



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOSAS  
SOBRE TERRENO CONSTRUIDAS CON  
CONCRETO DE CONTRACCIÓN COMPENSADA**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

P R E S E N T A :

**SANTA BERTILA QUIÑONES LUNA**

TUTOR:

**DR. SERGIO M. ALCOCER MARTÍNEZ DE CASTRO**

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: M. I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO  
Secretario: M. I. JORGE ARTURO ÁVILA RODRÍGUEZ  
Vocal: DR. SERGIO M. ALCOCER MARTÍNEZ DE CASTRO  
1<sup>er</sup>. Suplente: DR. JUVENTINO CARLOS REYES SALINAS  
2<sup>do</sup>. Suplente: DR. CARLOS AIRE UNTIVEROS

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

**TUTOR DE TESIS:**

---

DR. SERGIO M. ALCOCER MARTÍNEZ DE CASTRO



A Juliano, Donata, Alex y Elvia por su amor incondicional

A Roque por su magnífica compañía

A Leandro por ser mi fuerza y por llenarme de ternura



## **AGRADECIMIENTOS**

La realización de esta investigación fue posible gracias al apoyo del Instituto de Ingeniería de la UNAM y de CEMEX Concretos.

Muy en especial al Dr. Sergio Manuel Alcocer Martínez de Castro, por su dedicación en la dirección de este trabajo y la oportunidad que me brindó para desarrollarlo en el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

A los investigadores, M. I. Carlos Javier Mendoza, M. I. Jorge Ávila Rodríguez, Dr. Carlos Aires Untiveros, Dr. Carlos Reyes Salinas por sus valiosos comentarios y sugerencias en este trabajo.

Al Ing. Roque Sánchez Meza por su ayuda y comentarios referidos a la presente investigación.

## CONTENIDO

<b>CONTENIDO</b> .....	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xv</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>OBJETIVO</b> .....	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES</b> .....	<b>5</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	5
1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOSAS SOBRE TERRENO .....	5
1.2.1 Tipos de losas .....	5
1.2.2 Diseño y variables de construcción .....	7
1.2.3 Métodos de diseño.....	7
1.3 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO DE CONTRACCIÓN COMPENSADA .....	9
1.3.1 Cementos expansivos .....	10
1.3.2 Agregados.....	12
1.3.3 Concreto .....	12
1.4 INVESTIGACIONES REALIZADAS SOBRE LOSAS DE CONCRETO DE CONTRACCIÓN COMPENSADA .....	16
1.4.1 Estudios de Russell.....	16
1.4.2 Recomendaciones del Comité 223 del Instituto Americano del Concreto (ACI 223) ....	23
<b>CAPÍTULO 2 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>27</b>
2.1 LOSA SOBRE TERRENO .....	27
2.1.1 Materiales .....	27
2.1.2 Construcción del espécimen .....	28
2.1.3 Instrumentación .....	30
2.2 LOSAS VERTICALES .....	33
2.2.1 Materiales .....	34
2.2.2 Construcción de los especímenes .....	34
2.2.3 Instrumentación .....	37
2.3 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO DE CONTRACCIÓN COMPENSADA EMPLEADA EN LOS ENSAYES .....	41
<b>CAPÍTULO 3 RESULTADOS EXPERIMENTALES</b> .....	<b>43</b>
3.1 LOSAS SOBRE TERRENO .....	43
3.1.1 Deformaciones registradas en el acero y en el concreto.....	43
3.1.2 Prismas de concreto muestreados por CEMEX.....	53

3.1.3	Deformación superficial en el plano de la losa .....	54
3.2	LOSAS VERTICALES .....	56
3.2.1	Deformaciones registradas en el acero y en el concreto.....	56
3.2.2	Comparación de deformaciones en los especímenes del mismo espesor .....	66
3.2.3	Comparación de deformaciones en los especímenes de igual cuantía .....	68
3.3	COMPARACIÓN ENTRE LAS EXPANSIONES MÁXIMAS REGISTRADAS EN LOS ESPECÍMENES Y LAS EXPANSIONES ESPERADAS SEGÚN LAS RECOMENDACIONES DEL ACI 223 .....	71
3.3.1	Losa sobre terreno .....	71
3.3.2	Losas verticales .....	71
<b>CAPÍTULO 4 RESUMEN Y CONCLUSIONES .....</b>		<b>75</b>
4.1	RESUMEN.....	75
4.2	CONCLUSIONES.....	75
4.3	RECOMENDACIONES DE DISEÑO .....	77
<b>APÉNDICE A HISTORIA DE DEFORMACIONES EN LA LOSA SOBRE TERRENO.....</b>		<b>81</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>		<b>95</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>		<b>97</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Tipos de losas con los métodos de diseño apropiados (ACI-360R, 1992).....	6
Tabla 1.2 Descripción y nomenclatura de las losas (Russell, 1980) .....	17
Tabla 2.1 Propiedades del concreto en estado fresco (CEMEX, 2004) .....	29
Tabla 2.2 Propiedades del concreto en estado endurecido (CEMEX, 2004) .....	29
Tabla 2.3 Descripción y nomenclatura de las losas verticales .....	33
Tabla 3.1 Expansiones máximas en el acero de refuerzo y en el concreto .....	52
Tabla 3.2 Variaciones en la deformación, en microdeformaciones, sobre la superficie de la losa en los puntos de medición .....	55
Tabla 3.3 Deformaciones en los especímenes.....	66



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Características típicas del cambio de longitud de concretos con CPO y concretos de contracción compensada (Williams, 1981) .....	10
Figura 1.2 Agrietamiento del concreto con CPO debido a la contracción por secado y el concepto básico del concreto con cemento expansivo (Williams, 1981) .....	10
Figura 1.3 a) Efecto del tipo de agregado en los cambios de longitud de concreto de contracción compensada; b) resistencia a compresión; c) módulo de elasticidad. (J. Epps y M. Polivka, 1971) .....	14
Figura 1.4 a) Efecto de la relación agua/cemento en la resistencia a compresión de concretos de contracción compensada; b) efecto del contenido de cemento en la resistencia a compresión de concretos de contracción compensada; c) efecto de la relación agua/cemento en el cambio de longitud del concreto de contracción compensada. (Polivka y Willson, 1973).....	15
Figura 1.5 Tipos de ubicación de parrillas de refuerzo .....	17
Figura 1.6 Especímenes sin restricción externa (Russell, 1980).....	17
Figura 1.7 Historia de deformaciones en los especímenes reforzados simétricamente durante 70 días (Russell, 1973) .....	19
Figura 1.8 Efecto del refuerzo en la expansión (Russell, 1973).....	19
Figura 1.9 Historia de deformaciones en los especímenes reforzados simétricamente durante 250 días (Russell, 1980) .....	20
Figura 1.10 Efecto del refuerzo en la deformación a la edad de 250 días (Russell, 1980) .....	20
Figura 1.11 Historia de deformaciones en las losas sin refuerzo (Russell, 1980).....	21
Figura 1.12 Historia de deformaciones en los especímenes con refuerzo asimétrico y con caras selladas (Russell, 1980) .....	22
Figura 1.13 Estimación de la expansión de un elemento a partir de la expansión de prismas (ACI 223, 1998) .....	24
Figura 2.1 Distribución de acero de refuerzo en la losa .....	27
Figura 2.2 Armado de la losa .....	28
Figura 2.3 Secuencia de colocación del concreto de la losa.....	29
Figura 2.4 Curado de la losa.....	29
Figura 2.5 Líneas principales de medición.....	30
Figura 2.6 a) Deformímetro para mediciones en el concreto; b) deformímetro para mediciones en el acero .....	31
Figura 2.7 a) Sensor de temperatura; b) sensor de humedad.....	32
Figura 2.8 a) Líneas principales de medición; b) distribución de deformímetros en el concreto; c) distribución de deformímetros en el acero de refuerzo .....	32
Figura 2.9 Distribución de puntos de medición en la superficie .....	33
Figura 2.10 Distribución del acero de refuerzo en las losas verticales .....	35
Figura 2.11 Cimbra de las losas verticales .....	36
Figura 2.12 Losas coladas y transductores de desplazamiento .....	36
Figura 2.13 Curado de losas .....	36
Figura 2.14 Losas después del curado.....	37
Figura 2.15 Molde de acero para prismas de concreto restringido.....	37
Figura 2.16 Ubicación de los deformímetros para acero y para concreto .....	38
Figura 2.17 Ubicación de instrumentación de sensores de temperatura y humedad y transductores eléctricos de desplazamiento.....	39
Figura 2.18 Distribución del acero de refuerzo en las losas y ubicación de instrumentos de medición .....	40
Figura 2.19 Deformaciones del concreto de contracción compensada empleada en los ensayos .....	41
Figura 2.20 Resistencia a compresión del concreto de contracción compensada empleada en los ensayos .....	41
Figura 3.1 Historia de deformaciones en el concreto, Eje <i>XI</i> .....	45
Figura 3.2 Historia de deformaciones en el acero, Eje <i>XI</i> .....	46

Figura 3.3 Historia de temperatura, Eje <i>X1</i> .....	47
Figura 3.4 Historia de humedad, Eje <i>X1</i> .....	48
Figura 3.5 Deformaciones registradas en el acero, concreto y de humedad y temperatura en el medio ambiente y en la losa, durante los días 45 a 50 .....	49
Figura 3.6 Historia de deformaciones registradas en el acero, concreto y de humedad y temperatura en el medio ambiente y en la losa .....	51
Figura 3.7 Comparación de deformaciones por eje.....	53
Figura 3.8 Deformación en los prismas .....	54
Figura 3.9 Ubicación de los puntos de medición sobre la superficie de la losa .....	55
Figura 3.10 Variación de longitud sobre la superficie de la losa .....	56
Figura 3.11 Historia de deformaciones en losas de espesor 10 cm.....	58
Figura 3.12 Historia de deformaciones en losas de espesor 15 cm.....	61
Figura 3.13 Historia de humedad relativa en las losas verticales desde el colado hasta los 28 días iniciales y desde el día 98 al 126.....	64
Figura 3.14 Deformaciones registradas en el acero, concreto y de humedad y temperatura en el medio ambiente y en la losa vertical K-10-0.50%, durante los días 105 a 110 .....	65
Figura 3.15 Valores medios de deformaciones en las losas verticales.....	67
Figura 3.16 Especímenes de igual cuantía .....	68
Figura 3.17 Expansión de losa apoyada sobre terreno contra expansión de prisma .....	72
Figura 3.18 Expansión de losa vertical contra expansión de prisma.....	73
Figura A.1 Historia de deformaciones en el concreto en el eje <i>X2</i> .....	81
Figura A.2 Historia de deformaciones en el concreto en el eje <i>X3</i> .....	82
Figura A.3 Historia de deformaciones en el concreto en el eje <i>D</i> .....	83
Figura A.4 Historia de deformaciones en el acero en el eje <i>X2</i> .....	84
Figura A.5 Historia de deformaciones en el acero en el eje <i>X3</i> .....	85
Figura A.6 Historia de deformaciones en el acero en el eje <i>X4</i> .....	86
Figura A.7 Historia de deformaciones en el acero en el eje <i>Y2</i> .....	87
Figura A.8 Historia de deformaciones en el acero en el eje <i>Y3</i> .....	88
Figura A.9 Historia de deformaciones en el acero en el eje <i>Y4</i> .....	89
Figura A.10 Historia de temperaturas en el eje <i>Y3</i> .....	90
Figura A.11 Historia de temperaturas en el eje <i>D</i> .....	91
Figura A.12 Historia de humedad en el eje <i>Y3</i> .....	92
Figura A.13 Historia de humedad en el eje <i>D</i> .....	93

## **RESUMEN**

En este trabajo de investigación se estudia el comportamiento de losas de concreto de contracción compensada (CCC) empleando resultados de ensayos experimentales de una losa apoyada sobre terreno de 10 x 10 x 0.15 m con cuantía de 0.15 por ciento y de doce losas verticales de 0.6 x 1.2 m con espesores de 0.10 y 0.15 m con cuantías entre 0.1 y 2 por ciento, todas con CCC. El objetivo del uso del CCC es disminuir el agrietamiento producto de la contracción por secado que se presenta en elementos construidos con concreto convencional. El CCC produce una expansión inicial en el elemento durante la etapa de curado y luego, al igual que un concreto convencional, una contracción por secado. Finalmente, un buen diseño, alcanzará una expansión neta o la compensación completa, pero sin llegar a la contracción que produce el agrietamiento. En la losa apoyada sobre terreno se alcanzó una expansión neta, producto de la fricción con el terreno, mientras que en las losas verticales, al no presentar ninguna restricción exterior, se obtuvieron contracciones netas. Se observó en las losas verticales que la expansión inicial es función de la cuantía de refuerzo. Además, se encontró que la humedad es un factor que influye significativamente en el comportamiento en este tipo de concreto.

## **ABSTRACT**

This research is focused in studying behavior of shrinkage compensating concrete (SCC) in slabs. The results of several specimens with SCC were used: an on grade slab of 10 x 10 x 0.15 m with reinforced ratio of 0.15 percent and twelve vertical slabs of 0.6 x 1.2 m with 0.10 and 0.15 of thickness using reinforced ratio among 0.1 and 2.0 percent. Employing SCC reduce the cracks on slabs produced by shrinkage drying. In an element with SCC, during curing expansions are produced, after that, shrinkage is developed by drying as a conventional concrete. In a good design, deformations get net expansions or complete compensation, without cracks by shrinkage. In on grade slab were gotten net expansions due friction grade and in vertical slabs net shrinkage. It was concluded that reinforced ratio controls expansion beginning and variations in diary humidity modifies deformations in concrete and reinforcement.

## INTRODUCCIÓN

El término “losas sobre terreno” se emplea para denominar a las losas de uso industrial, de uso comercial, de departamentos y de viviendas unifamiliares. También comprende las losas para estacionamiento y pavimentos, aunque estos últimos no forman parte de este estudio.

El presente trabajo de investigación se enfoca al estudio del comportamiento de losas industriales. Estas losas se componen de una losa de concreto, apoyada continuamente sobre un material compuesto de una base, una sub-base y una subrasante; las cargas predominantes se deben a las maniobras de los montacargas, las cargas producto del almacenaje y cambios de volumen en el concreto.

Los cambios de volumen, expansión o contracción, en un concreto convencional se deben, principalmente, a los ciclos de temperatura y humedad. Aunque debido a los efectos químicos como la contracción por carbonatación, el ataque de sulfatos, la expansión de la reacción álcali-agregado, o debido a cargas como el flujo plástico, carga externa aplicada, estos cambios también son importantes.

Como consecuencia de estos cambios volumétricos, las losas sobre terreno se alabean debido a las diferencias entre el contenido de humedad y temperatura entre la cara superior, expuesta al medio ambiente, y la cara inferior, en contacto con el terreno.

Dentro del diseño de losas sobre terreno con concreto convencional, el agrietamiento debido a la contracción por secado y el alabeo de los bordes son temas de interés. La contracción por secado es causado por la evaporación de la humedad de la superficie de la losa, mientras que el alabeo de los bordes, como se explicó anteriormente, es causado por las diferencias entre los contenido de humedad y temperatura entre la cara superior e inferior de la losa. Para reducir el efecto de la contracción por secado es necesario colocar juntas de contracción. Por ejemplo, la Asociación de Cemento Pórtland recomienda separación de juntas de 24 a 36 veces el espesor de losa.

Como las losas sobre terreno tienden a alabearse en las juntas y alrededor del perímetro, algunas veces causan que la losa pierda contacto con el material de la sub-base. En las construcciones industriales como fábricas y almacenes, los pisos de concreto deben permanecer lisos y planos para permitir a los montacargas, las apiladoras de alto alcance y otros equipos especializados, operar con seguridad y precisión, ya que un equipo que cruza una junta alabeada puede causar que su plataforma raspe la superficie del piso, desportillándose o fracturándose si la subrasante de apoyo se ha deteriorado, por lo que estas losas pueden deteriorarse rápidamente, causar problemas de seguridad y costos de reparación. El problema del alabeo se reduciría si se eliminan las juntas de control, lo que involucraría un piso con grietas aleatorias debido a la contracción por secado. Aun cuando el piso tuviera una fuerte cantidad de refuerzo, éste sólo ayudaría a controlar el ancho de grietas.

Con el objeto de minimizar los efectos antes mencionados en la construcción de pisos industriales, el Instituto de Ingeniería de la UNAM está desarrollando un proyecto de investigación titulado: “Comportamiento de losas de concreto de contracción compensada” patrocinado por la empresa CEMEX Concretos. Este proyecto incluye una parte experimental que se realizó en las instalaciones del Centro de Tecnología de Concreto y de la planta de CEMEX Concretos en el Distrito Federal y cuyos resultados se muestran en el presente trabajo de investigación.

## **OBJETIVO**

El objetivo de este estudio es evaluar el comportamiento a mediano plazo de elementos de concreto reforzado empleando cemento expansivo tipo K, fabricado en México, en losas de concreto sobre terreno. Para ello, se midieron las deformaciones por expansión y contracción del concreto, y su efecto en el acero de refuerzo, desde el momento del colado.

# CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

## 1.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las características de las losas sobre terreno, del concreto de contracción compensada, las investigaciones realizadas relacionadas con losas sobre terreno fabricadas con concreto de contracción compensada y las recomendaciones del Comité 223 del ACI para el uso de este concreto.

## 1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOSAS SOBRE TERRENO

Los esfuerzos en las losas sobre terreno son ocasionados por las cargas impuestas y los cambios de volumen del concreto. Su magnitud depende de factores como el grado de continuidad, la resistencia y uniformidad de la subrasante, el método y la calidad de construcción, la magnitud y posición de las cargas.

Los métodos de diseño para estas losas se basan en teorías originalmente desarrolladas para pavimentos. Una de las primeras teorías considera una losa homogénea, isótropa y elástica que se apoya en una subrasante ideal, que ejerce en todos los puntos una presión de reacción vertical proporcional a la deflexión de la losa (Westergaard, 1923, 1925, 1926). Esta subrasante es conocida como subrasante Winkler. La teoría supone que la subrasante actúa como un resorte lineal, con una constante de proporcionalidad  $k$  con unidades de presión por unidad de deformación; esta constante se denomina coeficiente o módulo de reacción de la subrasante.

Posteriormente surgieron otras teorías que se pueden agrupar de acuerdo con los modelos usados para simular el comportamiento de la losa y la subrasante. Las losas se pueden modelar como un sólido elástico-isótropo o una losa delgada elástica o una losa delgada elástico-plástica. La subrasante se puede modelar como un sólido elástico-isótropo o una subrasante Winkler.

Se puede utilizar el método del elemento finito para analizar losas sobre terreno, particularmente aquellas con discontinuidades, como juntas, grietas y subrasante no uniformes. Hay varios modelos propuestos para representar las losas sobre terreno, tales como combinaciones de varios elementos como sólidos elásticos, sólidos rígidos y barras de torsión. La subrasante normalmente se modela como subrasante Winkler debajo de los nudos. El método de elemento finito es útil para problemas complejos.

### 1.2.1 Tipos de losas

En la tabla 1.1 se indican los tipos de losas sobre terreno y los métodos de diseño apropiados para cada uno (ACI 360). Los métodos indicados fueron desarrollados por la Asociación de Cemento Pórtland (PCA), el Instituto del Refuerzo de Alambre (WRI), el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (COE), el Instituto del Concreto Postensado (PTI) y el Comité 223 del Instituto Americano del Concreto (ACI 223).

Los tipos de losas sobre terreno que se indican en la tabla 1.1 son: losas de concreto simple, losas reforzadas por contracción y temperatura, losas de concreto de contracción compensada reforzada, losas postensadas para compensar la contracción, losas postensadas y/o reforzadas con preesfuerzos activos y las losas reforzadas por acción estructural.

Todos los tipos de losas, con excepción del último, son diseñados considerando que las cargas aplicadas no agrietan las losas. Sin embargo, en las losas reforzadas por acción estructural, se espera que las cargas aplicadas puedan agrietar la losa. Cada método hace recomendaciones para las juntas y su separación. Los parámetros más importantes que relacionan los tipos de losas y métodos de diseño son el módulo de la subrasante de apoyo, y la fricción entre la losa y el terreno de apoyo.

**Tabla 1.1 Tipos de losas con los métodos de diseño apropiados (ACI-360R, 1992)**

TIPOS DE CONSTRUCCIÓN DE LOSAS	MÉTODO DE DISEÑO					
	PCA	WRI	COE	PTI	ACI223	
Losa de concreto simple, no reforzada	X	X	X			Elección del espesor
	X		X			Detalles relacionados
Losa reforzada, por contracción y temperatura	X	X	X			Elección del espesor
	X	X				Detalles relacionados
Losa de concreto de contracción compensada, con refuerzo por contracción	X	X	X			Elección del espesor
					X	Detalles relacionados
Losa postensada, para controlar grietas	X	X	X	X		Elección del espesor
				X		Detalles relacionados
Losa postensada y/o reforzada, con presfuerzos activos	X	X		X		Elección del espesor
				X		Detalles relacionados
Losas reforzadas, por acción estructural	X	X	X			Elección del espesor
		X	X			Detalles relacionados

El diseño de losas de concreto simple consiste en determinar el espesor como una losa de concreto sin refuerzo de algún tipo (como alambres, barras lisas o corrugadas). No obstante, puede tener las juntas reforzadas. Normalmente se usa cemento pórtland tipo I o II que son equivalentes al Cemento Pórtland Ordinario (CPO) o al Cemento Pórtland Compuesto (CPC) o cualquier cemento que cumpla con la característica especial Bajo Calor de Hidratación (BCH) o Resistente a los Sulfatos (RS). Por efecto de la contracción por secado, la separación de juntas es limitada. Por ejemplo, la PCA recomienda separación de juntas de 24 a 36 veces el espesor de la losa.

El diseño del espesor de losas reforzadas por contracción y temperatura es similar al de las losas de concreto simple. El diseño tampoco debe contemplar grietas en la superficie producidas por las cargas aplicadas. Generalmente, se construyen con cemento pórtland tipo I o II que son equivalentes al CPO y CPC. Para controlar las grietas por contracción se proporciona una cuantía nominal de refuerzo que se coloca en la mitad superior de la losa. Esto permite una mayor separación de juntas que las losas de concreto simple. La separación de juntas se calcula con la ecuación de fricción de la subrasante que se indica en la ecuación 1.1.

Las losas de concreto de contracción compensada se producen con un cemento expansivo. Este concreto se expande una cantidad prevista, la cual será levemente mayor que la contracción por secado. Normalmente se usan cuantías de refuerzo por temperatura y contracción entre 0.15 y 0.20%. El refuerzo se usa para limitar la expansión inicial de la losa y restringir la contracción por secado. Las losas se deben aislar de las partes fijas de una estructura, como columnas y perímetro de cimentaciones, con un material compresible que les permita expandirse. El diseño del espesor de este tipo de losa es similar al de las losas anteriores, con la ventaja de obtener mayores separaciones de juntas. Los criterios de diseño se detallarán mejor en el capítulo 2.

### ***Ecuación de fricción de la subrasante***

La ecuación de fricción de la subrasante se usa para determinar la cantidad de refuerzo no pretensado que sirve como refuerzo por contracción y temperatura, y controla la anchura de grietas de la losa sobre terreno, manteniendo firmemente cerrada alguna grieta que pueda ocurrir entre las juntas de manera que funcione la transferencia de carga. No se aplica cuando se utiliza pretensado o fibras. El acero determinado por esta ecuación no evita las grietas ni aumenta significativamente la capacidad de carga del piso.

La ecuación para determinar el acero por unidad de ancho de losa es (ACI 360R-92):

$$A_s = \frac{F \cdot L \cdot w}{2 \cdot f_s} \quad (1.1)$$

Donde

- $A_s$     área de acero de la sección transversal por unidad lineal de ancho de losa
- $F$     coeficiente de fricción de la subrasante (la PCA recomienda usar 1.5 a 2.0 para pavimentos y 1.5 para pisos de concreto sobre terreno.)
- $L$     longitud de la losa (o anchura si es apropiado) entre bordes libres, (un borde libre es cualquier junta libre para moverse en un plano horizontal.)
- $w$     peso de la losa por unidad de área.
- $f_s$     el esfuerzo de trabajo permisible del refuerzo. (El esfuerzo de trabajo del acero normalmente es de 0.67 a 0.75 veces el esfuerzo de fluencia del acero).

### **1.2.2 Diseño y variables de construcción**

El diseño y construcción de losas sobre terreno comprende factores técnicos y humanos. Los factores técnicos incluyen cargas, sistemas de apoyo, tipos y separación de juntas, el método de diseño, el tipo de losa, la mezcla de concreto y el proceso de construcción. Los factores humanos comprenden la habilidad de los trabajadores, supervisión del proceso constructivo y procedimiento de mantenimiento anticipado que consideren el agrietamiento, alabeo, contracción y otras condiciones.

Las losas están sujetas a las siguientes cargas: carga de las ruedas de vehículos, cargas concentradas, cargas uniformes, cargas de construcción, efecto del medio ambiente incluyendo suelos expansivos, y cargas inusuales como fuerzas ocasionadas por asentamientos diferenciales.

El diseño de losas sobre terreno involucra la interacción de la losa y el sistema de apoyo del suelo para resistir momentos y cortantes inducidos por las cargas aplicadas. Por consiguiente, las propiedades del concreto y del suelo de apoyo son importantes. El sistema de apoyo del suelo normalmente consiste de una base, una sub-base y una subrasante. Si el suelo existente tiene la resistencia y propiedades requeridas para apoyar a la losa, ésta se puede colocar directamente sobre la subrasante existente. Normalmente el suelo existente no tiene la nivelación ni la pendiente adecuada, por lo que se requiere de algún corte o relleno, que se deberá hacer con la elección del mejor material del lugar.

### **1.2.3 Métodos de diseño**

Cada método de diseño tiene recomendaciones para los tipos y separación de las juntas. Los parámetros más importantes que relacionan los tipos de losas y métodos de diseño son el módulo de la subrasante de apoyo, y la fricción entre la losa y el terreno de apoyo.

### ***Método de la PCA***

Este método es un proceso de elección del espesor, en función de la carga de la rueda de los vehículos operantes (montacargas), de la carga sobre las patas de los estantes de almacenamiento (o postes); y de la carga uniforme. Generalmente, no se requiere refuerzo, pero si es el caso, se emplean para controlar las grietas por efecto de la temperatura. Se emplean pasajuntas para la transferencia de cargas en las juntas.

El diseño se basa en los gráficos de influencia de Pickett que emplea el concepto de carga equivalente de una sola rueda centrada y ubicada en el interior de la losa, es decir, cargas que están en la superficie de la losa pero no adyacente a los bordes libres.

Las variables usadas son la resistencia a flexión, el esfuerzo de trabajo, área de contacto y la separación de las ruedas y el módulo de la subrasante.

En las gráficas no se incluye las discontinuidades de la losa. La PCA sugiere que la losa sea reforzada en las juntas para compensar la falta de continuidad. Esto normalmente se hace aumentando la sección en los bordes o con pasajuntas lisas o barras de anclaje.

### ***Método del WRI***

Este método de diseño usa nomogramas para determinar el espesor de losa basado en soluciones de un modelo de elemento discreto para las losas de concreto. La losa se modela mediante barras rígidas para la flexión, barras de torsión para losas a torsión, y por nudos elásticos para la flexión de la placa. Se proporciona apoyo continuo por constantes de resorte elástico en todos los nudos.

Las variables de diseño son el módulo de elasticidad del concreto, el módulo de reacción de la subrasante, el diámetro del área cargada, la separación de los pasajuntas, el módulo de ruptura del concreto y la elección del factor de seguridad. El método del WRI proporciona soluciones para la carga de las ruedas y para cargas uniformes con un ancho de pasillo variable. Al igual que el método de la PCA sólo considera cargas en el interior de la losa.

### ***Método del COE***

Este método se basa en la fórmula de Westergaard para los esfuerzos del borde en una losa de concreto sobre terreno. Se emplean nomogramas con las siguientes variables: el módulo de ruptura, módulo de la subrasante y la carga. La carga se maneja usando índices de diseño; este índice internamente fija un valor para el área de la rueda, la separación de ruedas y carga en ejes.

Las gráficas de diseño del COE se emplean para cargas de ruedas y ejes aplicadas solamente en bordes o en las juntas. No considera las cargas concentradas, las cargas uniformes, las cargas de construcción y las cargas en franjas.

### ***Método del PTI***

El manual del PTI, para el análisis y diseño de losas postensadas, incluye requisitos de resistencia en términos de momentos y cortantes. Adicionalmente al postensado, se pueden usar barras de acero corrugadas, mallas de alambre soldado, o una combinación de tendones y acero de refuerzo.

El procedimiento de diseño es aplicable a losas ligeramente reforzadas contra los efectos de contracción, a losas reforzadas y rigidizadas con vigas y a losas estructurales. También incluyen losas apoyadas en suelos inestables; en este caso, el suelo de apoyo puede aplicar una carga a la losa.

El método del PTI se basa en parámetros de suelo, estructurales y su interacción. Algunos parámetros importantes son el clima, movimiento diferencial de suelo, índice de estabilidad de humedad, longitud y anchura de losa, separación de vigas, cargas aplicadas, espesor y anchura de vigas rigidizantes. El manual del PTI presenta un procedimiento basado en una ecuación para calcular el esfuerzo causado por las cargas concentradas en el interior de la losa, derivado de la teoría de vigas y cimentación elástica.

### ***Método del Comité 223 del ACI***

Este método de diseño es diferente de los cuatro anteriores, porque no trata directamente el espesor de la losa (requerido por las cargas colocadas en la superficie de la losa, éste se debe obtener con algún método mostrado en la tabla 1.1), si no más bien, trata los aspectos de la expansión y la contracción del concreto. El comité del ACI 223, da normas para el uso de concreto de contracción compensada, especifica la cuantía de refuerzo deseado y su ubicación en el espesor de la losa para valores específicos de expansión y contracción previstos. También indica los requerimientos de las juntas de expansión y la separación de juntas.

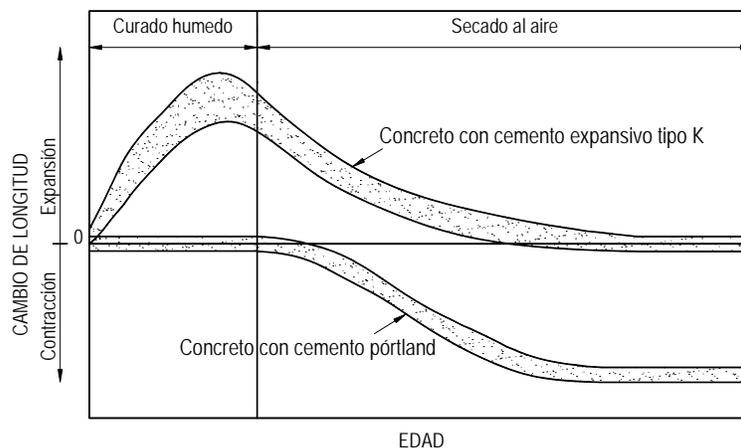
## **1.3 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO DE CONTRACCIÓN COMPENSADA**

La razón principal para utilizar el concreto de contracción compensada fabricada con cemento expansivo tipo K en pisos industriales es reducir y minimizar las grietas por contracción por secado. Al mismo tiempo, al permitir colocar grandes áreas de pisos sobre terreno, se reduce el número de juntas de construcción y los problemas que ellos conllevan.

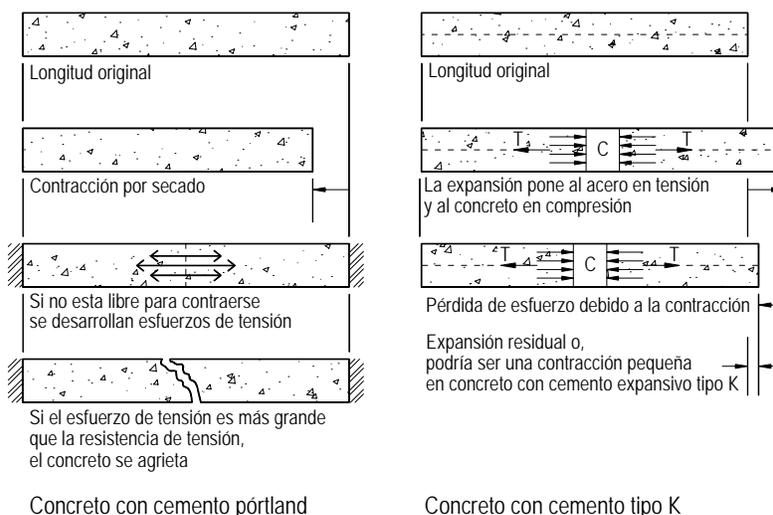
A continuación se indicará el comportamiento del concreto de contracción compensada en forma paralela al concreto convencional.

En las figuras 1.1 y 1.2 se muestran las características de cambio de volumen causado por la contracción por secado del concreto con CPO y concreto con cemento tipo K (en la sección 1.3.1 se mencionarán las características del cemento expansivo tipo K). Como se observa en la figura 1.1, el concreto con CPO después de un periodo de curado empieza a contraerse, mientras que el concreto con cemento tipo K experimenta un periodo de expansión debido a una reacción química interna durante la hidratación.

De la figura 1.2, el concreto con CPO cuando está sujeto a restricción, como normalmente sucede en la práctica profesional, desarrolla esfuerzos de tensión. Si estos esfuerzos excedieran la resistencia a tensión del concreto, éste se agrietará. A diferencia de la expansión de los concretos con cemento tipo K causan tensión en el refuerzo y, por lo tanto, compresión en el concreto. Con el transcurso del tiempo en el concreto, la deformación de expansión aproximadamente compensa la contracción por secado.



**Figura 1.1** Características típicas del cambio de longitud de concretos con CPO y concretos de contracción compensada (Williams, 1981)



**Figura 1.2** Agrietamiento del concreto con CPO debido a la contracción por secado y el concepto básico del concreto con cemento expansivo (Williams, 1981)

A continuación se indicarán las características de los materiales usados para la elaboración del concreto de contracción compensada.

### 1.3.1 Cementos expansivos

Los cementos expansivos son cementos hidráulicos que a diferencia de los CPO se expanden durante el periodo de hidratación temprano después del fraguado. Este cemento se usa para compensar la disminución de volumen debido a la contracción, para inducir esfuerzos de tensión en el refuerzo o para estabilizar dimensiones a largo plazo de estructuras de concreto postensadas.

La pasta de cemento expansivo, sin restricción, se expande grandes cantidades que pueden causar el agrietamiento; sin embargo, si la expansión es restringida, disminuye su magnitud y se desarrollaría un preesfuerzo o auto-esfuerzo. Dependiendo de la cantidad de preesfuerzo desarrollado en el concreto, los cementos expansivos se dividen en dos categorías. Cuando la magnitud de la expansión es pequeña

tal que el preesfuerzo desarrollado en el concreto es del orden de 1.75 a 7.00 kg/cm<sup>2</sup> (0.2 a 0.7 MPa) el cemento se conoce como compensador de contracción y es adecuado para compensar los esfuerzos de tensión debido a la contracción por secado. Los cementos de este tipo han dado buenos resultados en la construcción de pavimentos y losas libre de grietas. Cuando la magnitud de expansión es suficientemente grande para producir preesfuerzos del orden de 70.3 kg/cm<sup>2</sup> (6.9 MPa), el cemento se conoce como auto-esforzante. El nivel de esfuerzo de compresión es alto de modo que aún después de la pérdida de esfuerzo debido a la contracción por secado, el concreto permanece en compresión. Este cemento expansivo se puede usar para la producción de elementos de concreto presforzados químicamente.

El desarrollo de este estudio se referirá al concreto elaborado con un cemento compensador de contracciones, es decir del primer tipo señalado, por el tipo de aplicación realizada.

Las Norma Americana de Ensaye de Materiales (ASTM) C 845 indica las especificaciones para cementos expansivos, y menciona tres tipos designados como K, M y S. La expansión de cada uno de estos cementos, al mezclarse con suficiente agua, se debe principalmente a la formación de etringita.

Setenta y cinco a noventa por ciento de los concretos de contracción compensada consisten de componentes de cemento pórtland, con la adición de fuentes de aluminato y sulfato de calcio. El cemento expansivo tipo K es una mezcla de cemento pórtland, anhídros de sulfato trialuminato tetracálcico,  $C_4A_3\bar{S}$  (donde C=CaO, A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y  $\bar{S}$ =SO<sub>3</sub>, cal, óxido de aluminio y anhídrido sulfúrico, respectivamente), sulfato de calcio (CaSO<sub>4</sub>), y cal (CaO). El cemento expansivo tipo M, es una mezcla de cemento pórtland, cemento aluminato cálcico (CA y C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>), y sulfato de calcio. El cemento expansivo S, es un cemento pórtland que contiene una gran contenido de aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) y más sulfato de calcio que normalmente se encuentra en el cemento pórtland.

El potencial de expansión es controlado por el tipo y cantidad de aluminatos y sulfatos de calcio así como la proporción en que formen etringita. La resistencia a compresión, como en otros tipos de cemento pórtland, se debe principalmente a la hidratación de los silicatos de calcio.

La etringita es un mineral, denominado sulfoaluminato cálcico altamente sulfatado (3CaO • Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> • 3CaSO<sub>4</sub> - 30-32H<sub>2</sub>O), que surge en la naturaleza o se forma por el ataque de los sulfatos a los morteros y concretos; es el principal producto expansivo resultado de la reacción en cementos expansivos.

A continuación se verán algunas características del cemento de contracción compensada.

### ***Proceso de hidratación***

Los factores básicos para el desarrollo de la expansión son la cantidad apropiada de sulfatos y la disponibilidad de agua para la hidratación (ACI 223). La etringita empieza a formarse inmediatamente cuando el agua se introduce, y su formación se acelera con el mezclado. Para ser efectivo, la mayor parte de la etringita debe formarse después del alcanzar cierta resistencia, de lo contrario, la fuerza expansiva se disipará en la deformación del concreto plástico o semiplástico. Por esta razón, un mayor tiempo de mezclado para asegurar una mezcla uniforme es perjudicial, puesto que la etringita formada durante el mezclado prolongado reducirá la cantidad disponible para la expansión.

## ***Ensayes***

Para determinar la expansión del cemento de contracción compensada, se miden los cambios de longitud de prismas de mortero de arena, restringidos, de 50 x 50 x 254 mm, de acuerdo con la norma ASTM C 806, que describe el método de ensaye para expansión restringida de mortero con cemento expansivo. Con este ensaye, se mide el potencial expansivo del cemento y sirve para evaluar el cumplimiento de las especificaciones del cemento.

### **1.3.2 Agregados**

Los agregados del concreto que son empleados para los concretos con cemento pórtland también se pueden usar para concretos con cemento de contracción compensada. Se obtienen buenos resultados con agregados de peso normal, peso ligero, y de alta densidad si se cumplen los requerimientos de las normas para agregados.

El tipo de agregado es uno de los factores más importantes que influyen en el comportamiento de expansión y contracción de los concretos de contracción compensada. Resultados de ensayes de laboratorio han mostrado que los concretos con agregados de peso ligero (pizarra triturada) y piedra arenisca se expanden menos que las mezclas de concreto con granito triturado y grava de río. En prismas restringidos, los valores de expansión se encuentran entre 0.048 y 0.084%. Además, después de un año, la mezcla con grava de río y granito triturado tienen alguna compresión residual de 0.03%, mientras que el concreto hecho con agregado de piedra arenisca y agregado de peso ligero, pierde toda la precompresión después de 40 días y al cabo de un año, tiene una contracción neta de 0.02%. Esto se puede apreciar en la figura 1.3a (Epps y Polivka, 1971).

### **1.3.3 Concreto**

#### ***Resistencia***

La resistencia a compresión, tensión, y flexión en el concreto de contracción compensada, generalmente es influenciado por los mismos factores que el concreto con cemento pórtland (Klieger y Greening, 1968).

Epps y Polivka (1971), encontraron que el tipo de agregado, como en el comportamiento de expansión y contracción de los concretos de contracción compensada, también influye en la resistencia a compresión. Cuanto mayor es la expansión del concreto, menor es la resistencia, como se aprecia en la figura 1.3b.

Polivka y Willson (1973), encontraron que para una relación agua/cemento, entre 0.40 y 0.65, la resistencia a compresión de los concretos con cemento tipo K fue más alta que para un concreto con cemento pórtland tipo I. Como en el cemento pórtland tipo I, cuanto menor es la relación agua/cemento, mayor es la resistencia a compresión, como se aprecia en la figura 1.4a. Así mismo, como en el cemento pórtland tipo I, mientras mayor es el consumo de cemento, mayor es la resistencia a compresión del concreto. Para mayores consumos de cemento, la resistencia a compresión de los concretos de contracción compensada es mayor que la de los concretos con cemento pórtland tipo I, como se aprecia en la figura 1.4b.

---

### ***Módulo de elasticidad***

El módulo de elasticidad del concreto de contracción compensada generalmente es comparable al del concreto de cemento pórtland. Sin embargo, es influenciado por la magnitud de expansión, un incremento en la expansión reducirá el módulo. Por ejemplo, si se duplica la expansión de 0.06 a 0.12% se obtiene aproximadamente una disminución del módulo de elasticidad en un 10% (Polivka y Willson, 1973).

El módulo de elasticidad del concreto de contracción compensada es más bajo que el correspondiente al concreto hecho con cemento pórtland tipo V. Cuanto más alto es la expansión de un concreto, más bajo es el módulo de elasticidad, como se ve en la figura 1.3c (Epps y Polivka, 1971).

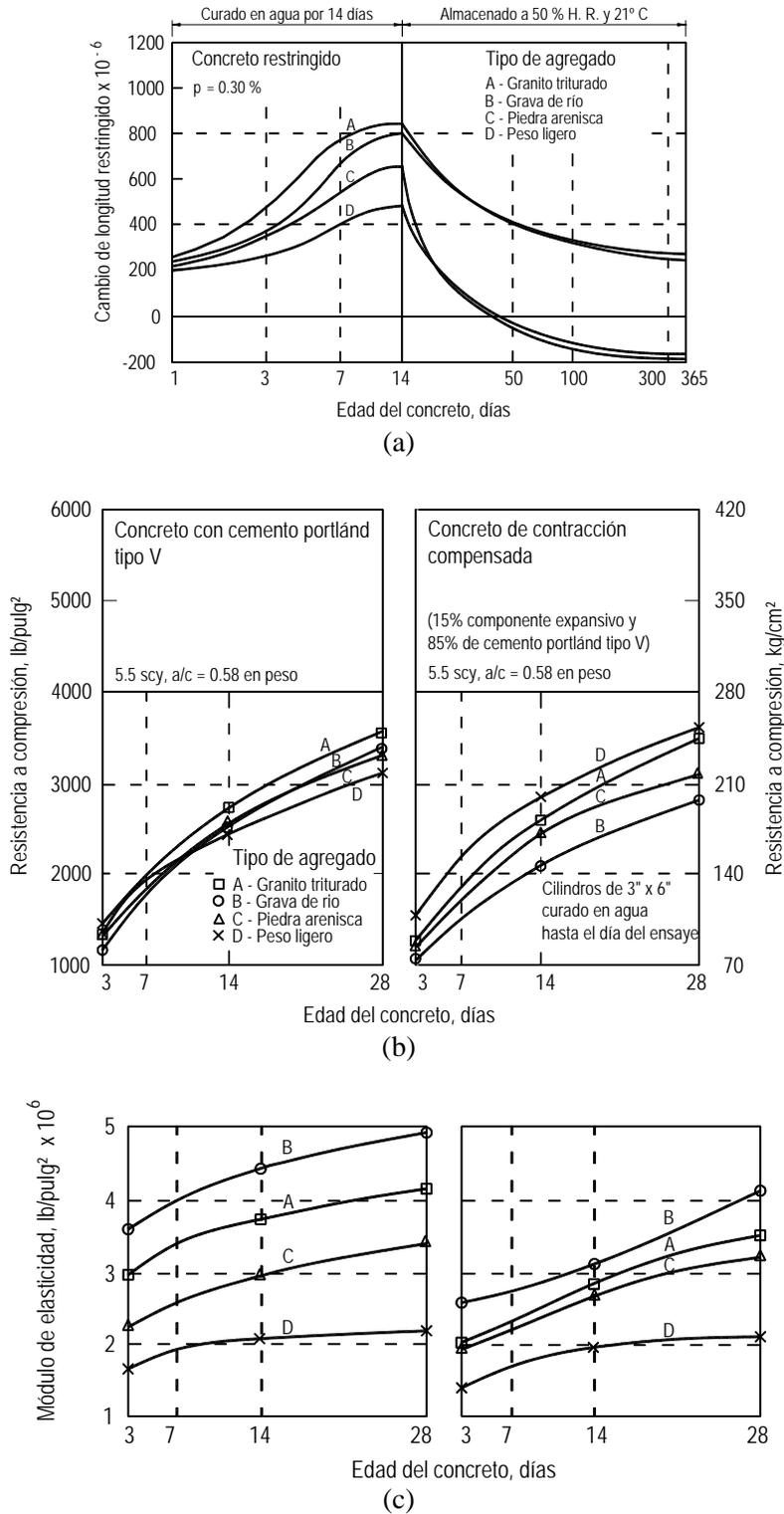
### ***Cambio de volumen***

Después de la expansión, las características de contracción por secado del concreto de contracción compensada, son similares a las del concreto con cemento pórtland. La contracción por secado de estos concretos es afectada por los mismos factores, como el contenido de agua en la mezcla de concreto, tipo de agregado usado, consumo de cemento, etc.

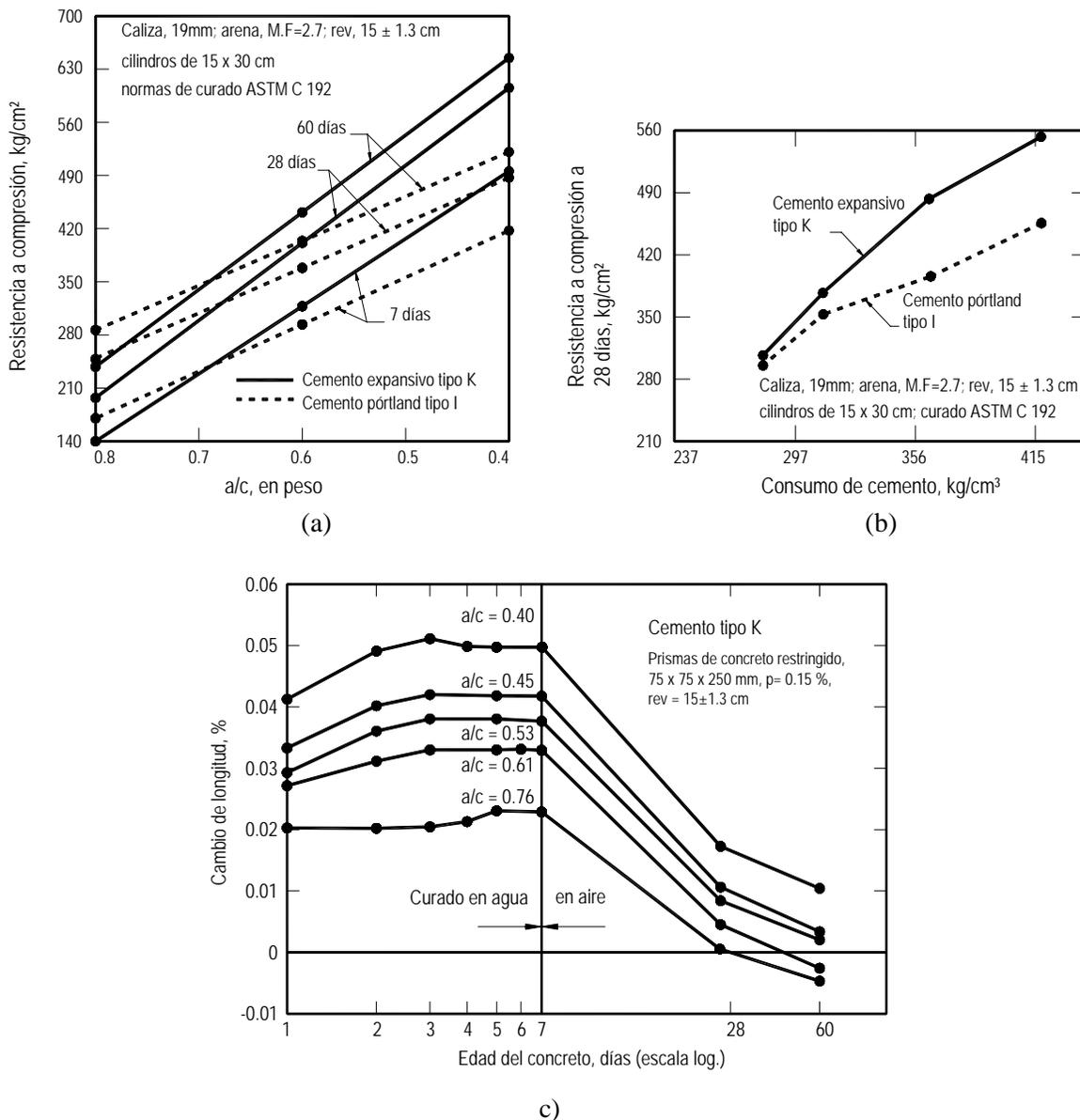
El contenido de agua influye en la expansión, durante el curado, y en el acortamiento debido a la contracción por secado. Polivka y Willson (1973), mostraron que los concretos de baja relación agua/cemento (0.40 a 0.53), después del secado durante 60 días, permanece en una ligera compresión (expansión residual), mientras que los concretos con alta relación agua/cemento (0.61 a 0.76) desarrollan un pequeño esfuerzo de tensión (contracción neta), como se aprecia en la figura 1.4c.

Se recomienda usar bajas relaciones agua/cemento, incluso cuando no es necesario por resistencia.

Una mezcla de concreto de contracción compensada, diseñada apropiadamente, debería permanecer bajo una ligera compresión después de un largo periodo de curado.



**Figura 1.3** a) Efecto del tipo de agregado en los cambios de longitud de concreto de contracción compensada; b) resistencia a compresión; c) módulo de elasticidad. (J. Epps y M. Polivka, 1971)



**Figura 1.4** a) Efecto de la relación agua/cemento en la resistencia a compresión de concretos de contracción compensada; b) efecto del contenido de cemento en la resistencia a compresión de concretos de contracción compensada; c) efecto de la relación agua/cemento en el cambio de longitud del concreto de contracción compensada. (Polivka y Willson, 1973)

En la sección 2.3 se indicará los resultados obtenidos de la resistencia y cambio de volumen, expansión y contracción por secado, para el concreto de contracción compensada utilizado en la parte experimental de esta investigación.

## 1.4 INVESTIGACIONES REALIZADAS SOBRE LOSAS DE CONCRETO DE CONTRACCIÓN COMPENSADA

No existe en la literatura técnica mucha información disponible sobre el comportamiento a corto y largo plazos de losas apoyadas sobre terreno de concreto de contracción compensada. Russell en 1973, presenta el primer informe sobre los resultados obtenidos a una edad de 70 días en losas verticales de concreto que se encontraban en condiciones de laboratorio, con una temperatura de 21° C y una humedad relativa de 55% constantes. Y en 1980, Russell presenta un segundo informe correspondiente a los resultados registrados a la edad de 1000 días.

### 1.4.1 Estudios de Russell

Russell dirigió una investigación para evaluar los efectos del tipo de cemento, tipo de agregado, cuantía y ubicación del refuerzo, espesor de losa y condiciones de curado en la expansión, y consecuente, contracción de losas fabricadas con concreto de contracción compensada. El estudio se dividió en tres partes, en función del tipo de restricción exterior en los extremos de los especímenes. En el primer grupo, denominados especímenes de contracción, la expansión o contracción del concreto fue restringida únicamente por el refuerzo sin presentar restricción externa, estos especímenes eran representativos de losas simplemente apoyadas. Al segundo grupo, denominados especímenes de restricción, se les aplicó una fuerza externa que representaba la restricción exterior proveniente de elementos colindantes. Finalmente, en el tercer grupo, denominados especímenes de flujo, se midió las propiedades del concreto de contracción compensada bajo carga axial constante.

Los especímenes ensayados por el Instituto de Ingeniería, son similares a los del primer grupo denominados por Russell como especímenes de contracción, ya que se construyeron sobre un suelo de concreto y no presentan ninguna restricción externa. A continuación se describirán los especímenes correspondientes al primer, segundo y tercer grupos, respectivamente, ensayados por Russell.

#### *Especímenes de contracción*

Las dimensiones de los especímenes fueron de 122 x 61 cm y espesores de 7.6, 15.2 y 22.9 cm. Se utilizaron barras de acero de refuerzo con esfuerzo nominal de fluencia de 4200 kg/cm<sup>2</sup> (412 MPa). En las losas reforzadas simétricamente se emplearon tres tipos de cemento de contracción compensada, S, K, M, y cemento pórtland tipo I como comparación. Un resumen de los diferentes especímenes ensayados se muestra en la tabla 1.2.

Los especímenes se colaron verticalmente y se descimbraron después de seis horas del colado. Las losas con caras selladas se cubrieron con una pintura a base de látex para reducir la pérdida de humedad; además, fueron envueltas con unas láminas de polietileno por tres días después del colado y se almacenaron a 21 °C y 55% de humedad relativa, durante todo el tiempo del ensaye. En la figura 1.6 se muestran algunos especímenes.

El espécimen KR se selló completamente con una lámina de cobre después de seis horas de retirar la cimbra. En los especímenes KT y KU se colocaron láminas en una cara y en sus extremos.

En los especímenes reforzados, se obtuvieron lecturas de deformación del acero de refuerzo y del concreto durante 250 días y finalmente se ensayaron a flexión. En los especímenes que no estaban reforzados la lectura de datos duró 1000 días.

**Tabla 1.2 Descripción y nomenclatura de las losas (Russell, 1980)**

Descripción de las losas <sup>1</sup>			Número de losa			
Tipo de cemento	Agregado <sup>2</sup>	Espesor, e, mm	Refuerzo nominal, %			
			0	0.25	0.50	1.75
Refuerzo simétrico						
I	LW <sup>a</sup>	152	IA	IB	IC	ID
S	LW <sup>a</sup>	152	SA	SB	SC	SD
K	LW <sup>a</sup>	152	KA	KB	KC	KD
M	LW <sup>a</sup>	152	MA	MB	MC	MD
K	LW <sup>b</sup>	76			KE	
K	LW <sup>a</sup>	229			KF	
K	NW <sup>b</sup>	76		KN		
K	NW <sup>b</sup>	152	KJ	KL	KM	
K	NW <sup>b</sup>	229		KP		
Refuerzo asimétrico						
K	LW <sup>c</sup>	152		KG	KH	
K	NW <sup>c</sup>	152		KQ		
Caras selladas						
K	NW <sup>d</sup>	152		KR <sup>3</sup>		
K	NW <sup>d</sup>	152		KT <sup>4</sup>	KU <sup>4</sup>	

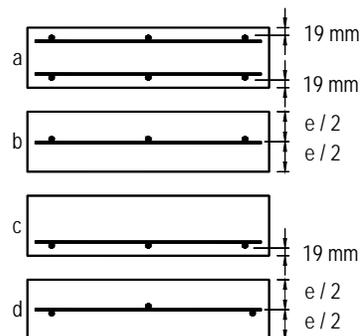
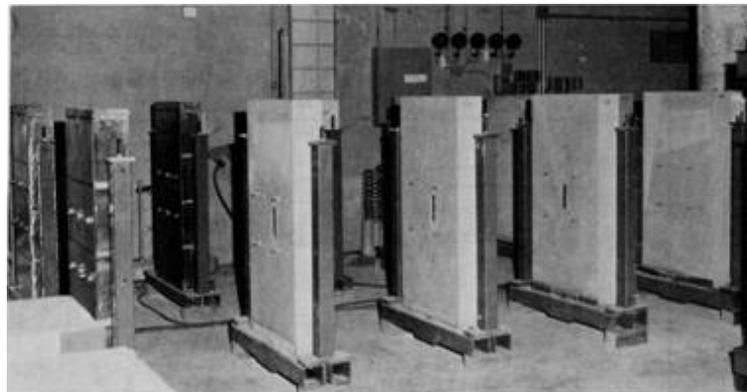
<sup>1</sup> Todas las losas tenían 610 mm de ancho y 1200 mm de alto

<sup>2</sup> LW es de peso ligero y NW es de peso normal

<sup>3</sup> Completamente sellada

<sup>4</sup> Sellada en una cara

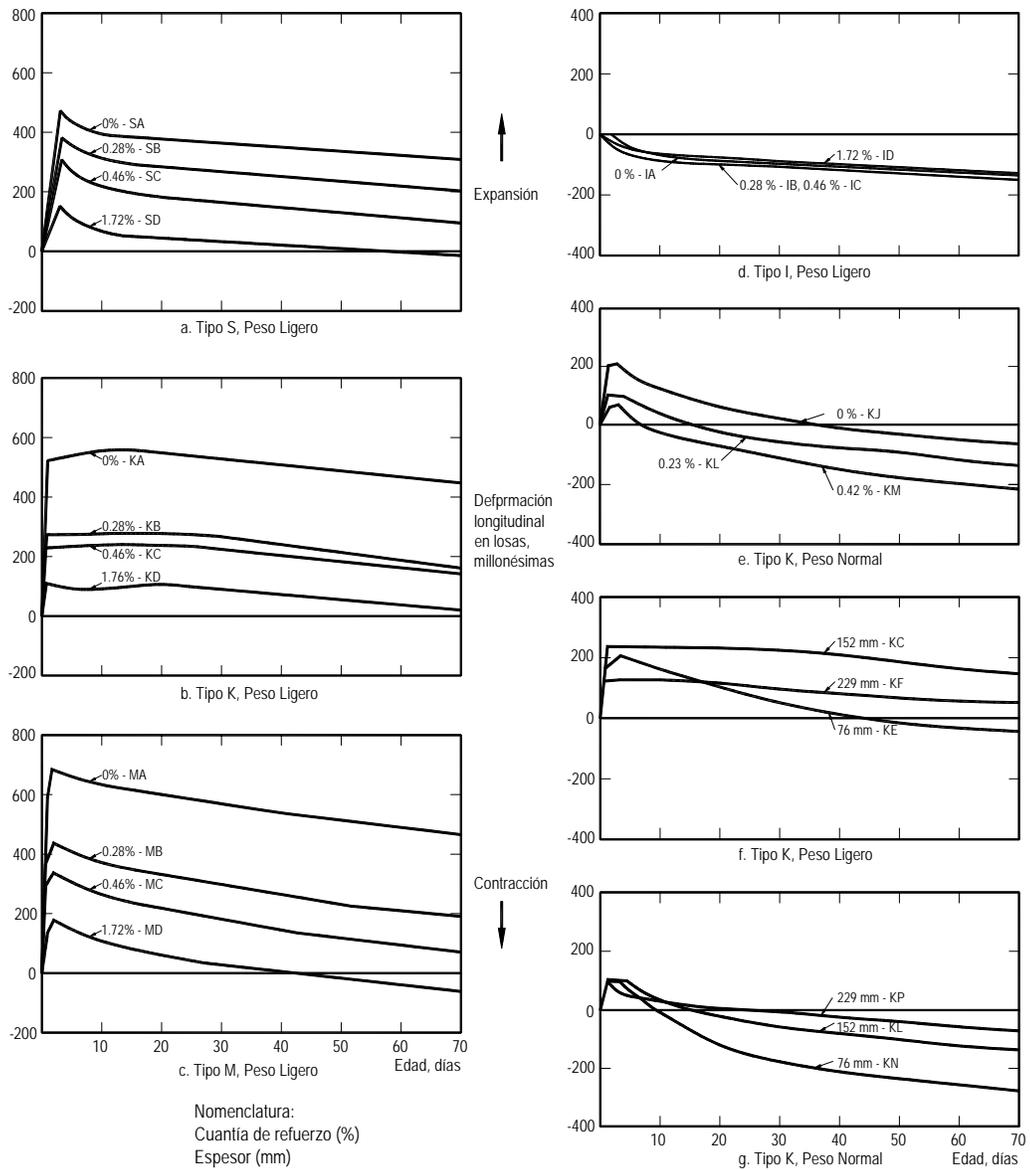
<sup>a, b, c, d</sup> Tipos de ubicación de refuerzo, ver figura 1.5

**Figura 1.5 Tipos de ubicación de parrillas de refuerzo****Figura 1.6 Especímenes sin restricción externa (Russell, 1980)**

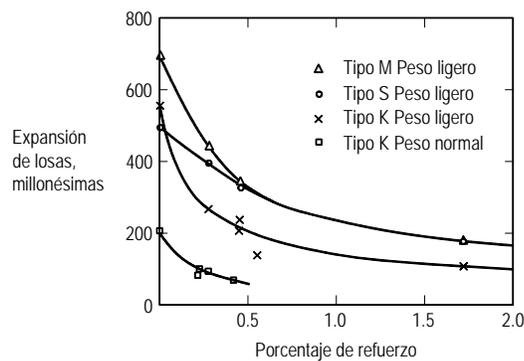
En las figuras 1.7 a 1.12, se muestran un resumen de los resultados obtenidos por Russell (1973, 1980) y de los cuales se observó lo siguiente:

En las losas con refuerzo simétrico:

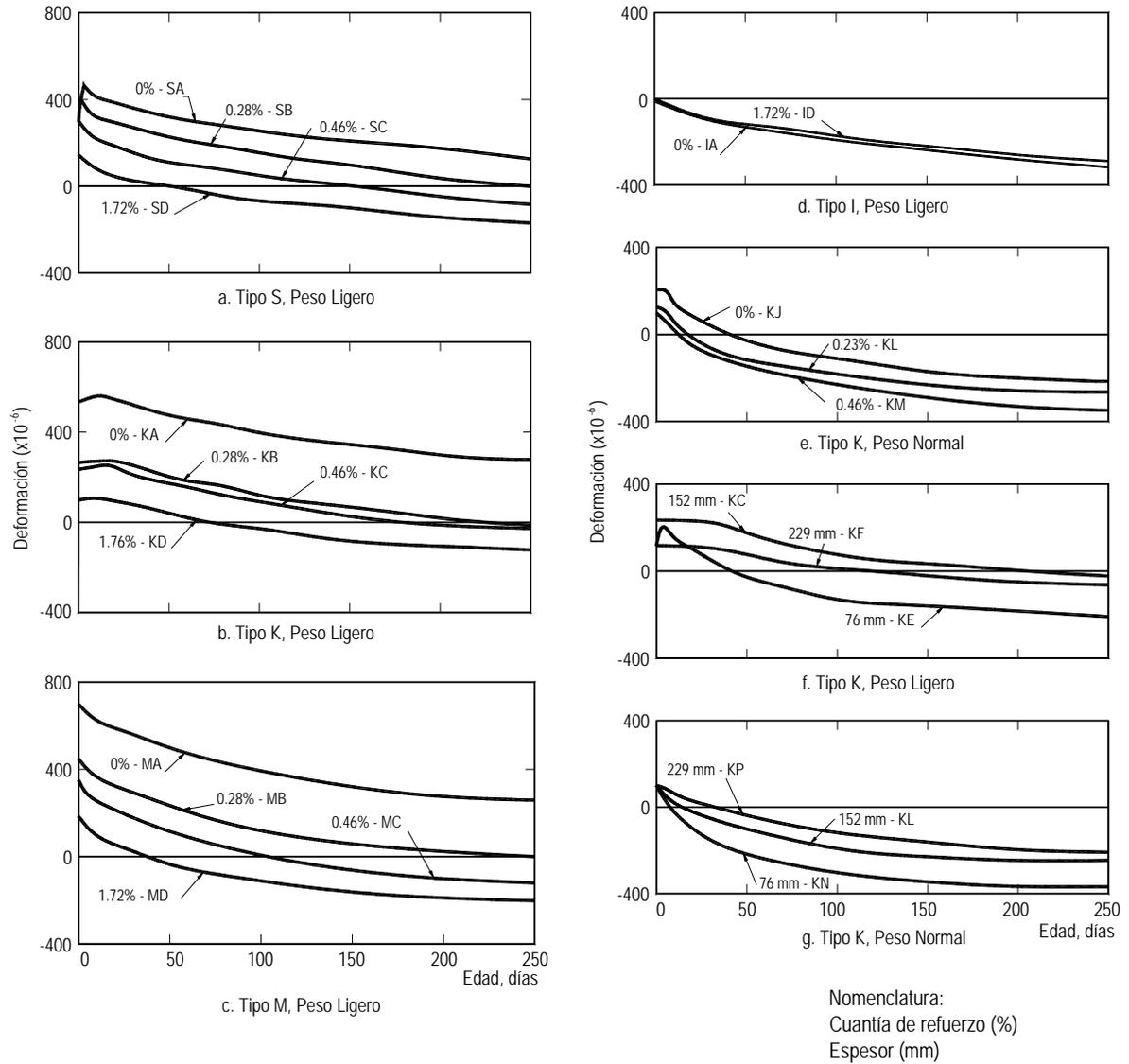
- En las figuras 1.7a a la 1.7c, se observa que los tres tipos de cemento se expandieron en cantidades y proporciones diferentes. En este caso, se usaron cementos comerciales, el único requisito fue que desarrollara la expansión máxima dentro de cuatro días después de colado.
- Todos los especímenes de concreto de contracción compensada se expandieron durante el periodo de curado (bajo bolsas de polietileno), ver figuras 1.7a, 1.7b, 1.7c, 1.7e, 1.7f y 1.7g, lo que no sucedió con el concreto con cemento tipo I, como se puede ver en la figura 1.7d.
- Al quitar las bolsas de polietileno, tres días después, y ponerlos en un ambiente de secado, el comportamiento de los especímenes de 152 y 229 mm de espesor, fabricadas con cemento tipo K y agregado de peso ligero no cambió; estos continuaron expandiéndose lentamente durante 15 días, como se aprecia en la figura 1.7f. Los demás especímenes empezaron a contraerse, como se aprecia en las figuras 1.7a, 1.7b, 1.7c, 1.7e y 1.7g.
- En la figura 1.8, se puede ver que en los tres tipos de cemento, una pequeña cuantía de acero de refuerzo reducirá la expansión obtenida en los especímenes sin refuerzo. En las gráficas las cuantías están expresadas en porcentajes.
- Las losas reforzadas con cuantías bajas experimentan mayores expansiones que las losas con cuantías altas. Sin embargo, el efecto del refuerzo no es grande en la contracción, por la forma de la parte de la contracción de las curvas de las figuras 1.9a, 1.9b, 1.9c y 1.9e. Para especímenes de espesores iguales las curvas son aproximadamente paralelas.
- En la figura 1.10, se muestra el efecto del refuerzo en el cambio neto en longitud a la edad de 250 días. Sólo las losas de peso ligero y con cuantías bajas tienen una expansión neta. Las losas de peso normal con cemento de contracción compensada y las losas con cemento tipo I presentan una contracción neta considerable.
- La ventaja de usar cemento de contracción compensada con respecto al cemento pòrtland ordinario se demuestra la figura 1.10. La curva para la losa de peso ligero con cemento tipo I está más abajo que la curva para la losa de peso ligero con cemento de contracción compensada. La diferencia entre las curvas es menor para losas con cuantías altas. La tendencia ascendente de la curva de la losa de peso ligero y cemento tipo I se debe a que el refuerzo restringe la contracción.



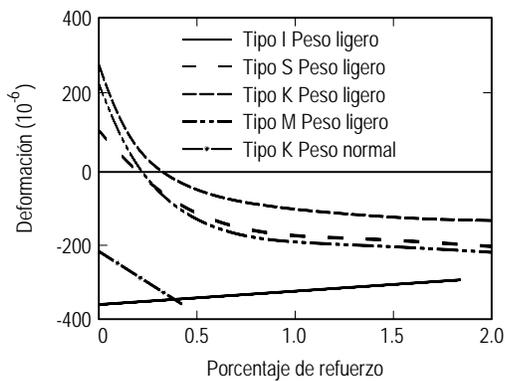
**Figura 1.7 Historia de deformaciones en los especímenes reforzados simétricamente durante 70 días (Russell, 1973)**



**Figura 1.8 Efecto del refuerzo en la expansión (Russell, 1973)**



**Figura 1.9 Historia de deformaciones en los especímenes reforzados simétricamente durante 250 días (Russell, 1980)**



**Figura 1.10 Efecto del refuerzo en la deformación a la edad de 250 días (Russell, 1980)**

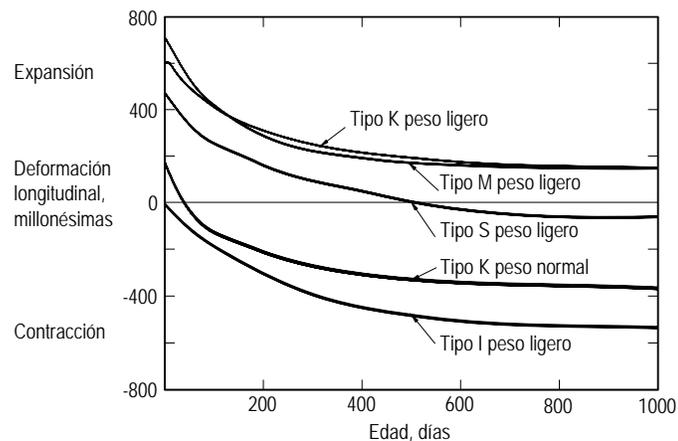
- En la figura 1.11 se muestra las deformaciones medidas en la losa sin refuerzo durante 1000 días. La tendencia en las curvas observadas durante los primeros 250 días continúa a los 1000 días.

En las losas con refuerzo asimétrico

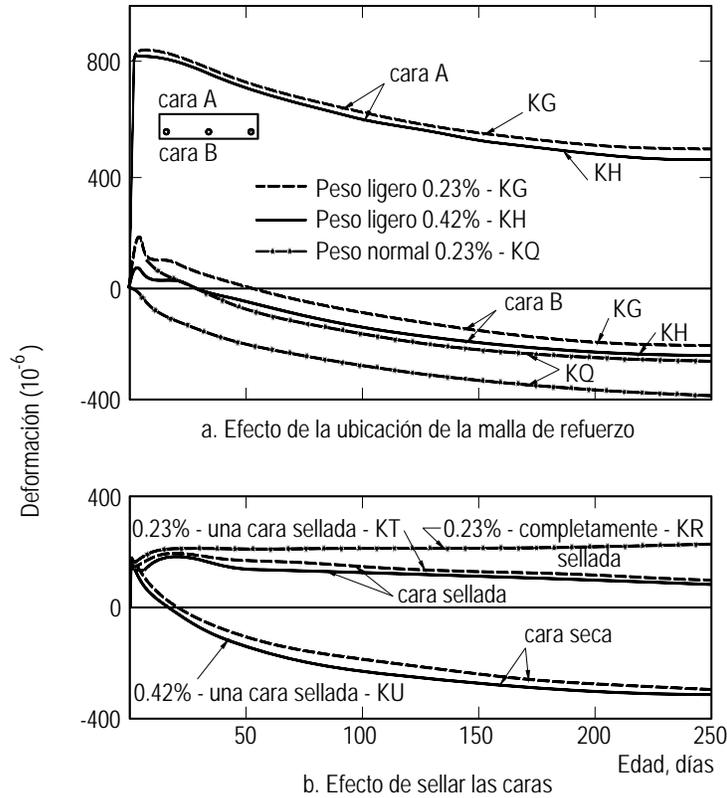
- En la figura 1.12a, para las losas con refuerzo excéntrico, la cara más distante del acero se expandió considerablemente más que la cara más cercana. Para las losas con agregado ligero, la expansión fue casi independiente de la cuantía de acero y mayores que para losas de peso normal. Después del curado (al quitar las hojas de polietileno), la contracción en ambas caras de los tres especímenes fue casi igual.

En las losas con caras selladas

- En la figura 1.12b, para especímenes sellados en una cara, la expansión de caras opuestas fue aproximadamente igual y ligeramente menor que aquellas losas completamente selladas. Después del curado, la cara expuesta empezó a contraerse mientras que la cara sellada continuó expandiéndose aproximadamente por 20 días.



**Figura 1.11 Historia de deformaciones en las losas sin refuerzo (Russell, 1980)**



**Figura 1.12 Historia de deformaciones en los especímenes con refuerzo asimétrico y con caras selladas (Russell, 1980)**

### *Especímenes de restricción*

Russell instrumentó losas verticales de 0.6 x 1.2 x 0.15 m con celdas de carga ubicadas en la parte superior, para obtener los esfuerzos que se producirían en las losas si éstas presentaran restricción externa a su expansión, evitando mediante fuerzas externas que las losas se expandan.

Se encontró que los esfuerzos a compresión alcanzados estuvieron entre 2 y 5 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que los esfuerzos en tensión fueron de 14 a 28 kg/cm<sup>2</sup>.

La característica principal encontrada en estos especímenes fue que pasaron rápidamente de esfuerzos de compresión a tensión. Esto provoca que el concreto de contracción compensada se agriete a edades más tempranas que un concreto normal (Russell, 1973).

### *Especímenes de flujo*

De los ensayos de flujo plástico se encontró que la deformación inicial “instantánea” puede predecirse usando el módulo de elasticidad de cilindros sin restricciones (15 x 30 cm) bajo el mismo intervalo de esfuerzos.

El flujo plástico de las losas de concreto de contracción compensada fue más alto que las correspondientes losas hechas con concreto con cemento pórtland tipo I.

## 1.4.2 Recomendaciones del Comité 223 del Instituto Americano del Concreto (ACI 223)

El Comité 223 del Instituto Americano del Concreto (ACI 223) recomienda para el diseño de elementos estructurales de concreto reforzado, usando concreto de contracción compensada, cumplir los requerimientos correspondientes de las normas aplicables del ACI. Además, se deberá proporcionar una expansión del concreto adecuada para compensar la contracción subsiguiente, por secado, para reducir el agrietamiento al mínimo.

### *Para elementos estructurales*

*Tipos de restricción.*- Existen dos tipos de restricción. La restricción proporcionada por el refuerzo interno para desarrollar la contracción compensada y la restricción proporcionada por los elementos estructurales adyacentes y la fricción de la subrasante, estos últimos, difíciles de determinar. Para estimar los coeficientes de fricción de la subrasante, el ACI 223 recomienda emplear valores en el intervalo de 1.0 a 2.5. Altos niveles de restricción, inducirán esfuerzos de compresión altos en el concreto y proporcionarán poca contracción compensada.

*Refuerzo mínimo y ubicación.*- El diseño de elementos estructurales generalmente proporciona cuantías de refuerzo mayores a la mínima. En algunos elementos que no soportan cargas como losas sobre terreno y elementos ligeramente reforzados, la cuantía de refuerzo usual puede ser menor que la mínima necesaria para concretos de contracción compensada. En estos casos se recomienda una cuantía mínima de refuerzo de 0.0015 en cada dirección que se desee la contracción compensada. El ACI 318 recomienda esta cantidad para esfuerzos por contracción y temperatura.

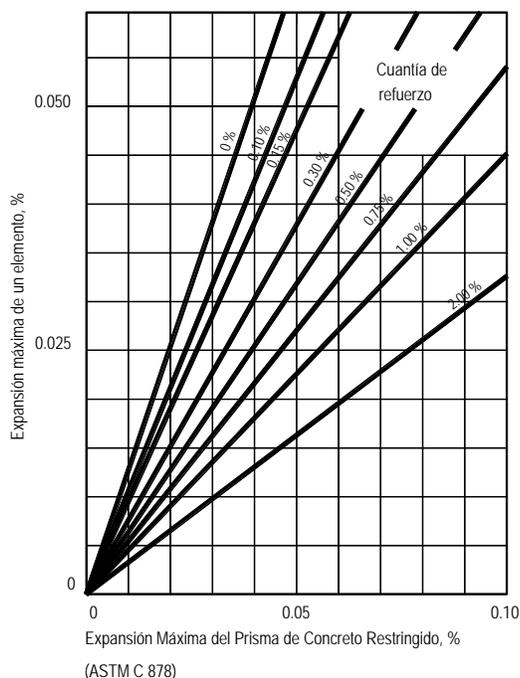
En los elementos estructurales, la ubicación del refuerzo, se determina de los requerimientos de diseño. Cuando la ubicación del refuerzo no es determinado por diseño estructural, se debe ubicar de modo de minimizar el alabeo. Por ejemplo, en losas sobre terreno, donde la mayoría del secado ocurre en la parte superior, el refuerzo se debe colocar en la mitad superior de la losa (preferentemente a un tercio de profundidad), mientras sea posible un recubrimiento adecuado.

*Estimación de la máxima expansión.*- Si por diseño estructural se obtiene una cuantía mayor que la mínima recomendada, o cuando se desee usar cuantías menores que la mínima recomendada anteriormente, el nivel de expansión de los elementos estructurales se debe estimar de la figura 1.13. Este gráfico muestra la relación entre la expansión del elemento, expansión de prisma y cuantía de refuerzo cuando el elemento y el prisma se hacen con concretos similares, mezclados y curados en las mismas condiciones. El ensaye de expansión de prisma se define en las normas ASTM C 878.

La figura 1.13 también se puede utilizar para estimar la expansión requerida de los prismas de control para obtener una expansión dada en un elemento estructural sin restricción externa. Para conseguir la contracción compensada satisfactoriamente se recomienda que la expansión en el elemento estructural reforzado sea mayor, o por lo menos igual, que la contracción anticipada. Por ejemplo, considere un elemento de concreto donde la contracción anticipada es 0.025%. La expansión requerida para la contracción compensada completa es también 0.025%. Si el elemento contiene 0.5% de refuerzo, luego se requiere una expansión de prisma restringido de 0.04% para la compensación completa. Por otro lado, si la expansión de prisma restringido es 0.05%, entonces se puede utilizar un porcentaje de refuerzo hasta 0.75% y la contracción compensada todavía puede alcanzarse.

La expansión de un elemento de concreto disminuye con un incremento de la cuantía de refuerzo. La contracción también se reduce, pero en menor grado. En consecuencia, para alcanzar la contracción compensada completa, el potencial expansivo debe ser mayor para elementos con cuantías mayores. El incremento de la expansión se puede obtener con un mayor consumo de cemento. Sin embargo, la expansión, como se mide usando las normas ASTM C 878, debería ser mayor que 0.03% y menor que 0.10%.

*Acero de refuerzo.*- El refuerzo debe ser cualquier malla de alambre soldada o barras corrugadas que reúnan los requisitos del ACI 318. No se debe usar refuerzo con barras lisas porque no desarrollará una adherencia adecuada. Para asegurar la posición correcta de las barras se deben colocar en silletas, o atadas a otras barras fijas, apoyos de concreto, o se puede utilizar porciones de la estructura. Cuando se utilice una malla de alambre en lugar de barras corrugadas, deberán estar en hojas planas o mallas en lugar de rollos. No se recomienda el uso de malla de alambre enrollado. Sin embargo, si se usa malla de alambre enrollado, se deberá desenrollar en una superficie plana dura para eliminar toda la curvatura antes de ser colocada en la posición final.



**Figura 1.13 Estimación de la expansión de un elemento a partir de la expansión de prismas (ACI 223, 1998)**

**Losas reforzadas sobre terreno**

Las losas reforzadas sobre terreno con concreto de contracción compensada se comportan inicialmente diferente de las losas de concreto con cemento pórtland, porque el concreto de contracción compensada se expande poco después del fraguado. A continuación se indican algunas diferencias:

*Deformación por tensión.*- Como el concreto con cemento pórtland tiene una capacidad límite de deformación por tensión, en losas reforzadas sobre terreno se usa el refuerzo principalmente para controlar en ancho de grietas causado por flexión y contracción por secado.

Según el ACI 223 (1998), la capacidad de deformación por tensión en los concretos de contracción compensada alcanzan un 23% más que en los concretos con cemento pórtland.

*Alabeo.*- Debido a las restricciones de la subrasante y la restricción interna del acero superior contra la expansión del concreto, se pueden esperar deformaciones expansivas diferenciales entre la parte superior e inferior. Durante la contracción por secado, las deformaciones expansivas se atenúan más rápidamente en la superficie superior seca que en la subrasante. Keeton (1979) ha demostrado que el efecto neto indica deformaciones expansivas restringidas residuales que son mayores en la superficie superior que en el fondo, de manera que desarrollaron condiciones de alabeo revertidas. Los esfuerzos por alabeo tienden a ser contrarrestado por el peso propio de la losa.

La función del refuerzo en la parte superior es equilibrar la restricción de la subrasante, además de proporcionar la restricción necesaria contra la expansión.

Si la restricción de la subrasante es más baja comparada con la restricción del refuerzo superior, puede ocurrir el alabeo. Esta condición puede desarrollarse en una losa altamente reforzada sobre polietileno. Se podrá reducir el alabeo, incrementando la fricción de la subrasante, con arena colocada en la parte superior del polietileno o colocando el refuerzo en la mitad superior o a un tercio de profundidad.

*Secuencia de colocación.*- En losas sobre terreno, la secuencia de colado permitirá que las deformaciones por expansión ocurran contra un borde libre y sin restricción. El borde opuesto de la losa colada contra un elemento rígido debe dejarse libre para moverse.

La secuencia de colado se organizará de manera que los extremos de la losa estén libres para moverse por el máximo tiempo posible antes de colar la losa adyacente. Por lo menos el 70% de la máxima expansión medida en laboratorio de acuerdo con las normas ASTM C 878 debe ocurrir antes de colar las losas que no están libres de expandirse en dos extremos opuestos.

Antes de establecer la secuencia de colado, se recomienda ejecutar una serie de ensayos realizados de acuerdo con las normas ASTM C 878, empleando el diseño de mezcla de concreto propuesto. Para losas sobre terreno se recomienda una expansión mínima de prisma de 0.03%. Es fundamental que en el diseño de mezcla ensayado se use materiales idénticos a los que serán usados en la construcción y para la obtención del revenimiento reproducir las condiciones atmosféricas de campo tanto como sea posible.

*Junta de aislamiento.*- Se deben proporcionar juntas para acondicionar el movimiento vertical u horizontal en la unión con los muros, columnas, bases de máquinas, cimentaciones u otros puntos de restricción externa como tubos, sumideros y escaleras. Estas juntas, además de aislar de un elemento externo, se usarán para acomodar la expansión inicial del concreto.

No se debe utilizar la restricción exterior rígida porque previene la expansión del concreto. Esto llevaría a imponer fuerzas a los elementos restringidos. Russell (1973) ha mostrado que las restricciones rígidas originan esfuerzos de compresión de hasta  $11.9 \text{ kg/cm}^2$  (1.2 MPa). Esfuerzos de esta magnitud pueden dañar la estructura restringida. Por lo que se recomienda proteger las cimentaciones, hoyos, drenajes, y elementos similares con juntas de aislamiento para prevenir daños durante la etapa de expansión y permitir desarrollar la deformación expansiva necesaria.

Las juntas de aislamiento estarán compuestas de un material que sea suficientemente compresible para deformarse bajo la acción expansiva del concreto. Si es demasiado rígido, como algunos materiales de aislamiento asfáltico rígidos, podrían actuar como restricción externa y restricción de expansión del concreto. Se debería utilizar un material con un módulo de elasticidad de  $3.52 \text{ kg/cm}^2$  (0.34 MPa) y con una deformación máxima de 50% de acuerdo con las normas ASTM D 1621 o D 3575.

*Junta de construcción.*- Con el uso del concreto de contracción compensada, se pueden aumentar los tramos de colocación de la losa de 6 a 9 m usados con concreto con cemento pórtland. Las losas ubicadas dentro de una estructura, o donde los cambios de temperatura son pequeños se pueden colocar en áreas tan grandes como de 1500 m<sup>2</sup> sin juntas. En áreas donde los cambios de temperatura son más grandes o las losas no son cercadas por una estructura, la colocación de losa se reduce entre 650 y 1100m<sup>2</sup>.

Los tramos de construcción de la losa se deben colocar, en la manera de lo posible, en forma cuadrada.

Las juntas de construcción deben ser diseñadas y detalladas como juntas de contracción para acomodar los movimientos de temperatura, y permitir que las juntas se abran, liberando los esfuerzos de tensión que actúan en la losa. Cuando se requiere la transferencia de carga, se deberían usar pasajuntas que se deslizan en lugar de barras corrugadas. Se podrían usar juntas machihembradas cuando las contracciones grandes de temperatura no estén presentes y no se requiere alta transferencia de carga.

*Junta de contracción.*- Estas juntas son cortadas, formadas, o colocadas de manera diferente a las otras juntas. El objetivo es inducir, por la contracción por secado, que la losa se agriete a lo largo de los planos debilitados (juntas). Con el concreto de contracción compensada se pueden utilizar distancias más grandes entre juntas de contracción. Para áreas expuestas se recomienda una separación de juntas máxima de 30 m. Donde el área es protegida de variaciones extremas en temperatura y humedad, se ha usado separación de juntas de 45 a 60 m. Las juntas de contracción se pueden hacer de la misma manera que para el concreto de cemento pórtland. Normalmente, las juntas de contracción son eliminadas con concreto de contracción compensada excepto en áreas de esfuerzos altos.

*Junta de expansión.*- La ubicación y diseño de juntas de expansión para el control de movimientos térmico no son cambiados con el uso de concreto de contracción compensada. Sin embargo, las juntas para movimientos térmicos serán diseñadas para asegurar que la expansión adecuada pueda tener lugar durante la fase de expansión.

En México, no se han realizado estudios experimentales de concretos con cemento de contracción compensada ni con el propio cemento. La finalidad del presente estudio es emplear el cemento de contracción compensada fabricado en México en la elaboración de concreto para losas industriales, para lo cual se construyeron especímenes similares a los denominados especímenes de contracción desarrollados por Russell (1980) y finalmente se construyó una losa apoyada sobre terreno similar a la que se encontraría en la industria. Los resultados de esta investigación serán aplicables a losas de concreto de contracción compensada sobre terreno construidas en ambientes interiores y no expuestas al medio ambiente ya que los ensayos realizados por Russell se desarrollaron en condiciones de laboratorio (temperatura y humedad constantes).

## CAPÍTULO 2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Con objeto de evaluar el comportamiento a mediano plazo de una losa hecha con concreto de contracción compensada, con cemento expansivo CEMEX, se construyó, instrumentó y midieron las deformaciones de una losa sobre terreno y doce losas en dirección vertical. Las losas se construyeron en el Centro de Tecnología del Concreto de CEMEX Concretos en el Distrito Federal.

### 2.1 LOSA SOBRE TERRENO

El espécimen construido fue una losa cuadrada de 10 m de lado y 15 cm de espesor, apoyada sobre una rasante de suelo (tepetate) compactado, con un grado de compactación próctor de 90%. La losa se construyó con concreto de contracción compensada con una cuantía especificada de refuerzo de 0.15% en cada dirección. El refuerzo estuvo constituido por una parrilla de barras de acero corrugado del no. 4 (12.7 mm de diámetro) separadas cada 55 cm. La parrilla se encontraba ubicada cerca de la cara superior de la losa, a dos tercios de la altura, según recomendaciones del ACI 223. La distribución del acero de refuerzo se muestra en la figura 2.1.

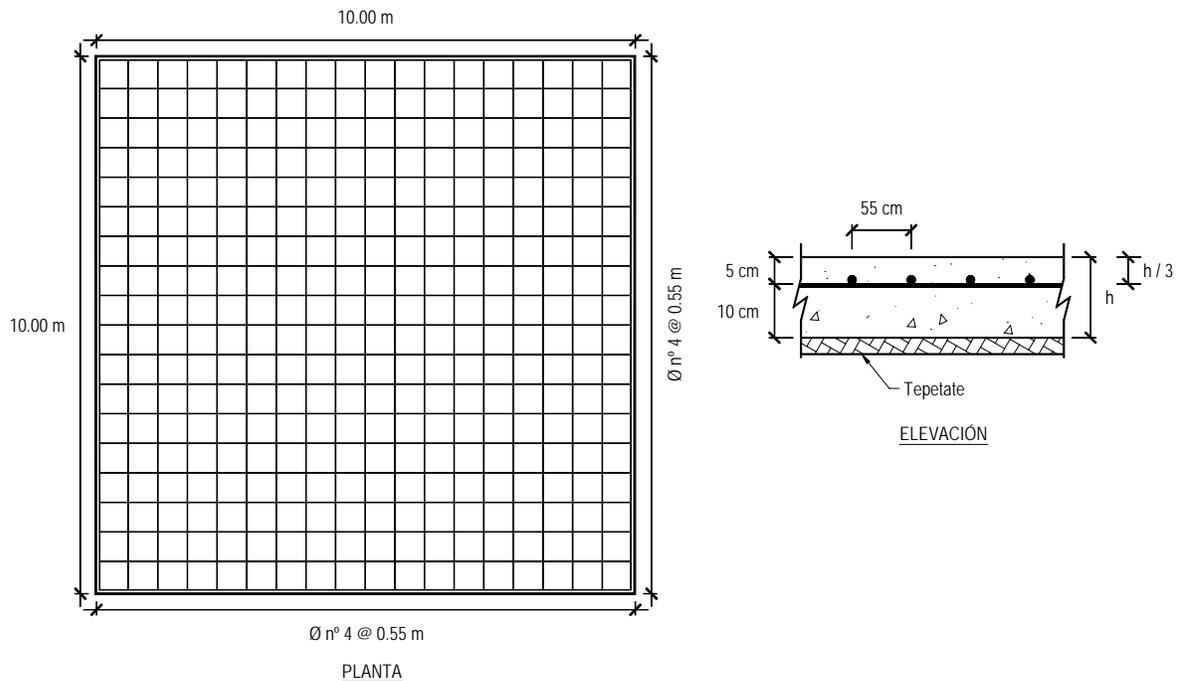


Figura 2.1 Distribución de acero de refuerzo en la losa

#### 2.1.1 Materiales

Los materiales utilizados en la construcción de losa fueron los que se encuentran disponibles en el mercado de la ciudad de México. El concreto fue elaborado con cemento expansivo CEMEX tipo K de la planta Valles que cumple con las especificaciones ASTM C-845 (este cemento es similar al empleado por Russell, 1978), grava caliza de masa específica de  $2.67 \text{ g/cm}^3$ , arena andesita de masa específica de  $2.39 \text{ g/cm}^3$ , agua de la red potable y aditivo reductor de agua normal Pozzolith 322-N de Basf (MBT). El acero empleado tuvo un esfuerzo nominal de fluencia de  $4200 \text{ kg/cm}^2$  (412 MPa).

### 2.1.2 Construcción del espécimen

El suelo sobre el que se apoyó la losa fue debidamente compactado, con un grado de compactación próctor de 90%. Para evitar el intercambio de humedad entre el suelo y la losa se colocó una membrana a base de una hoja de polietileno en toda la superficie del suelo. El cimbrado del espécimen fue hecho con tablas de 150 mm x 380 mm (6 pulg x 1½ pulg), dando la forma de un marco cuadrado de 10 m de lado.

El refuerzo, consistente de una parilla de acero corrugado con barras del no. 4 (1/2 pulg de diámetro) separadas cada 55 cm, se colocó a una altura de 10 cm del suelo (1/3 de profundidad, según recomendación del ACI 223). Para lograr una altura uniforme en la losa, la parrilla se apoyó sobre soportes hechos de barras de acero del no 4, separados cada 1.5 m en ambas direcciones. El armado de la losa se aprecia en la figura 2.2.

El colado se realizó el 1º de marzo de 2004, desde las 16 h hasta las 20 h. El concreto empleado fue elaborado por CEMEX Concretos en la planta del Distrito Federal con una resistencia a compresión nominal de 350 kg/cm<sup>2</sup>. La colocación del concreto se realizó en tres partes, como se indica en la figura 2.3.

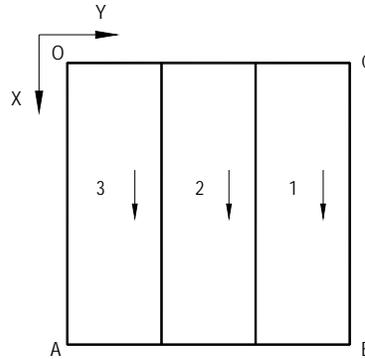
El volumen de concreto fabricado fue de 18 m<sup>3</sup>, y fue suministrado por tres camiones revolvedores con una capacidad de volumen de 6 m<sup>3</sup> cada uno. El intervalo de tiempo de carga de cada uno fue de 10 min y el tiempo de trayecto hacia la obra fue de 20 min. CEMEX realizó el muestreo del concreto de cada camión, determinando el revenimiento en planta y en obra, midiendo la temperatura del concreto, calculando la masa unitaria fresca y muestreando cilindros de concreto para determinar la resistencia a compresión a la edad de 7 y 28 días.

Las propiedades del concreto en estado fresco y en estado endurecido se indican en la tabla 2.1 y 2.2, respectivamente (CEMEX, 2004).

El curado de la losa inició después de 17 horas de colocado el concreto, con un espejo de agua durante siete días, y para evitar la pérdida de humedad, se cubrió con una hoja de polietileno. Después de siete días de curado, se retiró el plástico quedando la losa expuesta al aire libre, y a temperaturas del medio ambiente que oscilaban entre 5 °C y 29 °C. Una foto del espécimen durante el curado se muestra en la figura 2.4.



**Figura 2.2 Armado de la losa**



**Figura 2.3** Secuencia de colocación del concreto de la losa

**Tabla 2.1** Propiedades del concreto en estado fresco (CEMEX, 2004)

PROPIEDADES		CAMIÓN		
		1	2	3
Tiempo de trayecto	min	20	19	17
Revenimiento en planta	cm	18.5	19	17
Revenimiento en obra	cm	17	18	17
Temperatura ambiente	°C	25	25	25
Temperatura inicial del concreto	°C	23	21	24.5
Masa unitaria fresca	kg/m <sup>3</sup>	2237	2254	2263

**Tabla 2.2** Propiedades del concreto en estado endurecido (CEMEX, 2004)

PROPIEDADES		CAMIÓN		
		1	2	3
fc a 7 días	kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	296 (29.0)	304 (29.8)	276 (27.0)
fc a 28 días	kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	398 (39.0)	399 (39.1)	359 (35.2)
MR a 28 días	kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	57 (5.6)	47 (4.6)	52 (5.1)
Expansión de barra restringida de concreto según ASTM C878, a 7 días	x 10 <sup>-6</sup>	600	690	530



**Figura 2.4** Curado de la losa

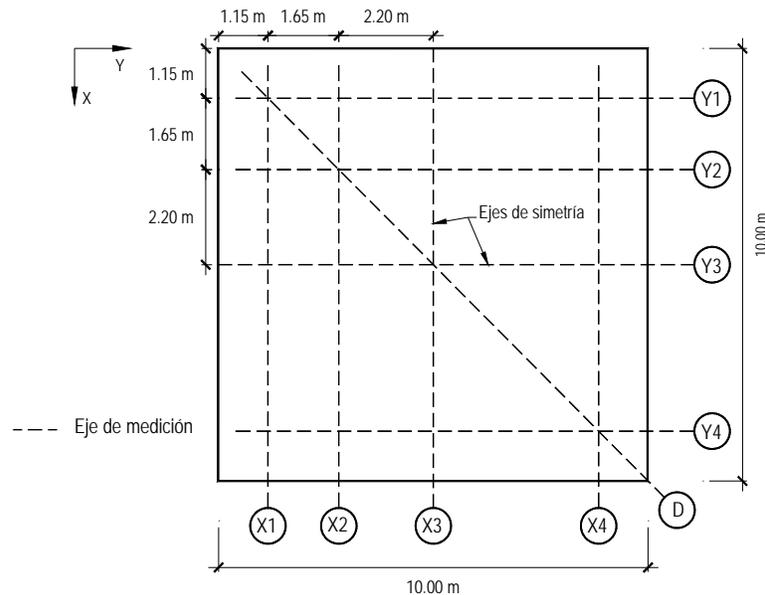
### 2.1.3 Instrumentación

Con objeto de registrar los parámetros más relevantes necesarios para evaluar el comportamiento a mediano plazo de la losa, se planteó una instrumentación que permitiera medir lo siguiente:

- Deformaciones del concreto, utilizando deformímetros eléctricos ahogados en el concreto, en el plano de la losa.
- Deformaciones del acero de refuerzo utilizando deformímetros eléctricos adheridos a las barras.
- Temperatura interna de la losa utilizando sensores de temperatura.
- Humedad interna de la losa utilizando sensores de humedad relativa.
- Temperatura externa con sensores de Cemex.
- Deformaciones puntuales en el plano de la losa, medidas sobre la superficie de ésta utilizando un extensómetro.

Se establecieron líneas de medición para la instrumentación, es decir, aquellas líneas imaginarias sobre las cuales se colocaría la instrumentación. La distribución de las líneas de medición en el plano de la losa se indica en figura 2.5.

Durante la instrumentación de la losa se trató, en la medida de lo posible, de respetar la dirección dada por estas líneas colocando los diversos tipos de instrumentos sobre ellas, de manera de obtener los diversos tipos de datos a la altura de los mismos puntos. Asimismo, aprovechando la simetría bidireccional de la losa se concentró la mayor parte de la instrumentación en un solo cuadrante. Cabe señalar que en este cuadrante se usó concreto proveniente de dos camiones revolvedores, según la secuencia de colado indicada en la figura 2.3. La captura de datos se inició inmediatamente después del colado de la losa y, de común acuerdo con CEMEX, se tomaron lecturas durante 125 días, con excepción de los días 9 y 10 y entre los días 42 y 43 en los cuales se interrumpió accidentalmente el suministro de energía eléctrica.



**Figura 2.5 Líneas principales de medición**

### ***Deformímetros eléctricos para el concreto***

Se colocaron deformímetros eléctricos para registrar las deformaciones del concreto en el plano de la losa. Estos deformímetros quedaron ahogados en el concreto a una altura aproximada de 10 cm del nivel del terreno y se sujetaron del acero de refuerzo con alambres de calibre 24, figura 2.6a, con objeto que permaneciera en el plano de la parrilla de acero. Los deformímetros empleados fueron del tipo EGP-5-350. La distribución de éstos en el plano de la losa se indica en la figura 2.8a.

### ***Deformímetros eléctricos para el acero***

Se colocaron deformímetros eléctricos en las barras de acero de la parrilla de refuerzo. Se utilizaron deformímetros del tipo FLA-5-5L, los cuales fueron adheridos a las barras de refuerzo, figura 2.6b. Los deformímetros se colocaron como se indica en la figura 2.8b siguiendo las líneas principales de medición de datos.

### ***Sensores de temperatura***

Para medir las variaciones de temperatura interna del concreto de la losa, se colocaron sensores del tipo semiconductor LM-335, figura 2.7a. La distribución se indica en la figura 2.8c.

### ***Sensores de humedad***

En virtud de que los cambios de humedad en el concreto se traducen en cambios volumétricos del concreto, se decidió colocar sensores de humedad, para cuantificar la humedad relativa en el interior de la losa. Se emplearon sensores de humedad relativa HM1500 de la marca *Humirel*, figura 2.7b. Estos sensores se dejaron ahogados en el concreto a una altura aproximada de 10 cm del nivel de terreno. La distribución se indica en la figura 2.8d.



**Figura 2.6 a) Deformímetro para mediciones en el concreto; b) deformímetro para mediciones en el acero**



(a)



(b)

Figura 2.7 a) Sensor de temperatura; b) sensor de humedad

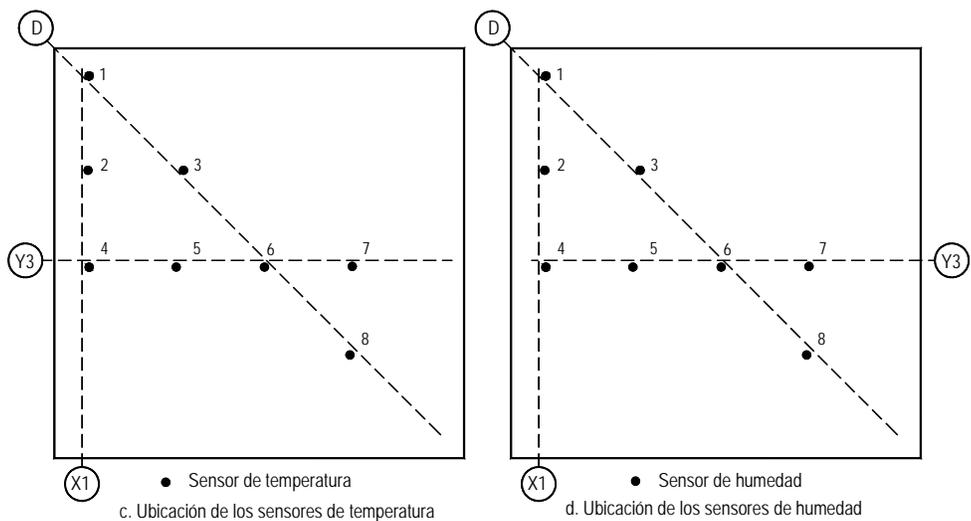
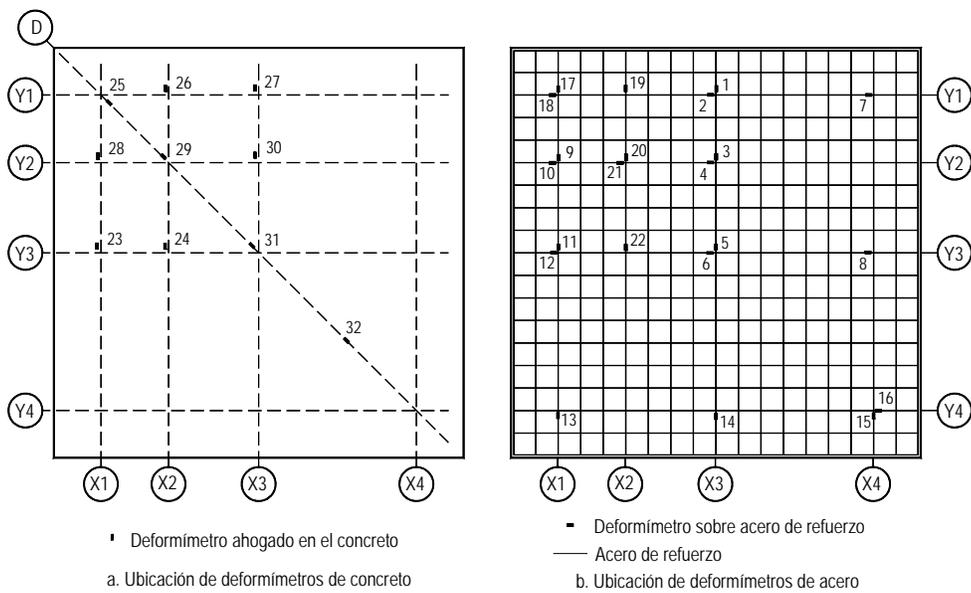
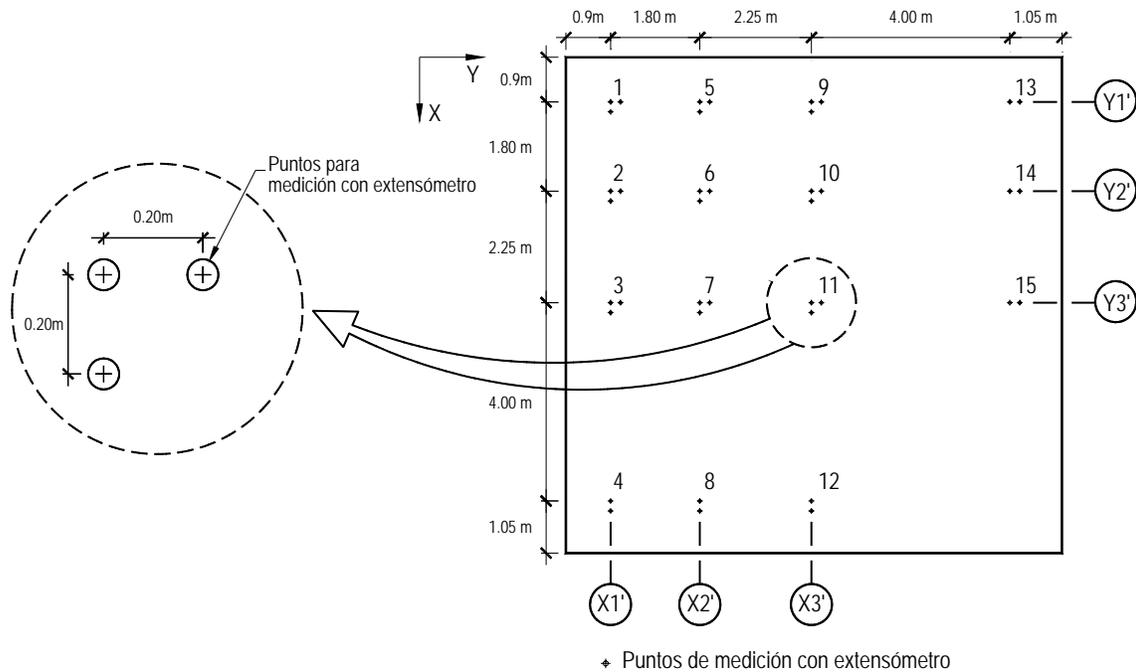


Figura 2.8 a) Líneas principales de medición; b) distribución de deformímetros en el concreto; c) distribución de deformímetros en el acero de refuerzo

### Mediciones en la superficie

Se colocaron puntos guías en la superficie de la losa, para realizar mediciones sobre la superficie en las líneas principales de medición. Los puntos guía se colocaron utilizando una pistola neumática al quinto día del colado de la losa. La distribución de los puntos de medición se indica en la figura 2.9.

Para estas mediciones se utilizó un extensómetro tipo *Whitmore* de 20 cm. Los puntos de medición se encontraban separados aproximadamente 20 cm. Para realizar mediciones se colocan los extremos del extensómetro sobre los puntos guías y se puede obtener la variación de la distancia inicial entre los puntos guía a lo largo del tiempo.



**Figura 2.9 Distribución de puntos de medición en la superficie**

## 2.2 LOSAS VERTICALES

Se construyeron losas sin restricción externa para simular losas simplemente apoyadas. Las variables experimentales a estudiar fueron la cuantía de refuerzo y el espesor de losa. Se planeó originalmente la construcción de 14 losas, pero finalmente sólo se colaron 12. Las dimensiones de las losas fueron 0.60 x 1.20 m con espesores de 10 y 15 cm. Las losas se construyeron en dirección vertical, similar a las realizadas por Russell (1978). Se emplearon cuantías de refuerzo entre 0.1% y 2.0% colocadas en una capa al centro de los muros de 10 cm y en dos capas en los muros de 15 cm con un recubrimiento de 2 cm en ambas caras. En la tabla 2.3 se muestra la nomenclatura de las losas coladas.

**Tabla 2.3 Descripción y nomenclatura de las losas verticales**

DESCRIPCIÓN DE LOSA		NOMENCLATURA DE LOSA					
Tipo de cemento	Espesor (cm)	Refuerzo, % de cuantía					
		0.10	0.15	0.3	0.5	1.0	2.0
K	10	K-10-0.1	K-10-0.15	K-10-0.3	K-10-0.5	K-10-1.0	K-10-2.0
K	15	K-15-0.1	K-15-0.15	K-15-0.3	K-15-0.5	K-15-1.0	K-15-2.0

### **2.2.1 Materiales**

Se emplearon barras de acero de refuerzo del no. 1.5 y 2.5 con esfuerzo nominal de fluencia de 6000 kg/cm<sup>2</sup> (588 MPa) y del no. 3, 4 y 5 con esfuerzo nominal de fluencia de 4200 kg/cm<sup>2</sup> (412 MPa). El concreto fue elaborado con cemento de contracción compensada CEMEX tipo K en la planta de CEMEX San Antonio y se adicionó un aditivo reductor de agua Pozzolith 322-N de Basf (MBT)

### **2.2.2 Construcción de los especímenes**

El refuerzo fue proporcionado por parrillas de barras de acero corrugado del no. 1.5, 2.5, 3, 4 y 5 según la cuantía requerida. En las losas de 10 cm se ubicó una parrilla en la mitad del espesor; mientras que en las losas de 15 cm, dos parrillas cerca de las caras con un recubrimiento de 2 cm. La distribución del acero de refuerzo se puede ver en la figura 2.10

El colado de los especímenes se realizó en las instalaciones de CEMEX San Antonio en diciembre de 2006. Para dicho colado se prepararon cimbras de madera que se fijaron al piso del laboratorio, figura 2.11.

Para la mezcla de los materiales del concreto se empleó una revolvedora cuya capacidad permitía colar un espécimen de 10 cm y otro de 15 cm de espesor, por lo que se realizaron seis colados. Para el compactado, en los especímenes de 15 cm, se emplearon un vibrador para concreto y martillos de goma; mientras que en los especímenes de 10 cm, debido a que el vibrador no ingresaba hasta la zona inferior, se empleó una varilla lisa de diámetro ½ pulg.

Los especímenes se colaron verticalmente y se descimbraron seis horas después, para reducir la restricción a la expansión que podría provocar la cimbra. Después del descimbrado se instalaron los transductores de desplazamiento y se comenzó con el registro de datos. En la figura 2.12 se muestra los especímenes después del último descimbrado; también, se pueden apreciar los transductores de desplazamiento instalados en los especímenes.

Dos días después del colado se procedió con el curado, los especímenes se envolvieron con bolsas de polietileno durante 10 días, como se aprecia en la figura 2.13. Durante todo el ensaye los especímenes permanecieron en un ambiente cerrado y bajo techo como se muestra en la figura 2.14. En la sección 3.2.1 se mostrará los registros de temperatura y humedad registrados en los especímenes.

Para determinar las propiedades expansivas de los concretos, de acuerdo con la norma ASTM C 878, CEMEX obtuvo prismas restringidos de concreto en moldes de acero de 76 x 76 x 254 mm, como se aprecia en la figura 2.15.

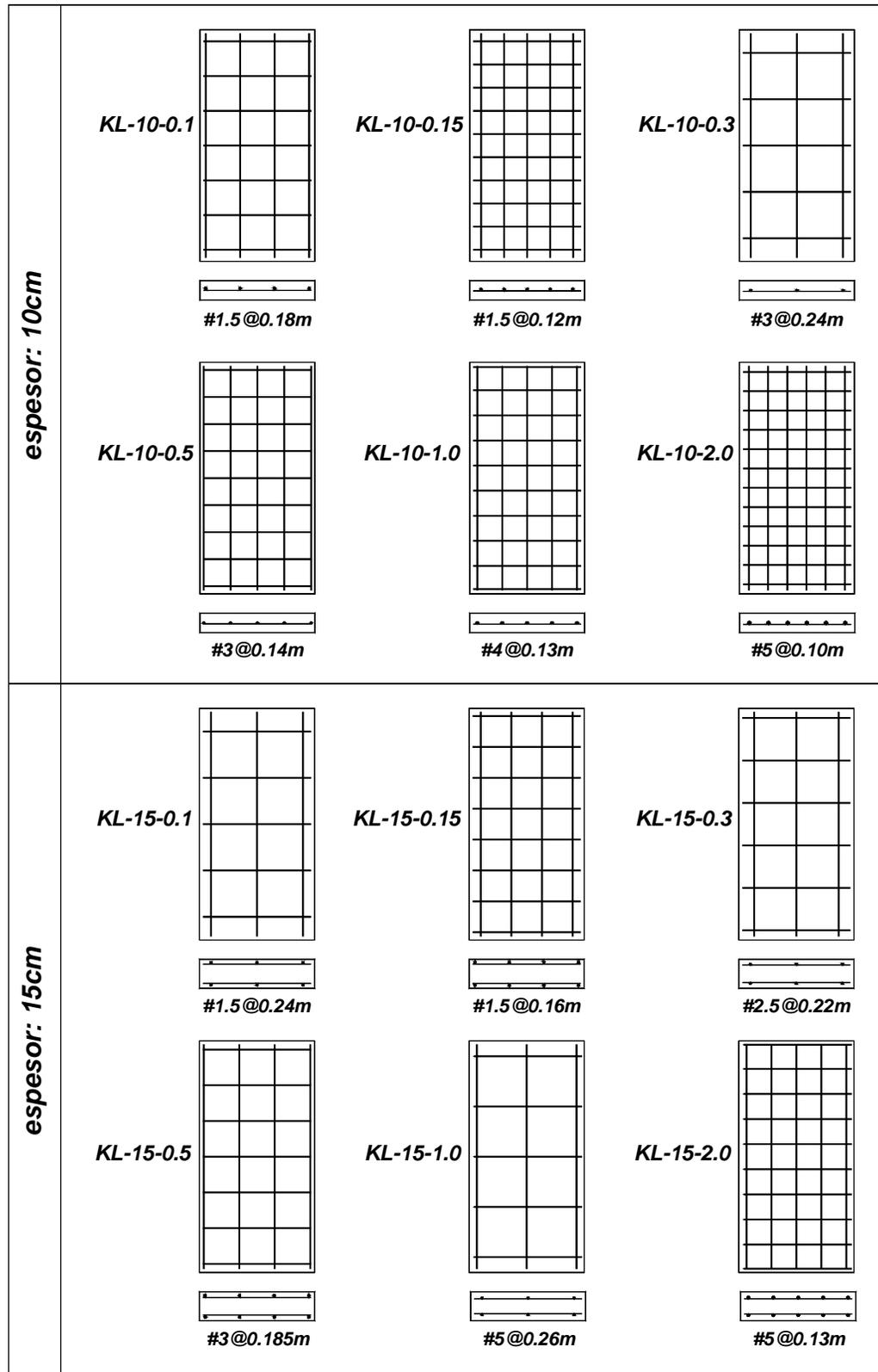


Figura 2.10 Distribución del acero de refuerzo en las losas verticales



**Figura 2.11 Cimbra de las losas verticales**



**Figura 2.12 Losas coladas y transductores de desplazamiento**



**Figura 2.13 Curado de losas**



**Figura 2.14 Losas después del curado**



**Figura 2.15 Molde de acero para prismas de concreto restringido**

### **2.2.3 Instrumentación**

#### ***Instrumentación interna***

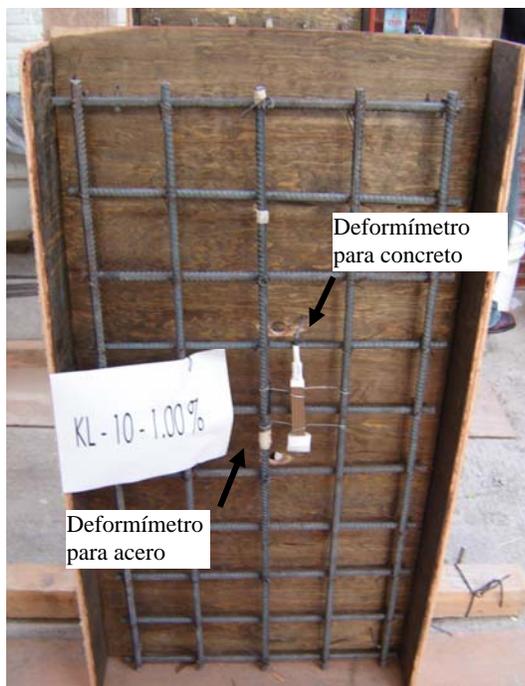
Los cambios de longitud del acero de refuerzo se registraron con deformímetros eléctricos adheridos a las barras de acero que quedaron ahogados en el concreto. En las losas de 10 cm, que tenía una parrilla de refuerzo, los deformímetros se ubicaron a la mitad del espesor del espécimen; mientras que en las losas de 15 cm, que presentaban dos parrillas de refuerzo, los deformímetros quedaron cerca de las caras con un recubrimiento de 2 cm. Para medir las deformaciones en el concreto, se dejaron ahogados deformímetros para concreto, que se ubicaron en el plano de las parrillas de refuerzo. Con estos instrumentos, deformímetros para acero y concreto, se registraron deformaciones puntuales en el acero y el concreto. En la figura 2.16 se muestran la ubicación de los deformímetros para acero y para concreto empleados. La captura de datos se inició inmediatamente después del colado. Además, se instalaron sensores de temperatura y humedad en la losa cuya ubicación se muestra en la figura 2.17a.

### ***Instrumentación externa***

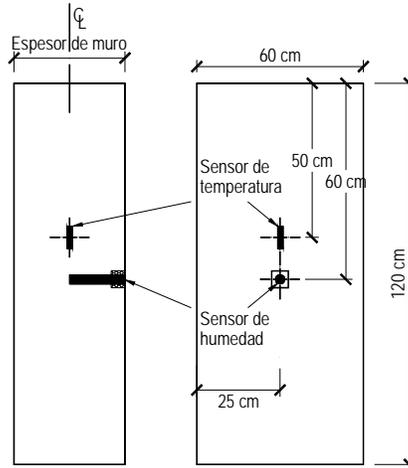
Para la lectura de deformaciones en la losa, se utilizaron transductores eléctricos de desplazamiento en una o ambas caras de la losa, que se ubicaron a media altura de las losas. Estos transductores midieron los desplazamientos de los extremos de dos barras roscadas embebidas en el concreto separadas 25.4 cm (10 pulg) en el centro de los especímenes. La ubicación de las barras roscadas y el sistema de medición con el transductor de desplazamiento se indican en las figuras 2.17b y 2.17c.

Para instalar las barras roscadas, se dejaron agujeros en la cimbra y se cubrieron con poliestireno; sobre éste atravesaron las barras roscadas, de tal manera que al retirar la cimbra se evite cualquier movimiento de dichas barras.

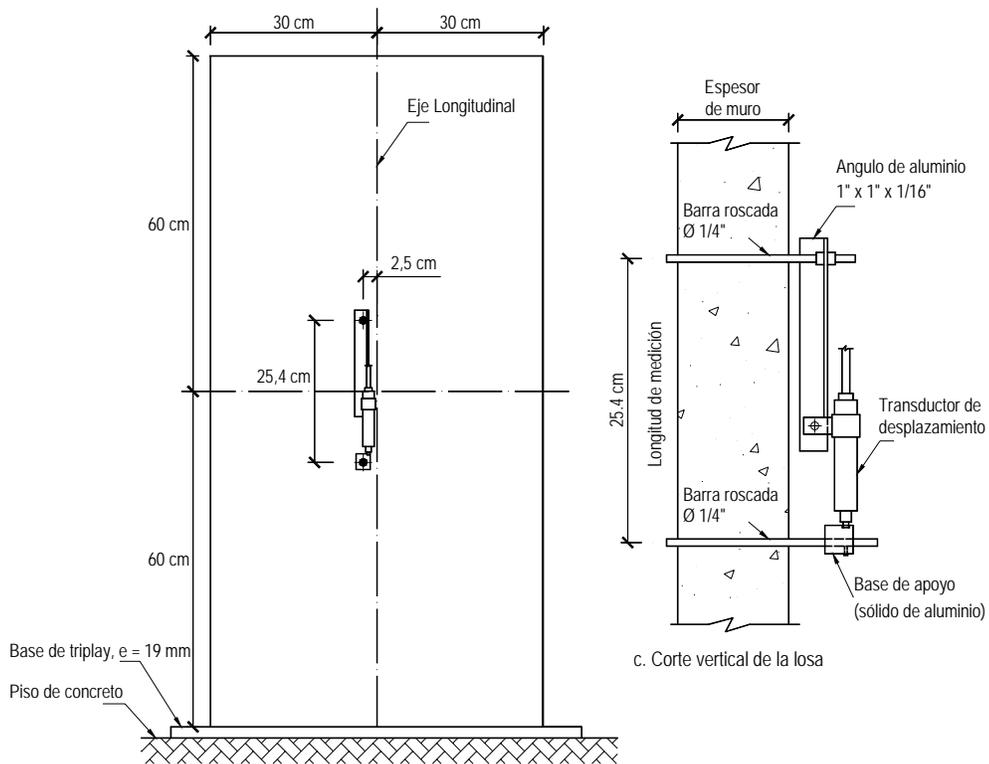
Los cables de los deformímetros y de los transductores se conectaron a los equipos TDS y *Field Point* encargados de registrar las mediciones. Estos equipos iniciaron la captura de datos inmediatamente después del colado. El registro se realizó a intervalos de 10 min y durante 133 días.



**Figura 2.16 Ubicación de los deformímetros para acero y para concreto**



a. Ubicación de sensores de temperatura y humedad



b. Ubicación de transductor eléctrico de desplazamiento

### Figura 2.17 Ubicación de instrumentación de sensores de temperatura y humedad y transductores eléctricos de desplazamiento

Para la instrumentación interna se emplearon 20 deformímetros para acero (numerados del 1 al 20), 6 deformímetros para concreto (numerados del 21 al 26) y para la instrumentación externa, 16 transductores eléctricos de desplazamiento (numerados del 101 al 116). La distribución del acero de refuerzo empleado en cada losa, así como la ubicación de los deformímetros para acero y para concreto y los transductores eléctricos de desplazamiento, se muestran en la figura 2.18.

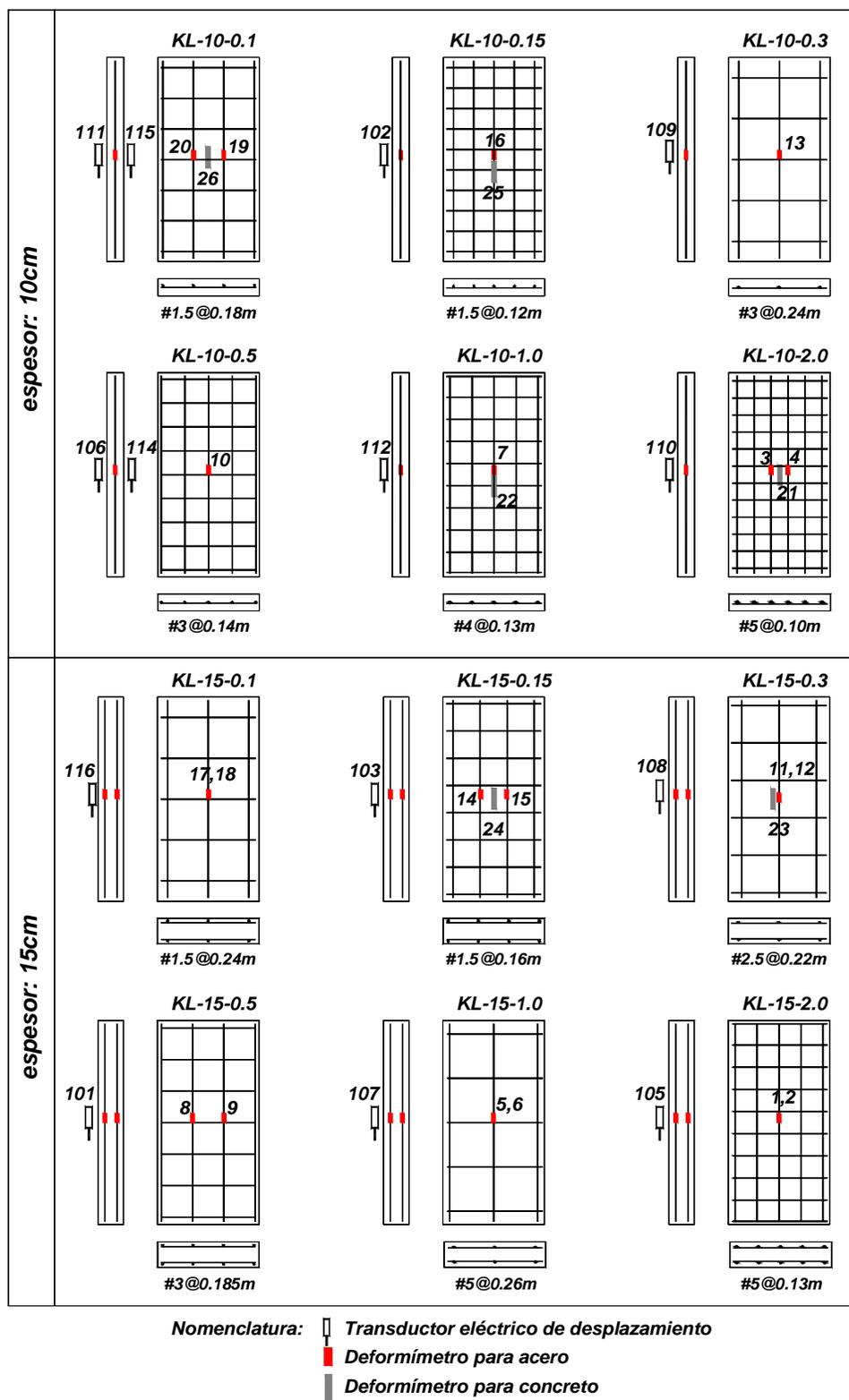
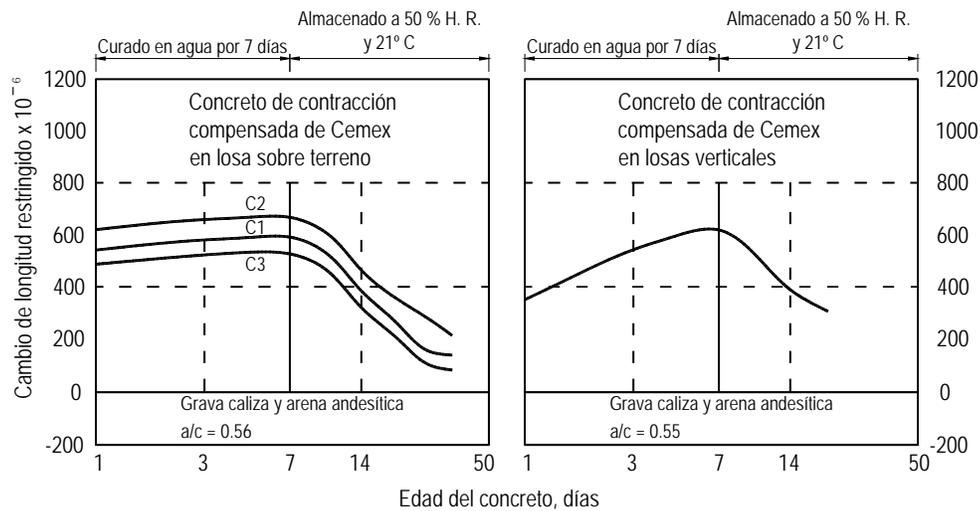


Figura 2.18 Distribución del acero de refuerzo en las losas y ubicación de instrumentos de medición

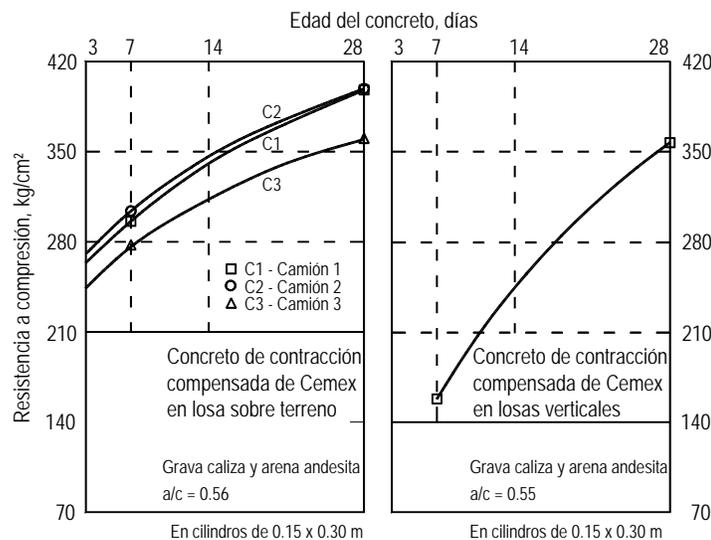
### 2.3 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO DE CONTRACCIÓN COMPENSADA EMPLEADA EN LOS ENSAYES

De la figura 2.19, se observa que a pesar que la forma de las curvas no es igual, las deformaciones de expansión alcanzadas, característica principal de los concretos de contracción compensada, fue en todas de 600 microdeformaciones. La diferencia en las curvas se debe a que el concreto empleado en la losa sobre terreno fue traído por camiones revolvedores (proceso industrial), mientras que el concreto para las losas verticales se hizo en obra con la ayuda de una revolvedora (proceso artesanal).

En la figura 2.20 se observa que todos los concretos alcanzaron valores de resistencia a compresión mayores que el nominal de  $350 \text{ kg/cm}^2$ . Nuevamente se aprecia que en los concretos de los camiones revolvedores se obtiene una resistencia a compresión más alta que el concreto empleado en las losas verticales.



**Figura 2.19** Deformaciones del concreto de contracción compensada empleada en los ensayos



**Figura 2.20** Resistencia a compresión del concreto de contracción compensada empleada en los ensayos

## CAPÍTULO 3 RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 3.1 LOSAS SOBRE TERRENO

#### 3.1.1 Deformaciones registradas en el acero y en el concreto

Las deformaciones registradas en los ejes de medición:  $X1$ ,  $X2$ ,  $X3$ ,  $X4$ ,  $Y1$ ,  $Y2$ ,  $Y3$  e  $Y4$ , fueron muy parecidas, por lo que en esta sección se mostrarán sólo las deformaciones medidas en el eje  $X1$  y las historias de deformaciones registradas en los demás ejes de medición se encuentran en el Apéndice A.

En las figuras 3.1 y 3.2, se muestran la historia de deformaciones totales en el concreto y en el acero, respectivamente, ambos en el plano de la losa y en la línea de medición  $X1$ . Se presentan tres series de tiempo: la primera corresponde a los 7 días iniciales después del colado; la segunda, a los 28 días iniciales; y la tercera, al tiempo total registrado. Las deformaciones se presentan en microdeformaciones (es decir se deben multiplicar por  $10^{-6}$ ) y poseen signo positivo si son de expansión y signo negativo si son de contracción.

En las figuras 3.1 y 3.2 se observa que las deformaciones varían durante el día. La losa se expande entre las 7 h y las 14 h, después de las 14 h empieza a contraerse hasta las 7 h del día siguiente completando así un ciclo.

Las historias de deformaciones totales mostradas representan los efectos de los cambios de temperatura, de la humedad y la contracción por secado del concreto, siendo estas últimas las de interés en esta investigación.

En la figura 3.3 se presenta la historia de la temperatura registrada dentro de la losa y, adicionalmente, se incluye la temperatura del medio ambiente. Se observa que las temperaturas medidas en la losa fueron mayores en  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  que las registradas en el medio ambiente debido a la radiación solar.

En la figura 3.4 se muestra el registro de humedad relativa en la losa. Los sensores de humedad muestran valores del 100% de humedad hasta una edad de 28 días debido a que permanecieron saturados. Posteriormente, cuando el agua de la losa se fue evaporando, estos sensores comenzaron a registrar valores menores que 100%. Luego, nuevamente, a partir del día 68, los sensores de humedad comenzaron a registrar nuevamente valores superiores a 0%. Más adelante se explicará la influencia de la humedad en las deformaciones registradas, sin embargo, no se realizará ninguna corrección al registro al no existir en la literatura una expresión que corrija dicha influencia.

En la figura 3.5, se muestra las deformaciones en el acero, en el concreto y la variación de humedad y temperatura registrada en la losa y en el medio ambiente entre los días 45 y 50, período en el cual los sensores de humedad en la losa no permanecen saturados. Analizando las variaciones en un día, se observa que la temperatura mínima y máxima del medio ambiente se alcanzan 2.5 y 2 horas, respectivamente, antes que en la losa. Esto indica que la tasa de liberación y absorción de calor de la losa es similar. Con respecto a la humedad, se observa que la máxima humedad en el interior de la losa coincide aproximadamente con la mínima humedad en el medio ambiente y viceversa. El humedecimiento de la losa es un proceso donde se alcanza el valor máximo de humedad a las 18 h y luego se inicia el periodo de secado que termina a las 9 h del día siguiente, donde se obtiene el menor valor de la humedad, en seguida empieza nuevamente el humedecimiento. Durante este periodo de secado, la losa absorbe la humedad del medio ambiente y alcanza su punto más bajo a las 9 h. A partir de este punto, la humedad absorbida en la etapa de secado incrementa la humedad en la losa y alcanza

nuevamente su máximo valor a las 18 h, completando así un ciclo. Esta variación de la humedad en la losa coincide con la variación registrada en los deformímetros para acero, donde se obtuvieron variaciones de deformación, durante el curado, de hasta 1080 microdeformaciones en un día. Los valores máximos y mínimos de expansión se obtuvieron a las 14 h y 7 h, respectivamente. Estos valores se registraron cuatro y dos horas antes de alcanzarse los máximos y mínimos en la humedad en la losa.

En las figuras 3.1 y 3.2 se observa que el deformímetro para concreto 23 alcanzó una expansión máxima, durante el curado, de 305 microdeformaciones, mientras que el deformímetro para acero 11 registró 1217 microdeformaciones; ambos instrumentos se localizaban en el centro del eje *XI*. Se especula que esta diferencia se deba a que durante el proceso del colado, el deformímetro para concreto que originalmente se ubicó en el plano de la parrilla de refuerzo, se desplazó hacia abajo por efecto de la caída del concreto, por lo que este deformímetro no registró las deformaciones a la misma altura de la parrilla. Keeton (1979) encontró que en una losa de concreto de contracción compensada sobre terreno de 20 cm de espesor y con una cuantía de refuerzo de 0.15%, las deformaciones registradas a través del espesor fueron distintas, obteniéndose en el fondo de la losa el 70% de la deformación registrada en la superficie, lo cual se debe a la restricción que ofrece el terreno. En esta investigación, al haberse desplazado el deformímetro para concreto hacia el fondo, registró valores menores como los encontrados por Keeton (1979). La proporción en las deformaciones obtenida por Keeton son menores a las registradas en este ensaye, cabe indicar que Keeton mantuvo en sus ensayos condiciones de laboratorio (temperatura y humedad constantes) lo que no sucedió en la losa que se mantuvo al medio ambiente. Como se explicará posteriormente, la influencia de la humedad es un factor importante en la variación diaria de las deformaciones.

La variación de deformación registrada, durante un día, en los deformímetros para acero fue hasta 5.5 veces mayor que los registrados en los deformímetros para concreto, figuras 3.1 y 3.2. Esto se debe a que la humedad afectó principalmente a las capas superiores de la losa donde se ubicó el refuerzo, siendo su efecto nulo o limitado en la zona inferior. Como se explicó anteriormente, los deformímetros para concreto sufrieron un desplazamiento hacia abajo desde su posición inicial (en el plano del refuerzo), y el efecto de la humedad fue menor.

El cambio en la temperatura no fue un parámetro significativo en el comportamiento de las deformaciones registradas en la losa. La PCA (1998) indica que la contracción en el concreto puede llegar a 550 microdeformaciones por efecto de una disminución en la temperatura de 55 °C. Suponiendo que la deformación es linealmente proporcional al incremento de la temperatura y que la variación de temperatura en la losa fue de 16 °C, se puede considerar que la variación en la deformación por efecto de la temperatura sería de 160 microdeformaciones lo que representa sólo el 15% de la variación registrada (1080 microdeformaciones) en el deformímetro para acero, restando un 85% por efecto de la humedad. Además, las especificaciones técnicas del deformímetro para acero empleado indican que el intervalo de temperatura que alcanzó la losa, no influyó en el registro de deformaciones obtenido. Por lo tanto, se concluye que la humedad sería el factor más relevante en el comportamiento de la losa.

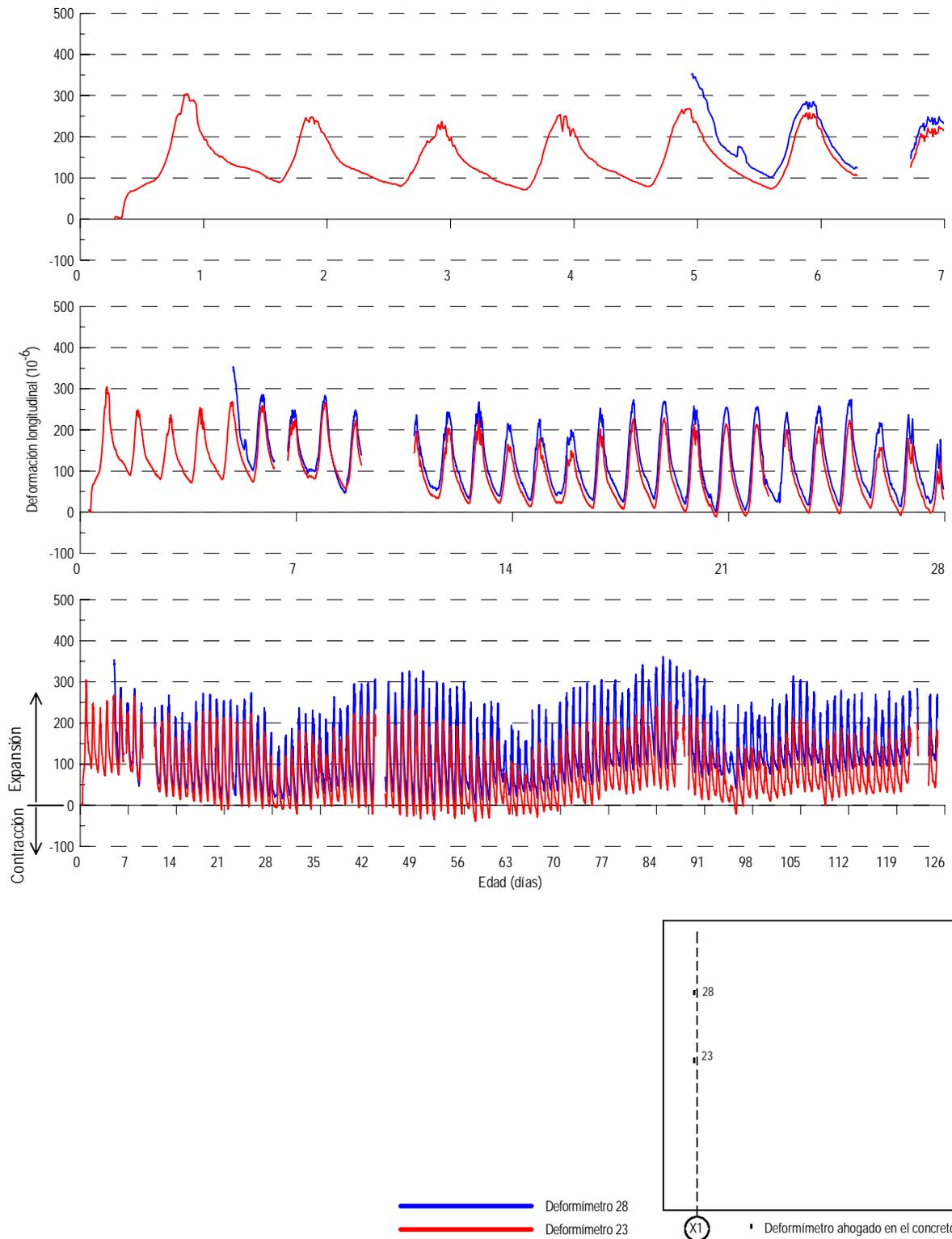


Figura 3.1 Historia de deformaciones en el concreto, Eje XI

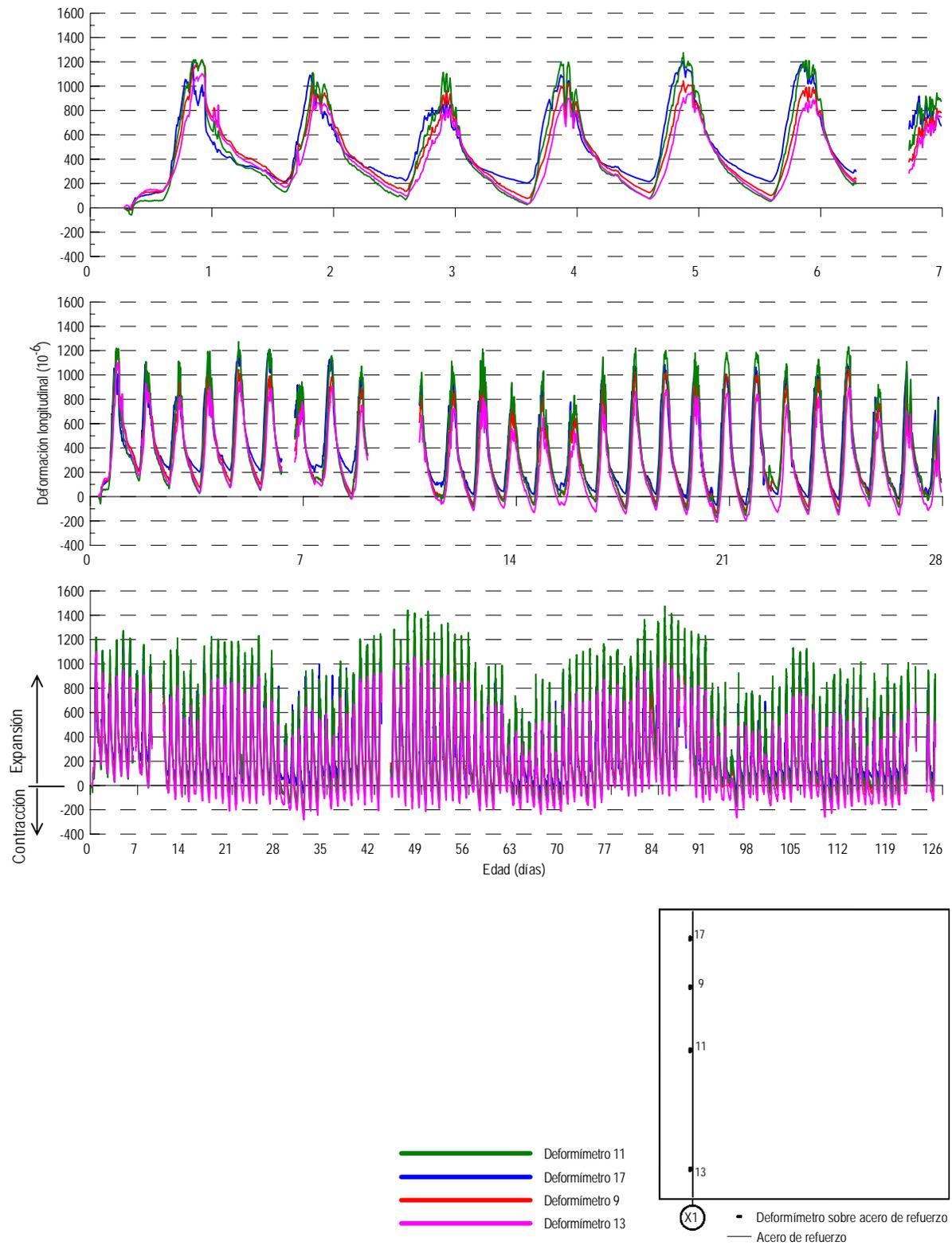
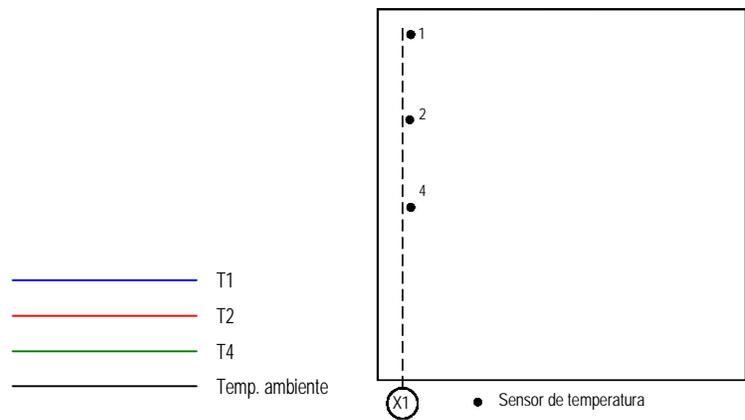
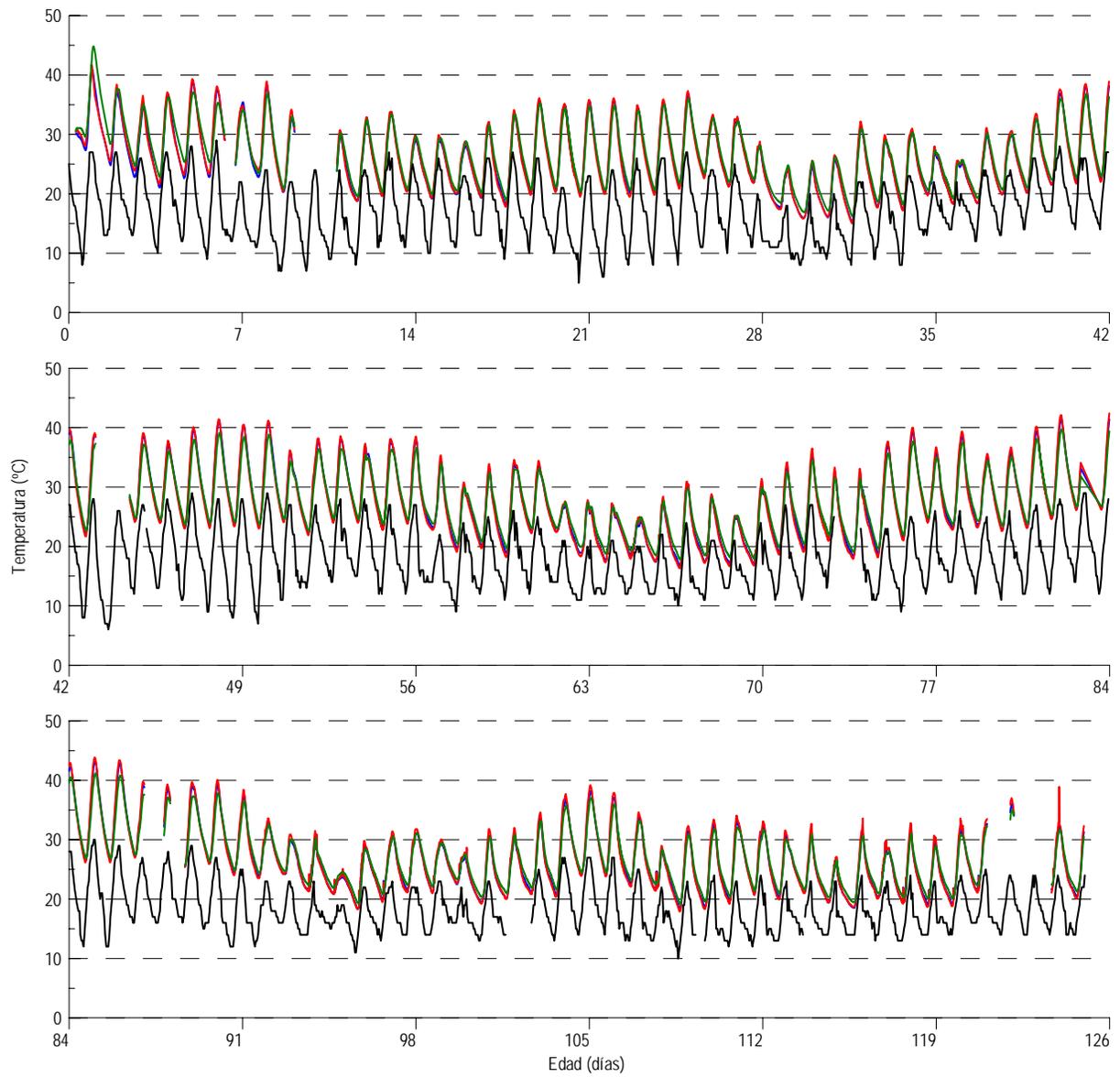


Figura 3.2 Historia de deformaciones en el acero, Eje X1



**Figura 3.3 Historia de temperatura, Eje XI**

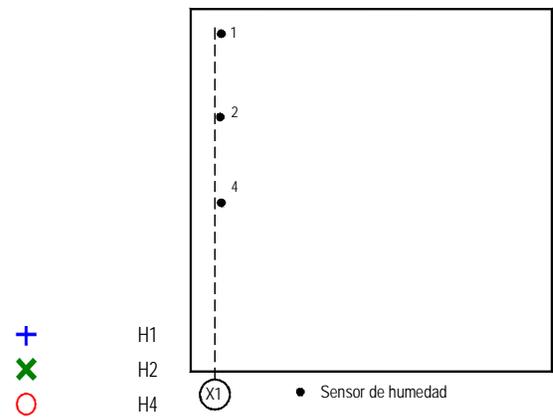
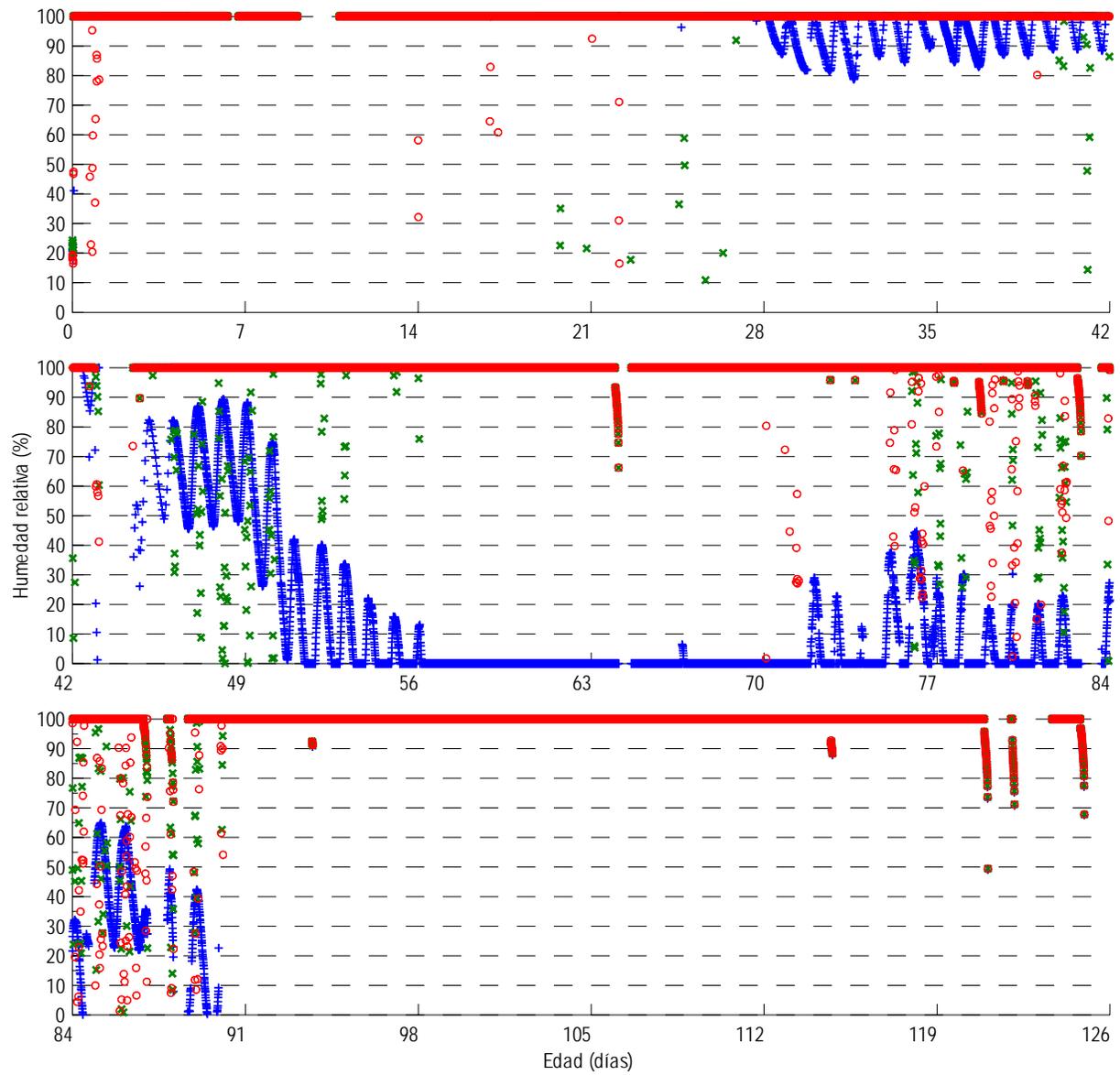
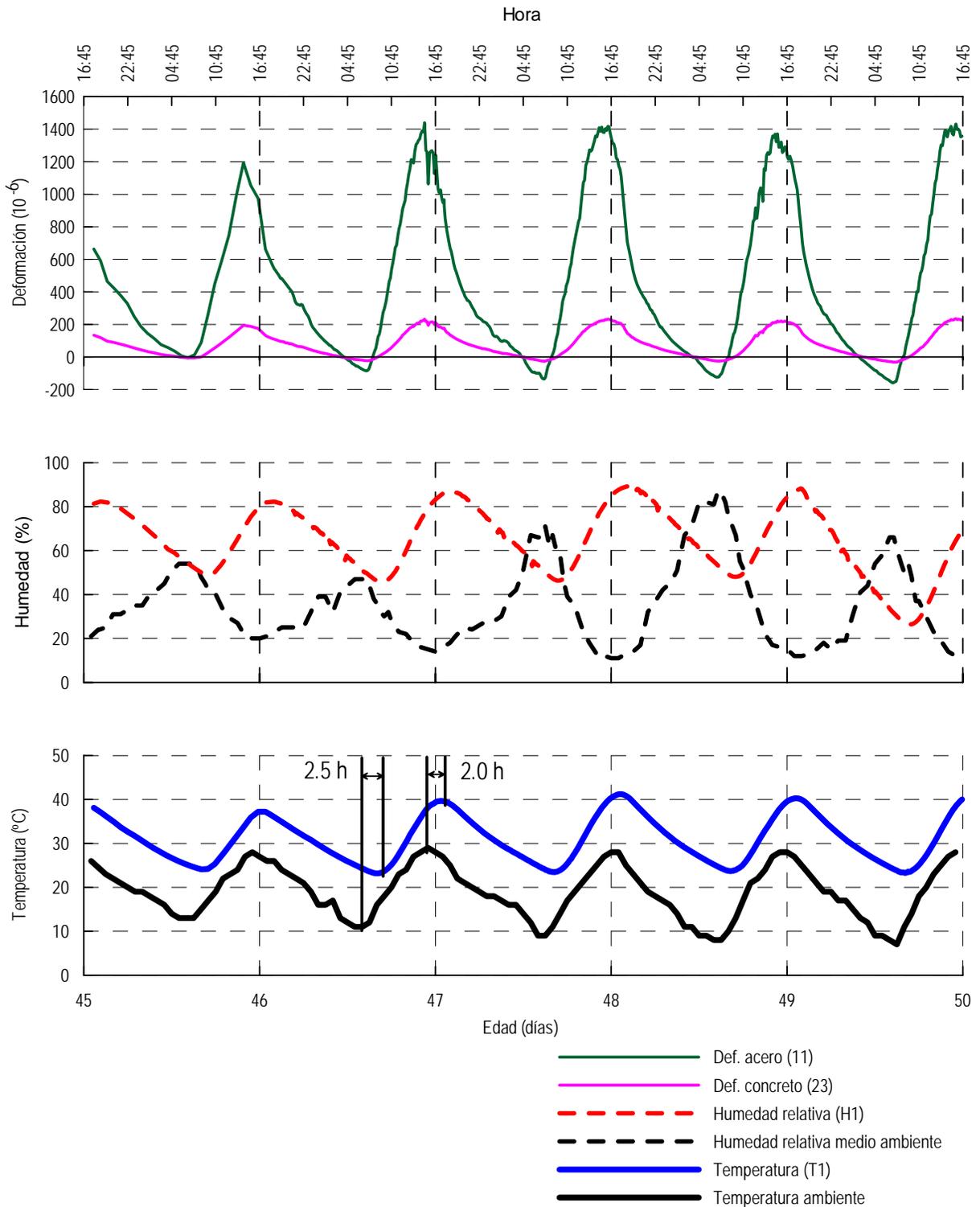


Figura 3.4 Historia de humedad, Eje XI

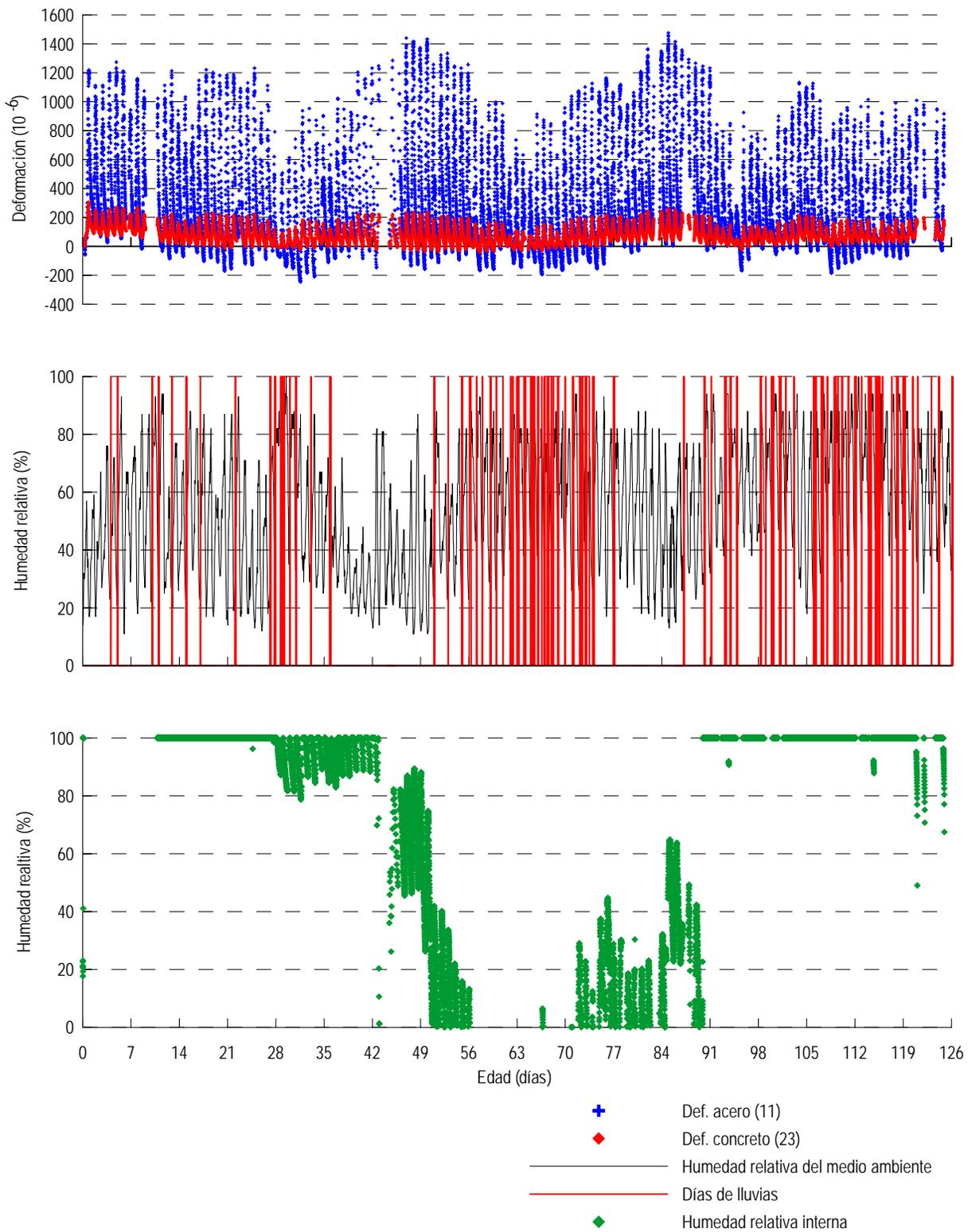


**Figura 3.5 Deformaciones registradas en el acero, concreto y de humedad y temperatura en el medio ambiente y en la losa, durante los días 45 a 50**

Con la finalidad de mostrar el comportamiento, a largo plazo, de las deformaciones medidas, se tomaron dos puntos de medición representativos de la losa, figura 3.6. Los puntos de medición elegidos se encuentran sobre el eje *X1* y corresponden al deformímetro 11 para el acero y al deformímetro 23 para el concreto. En esta misma figura se observa la humedad relativa en la losa y la ambiental, además, se muestra con líneas verticales de color rojo los días con lluvias.

Como se observa de la figura 3.6, como era de esperarse, se midieron expansiones en los primeros días, durante el período de curado. Conforme avanza el tiempo, la expansión disminuye y la contracción inicia el control del comportamiento alcanzando su menor valor el día 28. Después de este día, existe una expansión seguida de contracción y, finalmente, una nueva expansión y su contracción siguiente. Este comportamiento se explica por la presencia de las lluvias, figura 3.6, que contribuyeron a humedecer la superficie y el interior de la losa. Como se observa de esta figura, se inicia el primer período de lluvias continuas entre los días 28 y 35 lo que hace que las deformaciones registren expansión hasta que el agua almacenada en la losa se evapora y se inicia nuevamente la contracción a partir del día 45. Este comportamiento coincide con el periodo sin lluvias. A partir del día 45, se inicia la contracción hasta el día 63, luego de este día nuevamente se produce la expansión. Este comportamiento se debe a las lluvias continuas que suceden entre los días 49 y 77 que hacen que el agua que absorbe la losa contrarreste la contracción de la losa debido al secado y la posterior expansión. Luego de terminada la etapa de lluvias, el agua en la losa se evapora comenzando una nueva contracción por secado el día 86. A partir de este día el agua de lluvias ya no afecta el comportamiento de la losa y al cabo del día 126 la losa muestra una ligera expansión neta.

El comportamiento final de expansión neta fue el esperado para este tipo de concretos, donde se debe alcanzar una expansión neta o una expansión nula, esto último significa que la contracción producida después del curado sea compensada con la expansión inicial.



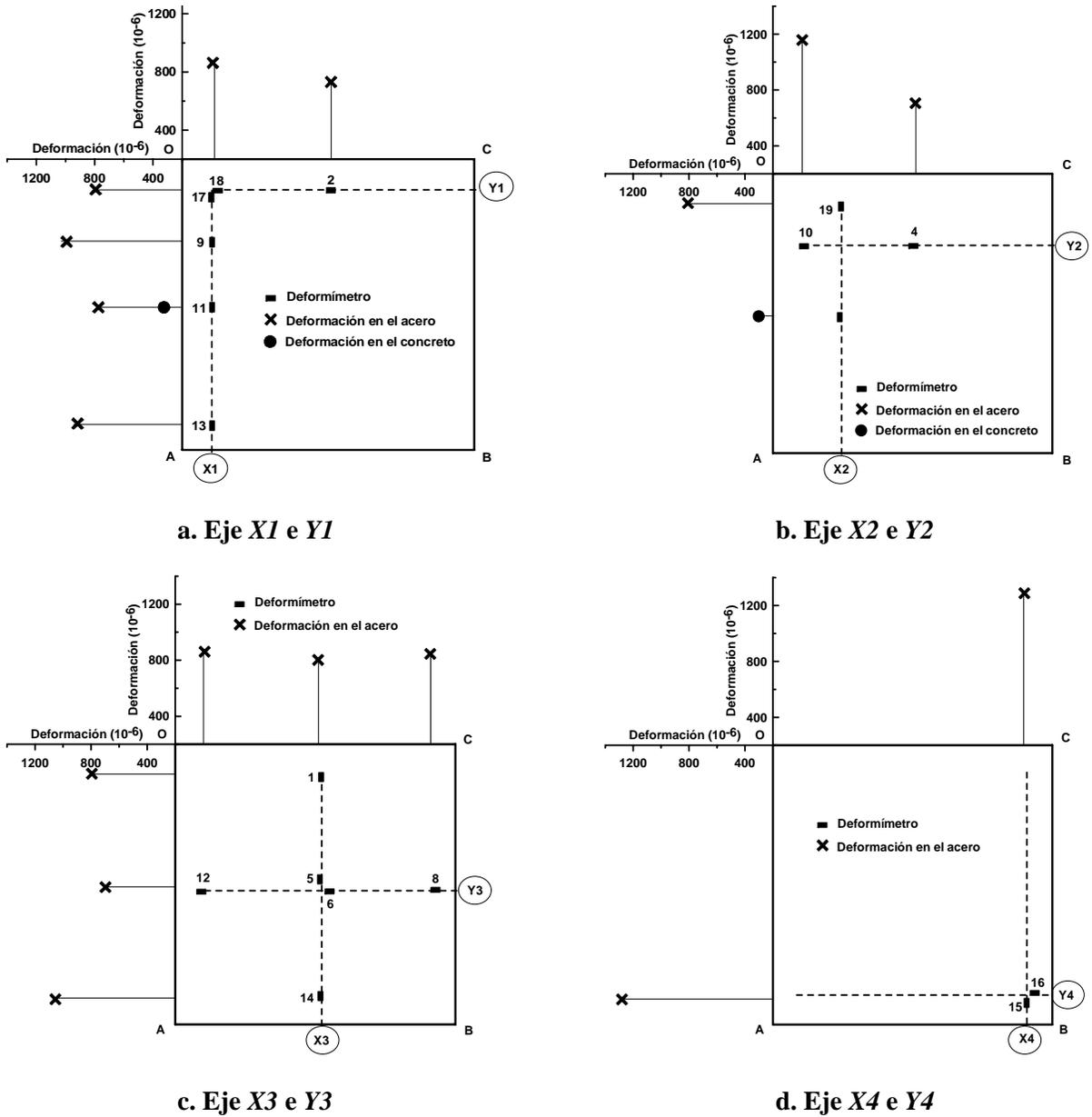
**Figura 3.6** Historia de deformaciones registradas en el acero, concreto y de humedad y temperatura en el medio ambiente y en la losa

Del comportamiento a largo plazo de la losa, se observa que además del periodo de curado, también se expande durante el periodo de lluvias, alcanzando cantidades importantes en los días 50 y 85. En la tabla 3.1 se indica las máximas deformaciones alcanzadas durante el curado, en las lluvias (día 85) y en el último día de registro (día 126). La distribución de los sensores en la losa se puede ver en las figuras 2.5b y 2.5c.

**Tabla 3.1 Expansiones máximas en el acero de refuerzo y en el concreto**

No de sensor	Expansiones, x 10 <sup>-6</sup>						
	En el curado (día 1)	En las lluvias (día 85)	Ultimo día de registro (día 126)	No de sensor	En el curado (día 1)	En las lluvias (día 85)	Ultimo día de registro (día 126)
En el acero de refuerzo				En el concreto			
1	1102	-	-	23	305	258	183
2	1011	1505	908	24	317	280	200
3	-	-	-	25	-	268	219
4	1032	1473	940	26	-	287	221
5	774	985	443	27	-	297	198
6	887	1130	574	28	-	361	270
7	-	-	-	29	-	291	227
8	955	1194	545	30	-	380	276
9	1209	1215	704	31	-	382	287
10	1221	1204	725	32	-	378	256
11	1217	1476	917				
12	1411	1426	953				
13	1102	996	525				
14	1268	1366	813				
15	1438	1400	704				
16	1487	1462	738				
17	1193	1164	826				
18	1360	1277	851				
19	853	859	453				
20	-	-	-				
21	-	-	-				
22	-	-	-				

En la figura 3.7 se muestran, de manera gráfica, los valores indicados en la tabla 3.1. Se observa que las deformaciones en las barras de acero de puntos diagonalmente simétricos son similares. Sin embargo, entre los puntos O (sensores 17 y 18) y B (sensores 15 y 16) se aprecia una diferencia del orden de 200 microdeformaciones. Esta diferencia se puede deber a dos motivos; primero, a la secuencia de colado, que se realizó en tres etapas, donde el extremo B y el extremo O se colaron en la primera y tercera etapa, respectivamente; y segundo, el concreto proveniente de camiones revolvedores diferentes. Del muestreo de CEMEX Concretos, realizados en los prismas de control, con concreto proveniente de cada camión se obtuvo deformaciones de expansión de 600, 690 y 530 microdeformaciones en los camiones C1, C2 Y C3 respectivamente.



En la figura 3.8 se muestran las lecturas de las deformaciones obtenidas por CEMEX en cada prisma medidos diariamente desde el colado hasta una edad de 35 días. En esta figura se observa un incremento en las deformaciones debido a la expansión durante los primeros siete días de curado, luego los prismas se contraen gradualmente. Asimismo se aprecia que las deformaciones de los prismas de concreto provenientes de un mismo camión son similares, mientras que hay una diferencia de 70 microdeformaciones entre los prismas de concreto proveniente de los camiones C1 y C3. Este valor corresponde al 35% de la diferencia registrada entre los puntos O y B en la losa (Fig. 3.7). La secuencia del colado fue quizá el otro factor que produjo la diferencia restante.

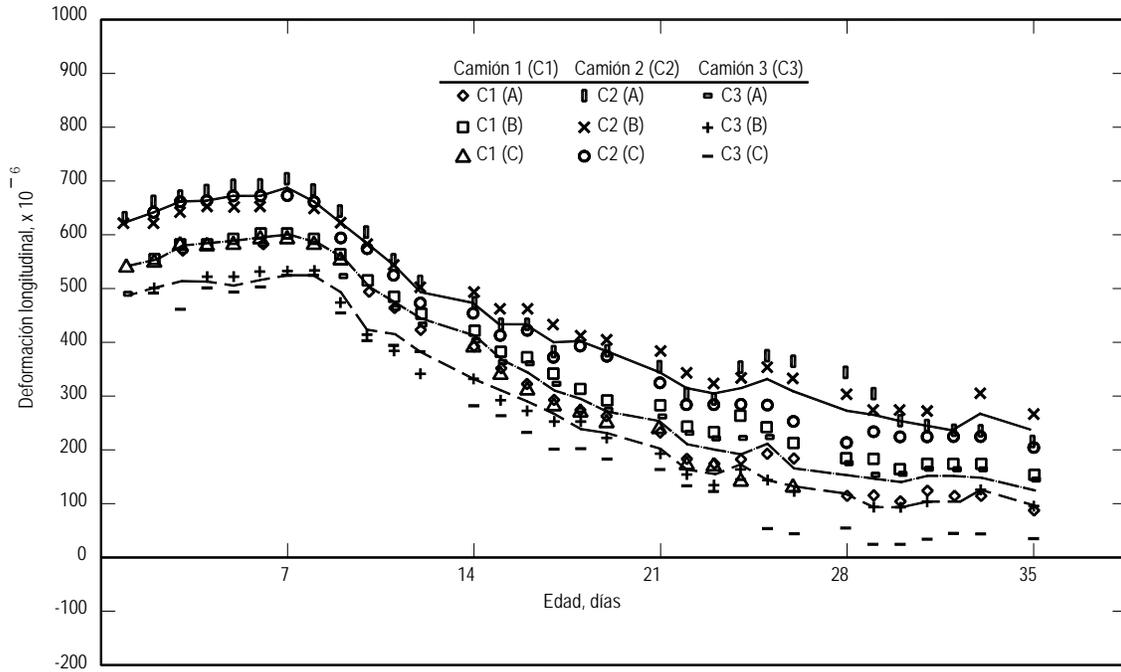
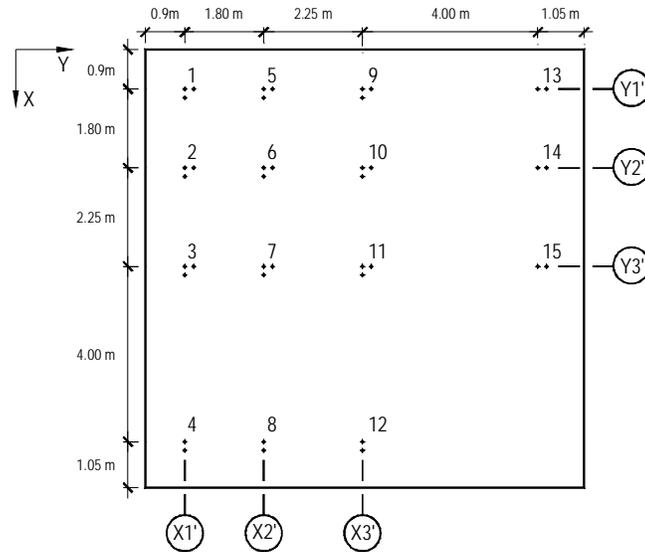


Figura 3.8 Deformación en los prismas

### 3.1.3 Deformación superficial en el plano de la losa

Para medir las deformaciones en la superficie de la losa se tomaron lecturas de la distancia entre puntos guías separados nominalmente 20 cm, figura 3.9. Las lecturas se tomaron con el extensómetro los días 9, 11, 14, 16, 18 y 22 después de colado.

En la tabla 3.2 se muestran las variaciones de las deformaciones en los puntos guías en los días 11, 14, 16, 18 y 22 con respecto al primer día de medición (día 9) todas registradas a la misma hora.



**Figura 3.9 Ubicación de los puntos de medición sobre la superficie de la losa**

**Tabla 3.2 Variaciones en la deformación, en microdeformaciones, sobre la superficie de la losa en los puntos de medición**

	Punto de medición	Día 11	Día 14	Día 16	Día 18	Día 22
Eje X	2	265	195	115	205	350
	3	145	45	-10	25	255
	4	125	-	-40	90	165
	5	125	-	-40	90	165
	6	130	20	-65	300	120
	7	185	300	170	150	430
	8	150	70	65	115	-750
	9	-415	-50	-90	15	60
	10	15	-75	-135	-75	35
	11	20	-120	-150	-125	-80
	12	-5	365	-100	-30	15
	Eje Y	2	165	-410	325	415
3		65	-30	-105	-45	35
5		210	105	30	320	260
6		335	255	165	65	340
7		170	140	90	90	250
9		140	95	15	-45	205
	13	125	185	25	55	175

(-) Contracción (+) Expansión

Del registro de deformaciones del deformímetro 11 para acero y del deformímetro 23 para concreto, figura 3.10, se observa que la variación de las deformaciones en el acero,  $\Delta\varepsilon_s$ , en los días 11, 14, 16, 18 y 22 (los mismos días que se midieron con el extensómetro sobre la superficie) fueron mayores que las variaciones registradas en el deformímetro para concreto,  $\Delta\varepsilon_c$ . Esta diferencia se debe a que las historias de deformaciones registradas no se encuentran a una misma altura, por lo que se considera que las variaciones en la deformación en la superficie de la losa debieron ser mayores.

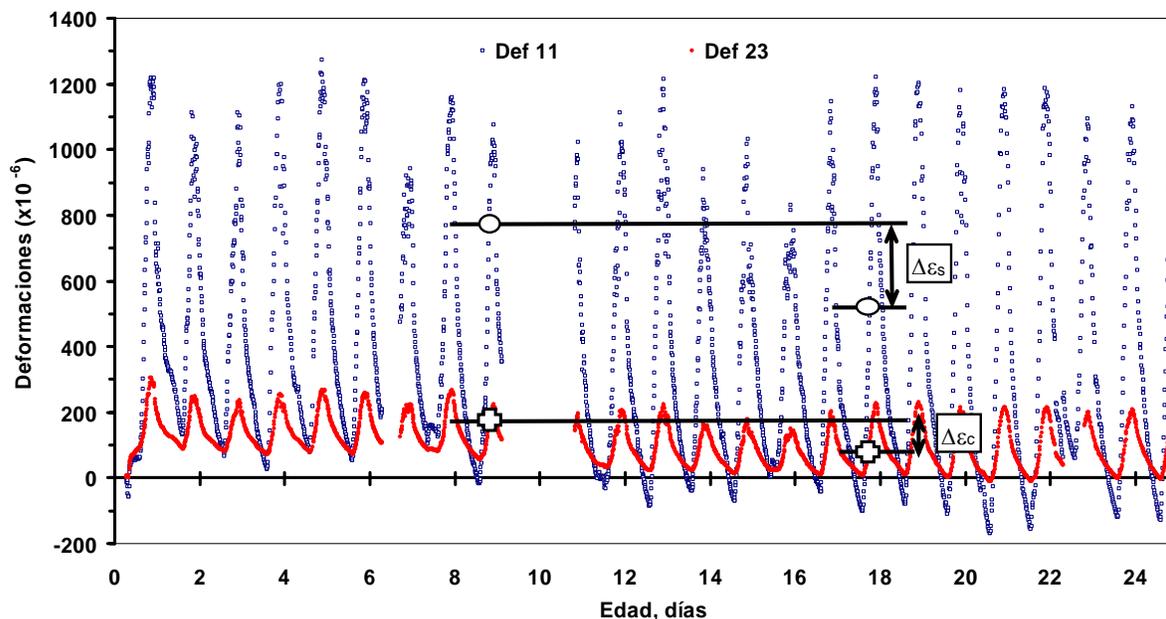


Figura 3.10 Variación de longitud sobre la superficie de la losa

### 3.2 LOSAS VERTICALES

#### 3.2.1 Deformaciones registradas en el acero y en el concreto

En las figuras 3.11a a 3.11f se muestran las historias de deformaciones en el acero y en el concreto de las losas de 10 cm de espesor; mientras que en las figuras 3.12a a 3.12f, las historias correspondientes a las losas de 15 cm de espesor.

En todos los especímenes se colocaron deformímetros para acero y transductores externos de desplazamiento, sólo se colocaron seis deformímetros para concreto en los especímenes K-10-0.10%, K-10-0.15%, K-10-1.00%, K-10-2.00%, K-15-0.15% y K-15-0.30%.

Es conveniente señalar, dada la interrupción en la lectura de los datos, que se emplearon dos sistemas de adquisición de datos. El primero, denominado TDS se conectó a una computadora donde se registraban las mediciones; el segundo, denominado *Field Point* posee una memoria donde se almacenaba la información. Debido a continuos cortes en la energía eléctrica existen vacíos en la información mostrada en las gráficas. Los instrumentos conectados al sistema TDS fueron los que presentaron mayor cantidad de interrupciones debido a que en cada interrupción de corriente era necesario reiniciar la computadora y cargar el software de adquisición de datos. Esto último no sucedió con el sistema *Field Point* que por característica propia reiniciaba automáticamente con el retorno de la energía eléctrica.

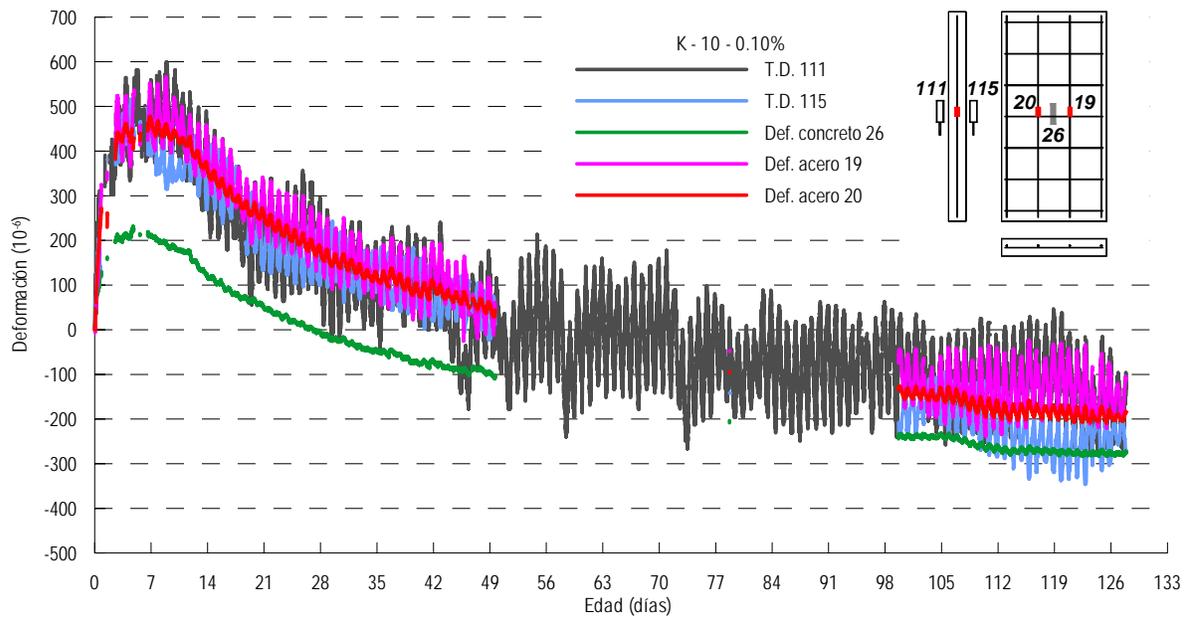
Durante el colado se dañó el deformímetro de acero en la losa de 10 cm con cuantía 0.15%, por lo que en la figura 3.11b no se muestra el registro de deformaciones en el acero. Debido a los ya mencionados cortes en la energía eléctrica, varios deformímetros de acero y uno de concreto se dañaron (figuras 3.11e y f, 3.12a, b y f).

De las figuras 3.11 y 3.12 se puede observar que todos los especímenes se expandieron durante el periodo de curado (nueve días bajo bolsas de polietileno), posteriormente empezó la contracción y al cabo de 133 días alcanzaron una contracción neta.

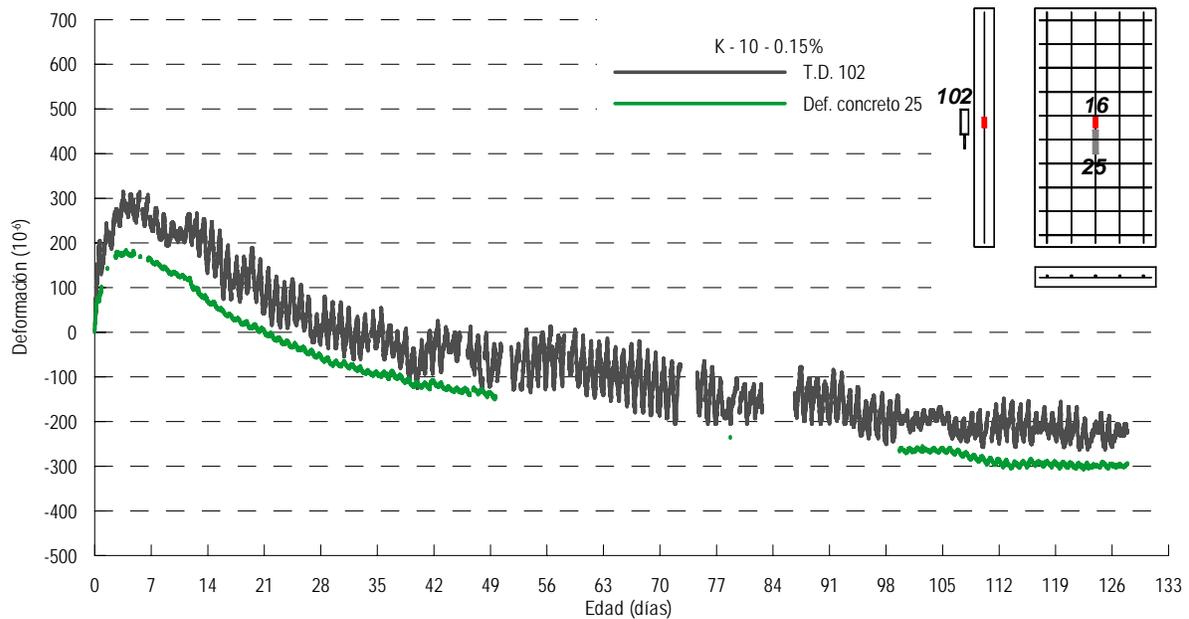
También, se aprecia que debido a los ciclos de humedad y temperatura del medio ambiente, las historias de deformaciones presentan expansiones y contracciones durante el día. Cabe mencionar que las variaciones en la deformación en un día son menores que las experimentadas por la losa sobre terreno, esto se debe a que las losas verticales se encontraban en un ambiente cerrado mientras que la losa sobre terreno estaba expuesta directamente al medio ambiente.

Además, se observa que las deformaciones registradas internamente en el acero son similares a las deformaciones registradas por los deformímetros para concreto y a las deformaciones externas registradas por los transductores eléctricos de desplazamiento. Sin embargo, en algunos casos los deformímetros para concreto registraron valores de deformación menores a los obtenidos mediante los otros instrumentos de medición (deformímetros para acero y transductores de desplazamiento). Esta diferencia sólo se registró en los especímenes de 10 cm de espesor, que presentan una parrilla de refuerzo, figuras 3.11a, 3.11b, 3.11e y 3.11f. Se considera que la diferencia encontrada se debe a que en las losas de 10 cm, los deformímetros para concreto se ubicaron en el plano de la parrilla de refuerzo lo que restringió la expansión; mientras que, en las losas de 15 cm, los deformímetros para concreto se ubicaron al centro del espesor entre las dos parrillas de refuerzo por lo que el deformímetro no sufrió ningún tipo de restricción.

Los especímenes se deformaron uniformemente en dirección longitudinal, lo que se puede apreciar al comparar la historia de deformaciones de los especímenes que se instrumentaron con dos deformímetros para acero, figuras 3.11a, 3.12a, 3.12c, 3.12d y 3.12e, y en los especímenes donde se colocaron dos transductores de desplazamiento, figuras 3.11a y 3.11d. Es decir, no hubo flexión.



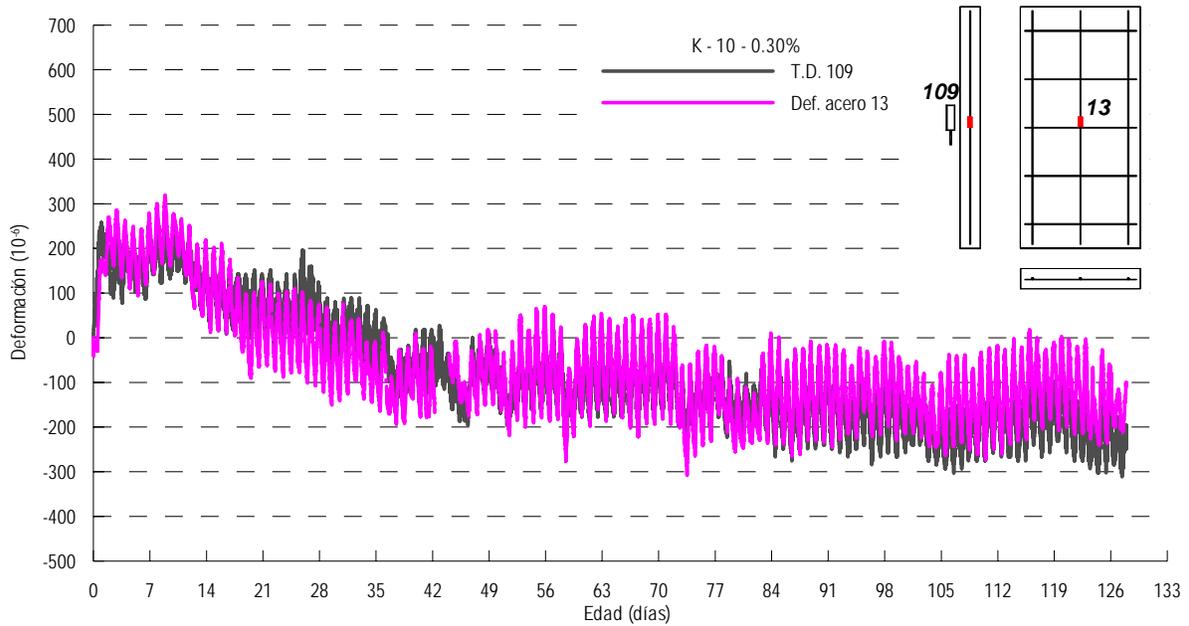
**a. Cuantía 0.1%**



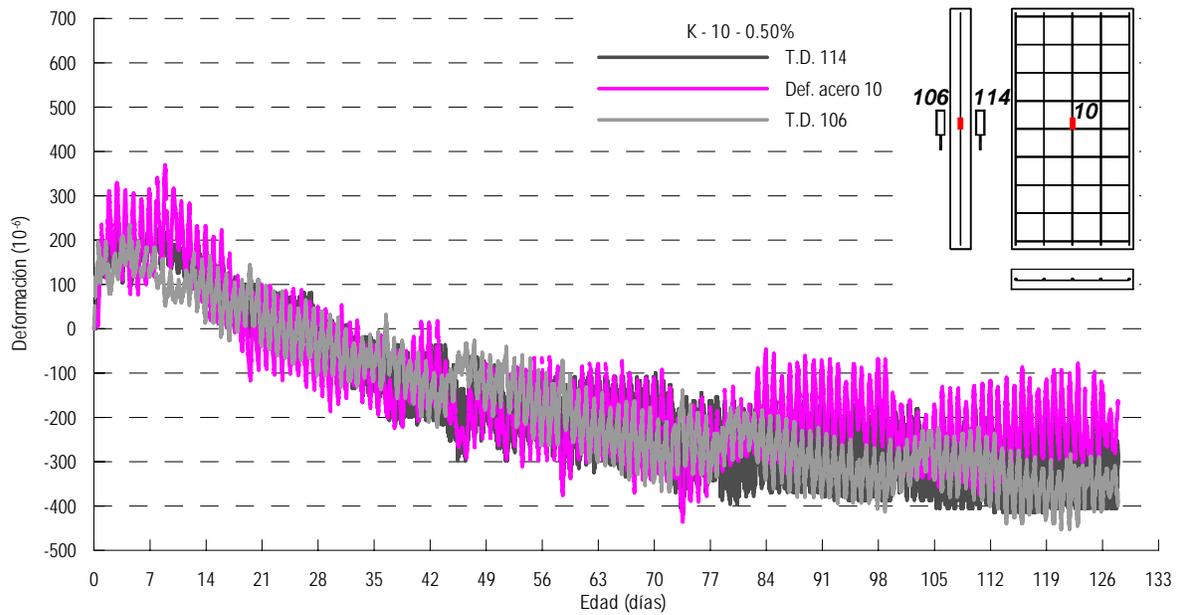
T.D.: Transductor de desplazamiento

**b. Cuantía 0.15%**

**Figura 3.11 Historia de deformaciones en losas de espesor 10 cm**



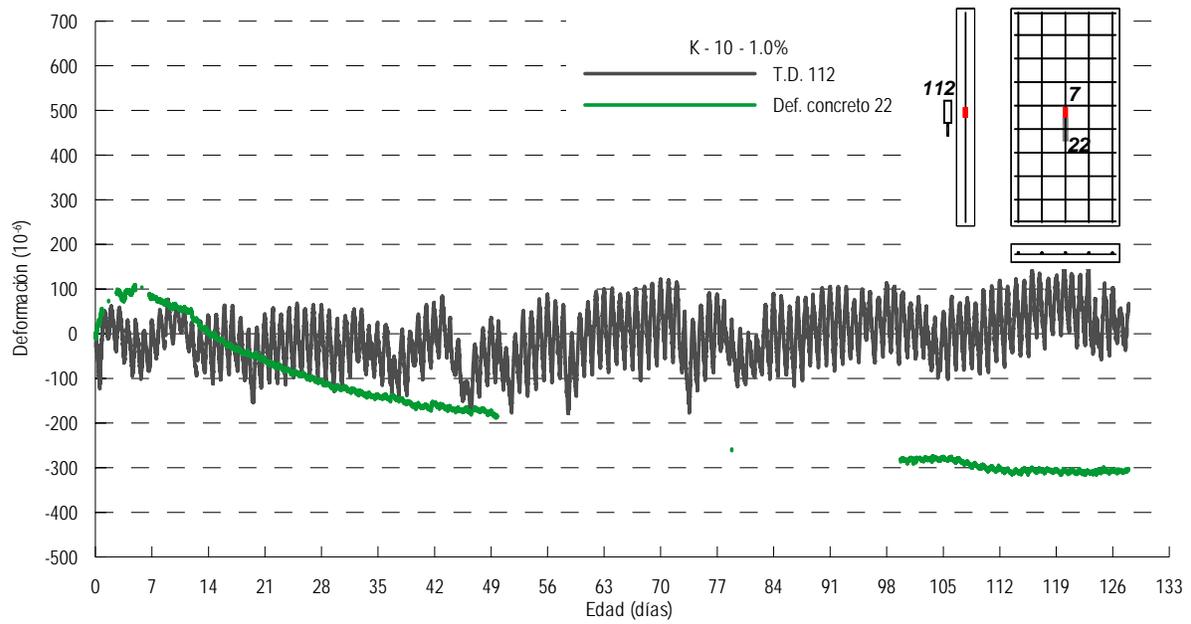
**c. Cuantía 0.3%**



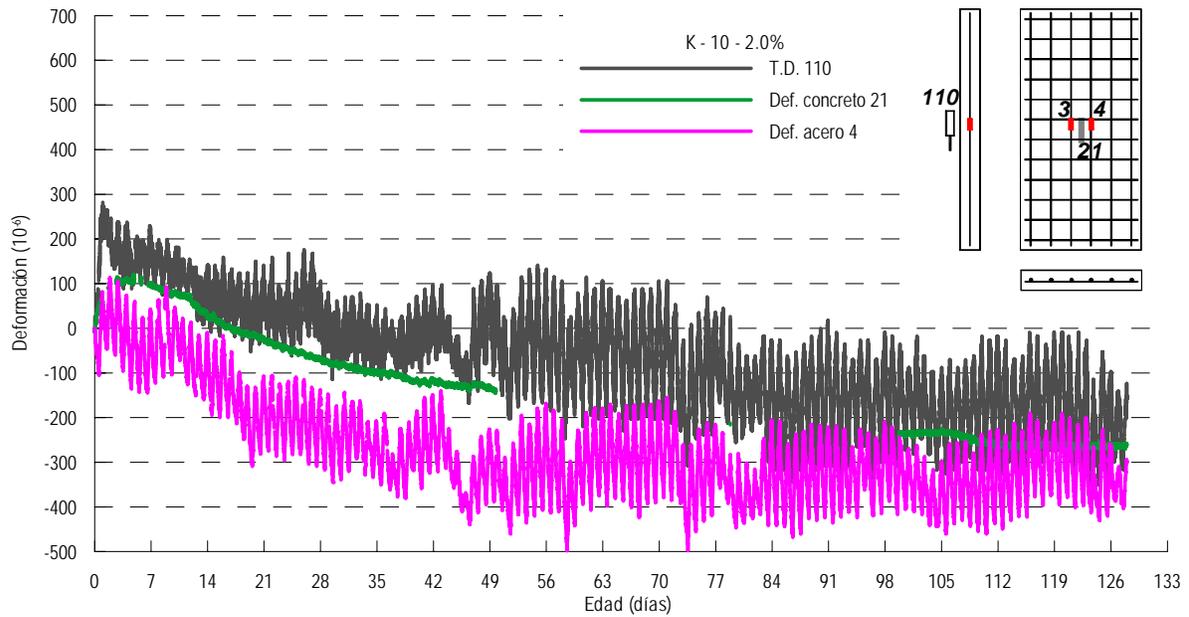
T.D.: Transductor de desplazamiento

**d. Cuantía 0.5%**

**Figura 3.11 Historia de deformaciones en losas de espesor 10 cm (continuación)**



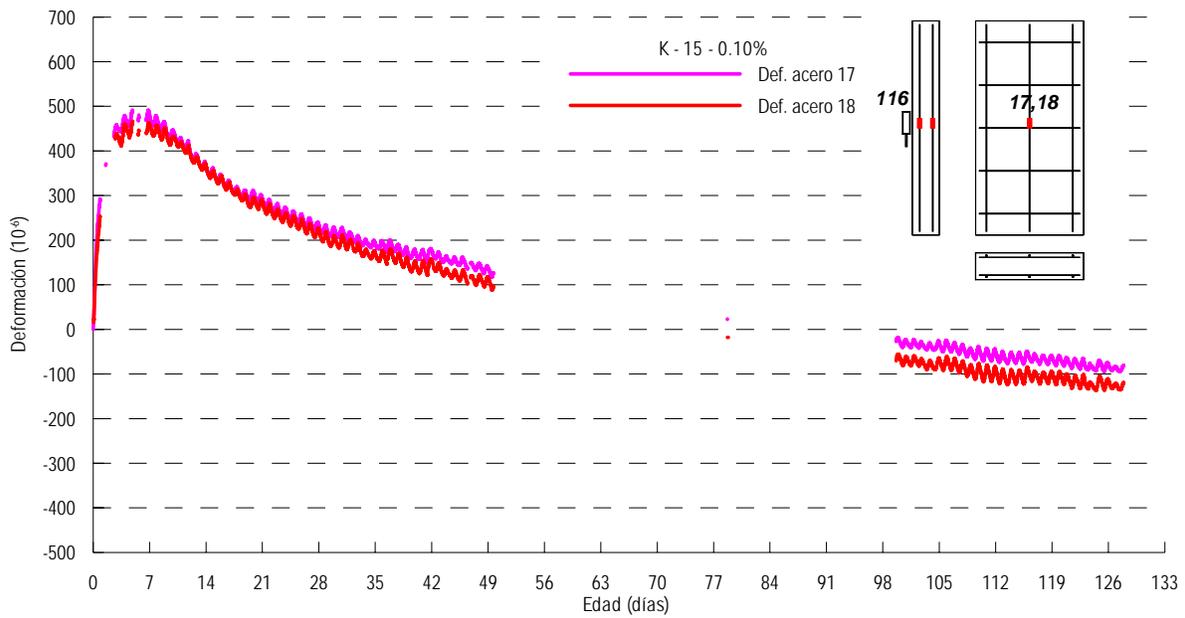
**e. Cuantía 1.0%**



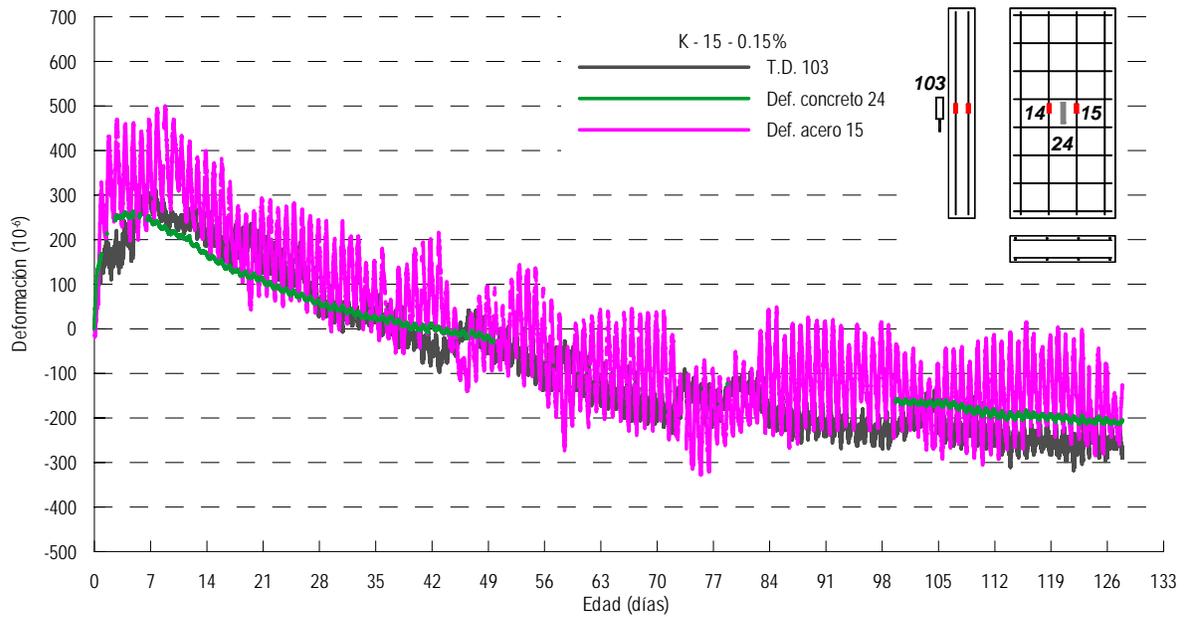
T.D.: Transductor de desplazamiento

**f. Cuantía 2.0%**

**Figura 3.11 Historia de deformaciones en losas de espesor 10 cm (continuación)**



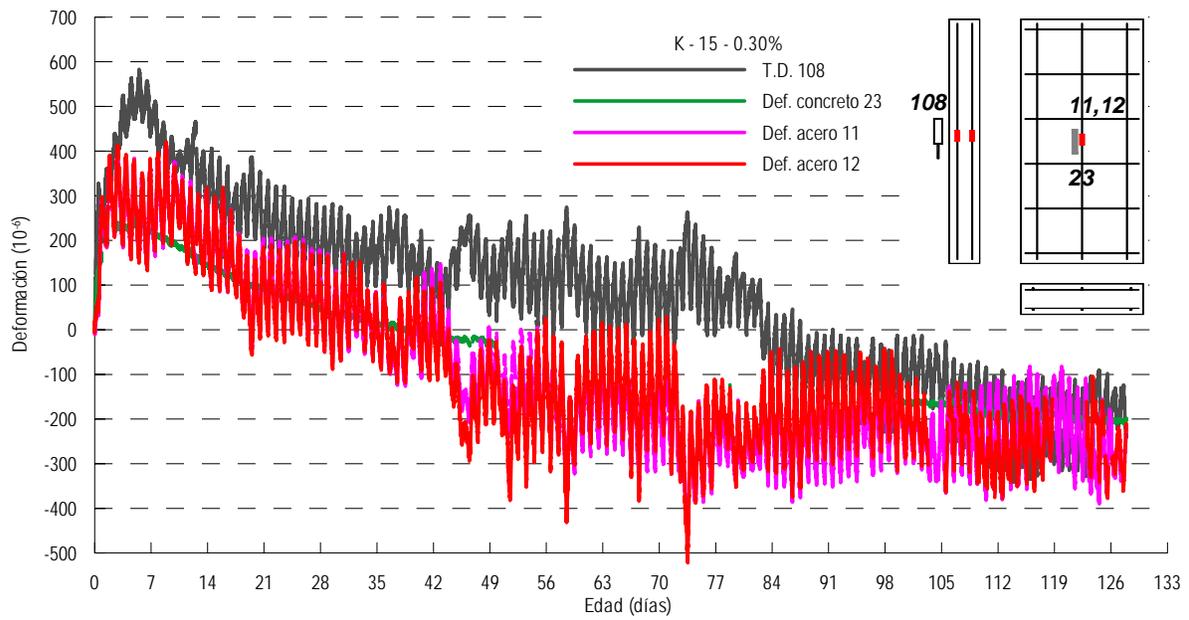
**a. Cuantía 0.1%**



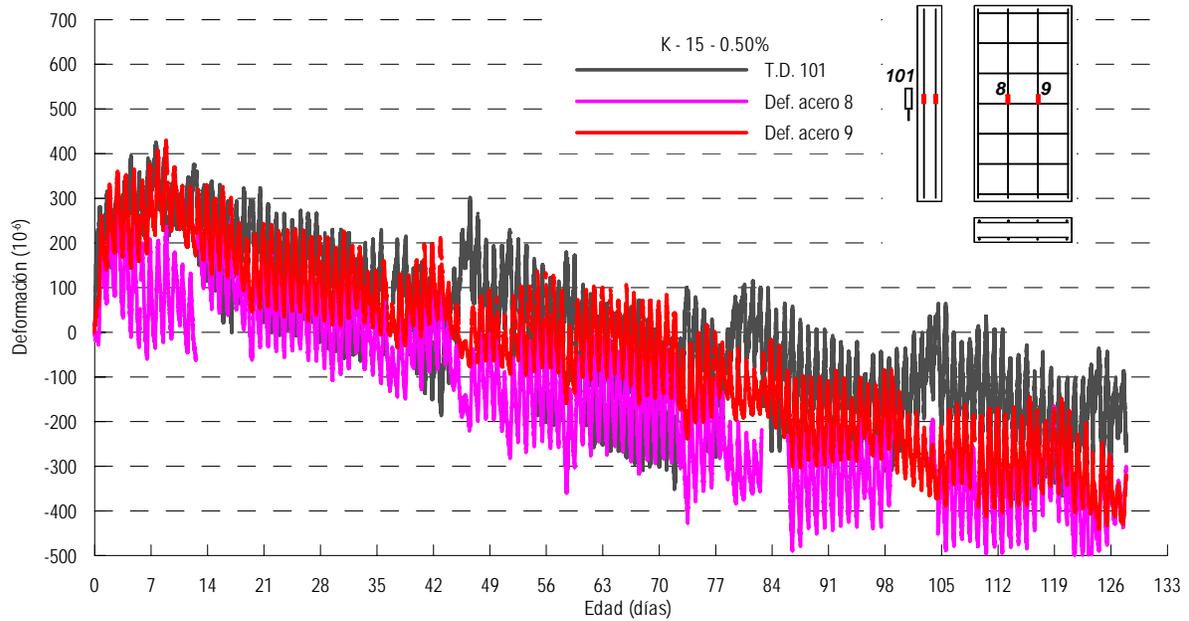
T.D.: Transductor de desplazamiento

**b. Cuantía 0.15%**

**Figura 3.12 Historia de deformaciones en losas de espesor 15 cm**



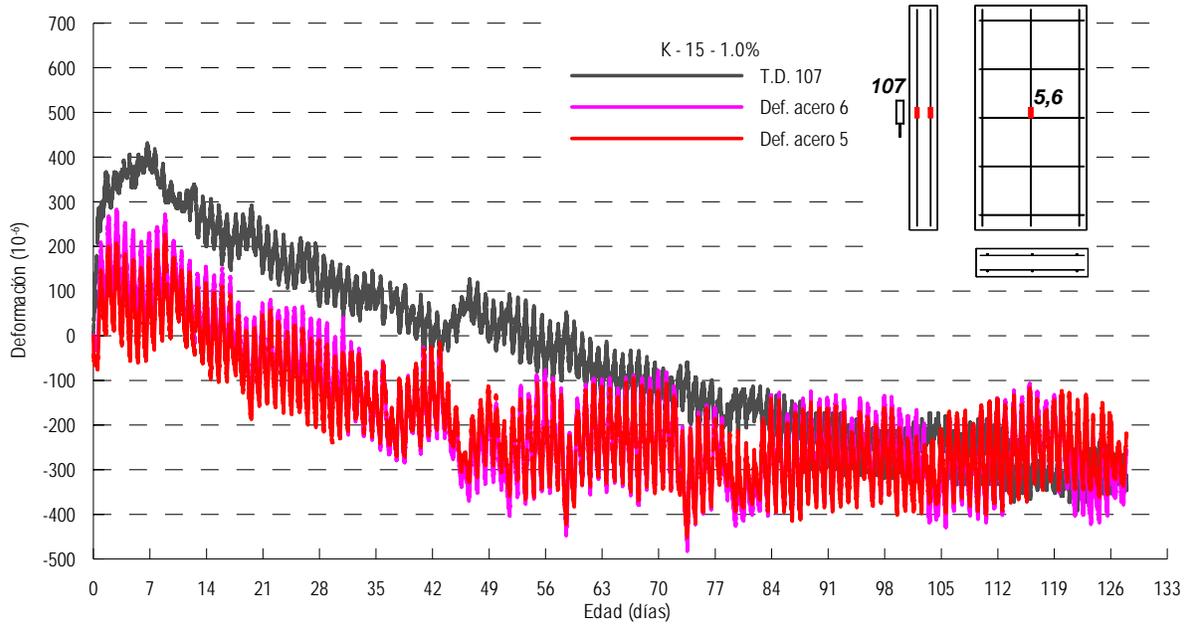
**c. Cuantía 0.3%**



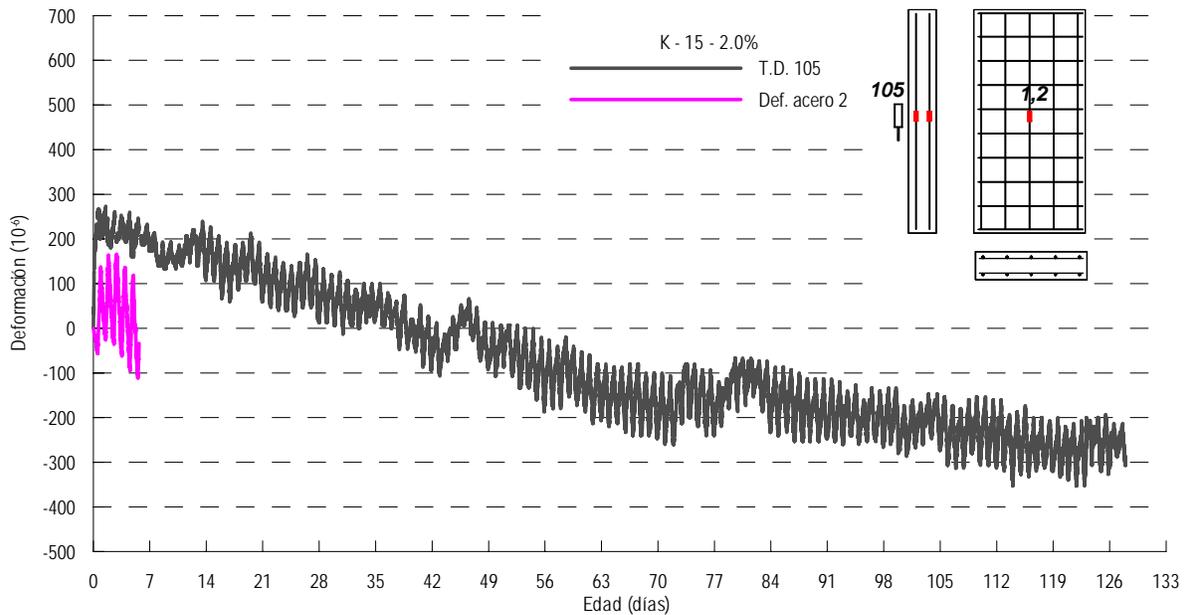
T.D.: Transductor de desplazamiento

**d. Cuantía 0.5%**

**Figura 3.12 Historia de deformaciones en losas de espesor 15 cm (continuación)**



### e. Cuantía 1.0%

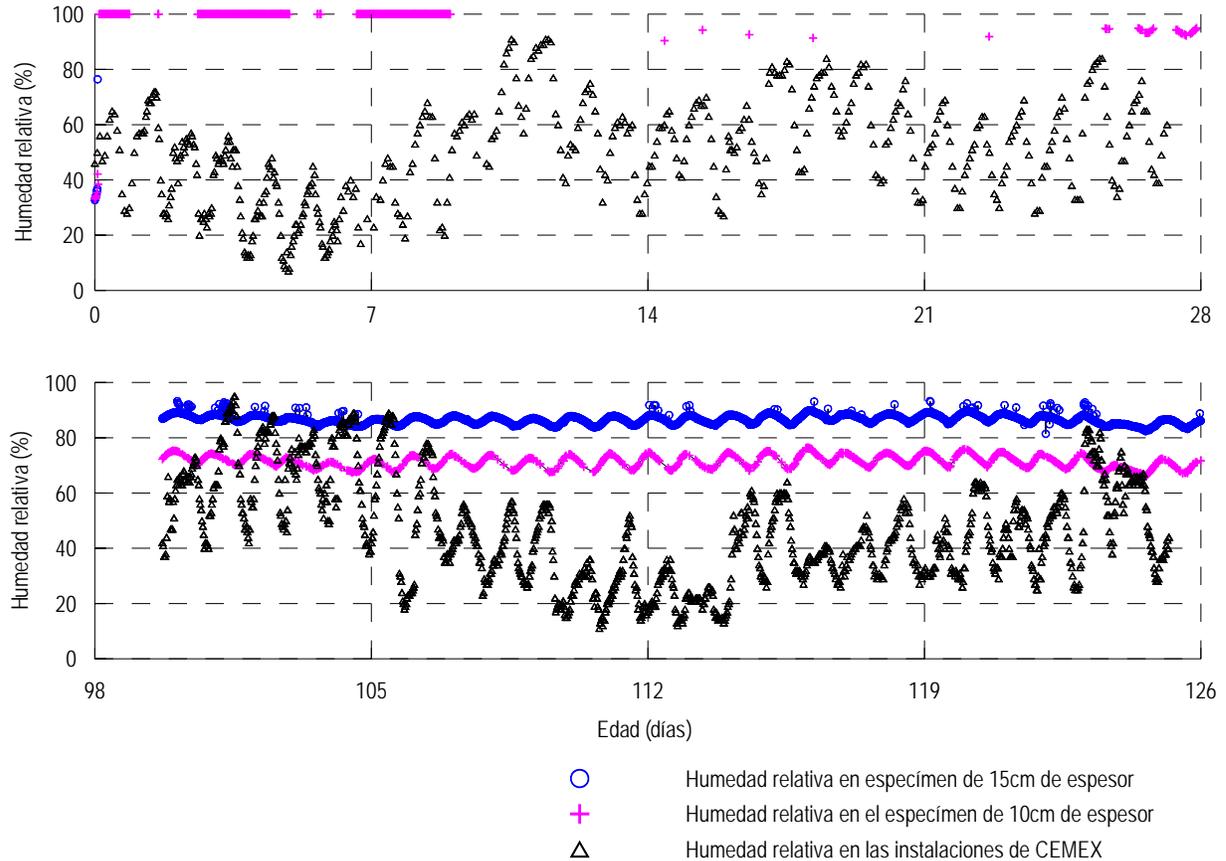


T.D.: Transductor de desplazamiento

### f. Cuantía 2.0%

Figura 3.12 Historia de deformaciones en losas de espesor 15 cm (continuación)

En la figura 3.13 se muestra la historia de humedad en la losa de 10 cm y de 15 cm, así mismo, la historia de humedad relativa del medio ambiente en las instalaciones de CEMEX. De la figura se observa que la humedad relativa del medio ambiente no afecta la variación de la humedad en las losas de 10 cm y 15 cm, esto debido a que los especímenes permanecieron dentro de instalaciones cerradas. También se observa que la historia de humedad en la losa de 15 cm de espesor se encuentra por encima de la de 10 cm de espesor, en decir, la losa de mayor espesor retiene más humedad (demora en secar) en su eje central, lugar donde se instaló el sensor de humedad.

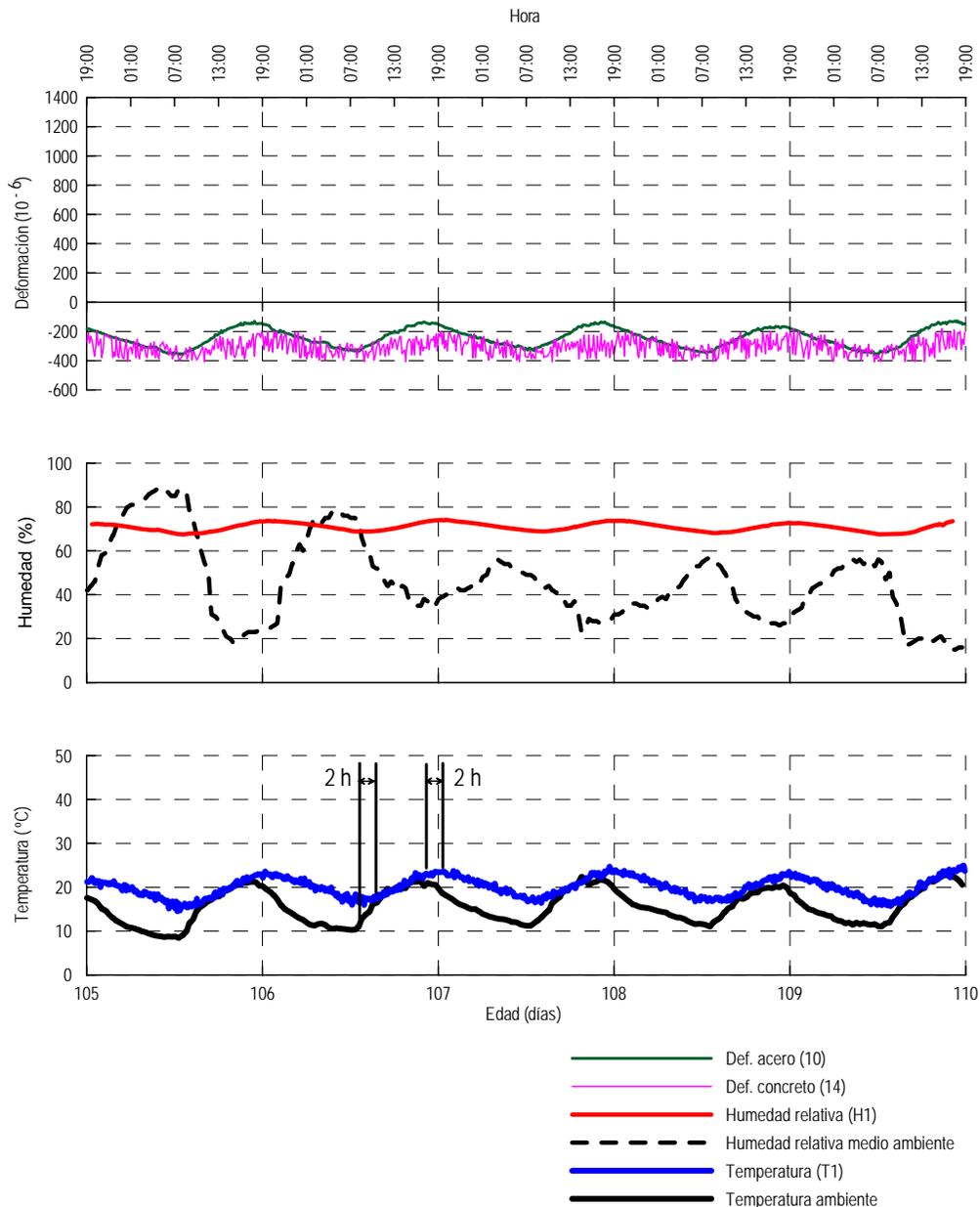


**Figura 3.13 Historia de humedad relativa en las losas verticales desde el colado hasta los 28 días iniciales y desde el día 98 al 126**

En la figura 3.14, se muestran las deformaciones en el acero, en el concreto y la variación de humedad y temperatura registrada en la losa y en el medio ambiente entre los días 105 y 110, período en el cual se registraron datos continuos en los sensores de humedad en las losas sin interrupciones debido al corte de la energía eléctrica. Analizando las variaciones en un día, se observa que la temperatura mínima y máxima del medio ambiente se alcanzan 2 horas, antes que en las losas. Esto indica, al igual que en la losa sobre terreno, que la tasa de liberación y absorción de calor de las losas verticales fueron similares. Además, la variación de la temperatura durante el día dentro de las losas fue de 10 °C lo que correspondería a una variación en la deformación de 100 microdeformaciones según la PCA (1998).

Con respecto a la humedad, se observa que la máxima humedad en el interior de la losa coincide aproximadamente con la mínima humedad en el medio ambiente y viceversa. A diferencia de la losa sobre terreno, el efecto de la humedad ambiental en las variaciones diarias de la deformación fue menor en las losas verticales que permanecieron en un ambiente cerrado, figura 3.14.

Finalmente, de la figura 3.14 se observa de la historia de deformaciones que la variación diaria registrada fue aproximadamente 200 microdeformaciones que corresponde en partes iguales a los efectos de la variación de la humedad y la temperatura. En este caso, las variaciones producto de estos efectos fueron similares, mientras que en la losa sobre terreno, el efecto de la humedad representó 85%, mientras que el efecto de la temperatura sólo el 15%, por lo que se puede concluir que el efecto de la variación de la humedad en un elemento es importante.



**Figura 3.14 Deformaciones registradas en el acero, concreto y de humedad y temperatura en el medio ambiente y en las losa vertical K-10-0.50%, durante los días 105 a 110**

### 3.2.2 Comparación de deformaciones en los especímenes del mismo espesor

En la figura 3.15 se muestra las curvas de deformación con los valores medios de deformación de los especímenes de 10 cm y 15 cm de espesor.

Se observa que los especímenes con menor cuantía experimentaron mayores deformaciones por expansión durante la etapa de curado. Además, se aprecia que para alcanzar las deformaciones máximas, la pendiente inicial de expansión es mayor para las losas con cuantías menores.

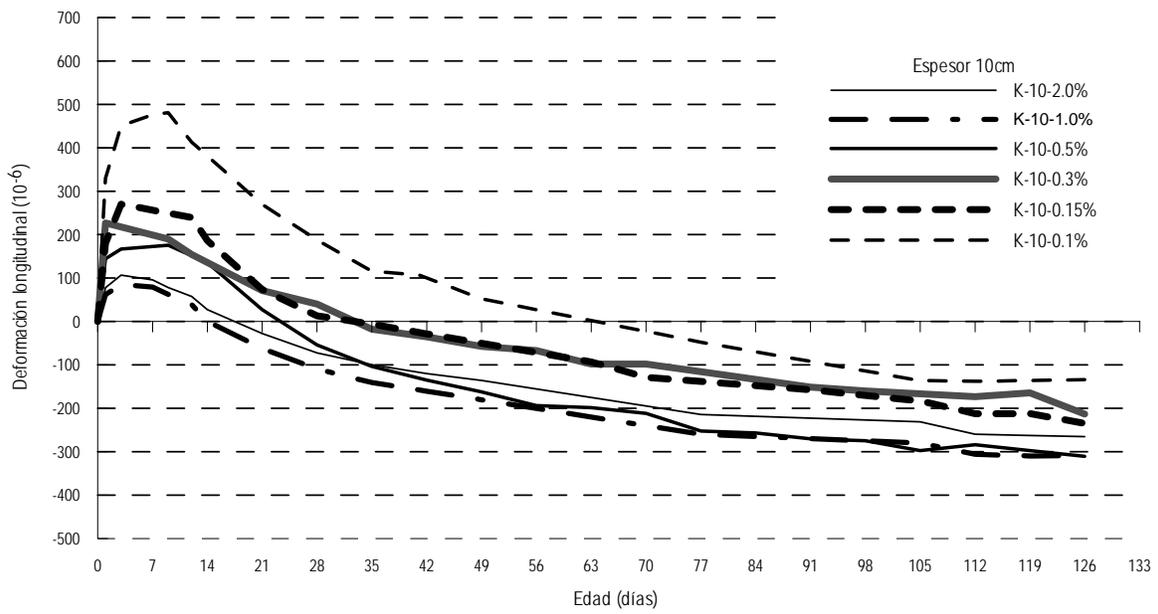
De las curvas mostradas en la figura 3.15 se observa que, luego de la etapa de curado, la mayoría de los especímenes se contraen en proporciones similares lo cual se aprecia en la forma paralela de las curvas en la etapa de contracción. Por lo tanto, se puede indicar que la cuantía de refuerzo no es un parámetro relevante en el comportamiento de las losas en el período de contracción. Esto coincide con lo señalado por Russell.

Después de 133 días, todos los especímenes experimentaron entre 130 y 300 microdeformaciones de contracción neta. Los especímenes con menor cuantía de refuerzo alcanzaron una mayor expansión y en consecuencia una menor contracción neta que los especímenes de mayor cuantía de refuerzo. Siguiendo la tendencia de las curvas de la figura 3.15, para una losa vertical sin refuerzo y sin ninguna restricción externa, se debería alcanzar la contracción compensada (contracción nula o expansión neta).

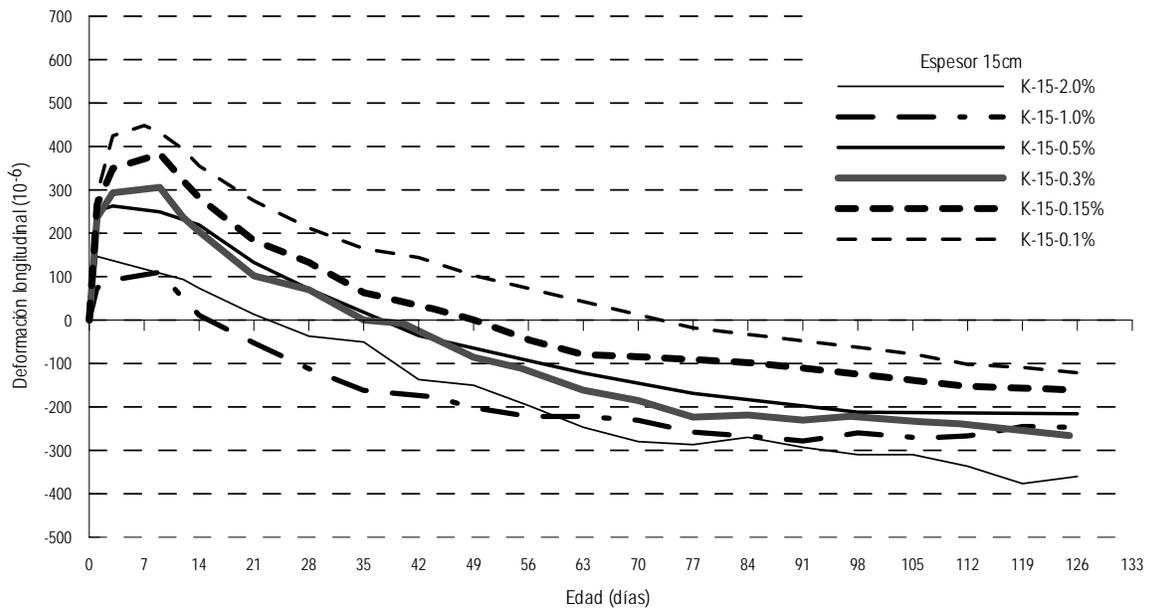
El incremento de la cuantía de refuerzo no es linealmente proporcional a la deformación por expansión, como se observa en la tabla 3.3. El espécimen K-10-0.30% alcanzó una deformación de 227 microdeformaciones lo que representó el 47% de la expansión obtenida en el espécimen K-10-0.10%, este último con la tercera parte de la cuantía de refuerzo del primero.

**Tabla 3.3 Deformaciones en los especímenes**

Especímen	Deformación longitudinal, $\times 10^{-6}$		
	Expansión máxima		A los 133 días
	Acero	Concreto	Concreto
K-10-0.10%	481	484	-134
K-10-0.15%	-	270	-235
K-10-0.30%	240	227	-213
K-10-0.50%	255	176	-311
K-10-1.00%	-	84	-308
K-10-2.00%	106	107	-265
K-15-0.10%	448	400	-122
K-15-0.15%	383	256	-161
K-15-0.30%	306	324	-266
K-15-0.50%	297	263	-216
K-15-1.00%	110	346	-247
K-15-2.00%	137	147	-360



a. Espesor 10 cm



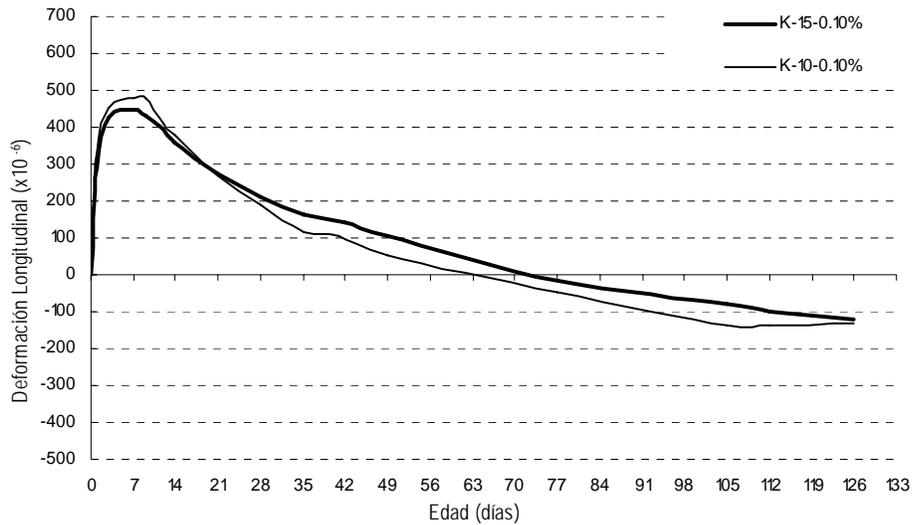
b. Espesor 15 cm

Figura 3.15 Valores medios de deformaciones en las losas verticales

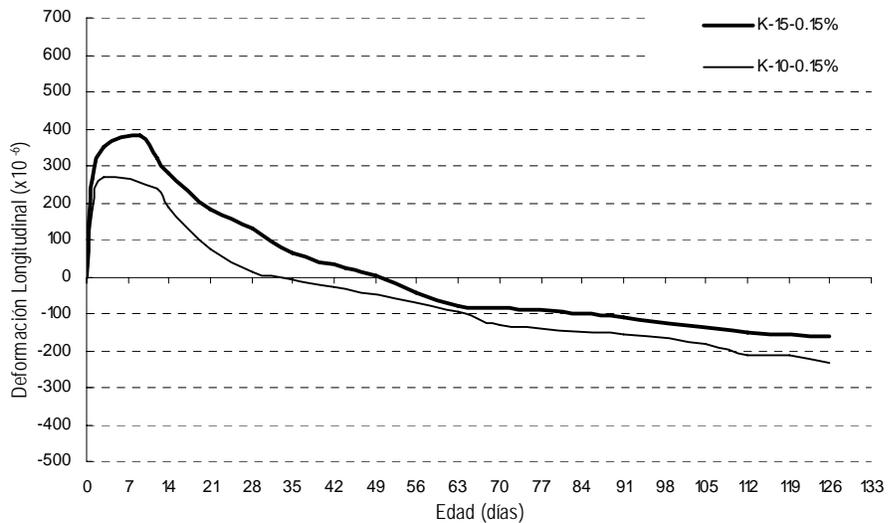
### 3.2.3 Comparación de deformaciones en los especímenes de igual cuantía

En la figura 3.16 se comparan las curvas deformación-tiempo de los especímenes de 10 y 15 cm con la misma cuantía de refuerzo. Se observa que no existe una diferencia de deformaciones importante entre los especímenes de 10 y 15 cm: la expansión máxima, la contracción neta y la forma de las curvas son similares. Por lo tanto, se puede indicar que la influencia del parámetro espesor de la losa no es un factor relevante en el comportamiento. Esto coincide con lo señalado por Russell.

De la figura 3.16 se observa que los especímenes con mayor cuantía ingresaron a la etapa de contracción más temprano que los especímenes de menor cuantía. En los especímenes de 0.1% de cuantía de refuerzo la compensación (deformación nula) se logró a los 66 días; mientras que los especímenes de 2%, a los 14 días.

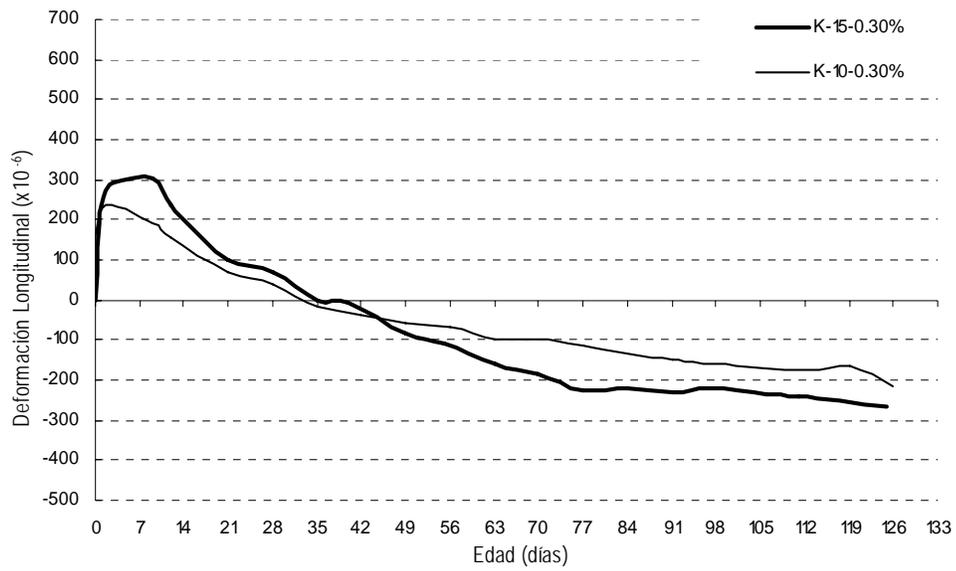


a. Cuantía 0.1%

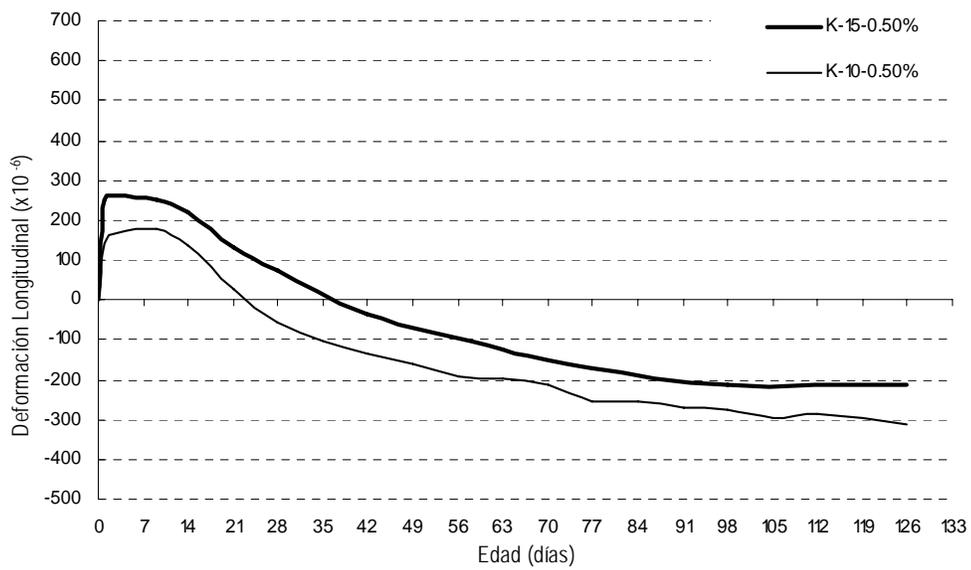


b. Cuantía 0.15%

Figura 3.16 Especímenes de igual cuantía

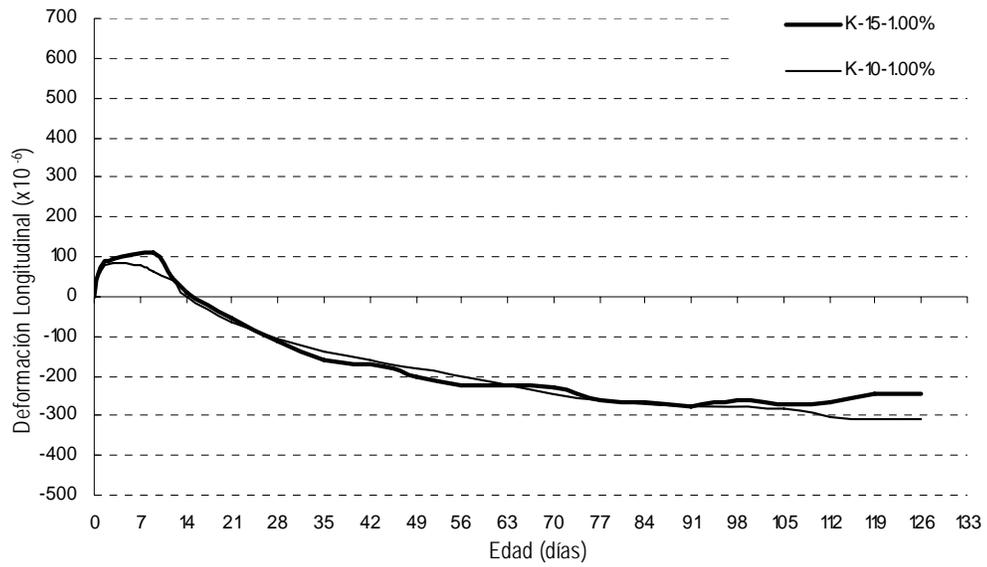


**c. Cuantía 0.3%**

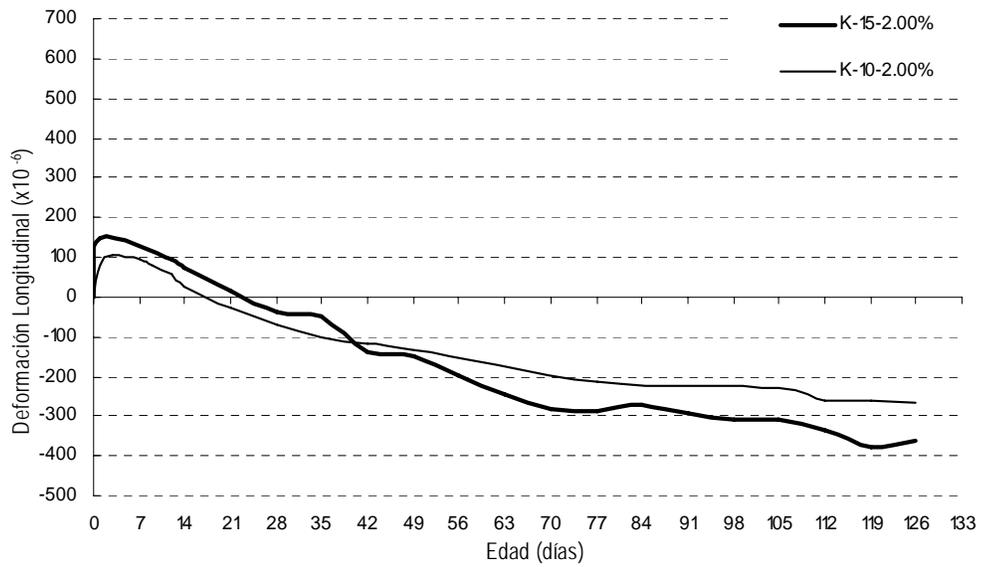


**d. Cuantía 0.5%**

**Figura 3.16 Especímenes de igual cuantía (continuación)**



**e. Cuantía 1.0%**



**f. Cuantía 2.0%**

**Figura 3.16 Especímenes de igual cuantía (continuación)**

### **3.3 COMPARACIÓN ENTRE LAS EXPANSIONES MÁXIMAS REGISTRADAS EN LOS ESPECÍMENES Y LAS EXPANSIONES ESPERADAS SEGÚN LAS RECOMENDACIONES DEL ACI 223**

En esta sección, se realizarán comparaciones entre las expansiones máximas obtenidas en los especímenes y las esperadas según la propuesta del ACI 223 (1998).

El ACI 223 (1998) propone el empleo de un gráfico que proporciona la expansión máxima que se alcanzaría en un elemento de concreto, que se expande libremente en condiciones de laboratorio (humedad y temperatura constantes), y la expansión requerida en un prisma de control, dado un diseño de mezcla, para alcanzar la contracción compensada completa. En la figura 3.17 se reproduce el gráfico del ACI 223 (1998) mostrada en la sección 1.2.1, a la cual Russell (1980) adicionó una curvas que relacionan diferentes valores de volumen/área de superficie de secado.

#### **3.3.1 Losa sobre terreno**

En la figura 3.17 se ubica el punto A que corresponde a la intersección de las curvas de relación volumen/área de superficie de secado igual a 15 cm (una cara de secado) y la cuantía de refuerzo de 0.15%. A este punto le corresponde una expansión de losa de 305 microdeformaciones y la expansión de prisma restringido de 320 microdeformaciones. En consecuencia, para conseguir la contracción compensada completa de la losa se requiere una expansión de 305 microdeformaciones y esto se puede alcanzar con una expansión de prisma (ASTM C 878) de 320 microdeformaciones como mínimo.

Los prismas de control muestreados por CEMEX registraron deformaciones entre 530 a 670 microdeformaciones que son valores mayores que el obtenido de la figura 3.17 en el punto A, siendo esto favorable ya que como mínimo se requería 320 microdeformaciones en el prisma para conseguir la contracción compensada completa o una expansión neta en el espécimen. Ahora emplearemos la gráfica de forma inversa. Con los valores obtenidos del muestreo de CEMEX e intersectándolas con la línea de cuantía de refuerzo de 0.15% de la figura 3.17 se obtiene que la máxima expansión en el espécimen debiera estar entre 500 a 700 microdeformaciones.

Si trazamos una línea con los valores medios de la deformación del acero, en el grafico 3.6 zona de curado, se obtendría un valor de 700 microdeformaciones. Este valor corresponde al esperado de los ensayos de prisma de control. Se consideró emplear las mediciones en el acero de refuerzo por su ubicación cerca de la superficie libre de la losa, la cual no sufría la restricción externa del terreno, lo que mejor representa las condiciones para las que el ACI 223 (1998) propuso la figura 3.17.

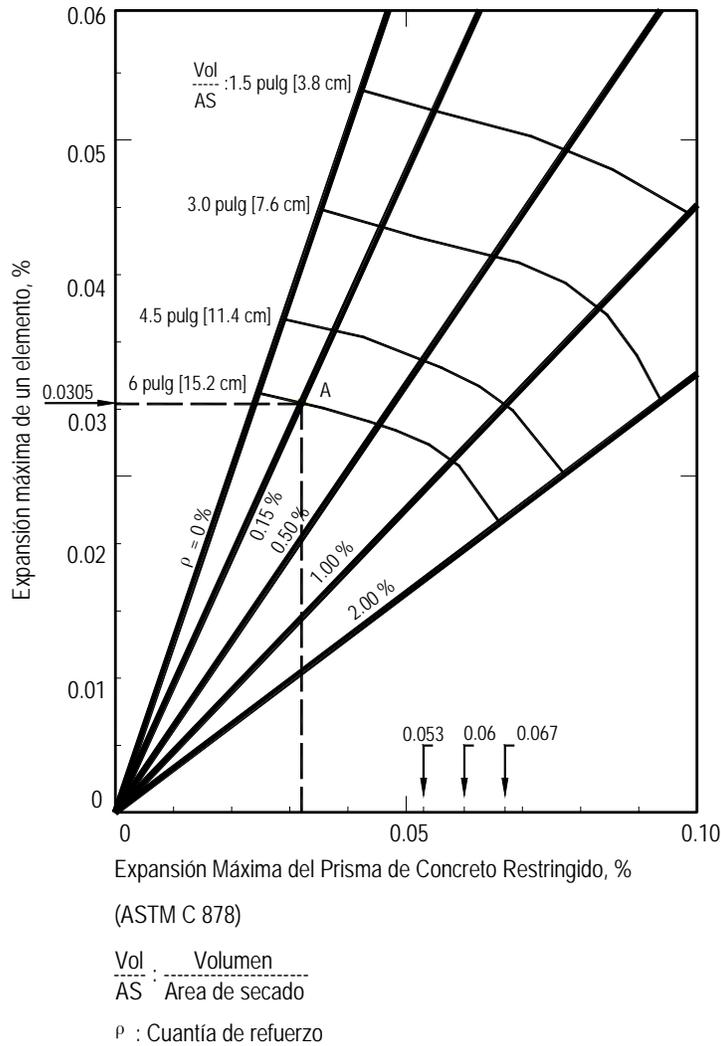
#### **3.3.2 Losas verticales**

Para hacer las comparación de las deformaciones por expansión medidas en las losas verticales con las indicadas por el ACI 223 (1998) se eligió una losa de 10 cm de espesor y 0.1% de cuantía de refuerzo. En la figura 3.18 se muestra el punto B correspondiente a dicha cuantía y relación volumen/área de secado igual a 5 cm. En ese punto, la expansión del prisma debería ser 460 microdeformaciones y se espera una expansión máxima en el espécimen de 500 microdeformaciones.

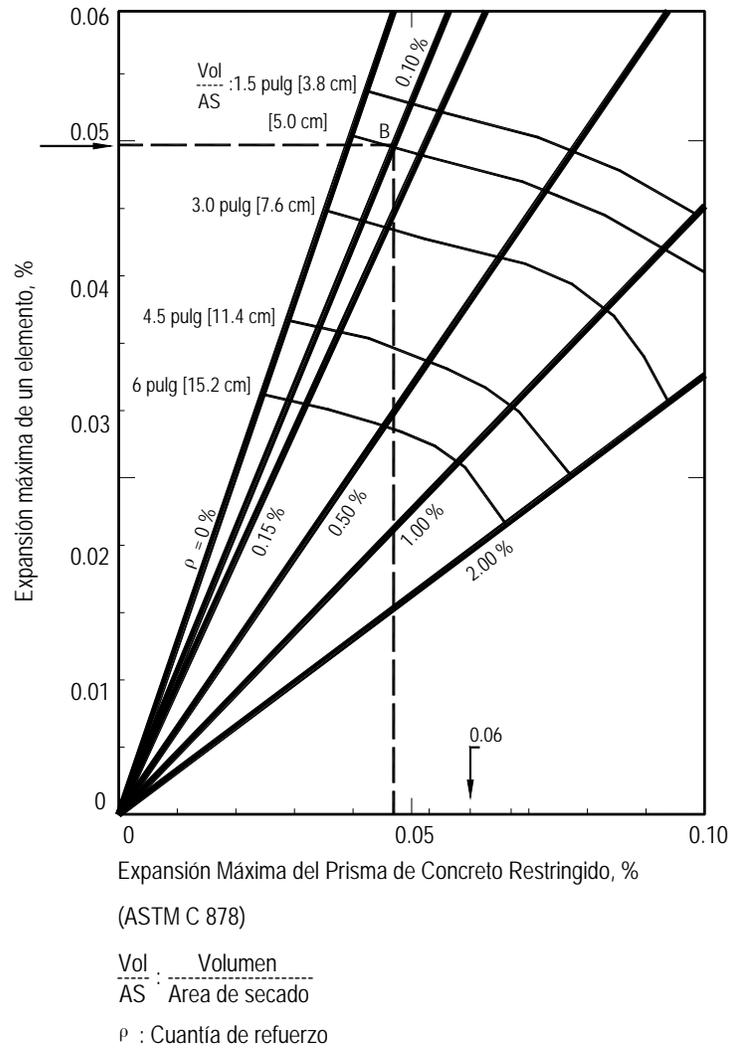
Los primas muestreados arrojaron una deformación de 600 microdeformaciones. Si se toma este valor y se intersecta con la recta de cuantía de refuerzo de 0.1% se obtiene un valor cercano a las 600 microdeformaciones. Esta deformación es la mínima necesaria para alcanzar la contracción compensada completa.

En la figura 3.11a, se observa que la contracción anticipada (diferencia entre la máxima expansión y la contracción neta) es de 600 microdeformaciones. Este comportamiento en la deformación coincide con lo encontrada según la gráfica del ACI 223 (1998).

Por lo tanto, los valores de deformación registrados en los especímenes de esta investigación son comparables con los obtenidos de la gráfica del ACI 223 (1998), por lo que se puede decir que dicha gráfica puede ser empleada inicialmente para propósitos de prediseño de losas de concreto de contracción compensada sin restricción, aun cuando dicho gráfico se elaboró para elementos sin restricción.



**Figura 3.17 Expansión de losa apoyada sobre terreno contra expansión de prisma**



**Figura 3.18** Expansión de losa vertical contra expansión de prisma

## CAPÍTULO 4 RESUMEN Y CONCLUSIONES

### 4.1 RESUMEN

En el presente trabajo se muestran los resultados de las mediciones realizadas en una losa apoyada sobre terreno y en losas verticales, ambas construidas con concretos de contracción compensada en las instalaciones de CEMEX San Antonio con objeto de estudiar su comportamiento a mediano plazo (133 días) mediante la medición de las deformaciones por expansión y contracción siguiente.

Se construyó una losa de 10x10x0.15 m con 0.15% de cuantía de refuerzo apoyada sobre una subrasante (tepetate) compactado, con un grado de compactación próctor de 90%. Con el fin de evitar el intercambio de humedad y disminuir la fricción entre el terreno y la losa, se coló la losa sobre una hoja de polietileno. La parrilla de refuerzo se ubicó a los 2/3 de altura del espesor con el fin de proporcionar la restricción interna que compense la restricción externa proporcionada por el terreno. Para el curado se aplicó un espejo de agua durante siete días y para evitar la pérdida de humedad se cubrió la losa con una hoja de polietileno. Se emplearon deformímetros adheridos en el acero de refuerzo y deformímetros ahogados en el concreto. Adicionalmente, se realizaron mediciones de deformación sobre la superficie de la losa y se registraron variaciones en la temperatura y humedad en su interior. Esta losa se mantuvo expuesta a variaciones climáticas entre los meses de marzo y julio del 2004.

Para estudiar el efecto de otras variables en el comportamiento en losas de concreto de contracción compensada, se construyeron 12 losas verticales de 0.6 x 1.2 m con espesores de 10 y 15 cm y con diferentes cuantías de refuerzo, entre 0.1% y 2%. Aunque estas losas se concibieron para expandirse y contraerse libremente sin restricción externa (a diferencia de la losa sobre terreno donde la restricción externa fue proporcionada por el terreno) y con restricción interna debido al refuerzo, sus resultados pueden extrapolarse para losas coladas sobre una hoja de polietileno que disminuye la fricción entre el terreno y el concreto. Las losas verticales se colaron sobre un piso de concreto, en un ambiente cerrado y bajo techo por lo que estuvieron libres del efecto de la lluvia. Para el curado, cada losa se cubrió con una hoja de polietileno por 9 días. Para las mediciones, al igual que en la losa sobre terreno, se emplearon deformímetros para acero de refuerzo y para concreto; además, se adicionaron transductores de desplazamiento adheridos a las caras laterales.

Debido a que las deformaciones producto de las variaciones de temperatura no fueron relevantes, no se realizó la corrección por este factor. Al no existir en la literatura una expresión confiable que correlacione la humedad con las deformaciones obtenidas en un concreto de contracción compensada, se mantuvieron las mediciones originales.

### 4.2 CONCLUSIONES

A partir de los resultados, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

*Losa sobre terreno:*

- El concreto en estudio se expandió durante los primeros siete días de curado.
- Después del curado se inició la contracción de la losa y a los 125 días después del colado, la losa apoyada sobre el terreno llegó a presentar una ligera expansión neta, producto de la restricción interna (acero de refuerzo) y la restricción externa (fricción del terreno).

- La deformación de la losa a través de su espesor no es constante, siendo menor en la parte inferior y mayor en la superficie, debido a la restricción externa proporcionada por el terreno lo que impide que la losa se expanda.
- Producto de las variaciones de humedad y temperatura del medio ambiente, en la etapa de curado se registraron variaciones en la deformación de 1080 microdeformaciones en el deformímetro para acero y de 200 microdeformaciones en el deformímetro para concreto.
- En el periodo de lluvias, durante la etapa de secado, se registraron variaciones de 1460 microdeformaciones en el deformímetro para acero y de 220 microdeformaciones en el deformímetro para concreto.
- La diferencia en estas variaciones se deben a la ubicación en altura de los deformímetros para acero y para concreto. Los primeros se ubicaron a una altura igual a los 2/3 del espesor, mientras que los segundos, por efecto del colado, se desplazaron hacia el fondo de la losa, registrando deformaciones en un nivel inferior más cercano a la superficie en contacto con el terreno.
- La variación de la humedad afectó principalmente a los deformímetros ubicados cerca de la superficie ya que la humedad acumulada durante la tarde y la madrugada del día anterior se evaporó por efecto del calor de la mañana. Por lo que los deformímetros para concreto que se desplazaron al fondo por causa del colado sufrieron menores variaciones.
- Las variaciones de deformación registradas sobre la superficie empleando el extensómetro, demostraron que efectivamente, las deformaciones a través del espesor de la losa fueron distintas.
- Se observó que la acumulación de agua sobre la superficie de la losa, por efecto de las lluvias, produjo expansiones en el concreto, alcanzando expansiones máximas los días 50 y 85 como se observa de la historia de deformaciones.
- Se encontró que la variación de la temperatura contribuyó con sólo un 15% a la variación de las deformaciones durante el día, siendo el 85% consecuencia de la variación de la humedad.

*Losas verticales:*

- Las losas alcanzaron su máxima expansión en la etapa de curado y finalizada esta etapa empezó la contracción.
- Las losas verticales alcanzaron una contracción residual debido a que sólo presentaban restricción interna (acero de refuerzo).
- Como estas losas se ubicaron en un ambiente cerrado, las variaciones diarias por efecto de la humedad y temperatura ambiental fueron del orden de 200 microdeformaciones, de las cuales el 50% corresponden a la temperatura y 50% a la humedad. Con este resultado y el obtenido en la losa apoyada sobre terreno, se confirma que la humedad es un factor importante que afecta el comportamiento de las losas con concreto de contracción compensada.
- Para un mismo espesor de losa, luego de la etapa de curado, la mayoría de los especímenes se contraen en proporciones similares lo cual se aprecia en la forma paralela de las curvas en la etapa de

contracción. Por lo tanto, se puede indicar que la cuantía de refuerzo no es un parámetro relevante en el comportamiento de las losas en el período de contracción.

- Tanto en las losas de 10 y 15 cm de espesor, los especímenes con menor cuantía de refuerzo alcanzaron una mayor expansión y, en consecuencia, una menor contracción neta que los especímenes de mayores cuantías de refuerzo.
- El incremento de la cuantía de refuerzo no fue linealmente proporcional a la expansión alcanzada en la etapa de curado.
- No se observó una diferencia de deformaciones importante entre los especímenes de 10 y 15 cm de igual cuantía de refuerzo: la expansión máxima, la contracción neta y la forma de las curvas son similares. Por lo tanto, se puede indicar que el espesor de la losa no es un factor relevante en el comportamiento del espécimen.
- Los especímenes con mayor cuantía ingresan a la etapa de compresión más temprano que los especímenes de menor cuantía.

Se puede indicar que el comportamiento de los especímenes estudiados en esta investigación fue el esperado, a pesar de no contar con las condiciones estables de temperatura y humedad existentes en un laboratorio. La forma de las historias de deformaciones, las expansiones máximas registradas y las deformaciones netas obtenidas de estos ensayos sustentan las conclusiones mencionadas. En las losas verticales, a pesar de haberse obtenido contracciones netas, no se observaron grietas debido a que las deformaciones registradas no superaron la deformación necesaria para alcanzar el estado agrietado. Además, dichos resultados de deformaciones se compararon con la propuesta del ACI 223 (1998) obteniéndose valores similares.

Finalmente, se recomienda estudiar el efecto de la humedad en los elementos debido a que se ha observado que puede producir variaciones importantes en las deformaciones durante el día.

#### **4.3 RECOMENDACIONES DE DISEÑO**

A partir de la literatura estudiada y de los resultados del programa experimental, se desarrollaron las siguientes recomendaciones de diseño:

1. Las losas de concreto de contracción compensada deben presentar por lo menos una cuantía mínima. El acero de refuerzo en losas comprime al concreto en la etapa de expansión y luego esta compresión se libera en la etapa de secado.
2. Con el empleo del concreto de contracción compensada y el procedimiento de diseño indicado en el ACI 223 se pueden obtener cuantías de refuerzo menores que la mínima recomendada por el ACI 318 por contracción y temperatura.
3. En las losas sobre terreno, donde el secado es más rápido en su superficie, el refuerzo debe ser colocado en la mitad superior de la losa. Preferentemente a un tercio de profundidad, a partir de la parte superior, mientras se permita un adecuado recubrimiento.
4. En losas sobre terreno, independientemente del tipo de concreto a emplear, es importante realizar ensayos de contracción previos al colado empleando materiales de características mecánicas similares al que se empleará en la obra, para conocer la contracción final del

- concreto. Este valor será referente para modificar el diseño de mezcla y obtener finalmente un agrietamiento por contracción minimizado.
5. En elementos de concreto de contracción compensada se recomienda que la expansión requerida en un elemento sea mayor o igual que la contracción anticipada.
  6. La expansión de un elemento de concreto se reduce cuando la cantidad de acero de refuerzo se incrementa. En consecuencia, para alcanzar la contracción compensada el potencial expansivo debe ser mayor en elementos con cuantías mayores. El incremento en la expansión se puede obtener con una mayor proporción de cemento en el diseño de la mezcla.
  7. El refuerzo a emplearse debe ser mallas de alambre soldadas o barras de acero corrugadas que cumplan los requerimientos del ACI 318.
  8. Emplear acero de refuerzo corrugado para desarrollar una adherencia adecuada entre la barra y el concreto.
  9. Se recomienda colar la losa sobre una hoja de polietileno para evitar el intercambio de humedad entre la losa y el terreno.
  10. Si la restricción de la subrasante es menor que la restricción del refuerzo, puede ocurrir el alabeo. Esta condición se desarrolla en losas altamente reforzadas sobre polietileno. Se podrá reducir el alabeo incrementando la fricción de la subrasante, colocando arena en la parte superior del polietileno o colocando el refuerzo en la mitad superior o a un tercio de profundidad.
  11. Adicionalmente al cálculo del espesor y la cuantía de refuerzo de una losa apoyada sobre terreno, en una losa con concreto de contracción compensada se empleará el procedimiento indicado en el ACI 223 con respecto a las deformaciones por expansión y contracción.
  12. Es importante que los materiales empleados en el diseño de mezcla de los primas de control sean los mismos y bajos las mismas condiciones que los que se empleen en el colado de la losa.
  13. Se debe proporcionar juntas de aislamiento para evitar contacto con cualquier elemento adyacente (muros, columnas, cimentaciones, etc.) que impediría la expansión del concreto. Esta restricción podría, según Russell, alcanzar esfuerzos de hasta  $12 \text{ kg/cm}^2$  que pueden dañar la estructura.
  14. Con el uso del concreto de contracción compensada se puede aumentar los tramos de colocación de losas de 6 a 9 m usados en un concreto convencional con CPO. Las losas ubicadas dentro de una estructura o donde los cambios de temperatura son pequeños se pueden colocar áreas de hasta  $1500 \text{ m}^2$  sin juntas de construcción. En áreas donde los cambios de temperatura son más grandes o las losas no son cercadas por una estructura, la colocación de losa se reduce entre  $650$  y  $1100 \text{ m}^2$ .
  15. Los tramos de construcción de la losa se deben colocar, en la manera de lo posible, en forma cuadrada.

16. Las juntas de contracción son cortadas, formadas o colocadas de manera diferente a las otras juntas. Con el concreto de contracción compensada se pueden utilizar juntas de contracción más separadas. Para áreas expuestas se recomienda una separación de juntas máxima de 30 m. Donde el área es protegida de variaciones extremas en temperatura y humedad, se ha usado separación de juntas de 45 a 60 m. Las juntas de contracción se pueden hacer de la misma manera que para el concreto de cemento pórtland. Normalmente, las juntas de contracción son eliminadas con concreto de contracción compensada excepto en áreas de esfuerzos altos.
17. La ubicación y diseño de juntas de expansión para el control de movimiento térmico son similares al uso de concreto convencional. Sin embargo, las juntas para movimientos térmicos serán diseñadas para asegurar que la expansión adecuada pueda tomar lugar durante la fase de expansión.

## APÉNDICE A HISTORIA DE DEFORMACIONES EN LA LOSA SOBRE TERRENO

En este apéndice se muestra la historia de deformaciones registradas en el acero y en el concreto de la losa sobre terreno obtenido según los ejes de medición (figuras A.1 a A.11). Se presentan tres series de tiempo: la primera corresponde a los 7 días iniciales después del colado; la segunda, a los 28 días iniciales; y la tercera, al tiempo total registrado.

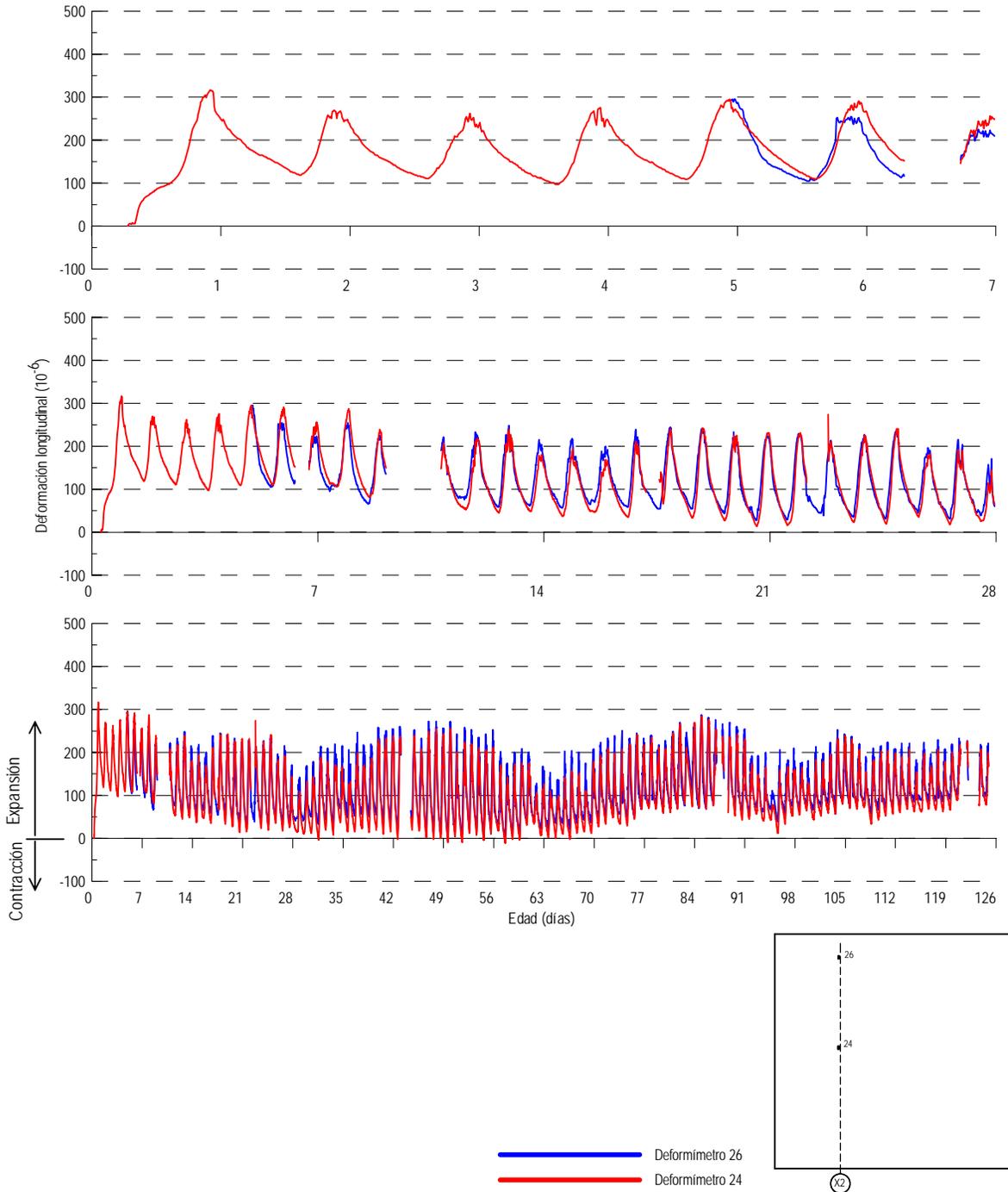
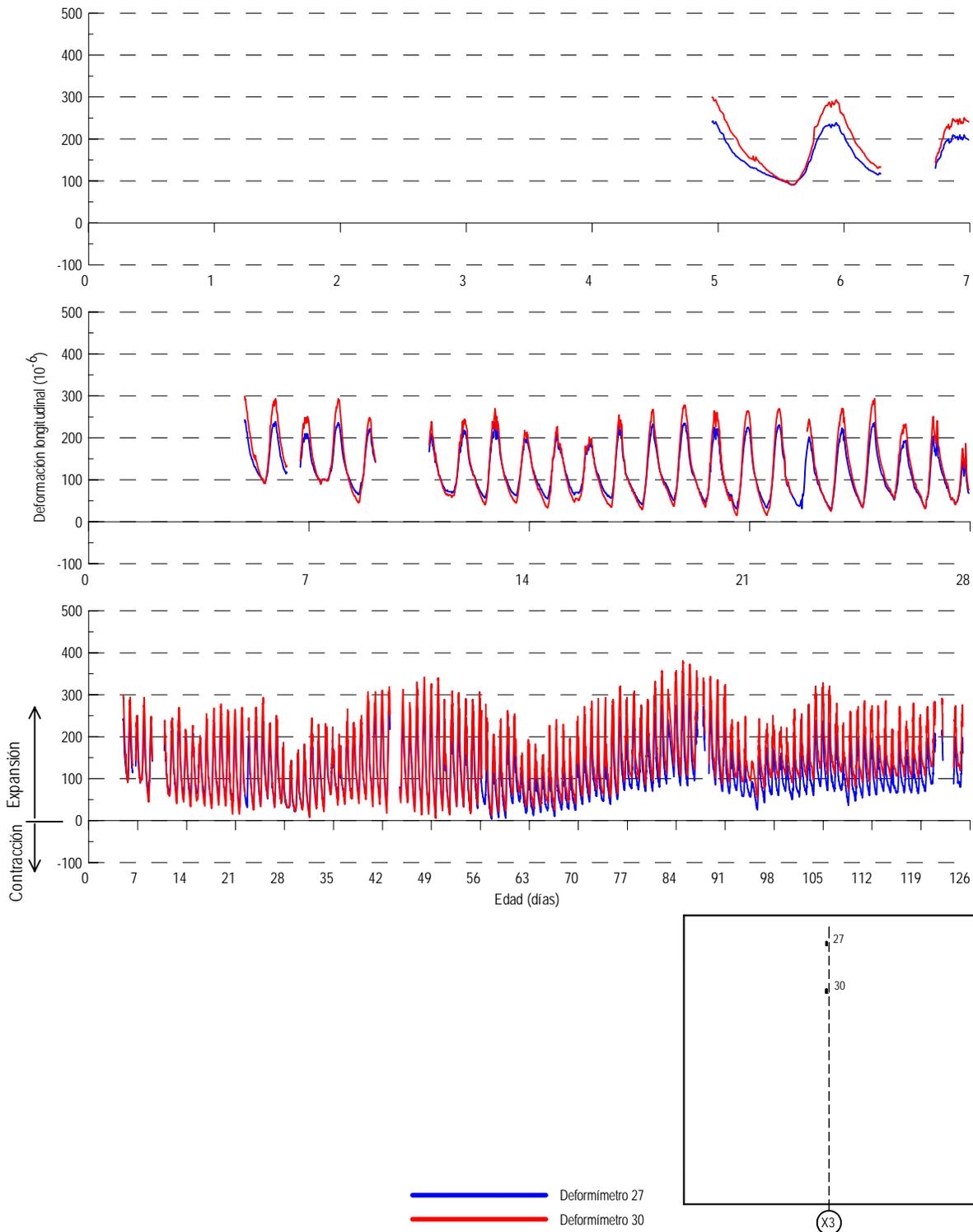


Figura A.1 Historia de deformaciones en el concreto en el eje X2



**Figura A.2 Historia de deformaciones en el concreto en el eje X3**

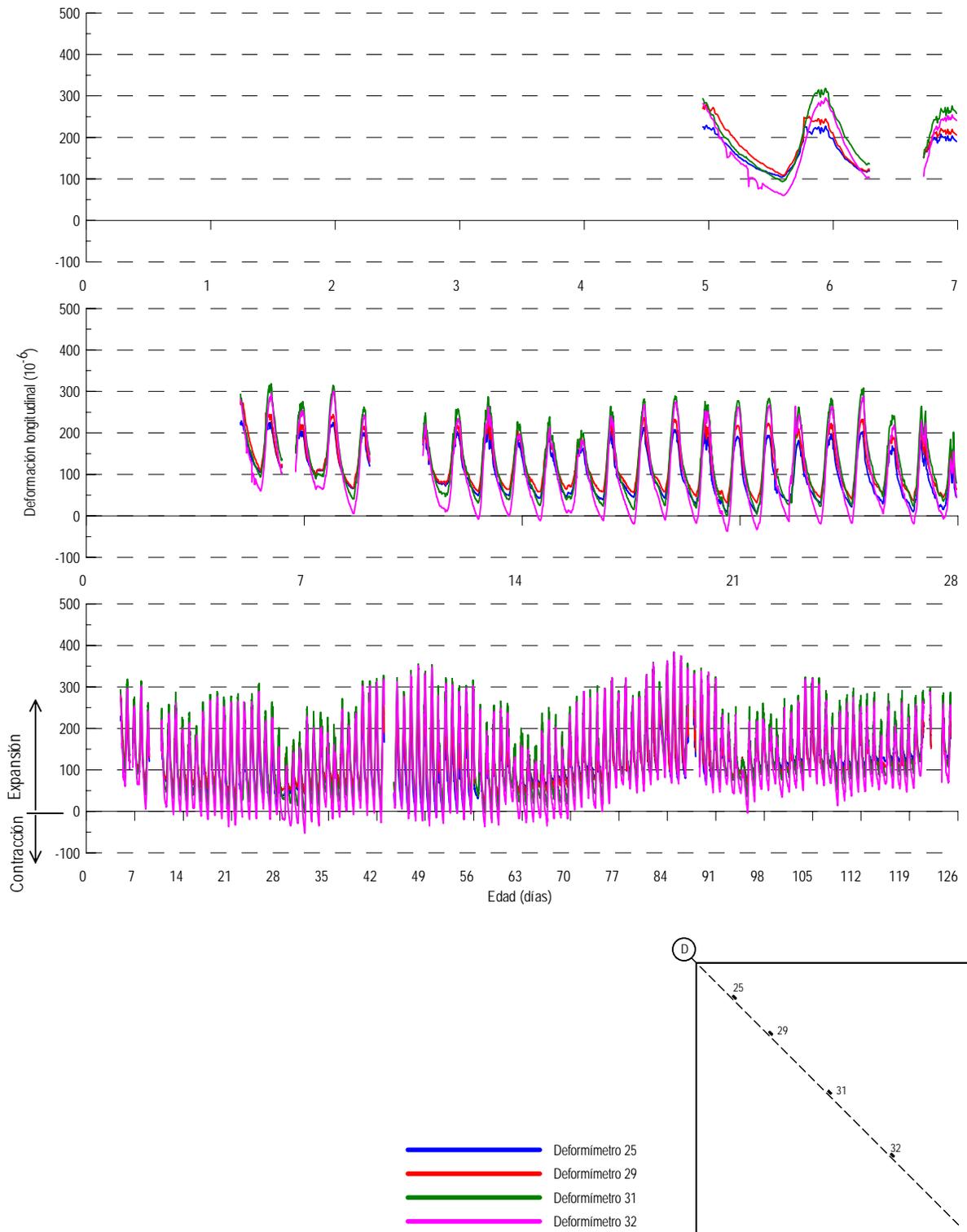
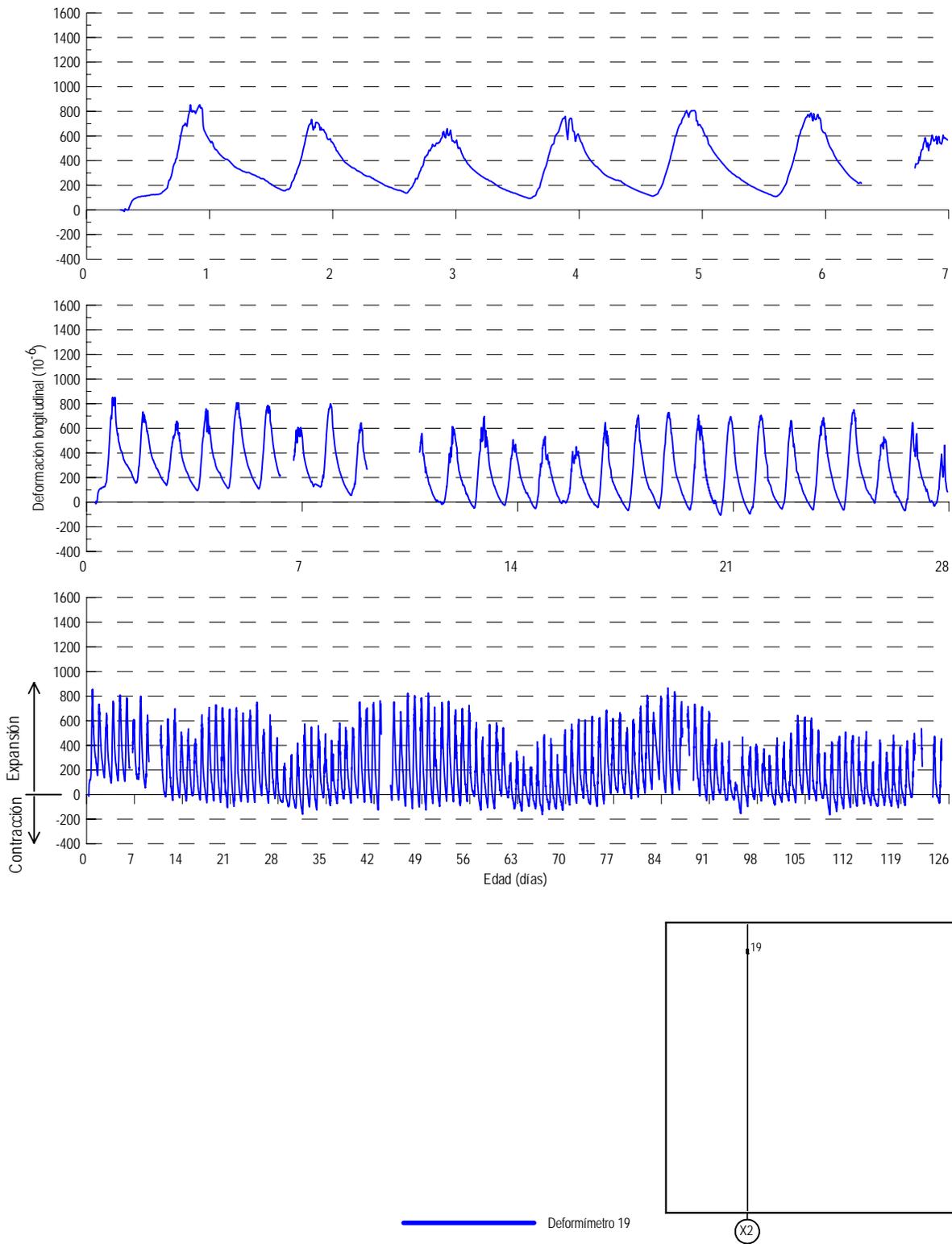


Figura A.3 Historia de deformaciones en el concreto en el eje *D*



**Figura A.4 Historia de deformaciones en el acero en el eje X2**

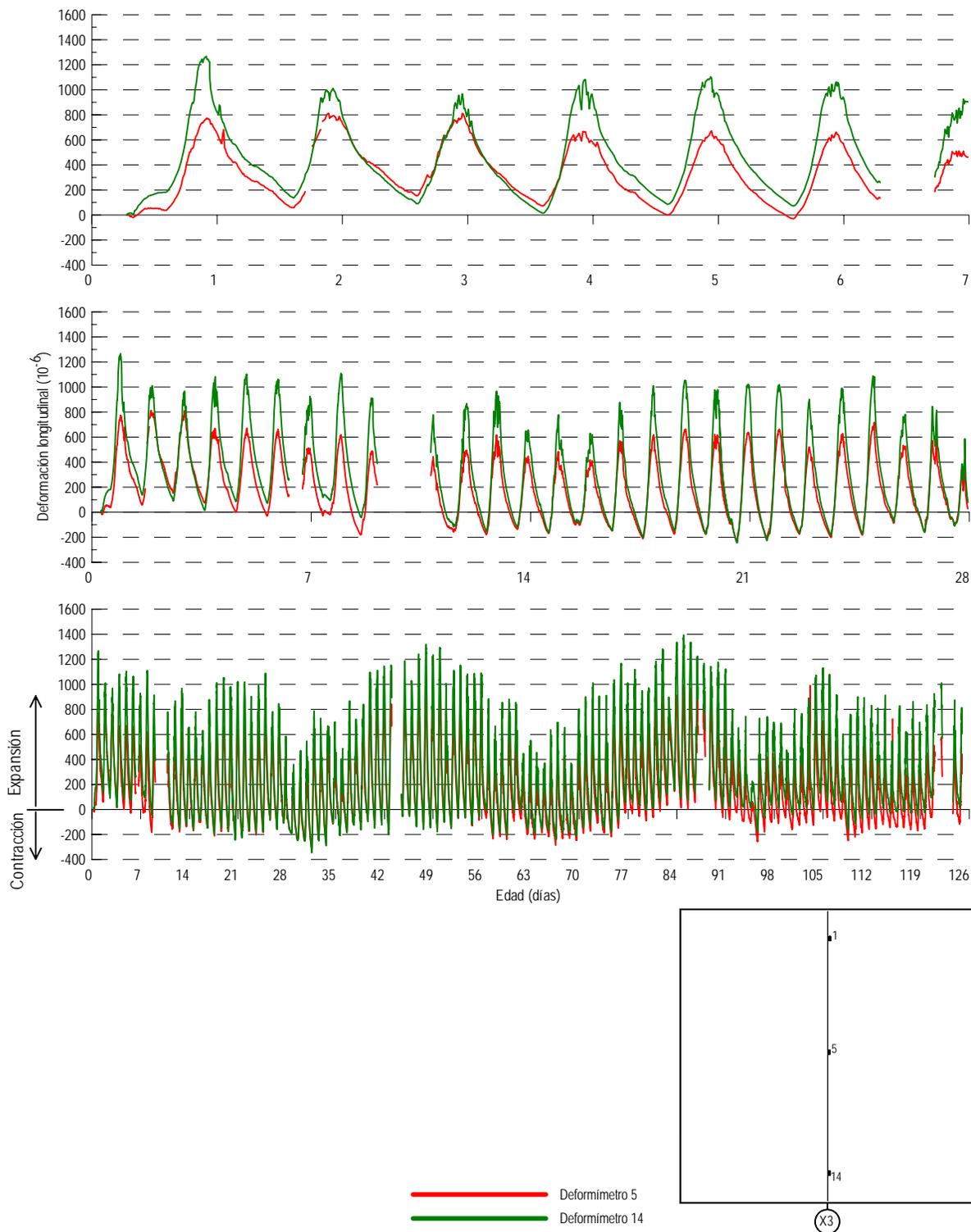
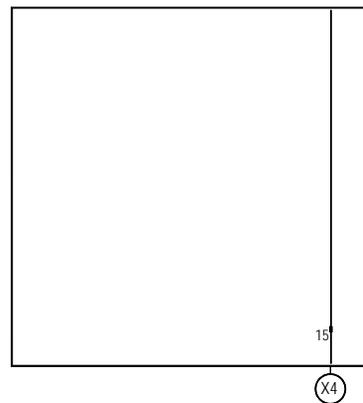
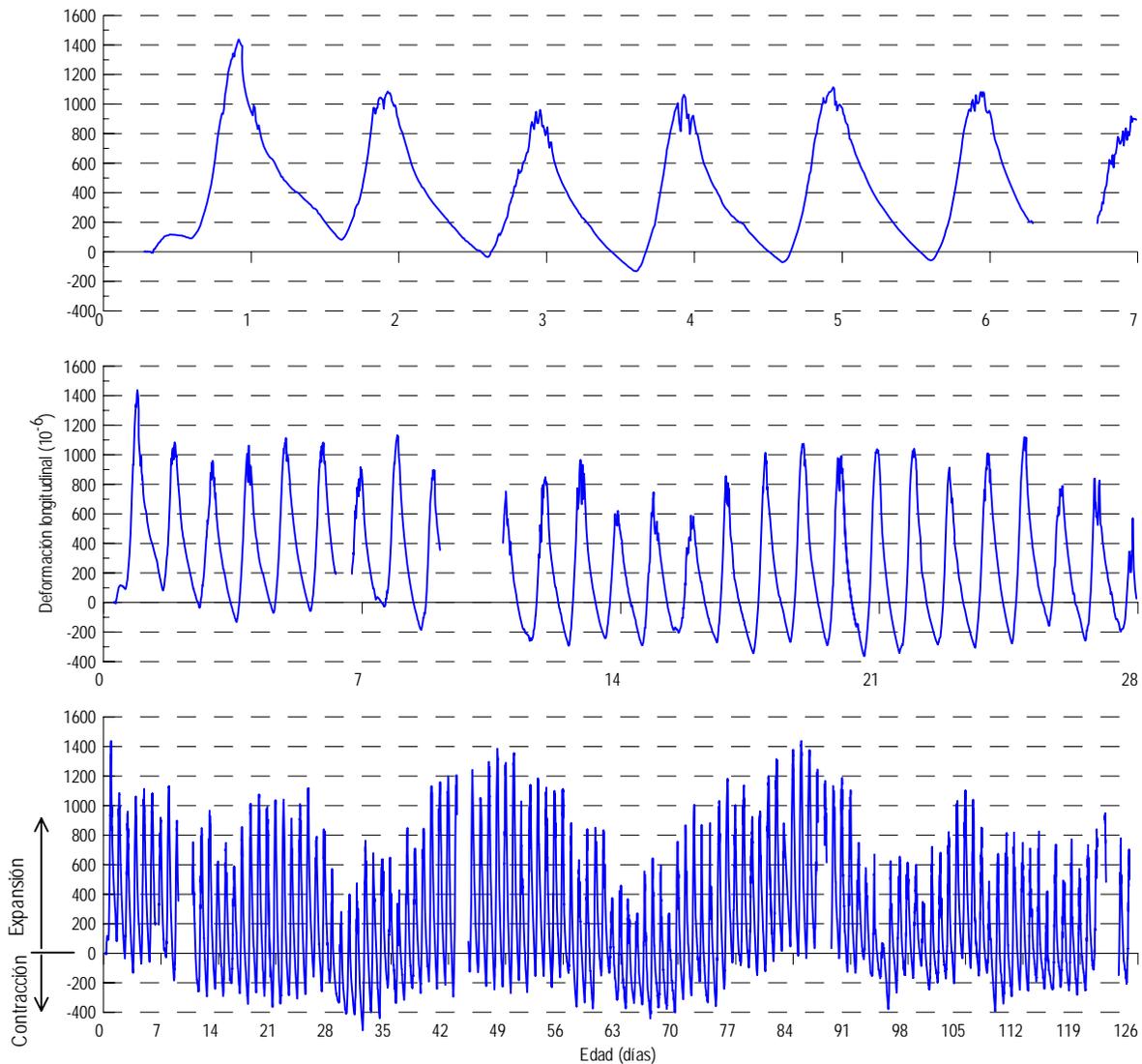


Figura A.5 Historia de deformaciones en el acero en el eje X3



Deformímetro 15

**Figura A.6 Historia de deformaciones en el acero en el eje X4**

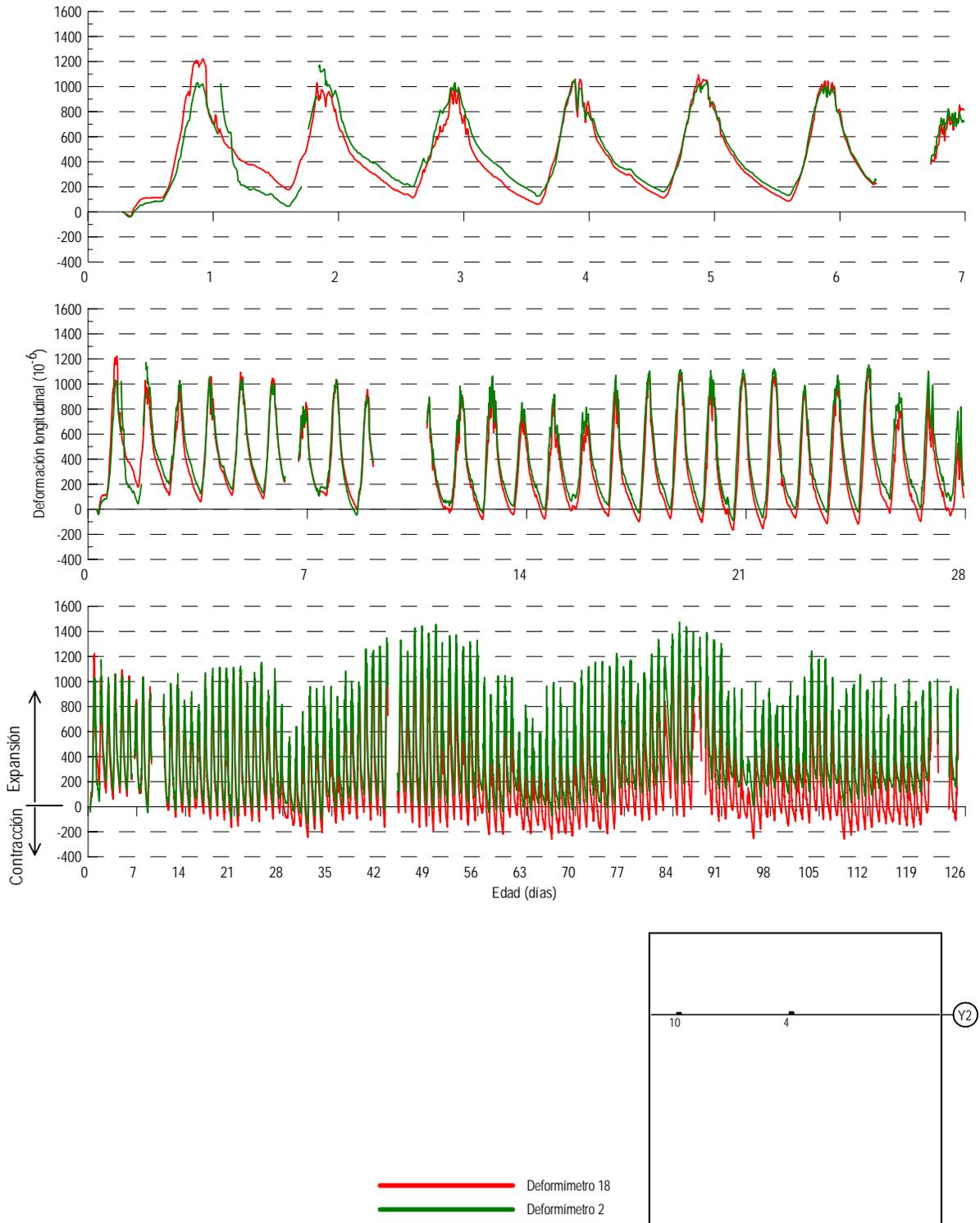


Figura A.7 Historia de deformaciones en el acero en el eje Y2

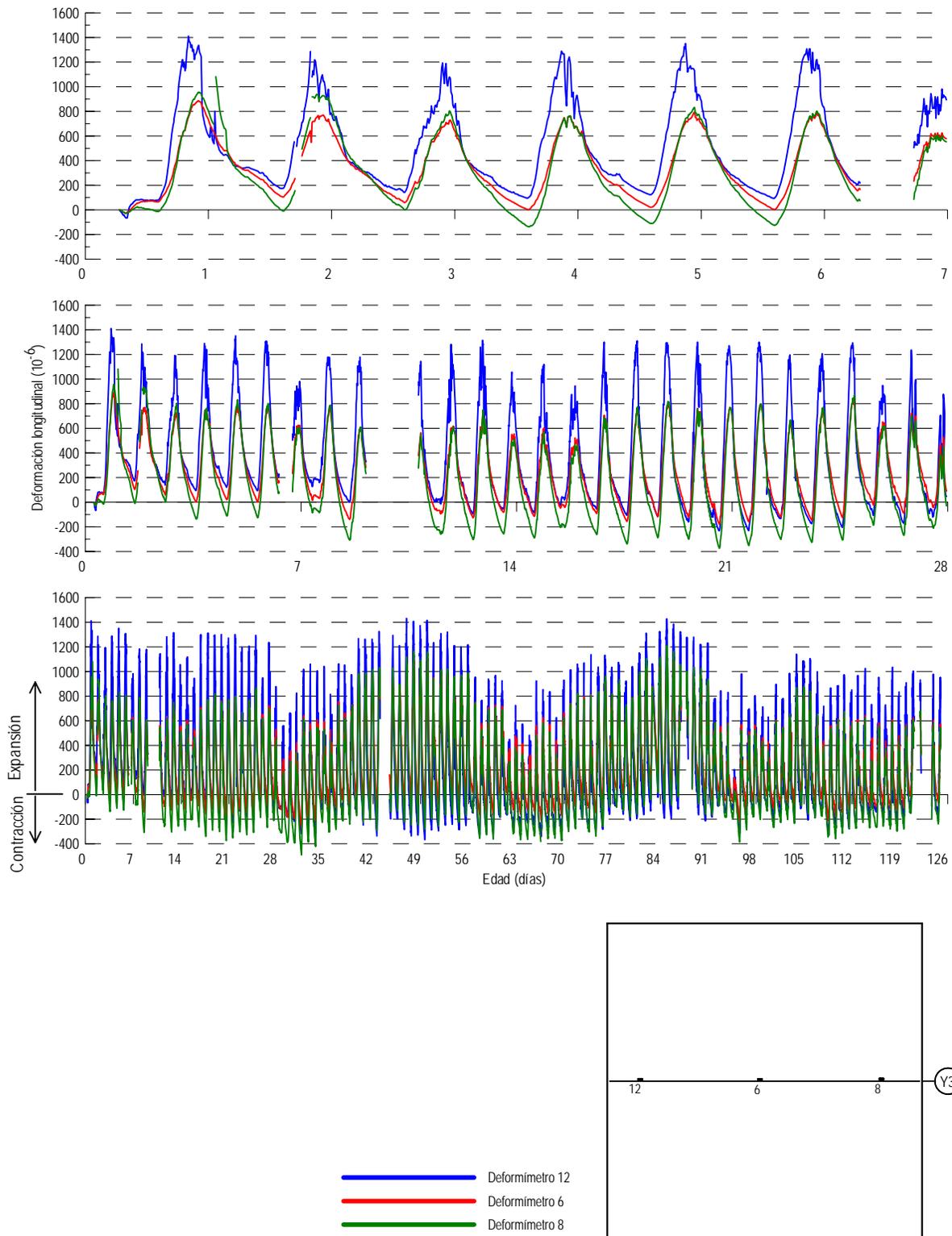


Figura A.8 Historia de deformaciones en el acero en el eje Y3

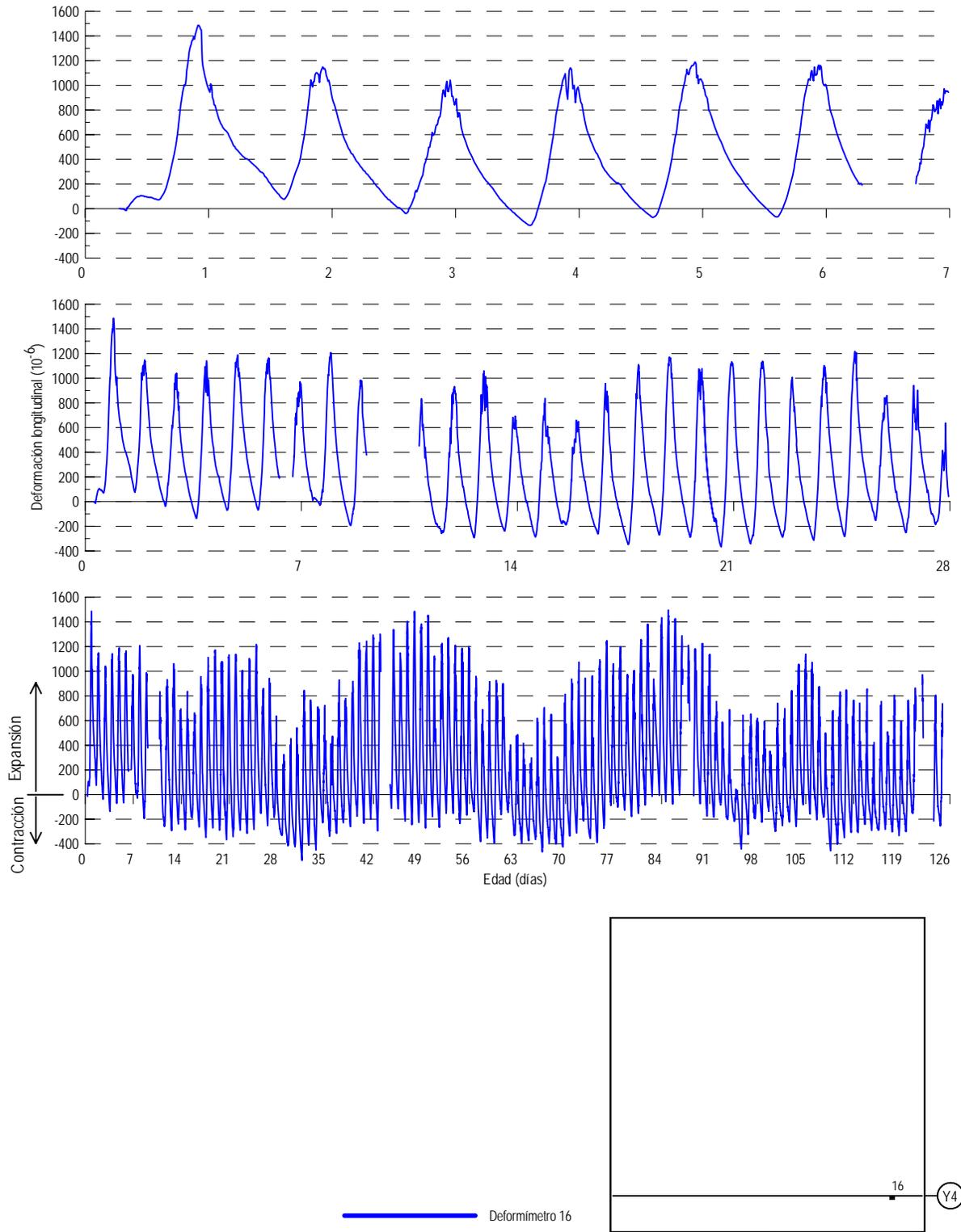
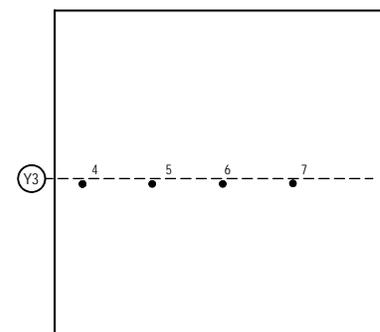
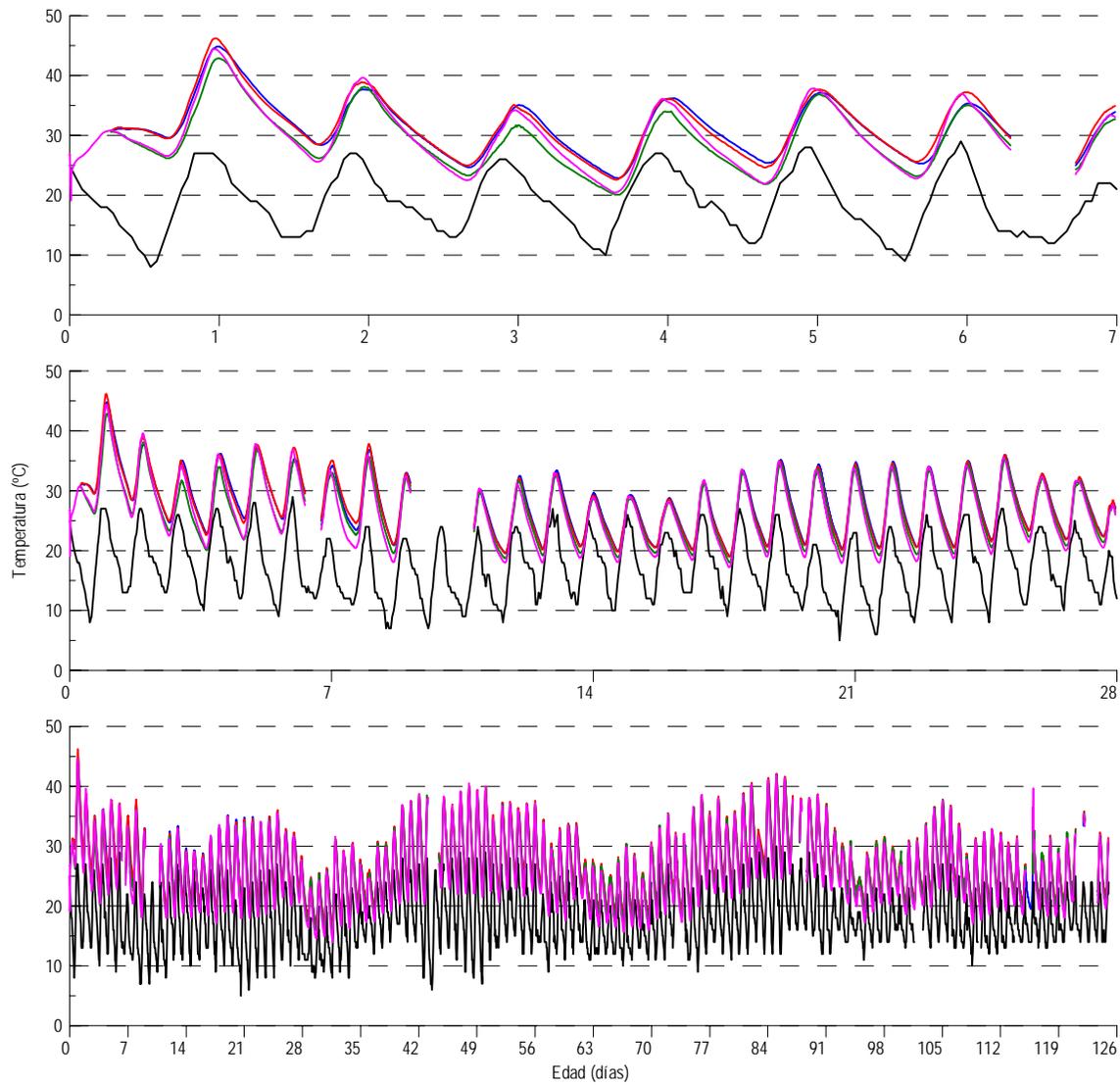


Figura A.9 Historia de deformaciones en el acero en el eje Y4



**Figura A.10 Historia de temperaturas en el eje Y3**

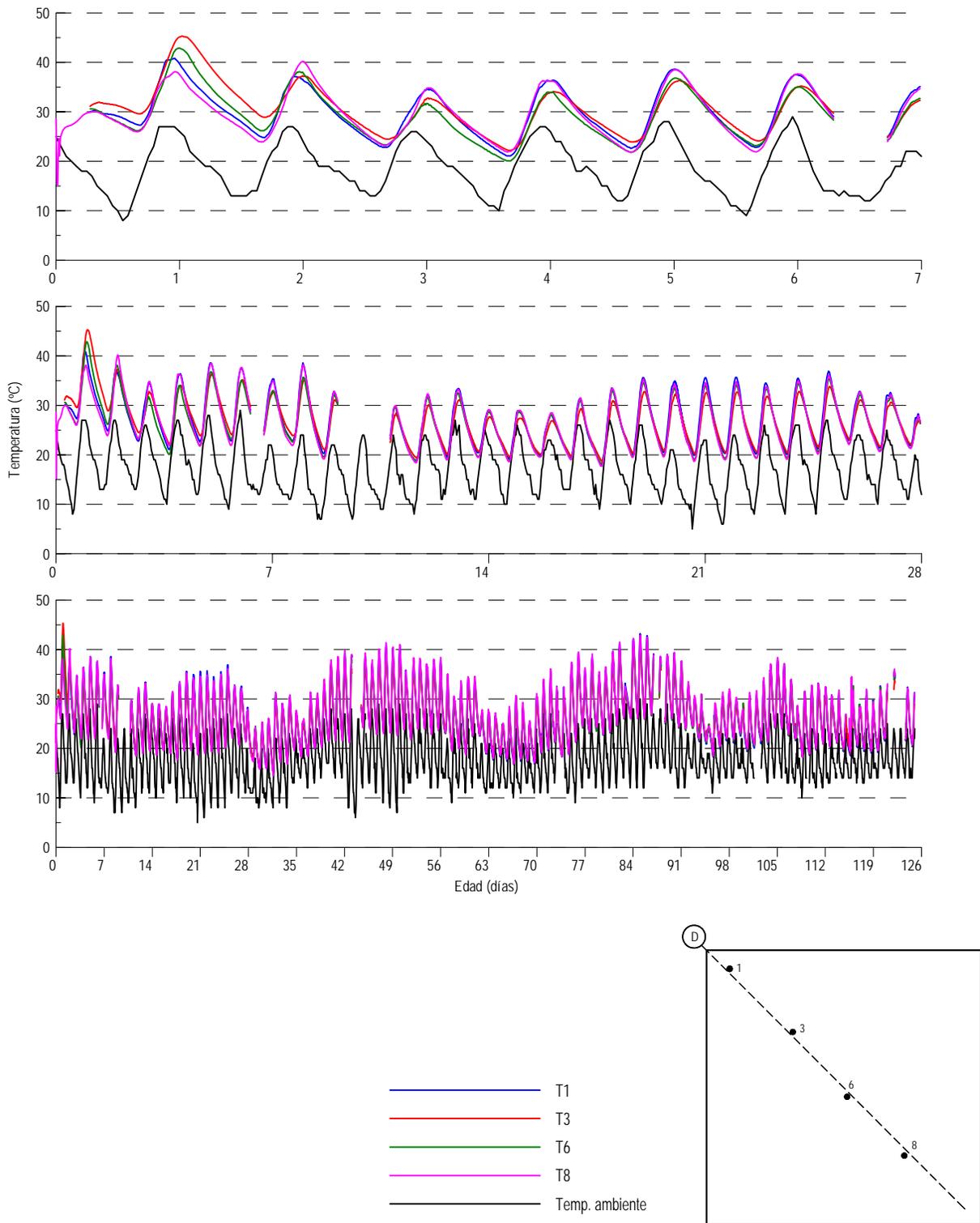
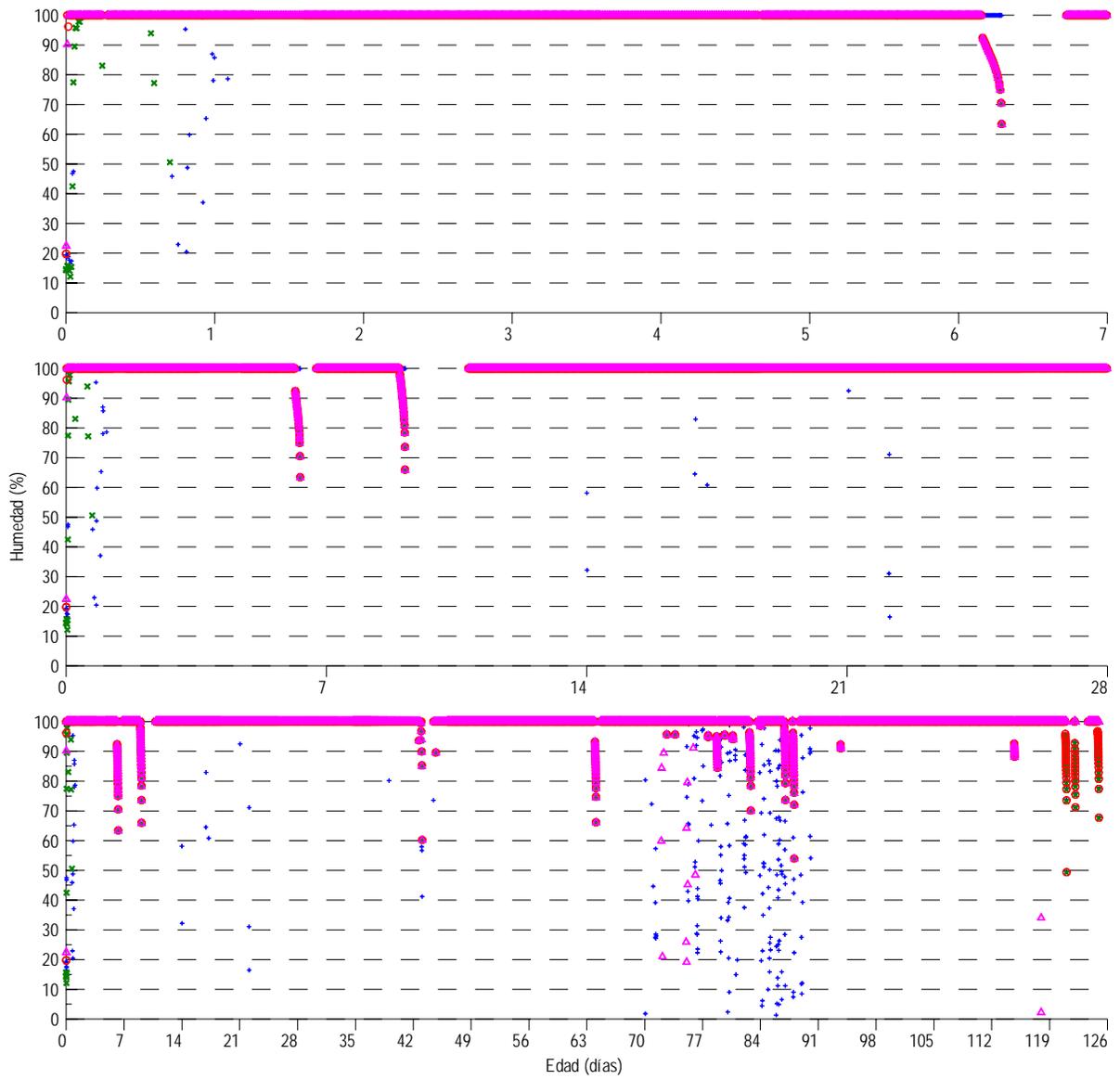


Figura A.11 Historia de temperaturas en el eje D



- + H4
- × H5
- H6
- △ H7

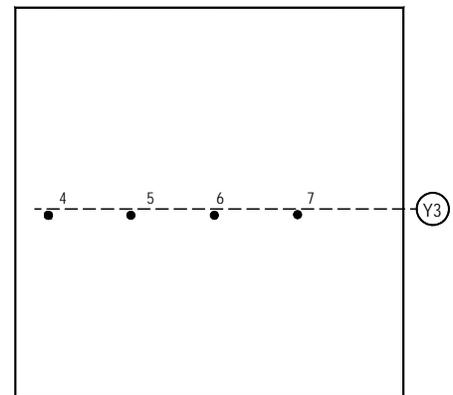


Figura A.12 Historia de humedad en el eje Y3

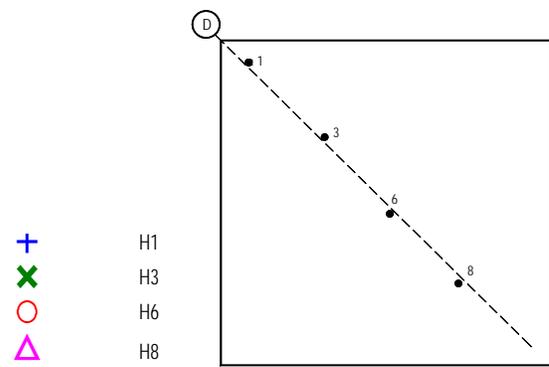
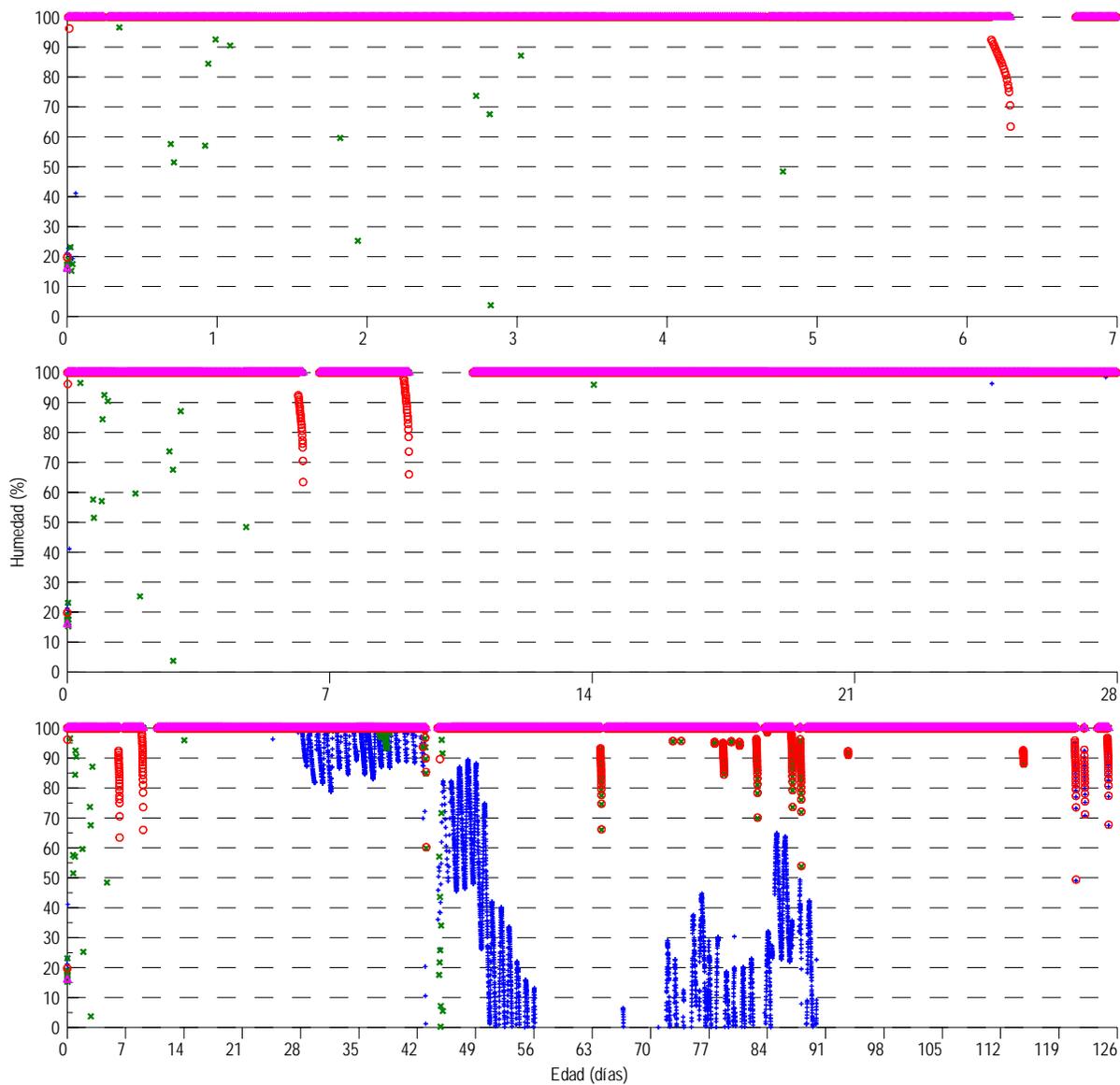


Figura A.13 Historia de humedad en el eje D

## REFERENCIAS

- ASTM C 806, (1987), "Standard Test Method for Restrained Expansion of Expansive Cement Mortar", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 4 pp.
- ASTM C 845, (1990), "Standard Specification for Expansive Hydraulic Cement", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 3 pp.
- ASTM C 878, (1995), "Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 4 pp.
- Cemex 2004, Etapa experimental de losas de concreto de contracción compensada, Publicación interna.
- Comité ACI 223, (1998), "Standard Practice for the Use of Shrinkage Compensating Concrete", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 28 pp.
- Comité ACI 302, (1996), "Guide for Concrete Floor and Slab Construction", Farmington Hills, MI, 67 pp.
- Comité ACI 360R, (1992), "Design of Slabs on Grade", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 57 pp.
- Epps J. A. y Polivka M., (1971), "Effect of Aggregate Type on the Properties of Shrinkage-Compensating Concrete", Highway Research Record, No 307, pp 82-90.
- Keeton, J. R. (1979), "Shrinkage-Compensating Cement for Airport Pavement: Phase 2," Technical Note No. Tn-1561 (FAA-RD-79-11), Civil Engineering Laboratory, Naval Construction Battalion Center, Port Hueneme, 39 pp.
- Klieger P. y Greening N. R., (1969), "Properties of Expansive Cements Concretes", Proceedings, Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement (Tokyo), Cement Association of Japan, Tokyo, pp 439-456.
- Mehta P. K. y Monteiro P., (1993), "Concrete, Structure, Properties, and Materials", Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., Cap 6 y Cap 11.
- Polivka M. y Willson C., (1973), "Properties of Shrinkage-Compensating Concrete", Klein Symposium on Expansive Cement Concretes, SP-38, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, pp. 227-237.
- Portland Cement Association (2002), "Design and Control of Concrete Mixtures", 14th Ed., Skokie, Ill.
- Russell H. G., (1973), "Design of Shrinkage-Compensating Concrete Slabs", Klein Symposium on Expansive Cement Concretes, SP-38, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, pp 193-226.
- Russell H. G., (1980), "Performance of Shrinkage-Compensating Concrete Slabs", Cedric Wilson Symposium on Expansive Cement, SP-64, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, pp 81-114.

Williams Joe V., "Recommendations For Use Of Shrinkage – Compensating Concrete In Sanitary Structures," Concrete International, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, April 1981, pp. 57-61.

Westergaard H. M. (1923). "On the Design of Slabs on Elastic Foundation with Special Reference to Stresses in Concrete Pavements". En: Comité ACI 360R-92, "Design of Slabs on Grade", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 57 pp.

Westergaard H. M. (1925). "Theory of Stresses in Road Slabs". En: Comité ACI 360R-92, "Design of Slabs on Grade", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 57 pp.

Westergaard H. M. (1926). "Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis". En: Comité ACI 360R-92, "Design of Slabs on Grade", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 57 pp.

Ytterberg Robert F., "Shrinkage and Curling of Slabs on Grade, Part I – Drying Shrinkage, Part II – Warping and Curling, and Part III – Additional Suggestions," Concrete International, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, April 1987, pp. 22-31; May 1987, pp. 54-61; y June 1987, pp. 72-81.