

---

---

## **CAPÍTULO 5.**

### **INSTRUMENTACIÓN DE UNA ESTRUCTURA CON GEOMETRÍA ESPECIAL.**

En la actualidad, existe una gran diversidad de construcciones con características poco usuales, que brindan soluciones a problemas genéricos. Un ejemplo de ello, son los puentes. Existen desde el inicio de las civilizaciones y los métodos constructivos que se emplean en su elaboración son una referencia de la evolución del pensamiento humano a través del tiempo. Mantenerlos en funcionamiento es un gran reto que hoy en día puede superarse fácilmente mediante el uso de las herramientas adecuadas.

#### **5.1 El caso de un puente con trayectoria curva.**

El puente San Cristóbal representa una obra de infraestructura con una geometría poco común, la cual describe una curva horizontal que libra una barranca de 200 metros de profundidad con una curvatura de  $2^{\circ} 45'$  y una inclinación longitudinal y transversal de 10% y 15% respectivamente (Monitor 2008).



Figura 5.1: Puente San Cristóbal, tres semanas antes de la apertura (Monitor, 2008)

La construcción del puente San Cristóbal fue el último obstáculo para terminar la autopista de cuota Tuxtla Gutiérrez - San Cristóbal de las Casas, de 59 km de longitud. Este tramo carretero beneficia directamente a los Municipios de Tuxtla Gutiérrez, Chiapa de Corzo, Zinacatlán y San Cristóbal de las Casas debido al impulso de actividades económicas tales como la ganadera, agricultura, el turismo y la industria en esta zona (SCT 2006).

##### **5.1.1 Descripción de la superestructura.**

La superestructura consiste en una caja continua compuesta de acero ortotrópico de grado 50, de altura constante, que contiene de tres claros: uno central de 178 metros y dos laterales de 73 metros, con una longitud total de 324 metros y un peso estimado en 2500 toneladas (figura 5.2). El sistema constructivo utilizado para su fabricación fue el método de lanzamiento incrementado desde ambos lados del barranco. La mitad de la superestructura fue lanzada cuesta arriba y la

otra mitad, cuesta abajo. Cada cantiléver consta de 14 segmentos de acero: los primeros cinco son ortotrópicos, o bien, una combinación de acero y concreto (figura 5.3 a), mientras que los segmentos restantes constan de una losa de concreto postensado de 30 cm de espesor, formando una sección compuesta con pernos de corte que unen la interfaz entre las bridas superior de la viga de cajón abierto y la losa de concreto (figura 5.3 b).

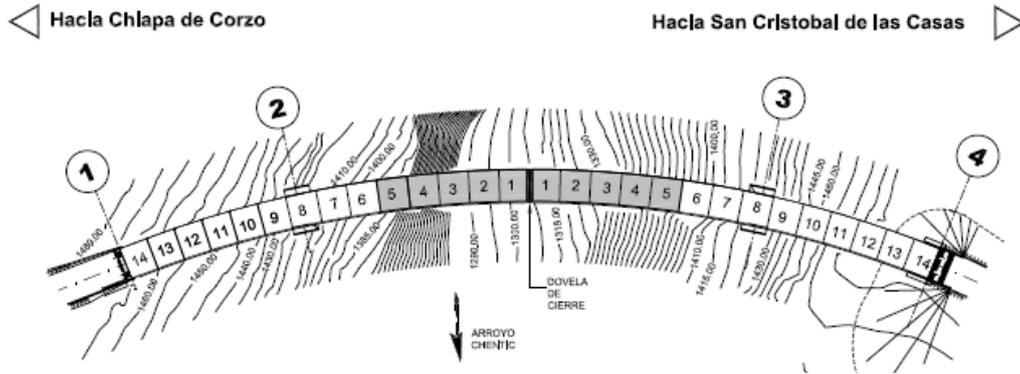


Figura 5.2: Vista en planta del puente San Cristóbal.

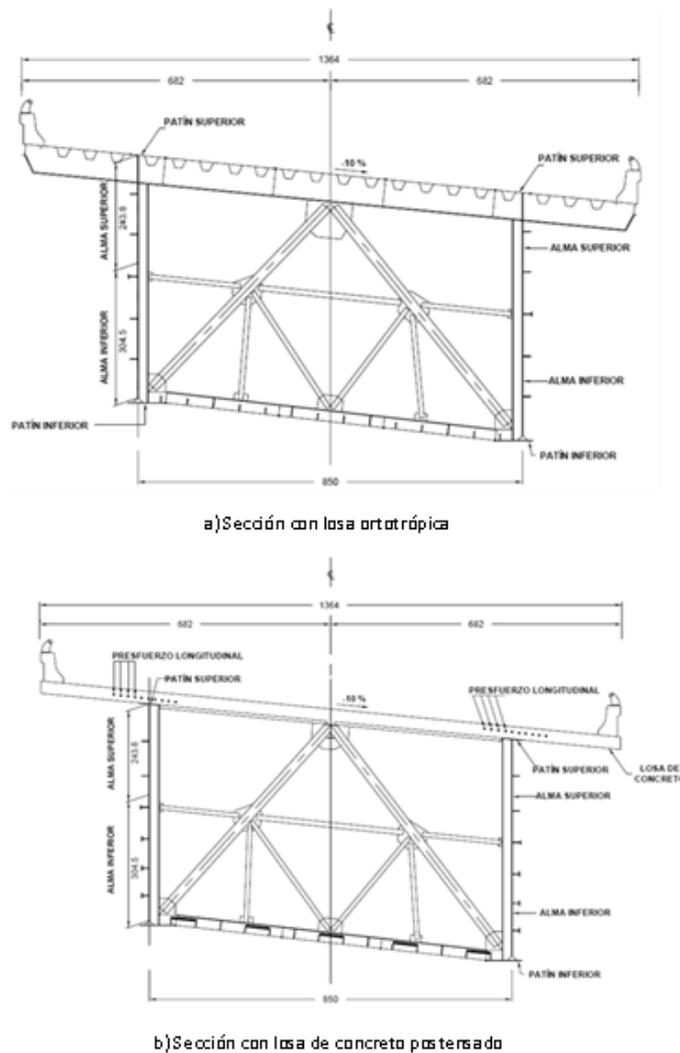


Figura 5.3: Secciones transversales de la superestructura del puente San Cristóbal.

Además, en el interior de cada dovela se cuenta con 19 piezas aproximadamente, las cuales brindan rigidez adicional a la estructura. En la figura 5.4 se pueden observar los diferentes elementos que conforman una dovela tipo, la única diferencia es el número de marcos transversales que las conforman, ya que las dovelas 8 y 14 de ambos márgenes cuentan con 5 marcos transversales (Bennetts, 2008).

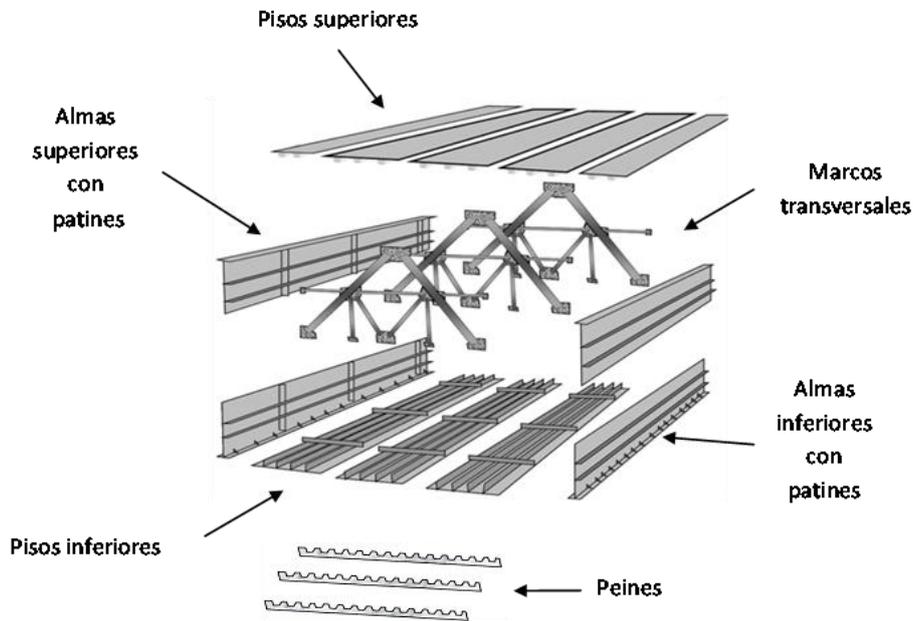


Figura 5.4 Componentes de una dovela tipo (Bennetts, 2008)

El acero que se utiliza para la fabricación de los marcos es ASTM A-709 grado 36. Las uniones de todos los elementos metálicos se hicieron por medio de soldadura de diversos tipos: SAW, SMAW y FCAW. El peso aproximado por dovela es de alrededor de 60 ton, sin contar con las obras complementarias como losa de calzada y parapeto. El ancho de la calzada abarca 13.6 m, en la cual se alojaron dos carriles de 3.65 m, dos acotamientos de 2.50 m y dos guarniciones laterales de 55 cm, por lo cual, el peso total de la superestructura se estima aproximadamente en 1,720 ton (SCT 2006).

### 5.1.2 Descripción de la subestructura.

La subestructura está conformada por 2 estribos y 2 pilas. El primer apoyo es el estribo 1 ubicado en la margen derecha del puente, el segundo apoyo es la pila número 2, misma que también está en la margen de derecha. En la margen izquierda y continuando con el tercer apoyo se encuentra la pila número 3 y para finalizar, el cuarto apoyo lo conforma el estribo 4 (Bennetts, 2008). La figura 5.5 muestra la ubicación de los elementos que conforman la subestructura.

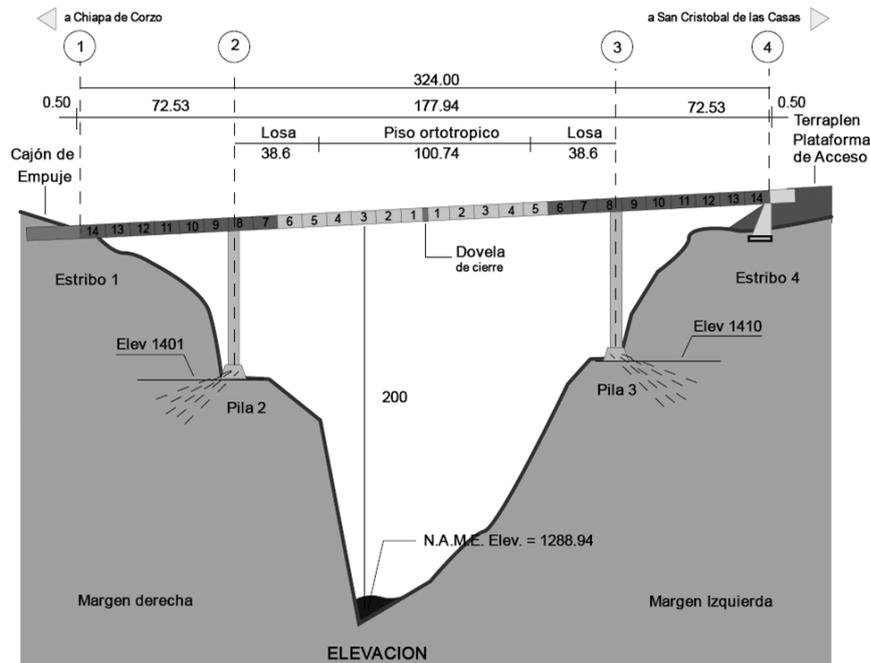


Figura 5.5: Vista en elevación del Puente San Cristóbal.

## 5.2 Monitoreo estructural.

Durante la construcción, la mitad de la superestructura del puente colapso. Lo cual ocurrió después de que las actividades de lanzamiento fueron terminadas, justo antes de colocar la dovela de cierre de 2 m de longitud, en el centro del puente (figura 5.6). Para la reconstrucción de la mitad de la superestructura que colapso, se propuso la instalación de un sistema de monitoreo, el cual comprendió ambos extremos del puente.



Figura 5.6: Colapso de la mitad del puente San Cristóbal (Notimex, 2004)

Los datos obtenidos abarcaron el proceso de lanzamiento de las nuevas dovelas, por lo cual las capturas se efectuaban cada vez que este era llevado a cabo. Al culminar el proceso de lanzamiento, los registros se realizaron diariamente y en forma aleatoria a partir del 10 de mayo de 2006 (fecha de colocación de la dovela central).

A finales del mes de marzo de 2007 las capturas se realizaron hora por hora y se implementaron dos horarios de captura, uno a las 8:00 y el otro a las 20:00 hrs. Esto con base en la disponibilidad de tiempo del personal que realiza las mediciones y con la finalidad de obtener datos libres de lecturas erróneas, ya que algunos instrumentos presentaban algunas anomalías en su funcionamiento durante el transcurso del día.

### 5.2.1 Descripción de la instrumentación.

La instrumentación implementada para monitorear la respuesta de la estructura asociada a esfuerzos, desplazamientos y temperatura, comprende 36 deformímetros con resistencia de  $\pm 350$  Ohms (marca Vishay), 6 inclinómetros bidireccionales (marca Applied Geomechanics) y 98 cuerdas vibrantes (marca Geokon, modelo 4000) que a su vez cuentan con transductores de temperatura. Las siguientes figuras muestran la presentación física de los dispositivos mencionados.

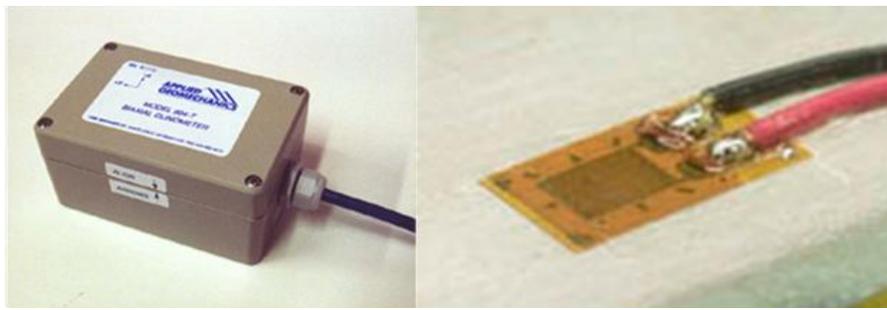


Figura 5.7: De izquierda a derecha, inclinómetro bidireccional (Applied Geomechanics) y deformímetro (Vishay)



Figura 5.8: Cuerda vibrante (Geokon)

Los deformímetros fueron distribuidos a lo largo de la superestructura del puente y orientados en la dirección longitudinal (L), en las dovelas DC, D4, D8 y D11 de ambos márgenes (figura 5.9), para medir deformaciones de manera conjunta con las cuerdas vibrantes durante la elaboración de pruebas de carga vehicular, ya que estas no son aptas para realizar mediciones en condiciones dinámicas.

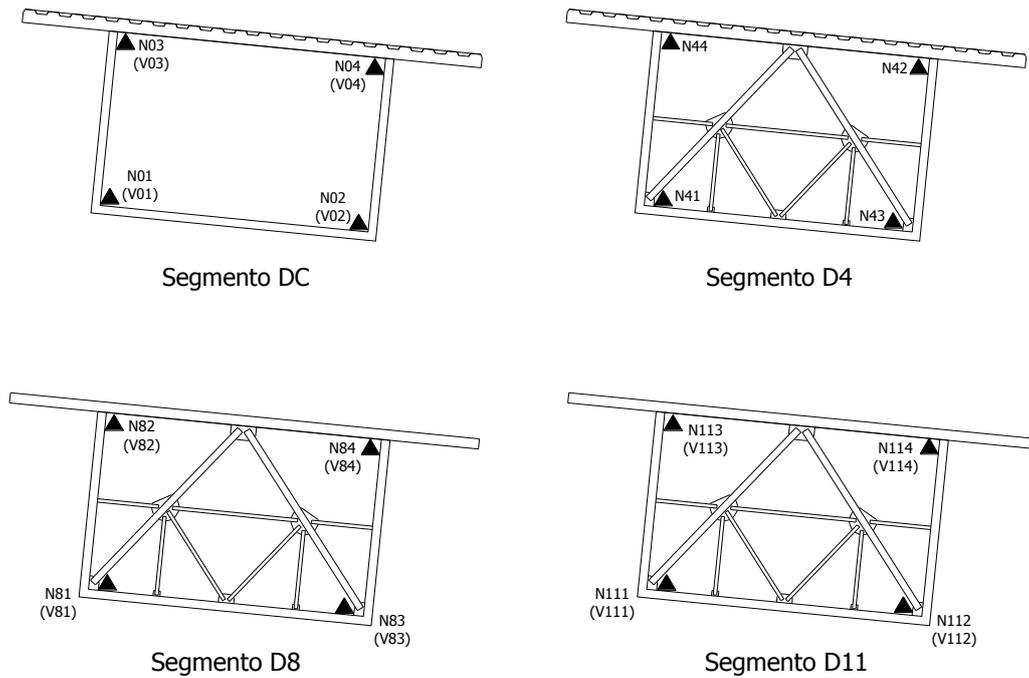


Figura 5.9: Secciones instrumentadas con deformímetros

Los inclinómetros bidireccionales se instalaron en el lecho superior de los segmentos D1, D6 y D8 en ambos lados del puente (figura 5.10), con el objetivo de medir los giros en las direcciones longitudinal y transversal (L y T) del claro central. Y vigilar que las deflexiones no excedan los límites permisibles durante el proceso de lanzamiento de las dovelas.

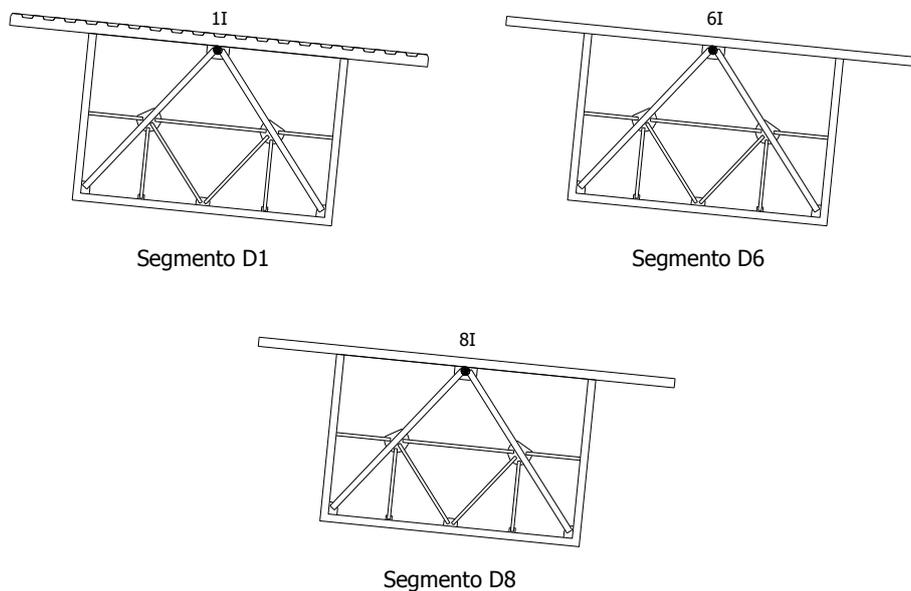


Figura 5.10: Distribución de los inclinómetros bidireccionales

Las cuerdas vibrantes abarcaron la dirección longitudinal (L) de los segmentos D8 y D4 de ambos extremos y el segmento de cierre DC del claro central durante la etapa de reconstrucción, debido a que se determinó que en estos puntos se presentaban las magnitudes de esfuerzo más significativas con base en el análisis del modelo de elementos finitos del puente. Esto incluyó la

colocación de cuerdas vibrantes en la zona de transición de los segmentos D5 y D6 (cambio de piso ortotrópico a losa de concreto) de ambos márgenes, para conocer los desplazamientos relativos en esta zona (Bennetts, 2008).

Posteriormente se instrumentaron los claros adyacentes al claro central para la realización de pruebas de carga tanto dinámicas como estáticas, lo cual implicó que se añadieran más sensores en las dovelas D8 y en los segmentos D11. De esta forma, quedó conformando el sistema de monitoreo permanente del puente, el cual estuvo operando hasta finales del mes de marzo de 2009. La siguiente figura muestra la distribución esquemática de las cuerdas vibrantes en las secciones transversales del puente.

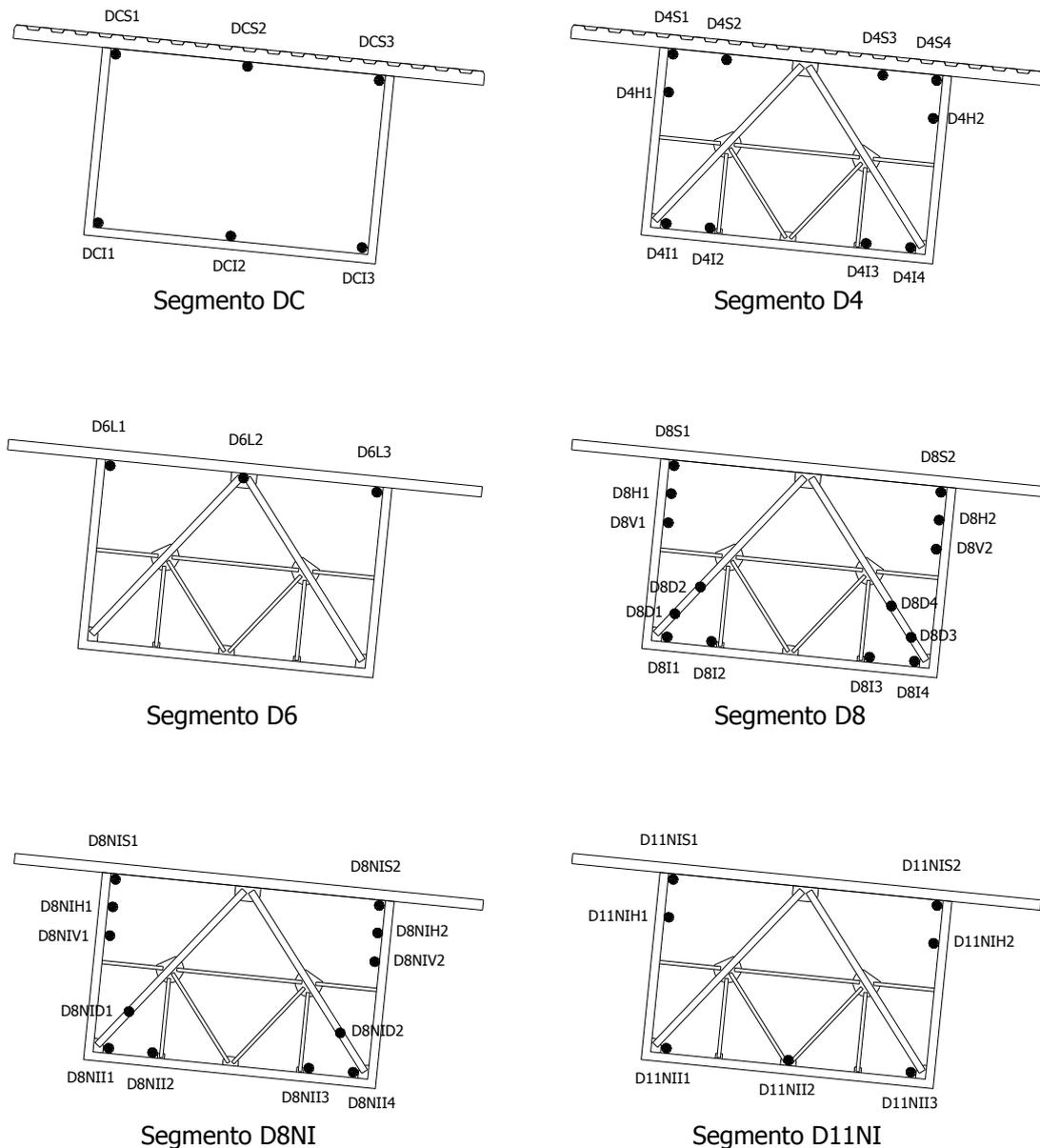


Figura 5.11: Secciones instrumentadas con cuerdas vibrantes

### 5.2.2 Sistema de adquisición de datos.

Para la extracción de la información proveniente de los sensores, el sistema de monitoreo cuenta con 8 multiplexores marca Geokon, modelo MUX 8032 y 2 registradores. El primero es el modelo 8020 (Micro 10, Geokon), mientras que el segundo es un sistema ensamblado Compact Field Point (National Instruments). La siguiente figura muestra los dispositivos mencionados:



Figura 5.12: De izquierda a derecha, multiplexor modelo MUX 8032, registrador 8020 Micro 10 (ambos, marca Geokon) y sistema Field Point (National Instruments)

Cada multiplexor tiene una capacidad de 16 canales y se encarga de recibir las señales de las cuerdas vibrantes que se le son asignadas. De esta forma, la información canalizada por los Multiplexores, es recibida por el registrador Micro 10. La tabla 5.1 muestra la cantidad de sensores conectados a cada multiplexor.

Lado	Dovela	Multiplexor	Cuerdas v.
Tuxtla Gutiérrez	D11NI	M1	7
	D8NI	M2	12
	D8	M3	14
	D6	M2	3
	D4	M4	10
	DC	M4	6
San Cristóbal	D4	M5	10
	D6	M5	3
	D8	M7	14
	D8NI	M6	12
	D11NI	M8	7

Tabla 5.1: Número de unidades manejadas por cada multiplexor (Rodríguez, 2008)

Por otro lado, el sistema Field Point tiene instalados 16 canales para medir voltaje y 16 canales para medir deformación. De los cuales, se emplearon 12 canales de voltaje para los inclinómetros, ya que cada uno cuenta con un sensor de temperatura adicional. Mientras tanto, de los 36 deformímetros instalados en el puente, sólo se utilizaron 16 para el monitoreo permanente de la estructura (4 en la dovela de cierre, 2 en las dovelas D4 de ambos márgenes y 4 en cada dovela D8). La conexión de estos dispositivos con el registrador, se realizó en forma directa, por lo cual, no hubo la necesidad de utilizar multiplexores. La ubicación de los elementos que conforman el sistema de captura se muestra a continuación:

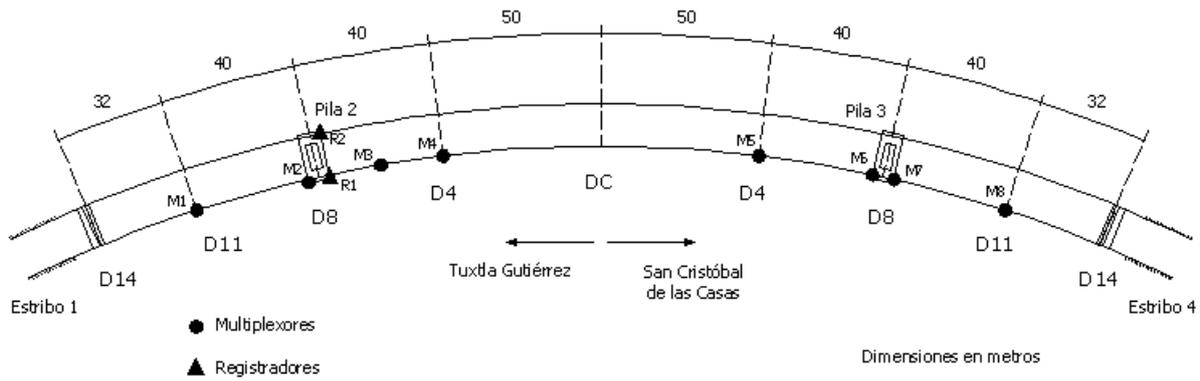


Figura 5.13: Ubicación de los componentes del sistema de captura permanente.

Tanto el registrador Micro 10 (R1), como el sistema Field Point (R2), se encargaron de capturar los valores de microdeformación unitaria, inclinación y temperatura a cada hora. Como se mencionó en la sección 5.2, se establecieron horarios de captura adicionales, a las 8:00 y a las 20:00 horas. Al principio, las mediciones fueron realizadas en forma manual con un registrador portátil modelo GK-403 marca Geokon y posteriormente en forma automática a través del registrador Micro 10.

### 5.2.3 Gestión de datos.

A continuación se explicará la forma en que se obtienen y procesan los datos descargados del registrador que manipula las cuerdas vibrantes. En este caso sólo se procesarán los valores de microdeformación obtenidos a las 8:00 y 20:00 hrs.

#### 5.2.3.1 Procesamiento de los datos.

En la sección 2.3.2.6 se dieron a conocer los principios del funcionamiento de las cuerdas vibrantes. Particularmente, algunos aspectos relativos al modelo 4000 de Geokon. Por lo tanto, para calcular la deformación unitaria, se empleará la ecuación 2.26, entonces:

$$\varepsilon = (4.0623 \times 10^{-3})f^2 \quad Ec. 5.1$$

Tomando en cuenta que el registrador empleado es el modelo GK-403. La información que despliega, es el periodo de vibración de la cuerda multiplicado por un factor de  $1 \times 10^6$ . Entonces la relación entre el periodo y la frecuencia es:

$$f = \frac{1 \times 10^6}{T} \quad Ec. 5.2$$

Al sustituir la ecuación 5.2 en la ecuación 5.1 se obtiene la siguiente expresión:

$$\varepsilon = (4.0623 \times 10^9)T^{-2} \quad Ec. 5.3$$

Una vez obtenidas las deformaciones unitarias se procede a calcular los esfuerzos, mediante la Ley de Hooke, por lo tanto:

$$\sigma = \mu \varepsilon E \quad \text{Ec. 5.4}$$

Solo basta conocer el modulo de elasticidad del acero estructural grado 50, el cual se considera igual a  $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  (Bennetts, 2008). Al sustituir valores en la ecuación 5.4, se obtiene:

$$\sigma = 2.1 \varepsilon \quad \text{Ec. 5.5}$$

Con la expresión anterior se calcularon los esfuerzos registrados por los 92 sensores de cuerda vibrante instalados en las diferentes dovelas del puente. Como se mencionó anteriormente, los otros 6 se emplearon para medir el desplazamiento relativo en la zona de transición ubicada entre las dovelas D5 y D6 en ambos extremos del claro central. Para obtener los desplazamientos relativos en términos de la deformación unitaria medida por la cuerda vibrante se utiliza la siguiente expresión:

$$\Delta L = \mu \varepsilon L \quad \text{Ec. 5.6}$$

En este caso L es la longitud del cable vibrante expresada en milímetros, por lo tanto la ecuación 5.3 puede escribirse en los siguientes términos:

$$\delta = (159 \times 10^{-6}) \varepsilon \quad \text{Ec. 5.7}$$

Mientras tanto, para medir los valores de temperatura, el registrador hace las lecturas en forma directa con base en la siguiente ecuación:

$$T = \frac{1}{A + B(\text{Ln}R) + C(\text{Ln}R)^3} - 273.2 \quad \text{Ec. 5.8}$$

Donde:

T: Temperatura en °C

LnR: Logaritmo natural de la resistencia del termistor, medida en Ohms

A, B y C: Coeficientes calculados para un rango de operación de -50 a 150 °C

Sustituyendo los coeficientes A, B y C proporcionados por el fabricante:

$$T = \frac{1}{1.4051 \times 10^{-3} + 2.369 \times 10^{-4}(\text{Ln}R) + 1.019 \times 10^{-7}(\text{Ln}R)^3} - 273.2 \quad \text{Ec. 5.9}$$

Finalmente, los registradores cuentan con una interfaz que permite extraer la información y almacenarla en una computadora portátil, por lo tanto se pueden obtener archivos con formato ASCII, o bien en formato de hoja de cálculo de Excel. Ambos contienen la fecha, la hora, las microdeformaciones y las temperaturas de cada cuerda vibrante. Para el cálculo de los esfuerzos y los desplazamientos relativos, la información se almacenó en archivos con formato de hoja de cálculo y se emplearon las ecuaciones descritas anteriormente.

5.2.3.2 Interpretación de los datos.

Para facilitar la interpretación de los datos, lo más recomendable es elaborar gráficas con los valores obtenidos y los que se derivan de los mismos. Esto con el fin de poder identificar posibles errores en las mediciones de los instrumentos o en su defecto errores en el procesamiento de los datos. En este caso y con fines de poder visualizar los resultados, los sensores se separan por dovela graficando la información recolectada en los lechos inferiores (I), superiores (S) y en los costados de cada sección transversal, en la dirección horizontal (H) y vertical (V) de acuerdo con la nomenclatura propuesta para la identificación de los aparatos. Vale la pena aclarar que sólo las dovelas D8 cuentan con sensores en las diagonales de contraventeo (D), mientras que los demás, tienen sus apoyos soldados a las placas de acero que componen cada dovela (figura 5.4). En los apéndices A, B, C y D se muestran las gráficas obtenidas con la información, tal cual fue extraída, tanto a las 8:00 como a las 20:00 hrs. A modo de ejemplo, se muestran los incrementos de esfuerzos relativos al día 10 de mayo de 2006 y las temperaturas medidas en la dovela central a las 8:00 hrs., a partir del mes de abril de 2007 hasta finales del mes de marzo de 2009.

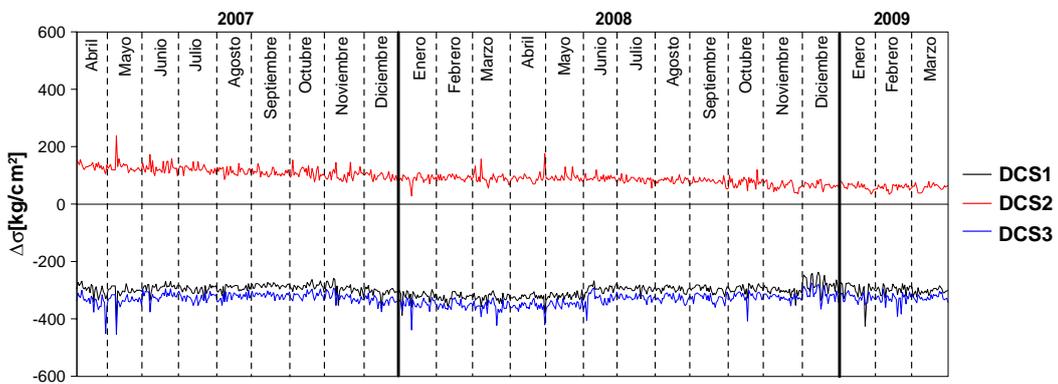


Figura 5.14: Incrementos de esfuerzo medidos en el lecho superior de la dovela central

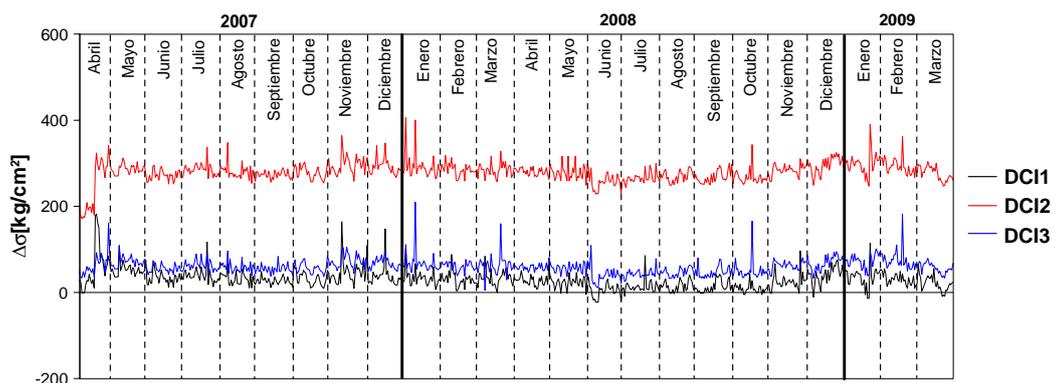


Figura 5.15: Incrementos de esfuerzo medidos en el lecho inferior de la dovela central

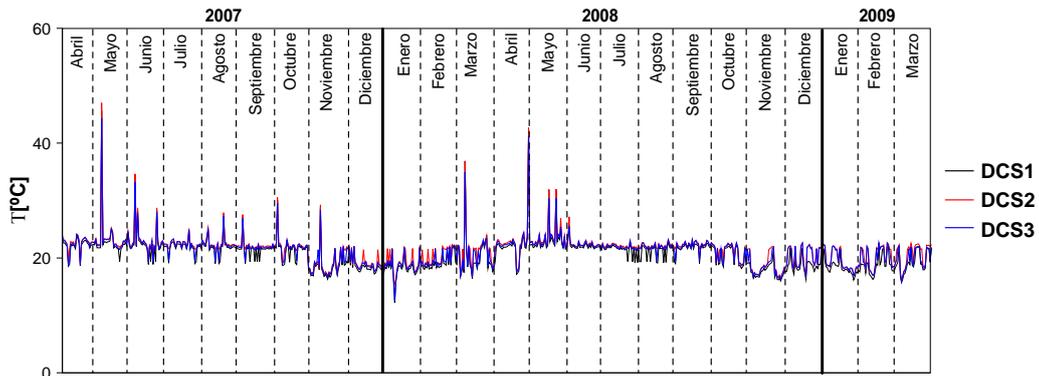


Figura 5.16: Temperaturas medidas en el lecho superior de la dovela central

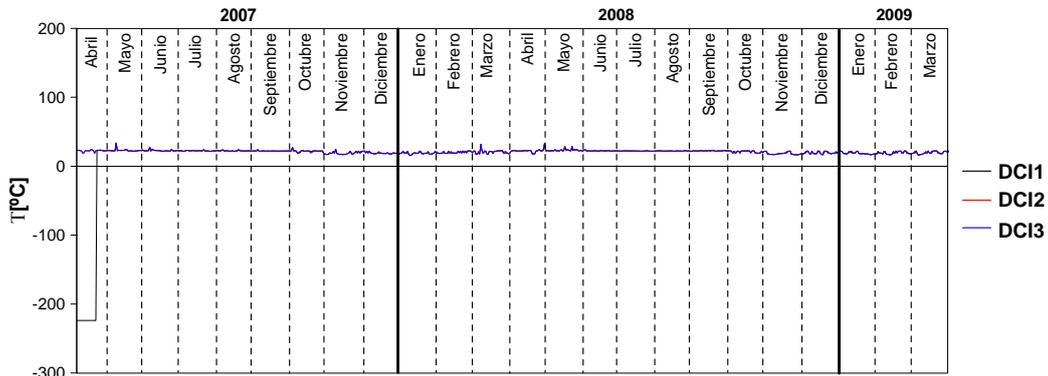


Figura 5.17 Temperaturas medidas en el lecho inferior de la dovela central

En las figuras 5.14 y 5.15 se pueden observar a simple vista, algunos problemas con los datos medidos, a principios del mes de abril de 2007. Tanto el sensor DCS2 como el DCI2 registraron mediciones superiores a las que proporcionan los dispositivos que los acompañan, los cuales muestran tendencias similares en la información que proporcionan. Por otro lado, los incrementos de esfuerzo registrados por el sensor DCI2 tuvieron un aumento súbito en su magnitud, la cual, en un principio se encontraba cerca de los 200 kg/cm<sup>2</sup> y posteriormente se registraron valores cercanos a los 300 kg/cm<sup>2</sup>, conservando esta tendencia hasta el final de las mediciones. Mientras que las temperaturas medidas por el termistor DCI1, en un principio adquieren valores superiores a los -200 °C y posteriormente disminuyen observándose mediciones similares a las de los demás termistores.

La información relativa a los dispositivos que se encuentran en las demás dovelas presenta algunas situaciones similares a los que se observaron anteriormente. En la siguiente sección se comentaran algunas de las acciones tomadas en la corrección de la información recabada por los sensores. La gran mayoría de estas actividades se basan en el uso del sentido común y en la experiencia personal. Por lo cual no siempre es bueno contar con programas de computadora que realicen esta tarea en forma automática, ya que algunos de estos se basan en la aplicación de filtros que pueden llegar a discriminar información valiosa si el dispositivo de medición sufre algún desajuste. Lo ideal es auxiliarse en estos, para graficar la información y facilitar la inspección visual de los datos proporcionados por los sistemas de captura.

### 5.2.3.3 Corrección de los datos.

Para poder realizar la corrección de los datos, se establecieron algunas hipótesis a cerca del comportamiento estructural del puente y las condiciones de esfuerzo y temperatura que se esperan. Esto con la finalidad de tener un marco de referencia para la toma de decisiones:

- El puente se idealiza como una viga continua, por lo cual se presentan esfuerzos de compresión en el lecho superior y de tensión en el lecho inferior de cada dovela, excepto en las dovelas D8, donde esta relación se invierte.
- Los sensores ubicados en sitios similares (lecho superior inferior, etc.) en cada dovela tienden a realizar mediciones similares.
- Dada la simetría del puente se puede esperar que los aparatos colocados en una dovela muestren registros semejantes a su similar de la margen opuesta.
- La temperatura ambiente en el Estado de Chiapas oscila entre los 15 °C y los 36 °C.

Adicionalmente, se cuenta con los datos almacenados hora tras hora por el registrador 8020 (Micro 10), ya que permitirán observar si la falla representa algo temporal como el ruido eléctrico (interferencias o señales de origen eléctrico que no son deseadas), o bien, si esta situación trascendió en las mediciones posteriores. En el caso del sensor DCI2 primero se observaron el día y la hora en la cual se presentó el incremento esfuerzo que produjo el desfaseamiento que se observa en la grafica de la figura 5.15. La siguiente tabla muestra los valores correspondientes al día 13 y 14 de abril de 2007

Canal		61			Canal		61		
Fecha	Hora	DCI2			Fecha	Hora	DCI2		
		μE	Δσ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Diferencia			μE	Δσ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Diferencia
10/05/2006	22:23	3643	-	-	-	-	-	-	
13/04/2007	00:00	3740	202.776	202.776	14/04/2007	00:00	3793	314.265	-0.336
13/04/2007	01:00	3739	200.991	-1.785	14/04/2007	01:00	3795	319.725	5.46
13/04/2007	02:00	3734	191.079	-9.912	14/04/2007	02:00	3793	314.937	-4.788
13/04/2007	03:00	3732	186.816	-4.263	14/04/2007	03:00	3796	322.014	7.077
13/04/2007	04:00	3731	184.527	-2.289	14/04/2007	04:00	3794	316.911	-5.103
13/04/2007	05:00	3731	184.422	-0.105	14/04/2007	05:00	3791	311.199	-5.712
13/04/2007	06:00	3734	190.155	5.733	14/04/2007	06:00	3786	301.119	-10.08
13/04/2007	07:00	3730	181.713	-8.442	14/04/2007	07:00	3786	300.363	-0.756
13/04/2007	08:00	3728	179.319	-2.394	14/04/2007	08:00	3782	290.976	-9.387
13/04/2007	09:00	3720	162.603	-16.716	14/04/2007	09:00	3775	277.326	-13.65
13/04/2007	10:00	3721	163.527	0.924	14/04/2007	10:00	3769	263.592	-13.734
13/04/2007	11:00	3719	160.125	-3.402	14/04/2007	11:00	3764	254.037	-9.555
13/04/2007	12:00	3719	159.348	-0.777	14/04/2007	12:00	3767	260.946	6.909
13/04/2007	13:00	3720	162.414	3.066	14/04/2007	13:00	3769	265.461	4.515
13/04/2007	14:00	3726	173.523	11	14/04/2007	14:00	3775	277.242	11.781
13/04/2007	15:00	3773	273.924	100.401	14/04/2007	15:00	3782	291.837	14.595
13/04/2007	16:00	3781	289.779	15.855	14/04/2007	16:00	3787	301.371	9.534
13/04/2007	17:00	3785	297.633	7.854	14/04/2007	17:00	3788	303.513	2.142
13/04/2007	18:00	3799	327.390	29.757	14/04/2007	18:00	3786	300.951	-2.562
13/04/2007	19:00	3789	306.936	-20.454	14/04/2007	19:00	3786	300.951	0
13/04/2007	20:00	3790	307.944	1.008	14/04/2007	20:00	3788	304.626	3.675
13/04/2007	21:00	3794	316.575	8.631	14/04/2007	21:00	3791	311.283	6.657
13/04/2007	22:00	3793	314.265	-2.31	14/04/2007	22:00	3790	308.700	-2.583
13/04/2007	23:00	3793	314.601	0.336	14/04/2007	23:00	3796	322.203	10.92

Tabla 5.2: Incrementos de esfuerzo medidos cada hora por el sensor DCI2

Al observar los datos de la tabla se puede notar que al calcular diferencia entre los incrementos de esfuerzo medidos a las 14:00 y 13:00 hrs del día 13 de abril, el valor que se obtiene es de 100.401 kg/cm<sup>2</sup>. Dicho aumento se mantiene prácticamente constante hasta el final de las mediciones (marzo de 2009), por lo cual, en la gráfica se observan valores cercanos a los 300 kg/cm<sup>2</sup>. Esto significa que el sensor pudo haber sufrido un desperfecto, por ejemplo. Los tornillos que sujetan el tubo protector de la cuerda vibrante pueden desacomodarse si los impactos producidos por el paso de los coches flexionan las placas de acero, o bien, si se ajustan mal a la hora de colocarlos, pueden alterar las mediciones si ejercen demasiada presión. Otra razón probable, es que el sistema de captura dejó de registrar las lecturas correctamente por problemas de impedancia (variaciones de la relación entre voltaje y corriente eléctrica, medidas). Como el sistema no se puede revisarse físicamente, esto puede solucionarse compensando dicho esfuerzo o bien restar su magnitud de los valores de las mediciones subsecuentes. Esto implica que esta operación debe realizarse también para los valores obtenidos a las 20:00 hrs, ya que como podrá observarse parcialmente en la tabla 5.2, este incremento también afectó a las demás mediciones. La siguiente figura muestra los resultados logrados al compensar las mediciones.

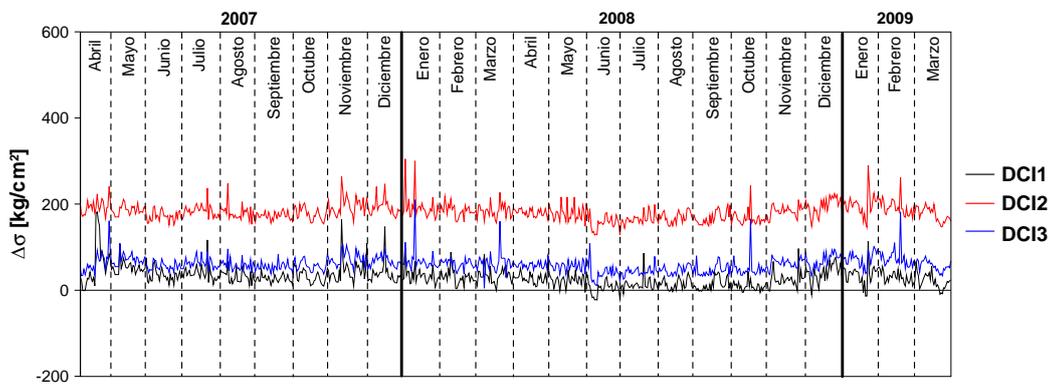


Figura 5.18: Incrementos de esfuerzo corregidos en el lecho inferior de la dovela central

Sin embargo, en la figura 5.18 se puede apreciar que las cuerdas vibrantes DCI1 y DCI3 muestran lecturas similares en contraste con el sensor DCI2, el cual proporciona valores superiores a los que se midieron con los demás dispositivos. Esta misma situación se presentó en el lecho superior con el sensor DCS2. La primera impresión, permite suponer que el mismo problema se presentó antes del periodo en estudio, ya que los dispositivos restantes aportaron mediciones similares y es poco probable que dos sensores fallen de la misma manera. Para averiguar si los datos estaban erróneos o no, se revisan nuevamente los registros realizados hora por hora entre el día 10 de mayo de 2006 y el día 31 de marzo de 2007.

En el caso del sensor DCI2, se halló una diferencia de 134.40 kg/cm<sup>2</sup> entre las mediciones registradas los días 11 y 12 de Mayo de 2006, lo cual confirmó la hipótesis. La tabla 5.6 muestra algunas de las lecturas observadas durante la inspección. Al restar este valor de las mediciones se observaron los resultados que se muestran en la figura 5.19:

Canal		61			Canal		61		
Fecha	Hora	DCI2			Fecha	Hora	DCI2		
		$\mu\epsilon$	$\Delta\sigma$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Diferencia			$\mu\epsilon$	$\Delta\sigma$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Diferencia
10/05/2006	22:23	3643	-	-	13/05/2006	18:22	3784	296.10	14.70
11/05/2006	00:29	3652	18.90	18.90	13/05/2006	21:11	3777	281.40	-14.70
11/05/2006	08:53	3670	56.70	37.80	13/05/2006	21:37	3881	499.80	218.40
11/05/2006	12:02	3675	67.20	10.50	13/05/2006	21:53	3826	384.30	-115.50
11/05/2006	12:23	3727	176.40	109.20	13/05/2006	22:09	3776	279.30	-105.00
11/05/2006	12:47	3676	69.30	-107.10	13/05/2006	22:24	3781	289.80	10.50
11/05/2006	13:11	3675	67.20	-2.10	13/05/2006	22:40	3779	285.60	-4.20
11/05/2006	13:24	3718	157.50	90.30	26/05/2006	09:11	3733	189.00	-96.60
11/05/2006	13:35	3718	157.50	0.00	26/05/2006	16:53	3743	210.00	21.00
11/05/2006	13:42	3680	77.70	-79.80	27/05/2006	09:33	3739	201.60	-8.40
11/05/2006	13:52	3676	69.30	-8.40	28/05/2006	08:43	3741	205.80	4.20
11/05/2006	13:59	3671	58.80	-10.50	28/05/2006	20:33	3742	207.90	2.10
11/05/2006	14:08	3673	63.00	4.20	29/05/2006	08:47	3737	197.40	-10.50
11/05/2006	14:31	3670	56.70	-6.30	29/05/2006	16:02	3751	226.80	29.40
11/05/2006	16:02	3661	37.80	-18.90	30/05/2006	08:43	3747	218.40	-8.40
12/05/2006	08:07	3725	172.20	134.40	30/05/2006	14:02	3758	241.50	23.10
12/05/2006	11:38	3720	161.70	-10.50	31/05/2006	08:36	3762	249.90	8.40
12/05/2006	14:23	3725	172.20	10.50	31/05/2006	14:05	3779	285.60	35.70
13/05/2006	10:12	3755	235.20	63.00	31/05/2006	20:27	3773	273.00	-12.60
13/05/2006	13:54	3777	281.40	46.20	01/06/2006	08:35	3772	270.90	-2.10

Tabla 5.3: Incrementos de esfuerzo observados durante la segunda inspección

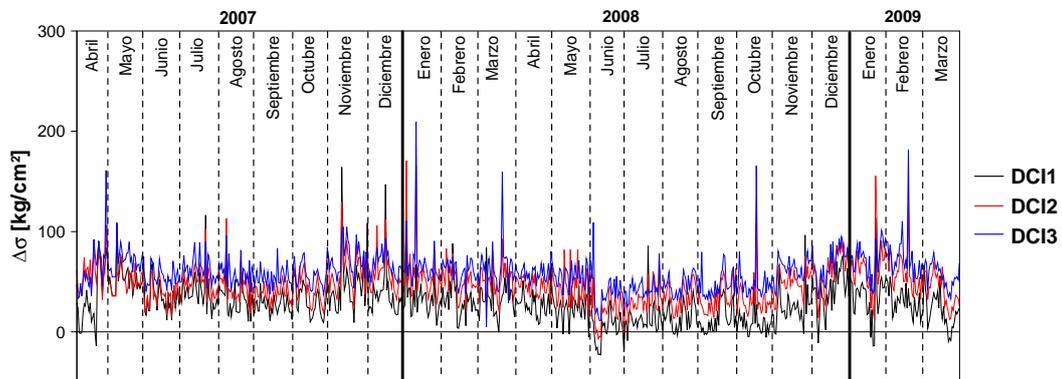


Figura 5.19: Segunda corrección de los incrementos de esfuerzo medidos en el lecho inferior de la dovela central

En el caso del sensor DCS2 los registros no mostraron una tendencia tan clara como la que se observa en la tabla 5.3, debido a que no se observaron anomalías en las mediciones. El aparato registraba deformaciones mayores al valor inicial, por lo cual, a la hora de calcular el incremento de esfuerzo se obtienen valores positivos desde el principio. Esto indica que la dovela estuvo trabajando en tensión en ese punto, en vez de hacerlo en compresión, como lo muestra la tabla 5.4, lo cual, no concuerda con las hipótesis elaboradas al inicio de esta sección, por lo tanto se descartará la información que proporcionada por este instrumento para los análisis posteriores.

Canal		62			Canal		62		
Fecha	Hora	DCS2			Fecha	Hora	DCS2		
		με	Δσ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Diferencia			με	Δσ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Diferencia
10/05/2006	22:23	3392	-	-	13/05/2006	18:22	3370	-46.20	-46.20
11/05/2006	00:29	3382	-21.00	-21.00	13/05/2006	21:11	3342	-105.00	-58.80
11/05/2006	08:53	3406	29.40	50.40	13/05/2006	21:37	3339	-111.30	-6.30
11/05/2006	12:02	3461	144.90	115.50	13/05/2006	21:53	3338	-113.40	-2.10
11/05/2006	12:23	3461	144.90	0.00	13/05/2006	22:09	3337	-115.50	-2.10
11/05/2006	12:47	3451	123.90	-21.00	13/05/2006	22:24	3336	-117.60	-2.10
11/05/2006	13:11	3468	159.60	35.70	13/05/2006	22:40	3335	-119.70	-2.10
11/05/2006	13:24	3469	161.70	2.10	26/05/2006	09:11	3484	193.20	312.90
11/05/2006	13:35	3472	168.00	6.30	26/05/2006	16:53	3470	163.80	-29.40
11/05/2006	13:42	3476	176.40	8.40	27/05/2006	09:33	3452	126.00	-37.80
11/05/2006	13:52	3480	184.80	8.40	28/05/2006	08:43	3422	63.00	-63.00
11/05/2006	13:59	3481	186.90	2.10	28/05/2006	20:33	3428	75.60	12.60
11/05/2006	14:08	3480	184.80	-2.10	29/05/2006	08:47	3426	71.40	-4.20
11/05/2006	14:31	3471	165.90	-18.90	29/05/2006	16:02	3470	163.80	92.40
11/05/2006	16:02	3418	54.60	-111.30	30/05/2006	08:43	3433	86.10	-77.70
12/05/2006	08:07	3398	12.60	-42.00	30/05/2006	14:02	3474	172.20	86.10
12/05/2006	11:38	3468	159.60	147.00	31/05/2006	08:36	3418	54.60	-117.60
12/05/2006	14:23	3444	109.20	-50.40	31/05/2006	14:05	3457	136.50	81.90
13/05/2006	10:12	3362	-63.00	-172.20	31/05/2006	20:27	3429	77.70	-58.80
13/05/2006	13:54	3392	0.00	63.00	01/06/2006	08:35	3417	52.5	-25.2

Tabla 5.4: Incrementos de esfuerzo observados para el sensor DCS2

Las temperaturas se corrigieron realizando una inspección de los datos, similar a la mostrada con la tabla 5.2. El error en la medición del sensor DCI1, se presentó después del día 22 de marzo de 2007 a las 10:18 hrs, en ese entonces, la temperatura registrada fue de 21 °C. Posteriormente el sistema de captura falló, por lo cual, sus lecturas fueron de -224 °C hasta el día 17 de abril de 2007 a las 14:00 hrs; instante en el que se registraron 31.89 °C. En este caso la corrección consistió en eliminar las lecturas de -224 °C y sustituirlas por del valor de 21 °C. Por otro lado también se pueden apreciar que algunos valores de temperatura son superiores a los 40 °C tanto en el lecho superior como en el inferior de la dovela central, lo cual es incorrecto ya que a las 8:00 am, las temperaturas oscilan entre los 17 y los 24 °C, en el lecho inferior alcanzando valores ligeramente mayores en el lecho superior. En este caso se sustituyó el valor erróneo por el registro del día anterior. Al hacer estos ajustes se obtiene el resultado que muestra en las siguientes figuras:

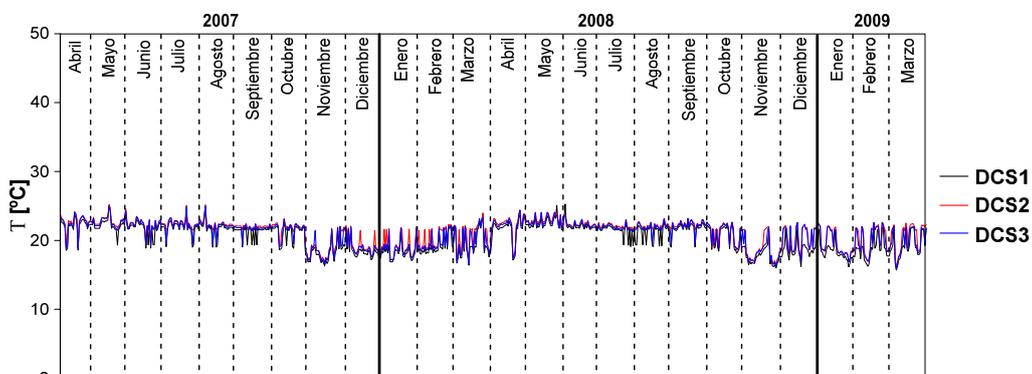


Figura 5.20: Temperaturas corregidas en el lecho superior de la dovela central

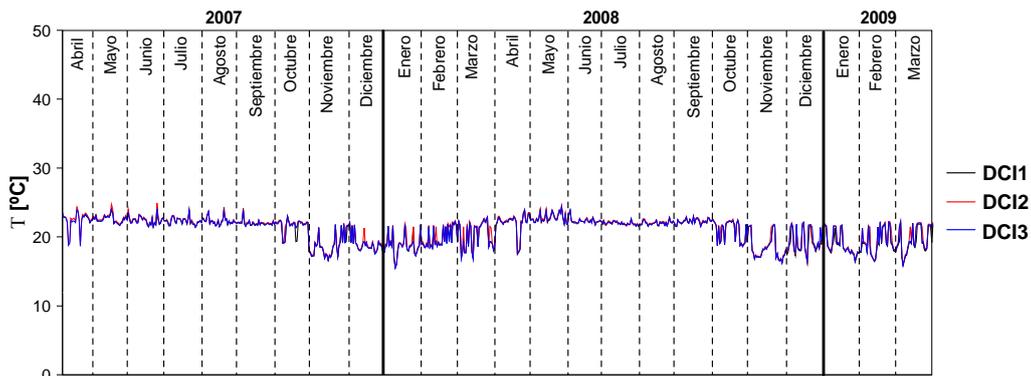


Figura 5.21: Temperaturas corregidas en el lecho inferior de la dovela central

El procedimiento mostrado para corregir las lecturas de las cuerdas vibrantes de la dovela central se aplicó en forma similar para depurar los datos recabados con los sensores de las demás dovelas. Al observar las gráficas de incrementos de esfuerzo, se identificaron tres tipos de problemas:

- Desfasamientos: Que trascienden en las capturas de las 8:00 y 20:00 hrs. (apéndices A y B; figuras A.7, A.10, A.19, A.29, A.36, B.2, B.7, B.10, B.19, B.29 y B.36).
- Incrementos repentinos: Sólo ocurrieron a las 8:00 hrs. a partir del mes de diciembre de 2008, en el punto H2 de las dovelas D4, D8 y D11 (apéndice A; figuras A.5, A.13, A.14, A.23, A.25, A.26 y A.33).
- Valores excesivos: Algunos dispositivos midieron valores cuya magnitud difiere demasiado comparada con la dimensión de los registros obtenidos con sensores ubicados en posiciones similares (apéndices A y B; figura A.3, A.15, A.18, A.20, A.30 y B.36).

En el caso de las temperaturas, los inconvenientes observados consisten en que la mayoría de los aparatos registraron mediciones del orden de 30 hasta 40 °C durante la mañana, cuando la temperatura en esa etapa del día, ronda entre los 17 y los 24 °C, excepto para los termistores ubicados en el lecho superior de cada dovela, donde los registros se aproximan a los 30 °C. En casos más extremos se encontraban mediciones que alcanzaban los 70 °C, tanto a las 8:00 como a las 20 hrs. (apéndices C y D; figuras C.29 y D.29). Por otro lado, fueron pocos los sensores cuyos registros fueron eliminados (D4I1 D8V2 D8NIV2, lado Tuxtla Gutiérrez), ya que sólo mostraban temperaturas negativas en ambos horarios de captura (apéndice C; figuras C.7, C.15, C.25).

Las tablas que se muestran a continuación (5.5 a 5.10), contienen los valores de esfuerzo, desplazamiento y temperatura promedio alcanzados durante el monitoreo. Las celdas que aparecen en color naranja contienen los valores que no concuerdan con las hipótesis planteadas o simplemente se desconoce su veracidad. Por lo tanto, su información se descarta para los análisis que se elaboran en la siguiente sección.

Es importante tener un control de los sensores cuya información fue corregida o en su defecto, no aportan datos congruentes, ya que será necesario rectificar esta situación al revisar los dispositivos en campo. Los valores promedio de las mediciones realizadas aportan una idea de la tendencia de los registros que se deben obtener, lo cual facilita las cosas, ya que es difícil hacerlo sólo observando gráficas.

Dovela	Punto	$\Delta\sigma_{prom}$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	Desv. est. [Kg/cm <sup>2</sup> ]	T <sub>prom</sub> [°C]	Desv. est. [°C]
DC	DCS1	-300.98	18.86	20.40	2.09
	DCS2	90.83	24.42	21.23	1.97
	DCS3	-331.61	20.46	20.97	1.99
	DCI1	28.23	20.47	20.80	1.95
	DCI2	46.62	20.11	21.03	1.94
	DCI3	59.63	18.16	20.90	1.95

Tabla 5.5: Valores promedio medidos en la dovela central a las 8:00 hrs.

Dovela	Punto	$\Delta\sigma_{prom}$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	Desv. est. [Kg/cm <sup>2</sup> ]	T <sub>prom</sub> [°C]	Desv. est. [°C]
DC	DCS1	-362.83	40.14	28.51	4.04
	DCS2	124.05	26.81	29.16	4.19
	DCS3	-404.54	46.01	29.36	4.15
	DCI1	27.13	22.28	25.84	2.78
	DCI2	98.02	22.03	25.67	2.64
	DCI3	46.55	16.40	25.98	2.63

Tabla 5.6: Valores promedio medidos en la dovela central a las 20:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez				San Cristóbal			
Dovela	Punto	$\delta_{prom}$ [mm]	Desv. est. [mm]	T <sub>prom</sub> [°C]	Desv. est. [°C]	$\delta_{prom}$ [mm]	Desv. est. [mm]	T <sub>prom</sub> [°C]	Desv. est. [°C]
D6	D6L1	-0.1068	0.0183	23.92	2.02	-0.1858	0.0166	23.71	1.92
	D6L2	-0.1628	0.0232	24.29	1.98	-0.0652	0.0209	23.37	1.83
	D6L3	-0.0982	0.0251	24.24	1.85	-0.0663	0.0102	22.74	0.96

Tabla 5.7: Valores promedio medidos en la dovela seis a las 8:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez				San Cristóbal			
Dovela	Punto	$\delta_{prom}$ [mm]	Desv. est. [mm]	T <sub>prom</sub> [°C]	Desv. est. [°C]	$\delta_{prom}$ [mm]	Desv. est. [mm]	T <sub>prom</sub> [°C]	Desv. est. [°C]
D6	D6L1	-0.0993	0.0179	26.35	2.49	-0.1781	0.0162	26.89	2.55
	D6L2	-0.1600	0.0232	26.45	2.46	-0.0656	0.0208	26.89	2.56
	D6L3	-0.0930	0.0250	26.52	2.23	-0.0579	0.0083	23.47	1.43

Tabla 5.8: Valores promedio medidos en la dovela seis a las 20:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez				San Cristóbal			
Dovela	Punto	$\Delta\sigma_{prom}$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	Desv. est. [Kg/cm <sup>2</sup> ]	T <sub>prom</sub> [°C]	Desv. est. [°C]	$\Delta\sigma_{prom}$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	Desv. est. [Kg/cm <sup>2</sup> ]	T <sub>prom</sub> [°C]	Desv. est. [°C]
D4	D4S1	-56.12	23.16	20.69	2.06	-64.82	20.35	19.71	1.99
	D4S2	-133.47	27.09	20.98	2.03	3.34	22.34	20.30	2.11
	D4S3	-17.19	27.40	20.97	2.03	-143.63	22.18	20.46	2.10
	D4S4	-154.84	26.10	20.82	2.01	-150.33	23.33	20.30	2.07
	D4H1	-57.15	11.48	21.76	1.83	-287.35	15.66	20.92	1.99
	D4H2	-97.44	19.75	21.76	1.71	-187.00	18.47	21.08	1.95
	D4I1	122.23	41.03	-	-	-147.94	19.96	20.96	1.96
	D4I2	24.86	18.52	21.28	1.88	211.17	13.43	21.14	1.93
	D4I3	111.07	28.74	21.23	1.94	233.32	12.76	21.17	1.92
D4I4	270.00	60.30	21.12	2.04	187.13	13.59	21.00	1.94	
D8	D8S1	117.31	23.58	24.21	2.09	-16.50	21.17	24.01	1.98
	D8S2	185.60	15.66	23.75	1.91	190.29	26.64	23.86	1.95
	D8H1	-35.44	17.18	22.21	1.70	-7.06	16.08	21.82	1.84
	D8H2	-11.70	18.91	22.51	1.58	188.68	26.82	22.12	1.75
	D8V1	49.98	4.28	22.12	1.74	-50.77	8.88	21.75	1.85
	D8V2	58.73	6.61	-	-	87.36	10.39	22.02	1.76
	D8D1	-332.27	22.96	22.50	1.65	68.78	18.77	22.15	1.74
	D8D2	-243.64	20.42	22.54	1.64	-8.83	18.70	22.20	1.71
	D8D3	-157.02	13.38	22.46	1.65	-485.98	31.00	22.19	1.72
	D8D4	-575.61	12.94	22.48	1.65	-432.56	27.60	22.26	1.70
	D8I1	-377.69	11.71	21.91	1.80	-236.40	14.82	21.56	1.86
	D8I2	-187.40	10.63	22.27	1.70	-142.21	7.33	21.96	1.76
	D8I3	-269.06	8.20	22.33	1.68	-130.94	9.32	22.21	1.69
D8I4	-201.85	32.87	22.09	1.73	-153.74	14.91	21.93	1.73	
D8NI	D8NIS1	249.05	21.93	24.08	2.04	97.00	34.88	24.22	2.00
	D8NIS2	186.64	13.44	23.67	1.88	177.81	52.85	23.46	1.81
	D8NIH1	49.63	15.69	22.46	1.63	200.21	22.52	22.19	1.74
	D8NIH2	-10.16	12.66	22.73	1.59	155.06	25.60	22.23	1.70
	D8NIV1	-62.78	4.12	22.28	1.69	11.01	10.99	22.07	1.76
	D8NIV2	-35.93	6.65	-	-	85.96	10.93	22.24	1.70
	D8NID1	-52.50	12.02	22.59	1.64	342.68	25.78	22.13	1.73
	D8NID2	146.78	15.52	22.38	1.65	28.88	24.42	22.05	1.74
	D8NII1	-228.48	19.81	22.03	1.81	-202.30	10.98	21.73	1.82
	D8NII2	-188.54	9.21	22.60	1.65	-175.07	14.33	22.15	1.71
	D8NII3	-200.59	12.40	22.52	1.64	-260.00	10.17	22.28	1.66
D8NII4	-182.93	13.05	22.06	1.72	-52.48	16.55	22.12	1.69	
D11NI	D11NIS1	-351.81	61.09	24.12	2.03	-266.99	43.56	23.65	1.98
	D11NIS2	-225.14	46.95	23.39	1.71	-313.41	44.86	23.29	1.90
	D11NIH1	-208.11	48.12	22.49	1.59	-312.89	67.46	22.02	1.77
	D11NIH2	232.24	86.66	22.72	1.48	-77.65	14.93	22.28	1.69
	D11NII1	217.90	12.29	21.86	1.72	-39.96	11.00	21.59	1.83
	D11NII2	-183.49	13.26	22.01	1.69	-170.21	11.35	21.82	1.77
	D11NII3	266.03	12.15	21.85	1.74	-140.84	11.70	21.49	1.82

Tabla 5.9: Valores promedio medidos en las dovelas restantes a las 8:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez				San Cristóbal			
Dovela	Punto	$\Delta\sigma_{prom}$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	Desv. est. [Kg/cm <sup>2</sup> ]	T <sub>prom</sub> [°C]	Desv. est. [°C]	$\Delta\sigma_{prom}$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	Desv. est. [Kg/cm <sup>2</sup> ]	T <sub>prom</sub> [°C]	Desv. est. [°C]
D4	D4S1	-127.64	45.49	28.87	4.13	-154.47	47.79	29.63	4.31
	D4S2	-203.11	43.44	29.22	4.17	-84.91	50.10	30.51	4.49
	D4S3	-87.73	42.10	29.10	4.02	-227.37	47.08	30.80	4.50
	D4S4	-243.13	46.13	29.52	4.10	-242.61	51.49	29.86	4.29
	D4H1	-24.69	15.31	26.02	2.57	-262.73	15.00	26.29	2.72
	D4H2	-85.75	12.97	25.75	2.56	-161.33	12.55	26.16	2.69
	D4I1	146.68	55.12	-	-	-107.36	22.71	25.97	2.53
	D4I2	37.94	23.69	25.33	2.38	208.03	14.00	26.08	2.49
	D4I3	111.22	28.56	25.21	2.34	230.86	13.88	25.97	2.45
D4I4	271.81	59.24	25.29	2.80	172.65	18.61	25.99	2.38	
D8	D8S1	128.36	24.28	26.66	2.51	9.29	18.22	26.43	2.42
	D8S2	185.84	14.96	26.42	2.46	205.46	29.13	26.79	2.51
	D8H1	-36.67	17.29	25.33	2.27	-16.41	14.93	25.34	2.26
	D8H2	-15.27	14.16	25.50	2.22	176.90	25.83	25.61	2.24
	D8V1	44.09	4.78	25.23	2.26	-64.89	10.44	25.46	2.26
	D8V2	55.08	4.89	-	-	81.25	9.97	25.72	2.24
	D8D1	-346.85	18.79	25.30	2.18	46.52	23.43	26.06	2.25
	D8D2	-258.40	17.40	25.42	2.18	-29.84	22.11	26.08	2.24
	D8D3	-144.93	14.83	25.26	2.11	-483.19	32.85	26.02	2.21
	D8D4	-563.96	15.63	25.34	2.12	-428.86	29.26	26.02	2.20
	D8I1	-371.07	28.62	24.72	2.09	-214.53	15.38	24.42	1.92
	D8I2	-174.69	9.77	24.61	1.95	-137.42	8.21	24.47	1.86
	D8I3	-257.68	11.03	24.62	1.92	-125.08	10.75	24.76	1.91
D8I4	-203.68	34.05	24.74	1.93	-162.53	21.81	24.87	1.90	
D8NI	D8NIS1	253.78	21.37	26.64	2.53	116.94	40.56	26.85	2.43
	D8NIS2	184.49	13.02	26.14	2.36	183.80	56.98	26.75	2.46
	D8NIH1	49.01	15.05	25.33	2.25	188.60	22.45	25.90	2.31
	D8NIH2	-15.77	10.64	25.35	2.21	140.71	27.47	25.78	2.25
	D8NIV1	-67.18	4.74	25.25	2.26	3.80	11.76	25.75	2.28
	D8NIV2	-38.58	6.82	-	-	79.11	10.98	25.87	2.23
	D8NID1	-58.17	9.83	25.53	2.21	378.62	26.66	26.17	2.26
	D8NID2	159.81	18.25	25.21	2.13	38.98	41.74	26.11	2.23
	D8NII1	-227.71	22.90	24.92	2.28	-200.65	15.60	24.61	1.93
	D8NII2	-176.31	11.78	24.99	2.04	-177.37	15.18	24.84	1.97
	D8NII3	-190.92	11.61	24.90	2.00	-253.90	11.61	25.00	1.98
	D8NII4	-185.65	14.95	24.81	1.96	-66.02	26.02	25.29	1.99
D11NI	D11NIS1	-321.27	60.23	26.71	2.59	-241.70	40.92	26.45	2.44
	D11NIS2	-208.60	49.53	26.03	2.37	-296.01	41.64	26.46	2.47
	D11NIH1	-182.51	43.26	24.96	2.15	-299.54	60.72	25.47	2.25
	D11NIH2	183.12	37.90	24.86	2.15	-84.96	13.59	25.82	2.26
	D11NII1	224.11	13.14	24.81	2.16	-36.33	12.29	25.16	2.29
	D11NII2	-177.25	14.30	24.74	2.12	-179.25	14.02	25.33	2.20
	D11NII3	265.36	12.54	24.72	2.10	-139.24	18.65	25.19	2.16

Tabla 5.10: Valores promedio medidos en las dovelas restantes a las 20:00 hrs.

A continuación, se presentan una serie de tablas similares a las anteriores, las cuales contienen la relación de los sensores cuyos datos fueron rectificadas. Esto lo indican las celdas marcadas con una "X". Las celdas color naranja y marcadas con una "X", hacen referencia a los dispositivos cuya información fue corregida y que a pesar de ello resultó incongruente con las hipótesis establecidas. Por último, las celdas color amarillo, hacen referencia a los sensores que se corrigieron en el horario complementario. Por ejemplo, aquellos cuyas lecturas no fueron corregidas en el horario de las 8:00 hrs., pero sí hubo la necesidad de hacerlo en las capturas correspondientes al horario de las 20:00 hrs. y viceversa.

Dovela	Punto	$\Delta\sigma$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	T [°C]
DC	DCS1		X
	DCS2		X
	DCS3		X
	DCI1		X
	DCI2	X	X
	DCI3		X

Tabla 5.11: Sensores corregidos en la dovela central a las 8:00 hrs.

Dovela	Punto	$\Delta\sigma$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	T [°C]
DC	DCS1		
	DCS2		
	DCS3		
	DCI1		X
	DCI2	X	
	DCI3		

Tabla 5.12: Sensores corregidos en la dovela central a las 20:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez		San Cristóbal	
Dovela	Punto	$\delta$ [mm]	T [°C]	$\delta$ [mm]	T [°C]
D6	D6L1				
	D6L2			X	
	D6L3		X		X

Tabla 5.13: Sensores corregidos en la dovela seis a las 8:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez		San Cristóbal	
Dovela	Punto	$\delta$ [mm]	T [°C]	$\delta$ [mm]	T [°C]
D6	D6L1				
	D6L2			X	
	D6L3		X		X

Tabla 5.14: Sensores corregidos en la dovela seis a las 20:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez		San Cristóbal	
Dovela	Punto	$\Delta\sigma$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	T [°C]	$\Delta\sigma$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	T [°C]
D4	D4S1		X		X
	D4S2		X		X
	D4S3		X		X
	D4S4		X		X
	D4H1		X		X
	D4H2	X	X	X	X
	D4I1	X			X
	D4I2		X		X
	D4I3		X		X
	D4I4		X		X
D8	D8S1			X	
	D8S2				
	D8H1		X		X
	D8H2	X	X	X	X
	D8V1		X		X
	D8V2				X
	D8D1		X		X
	D8D2		X		X
	D8D3		X		X
	D8D4		X		X
	D8I1	X	X		X
	D8I2		X		X
	D8I3		X		X
	D8I4	X	X		X
D8NI	D8NIS1				
	D8NIS2				
	D8NIH1	X	X		X
	D8NIH2	X	X	X	X
	D8NIV1		X		X
	D8NIV2	X			X
	D8NID1		X	X	X
	D8NID2		X	X	X
	D8NII1	X	X	X	X
	D8NII2		X	X	X
	D8NII3		X		X
	D8NII4	X	X	X	X
D11NI	D11NIS1				
	D11NIS2				
	D11NIH1		X		X
	D11NIH2	X	X	X	X
	D11NII1	X	X		X
	D11NII2	X	X		X
	D11NII3		X	X	X

Tabla 5.15: Sensores corregidos en las dovelas restantes a las 8:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez		San Cristóbal	
Dovela	Punto	$\Delta\sigma$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	T [°C]	$\Delta\sigma$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	T [°C]
D4	D4S1				X
	D4S2				
	D4S3				
	D4S4				
	D4H1				
	D4H2				
	D4I1	X			
	D4I2				
	D4I3				
	D4I4		X		
D8	D8S1			X	
	D8S2				
	D8H1				
	D8H2				
	D8V1				X
	D8V2				
	D8D1				
	D8D2				
	D8D3				
	D8D4				
	D8I1	X			
	D8I2				
	D8I3				
	D8I4	X			
D8NI	D8NIS1				
	D8NIS2				
	D8NIH1				
	D8NIH2				
	D8NIV1				
	D8NIV2				
	D8NID1				
	D8NID2				
	D8NII1	X	X	X	
	D8NII2			X	
	D8NII3				
	D8NII4	X		X	
D11NI	D11NIS1				
	D11NIS2				
	D11NIH1	X			
	D11NIH2			X	
	D11NII1	X			X
	D11NII2	X	X	X	
	D11NII3			X	

Tabla 5.16: Sensores corregidos en las dovelas restantes a las 20:00 hrs.

Con las tablas anteriores se pueden obtener algunos datos estadísticos empleando el número de elementos que involucran. Cada celda marcada indica el estado de las correcciones realizadas. La interpretación de las mismas se resume a continuación:

Significado	Con éxito	Sin éxito	Sin corrección	Complemento
Tipo de celda	X	X		

Tabla 5.17: Simbología empleada en la elaboración de datos estadísticos.

Esfuerzos corregidos					
Hora	Con éxito	Sin éxito	Sin corrección	Complemento	Total
8:00	17	8	15	1	41
20:00	12	4	20	5	41

Tabla 5.18: Valores estadísticos de las correcciones de esfuerzo

Desplazamientos relativos corregidos					
Hora	Con éxito	Sin éxito	Sin corrección	Complemento	Total
8:00	1	0	1	0	2
20:00	1	0	1	0	2

Tabla 5.19: Valores estadísticos de las correcciones de desplazamiento relativo

Temperaturas corregidas					
Hora	Con éxito	Sin éxito	Sin corrección	Complemento	Total
8:00	80	0	3	0	83
20:00	9	0	3	71	83

Tabla 5.20: Valores estadísticos de las correcciones de temperatura

Con estos datos se puede conocer el porcentaje de eficiencia del sistema en la captura de los parámetros medidos, mediante la siguiente ecuación:

$$\%E = \frac{N_s - n_{se}}{N_s} \times 100 \quad \text{Ec. 5.10}$$

Donde:

$N_s$ : Número de sensores utilizados por parámetro.

$n_{se}$ : Número de sensores con lecturas erróneas.

Las tablas que se muestran a continuación concentran la información obtenida con los cálculos realizados:

Incremento de esfuerzo					
Hora	Con éxito	Sin éxito	Sin corrección	n <sub>se</sub>	%E
8:00	17	8	15	40	56.52
20:00	12	4	20	36	60.87

Tabla 5.21: Porcentajes de eficiencia en las mediciones de esfuerzo

Desplazamiento relativo					
Hora	Con éxito	Sin éxito	Sin corrección	n <sub>se</sub>	%E
8:00	1	0	1	2	66.67
20:00	1	0	1	2	66.67

Tabla 5.22: Porcentajes de eficiencia en las mediciones de desplazamiento relativo

Temperatura					
Hora	Con éxito	Sin éxito	Sin corrección	n <sub>se</sub>	%E
8:00	80	0	3	83	15.30
20:00	9	0	3	12	87.76

Tabla 5.23: Porcentajes de eficiencia en las mediciones de temperatura

Como se mencionó en la sección 5.2. Los horarios de captura (8:00 y 20:00 hrs.) se establecieron con la finalidad de reducir los errores que se presentaron en las mediciones realizadas hora por hora desde el inicio del monitoreo; con idea de que esta situación solo fuese algo circunstancial como sucede en la mayoría de los casos, ya que ningún sistema de monitoreo es perfecto. En la práctica esto es muy válido ya que equivale a aplicar una especie de filtro a las lecturas, dado el carácter aleatorio de los valores medidos y que la respuesta de los sistemas de captura puede ser afectada por el entorno.

Las estadísticas en este caso indican que de los 41 sensores que presentaron errores al medir los incrementos de esfuerzo. Se dejan de corregir 5 dispositivos a las 20:00 y uno a las 8:00 hrs. (tabla 5.18). En cuanto a las lecturas de desplazamiento relativo, se detectan problemas únicamente en 2 dispositivos independientemente del horario de captura (tabla 5.19). Mientras que en las mediciones de temperatura existen 83 casos de instrumentos con errores a las 8:00 hrs., de los cuales 71 resultan ser algo transitorio, ya que a las 20:00 hrs. sólo se aprecian 12 situaciones de este tipo (tabla 5.20). Lo anterior revela que la información obtenida a las 20:00 hrs. es la que presenta menos errores. Esto indica que el sistema es inestable, debido a problemas de impedancia que se pueden presentar tanto en las cuerdas vibrantes como en el sistema de captura. Para descartar esta posibilidad, en el apéndice I se expone la metodología a seguir para comprobar el correcto funcionamiento de los instrumentos.

Técnicamente, alrededor del 40% de los dispositivos de cuerda vibrante requieren correcciones en sus mediciones. Lo cual resulta poco práctico, ya que la mayoría de las correcciones deben aplicarse en ambos horarios de captura. El trabajo en este aspecto se realiza al doble y es muy demandante, ya que se carecen de medios automatizados que ayuden a realizar las

correcciones. Ante tal situación lo más recomendable es revisar y validar únicamente la información capturada hora por hora en lugar de hacerlo en horarios separados.

#### 5.2.4 Análisis de la información.

En este apartado se utilizarán los datos obtenidos anteriormente para determinar si los esfuerzos estimados en el diseño del puente son inferiores a los límites permitidos, de acuerdo con las especificaciones del proyecto. Así como las condiciones en las que se encuentra la zona de transición mediante el análisis de los desplazamientos relativos máximos medidos en esta región de la superestructura.

##### 5.2.4.1 Revisión de niveles de esfuerzo.

La metodología de análisis para determinar el estado actual de esfuerzos o deformaciones aproximado al que se encuentra sometido el puente San Cristóbal consiste en determinar el estado inicial de esfuerzos obtenido del análisis realizado por el diseñador bajo la condición: carga muerta de servicio (CMS) más peso propio (PP), a la cual se le añaden los incrementos de esfuerzo ( $\Delta\sigma_M$ ). Además, se tomará en cuenta que el puente fue sometido a un proceso de postensado para mejorar el comportamiento estructural de la losa de concreto. El procedimiento para el cálculo del estado actual de los esfuerzos se realiza de la siguiente manera para las diferentes secciones instrumentadas:

1. Patines superiores de las dovelas D6 a D14 en ambos márgenes (losa de concreto postensada). A los esfuerzos iniciales calculados por el análisis ( $\sigma_{(CMS + PP + Postensado)}$ ), se les añaden los incrementos de esfuerzo medidos por el monitoreo ( $\Delta\sigma_M$ ), obteniéndose de manera aproximada los esfuerzos totales actuantes ( $\sigma_{(CMS + PP + Postensado)} + \Delta\sigma_M$ ).
2. Patines superiores de la dovela DC y las dovelas D1 a D5 en ambos márgenes (losa ortotrópica). A los esfuerzos calculados por el análisis ( $\sigma_{(CMS + PP)}$ ) se les agregan los incrementos de esfuerzo provenientes del monitoreo. De esta forma se calculan aproximadamente los esfuerzos actuantes ( $\sigma_{(CMS + PP)} + \Delta\sigma_M$ ).
3. Patines inferiores de todo el puente. Para el cálculo de los esfuerzos de los patines inferiores comprendidos entre las dovelas D6 y D14 de ambos márgenes, rigurosamente se debe agregar el incremento o decremento del esfuerzo ocasionado por el postensado, pero debido a que el efecto del postensado no es significativo, se desprecia su efecto y solo se consideran los esfuerzos ocasionados por las condiciones CMS + PP obtenidos por el análisis y el  $\Delta\sigma_M$  determinado por el monitoreo del puente. Para el cálculo de los niveles de esfuerzo de las secciones restantes, se procederá de la misma forma (Bennetts, 2008).

De acuerdo al procedimiento descrito, se muestran a continuación los valores de esfuerzo iniciales proporcionados por el proyectista en  $\text{kg/cm}^2$ .

Lado	Lecho	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	DC
Tuxtla Gutiérrez	Superior	-130	-535	-890	-725	-880	-985	-695	-985	-965	-885	-685	-485	-665	-760	-780
	Inferior	295	387.5	355	0	-405	-660	-810	-665	-435	-45	295	525	720	830	870
San Cristóbal	Superior	-760	-665	-485	-685	-885	-965	-985	-695	-985	-880	-725	-890	-535	-130	-780
	Inferior	830	720	525	295	-45	-435	-665	-810	-660	-400	0	350	387.5	295	870

Tabla 5.24: Esfuerzos iniciales promedio, por dovela (Bennetts, 2008)

Para conocer si los esfuerzos actuantes se encuentran cercanos al límite permisible, se calcula el porcentaje de esfuerzo alcanzado de a cuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\% \sigma_{perm} = \frac{\sigma_{(CMS+PP)} + \Delta \sigma_M}{0.55 f_y} \quad Ec. 5.11$$

$$\% \sigma_{perm} = \frac{\sigma_{(CMS+PP+Postensado)} + \Delta \sigma_M}{0.55 f_y} \quad Ec. 5.12$$

Donde el esfuerzo permisible es  $0.55 f_y$ , por lo tanto para el acero estructural de grado A50, el límite de fluencia es,  $f_y=3520 \text{ kg/cm}^2$ , entonces,  $0.55 f_y=1936 \text{ kg/cm}^2$ . De a cuerdo con lo comentado anteriormente, las siguientes tablas resumen los resultados de los cálculos realizados:

Dovela	Punto	$\sigma_i$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta \sigma_M$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_i + \Delta \sigma_M$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\% \sigma_{perm}$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]
DC	DCS1	-780.00	-300.98	-1080.98	55.84
	DCS2	-	-	-	-
	DCS3	-780.00	-331.61	-1111.61	57.42
	DCI1	870.00	28.23	898.23	46.40
	DCI2	870.00	46.62	916.62	47.35
	DCI3	870.00	59.63	929.63	48.02

Tabla 5.25: Porcentajes de esfuerzo alcanzado en la dovela central a las 8:00 hrs.

Dovela	Punto	$\sigma_i$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta \sigma_M$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_i + \Delta \sigma_M$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\% \sigma_{perm}$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]
DC	DCS1	-780.00	-362.83	-1142.83	59.03
	DCS2	-	-	-	-
	DCS3	-780.00	-404.54	-1184.54	61.18
	DCI1	870.00	27.13	897.13	46.34
	DCI2	870.00	98.02	968.02	50.00
	DCI3	870.00	46.55	916.55	47.34

Tabla 5.26: Porcentajes de esfuerzo alcanzado en la dovela central a las 20:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez				San Cristóbal			
Dovela	Punto	$\sigma_i$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_M$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_i+\Delta\sigma_M$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\% \sigma_{Perm}$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_i$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_M$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_i+\Delta\sigma_M$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\% \sigma_{Perm}$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]
D4	D4S1	-685.00	-56.12	-741.12	38.28	-725.00	-64.82	-789.82	40.80
	D4S2	-685.00	-133.47	-818.47	42.28	-	-	-	-
	D4S3	-685.00	-17.19	-702.19	36.27	-725.00	-143.63	-868.63	44.87
	D4S4	-685.00	-154.84	-839.84	43.38	-725.00	-150.33	-875.33	45.21
	D4I1	295.00	122.23	417.23	21.55	-	-	-	-
	D4I2	-	-	-	-	0.00	211.17	211.17	10.91
	D4I3	295.00	111.07	406.07	20.97	0.00	233.32	233.32	12.05
	D4I4	295.00	270.00	565.00	29.18	0.00	187.13	187.13	9.67
D8	D8S1	-695.00	117.31	-577.69	29.84	-	-	-	-
	D8S2	-695.00	185.60	-509.40	26.31	-985.00	190.29	-794.71	41.05
	D8I1	-810.00	-377.69	-1187.69	61.35	-665.00	-236.40	-901.40	46.56
	D8I2	-810.00	-187.40	-997.40	51.52	-665.00	-142.21	-807.21	41.69
	D8I3	-810.00	-269.06	-1079.06	55.74	-665.00	-130.94	-795.94	41.11
	D8I4	-810.00	-201.85	-1011.85	52.26	-665.00	-153.74	-818.74	42.29
D8NI	D8NIS1	-695.00	249.05	-445.95	23.03	-985.00	97.00	-888.00	45.87
	D8NIS2	-695.00	186.64	-508.36	26.26	-985.00	177.81	-807.19	41.69
	D8NII1	-810.00	-228.48	-1038.48	53.64	-665.00	-202.30	-867.30	44.80
	D8NII2	-810.00	-188.54	-998.54	51.58	-665.00	-175.07	-840.07	43.39
	D8NII3	-810.00	-200.59	-1010.59	52.20	-665.00	-260.00	-925.00	47.78
	D8NII4	-810.00	-182.93	-992.93	51.29	-665.00	-52.48	-717.48	37.06
D11NI	D11NIS1	-725.00	-351.81	-1076.81	55.62	685.00	-266.99	418.01	21.59
	D11NIS2	-725.00	-225.14	-950.14	49.08	685.00	-313.41	371.59	19.19
	D11NII1	0.00	217.90	217.90	11.25	-	-	-	-
	D11NII2	-	-	-	-	-	-	-	-
	D11NII3	0.00	266.03	266.03	13.74	-	-	-	-

Tabla 5.27: Porcentajes de esfuerzo alcanzado en las dovelas restantes a las 8:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez				San Cristóbal			
Dovela	Punto	$\sigma_i$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_M$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_i+\Delta\sigma_M$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\% \sigma_{Perm}$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_i$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_M$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_i+\Delta\sigma_M$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\% \sigma_{Perm}$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]
D4	D4S1	-685.00	-127.64	-812.64	41.98	-725.00	-154.47	-879.47	45.43
	D4S2	-685.00	-203.11	-888.11	45.87	-	-	-	-
	D4S3	-685.00	-87.73	-772.73	39.91	-725.00	-227.37	-952.37	49.19
	D4S4	-685.00	-243.13	-928.13	47.94	-725.00	-242.61	-967.61	49.98
	D4I1	295.00	146.68	441.68	22.81	-	-	-	-
	D4I2	-	-	-	-	0.00	208.03	208.03	10.75
	D4I3	295.00	111.22	406.22	20.98	0.00	230.86	230.86	11.92
	D4I4	295.00	271.81	566.81	29.28	0.00	172.65	172.65	8.92
D8	D8S1	-695.00	128.36	-566.64	29.27	-	-	-	-
	D8S2	-695.00	185.84	-509.16	26.30	-985.00	205.46	-779.54	40.27
	D8I1	-810.00	-371.07	-1181.07	61.01	-665.00	-214.53	-879.53	45.43
	D8I2	-810.00	-174.69	-984.69	50.86	-665.00	-137.42	-802.42	41.45
	D8I3	-810.00	-257.68	-1067.68	55.15	-665.00	-125.08	-790.08	40.81
	D8I4	-810.00	-203.68	-1013.68	52.36	-665.00	-162.53	-827.53	42.74

Tabla 5.28a: Porcentajes de esfuerzo alcanzado en las dovelas restantes a las 20:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez				San Cristóbal			
Dovela	Punto	$\sigma_i$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_M$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_i+\Delta\sigma_M$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\% \sigma_{Perm}$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_i$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_M$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_i+\Delta\sigma_M$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]	$\% \sigma_{Perm}$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]
D8NI	D8NIS1	-695.00	253.78	-441.22	22.79	-985.00	116.94	-868.06	44.84
	D8NIS2	-695.00	184.49	-510.51	26.37	-985.00	183.80	-801.20	41.38
	D8NII1	-810.00	-227.71	-1037.71	53.60	-665.00	-200.65	-865.65	44.71
	D8NII2	-810.00	-176.31	-986.31	50.95	-665.00	-177.37	-842.37	43.51
	D8NII3	-810.00	-190.92	-1000.92	51.70	-665.00	-253.90	-918.90	47.46
	D8NII4	-810.00	-185.65	-995.65	51.43	-665.00	-66.02	-731.02	37.76
D11NI	D11NIS1	-725.00	-321.27	-1046.27	54.04	685.00	-241.70	443.30	22.90
	D11NIS2	-725.00	-208.60	-933.60	48.22	685.00	-296.01	388.99	20.09
	D11NII1	0.00	224.11	224.11	11.58	-	-	-	-
	D11NII2	-	-	-	-	-	-	-	-
	D11NII3	0.00	265.36	265.36	13.71	-	-	-	-

Tabla 5.28b: Porcentajes de esfuerzo alcanzado en las dovelas restantes a las 20:00 hrs.

De las tablas anteriores se puede apreciar que el porcentaje de esfuerzo máximo alcanzado en la superestructura es del orden del 60% del valor permitido y que además, se encuentra en la interfaz de las dovelas D8 de ambos márgenes con las pilas, así como en las dovelas ubicadas al centro de cada uno de los tres claros (DC y D11 de ambos márgenes). Por otro lado, al complementar lo observado con los porcentajes presentados en las ubicaciones restantes (D4 de ambos márgenes) se puede asegurar que el desempeño global de la estructura es aceptable al notar en estas, valores que oscilan entre el 10% y el 50% del esfuerzo permisible. Esto indica que las placas de acero que componen las distintas secciones del puente, se encuentran sometidas a valores de esfuerzo cuya magnitud se encuentra dentro del rango elástico, lo cual garantiza que las deformaciones que se producen en condiciones de servicio puedan ser recuperadas, promoviendo de esta forma, la longevidad de la superestructura.

#### 5.2.4.2 Revisión de desplazamientos relativos.

Para determinar la calidad de los elementos estructurales que se utilizaron en la construcción de la zona de transición, el II-UNAM realizó varios estudios en el laboratorio (Sánchez R., 2005). Se realizaron diferentes pruebas a los distintos tipos de materiales, conexiones y conectores que conforman las dovelas, tales como pruebas de flexión simple a placas de acero grado A50 con espesores de 12.7 mm y 19 mm; a las conexiones placa-conector y a los conectores tipo perno Nelson auto-soldables de 19 mm de diámetro por 20.5 cm de longitud, las cuales también incluyeron ensayos de resistencia al esfuerzo cortante entre las conexiones y las placas. De toda la gama de pruebas realizadas, se determinó el valor del esfuerzo cortante que produce la falla en los pernos, así como las condiciones de esfuerzo más críticas que se pueden presentar en la unión entre el perno y la placa como lo muestra la figura 5.22.

Para la estimación del desplazamiento permisible ( $\delta_p$ ) en la zona de transición, se emplearán los resultados de las pruebas experimentales realizadas por el II-UNAM (Sánchez R., 2005). Específicamente la curva carga-desplazamiento (figura 5.23) obtenida del ensaye realizado a la conexión entre el perno y la placa base, la cual fue sometida a esfuerzo cortante, con relación al

valor permisible en los pernos ( $Z_r=7,312$  kg), el cual gobierna el diseño, de a cuerdo con las normas AASTHO-2002.

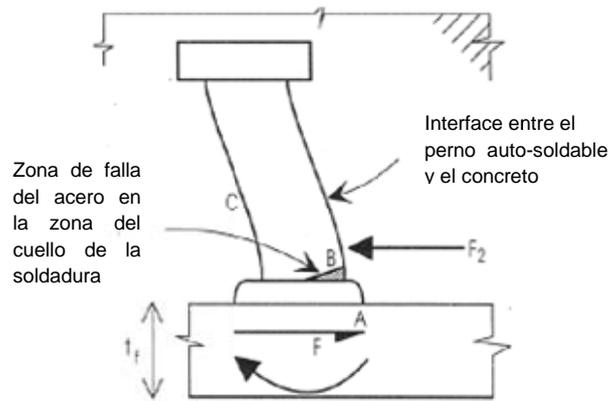


Figura 5.22: Falla del perno por fatiga (Oehlers y Bradford, 1995)

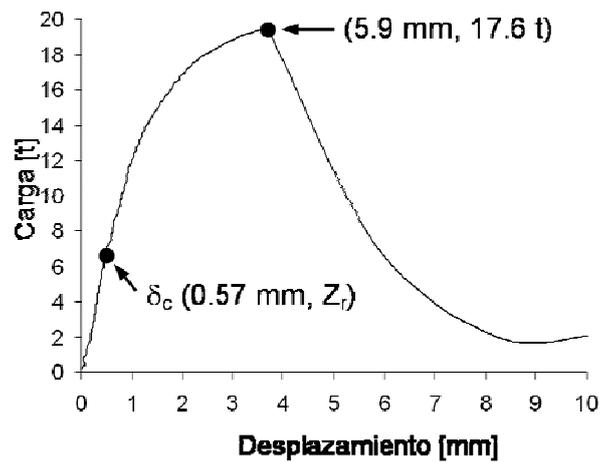


Figura 5.23: Curva carga-desplazamiento de la conexión entre perno y placa base, sometida a esfuerzo cortante (Bennetts, 2008).

Como se puede observar en la figura 5.23, el valor obtenido del desplazamiento permisible es  $\delta_p=0.57$  mm, el cual se utilizará para comparar los desplazamientos registrados por el monitoreo en la zona de transición. Al dividir los valores máximos medidos entre el valor permisible se obtiene el porcentaje de desplazamiento alcanzado de a cuerdo con la siguiente expresión:

$$\% \delta_{perm} = \frac{\delta_{m\acute{o}x}}{\delta_p} \times 100 \quad Ec. 5.13$$

Donde:

- $\delta_p$ : Desplazamiento permitido
- $\delta_{m\acute{o}x}$ : Desplazamiento máximo medido

Las siguientes tablas muestran el resultado de los cálculos realizados:

Lado		Tuxtla Gutiérrez		San Cristóbal	
Dovela	Punto	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	% $\delta_{\text{perm}}$	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	% $\delta_{\text{perm}}$
D6	D6L1	-0.142	24.91	-0.224	39.30
	D6L2	-0.196	34.39	-0.095	16.67
	D6L3	-0.141	24.74	-0.084	14.74

Tabla 5.29: Porcentajes de desplazamiento relativo máximo, registrados a las 8:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez		San Cristóbal	
Dovela	Punto	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	% $\delta_{\text{perm}}$	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	% $\delta_{\text{perm}}$
D6	D6L1	-0.139	24.39	-0.218	38.25
	D6L2	-0.196	34.39	-0.095	16.67
	D6L3	-0.135	23.68	-0.080	14.04

Tabla 5.30: Porcentajes de desplazamiento relativo máximo, registrados a las 20:00 hrs.

Al observar en las tablas 5.29 y 5.30, los desplazamientos máximos medidos por las cuerdas vibrantes de la dovela seis de la margen derecha, como los obtenidos en su similar de la margen izquierda, se pueden apreciar valores muy similares en cada una de estas. Sin embargo, al comparar ambos extremos, los datos difieren en magnitud, a pesar de la simetría del puente. Esto se debe a que la mitad correspondiente al lado San Cristóbal fue reforzada tras el colapso del resto de la superestructura, por lo cual se pueden observar cantidades de desplazamiento relativo menores a las registradas en el lado Tuxtla Gutiérrez.

Los valores máximos registrados por el sensor D6L1 del lado San Cristóbal se descartan, ya que resultan ser excesivos comparados con los datos aportados por los sensores D6L2 y D6L3. Al revisar la información obtenida con este dispositivo y con el resto de las cuerdas vibrantes no se encontraron indicios que pudieran conducir a una posible rectificación de las mediciones, con excepción del sensor D6L3 del lado San Cristóbal, el cual, se dañó y sólo se consideraron los datos que registró a partir del mes de diciembre de 2008. Las gráficas mostradas a continuación muestran las mediciones tomadas a las 8:00 hrs.

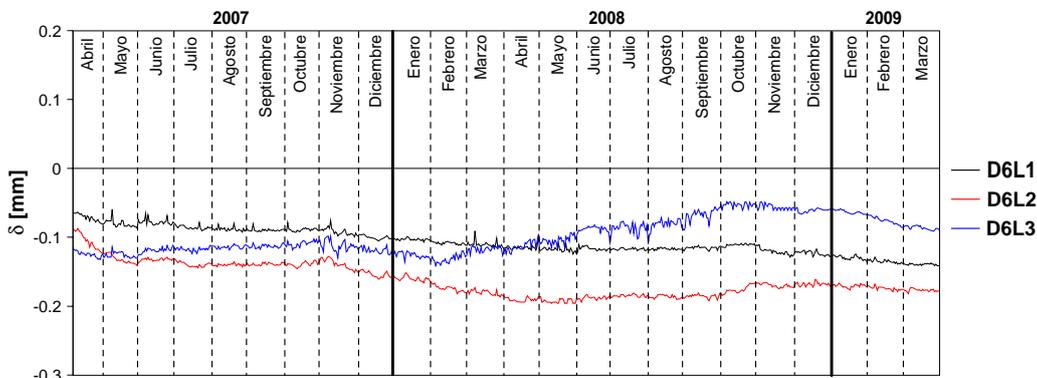


Figura 5.24: Desplazamiento relativo medido en la zona de transición, lado Tuxtla Gutiérrez

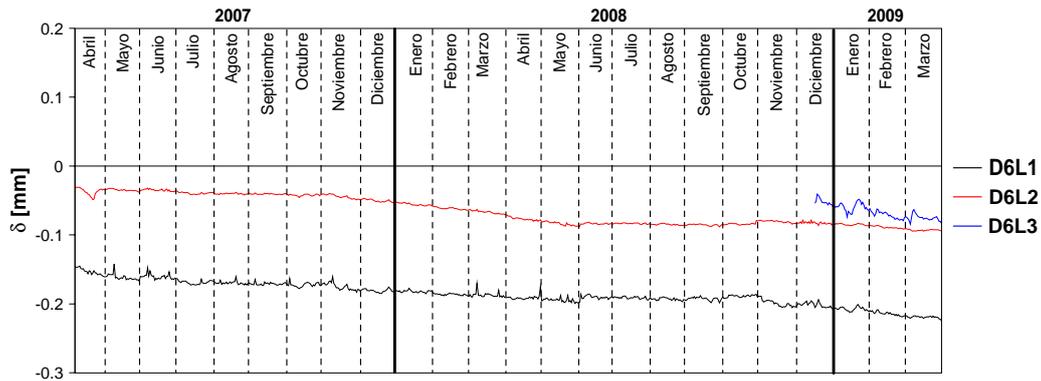


Figura 5.25: Desplazamiento relativo medido en la zona de transición, lado San Cristóbal

Finalmente, dada la importancia de la zona de transición en el desempeño de la estructura, se puede pensar conservadoramente y mencionar que el desplazamiento máximo medido durante el monitoreo, se encuentra en un porcentaje cercano al 35% del valor permitido en el lado Tuxtla Gutiérrez, dada la incertidumbre de las mediciones. Sin embargo, lo más probable es que este valor se encuentre alrededor del 24%, mientras que en el lado San Cristóbal esta cantidad se aproxima al 17%. Al observar las gráficas se puede apreciar que los desplazamientos tienden a incrementarse linealmente en valores aproximados a 0.05 mm en algunos de los registros obtenidos durante los dos años estudiados, por lo que podría suponerse que los incrementos de desplazamiento se encuentren actualmente en valores cercanos al 25% y el 40% del valor permitido, siendo el mayor porcentaje para la margen que da hacia Tuxtla Gutiérrez. Por lo tanto, se puede afirmar que la zona de transición se encuentra en óptimas condiciones y que la integridad estructural del puente no se encuentra comprometida en este aspecto.