPa).

ε = Deformación unitaria (m/m).

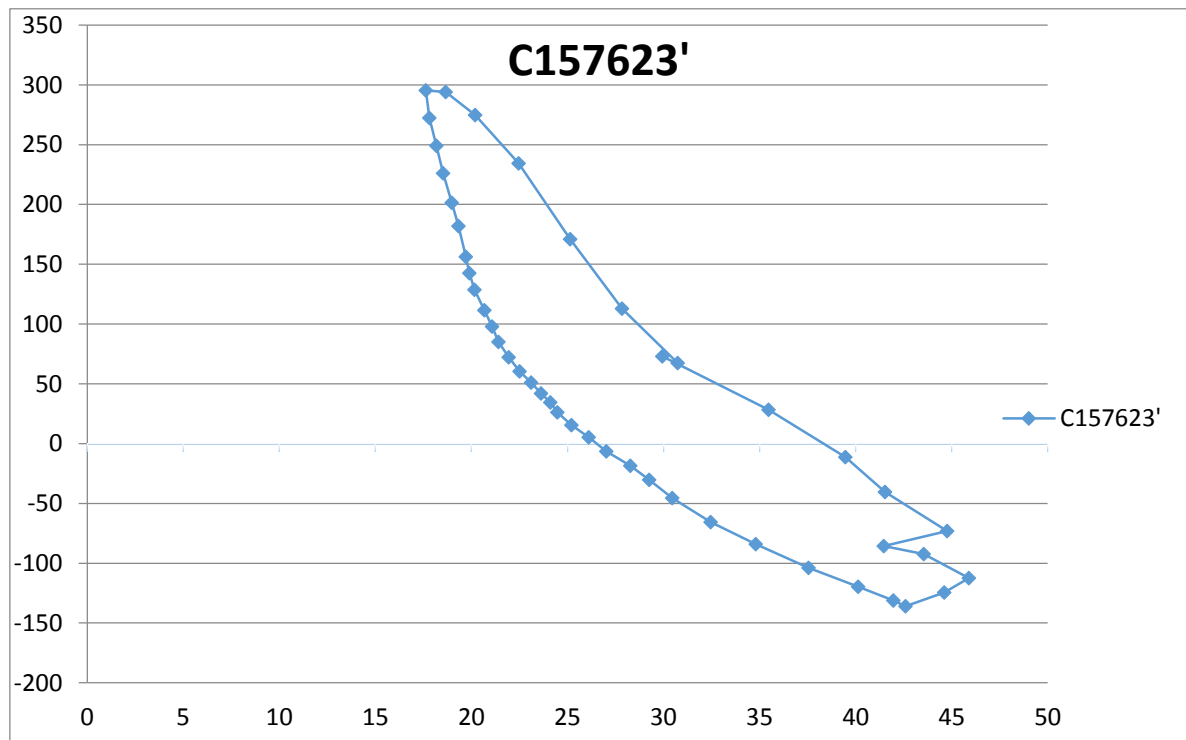


FIGURA 14.- Ciclo de deformaciones del sensor de concreto C157623 del día 15 de Abril del 2013.

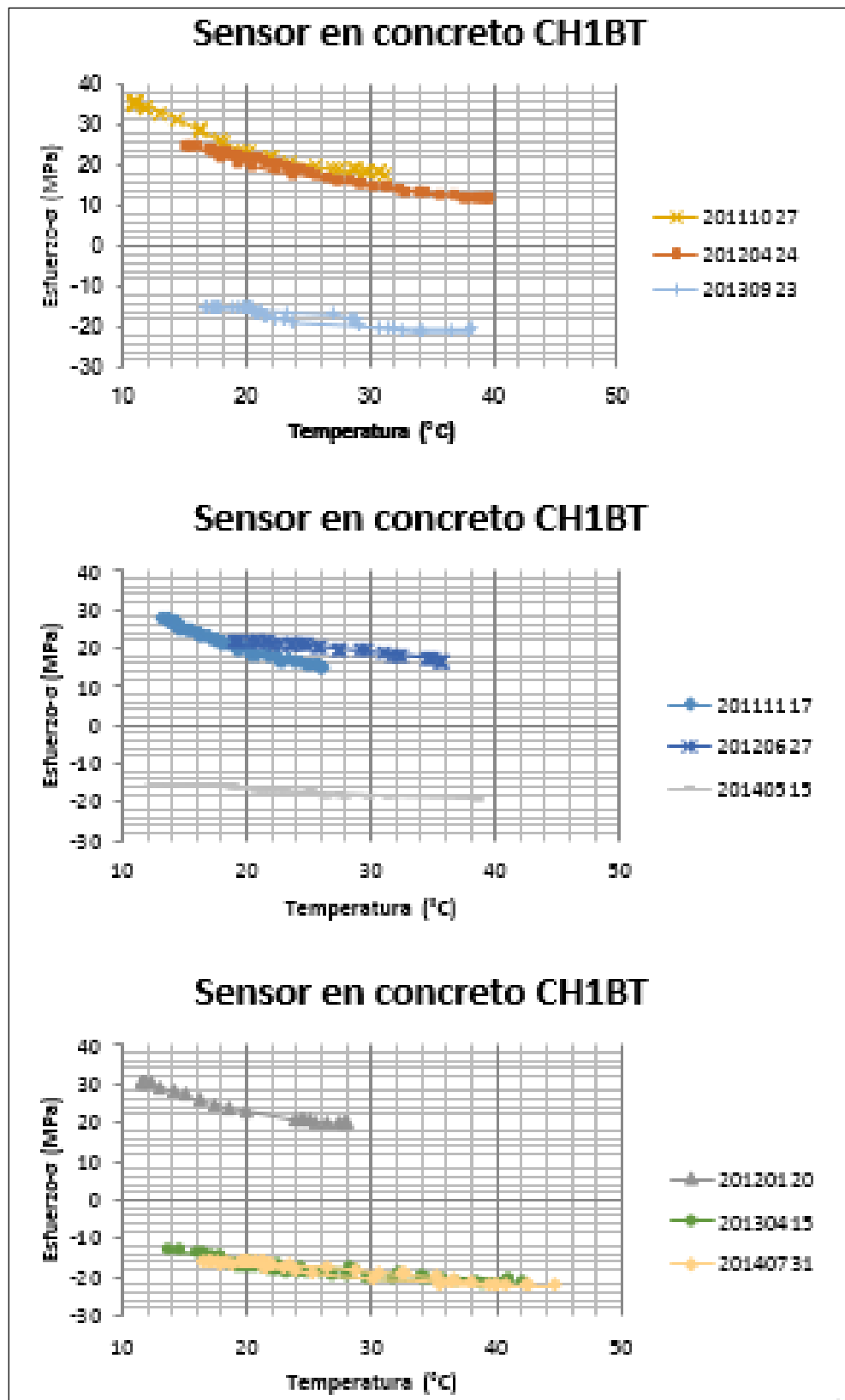


FIGURA 15.- Esfuerzos en los diferentes monitoreos del sensor de concreto CH1BT.

Y finalmente se obtiene la gráfica de temperatura-esfuerzo (figura 15). Agrupando los diferentes días de medición se obtiene la variación en los ciclos térmicos del pavimento.

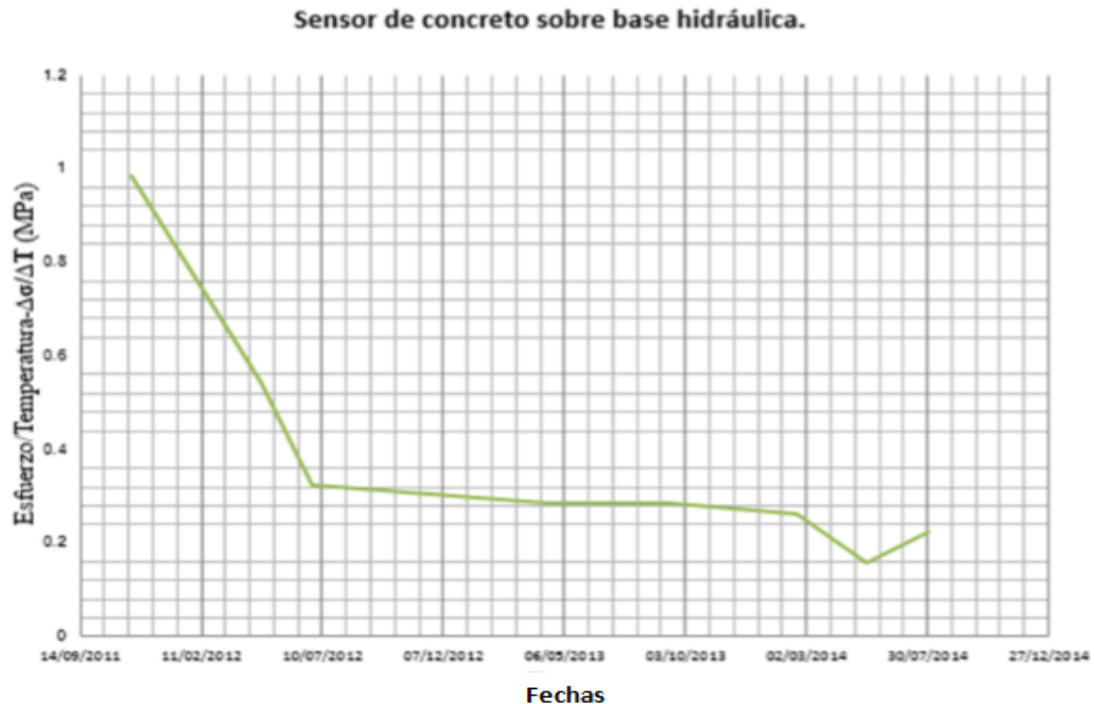


FIGURA 16.- *Esfuerzo/C°, en sensor colocado en Concreto en dirección longitudinal sobre la base hidráulica.*

Si se toma en cuenta la relación entre la apertura del ciclo térmico (esfuerzos) y la apertura de la temperatura, se obtiene la figura 16.

Modelación de la deformación y esfuerzo.

La modelación se llevó a cabo por medio del software Ansys y se realizó con los elementos SOLID 185 (utilizado para modelar el concreto de la losa), REINF264, (empleado para modelar el refuerzo de la malla) y CONTAC178, (usado 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 este en contacto con la base, cuando ésta pierde contacto por el alabeo térmico este elemento no genera ninguna reacción.

El otro aspecto importante consiste en establecer las temperaturas por medio del comando BF, lo cual permite asignar temperaturas y aceleraciones (gravedad y carga por peso propio) en nodos seleccionados, esto es importante, ya que genera distintas temperaturas a diferentes profundidades del pavimento. El valor de estas temperaturas se obtiene al programar la ecuación de la superficie de temperatura, asignando 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 y temperatura.

Otro aspecto importante es la selección de la temperatura base de la cual se parte para sacar el diferencial de temperatura, dicho valor se obtuvo por medio de la observación de los comportamientos de los perfiles de temperatura durante el día en estudio. Posteriormente se seleccionó la temperatura donde el perfil de las diferentes temperaturas siguieron una tendencia de línea recta, 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 misma.

2.7 Interacción suelo estructura.

2.7.1 Módulo de Resiliencia.

Uno de los aspectos ya mencionados es la deformación de los materiales de la base, Garnica et al (2002), refiere a Yoder y Witczak (1975) que proponen el Módulo de Resiliencia (MR) en materiales granulares, el cual se emplea en la práctica para caracterizar materiales de base y subbase.

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

$$M_R = K_a \left[\frac{\theta}{P_0} \right]^{k_b} \left[\frac{\sigma_d}{P_0} \right]^{k_c}$$

Ecuación 29.- Módulo de Resiliencia.

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.

K_a, K_b y $K_c =$ Constantes del material obtenidas por una prueba triaxial con carga repetida en materiales granulares.

En el caso del tramo experimental se cuenta con los valores de 90 Mpa del Módulo de Resiliencia en la base hidráulica y la base cementada cuenta con un valor de 120 Mpa.

2.7.2 Modelo MFE de interacción suelo estructura.

Winkler

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:

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

Ecuación 30.- Modelo Winkler (Aristizábal, 2000).

Donde:

w = deflexión en el punto de interés.

q = presión en el punto de contacto.

k_1 = Módulo de Resiliencia 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, 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 cuales este modelo representa una idealización adecuada y precisa de las condiciones de soporte existentes, tales como miembros flotantes (vigas, entramados, capas de hielo) los cuales son una consecuencia simple del principio de Arquímedes.

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

3 METODOLOGÍA.

3.1 Materiales.

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

Como se puede observar en la figura 17, la estructura tradicional de un pavimento rígido con juntas constan de una sección en este caso de 30 cm, mientras la figura 18 muestra 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 disminución del costo.



FIGURA 17.- Sección de pavimento existente (Gómez, 2013).

3.1.1 Materiales pétreos.

El material fue extraído del banco Las Brujas, ubicado en la comunidad de Apaseo El Grande, el cual es propio para su utilización en bases, pues cuenta con las características necesarias y la granulometría adecuada que satisface lo indicado en el manual M-MMP-1-11/08. Algunas de sus principales características, (como la curva de granulometría), se encuentran en el Anexo 1.

Es importante mencionar que su CBR (California Bearing Ratio) es del 103% lo cual corresponde a una equivalencia de $k = 21 \text{ Kg/cm}^3$, tiene un peso específico seco de 1750 kg/m^3 y una humedad óptima 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, se observa que se trata de un material ideal para la formación de bases.

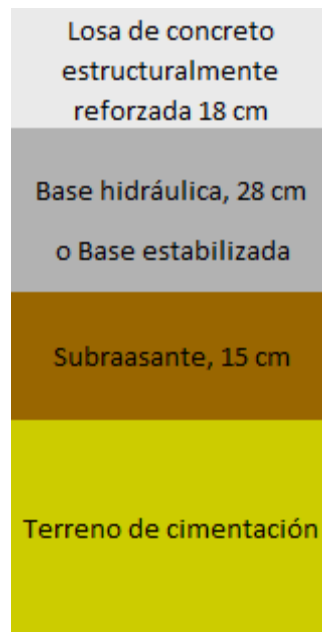


FIGURA 18.- Sección de PCERC (Gómez, 2013).

3.1.2 Cemento.

Este material es de gran importancia, pues el producto final de la mezcla de los pétreos con éste da como resultado el concreto que es la capa superficial o carpeta, que como ya se mencionó es la capa más importante y de mejor calidad.

Este material fue suministrado por la empresa Apasco, el cual entregó un certificado de calidad (Anexo 2), consta de un cemento Cemento Portland Compuesto clase Resistencia 40 (CPC 40).

3.1.3 Acero.

El acero utilizado en el tramo experimental forma las mallas de ingeniería MI-3.44-A y MI-3.44-B (Figura 19), estas mallas fueron diseñadas basándose en las cartas de influencia.

El refuerzo de acero consta de varillas con $F_y=600 \text{ kg/cm}^2$, de diámetros de 9.21 mm y 7.95 mm y las distribuciones que sigue cada una de las mallas es la siguiente:

La Malla MI-3.44-A, colocada en lecho inferior, cuenta con 25 varillas transversales de 9.21mm, espaciadas de la siguiente manera: en los primeros 98 cm las varillas se espacian cada 11 cm con un espacio inicial de 10 cm, utilizando 8 varillas, de los 98 cm a los 246 cm, las varillas se espacian 18.5 cm, empleando 9 varillas, mientras que en la longitud de 246 cm a 344 cm se utilizan las 8 varillas restantes espaciadas a cada 8 cm y en el extremo final se dejó un espacio de 10 cm.

En sentido longitudinal se utilizan 13 varillas con espacio de arranque de 10cm y 12 espacios de 20 cm.

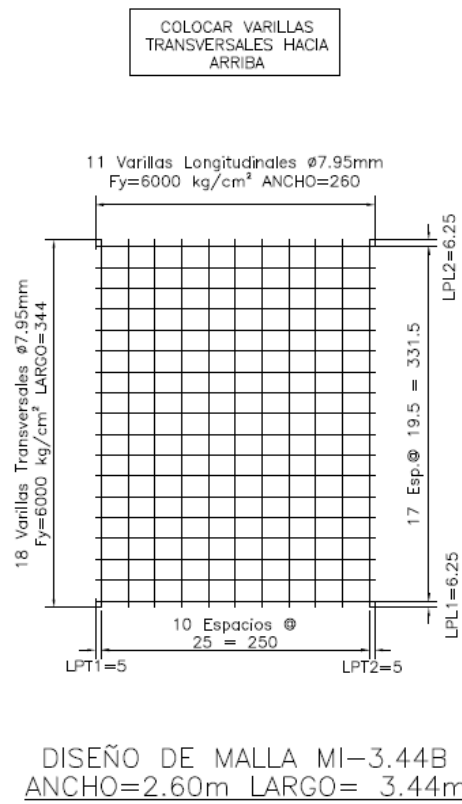
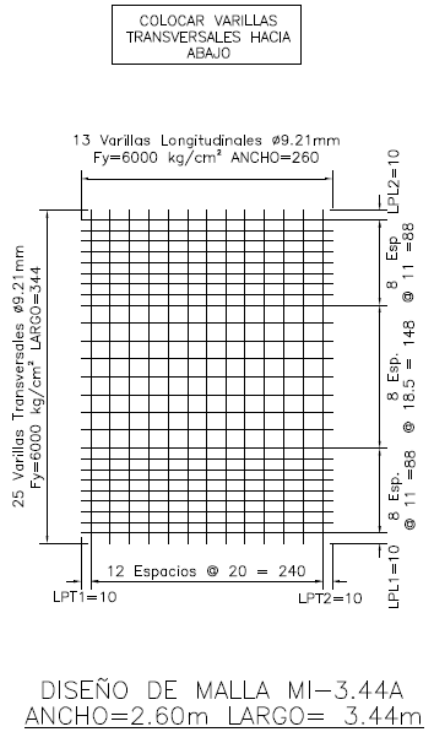


FIGURA 19.- Mallas del PCERC (Gómez, 2013).

La Malla MI-3.44-B, colocada en el lecho inferior tiene 18 varillas en la dirección transversal con un diámetro de 7.95 mm, entre cada una existe un espacio de 19.5 cm, 17 segmentos y en los extremos el espacio inicial es de 6.25 cm, la dirección longitudinal tiene 11 varillas de 7.95cm de diámetro, espaciadas cada 25 cm y en los extremos el espacio inicial es de 5cm.

El reporte de la calidad del acero se encuentra en el Anexo 3, en éste se pueden observar las propiedades mecánicas y químicas del acero.

3.1.4 Concreto.

Este es el material que compone la capa de rodamiento y por lo tanto el más importante. Fue proporcionado por la empresa Cemex; se realizó un muestreo con cilindros, los cuales fueron ensayados en el laboratorio del Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Las pruebas mecánicas determinaron que la resistencia a la compresión es de 300 kg/cm² (8 días), para estas pruebas se probaron 16 cilindros.

La descripción completa del ensayo se muestra en el manual M-MMP-2-02-058-04, perteneciente a la SCT.

El promedio obtenido de los cilindros ensayados es de 290 kg/cm². Se anexa uno de los ensayos (Anexo 4).



FIGURA 20.- Resistencia promedio de los cilindros.

3.2 Equipo.

Para el monitoreo se utilizaron sensores de fibra óptica basados en la tecnología de la rejilla de Bragg, los cuales se basan en el cambio de la longitud de onda en nanómetros (nm), que sufre el haz de luz al ser expuesto a diferentes fenómenos físicos, temperatura, presión, deformación, que contraen o expanden la rejilla y por tanto la longitud de onda sufre cambios. (FBG-Sensing-Advantages., 2011)

Los componentes utilizados son los siguientes:

3.2.1 Extensómetro para acero / extensómetro para concreto – os3600.

Estos sensores son de forma cilíndrica como se observa en la figura 24, pertenecen a la marca Micron-optics, su función se basa en el principio de la rejilla de Bragg, algunas de sus características son las siguientes: tiene un rango de operación entre temperaturas de -40° a 80°C , un rango de deformación unitaria que va de ± 2500 microdeformaciones y una sensibilidad a la temperatura de $23.8 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, por lo que la selección de esta tecnología los hace ideales para los objetivos del trabajo. Se anexa la ficha técnica (Anexo 5).



FIGURA 21.- Extensómetro de concreto y acero.

3.2.2 Sensor de Temperatura - os4350.

De igual forma que los extensómetros, éstos se basan en el principio de la rejilla de Bragg, son de la marca Micron-optics, 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, adicionalmente se anexa la ficha técnica del sensor (Anexo 6).

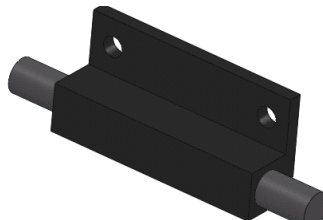


FIGURA 22.- Sensor de temperatura.

3.2.3 Acelerómetro – os7100.

Los acelerómetros son sensores marca Micro-optics, con 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, se anexa su ficha técnica (Anexo 7).



FIGURA 23.- Acelerómetro.

3.2.4 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.

3.2.5 Tubería Galvanizada de 3 pulgadas.

La finalidad de ésta es la protección de los cables de fibra óptica durante el proceso constructivo y la puesta en funcionamiento del tramo carretero.

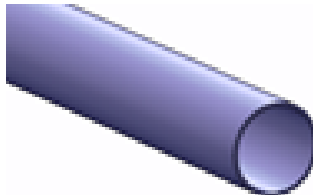


FIGURA 24.- Tubería Galvanizada.

3.2.6 Conectores Lado A-B

Son conectores de fibra óptica que se utilizan para conectarse directamente sobre el interrogador.

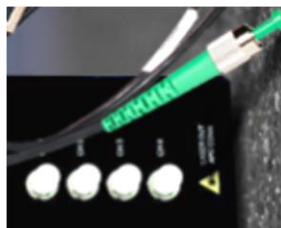


FIGURA 25.- Conector.

3.2.7 Interrogador – sm130-500.

Es una de las piezas más importantes, tiene la capacidad de medir las frecuencias del haz de luz y detectar variaciones del mismo, la forma física del interrogador se muestra en la Figura 26.

Este interrogador tiene las siguientes características:

- Marca: Micron Optics Inc.
- Modelo: sm130-500.
- Número de Entradas: 2, expandible a 4.
- Tipo de tecnología: Interrogado de longitud de onda de luz láser para rejillas de Bragg, con una frecuencia de muestreo de 500 Hz.
- Comunicación: Ethernet 100 Mbps.
- Tipo de alimentación: 120 VAC.

Todas las especificaciones técnicas del interrogador se encuentran en el Anexo 8.



FIGURA 26.- Interrogador sm130-500.

3.2.8 Software Enlight.

El programa para monitoreo y registro de datos que proporciona Micron Optics, Inc se llama ENLIGHT. Este paquete permite la introducción de imágenes o fotos en la ventana de monitoreo para visualizar desde la PC la ubicación de los sensores conectados al Interrogador. Todo esto con el fin 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, cambios de temperatura o aceleraciones. Con esto se hace más amigable el programa de monitoreo y además se facilita la comprensión de los parámetros correspondiente a los fenómenos que se están almacenado.

3.3 Procedimiento.

Para la realización de esta tesis se utilizó el procedimiento descrito en la figura 27, el cual se basa en la obtención de datos experimentales por medio del equipo ya mencionado y su comparación con datos obtenidos de un modelo construido a partir de los perfiles de temperatura.

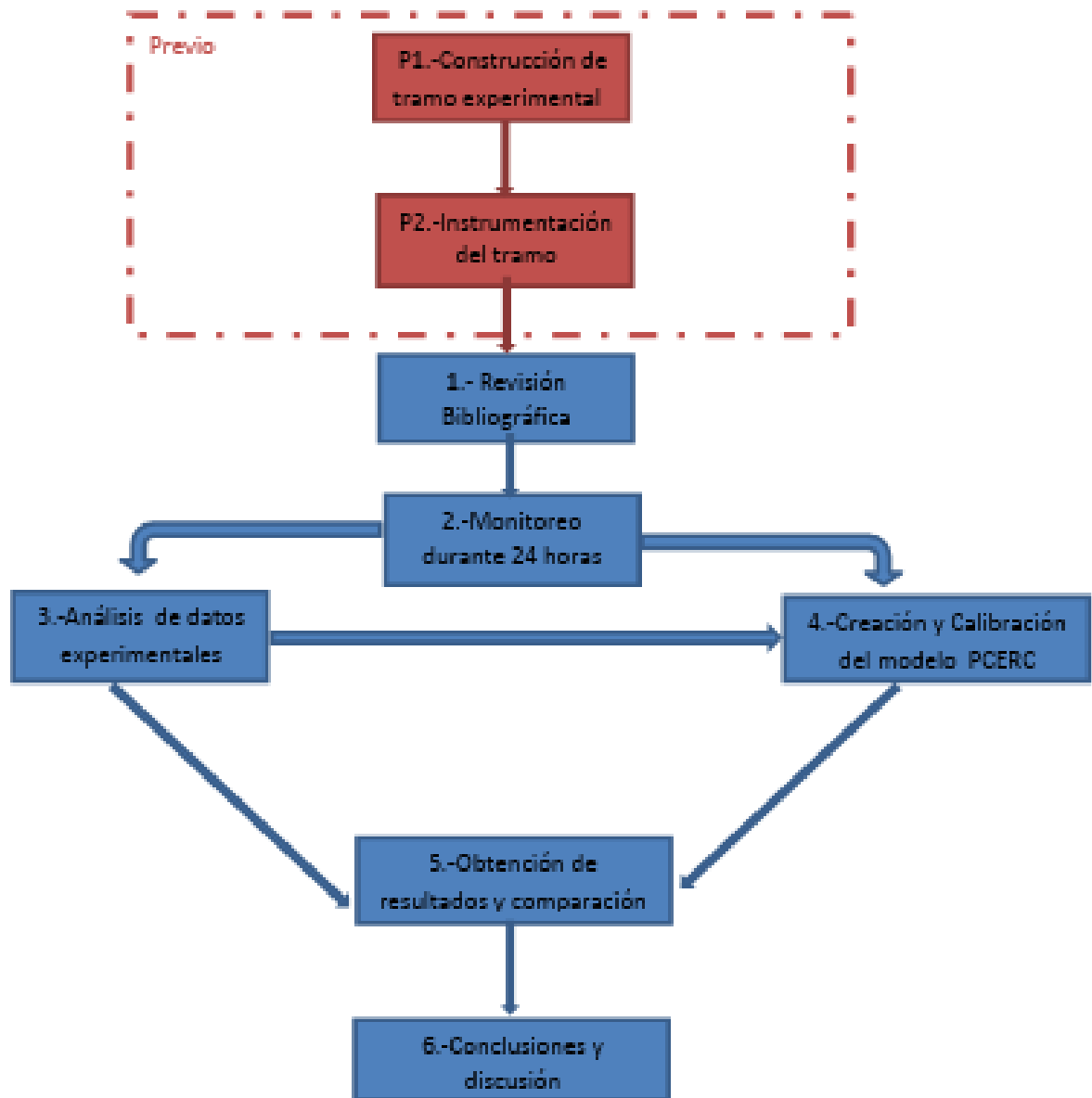


FIGURA 27.- Procedimiento.

3.3.1 Descripción de la figura.

Etapas previas

P1. Construcción del Tramo experimental.

El procedimiento comienza con la construcción del tramo experimental, el cual se ubica en la carretera México-Querétaro en el tramo entre el km 166+000 y 166+300 en el carril de baja velocidad en el cuerpo B (sentido Querétaro -México), se construyó con el sistema PCERC, que se fundamenta 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 18cm. 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 se llevó a cabo con sensores de fibra óptica, la cual es una tecnología relativamente nueva en nuestro país y se ha usado con éxito para el monitoreo de estructuras. Se instrumentó con 12 extensómetros, colocados tanto en el acero como en el concreto, 2 acelerómetros colocados en cada una de las bases y 6 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.

3.- Análisis de datos experimentales.

Una vez obtenidos los datos del monitoreo se procedió al análisis de los datos por medio de varios criterios, en primer lugar se separaron las microdeformaciones producidas por la temperatura de las microdeformaciones producidas por el tráfico y se obtuvieron las gráficas de comportamiento de temperatura y deformaciones y posteriormente las de temperatura y esfuerzos.

4.- Creación y calibración del modelo PCERC.

La modelación del sistema PCERC se realizó en Ansys y Matlab. Se utilizó Matlab para la obtención de las superficies y ecuaciones del comportamiento de la temperatura a diferentes profundidades y a diferentes horas del día, una vez teniendo estas ecuaciones se programaron en Ansys y se procedió a la modelación del comportamiento del sistema a diferentes horas del día y por consiguiente a diferentes temperaturas.

5.- Obtención de resultados y comparación.

Una vez procesada la información obtenida de forma experimental se procedió a su evaluación y comparación con la información del modelo.

6.- Conclusiones y discusión.

Finalmente se plasmaron las conclusiones y observaciones realizadas del presente trabajo, con la finalidad de dar a conocer la información relevante obtenida de este experimento.

3.3.2 P1. Construcción del Tramo experimental.

El tramo de construcción se inició con la demolición del pavimento existente cuya estratigrafía se muestra en la figura 16, esto se hizo con apoyo del personal de CAPUFE, quienes autorizaron la construcción del tramo experimental con el sistema PCERC y se realizó con excavadora sobre orugas Caterpillar 320, equipada con rotomartillo, posteriormente de la demolición de la capa de pavimento se procedió a la extracción del material producto de la demolición, por cuestiones de visibilidad no se permitió la acumulación de este material, el cual se cargó en camiones de 7 metros cúbicos, esto se realizó por medio de la Retroexcavadora Caterpillar, una vez realizado esto se continuó con el anclaje de las barras de amarre entre el pavimento existente en el carril de alta velocidad y acotamiento.

Posteriormente se comenzó con la compra del material pétreo del banco “Las Brujas”, éste se transportó al tramo y se comenzó con su colocación con ayuda de una Motoconformadora, esto de acuerdo a las especificaciones de SCT, que es la colocación de la nueva base 15 cm por debajo de donde se encuentre material firme, éste proceso se llevó a cabo en la mitad del tramo y en la otra mitad se realizó un proceso similar pero con la diferencia de que previo al tendido de la base se mezcló con un 5% de cemento, con la finalidad de generar una base estabilizada y se procedió con el tendido normal, con una compactación de 100% de su peso volumétrico seco.

Durante el proceso del tendido de la base se procedió a llevar un muestreo por parte del IMT con la finalidad de que la base contara con la calidad requerida por las especificaciones.

A continuación se realizó 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.

Después se tendieron las mallas de ingeniería de acuerdo a las especificaciones de proyecto, como se mencionó en el capítulo anterior, la cantidad y distribución del acero se llevó a cabo por medio del diseño basado en las cartas de influencia con la finalidad de que la carpeta tuviera la capacidad de absorber los momentos producidos por el tráfico vehicular.

Justo en este momento del proceso constructivo se procedió a la instrumentación del tramo experimental, con el objetivo de medir las deformaciones tanto en el concreto como en el acero.

Posteriormente se procedió al tendido del concreto de $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$, con un espesor de 18 cm y con la característica particular de la no existencia de juntas, por tratarse de un pavimento continuo.

3.3.3 P2. Instrumentación del Tramo.

La instrumentación tiene la capacidad de medir los siguientes parámetros:

- *Deformación unitaria en el concreto:* Ayuda a entender cómo se deforma (compresión y/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.

- *Deformación unitaria en la malla de acero:* Permite conocer qué tanto se comprime y/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.
- *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, permitiendo asociar esos cambios a las deformaciones sufridas por el concreto y a las sufridas por las varillas de acero.

Ubicación de los sensores en el tramo carretero

La ubicación de los sensores es en una longitud de 16m de los 300 m construidos del PCERC y cercano al cambio de base hidráulica a cementada.

Para entender las deformaciones del concreto y la malla de acero de ingeniería, algunos extensómetros se colocaron tanto transversalmente como longitudinalmente.

La Figura 28 muestra la sección del tramo instrumentado desde una vista superior, en ella se observa la posición relativa de los sensores, el lugar del cambio de base para el pavimento, la grieta inducida, el cadenamiento al que se posicionarán los sensores y los canales de monitoreo que comprenden a los lazos de sensores que se colocarán en dicho tramo.

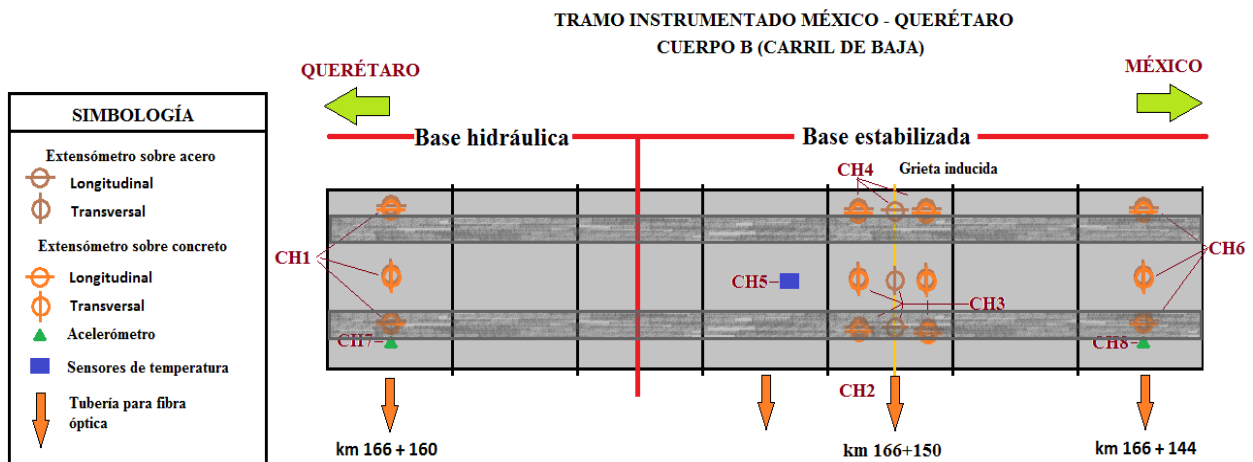


FIGURA 28.- Sección a instrumentar que comprende al tramo experimental PCERC.

Para entender el comportamiento del PCERC sobre la base hidráulica o granular y la base estabilizada con cemento, se colocaron dos juegos de sensores (cada uno en diferente base). Cada conjunto de sensores consiste en 6 extensómetros (3 para medir las deformaciones en la malla de ingeniería MI-3.44A y 3 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 comportará el PCERC ante esta situación, se generó una grieta transversal a la dirección de los vehículos, alrededor de ella se colocó 15

extensómetros, 6 para medir deformaciones en el concreto y 9 para medir deformaciones en la malla de ingeniería.

En general, todos los extensómetros para acero se montaron sobre la malla de ingeniería MI-3.44A. y todos los extensómetros para concreto se posicionaron sobre la malla de ingeniería MI-3.44B con una separación entre el instrumento y la varilla de 30 mm. La Figura 29 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, se encuentra 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.

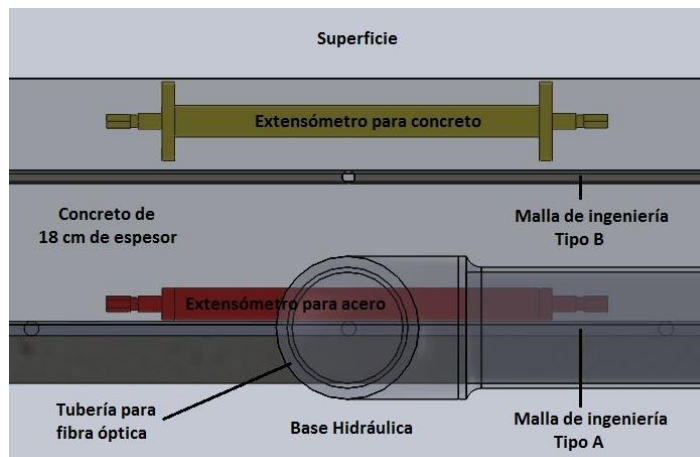


FIGURA 29.- Distribución de extensómetros en la losa de concreto PCERC.

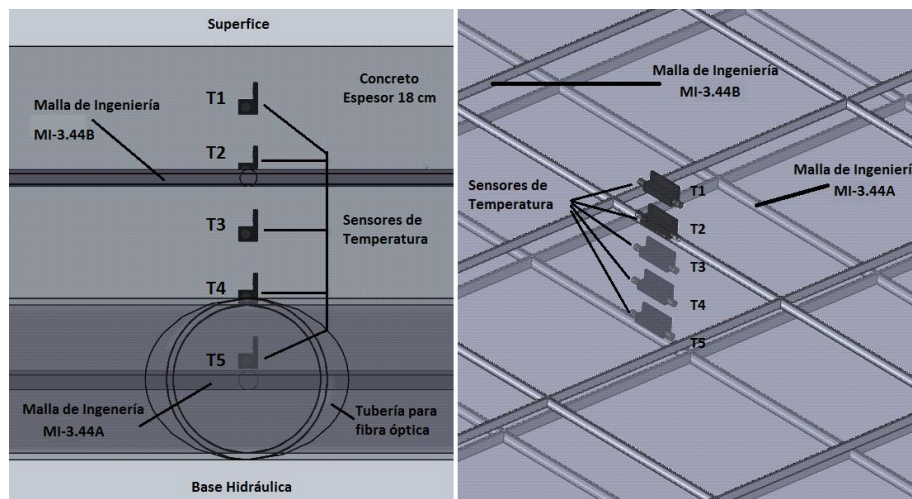


FIGURA 30.- Distribución de los sensores de temperatura en la losa de concreto PCERC.

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

Identificación de extensómetros

La nomenclatura de los extensómetros comprende 6 caracteres:

Caracter	1	2	3	4	5	6
Nomenclatura	X	X	X	X	X	X

El primer caracter 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 caracter hace alusión al tipo de base en que se encuentra:

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

El tercero y cuarto caracteres están determinados de acuerdo a la ubicación del extensómetro según los ejes longitudinales y transversales respectivamente.

Se denominan con los números 1, 2 ó 3, según la línea longitudinal imaginaria que les corresponde y con las letras A, B ó C, de acuerdo con la línea transversal imaginaria, ambas respecto al flujo vehicular (Figura 31). De esta manera, el tercer caracter siempre es un número mientras que al cuarto le corresponde una letra.

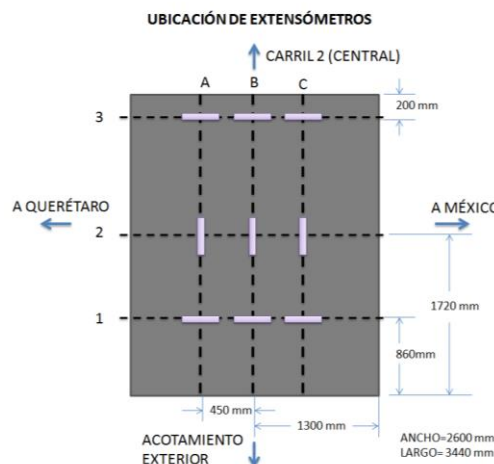


FIGURA 31.- Plano que correlaciona la posición de los extensómetros en bloque de PCERC.

El quinto caracter indica la dirección en que se colocó el sensor:

L: Longitudinal al flujo vehicular.

T: Transversal al flujo vehicular.

El sexto caracter con la letra **G**, aplica a los extensómetros que se encuentran dentro del área en donde se indujo 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 se encuentran en la base estabilizada sobre un solo punto distribuidos verticalmente con una separación de 30 mm entre los sensores contiguos (Figura 30).

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.

3.3.4 Revisión Bibliográfica.

El contenido de esta etapa fue plasmado en el capítulo anterior con la finalidad de obtener un marco teórico que facilite la interpretación y selección de los datos obtenidos en la experimentación, así como la selección de los parámetros deseados en la modelación del fenómeno para permitir el cumplimiento de los objetivos deseados.

3.3.5 Monitoreo durante 24 horas.

Se ha realizado un monitoreo continuo en diferentes fechas con la finalidad de obtener distintas condiciones de carga por tráfico, ambientales y otros factores. Éstos se realizaron durante un periodo de 24 horas con la finalidad de obtener los ciclos térmicos totales, tanto de enfriamiento como de calentamiento, a fin de observar sus peculiaridades.

El monitoreo se llevó a cabo en condiciones reales, con la carga de tráfico real y los fenómenos climatológicos asociados al día de medición.

Fecha	Prueba
20111117	Primera
20120424	Segunda
20120120	Tercera
20111027	Cuarta

20120627	Quinta
20130415	Sexta
20130923	Séptima
20130217	Octava
20140515	Novena
20140731	Décima
20141008	Décimo primera

Tabla 3.- Días de los monitoreos.

3.3.6 Análisis de datos experimentales.

El procesamiento de la información experimental se desarrolló por medio del algoritmo matrix3 y matrix6, posteriormente con ayuda de los programa Risk y Excel se obtuvieron las distribuciones estadísticas y las gráficas de esfuerzo.

Descripción del Algoritmo matrix6 (Cargas por tránsito).

Este algoritmo tiene la finalidad de procesar la información recabada en los sensores, que debido a su cantidad es necesario hacer un análisis a fin de obtener la información de un tamaño manejable.

El algoritmo requiere la localización del directorio donde se encuentran los datos en formato txt. Inicialmente este algoritmo crea un vector lista con el nombre y la posición de los archivos, posteriormente se importa cada archivo; se genera la media y la desviación estándar de cada columna del archivo, con esta información se procede a seleccionar los valores que sobrepasan el valor de la media por más de 2.5 desviaciones estándar. Estos valores seleccionados son almacenados en un vector de resultado.

Este proceso se repite para todos los archivos, el vector resultado es el valor de las microdeformaciones producidas por las cargas de tránsito y por medio de la ecuación 29 se procede a encontrar el valor de los esfuerzos producidos por las cargas de tránsito de cada día de monitoreo.

Procesamiento de la información obtenida del algoritmo matrix6 para cargas por tránsito.

Una vez obtenido el vector resultado que contiene los esfuerzos producidos por cargas de tránsito de cada día analizados, se procede a obtener un histograma de los esfuerzos, posteriormente se obtienen las distribuciones que tengan mejor ajuste de cada histograma y se repite este procedimiento con los demás días del monitoreo.

Se selecciona la distribución que tenga el mejor ajuste en todos los días, y se procede a obtener el valor de la media de estas distribuciones, finalmente se grafica a lo largo de las diferentes fechas de las mediciones.

Descripción del Algoritmo matrix3 (Cargas por temperatura).

Este algoritmo es una ayuda para el procesamiento de la información obtenida de las mediciones ya que debido a su cantidad, es necesario hacer un procesamiento de alto orden para poder reducirla a datos manejables.

Los requerimientos del algoritmo constan de un directorio que contiene los archivos en formato txt, y la localización del mismo.

El algoritmo crea un vector lista con los nombres de los archivos localizados en el directorio señalado a Matlab.

Se solicita al usuario que ingrese el tiempo inicial en el formato dd:hr:mm, esto es día, la hora y los minutos a partir de la cual se iniciaron las mediciones (se solicita en este formato debido a que se convierte a segundos).

También se le pide el periodo de búsqueda en formato mm, que es el incremento de tiempo en que se realizara la búsqueda de la información consistente en minutos, que nuevamente se convertirá en segundos.

Se solicita que se ingrese el rango del que se extraerán los datos.

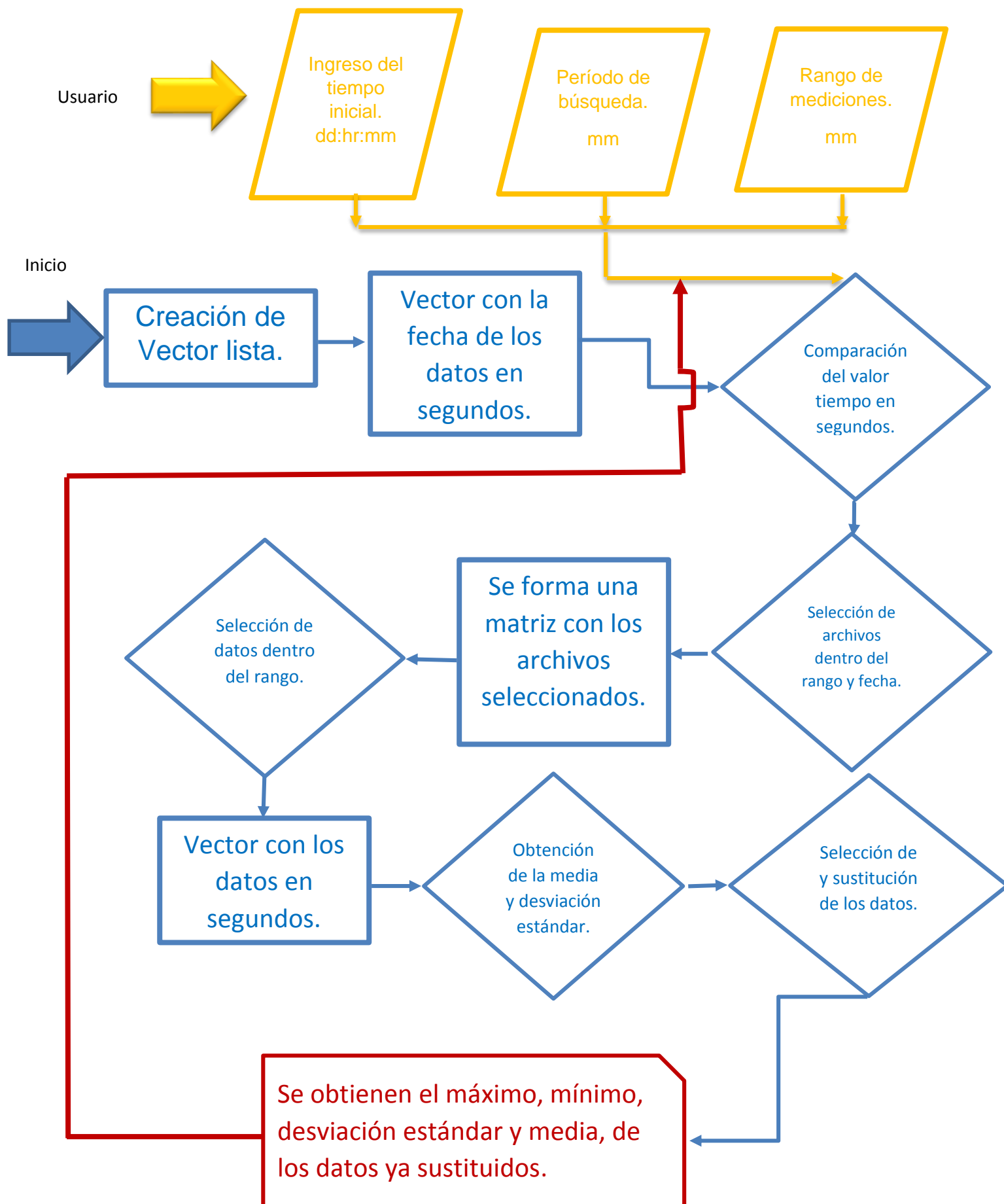
En general se está solicitando la hora inicial de búsqueda, el valor de incremento de la hora inicial de búsqueda y el rango en tiempo que se tomara para obtener el valor de las medias.

Posteriormente el algoritmo convierte el nombre de los archivo en el vector list, la fecha de los archivos en segundos, tomando 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 contienen la hora de medición.

Se importan estos archivos y se genera una matriz de datos de estos 2 archivos seleccionados.

Se convierte la columna de la matriz que contiene la hora nuevamente a segundos 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, menos 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 seleccionadas se genera una nueva matriz que sólo contiene las mediciones de estos dos minutos o la cantidad del rango que se desee.



Se procede a sacar 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 dos desviaciones estándar, si las rebasa, se sustituye el valor de la medición por la media y finalmente a esta matriz ya discriminada se le obtiene la media, que es el valor comparativo y que 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, información que ronda cerca de 360 millones de datos obtenidos por día.

Procesamiento de la información obtenida del algoritmo matrix 3 para cargas por temperatura.

Ya que se tiene esta información de un tamaño manejable, se continúa procesando pero esta vez en Excel, obteniendo tablas y diferentes gráficos que permiten observar el comportamiento del fenómeno térmico en el pavimento.

3.3.7 Creación y Calibración del modelo PCERC.

El modelo se realizó en Ansys con la finalidad de simular la temperatura diaria y observar los efectos que ésta produce en el tramo. Este modelo se realizó con la información del diseño del tramo experimental y con algunos parámetros obtenidos por laboratorios de control de calidad.

La mecánica del programa es la clásica forma de trabajo en Ansys.

La primera parte del algoritmo del modelo consiste en la selección del tipo de elemento, sus constantes y las características del material. Para este estudio se emplearon 3 elementos: Solid185, para la base y el concreto, un Contac178, para la interacción suelo estructura y finalmente un Reinf264, para simular el acero de refuerzo.

Posteriormente se le asignan sus características particulares de los elementos, en nuestro caso el único elemento que contiene particularidades es el elemento resorte Contac178, el cual se trabaja como un resorte débil, esto con la finalidad de simular una interacción suelo-estructura tipo Winkler.

A continuación se asigna a cada elemento el tipo de material, con sus respectivas características, estas características se obtuvieron del informe de laboratorio.

Enseguida se procede a crear los nodos de contacto entre los diferentes materiales, así como los keypoint con la misma ubicación de éstos. Al final estos nodos permiten unir todos los elementos.

Se crean los elementos con sus geometrías particulares y posteriormente se unen entre sí. Se procede con el mallado, el cual está íntimamente relacionado a los puntos previamente creados.

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 corresponde a la temperatura que la mayoría de los sensores detectan como un valor similar o igual y por tanto tenderían a presentar la misma deformación; esto con la finalidad de tomar como referencia una temperatura en la cual 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, convirtiendo este esfuerzo en una presión sobre cierta profundidad, es necesario hacer esto debido a que Ansys solo contempla el esfuerzo producido por la temperatura Axial.

A continuación se resuelve el sistema por medio de los algoritmos de Ansys y finalmente se obtiene un archivo txt, con la información de los esfuerzos y la temperatura de la parte superior de ese día en particular. Esta información se transforma en un archivo de Excel y se procede a graficar la figura de Temperatura esfuerzo, previamente obtenida de las mediciones.

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

4.1 Presentación de resultados por cargas de tránsito.

El análisis del comportamiento del sistema ante las cargas de tránsito a lo largo del tiempo, consistió en evaluar el valor de la media de esfuerzo, registrada por las cargas de tránsito que circulan sobre la carretera, a lo largo de los diferentes días de la mediciones, en un rango de temperatura seleccionado de 15 a 25°C, posteriormente se discriminó para el ciclo de enfriamiento del sistema y para el ciclo de calentamiento. Este análisis se realizó para los sensores localizados sobre la rodera del lado derecho ya que estos sensores tienen mayor sensibilidad al paso de las cargas de tránsito. Para poder realizar la comparación de las medias del esfuerzo, se evaluó la misma distribución estadística en el tiempo.

Las figuras 32 y 33 muestran el valor de la media del esfuerzo en diferentes fechas para el ciclo de calentamiento y enfriamiento respectivamente para el sensor de concreto CH1BL, se puede observar que cuando fue implementado el sistema tenía altos valores de esfuerzos y al paso del tiempo por la tercera medición, 20 de enero 2012, los valores de la media disminuyeron significativamente. Lo anterior pudo ser provocado por el agrietamiento del sistema que al fragmentarse trabaja en bloques más pequeños cuya única continuidad es la malla de acero.

Las figuras 33 y 34 muestran la media de esfuerzos del sensor colocado en el acero de la rodera derecha, AH1BL. En estas figuras podemos observar que el acero está trabajando a tensión tal y como se esperaba, también podemos observar que la media de esfuerzos en el ciclo de calentamiento no tiene cambios significativos. Una explicación para este comportamiento es que el acero no ha sufrido daños significativos y es éste el que mantiene unido al sistema, mientras que la media de esfuerzos del ciclo de enfriamiento tiene una disminución, esto nos indica que durante el enfriamiento el concreto tiende a perder mayor continuidad.

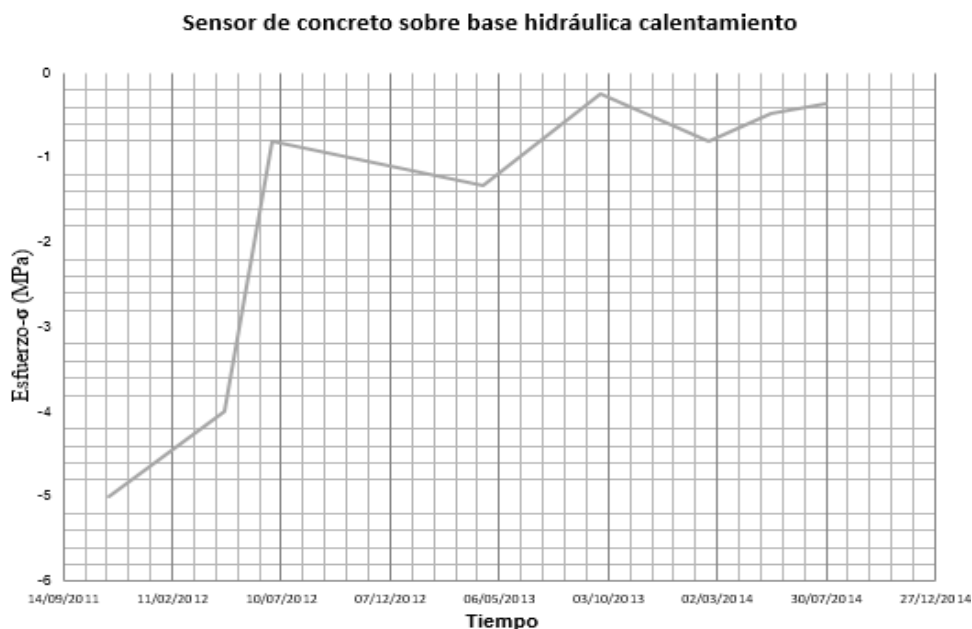


FIGURA 32.- Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el calentamiento del sistema en el sensor CH1BL.

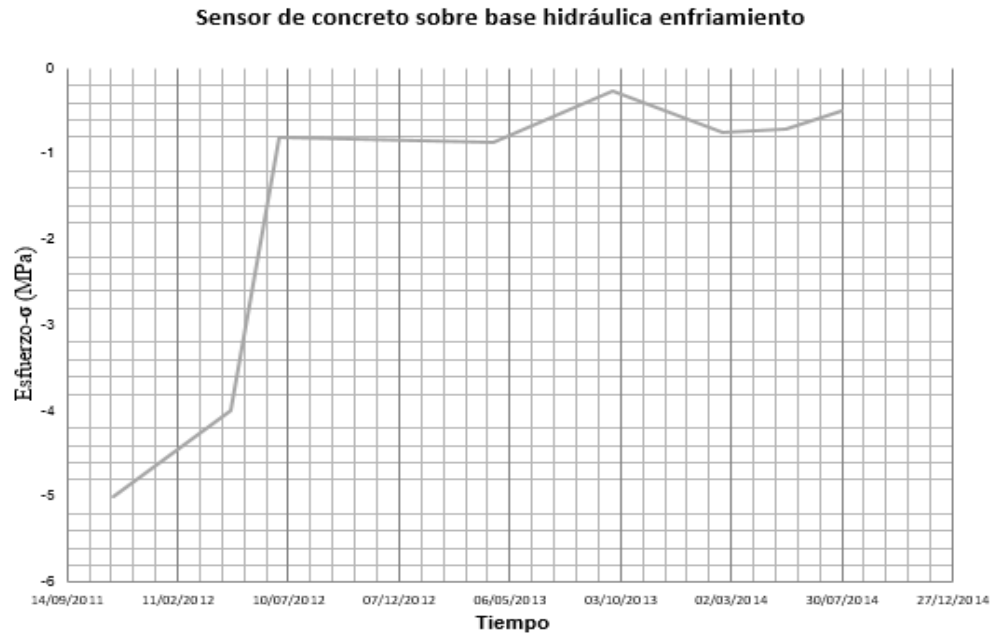


FIGURA 33.- Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el enfriamiento del sistema en el sensor CHIBL.

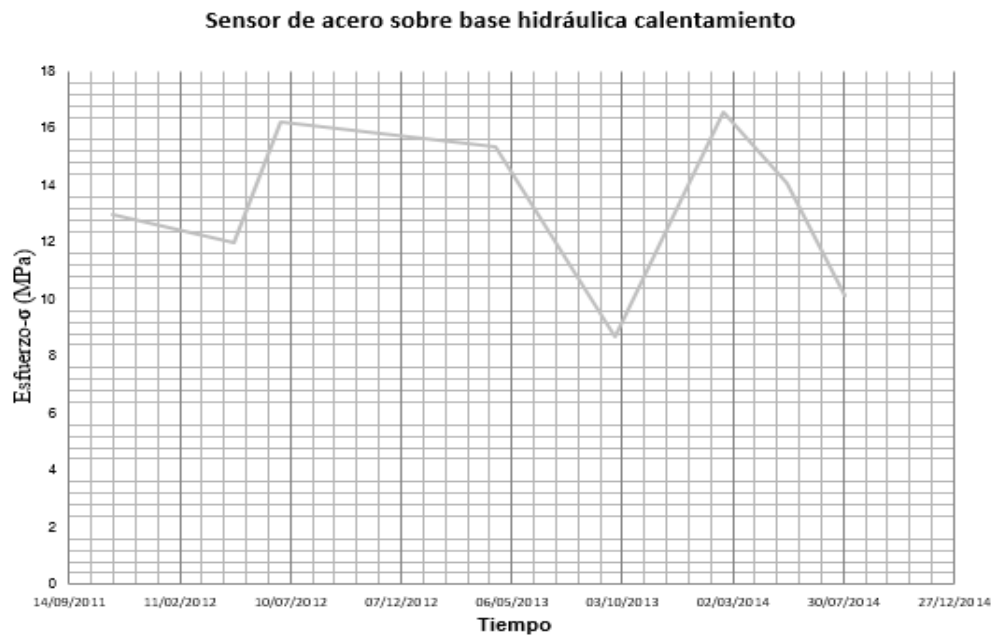


FIGURA 34.- Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el calentamiento del sistema en el sensor AH1BL.

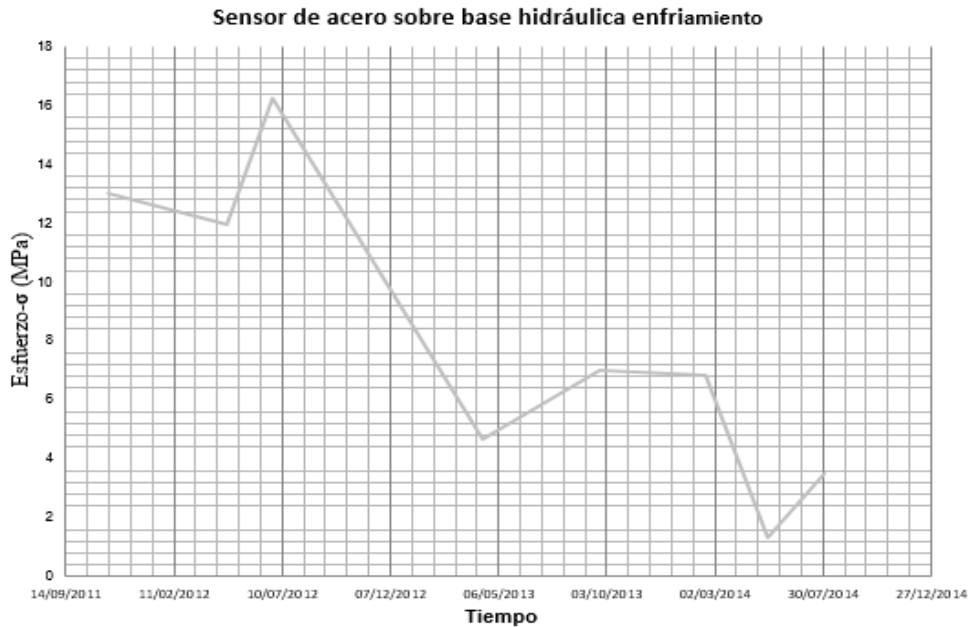


FIGURA 35.- Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el enfriamiento del sistema en el sensor AH1BL..

Los resultados obtenidos del sensor de concreto colocado en la rodera derecha sobre la base estabilizada (figura 36 y 37), son muy similares a los resultados observados en la base hidráulica y se puede concluir que sucede el mismo fenómeno de agrietamiento que secciona el concreto en bloques pequeños, por lo tanto ocurre una disminución de 5 Mpa a 0.2 Mpa. En el caso de los sensores de acero en la base estabilizada, (figura 38 y 39), se observa un disminución de la media de esfuerzos a partir de la segunda medición, también se encontró un estado a compresión a diferencia de los sensores de acero de la base hidráulica.

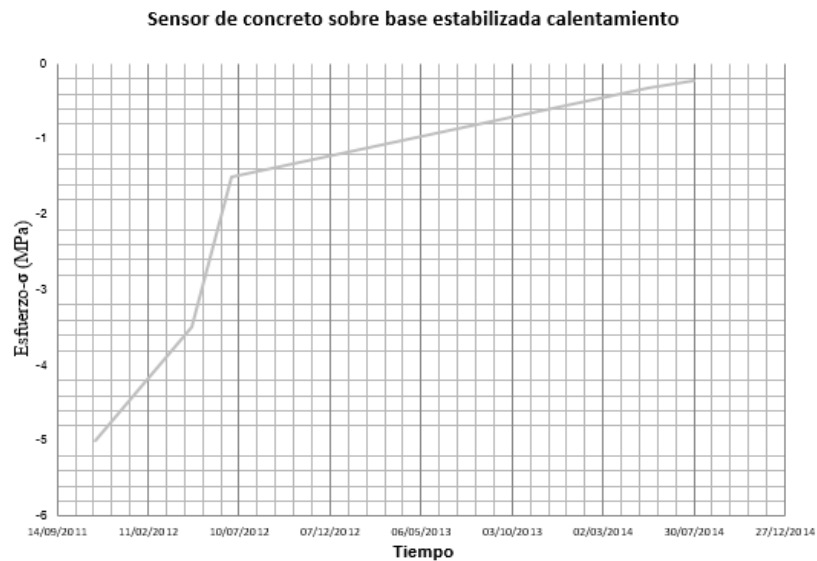


FIGURA 36.- Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el calentamiento del sistema en el sensor CE1BL

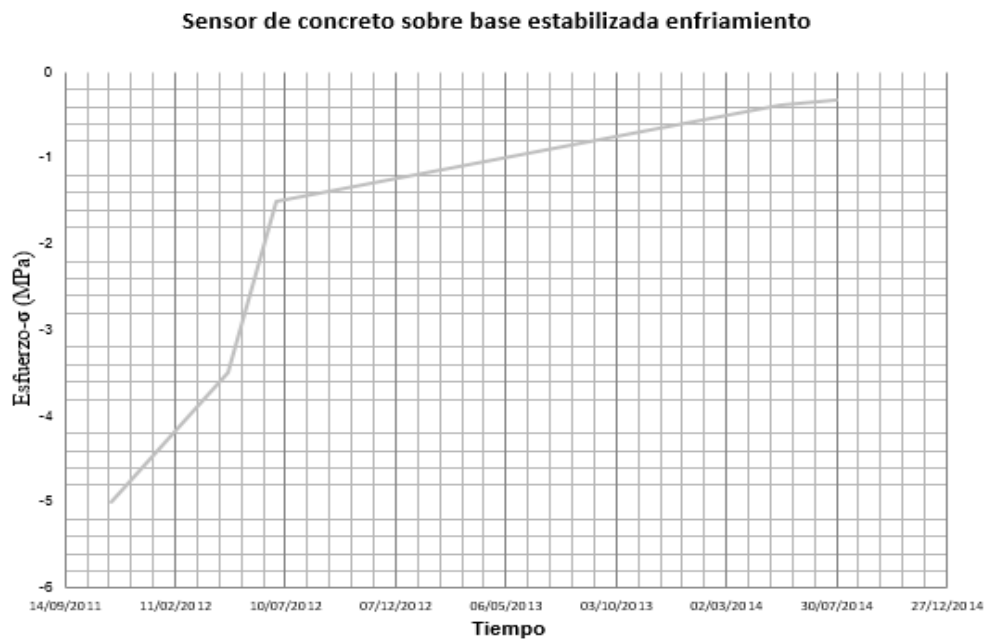


FIGURA 37.- Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el enfriamiento del sistema en el sensor CE1BL.

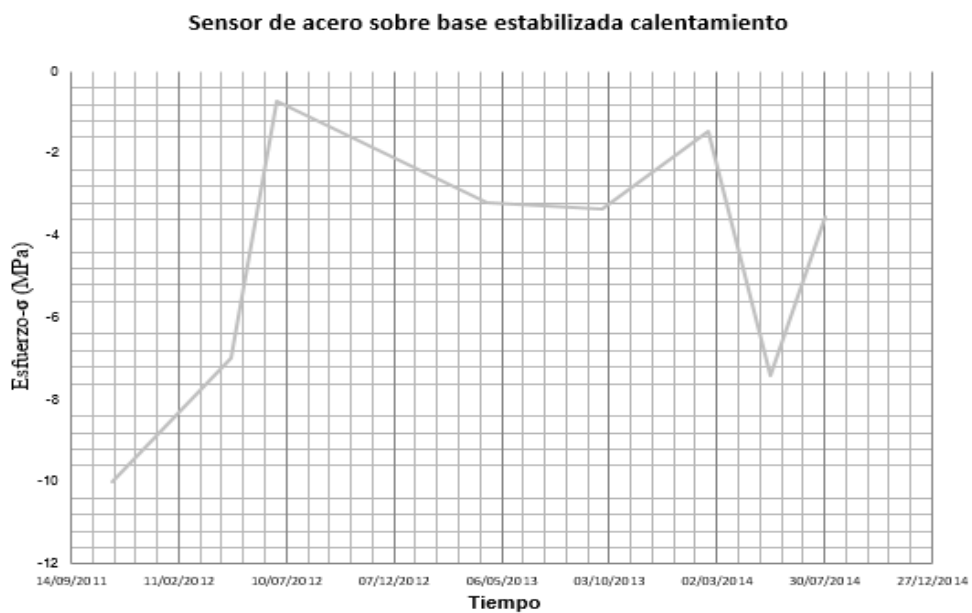


FIGURA 38.- Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el calentamiento del sistema en el sensor AE1BL.

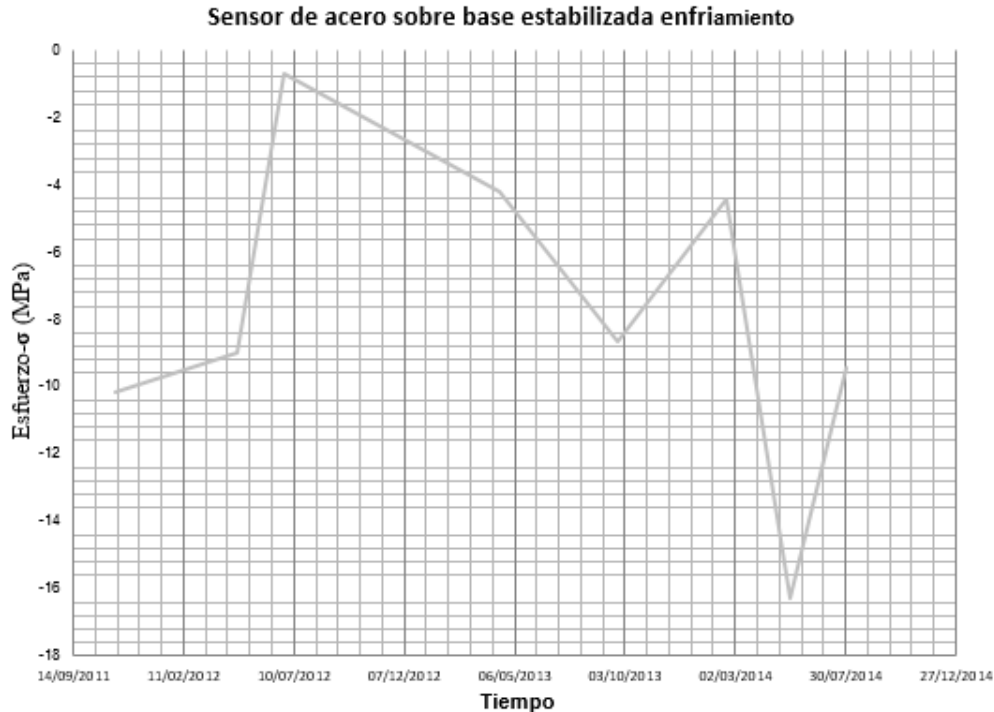


FIGURA 39.- Valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el enfriamiento del sistema en el sensor AE1BL.

4.2 Presentación de resultados por cargas de temperatura.

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

Las siguientes gráficas corresponden a los sensores ubicados a 6 cm de profundidad y muestran los valores de los esfuerzos producidos por el gradiente térmico a lo largo de las mediciones de 24 horas y durante 3 años de monitoreo.

Los resultados obtenidos de las gráficas del sensor CH1BL que se encuentra localizado en la rodera derecha (figura 40) permiten observar dos fenómenos, el primero es la compresión que tiene el sensor de concreto después de la fecha 27 de Junio del 2012 y la otra consiste en la disminución del rango de esfuerzos producidos por los ciclos térmicos, que rondan en una primera medición de 15 Mpa a 7 Mpa 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.

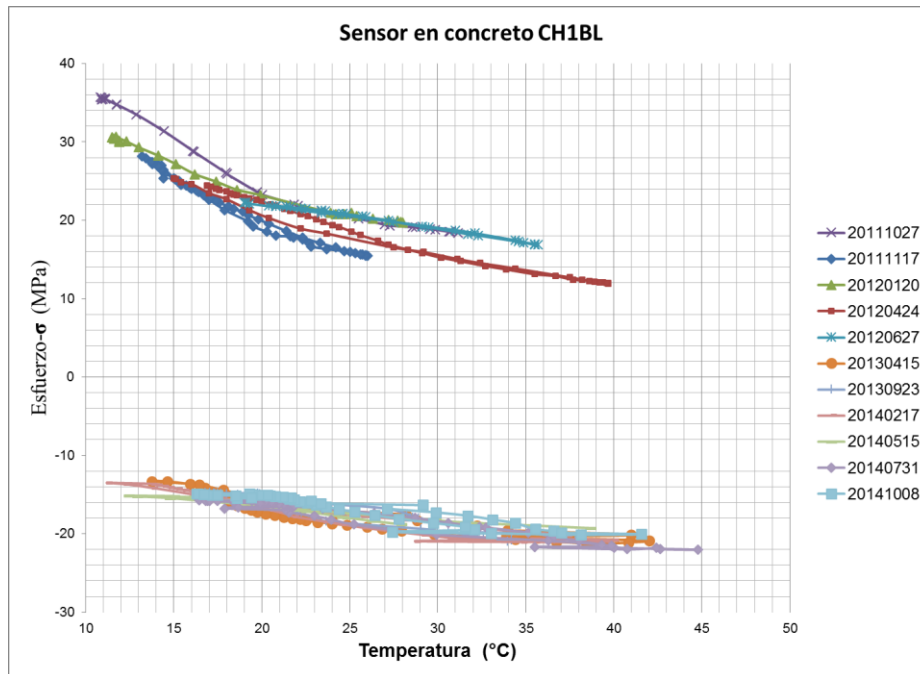


FIGURA 40.- Esfuerzo Temperatura CH1BL.

El siguiente análisis es el del sensor CH2BT, ubicado al centro de la losa y con sentido transversal, el cual presenta un comportamiento muy similar al primero, sólo con la diferencia de que su desplazamiento hacia la zona de compresión es gradual, lo cual se puede explicar debido a que existe un menor agrietamiento en sentido transversal.

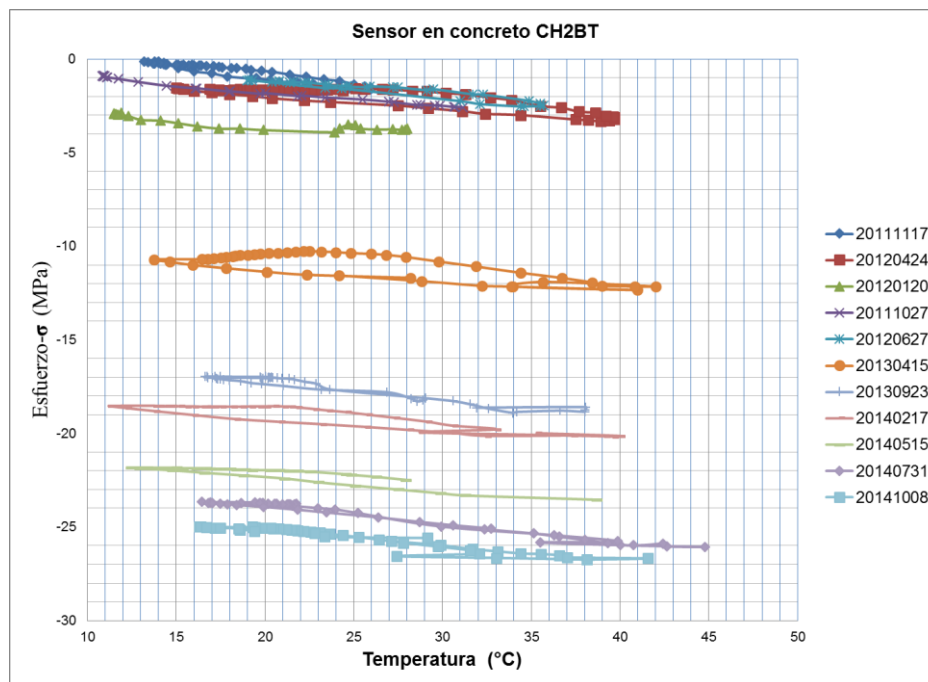


FIGURA 41.- Esfuerzo Temperatura CH2BT.

El sensor CH3BL se ubica en la rodera izquierda, cercano al carril de alta velocidad (figura 42), de igual forma tiene una tendencia similar, sin embargo presenta la particularidad 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 tiene un desplazamiento hacia la zona de compresión de entre 40 Mpa y 25 Mpa, este sensor tiene un desplazamiento hacia la zona de compresión de 7 Mpa.

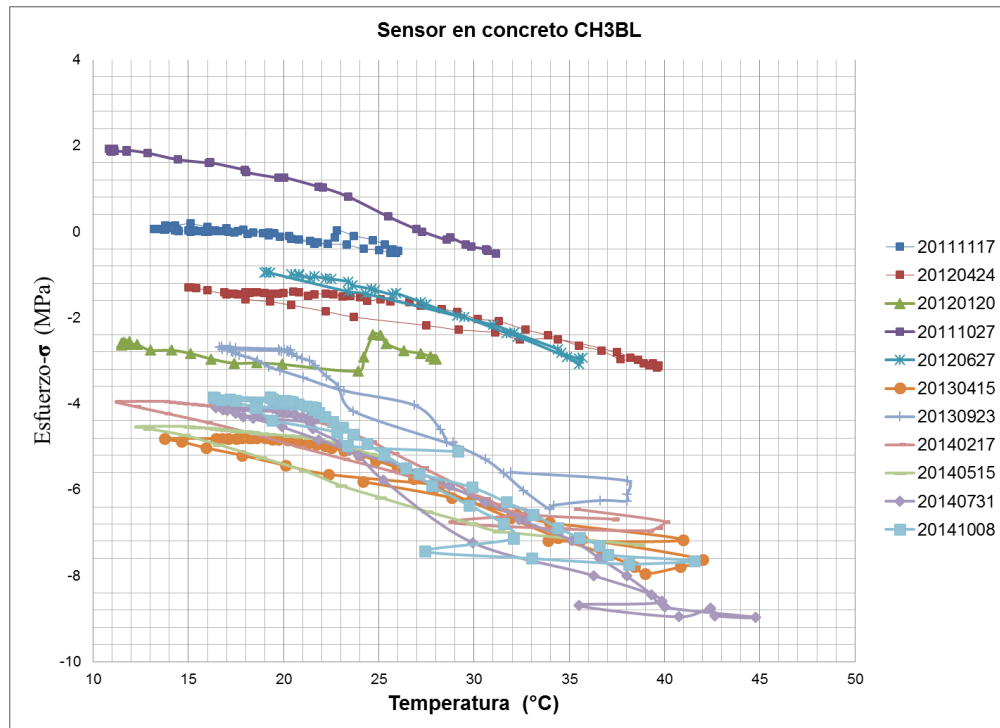


FIGURA 42.- Esfuerzo Temperatura CH3BL.

Para el caso de los sensores ubicados en base cementada, en general tienen un comportamiento similar a los de la base hidráulica, el sensor CE1BL (figura 43) se encuentra en la rodera del lado derecho a una profundidad de 6 cm. Este sensor como ya se mencionó, presenta un comportamiento similar al sensor espejo en la base hidráulica, pero con la salvedad de que los ciclos térmicos tienen un estado de 20 Mpa más a compresión que los sensores en la base hidráulica, también se observa que su rango de apertura de los ciclos térmicos es similar al de la base hidráulica entre 15 y 3 Mpa, ambos comportamientos pueden ser debidos a un mayor deterioro.

El sensor CE2BT (Figura 44), es un sensor 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 de los distintos monitoreos y su desplazamiento entre ambos estados no sobre pasa los 7 Mpa.

El último sensor de concreto sobre la base estabilizada, el CE3BL (Figura 45), es un sensor longitudinal ubicado junto al carril de alta velocidad, tiene un comportamiento a

compresión. En la siguiente gráfica se puede observar un desplazamiento de más de 40 Mpa a la zona de compresión.

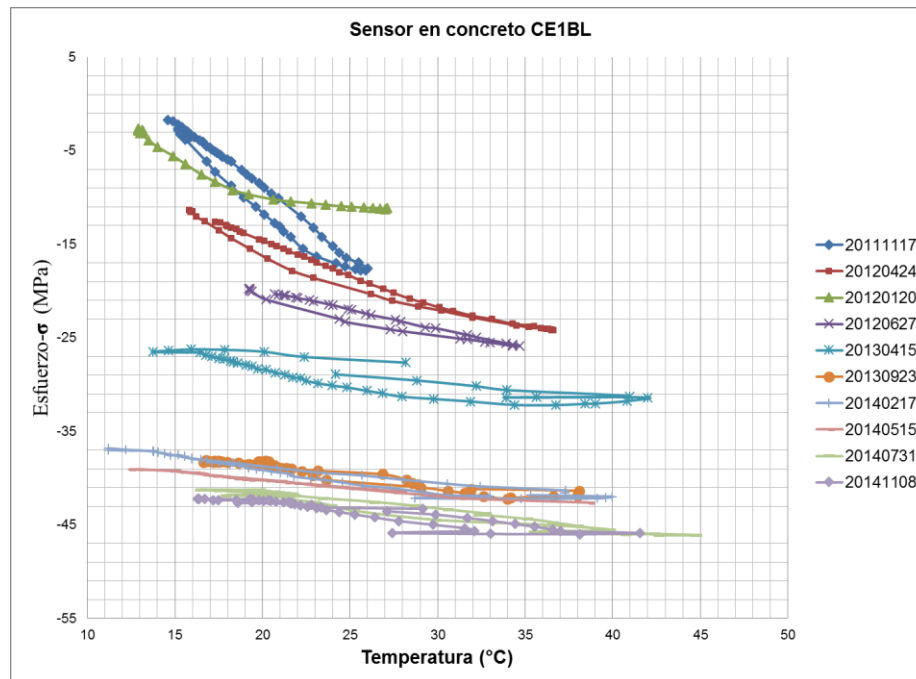


FIGURA 43.- Esfuerzo Temperatura CE1BL.

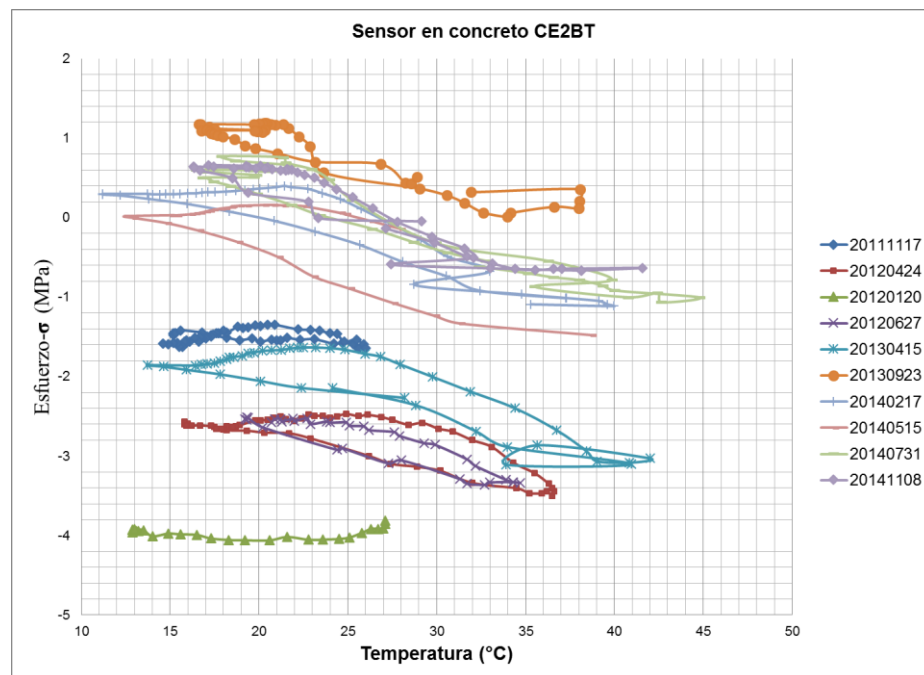


FIGURA 44.- Esfuerzo Temperatura CE2BT.

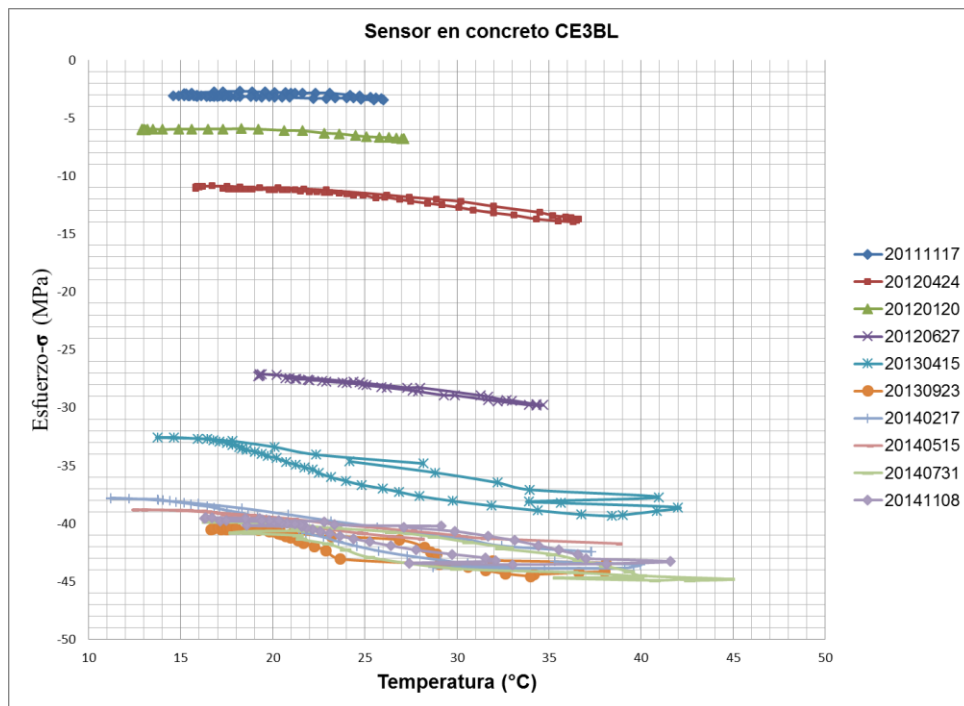


FIGURA 45.- Esfuerzo Temperatura CE3BL.

Posteriormente se analizaron los sensores de acero instalados en la base hidráulica, el primer sensor se localiza en la rodera derecha a 15 cm de profundidad, el AH1BL (figura 46), se observa que no ha tenido un desplazamiento a compresión como el sensor de concreto en la misma ubicación, además se observa que el rango de apertura de los ciclos térmicos no ha disminuido, esto puede significar que el agrietamiento aún no ha llegado a la parte inferior de la malla.

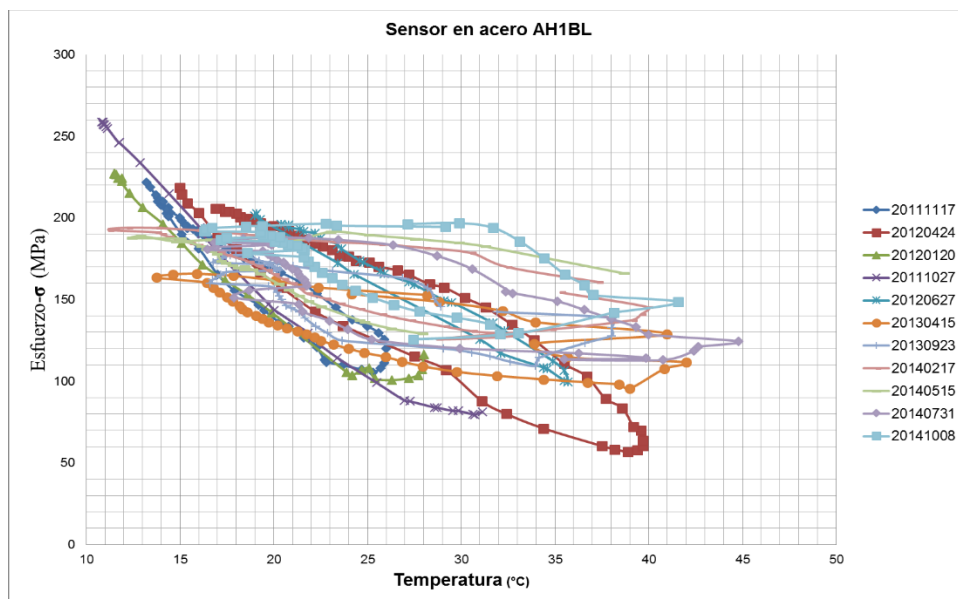


FIGURA 46.- Esfuerzo Temperatura AH1BL.

En el caso del sensor transversal AB2BT (figura 47), este ha pasado a un estado de compresión a lo largo del tiempo y con un rango de valores elevados, lo que significa que posiblemente sobrepasó límite de fluencia del acero y por consiguiente se tienen valores tan altos en este gráfico.

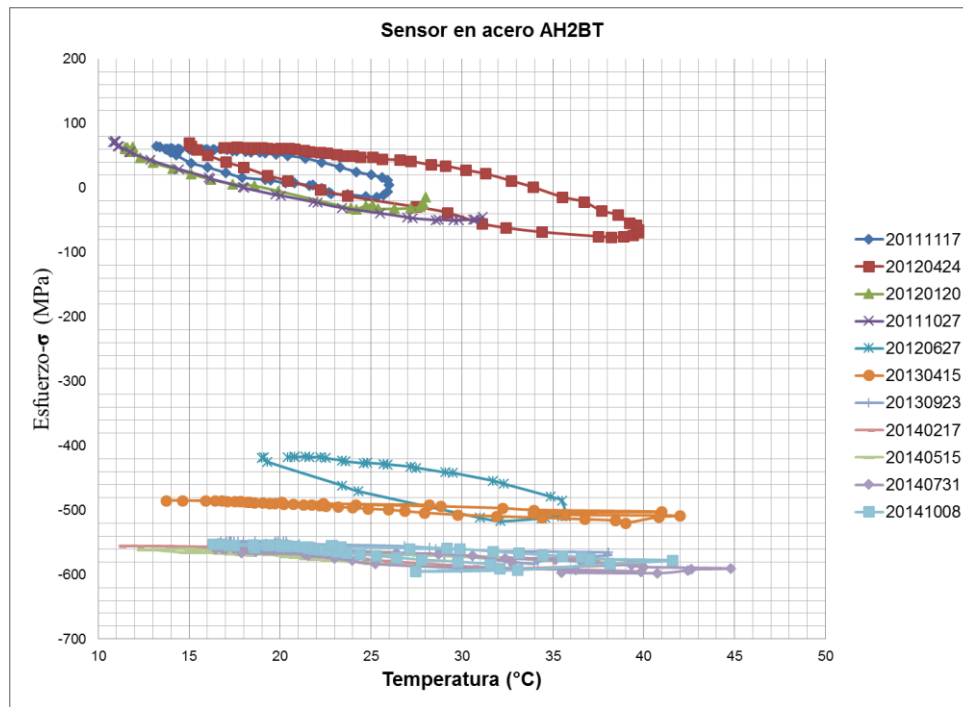


FIGURA 47.- Esfuerzo Temperatura AH2BT.

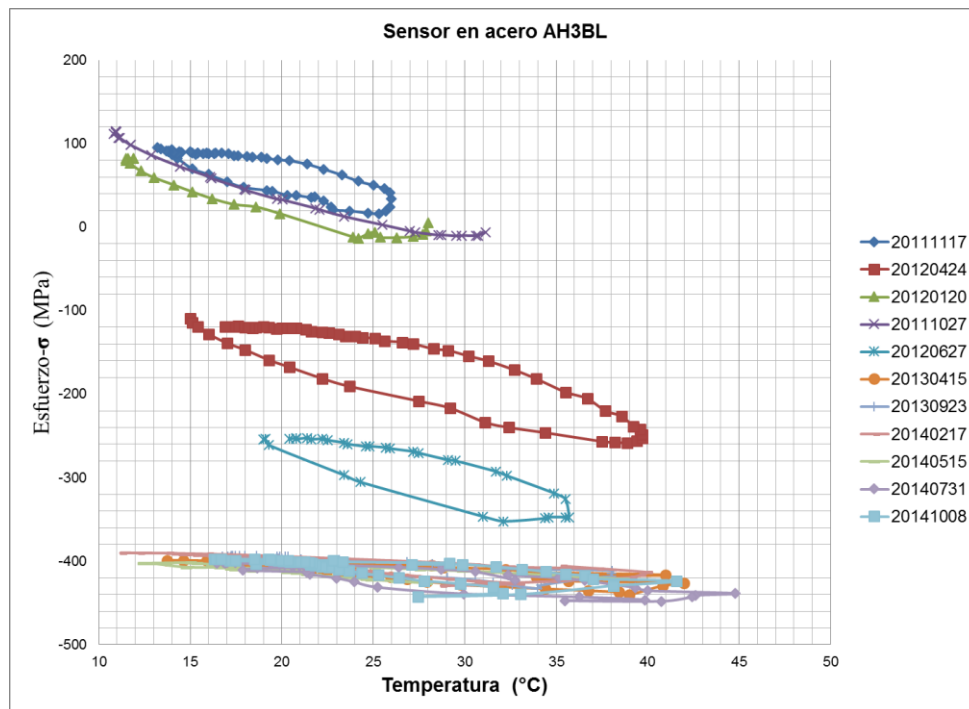


FIGURA 48.- Esfuerzo Temperatura AH3BL.

El sensor AH3BL (figura 48), localizado en la rodera contigua al carril de mediana velocidad, tiene un comportamiento muy similar al transversal, un estado a compresión gradual con respecto al tiempo y la alta probabilidad de que el acero de la malla en esta sección también se encuentre en la zona plástica.

A continuación se analizaron los sensores de acero en la base estabilizada, el primer sensor es el que se localiza en la rodera del lado derecho a una profundidad de 15 cm, el AE1BL(Figura 49), cuyo comportamiento es muy similar al de la base hidráulica, pero con la diferencia de que la apertura de los ciclos disminuyen bastante hasta ser de 40 Mpa a comparación de los 120 Mpa de su par en la base hidráulica.

El sensor colocado de forma transversal AE2BT (figura 50), tiene un comportamiento similar a su par de la base hidráulica, con tendencia a un estado de compresión, pero con un mayor desplazamiento casi de 200 Mpa, también podemos observar una disminución gradual en la apertura de su ciclo térmico, por lo que se puede concluir que esta sección de la malla también se encuentra en la zona plástica.

Para el sensor A3BL (figura 51) se puede observar que ha mantenido sus esfuerzos en una misma zona pero la apertura de su ciclo se ha disminuido un 50% aproximadamente.

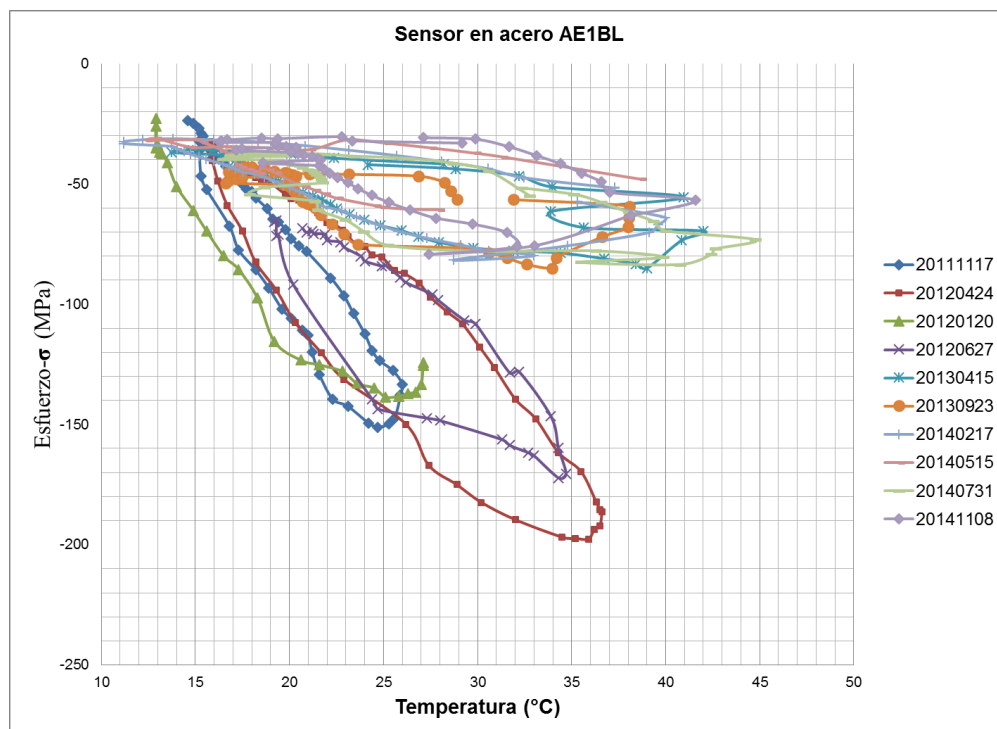


FIGURA 49.- Esfuerzo Temperatura AE1BL.

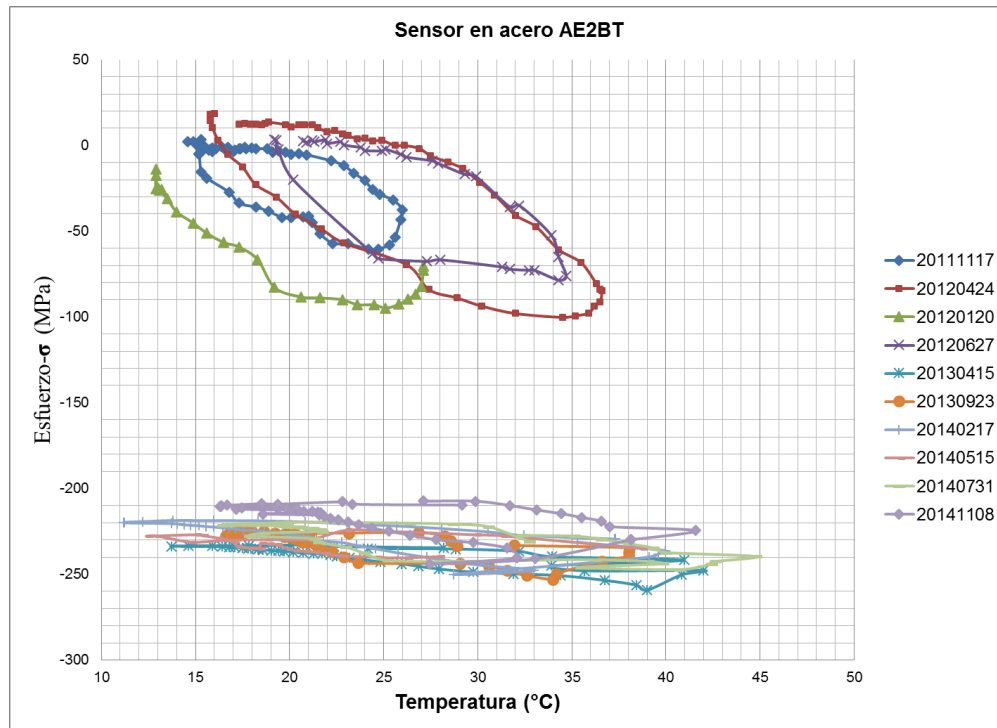


FIGURA 50.- Esfuerzo Temperatura AE2BT.

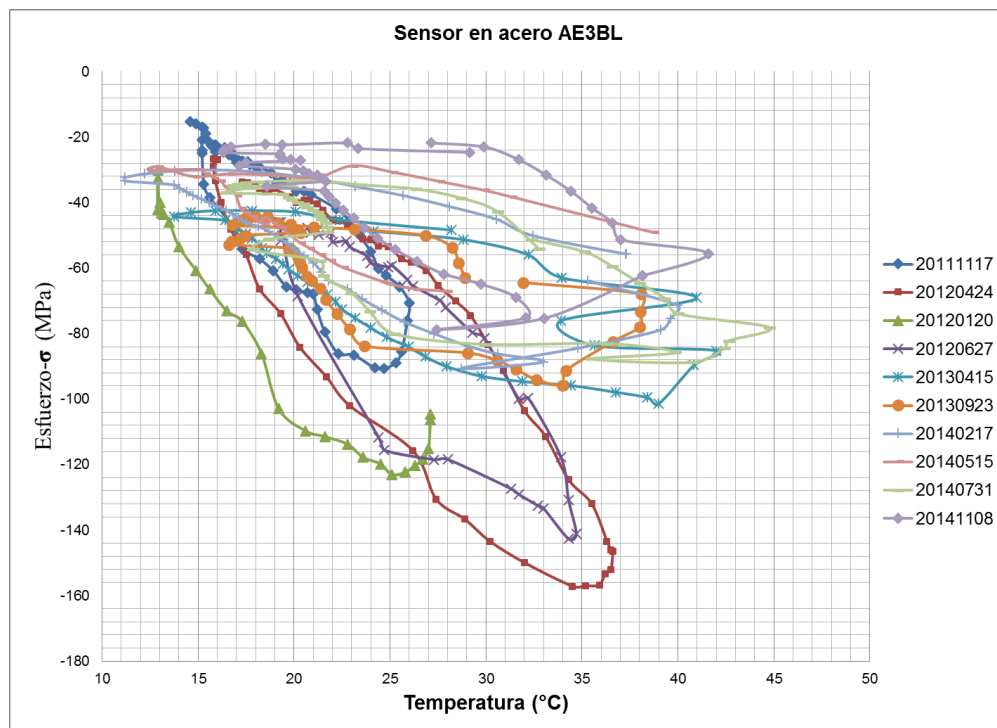


FIGURA 51.- Esfuerzo Temperatura AEB3L.

El siguiente análisis consiste en la evolución de la deformación del concreto y el acero por grado centígrado con la finalidad de ver un comportamiento a lo largo de los tres años de mediciones (Figura 52 y 53), en ambas figuras se observa un decremento del esfuerzo

desde la primera medición hasta la última que va en el orden de hasta 5 veces, esto se debe a la pérdida de rigidez del sistema, debido a la segmentación y agrietamiento del PCERC.

Sensor de concreto sobre base hidráulica.

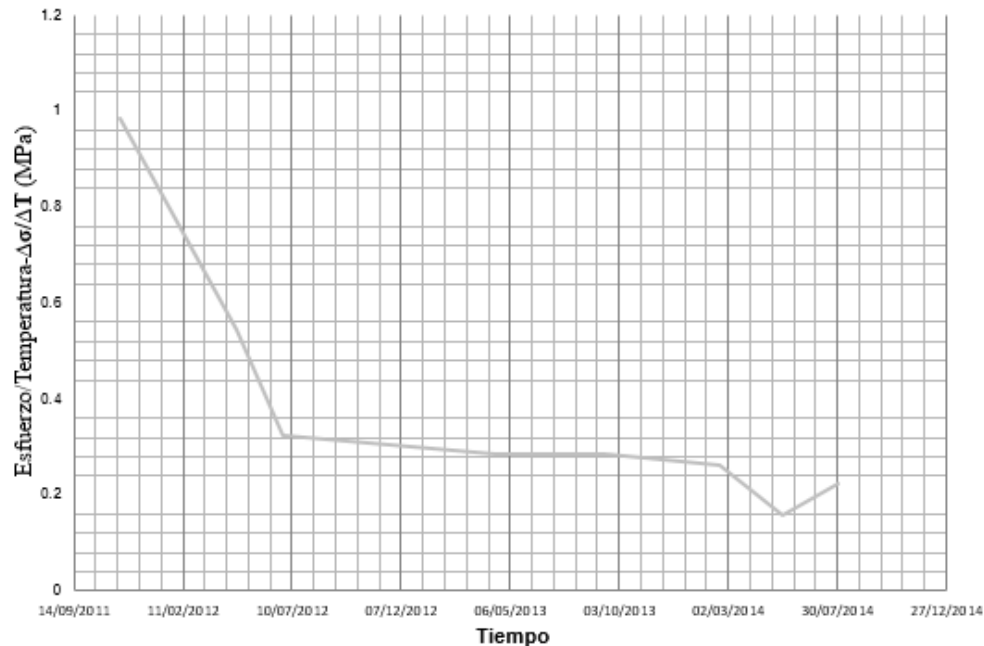


FIGURA 52.- Valor promedio del esfuerzo por grado centígrado para el sensor CHBIL.

Sensor de acero sobre base hidráulica.

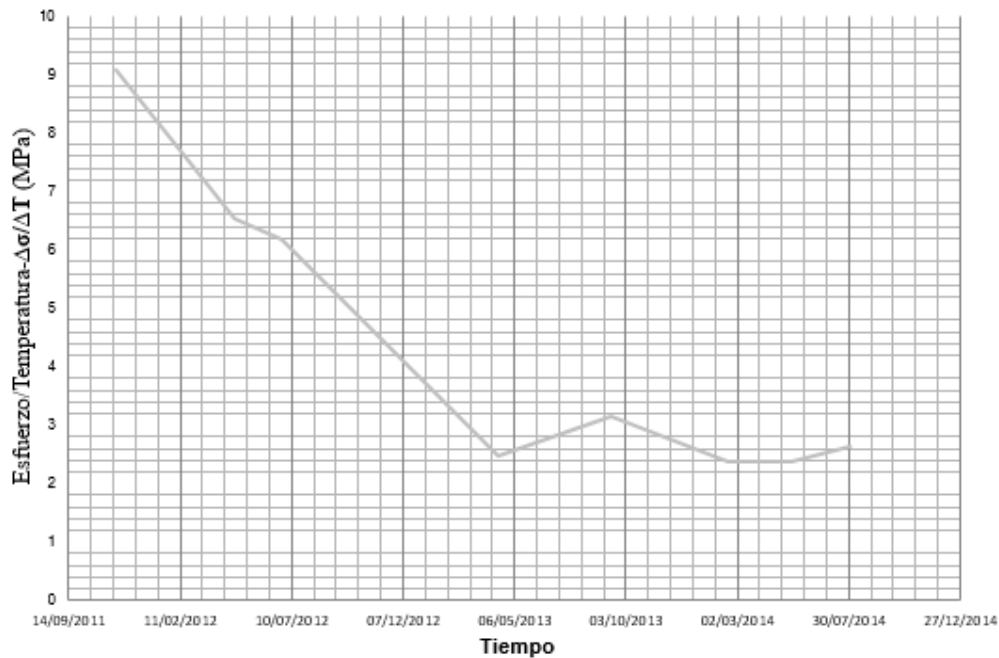


FIGURA 53.- Valor promedio del esfuerzo por grado centígrado para el sensor AHBIL.

Se realizó el mismo análisis para el sensor CEB1L y AEB1L (Figura 54 y 55), donde se pudo observar la misma tendencia, mientras que en la primera medición del CEB1L se obtuvo el resultado de 1.2 Mpa, al realizar su última medición se logró observar una disminución hasta el valor de 0.2 Mpa, lo cual refiere una pérdida de longitud o masa, que se ve reflejada en una menor estimulación del sistema.

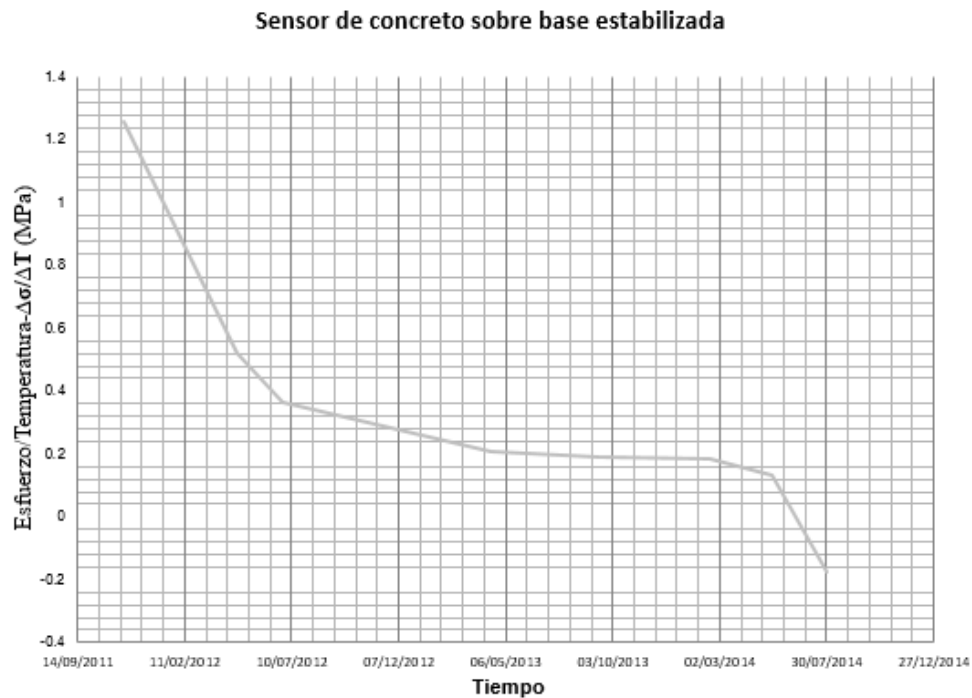


FIGURA 54.- Valor promedio del esfuerzo por grado centígrado para el sensor CEB1L.

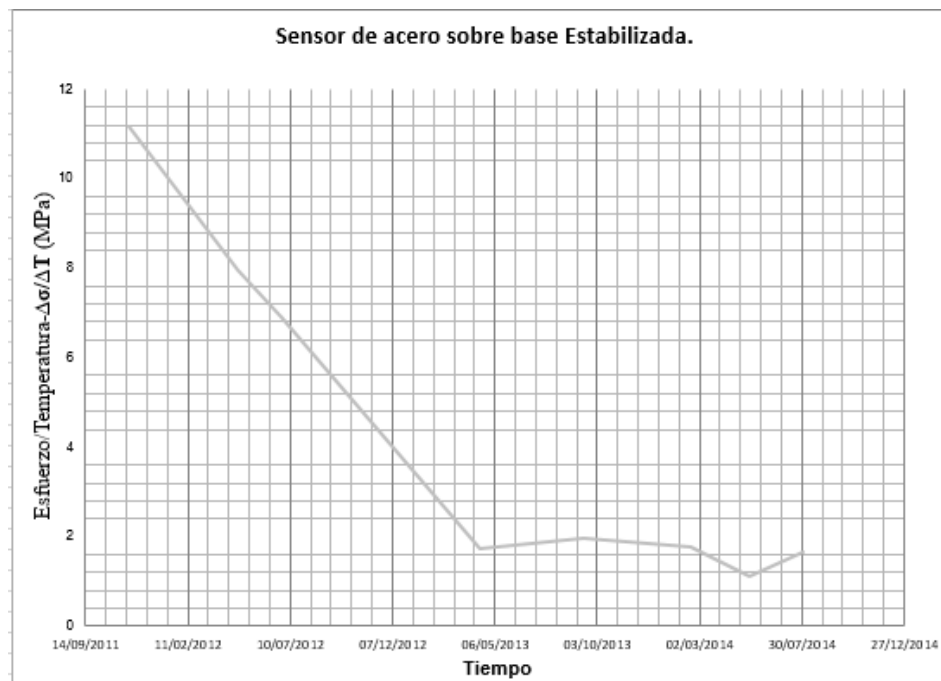


FIGURA 55.- Valor promedio del esfuerzo por grado centígrado para el sensor AEB1L.

En el caso del acero sobre la base estabilizada se observó el mismo patrón, una disminución en la apertura del ciclo térmico de 11Mpa y una final de 2 Mpa.

4.3 Creación y calibración de modelo.

Parte de la evaluación del pavimento fue la generación de un modelo de elemento finito que brindara la capacidad de simular los efectos térmicos en el PCERC, siendo calibrado 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 presentan un funcionamiento aceptable, hasta los valores frontera (mínimo y máximo), la simulación de los resortes, en los cuales es difícil determinar su estado actual, pues no se cuenta con sensores en las bases, que indique si existe un total o parcial contacto.

De igual forma cabe mencionar que el programa (Ansys) de elementos finitos con el que se modeló el pavimento 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 genera ciertas inconsistencia.

Finalmente y pese a todas estas limitaciones, se logró generar 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 se observa en la figura 56 y 57 el modelo tiene una tendencia similar a la presentada por el ciclo térmico, sin embargo este se ve limitado por las temperaturas que se asignan según la superficie de temperaturas, pero aún con estas limitaciones se observa una cercanía al valor de los puntos coincidentes del modelo.

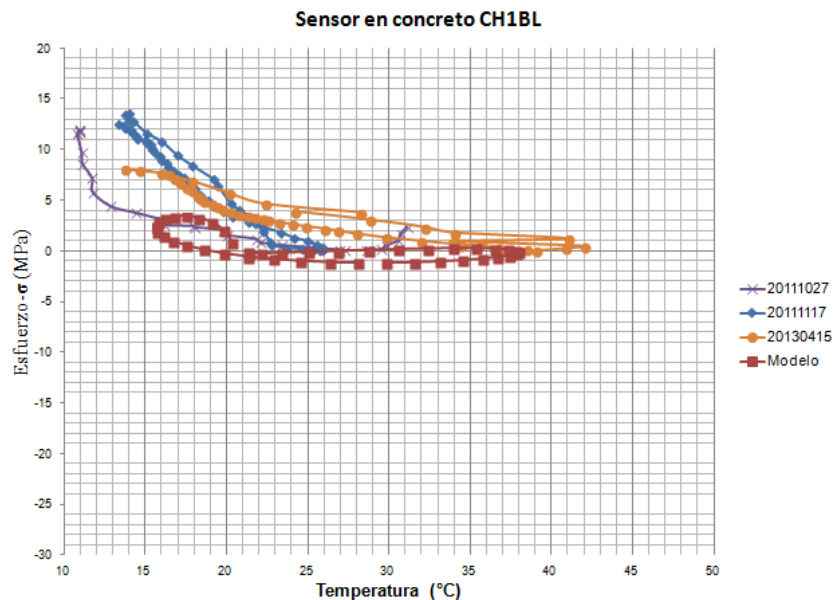


FIGURA 56.- Modelación del Sensor CH1BL.

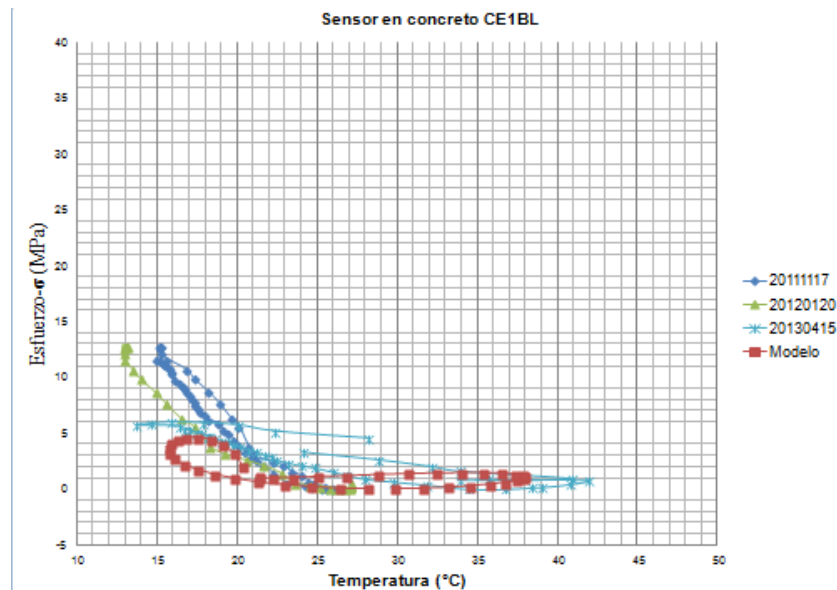


FIGURA 57.- Modelación del Sensor CE1BL.

En el caso de los sensores colocados transversalmente, (Figura 58 y 59), se observa una 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 esto generan una liberación de energía al no estar restringidos, pero el hecho de restringirlos podría generar una sobre excitación del modelo, provocando 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.

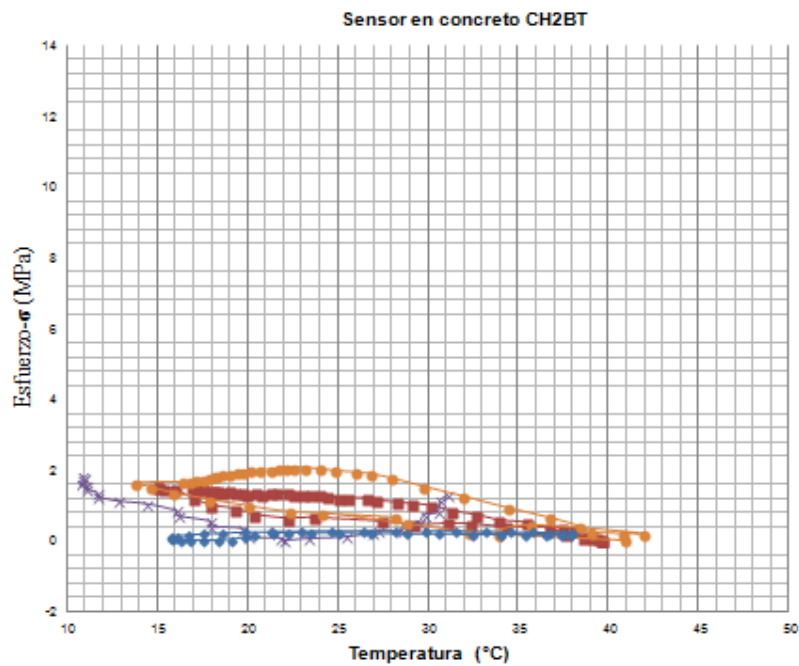


FIGURA 58.- Modelación del Sensor CH2BT.

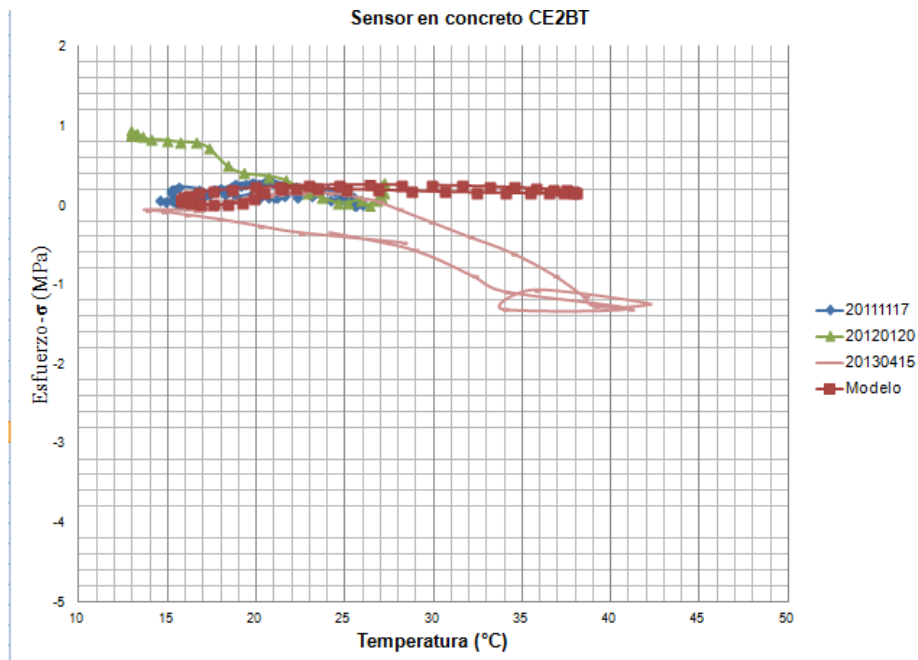


FIGURA 59.- Modelación del Sensor CE2BT.

En el caso de los sensores CH3BL y CE3BL (Figura 60 y 61), se observa una casi nula coincidencia, sin embargo el rizado hacia la temperatura fría presenta la tendencia a aumentar el valor a tensión de forma rápida, la cual el modelo si conserva.

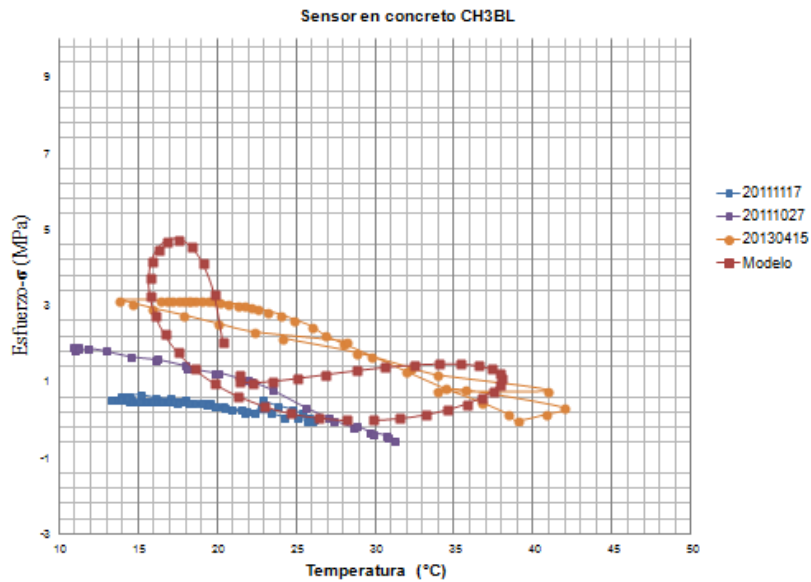


FIGURA 60.- Modelación del Sensor CH3BL.

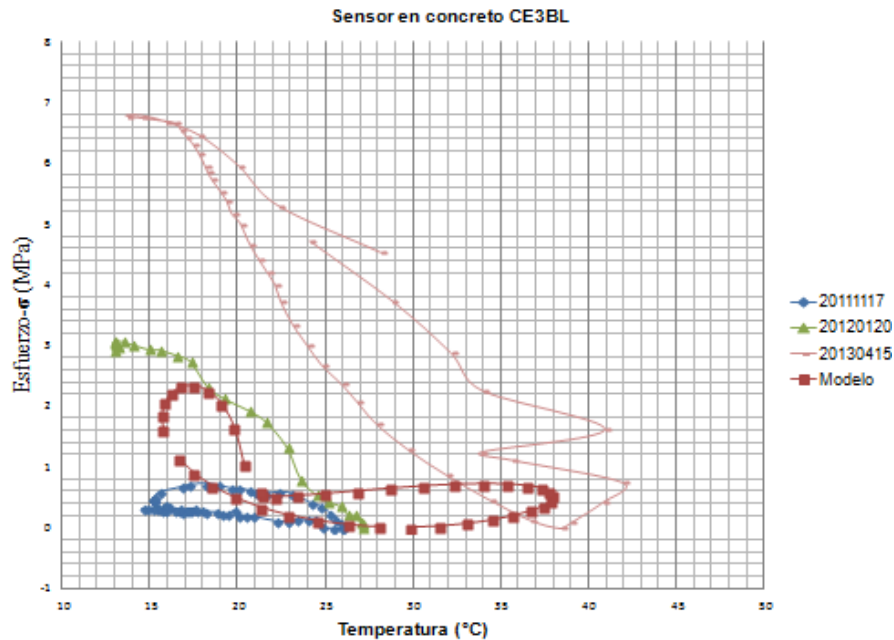


FIGURA 61.- Modelación del Sensor CE3BL.

4.4 Conclusiones.

Se observa que los esfuerzos registrados por los sensores de concreto en la base hidráulica y producidos por cargas de tránsito presentan una tendencia hacia compresión y los sensores de acero presentan una tendencia hacia tensión, mientras que ambos sensores tienen una disminución de las medias de esfuerzo, lo que indica una descomposición en bloques más pequeños.

El análisis realizado de los esfuerzos registrados por cargas de tránsito en la base estabilizada, en el caso de concreto, muestran una tendencia similar a los de la base hidráulica pero con un menor desplazamiento hacia la zona de compresión y en el caso del acero muestran un estado de compresión esto puede ser debido a que en la base estabilizada, se presenta un menor deterioro en la sección de la malla, por lo que no actúa a tensión como se su pondría.

Se observa una tendencia de los esfuerzos térmicos registrados en el PCERC a un estado de mayor compresión con respecto al tiempo y una apertura menor del ciclo térmico por el agrietamiento del sistema.

Se pudo generar un perfil de temperatura a partir de los datos experimentales para los cambios de temperatura del sistema durante el día, el cual pudo ser representado por un plano polinómico en el espacio. Lo anterior permitió simular el comportamiento del PCERC durante el día para comparar los ciclos térmicos experimentales.

Los resultados obtenidos de la simulación con EF tienen tendencias similares con los datos experimentales, sin embargo, los resultados se ven afectados debido a que el modelo está limitado a las ecuaciones de superficie de temperatura y a las ecuaciones de deformación, las cuales sólo pueden aplicarse en tres puntos de deformación por temperatura lineal y no lineal.

Del análisis realizado se observó que la base estabilizada presenta esfuerzos mayores que la base hidráulica.

5 BIBLIOGRAFÍA.

AASHTO. 1993. Design of Pavement Structures. America Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

AASHTO. 2007. Bridge Design Specifications SI Units. America Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

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

Akhter, M., H. Mustaque, J. Boyer y W. J. Parcells, 2007. Factors Affecting Rapid Roughness Progression on Portland Cement Concrete Pavement in Kansas. Transport. Res. 2300: 74-84.

Altoubat, S. A., J. R. Roesler, D. A. Lange, and K. A. Rieder. 2008. Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers. Constr. Build. Mater. 22: 384-393.

Ansys, INC. 2014. Tutorials, Examples & Curriculum - Ansys. Disponible en: <http://www.ansys.com>, [Último acceso: 25 Marzo 2015].

ASTM C 78, 2010. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)

ASTM C 1609-05, 2006. Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading).

Balbo, J. T. y A.A. Severi. 2007. Thermal Gradients in Concrete Pavement in Tropical Environment. Transport. Res. Rec. 2560: 12-22.

Brake, N. A., and A. Fatih, 2014. Accelerated fatigue damage of a rigid pavement overlying a sub-surface void: a computational analysis. TRB Annual Meeting, Estados Unidos.

Carrasco, C., M. Limouee, C. Tirado, S. Nazarian y J. Bendaña. 2011. Development of NYSLAB Improved Analysis Tool for Jointed Pavement. Transport. Res. 2227: 107-115.

Choi, S. y M.C. Won. 2009. Design of Tie Bars in Portland Cement Concrete Pavement Considering Nonlinear Temperature Variations. Transport. Res. 2095: 24-33.

Choi, S., S. Ha, y M. C. Won. 2011. Horizontal cracking of continuously reinforced concrete pavement under environmental loadings. Constr. Build. Mater. 25: 4260-4262.

FBG-Sensing-Advantages. 2011. Smart Fibres. Disponible en: <http://www.smartfibres.com/FBG-sensing-advan>

FHWA, 2013. Continuously reinforced concrete pavement: design using the AASHTO pavement ME design program. Tech Brief. FHWA-HIF-13-027: 1-11.

Garnica, P., J. A. Gómez, y Sesma, J. A., 2002. Mecánica de materiales para pavimentos. Publicación Técnica SCT-IMT, 197(0188-7297). p. 1-234, Sanfandila-Querétaro, México.

Gere, J. M., y B.J. Goodno. 2010. Mecánica de materiales. (Septima Ed.). CENGAGE, Ixtapaluca Ed. México.

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

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

Maitra, S. R., K. S. Reddy y L. S. Ramachandra, 2013. Estimation of Critical Stress in Jointed Concrete Pavement. *Procedia*, 2nd Conference of Transportation Research Group of India (2nd CTRG) , 104: 208-217.

MathWorks, INC, 2015. Disponible en: <http://www.mathworks.com> , [Último acceso: 16 Diciembre 2014].

Moaveni, S., 2003. *Finite Element Analysis, Theory and Application with Ansys*. (Segunda Ed.). Prentice Hall.

Mohamed, A. R. y W. Hansen. 1995. Prediction of Stresses in Concrete Pavements Subjected to Non-linear Gradients. *Cement and Concrete Composites*. 18: 381-387.

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

Nishizawa, T., T. Ozeki, K. Katoh y K. Matsui, 2009. Finite Element Model Analysis of Thermal Stresses of Thick Airport Concrete Pavement Slabs. *Transport. Res.* 2095: 3-12.

Pane, I., W. Hansen, and A. R. Mohamed. 1998. Three-Dimensional finite element study on effects of nonlinear temperature gradients in concrete pavement. *Transport. Res. Rec.* 1358: 58-66.

Pátil, V. A., V. A. Sawant, and K. Deb. 2010. Use of infinite element in the dynamic analysis of rigid pavement resting on two parameter soil medium. IGS Mumbai chapter IIT Bombay, Bombay, Indian.

Qin, Y., and J. E. Hiller. 2011. Modeling the temperature and stress distributions in rigid pavements: Impact of Solar radiation absorption and heat history development. *Civil Eng.* 1361-1371.

Quintana, J. A., F.J. Carrión, P.A. Garnica, S.E. Crespo, y J.A. Gutiérrez, 2013. Pavimento de concreto estructuralmente reforzado. *IC Ingeniería Civil*. 534: 26-30.

Rens, L., 2005. Continuously reinforced concrete-state-of-art in Belgium. *Betonzement*. 32-35.

Ryu, S. W., H. I. Won, S. Choi, and M. C. Won. 2013. Continuously reinforced bonded concrete overlay of distressed jointed plain concrete pavements. *Constr. Build. Mater.* 40: 1110-1117.

Santacruz, J. A., H.J. Montaña, R. Uribe, y A. Guerini. 2014. Pavimento de concreto hidráulico: retos y oportunidades. *IC Ingeniería Civil*. 541: 14-18.

Saurabh, J., Y. P. Joshi, and S. S. Goliya. 2003. Design of rigid and flexible pavements by various methods & their cost analysis of each method. *Journal of Engineering Research and Applications*. 3(5): 119-123.

SCT, 2006. Superficie de Rodadura. N-MMP-4-07-002/06.

SCT y GITS, 2008. Atlas de la red carretera de México.

Shoukry, S. N., G.W. William, y M. Riad. 2003. Nonlinear Temperature Gradient Effects in Dowel Jointed Concrete Slabs. *The International Journal of Pavement Engineering*.3: 131-142.

Treviño, E. L. y A. Olivares. 2006. Estudio experimental del comportamiento de un pavimento de concreto reforzado con mallas electrosoldadas de acero grado 60. Puerto Vallarta , XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural.

Tsubokawa, Y., J. Mizukami, y J. Yutaka. 2008. Study on effects of nonlinear distribution and slab thickness on thermal stress of airport concrete pavement. *International Journal of Pavement*. 1-8.

Woon, M. C. 2011. Continuously reinforced concrete pavement. identification of distress mechanisms and improvement of mechanistic-empirical design procedures. *Transport. Res. Rec.2(2226)*: 51-59.

Woon, M.C., 2005. Improvements of Testing Procedures for Concrete Coefficient of Thermal Expansion. *Transport. Res.* 1919: 23-28.

Yeon, J. H., S. Choi, y M. C. Won. 2013. In situ measurement of coefficient of thermal expansion in hardening concrete and its effect on thermal stress development. *Constr. Build. Mater.*38: 306-315.

Yiqiu, T., W. Haipeng, M. Shaojun, and X. Huining. 2014. Quality control of asphalt pavement compaction using fiber Bragg. *Constr. Build. Mater.*54: 53-59.


Zokaei-Ashtiani, M.A., C. Carrasco y S. Nazarian, 2014. Finite element modeling of slab–foundation interaction on rigid pavement applications. *Computers and Geotechnics*. 62: 118-127.

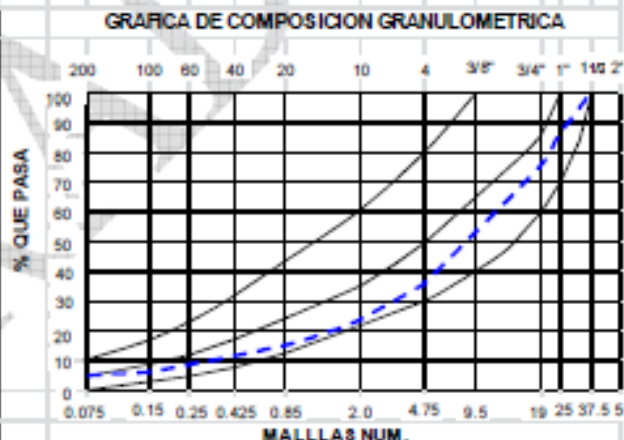
Zokaei-Ashtiani, M. A., C. Tirado, C. Carrasco, S. Nazarian, y J. Bendaña. 2013. Modeling of Slab-Foundation Friction in Jointed Concrete Pavements Under Nonlinear Thermal Gradient or Traffic Loads. *Transport. Res. Rec.2367*: 123-131.

6 ANEXOS

Anexo 1.- Curva granulometría de material pétreo.

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

		SERVICIOS TECNICOS DE INGENIERIA		Laboratorio de Suelos y Concreto	
		INFORME DE ENSAYE DE MATERIAL PARA BASE HIDRAULICA BANCO LAS BRUJAS "AGACEL AGREGADOS Y ASFALTOS S.A DE C.V."			
OBRA:	RECONSTRUCCION AUT. MEXICO-QUERETARO	REPORTE No.	01 - MQ/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			
			ESPECIF.	PRUEBAS EN MAT. MAYOR QUE LA MALLA N ^o m. 9.5	
V.R.S (ESTANDAR)%	103.2	100 m/in.	ABSORCION %	1.29	
EXPANSION %	0.0		DENSIDAD	2.62	
EQUIVALENTE DE ARENA %	70.7	50 m/in.	DURABILIDAD		
PRUEBAS SOBRE MATERIAL TAMIZADO POR LA MALLA N ^o m. 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 Tecomán
Carretera a Caleras Km. 1.5
C.P. 28130
Tecomán, 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 -ONNCEE-2010		Resultado	Unidades	
		Mínimo	Máximo			
Resistencia a la Compresión	3 días	NMX-C-081	-	-	29.8	N/mm ²
	28 días*	NMX-C-081	40 N/mm ²	-	41.7	N/mm ²
Tiempo de Fragado	Inicial	NMX-C-050	45 minutos	-	103	minutos
	Final	NMX-C-050	-	600 minutos	291	minutos
Estabilidad de volúmenes en auto clave		NMX-C-082	- 0.20 %	0.80 %	0.008	%
Exposición en tarso sumergidos a 14 días		NMX-C-185	-	0.020 %	0.011	%

Especificaciones Químicas	Método de Prueba	Especificación de la Norma NMX-C-614 -ONNCEE-2010		Resultado	Unidades	
		Mínimo	Máximo			
Tiempo de Azúcar (SO ₃)**		NMX-C-131	-	4.0 %	4.0	%

* Resultado de una muestra entera



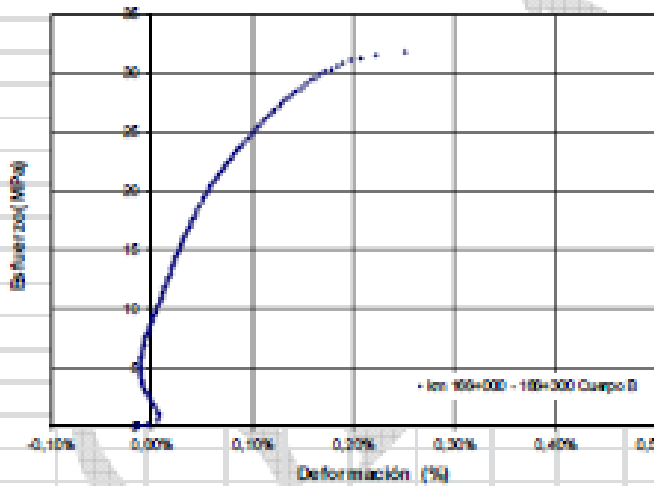
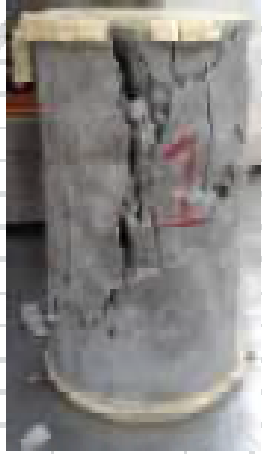
** De acuerdo a la norma NMX-C-414-ONNCEE vigente, el límite de sulfato de azufre (SO₃) permitido puede excederse si las exposiciones obtenidas en el ensayo de tarso sumergidos en agua a 14 días, determinada conforme a la norma NMX-C-185-ONNCEE vigente, son menores a 0.020 % máximo estipulado.

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>58271 - 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 a 8,44	8,057	(mm)		
DIAM. ALAMBRE TRANS./ TRANS. WIRE DIAMETER	7,71 a 8,44	8,19	(mm)		
R. TENSION LONG./ LONG. TENSILE STRENGTH	70 Mínimo	77,90	(kgf/mm ²)		
R. TENSION TRANS./ TRANS TENSILE STRENGTH	70 Mínimo	77,60	(kgf/mm ²)		
R. FLUENCIA LONG./ LONG. YIELD STRENGTH	60 Mínimo	72,70	(kgf/mm ²)		
R. FLUENCIA TRANS./ TRANS. YIELD STRENGTH	60 Mínimo	74,40	(kgf/mm ²)		
ELONGACION LONG./ ELONGATION LONG.	9,95 Mínimo	11,2	(%) en 200mm		
ELONGACION TRANS./ ELONGATION TRANS.	9,95 Mínimo	11,1	(%) en 200mm		
ANCHO DE MALLA / WIDTH	2,595 a 2,605	2,604	(m)		
LONGITUD DE MALLA / LENGTH	3,435 a 3,445	3,44	(m)		
R. CORTE DE SOLDADURA / WELD SHEAR STRENGTH	1460 Mínimo	3209	(kg-F)		
ANALISIS QUIMICO / CHEMICAL ANALYSIS					
SAE	% C	% Mn	% P	% S	% Si
1018 SAE	0,15 - 0,18	0,30 - 0,60	0,04 Max	0,05 Max	0,10 - 0,30
ASESORAMIENTO DE CALIDAD / QUALITY DEPARTMENT					
 Jefe de Calidad / Quality Chief					
DOCUMENTO PROPIEDAD DEL CLIENTE					
Esta 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, Sanandía, mpio de Pedro Escobedo, Querétaro 76700</small>			
REPORTE DE ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE EN ESPÉCIMENES DE CONCRETO					
Clave del Servicio/Proyecto					IE-13/11
Datos del colofante					
Nombre colofante/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:					
Espécimen No.:		1			
Diámetro espécimen:		101,81	mm	Altura espécimen:	199,95
Peso volumétrico húmedo ($\gamma_{m,1}$)		2362,24739	kg/m ³	=	23,17
				f_o =	31,76
					MPa
					
Observaciones:					
Calculó:					
José Antonio Gómez López					
Encargado del Área de Mecánica de Rocas y Agregados					

Anexo 5.- Ficha técnica e 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

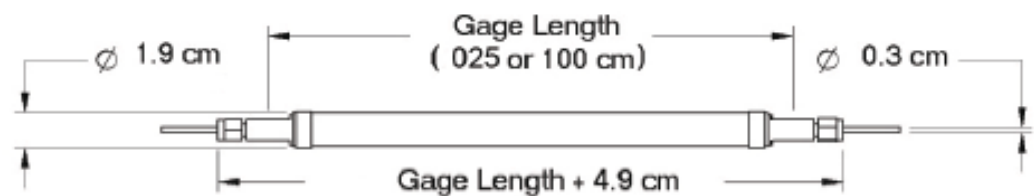
Dimensions	See Diagram Below
Weight	280 g
Material	Stainless steel/ Teflon construction
Cable Length	1 m (± 10 cm), each end
Cable Type	3 mm armored cable
Connectors	FC/APC with Connector Protection Fitting included, each end
Cable Bend Radius	≥ 17 mm
Fastening Methods ³	Bolt-on, Grout-in, Weldable, 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 de 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 (R _{max})	> 70%
FWHM (-3 dB point)	0.25 nm (± .05 nm)
Isolation	> 15 dB (@ ± 0.4 nm around center wavelength)

Anexo 7.- Ficha técnica sensor de temperatura.

Non-metallic Temperature Sensor | os4300

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

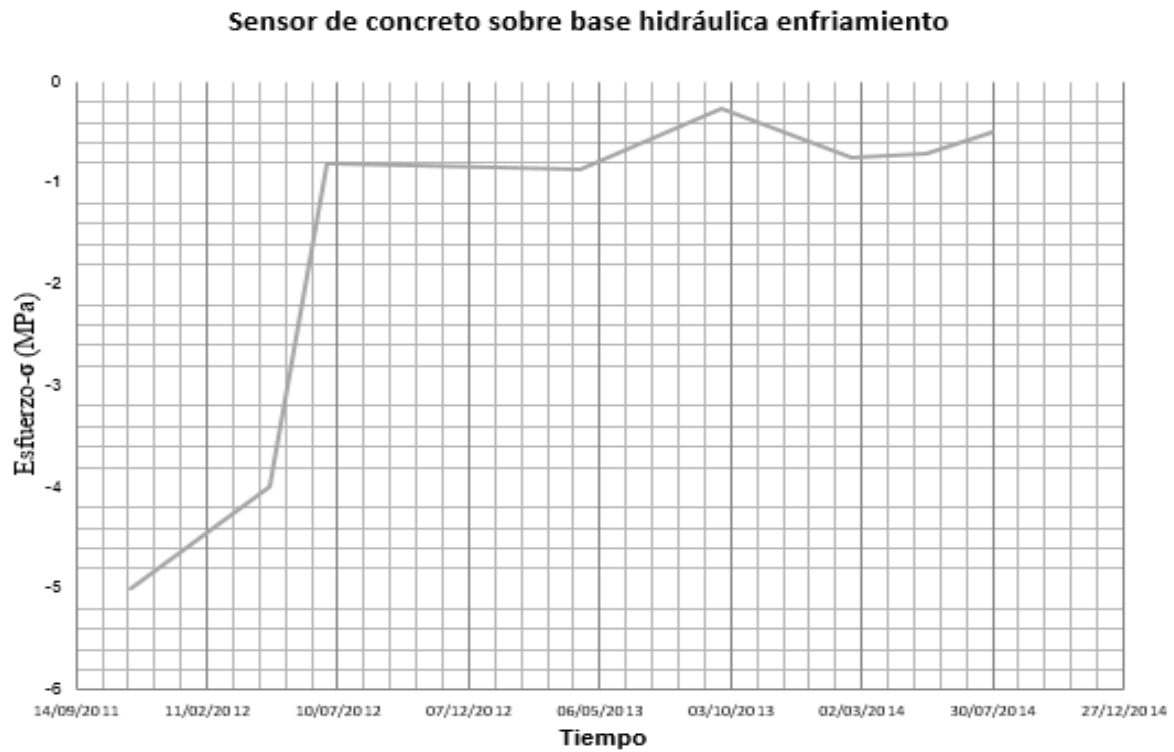
Anexo 8.- Ficha técnica de interrogador.

Optical Sensing Interrogator | sm130

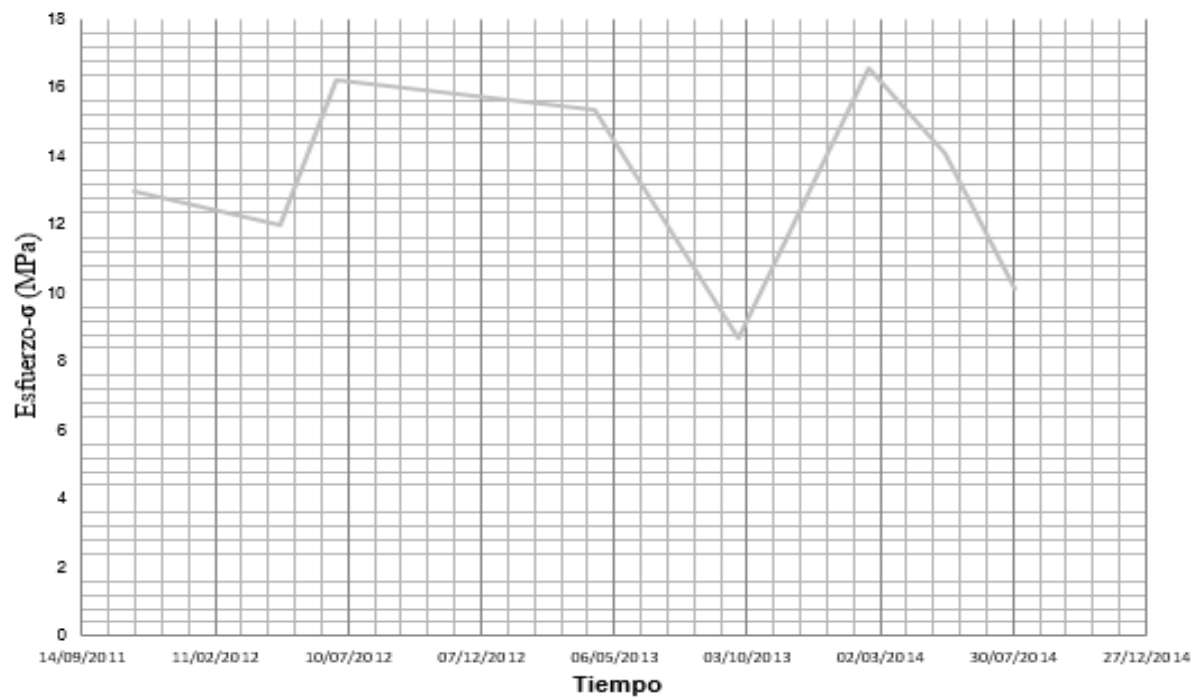


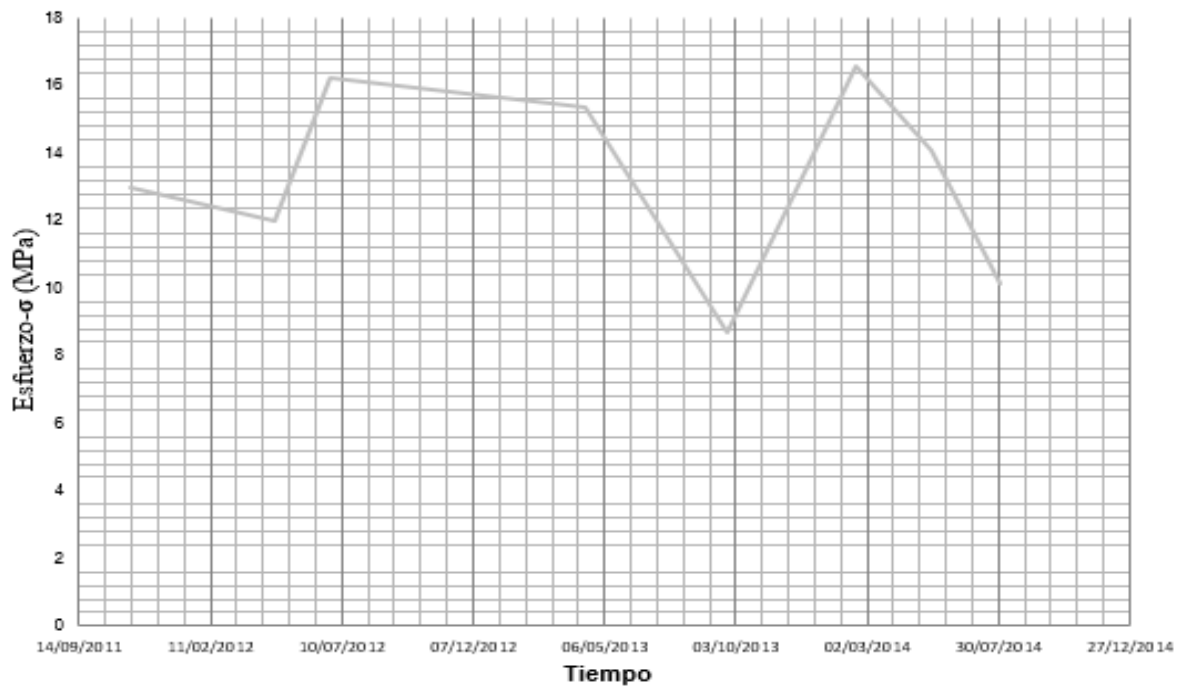
Specifications	sm130-200	sm130-500	sm130-700
Optical Properties			
Number of Optical Channels ²	1 (up to 16)	4 (up to 16)	4 (up to 16)
Scan Frequency	100 Hz	500 Hz	1 KHz
Wavelength Range	1510-1590 nm		
Wavelength Stability ²	2 pm typ, 5 pm max		
Wavelength Repeatability ⁴	1 pm, 0.05 pm with 1,000 averages		
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 +/- 0.05nm, 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		

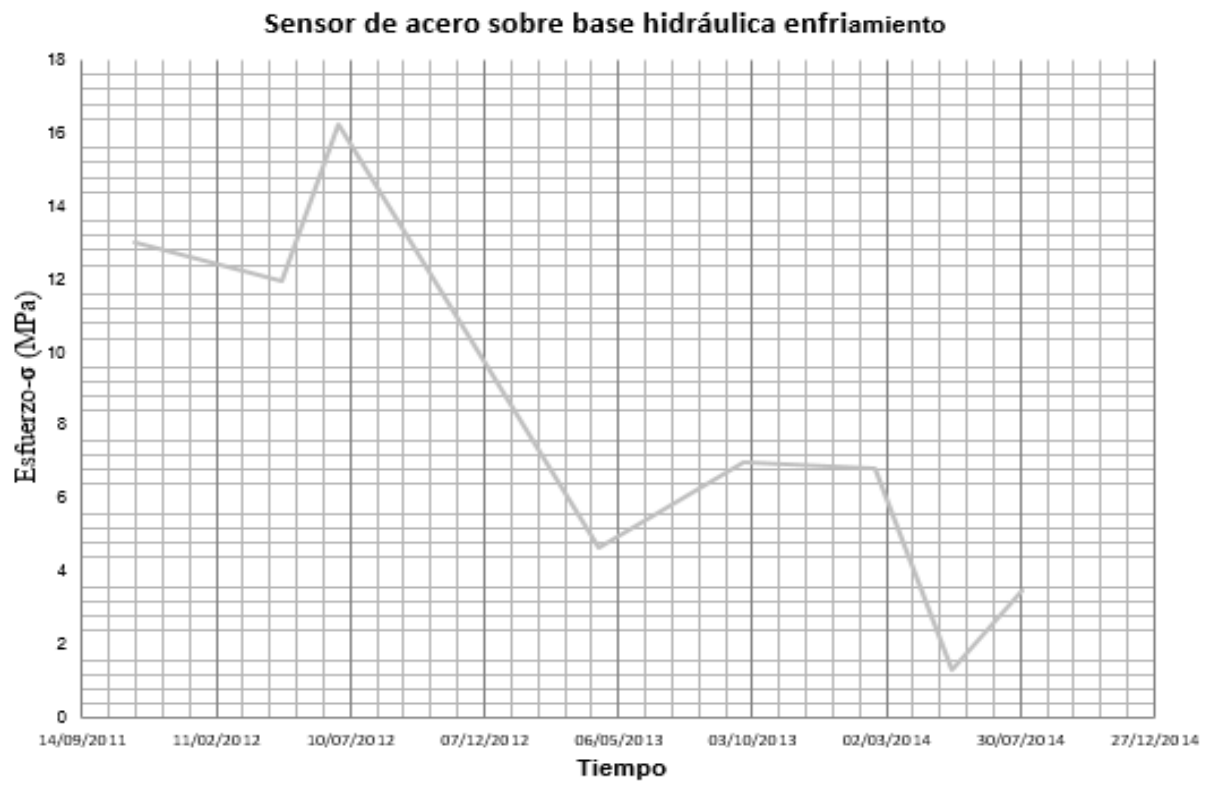
Anexo 9.- Gráficas del valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el calentamiento y enfriamiento base hidráulica.



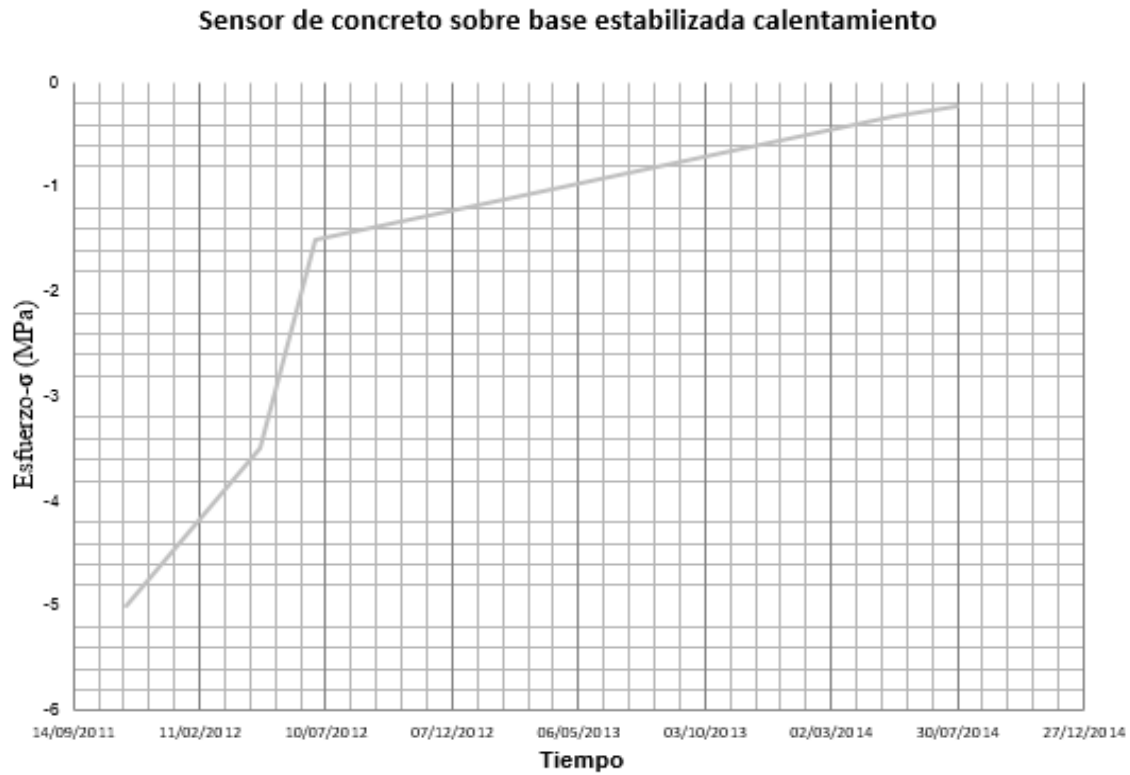
Sensor de acero sobre base hidráulica calentamiento

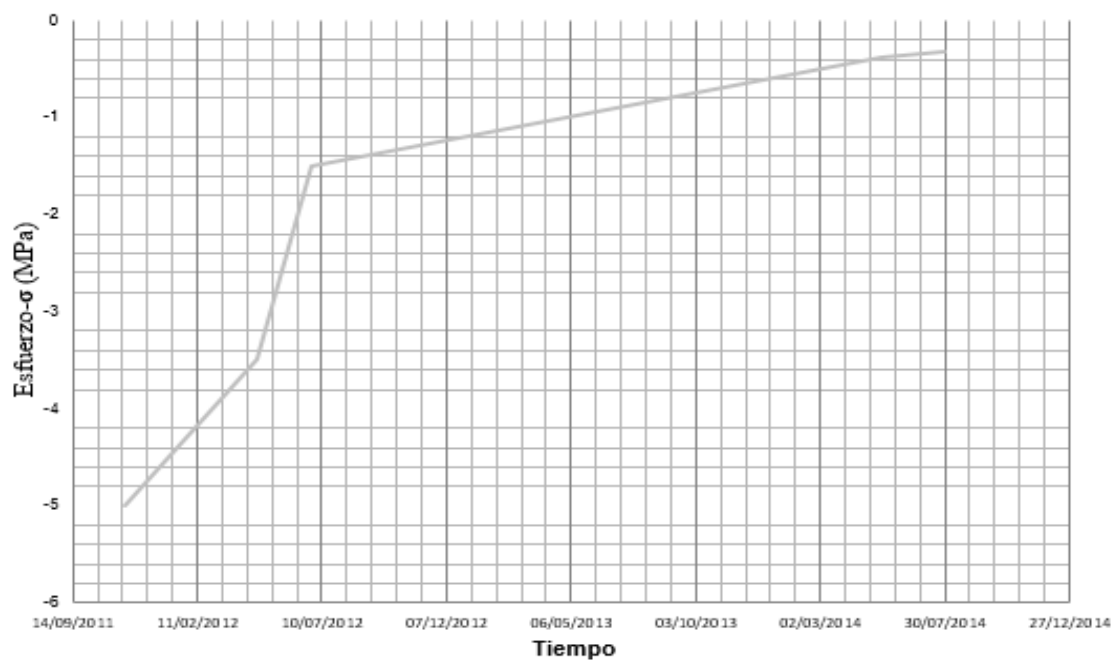


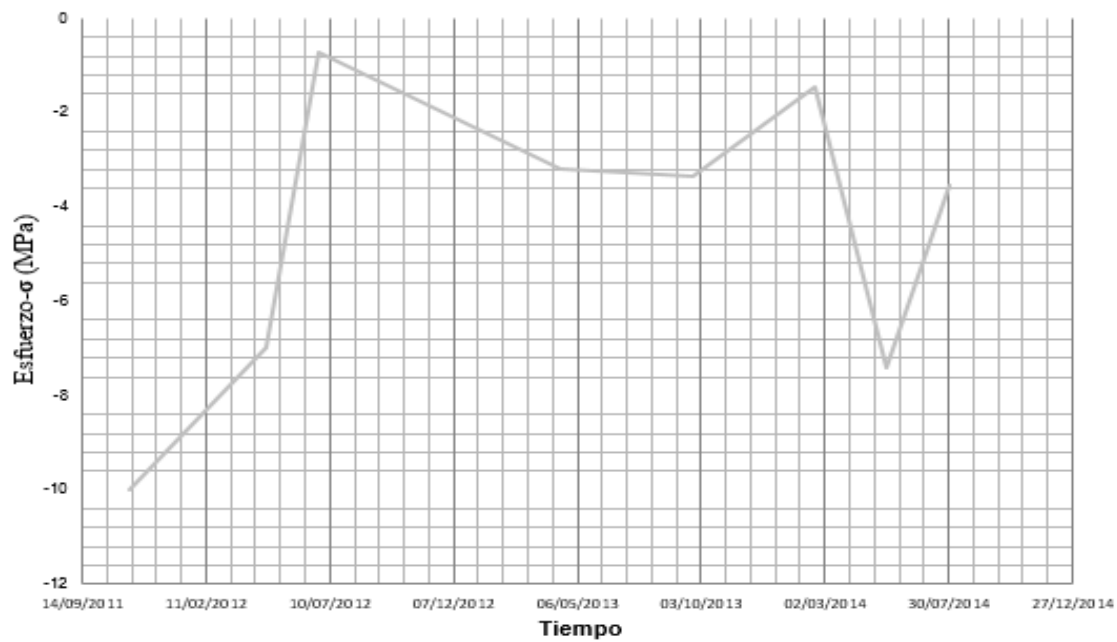
Sensor de acero sobre base hidráulica calentamiento

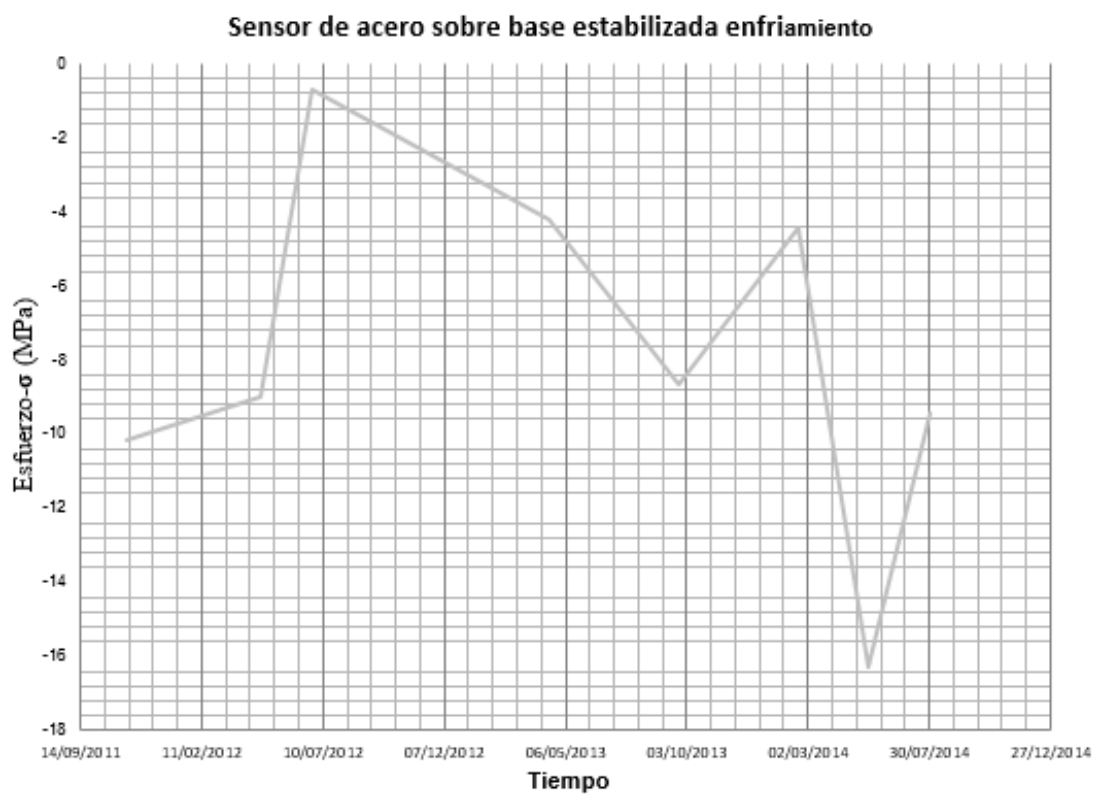


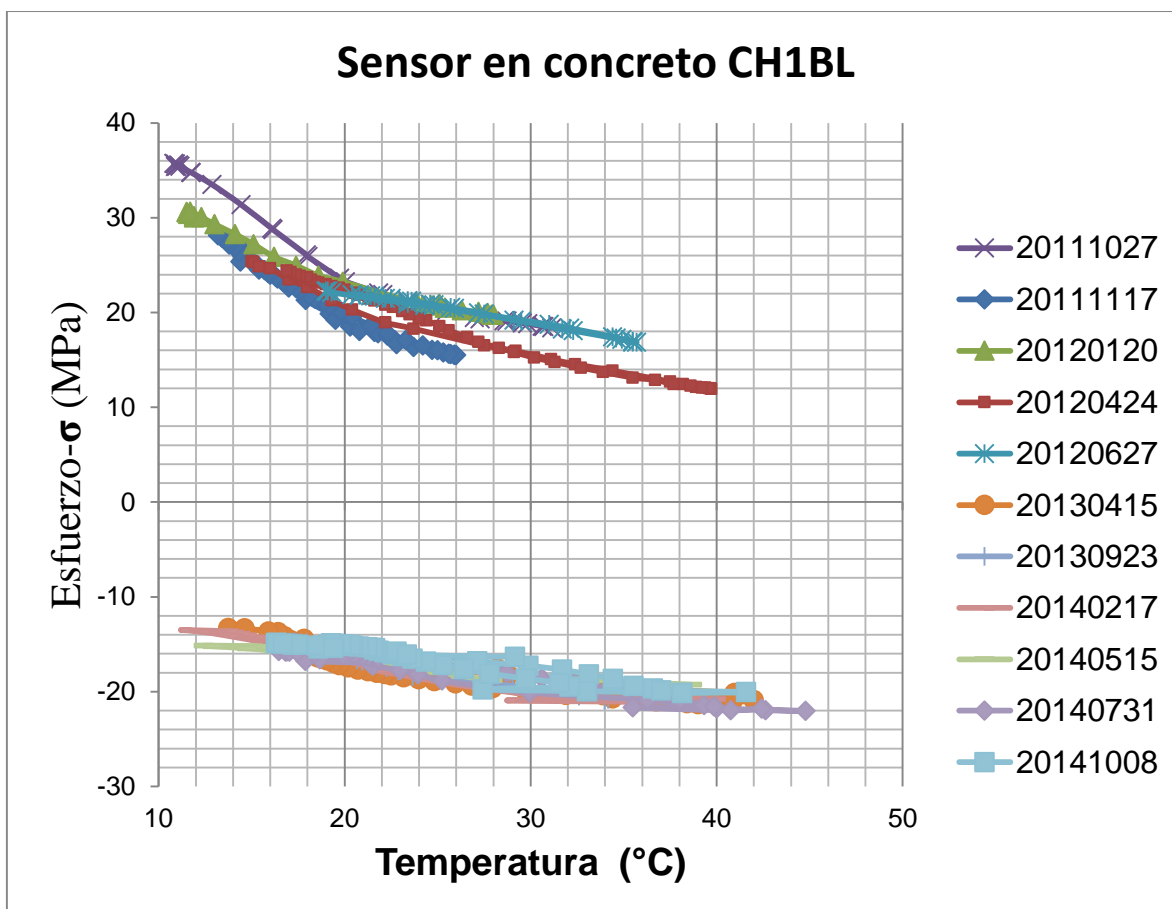
Anexo 10.- Gráficas del valor de la media del esfuerzo por carga viva durante el calentamiento y enfriamiento base estabilizada.

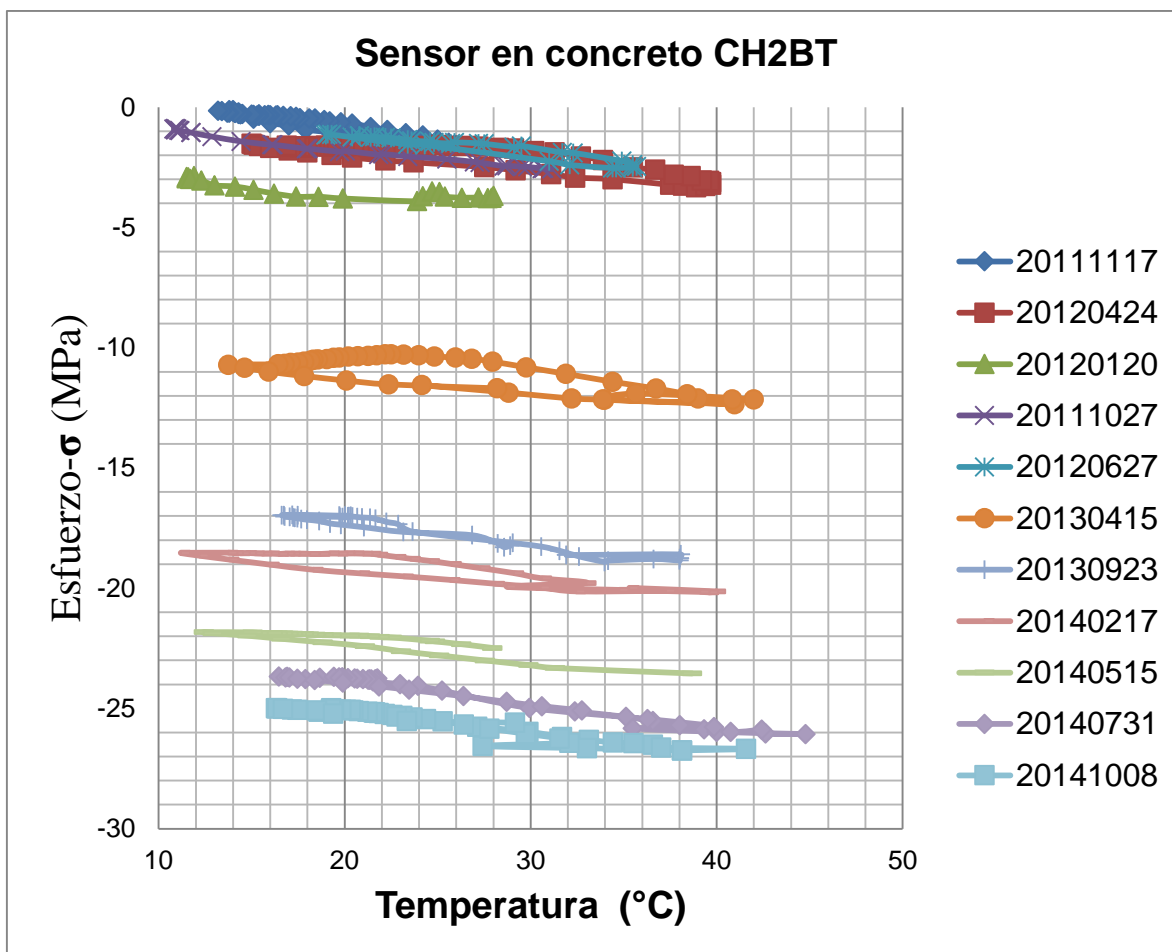


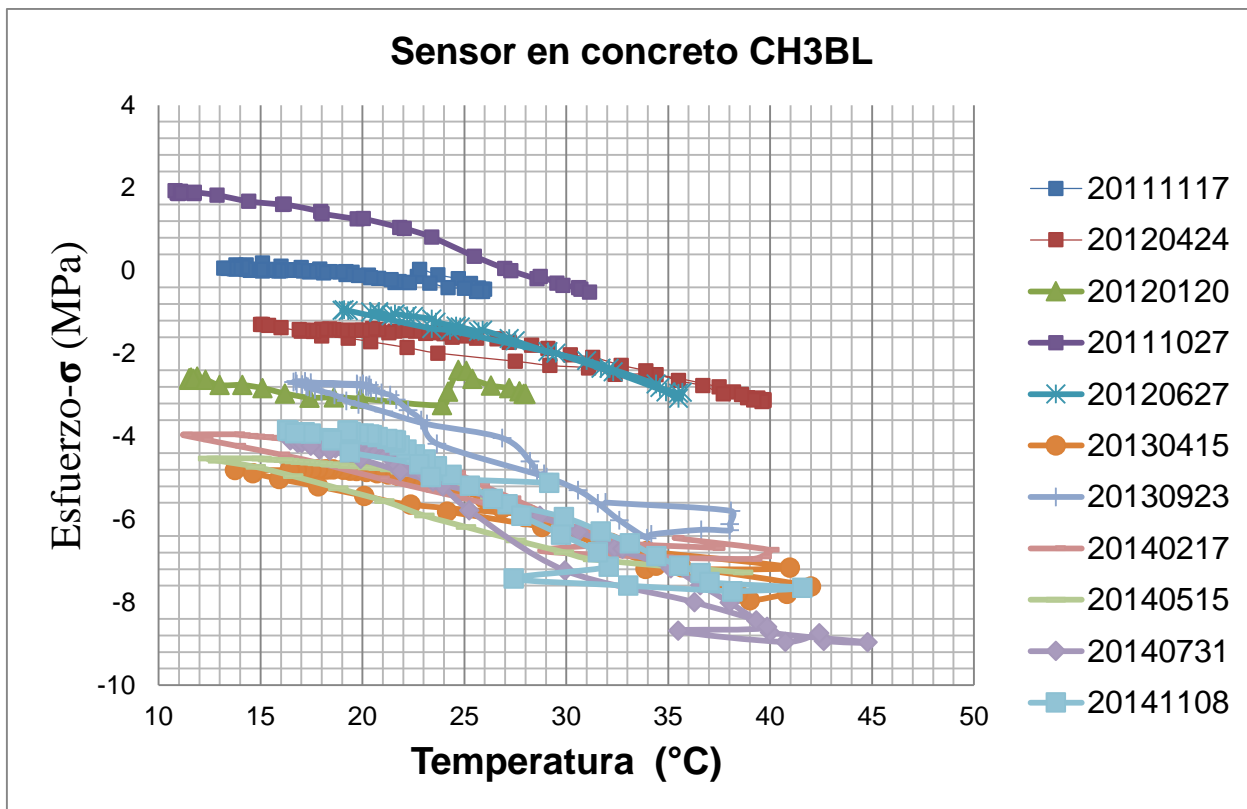
Sensor de concreto sobre base estabilizada enfriamiento

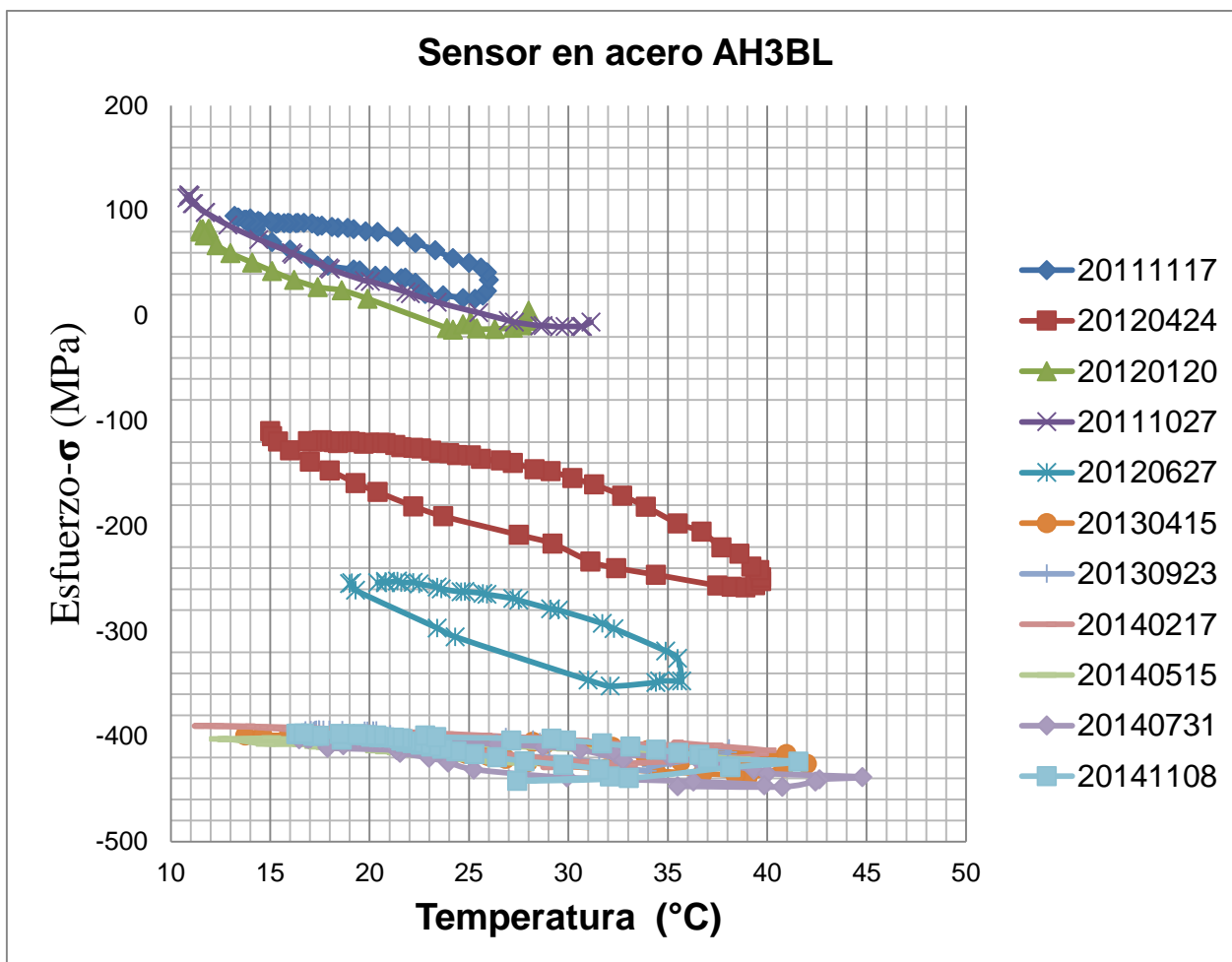
Sensor de acero sobre base estabilizada calentamiento

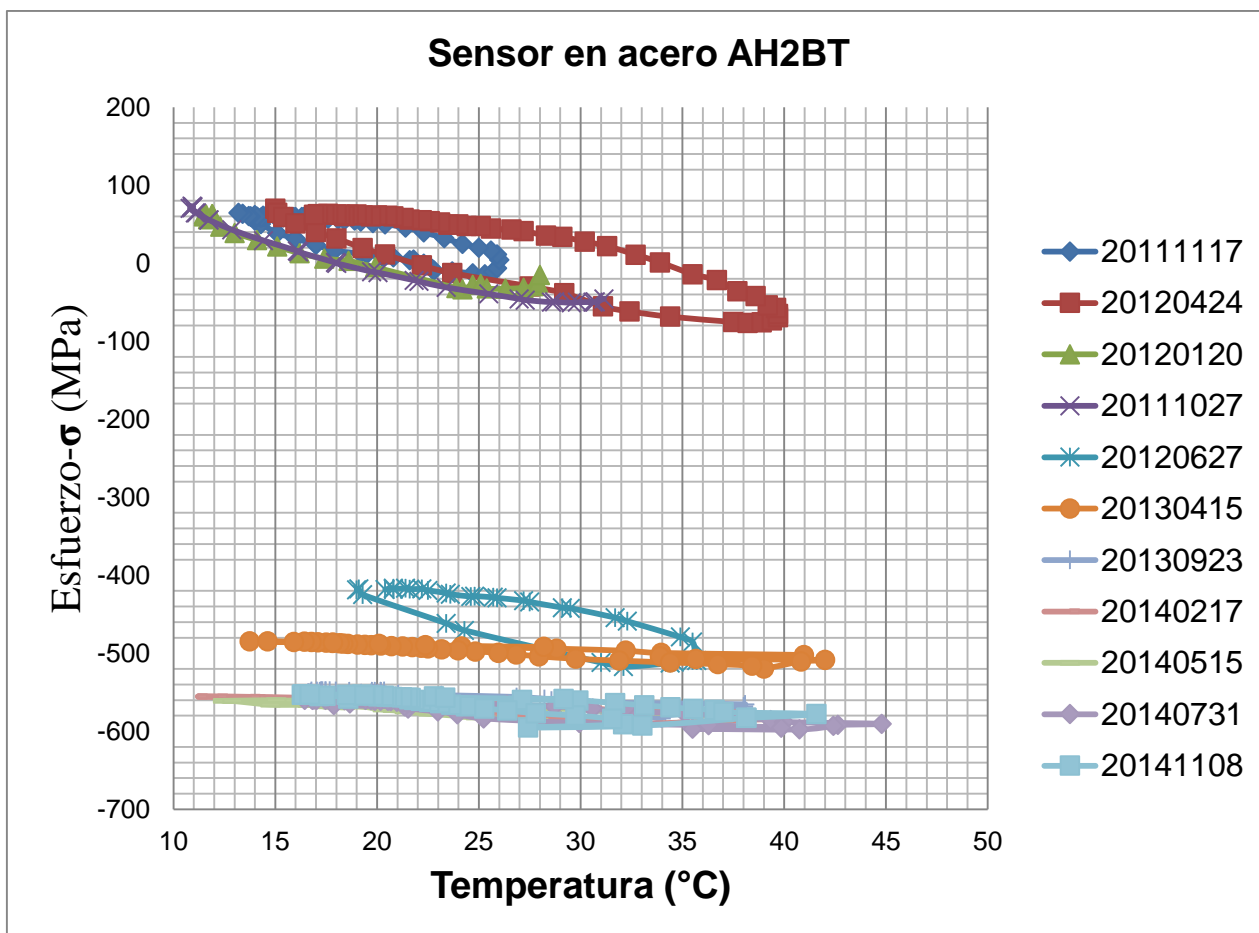


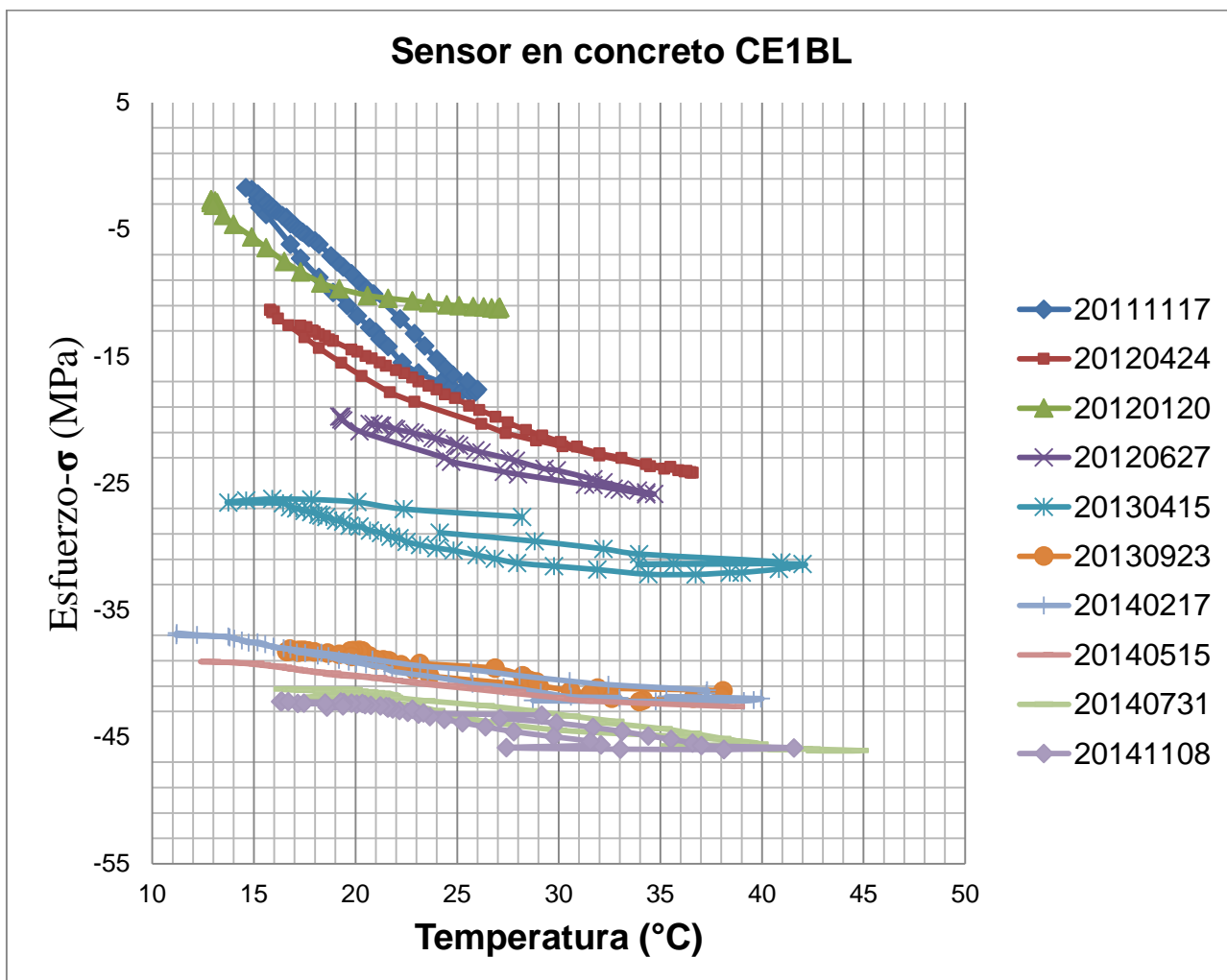
Anexo 11.- Gráficas Temperatura-Esfuerzo sobre base hidráulica.

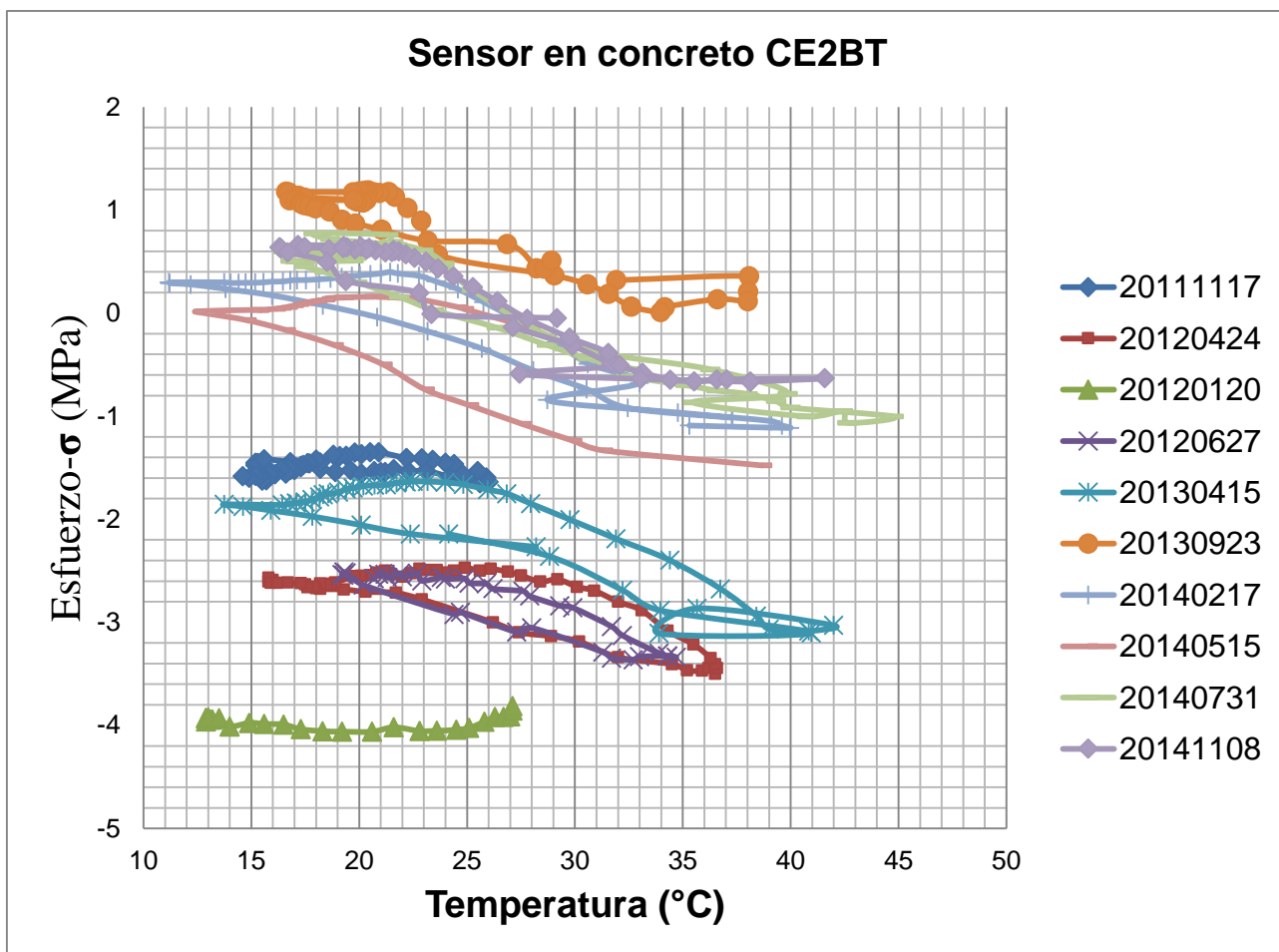


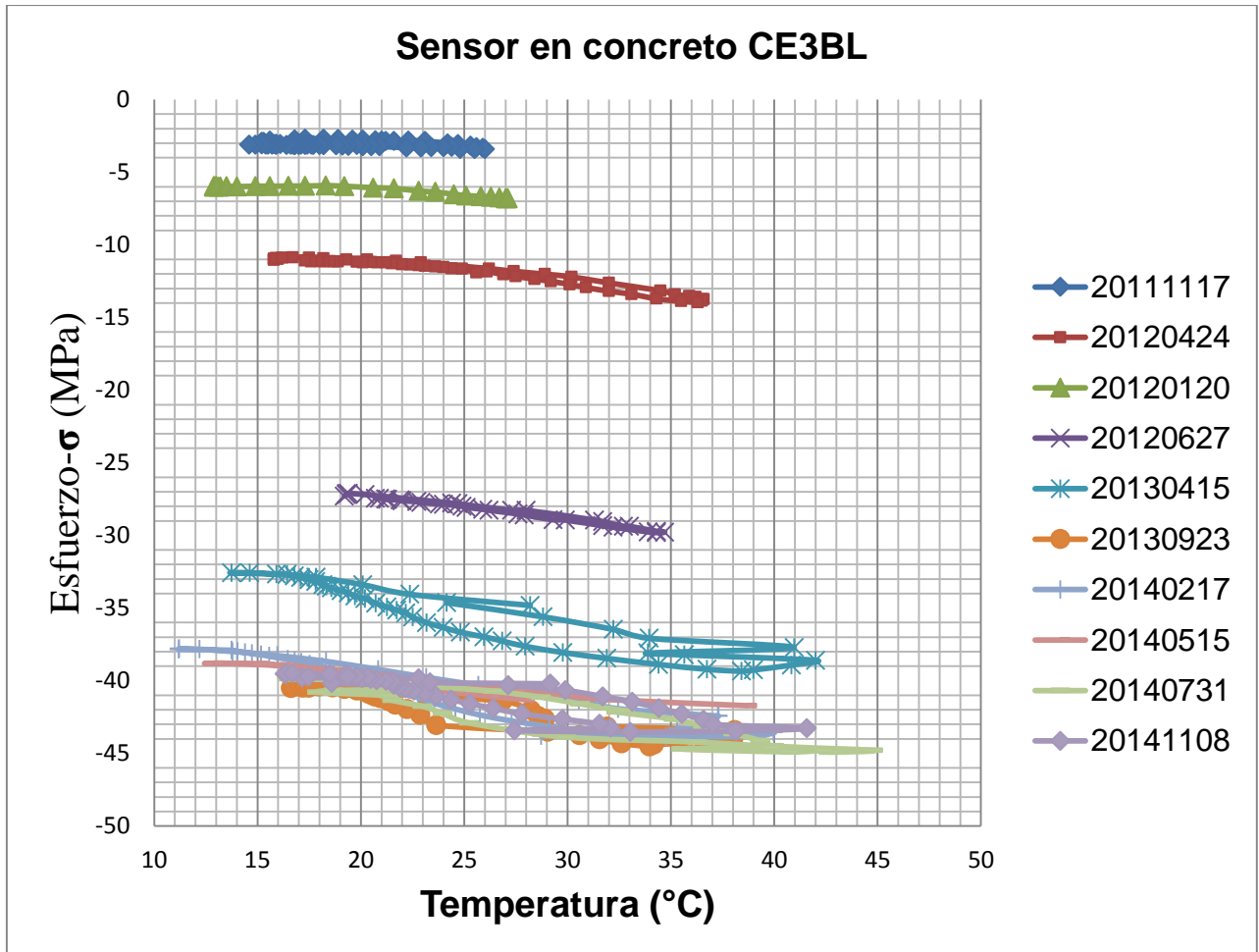


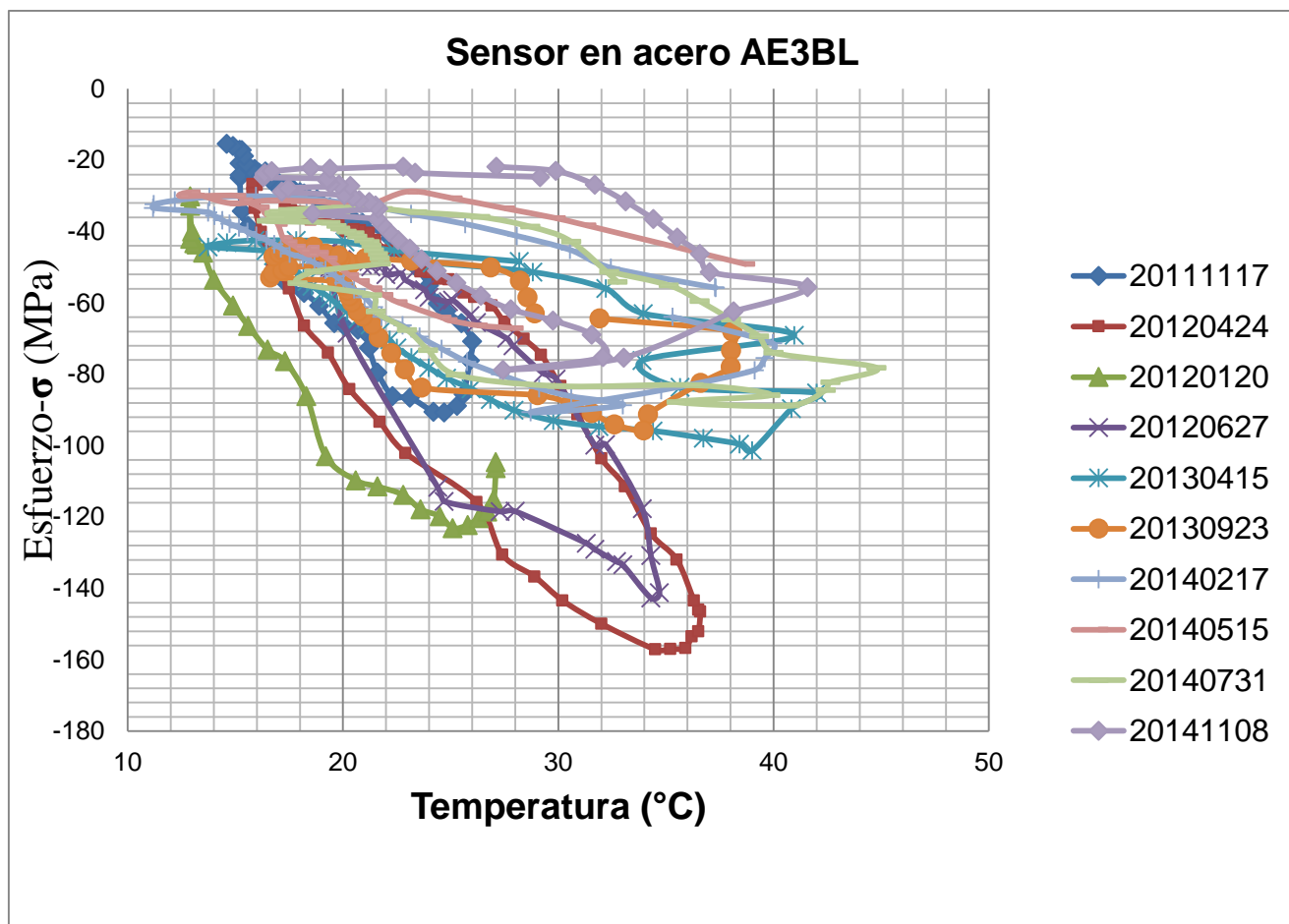


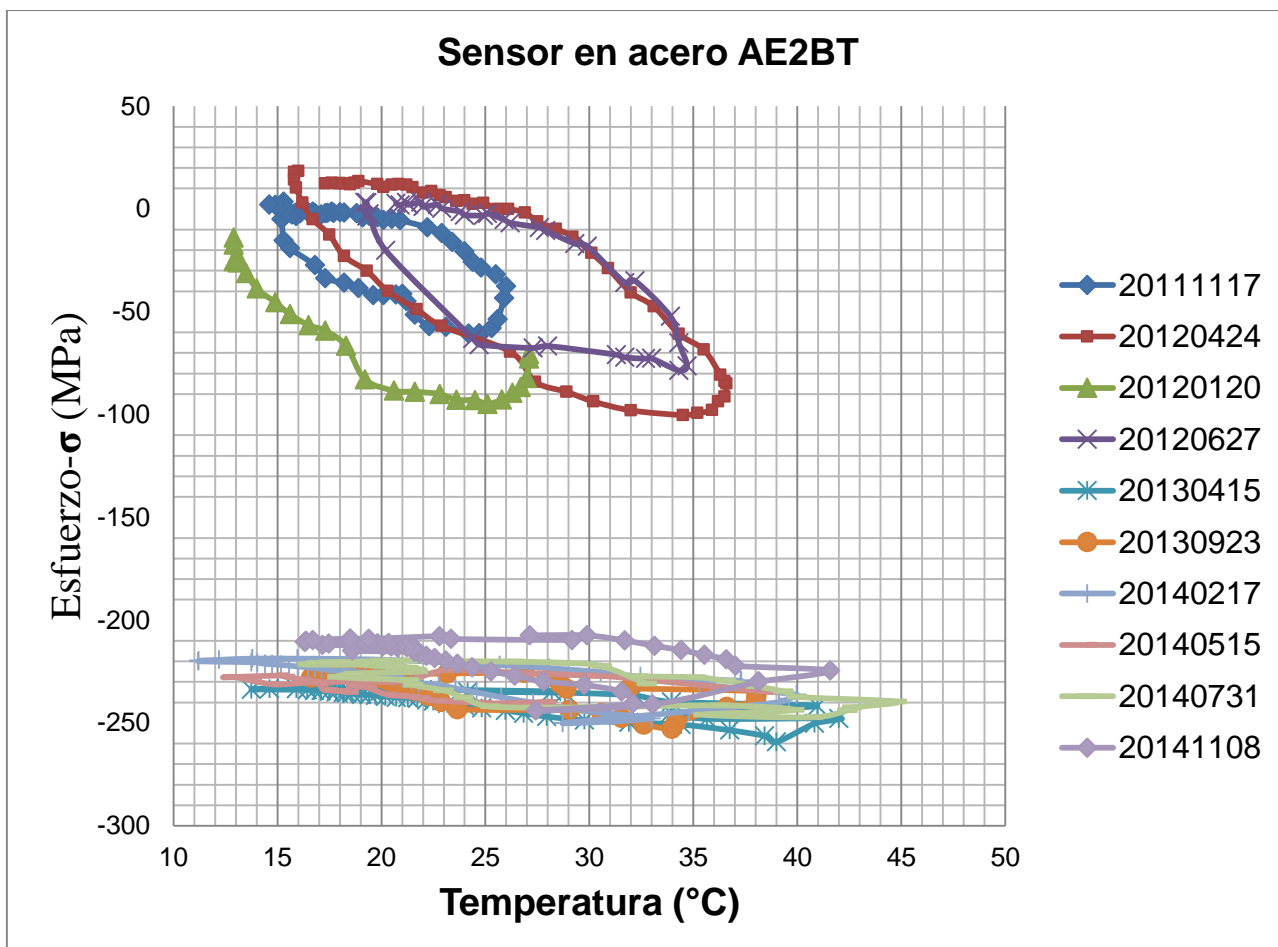


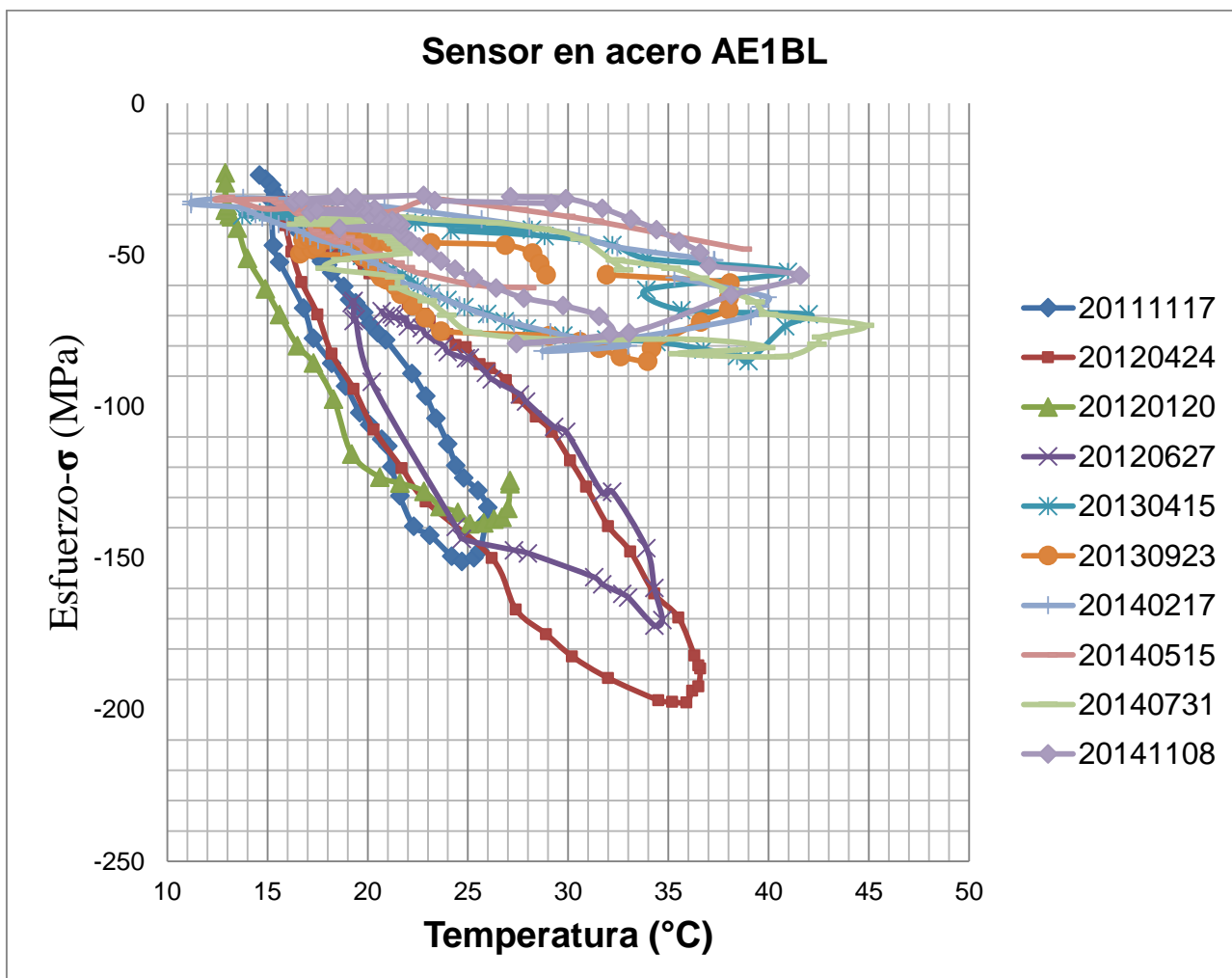
Anexo12.- Gráficas Temperatura-Esfuerzo sobre base cementada.

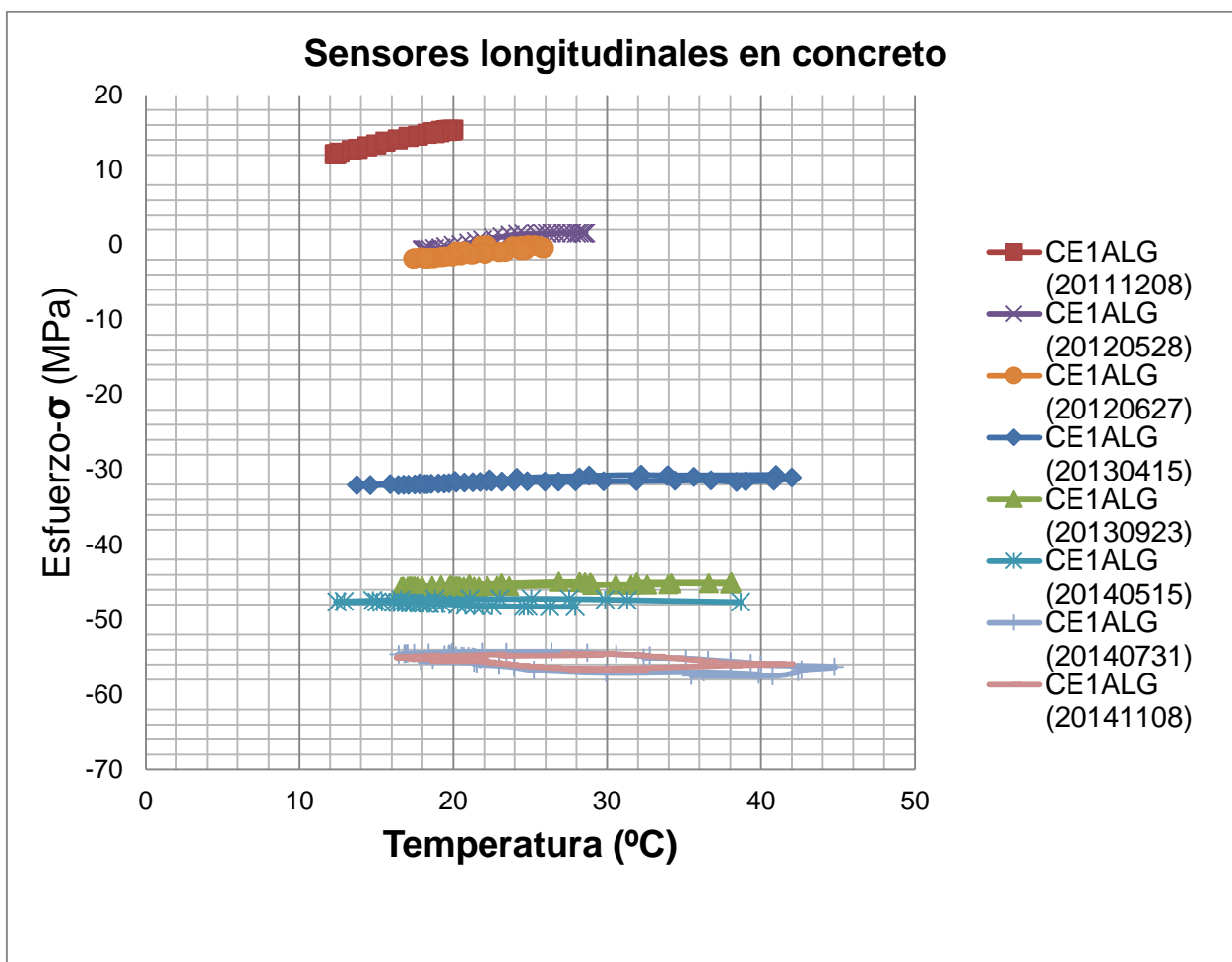


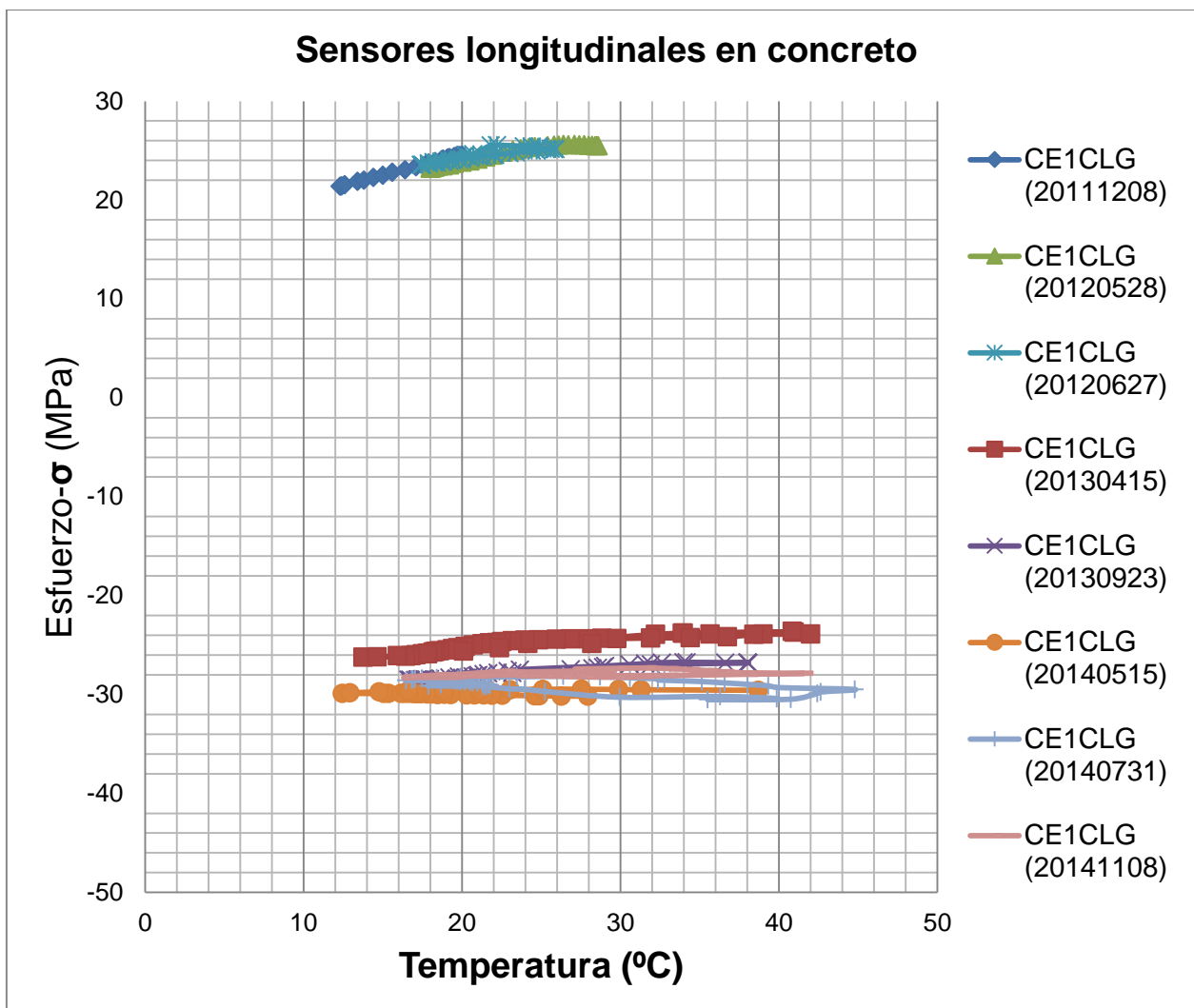


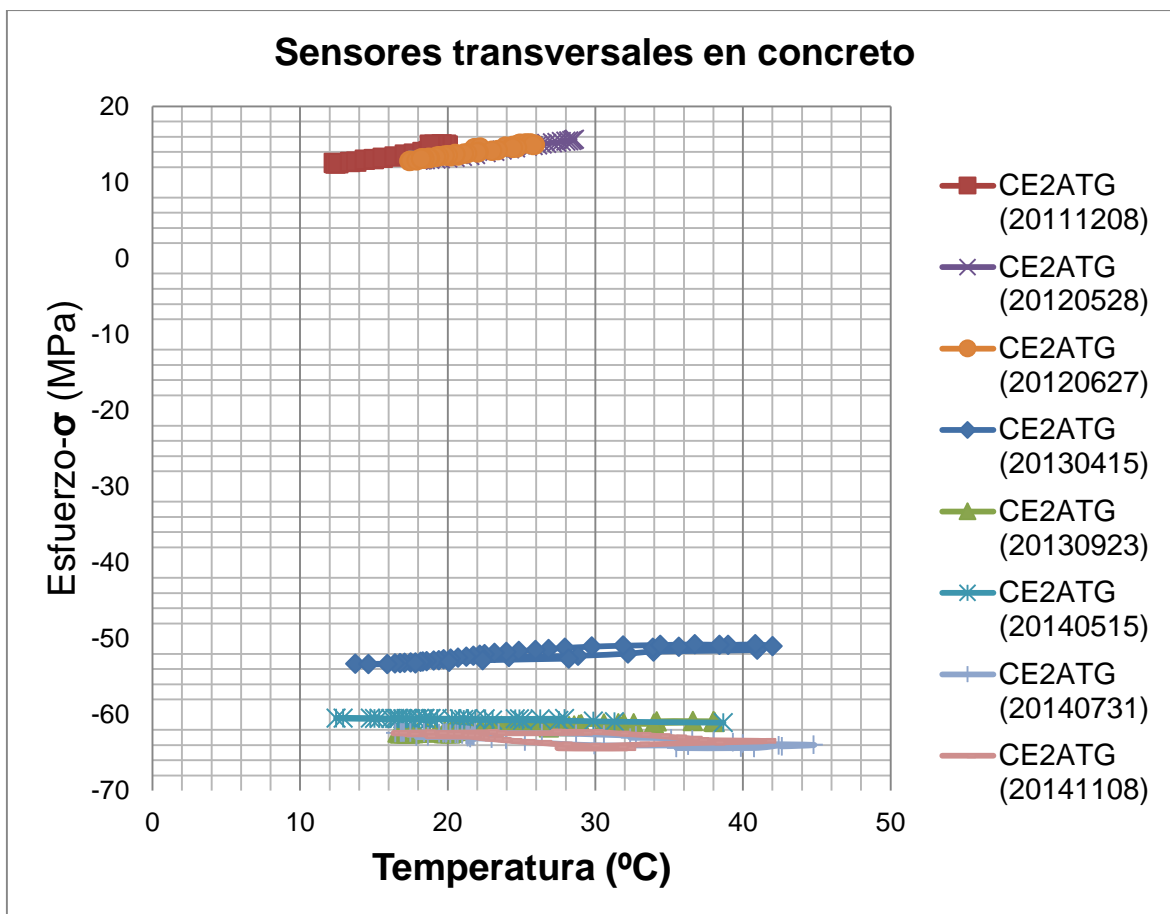


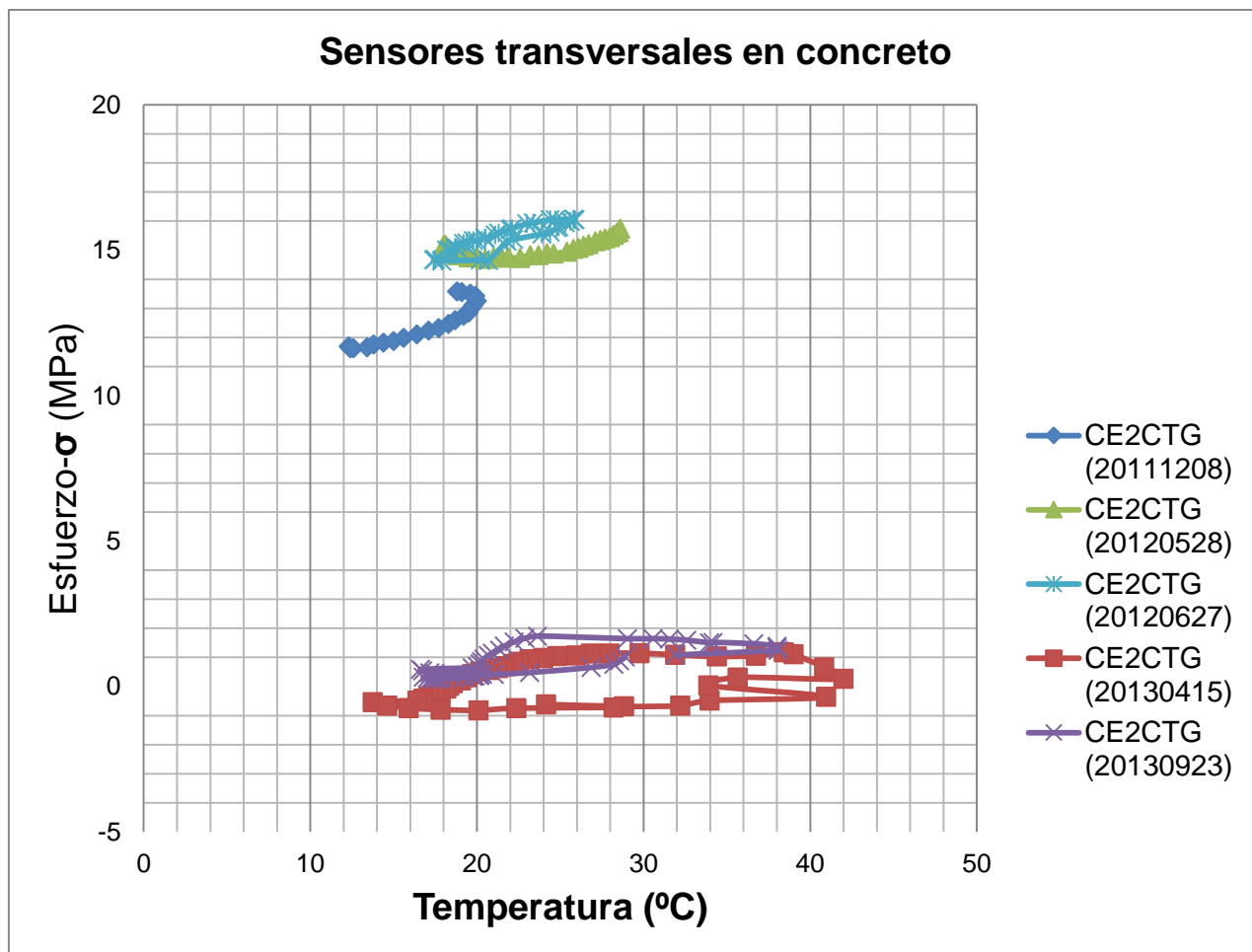


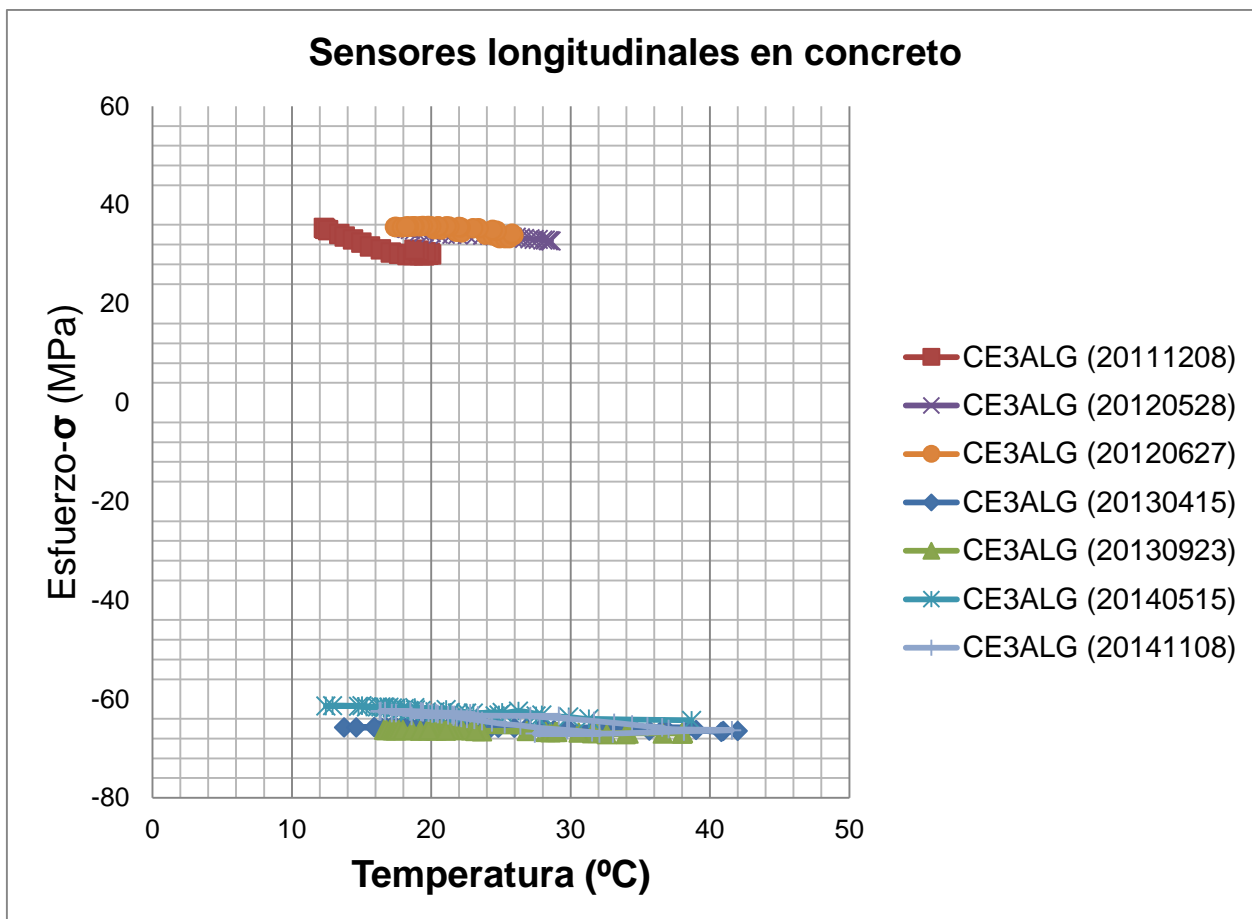


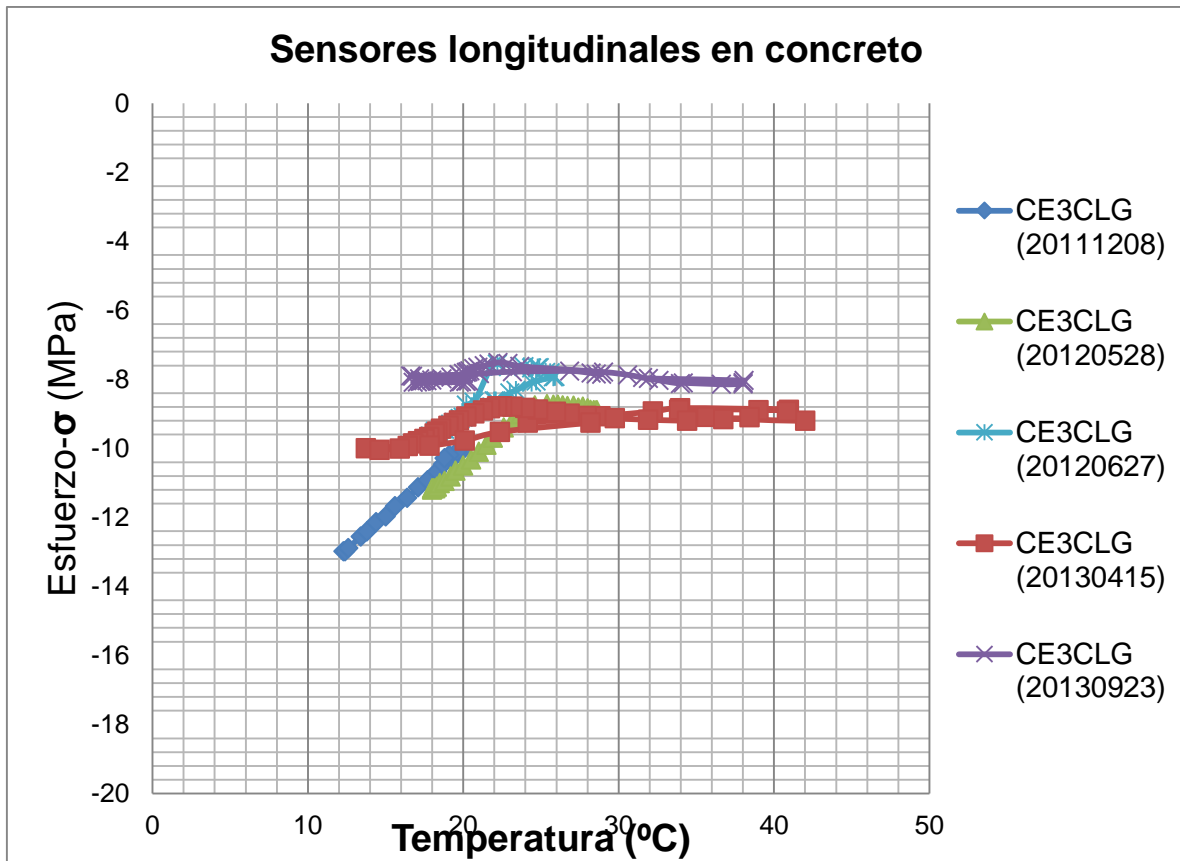
Anexo 13.- Gráficas Temperatura-Esfuerzo sobre base cementada con grieta.

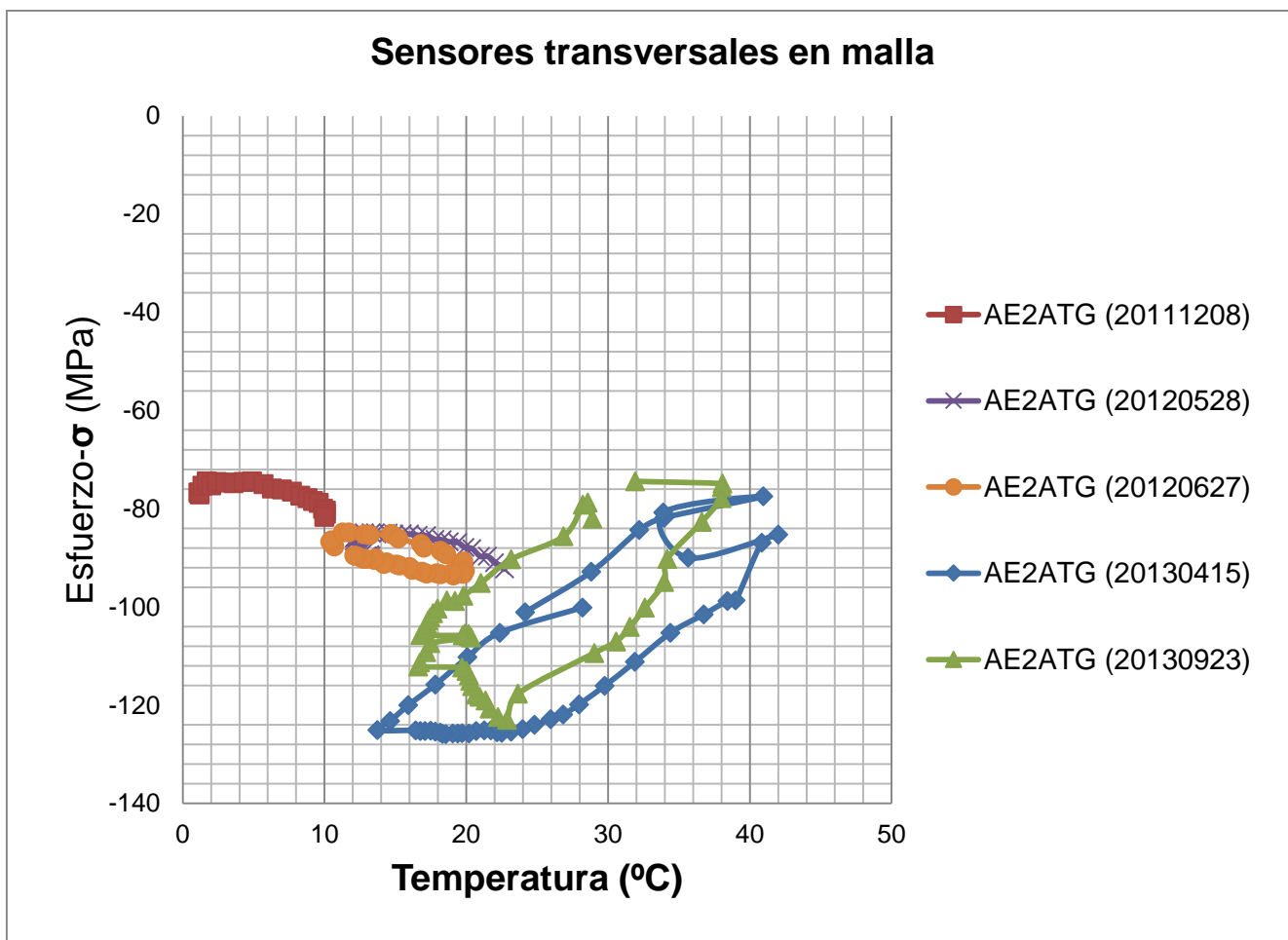


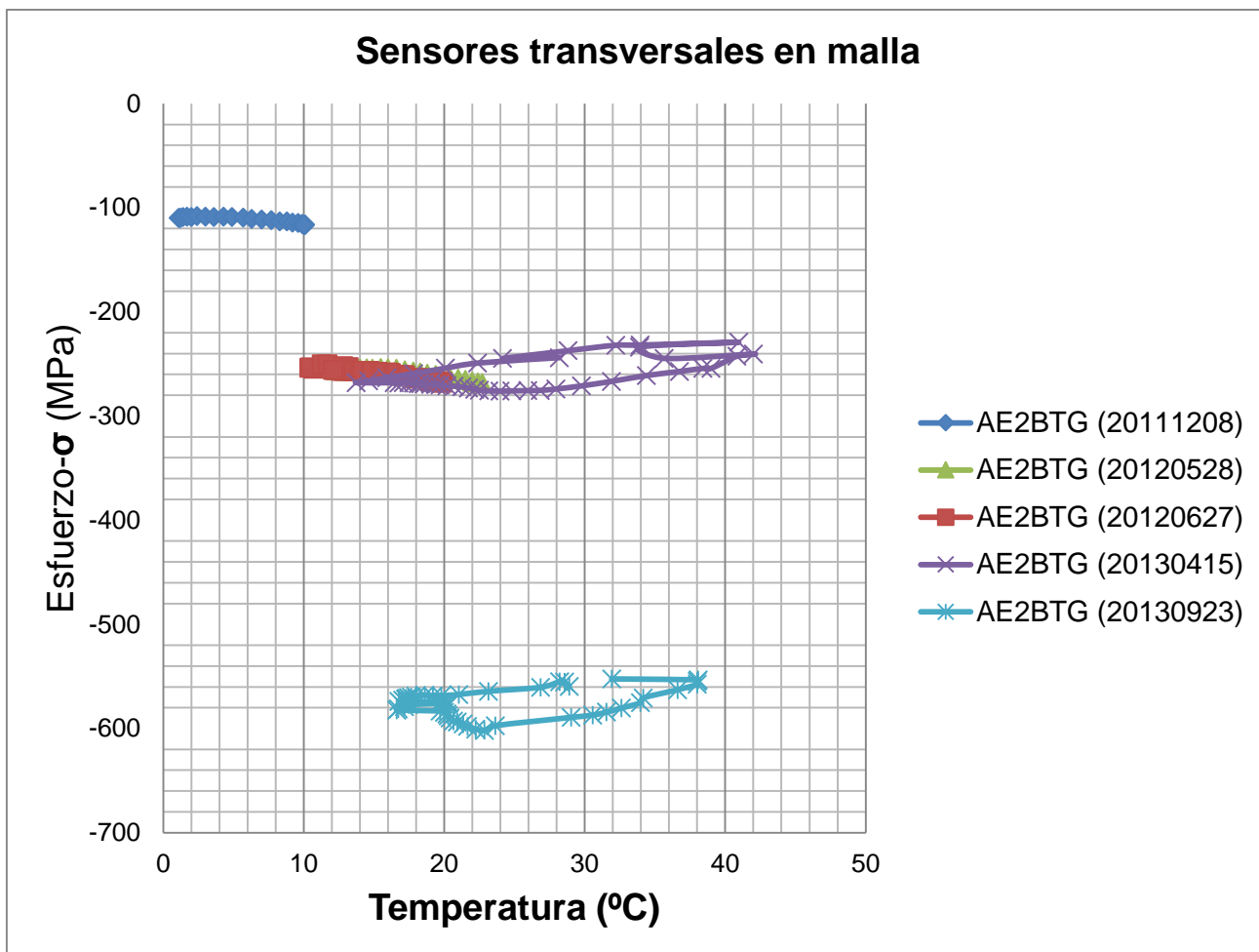


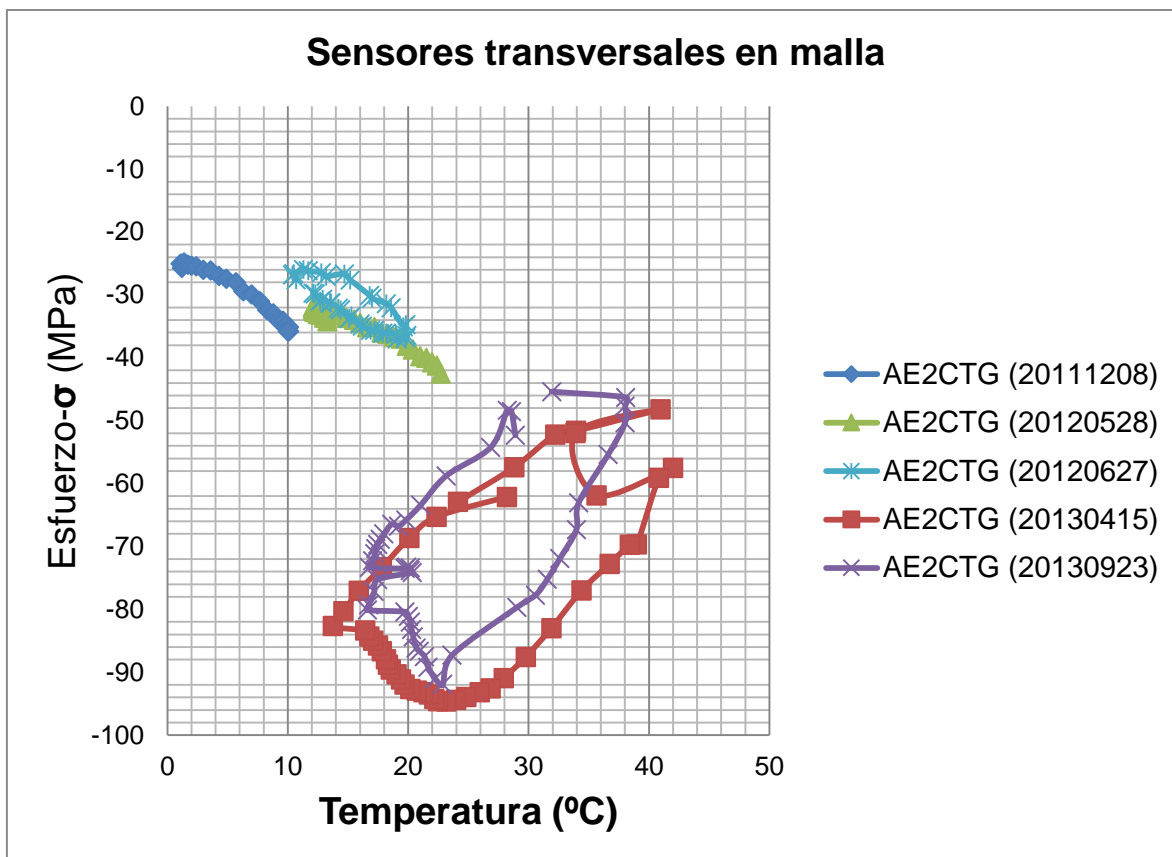


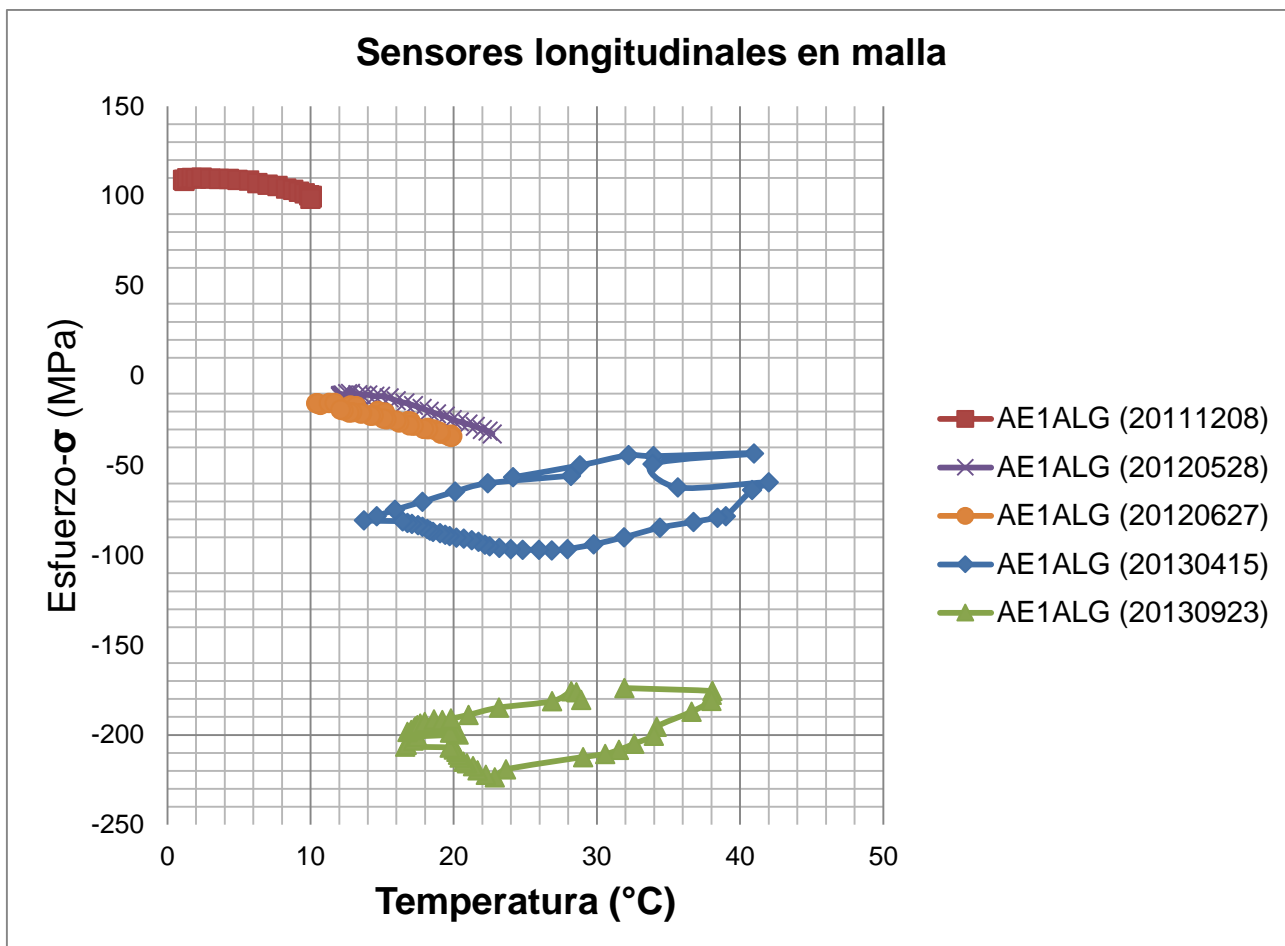


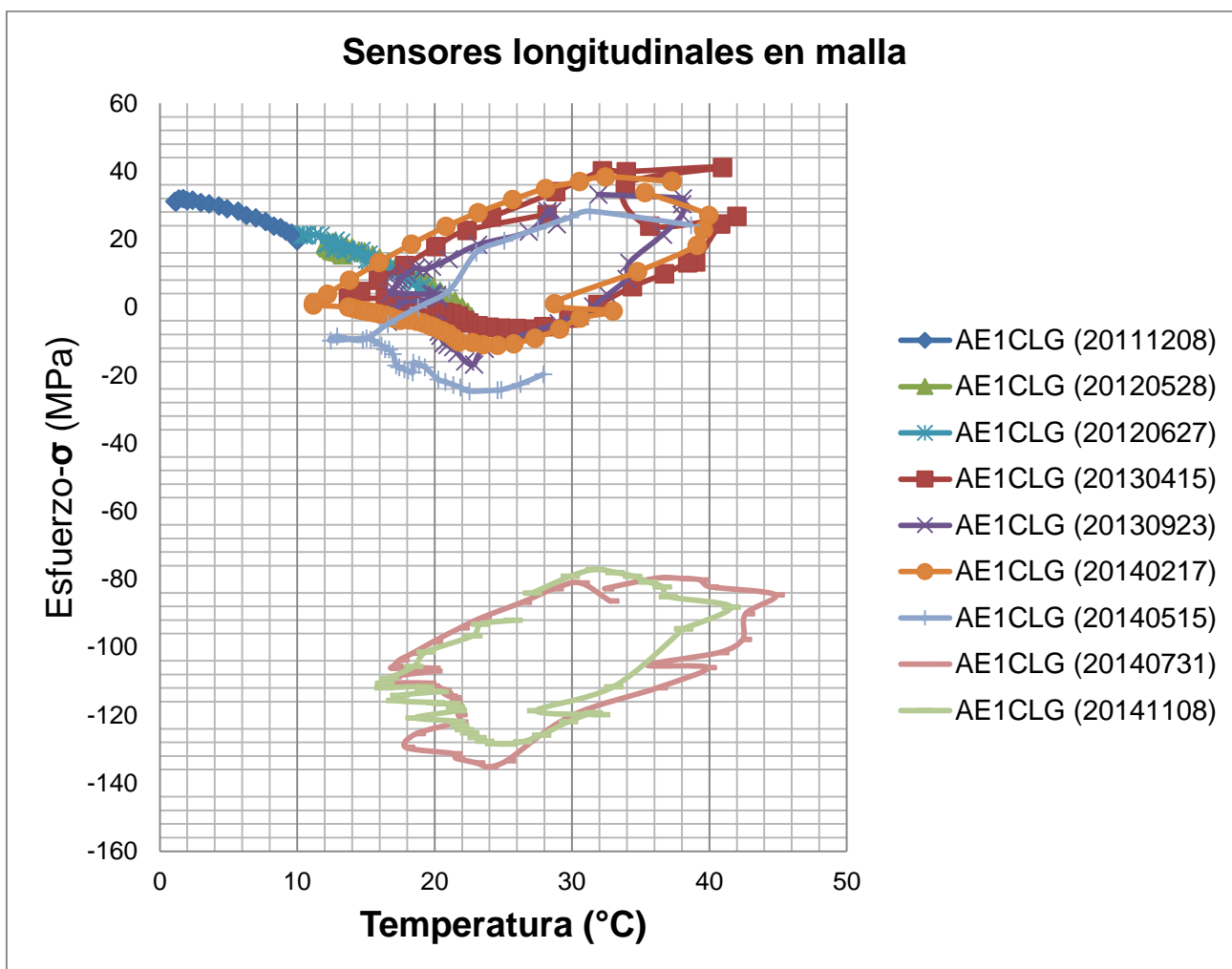




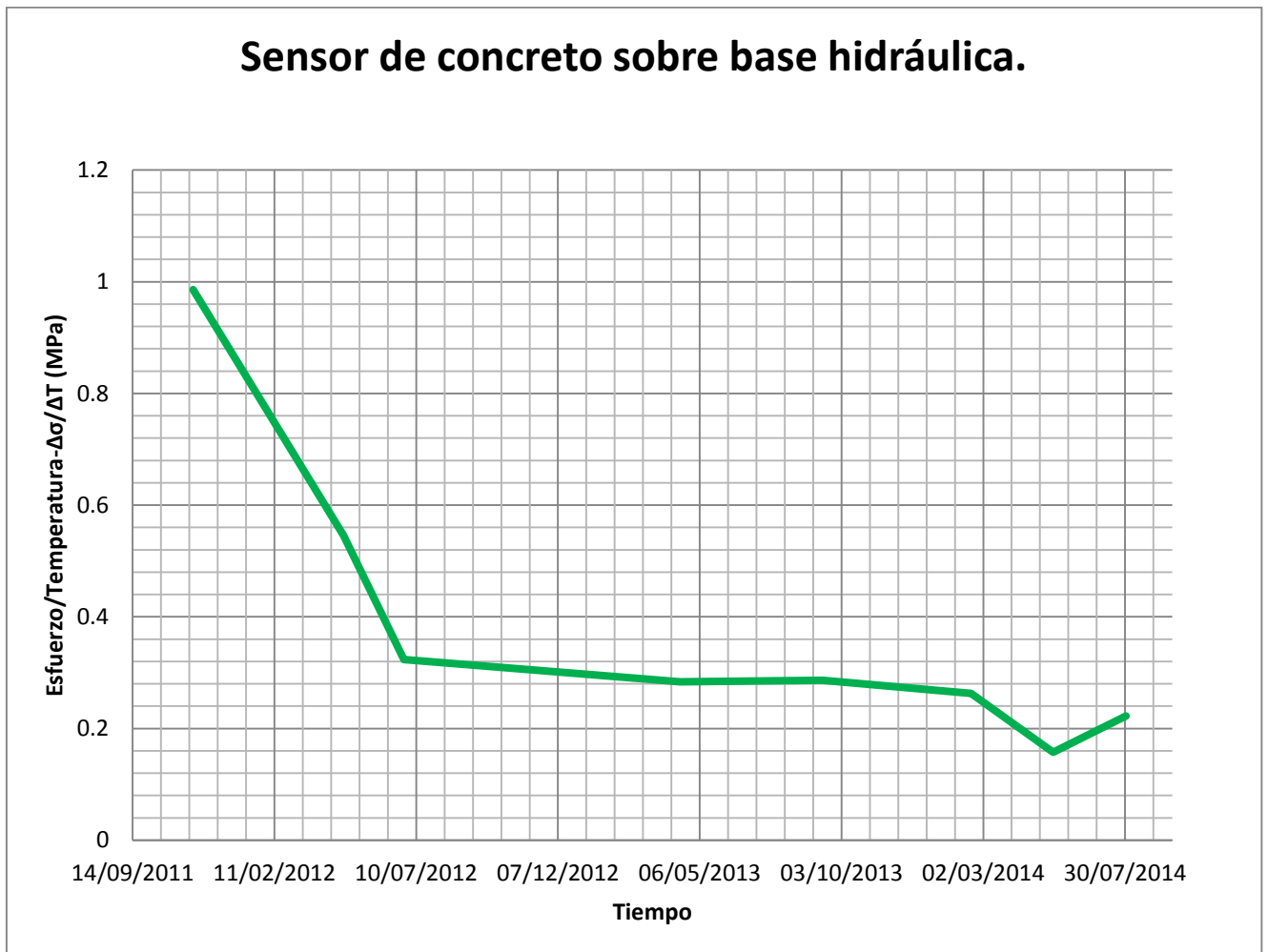








Anexo 14.- Valor promedio del esfuerzo por grado centígrado para el sensor.



Sensor de concreto sobre base estabilizada



