

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

---

PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN Y MONITOREO DE  
ANILLO INSTRUMENTADO Y SISTEMA DE CONVERGENCIAS  
AUTOMATIZADO EN EL TÚNEL EMISOR ORIENTE”

---



TESIS QUE OPTA QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

JOSÉ LUIS GONZÁLEZ ZARCO

ASESOR: ING. MARCOS TREJO HERNÁNDEZ

CIUDAD DE MÉXICO., MAYO, 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

---

PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN Y MONITOREO DE  
ANILLO INSTRUMENTADO Y SISTEMA DE  
CONVERGENCIAS AUTOMATIZADO EN EL TÚNEL  
EMISOR ORIENTE”

---

---

## ÍNDICE

---

|   |     |
|---|-----|
| Agradecimientos.....  | 1   |
| Objetivos.....  | 2   |
| Introducción.....   | 2   |
| 1. Antecedentes.....  | 3   |
| 2. Instrumentación.....   | 6   |
| 3. Descripción de los instrumentos a utilizar: “Anillo instrumentado y Sistema de Convergencias Automatizado (SCA)” ..... | 8   |
| 3.1. ANILLO INSTRUMENTADO.....  | 8   |
| 3.2. CELDA DE PRESIÓN.....  | 14  |
| 3.3. DEFORMÍMETRO DE ACERO.....   | 16  |
| 3.4. DEFORMÍMETRO DE CONCRETO.....  | 17  |
| 3.5. NOMENCLATURA.....  | 18  |
| 3.6. SISTEMA DE CONVERGENCIAS AUTOMATIZADO (SCA).....   | 19  |
| 4. Procedimiento de instalación.....  | 22  |
| 4.1. MATERIALES Y HERRAMIENTAS.....   | 23  |
| 4.2. CELDA DE PRESIÓN.....  | 24  |
| 4.3. DEFORMÍMETRO DE ACERO.....   | 32  |
| 4.4. DEFORMÍMETRO DE CONCRETO.....  | 39  |
| 4.5. SISTEMA DE CONVERGENCIAS AUTOMATIZADO (SCA).....   | 44  |
| 4.5.1. MATERIALES.....  | 45  |
| 5. Monitoreo de anillo instrumentado.....   | 55  |
| 5.1. CÁLCULO DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES.....  | 56  |
| 5.2. CELDA DE PRESIÓN.....  | 57  |
| 5.3. DEFORMÍMETRO DE ACERO.....   | 68  |
| 5.4. DEFORMÍMETRO DE CONCRETO.....  | 82  |
| 6. Monitoreo y reporte de sistema de convergencias automatizado .....   | 96  |
| 7. Conclusiones.....  | 101 |
| Bibliografía.....   | 102 |

---

## AGRADECIMIENTOS

---

***A mis padres.*** Todo el esfuerzo y desvelo generado han tenido un buen fin, que es la conclusión de este gran paso en mi vida. Con el objetivo de seguir desarrollándome personal y profesionalmente, deseo dar mi más alto agradecimiento, que han permanecido a mi lado apoyándome e impulsándome a ser mejor cada día.

***Al Colegio de Ingenieros Civiles de México;*** que por medio del programa de prácticas profesionales, en asociación con el consorcio COMISSA, el encargado de la construcción del proyecto del Túnel Emisor Oriente, tuve la oportunidad de ingresar a una obra de tal envergadura comenzando en el área de generadores en donde laboré por 3 meses y posteriormente fui contratado para incorporarme al departamento de Instrumentación en los tramos 3 y 4.

---

## **OBJETIVO**

---

El objetivo de esta investigación consiste en describir el procedimiento de la colocación de los instrumentos del anillo instrumentado que formará parte del revestimiento primario, así como la instalación del Sistema de Convergencias Automatizado (SCA), que forma parte de la instrumentación requerida en el Proyecto del Túnel Emisor Oriente.

---

## **INTRODUCCIÓN**

---

La relevancia de este documento tiene como objetivo primordial ser una guía descriptiva detallada de cada instalación y funcionamiento de los aparatos utilizados en la instrumentación de manera de ser lo más explícito posible y su monitoreo pueda ser realizado por cualquier técnico.

Este documento tiene por objetivo describir el procedimiento de la colocación de los instrumentos del anillo instrumentado que formará parte del revestimiento primario, así como la instalación del Sistema de Convergencias Automatizado (SCA), que forma parte de la instrumentación requerida en el Proyecto del Túnel Emisor Oriente, además, se describirán algunas de las actividades preliminares para la instalación de estos.

Los instrumentos son instalados por el departamento de Instrumentación y tienen como función identificar el comportamiento de los elementos que conforman el revestimiento primario (dovelas) al interactuar con el terreno natural, así como los materiales que forman parte del anillo (concreto y acero).

En capítulos que componen este trabajo, se describen detalladamente cada uno de los instrumentos, su composición, además de los reportes y entregas que se realizan para su control y análisis. A su vez, se definirán los procedimientos de monitoreo, basados en la frecuencia de monitoreo conciliada con la supervisión del tramo

Dentro del proyecto del Túnel Emisor Oriente se tienen instalados diferentes tipos de instrumentación con el fin de identificar parámetros que contribuyan a la confirmación de las hipótesis generadas en torno al comportamiento de las estructuras, así como una evaluación de seguridad bajo condiciones extraordinarias. La instrumentación en un proyecto de esta magnitud es de profunda relevancia ya que se requiere del monitoreo continuo en algunos procesos constructivos como en el caso de la construcción de las lumbreras, las cuales necesitan del apoyo de inclinómetros para determinar los desplazamientos horizontales en la construcción del muro Milán, por ejemplo. Otro tipo de instrumentos de alta importancia es la instalada en superficie perimetralmente a cada lumbrera con el fin de identificar el comportamiento de los niveles piezométricos y los niveles freáticos con base en piezómetros abiertos, piezómetros eléctricos de cuerda vibrante y pozos de observación que serán los encargados de suministrar los datos de estos parámetros.

---

## **1. ANTECEDENTES**

---

Debido a que la cuenca del valle de México se ubica donde anteriormente se encontraban los Lagos de Texcoco, Zumpango, Chalco, Xochimilco y Xaltocan, motiva que debido al aumento urbano de la Ciudad de México, ésta quede expuesta a inundaciones temporales, surgiendo la necesidad de un sistema de drenaje eficiente para el desalojo fuera de la cuenca, así como el control de las aguas residuales y pluviales.

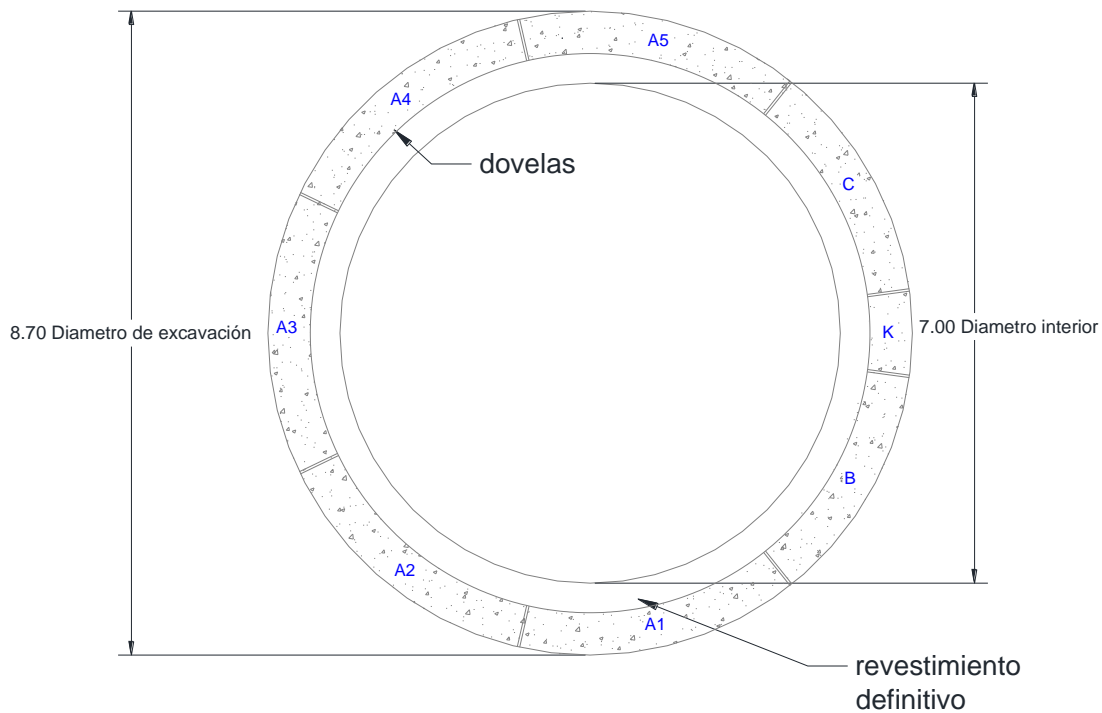
Actualmente, el sistema de drenaje de la ciudad es ineficiente debido a los asentamientos regionales originados por la explotación de los mantos acuíferos y se ha perdido la pendiente de diseño, originando deficiencia en la capacidad de desalojo, por lo que se ha recurrido a sistemas de bombeo para drenar las aguas residuales.

A raíz de ello, se optó por la construcción del proyecto de infraestructura denominado Túnel Emisor Oriente el cual contempla una longitud de 62 Km aproximadamente. Durante su construcción, contará con 24 lumbreras y el portal de salida los cuales servirán de manera complementaria para la construcción y su operación. El proyecto da inicio en la Avenida gran Canal en el Distrito federal, pasando por los municipios de Tultepec, Ecatepec, Teoloyucan, Huehuetoca, Coacalco, Melchor Ocampo pertenecientes al Estado de México, para desembocar en los Ejidos de Conejos donde se encuentra el Portal de Salida en el Estado de Hidalgo. La distancia promedio entre lumbreras es de 3 km aproximadamente, y van de los 32 metros hasta los 149 metros de profundidad, situadas en distintos estratos geológicos.

Una de las características principales del túnel es la pendiente, ya que en el tramo que va de la lumbrera L-00 a la Lumbrera L-06 tiene una pendiente de 0.19% y el tramo siguiente de la Lumbrera L-06 al Portal de salida tendrá una pendiente del 0.16%. Los tramos en los que nos enfocaremos serán: el tramo 3 que está conformado de la lumbrera L-10 a la lumbrera L-13 y el tramo 4 que está conformado de la lumbrera L-13 a la Lumbrera L-17. Las lumbreras como se ha mencionado, son estaciones primordiales para la construcción del túnel, ya que mediante éstas se hace el suministro de herramientas y materiales que requiere la maquina tuneladora; sus características varían debido a que algunas están construidas para el ensamble de la máquina, así como el montaje de la estructura de reacción, instalación del sistema de bandas encargado de la extracción del material originado por la excavación, suministro de dovelas, y demás aditamentos que requiere la maquina TBM .

La configuración del túnel está integrada por dos revestimientos: el primero está formado por las dovelas de concreto con el acomodo que se indica en la figura 1, y el revestimiento secundario o definitivo está conformado por concreto reforzado colado en el sitio de ejecución.





**Figura 1. CONFIGURACIÓN DEL REVESTIMIENTO QUE CONFORMA EL TÚNEL**

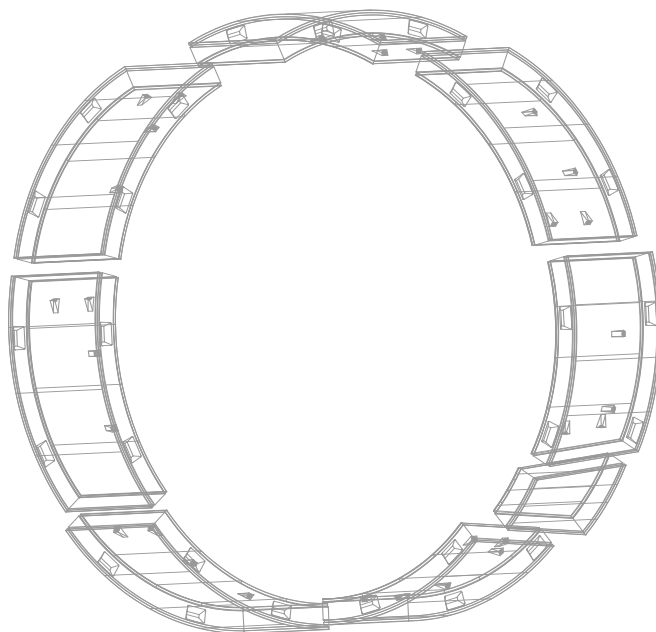
La excavación del Túnel Emisor Oriente se lleva a cabo mediante una máquina tuneladora TMB (Tunnel Boring Machine) que tiene como característica trabajar con Empuje Balanceado de Tierras, por lo que toma parte del material excavado, el cual pasa a la cámara de amasado para crear una contrapresión que permite una estabilización del frente, debido a esto, no se presenta ninguna consecuencia en superficie.

El escudo forma el túnel por medio de las dovelas prefabricadas, que dan forma al revestimiento primario que servirá como estructura primaria para detener las deformaciones generadas por la excavación en el terreno.

Por otra parte, el anillo está conformado por siete dovelas, (A1, A2, A3, A4, A5, B y C) más una dovela cuña (K) que es una dovela de cierre y universal, estas dovelas tienen un espesor de 40 cm, las dovelas A1, A2, A3, A4 y A5 contienen las mismas dimensiones geométricas, al igual que las dovelas B y C que comparten dimensiones iguales, la dovela K aparte de realizar la función de cierre en la conformación del anillo, tiene como función cambiar la orientación del avance del túnel que se requiera.

El concreto utilizado para la construcción de dovelas y revestimiento definitivo es de clase I, resistente a sulfatos y a una compresión que va de los 500 a los 550 kg/cm<sup>2</sup> a 28 días; el acero de refuerzo a utilizar tiene una resistencia a la fluencia de 4200 kg/cm<sup>2</sup>.

Las condiciones a la que será expuesto el túnel serán ejercidas por los esfuerzos verticales generados por el peso volumétrico del estrato y el empuje hidrostático.



**Figura 2 COMPOSICIÓN DEL REVESTIMIENTO PRIMARIO**

---

## **2. INSTRUMENTACIÓN**

---

Se define como instrumentación a la aplicación conocimientos teóricos y prácticos que están enfocados en el uso de aparatos especializados con el fin de obtener información cualitativa y cuantitativa de los elementos y el comportamiento de una estructura.

El conjunto de labores necesarias para el control del comportamiento de una excavación subterránea se engloba bajo el término auscultación.

El plan de auscultación y control de obra debe satisfacer los siguientes objetivos generales:

- Controlar y verificar la correcta construcción de las obras diseñadas y prevenir el desarrollo de cualquier accidente o daños a personas y cosas que pudiese relacionarse con la ejecución de las obras subterráneas. Un programa de auscultación bien diseñado puede lanzar una alarma inmediata que permita adoptar medidas efectivas que se anticipen a un fallo estructural.
- Garantizar la seguridad del entorno de la excavación
- Confirmar las hipótesis de partida que sirvieron de base al diseño del túnel: el análisis del comportamiento de las estructuras durante la construcción permite mediante análisis retrospectivo, confirmar que las condiciones geológicas asumidas en el diseño se ajustan a las condiciones reales: perfil del suelo y las características geotécnicas, niveles piezométricos, cargas externas, etc.

También permite la mejora y la optimización del diseño y la ejecución de las obras. La comprobación de la hipótesis del diseño se basa en comparar las mediciones in situ con las estimaciones siguientes hechas durante la fase de diseño:

- Presión de tierras y agua y empuje de gatos sobre los anillos de dovelas
- Deformaciones del revestimiento del túnel
- Asientos en superficie
- Niveles piezométricos
- Conocer el comportamiento a largo plazo de la estructura. El programa de auscultación debe prolongarse más allá del final de la construcción para analizar si el comportamiento post-construcción se ajusta a la hipótesis de diseño.
- Para cada estructura, el plan de auscultación definirá la siguiente información:
  - Variables que se deben medir: desplazamientos, presiones, etc.
  - Métodos de medición o sistemas de medición

- Localización de mediciones: Localización de las secciones de control y de la instrumentación a instalar dentro de cada una de las secciones de control
- Comienzo y final de las mediciones
- Intervalo de mediciones
- Umbrales de control
- Transmisión de las mediciones efectuadas
- Directrices de acción en caso de alcanzarse los niveles de acción
- Tipo y alcance de la interpretación de los resultados de la medición
- Asimilación del programa de auscultación dentro del proceso constructivo

Es necesario que previamente a la implantación de la instrumentación y la obtención de resultados propios de la auscultación, se hayan presentado y aprobado los procedimientos correctos a emplear en caso necesario.

---

### **3. DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS A UTILIZAR: “ANILLO INSTRUMENTADO Y SISTEMA DE CONVERGENCIAS AUTOMATIZADO (SCA)”**

---

#### **3.1 Anillo instrumentado**

Para dar continuidad al comportamiento del túnel en sus componentes (dovelas) después de su instalación en el túnel, se optó por la instalación de instrumentos en el

interior de estas durante su construcción con el fin de monitorear las cargas ejercidas por el terreno natural sobre el revestimiento primario.

Estos instrumentos se encuentran instalados según el modelo conceptual de instrumentación para dovelas. Los elementos a instrumentar son las dovelas A1, A3, A5 y K, están conformadas por cinco instrumentos por dovela (una celda de presión, dos deformímetros de acero y dos deformímetros de concreto). En la figura No. 2 se presenta un dibujo esquemático con el arreglo y localización de los instrumentos en cada una de las dovelas que conforman el anillo instrumentado.

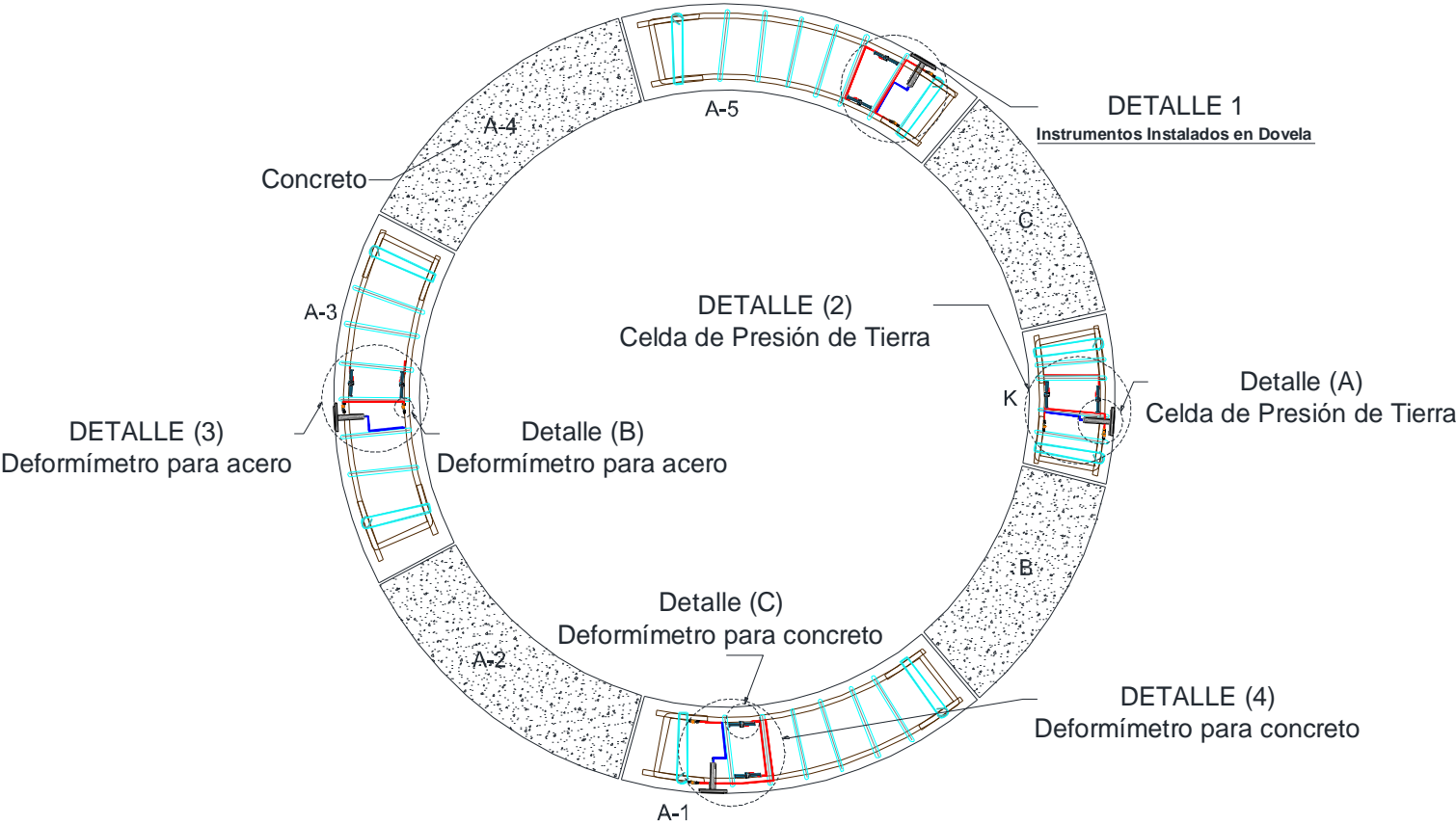
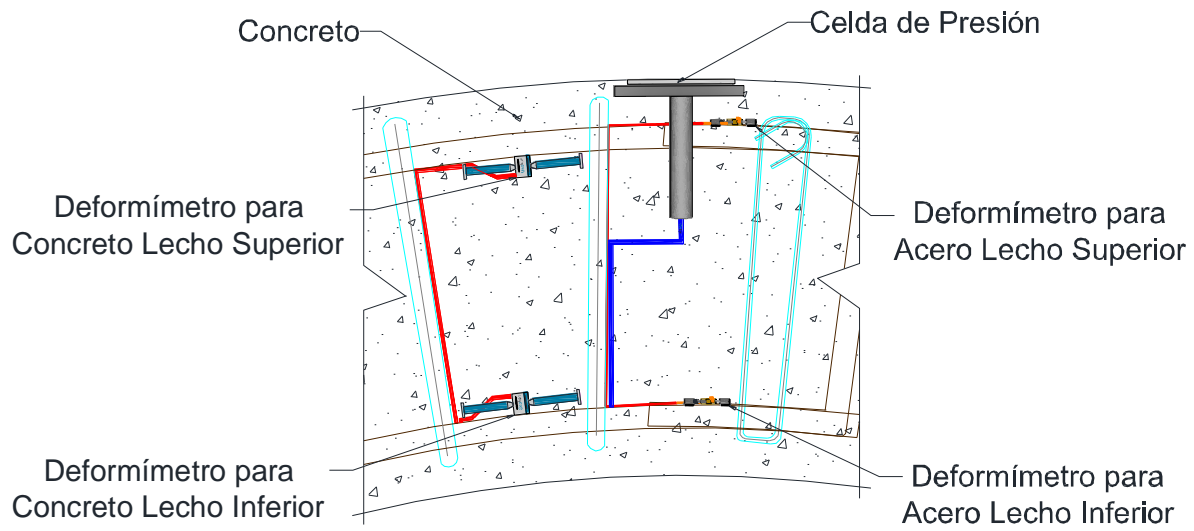
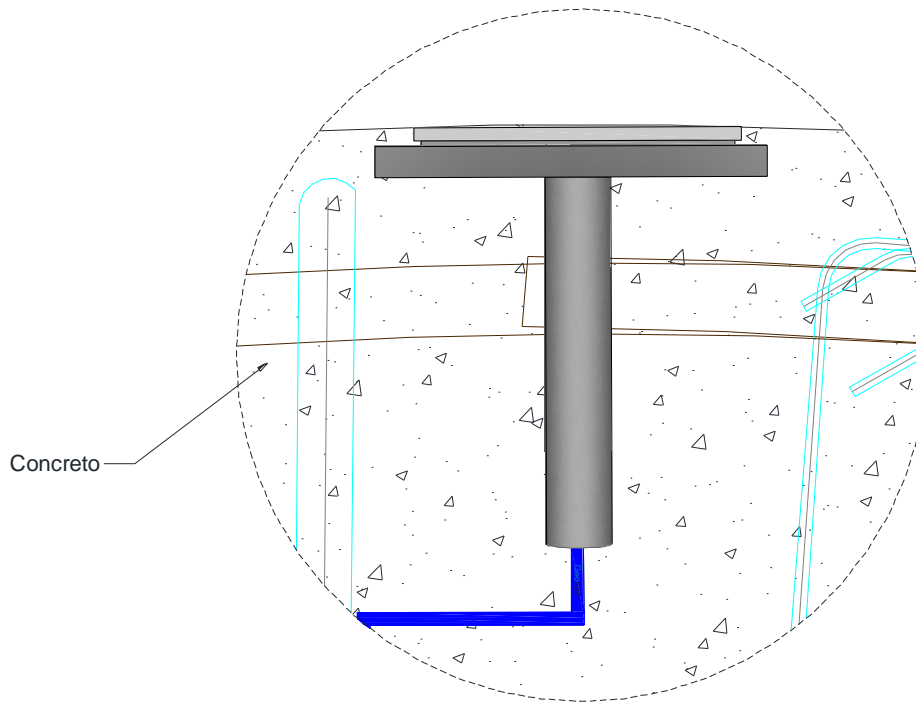


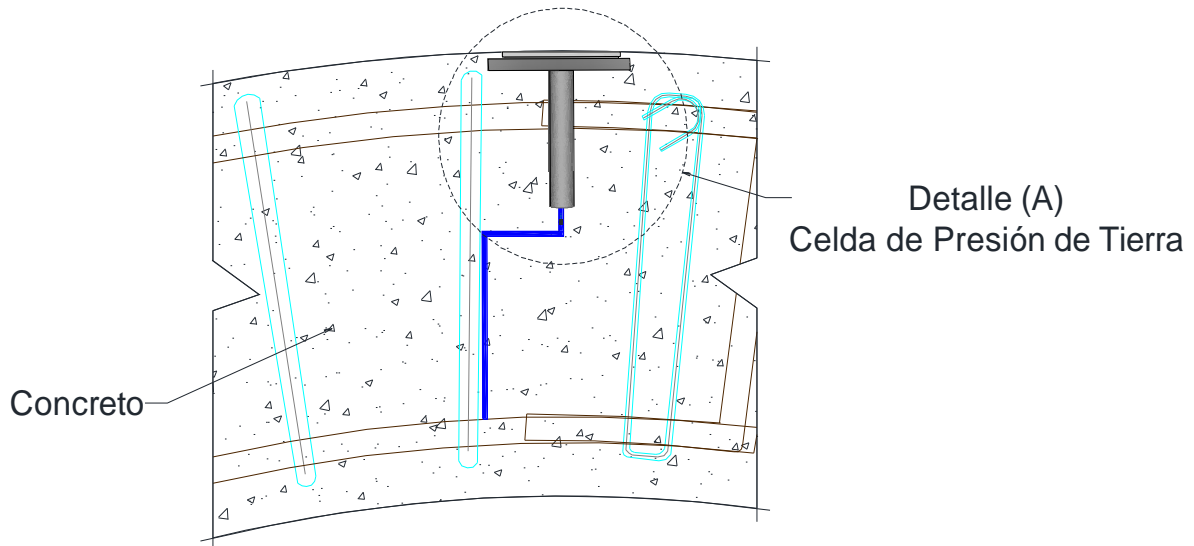
Figura 3. AREGLO DE INSTRUMENTOS EN ANILLO INSTRUMENTADO



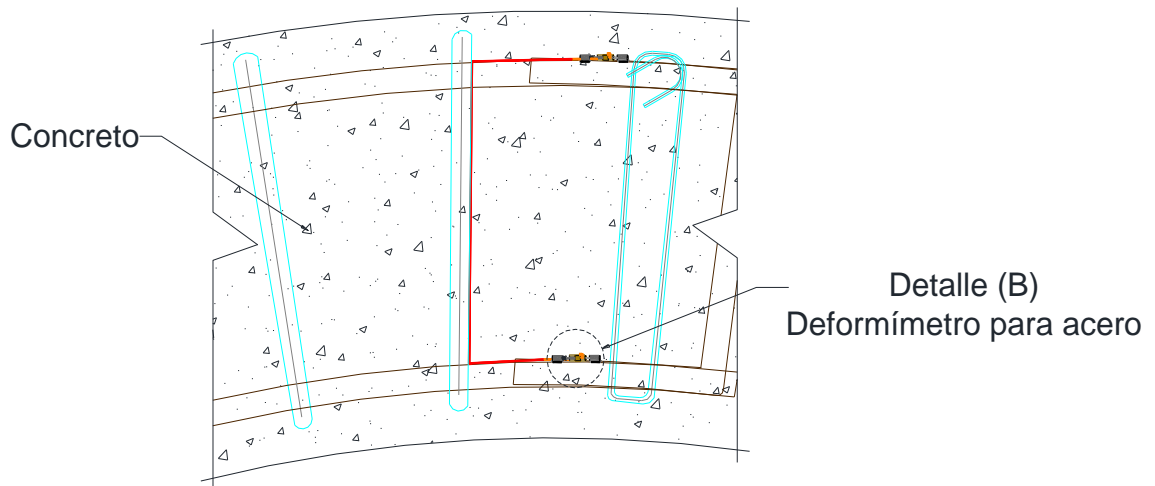
**Detalle (1) INSTRUMENTOS INSTALADOS EN DOVELA**



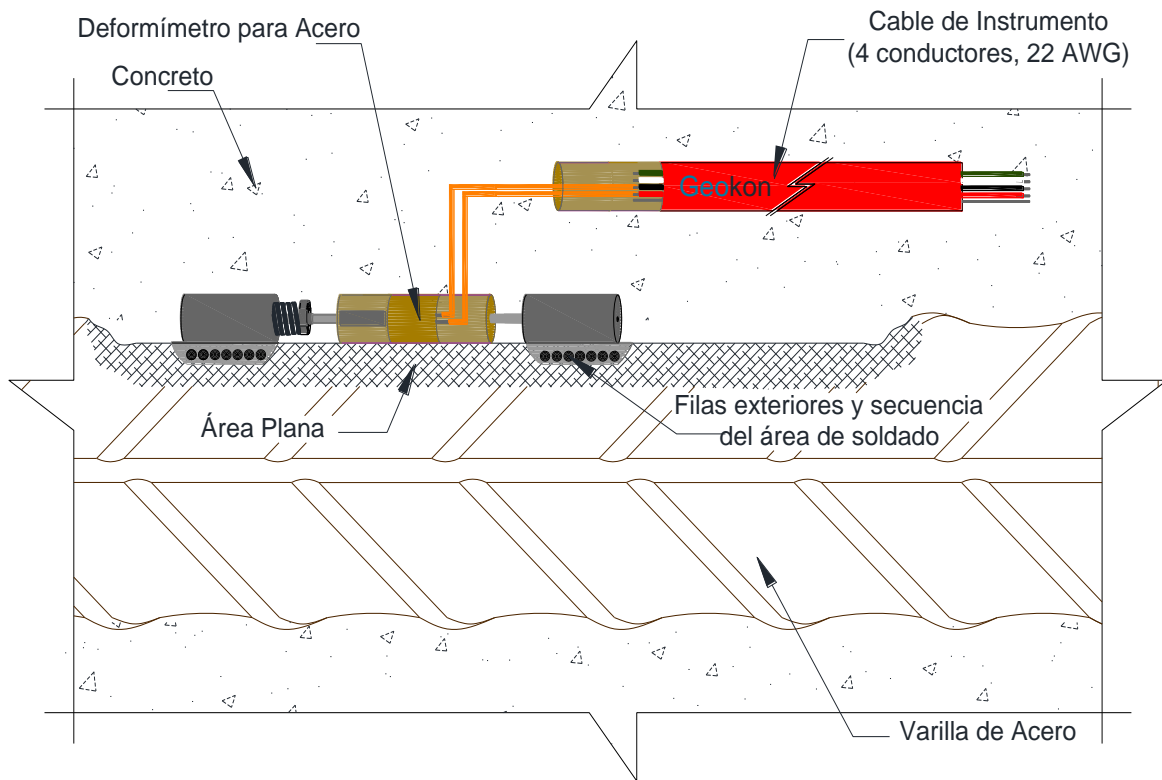
**Detalle (2) CELDA DE PRESIÓN DE TIERRA**



**Detalle (A) CELDA DE PRESIÓN DE TIERRA**



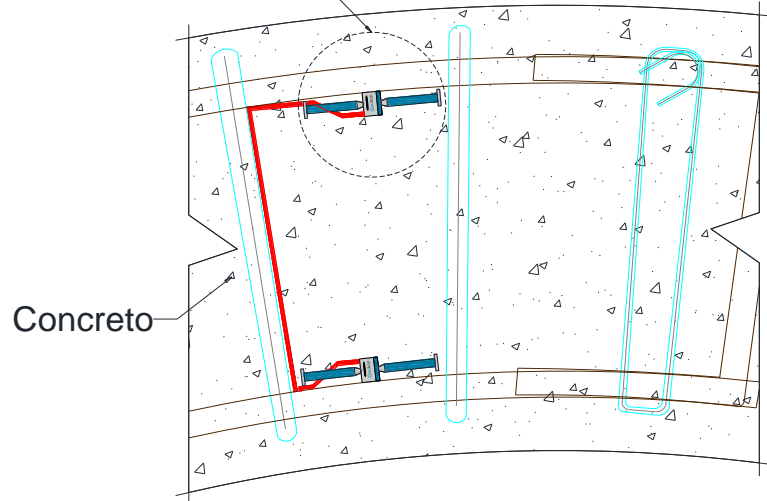
**Detalle (3) DEFOFMÍMETRO PARA ACERO**



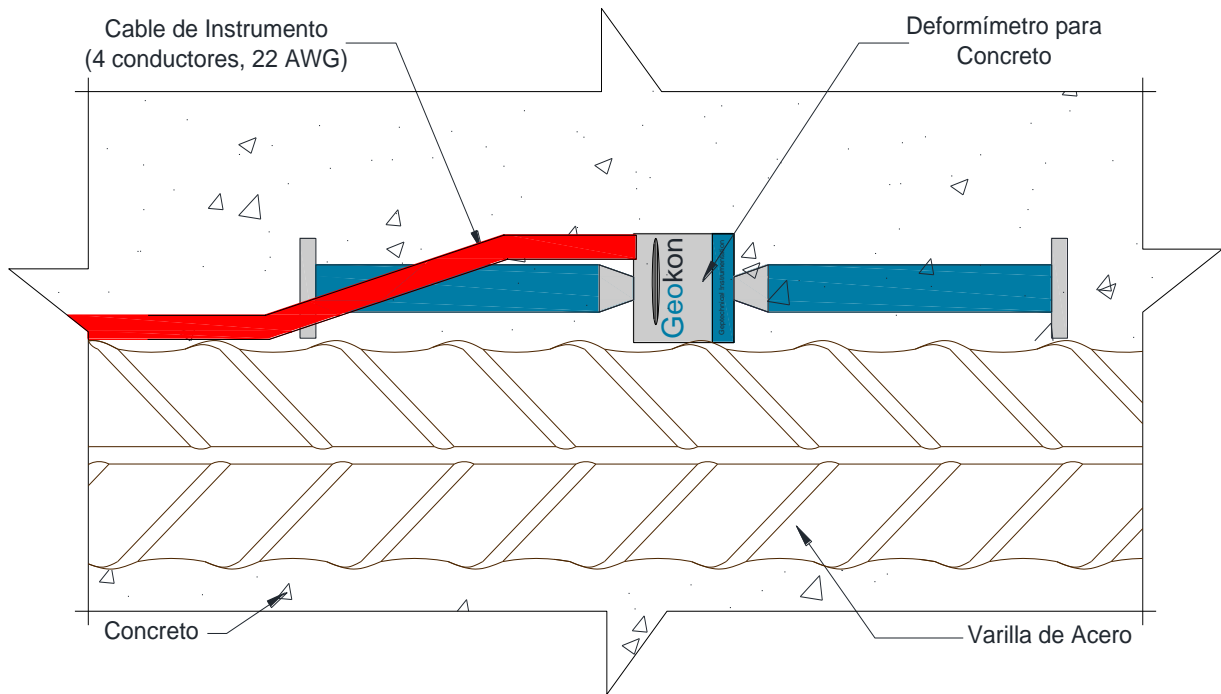
**Detalle (B) DEFORMÍMETRO PARA ACERO**



Detalle (C)  
Deformímetro para Concreto



Detalle (4) DEFORMÍMETRO PARA CONCRETO



Detalle (C) DEFORMÍMETRO PARA CONCRETO

### 3.2 Celdas de presión

Uno de los instrumentos a instalarse son las celdas de presión, que están diseñadas para determinar el esfuerzo ejercido por el terreno a las estructuras, en este caso el túnel.

Estas celdas se constituyen a partir de dos placas de acero inoxidable soldadas entre sí alrededor de su periferia y separadas por un pequeño hueco de fluido hidráulico. Debido a las presiones externas, se aprietan las dos placas creando una presión en el fluido, el cual está conectado por medio de un tubo de acero inoxidable a un transductor de presión que convierte la presión del fluido en una señal eléctrica transmitida por un cable a la ubicación de lectura, en este caso a una caja galvanizada que será colocada para el facilitar el monitoreo. Dicho sea de paso, están diseñadas para ser instalados en muros pantalla, para controlar las presiones del suelo en excavaciones, debido a que permiten la acumulación de presiones excesivas que pueden alterar las estructuras.

Estos instrumentos pueden ser complementados por piezómetros, los cuales pueden medir la presión de poro.

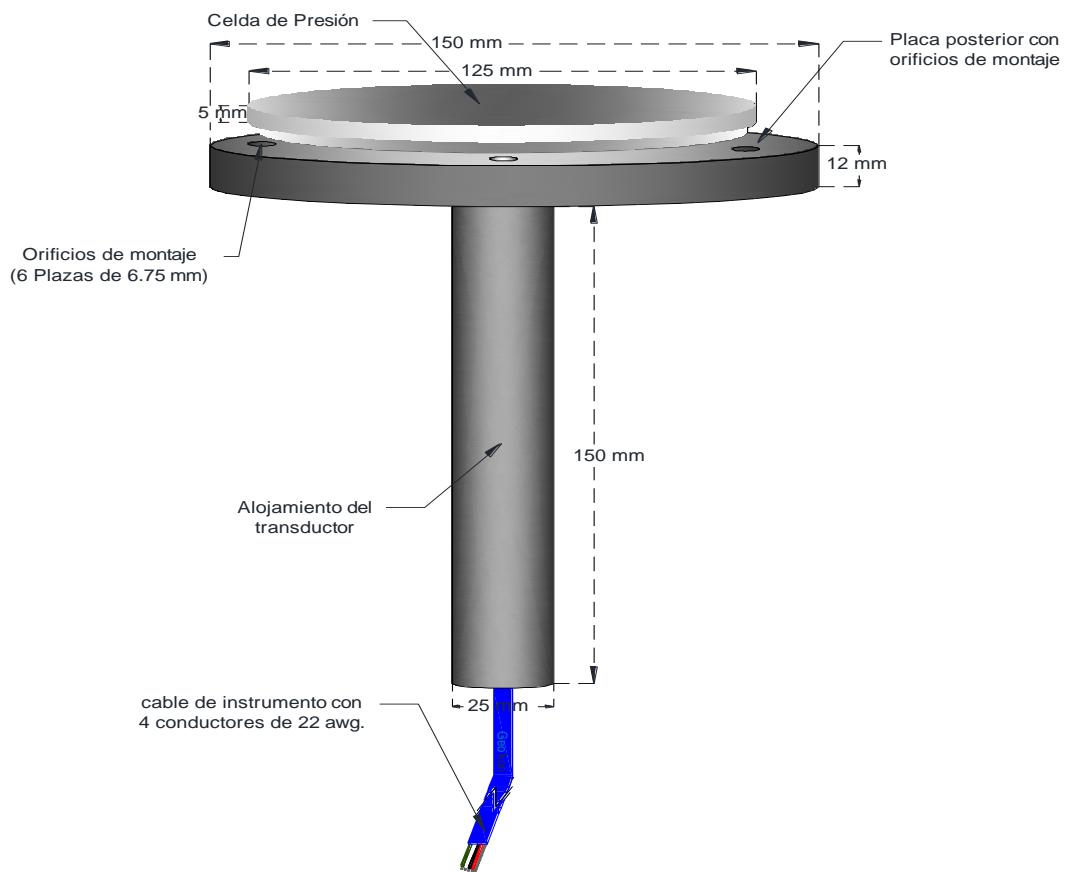


Figura 4. CONFIGURACIÓN CELDA DE PRESIÓN

Cada celda instalada debe estar certificada por una ficha de calibración la cual garantiza el buen funcionamiento del equipo durante su vida útil, además, facilita los parámetros iniciales del instrumento como son: presión barométrica antes y después de la calibración, temperatura, lectura inicial y factor de calibración (estos servirán para determinar los esfuerzos nominales en una hoja de cálculo).

A continuación se describen las especificaciones técnicas de la celda de presión a utilizar.

| <b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MODELO 4820 MARCA GEOKON</b> |                           |
|---|---------------------------|
| <b>TIPO TRANSDUCTOR</b>                                   | CUERDA VIBRANTRE          |
| <b>RANGO ESTÁNDAR</b>                                     | 350, 700 KPa; 1,2,3,5 MPa |
| <b>EN RANGO</b>   | 150% F.S (max)            |
| <b>PRESICIÓN</b>  | ±0.1% F.S.                |
| <b>RESOLUCIÓN</b>   | ±0.025% F.S               |
| <b>LINEALIDAD</b>   | <0.5% F.S.                |
| <b>EFECTO TÉRMICO EN CERO</b>                             | <0.05% F.S.               |
| <b>RANGO DE TEMPERATURA</b>                               | -20°C a +80°C             |
| <b>DIMENSIONES CELDA DE PRESIÓN (HxD)</b>                 | 12 X 150 mm               |
| <b>DIMENSIONES DEL TRANSDUCTOR (L x D)</b>                | 150 X 25 mm               |
| <b>MATERIAL</b>   | ACERO INOXIDABLE 304      |

Tabla 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS CELDA DE PRESIÓN

### 3.3 Deformímetro de acero

Este instrumento cumple la función de determinar las deformaciones en la superficie de estructuras de acero, pero también pueden ser instaladas en otros materiales.

Se conforman de un cable de acero tensado entre dos fichas de montaje. Estas fichas están unidas a las pestañas de acero inoxidable que pueden ser soldadas por puntos a la superficie en cuestión. La deformación de la estructura se determina debido a los esfuerzos que se ejercen hace en los fichas de extremo se muevan uno respecto a otro, dando como resultado un cambio en la tensión del alambre, esta tensión se medirá tirando de la cuerda, obteniendo la frecuencia en la resonancia de la vibración del cable. Por medio del equipo de monitoreo (VW Data recorder) que es el encargado de generar el tirado de la cuerda por el voltaje que genera al poner en contacto los cables del instrumento con los polos del equipo de medición, produce la frecuencia de vibración que será traducida a unidades de  $Hz^2$ .

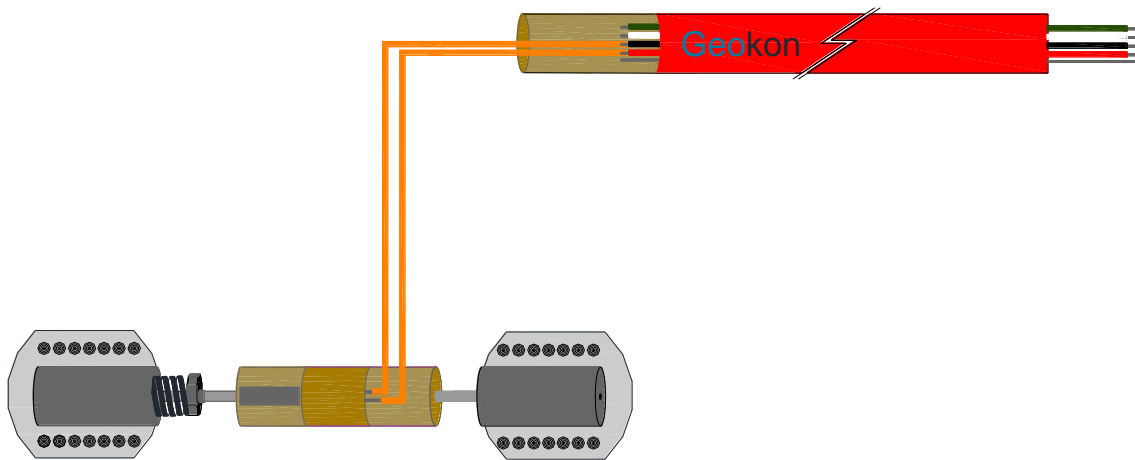


Figura 5. CONFIGURACIÓN DE DEFORMÍMETRO DE ACERO

Cabe mencionar las características de los materiales a monitorear (en este caso el acero de refuerzo) tiene una resistencia de fluencia de  $4,200 \text{ kg/cm}^2$ .

Enseguida se mencionan las características técnicas del deformímetro de acero que se instalarán.

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MODELO 4150 MARCA GEOKON |                    |
|--|--------------------|
| RANGO ESTÁNDAR                                     | 3000 $\mu\epsilon$ |
| RESOLUCIÓN   | 0.4 $\mu\epsilon$  |
| PRECISIÓN  | $\pm 0.5 \%$ F.S.  |
| NO LINEALIDAD                                      | $< 0.5 \%$ F.S.    |
| RANGO DE TEMPERATURA                               | -20°C a +80°C      |
| LONGITUD ACTIVA DEL CALIBRADOR                     | 51 mm              |

Tabla 2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE DEFORMÍMETRO DE ACERO

### 3.4 Deformímetro de concreto

El deformímetro tiene una longitud de 153 mm y se utiliza usualmente para medidas de deformación en pilotes, puentes, presas, vasos de contención, revestimientos de túneles, etc. Trabajan bajo el concepto de cuerda vibrante; este mecanismo como se ha mencionado trabaja por medio del tensado de un tramo de alambre de acero entre dos fichas que se incrustan directamente en el concreto, la tensión se genera por medio de aplicación de una descarga la cual genera una resonancia la cual es determinada por el equipo de medición que en este caso el VW Data recorder.

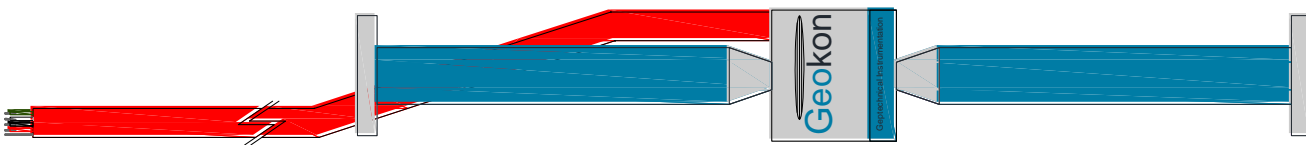


Figura 6. CONFIGURACIÓN DE DEFORMÍMETRO DE CONCRETO

A continuación se determinan las características técnicas del deformímetro de concreto:

| <b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MODELO 4200 MARCA GEOKON</b> |                    |
|---|--------------------|
| <b>RANGO ESTÁNDAR</b>                                     | 3000 $\mu\epsilon$ |
| <b>RESOLUCIÓN</b>   | 1.0 $\mu\epsilon$  |
| <b>PRECISIÓN</b>  | $\pm 0.5\%$ F.S.   |
| <b>NO LINEALIDAD</b>                                      | $< 0.5\%$ F.S.     |
| <b>RANGO DE TEMPERATURA</b>                               | -20°C a +80°C      |
| <b>LONGITUD ACTIVA DEL CALIBRADOR</b>                     | 153 mm             |
| <b>COEFICIENTE TÉRMICO DE EXPANSIÓN</b>                   | 12..0 ppm/°C       |
| <b>RESISTENCIA DE BOBINA</b>                              | 180 $\Omega$       |
| <b>TIPO DE CABLE</b>                                      | 4 CONDUCTORES      |
| <b>FRECUENCIA DE REFRENCIA DE DATOS</b>                   | 800 Hz             |

Tabla 3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE DEFORMÍMETRO DE CONCRETO

### 3.5 Nomenclatura

Con el objetivo de diferenciar correctamente cada instrumento de cada anillo instrumentado, se asigna una nomenclatura a cada instrumento según corresponda su ubicación:

**CELPD-T4-A819-A3-10**

**DEFAI-T4-A819-A3-06**

**DEFCI-T4-A819-A3-08**

- CELPD= Celda de presión
- DEFA=Deformímetro para acero, lecho inferior (I) o superior (s)
- DEFC=Deformímetro para concreto, lecho inferior (I) o superior (s)
- T4=Tramo 4 (Número de tramo)
- A819=Número de anillo que corresponda
- 10=Número consecutivo de instrumento en el anillo

Como se ha mencionado previamente, el anillo instrumentado cuenta con 20 instrumentos, los cuales son regidos por la nomenclatura establecida, por lo que la configuración sería la siguiente:

| <b>ANILLO N° 819</b> |                             |                      |                             |
|----------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|
| <b>DOVELA<br/>A1</b> | <b>NOMENCLATURA</b>         | <b>DOVELA<br/>A3</b> | <b>NOMENCLATURA</b>         |
|                      | <b>DEFAI-T4-A819-A1-01</b>  |                      | <b>DEFAI-T4-A819-A3-06</b>  |
|                      | <b>DEFAS-T4-A819-A1-02</b>  |                      | <b>DEFAS-T4-A819-A3-07</b>  |
|                      | <b>DEFCEI-T4-A819-A1-03</b> |                      | <b>DEFCEI-T4-A819-A3-08</b> |
|                      | <b>DEFCS-T4-A819-A1-04</b>  |                      | <b>DEFCS-T4-A819-A3-09</b>  |
|                      | <b>CELPD-T4-A819-A1-05</b>  |                      | <b>CELPD-T4-A819-A3-10</b>  |
| <hr/>                |                             |                      |                             |
| <b>DOVELA<br/>A5</b> | <b>NOMENCLATURA</b>         | <b>DOVELA<br/>K</b>  | <b>NOMENCLATURA</b>         |
|                      | <b>DEFAI-T4-A819-A5-11</b>  |                      | <b>DEFAI-T4-A819-K-16</b>   |
|                      | <b>DEFAS-T4-A819-A5-12</b>  |                      | <b>DEFAS-T4-A819-K-17</b>   |
|                      | <b>DEFCEI-T4-A819-A5-13</b> |                      | <b>DEFCEI-T4-A819-K-18</b>  |
|                      | <b>DEFCS-T4-A819-A5-14</b>  |                      | <b>DEFCS-T4-A819-K-19</b>   |
|                      | <b>CELPD-T4-A819-A5-15</b>  |                      | <b>CELPD-T4-A819-K-20</b>   |

Tabla 4. NOMENCLATURA ANILLO INSTRUMENTADO

### 3.6 Sistema Convergencias Automatizado (SCA)

Se define como un sistema automatizado a aquél que monitorea y registra los movimientos entre las juntas con precisión; funciona con base en la variación de la inclinación de sensores denominados “Tiltmeters”, estos envían la información a un instrumento de almacenamiento denominado Datalogger para su posterior descarga y procesamiento de la información. Este sistema se caracteriza por su instalación ya que los instrumentos quedan fijados perimetralmente a la pared de concreto del anillo.

El siguiente diagrama esquemático representa el sistema de convergencias automatizado, una vez instalado en el anillo.

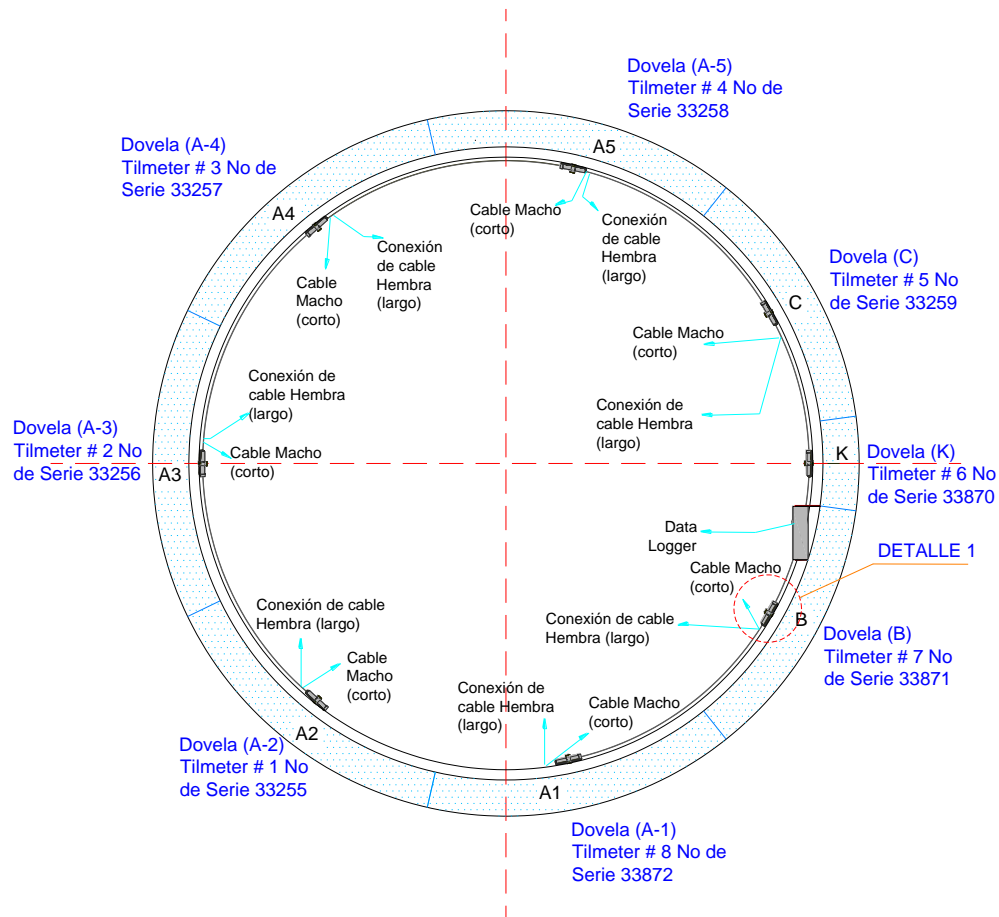


Figura 7. DISTRIBUCIÓN DE SISTEMA DE CONVERGENCIAS AUTOMATIZADO

Los “tiltmeters” o inclinómetros quedan apoyados en una placa que trabaja como base sujeta a la dovela, esta base da la libertad al tiltmeter de modificar la orientación de su eje vertical para quedar correctamente fijo.



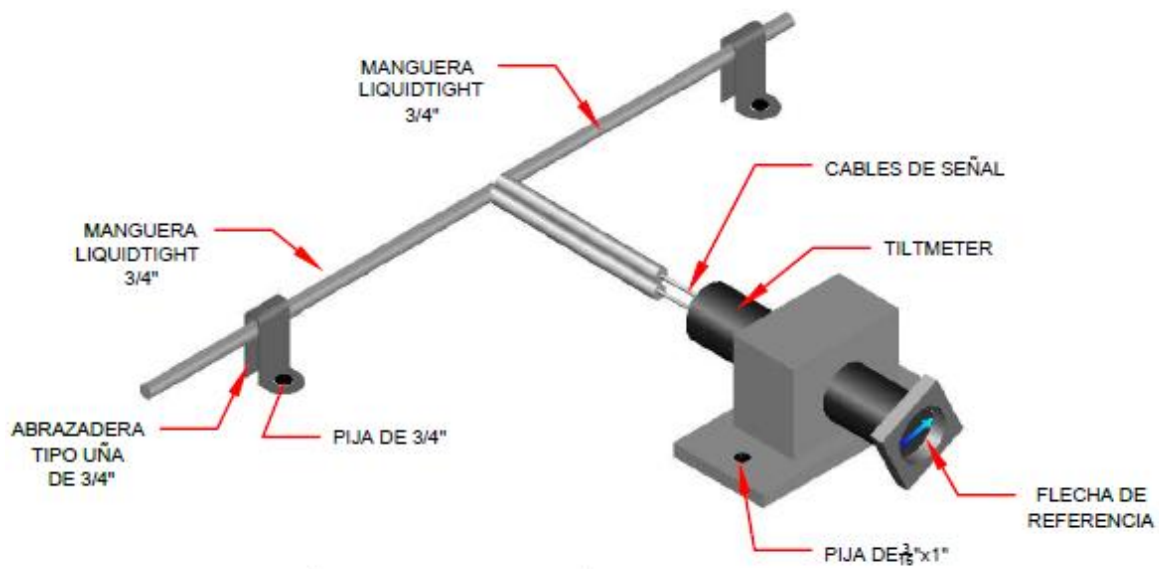


Figura 8. TILTMETER O CLINÓMETRO

El funcionamiento de los tiltmeters se basa en desplazamientos angulares, los cuales transforma a algoritmos matemáticos que representa deformaciones en el anillo.

A continuación se describen los componentes que conforman el Sistema de convergencias automatizado (SCA)

- Sensores de inclinación (Tiltmeters)
- Cable de interconexión de tiltmeters
- Conector de cada tiltmeters
- Sistema de registro de datos (Datalogger)
- Software geovewer (Logger Net)

Enseguida se presentan los parámetros de los sensores tiltmeters:

| ESPECIFICACIONES     | PARÁMETROS   |
|----------------------|--|
| <b>RANGO</b>         | $\pm 15^\circ$                                     |
| <b>RESOLUCIÓN</b>    | $\pm 2$ SEGUNDOS DE ARCO. (0.0006 °) (0.001 mm/ m) |
| <b>NO LINEALIDAD</b> | $\pm 0.0125\%$ F.S. (0.002°)( 0.03 mm/m)           |
| <b>REPETIBILIDAD</b> | $\pm 0.0125\%$ F.S. (0.002°)( 0.03 mm/m)           |

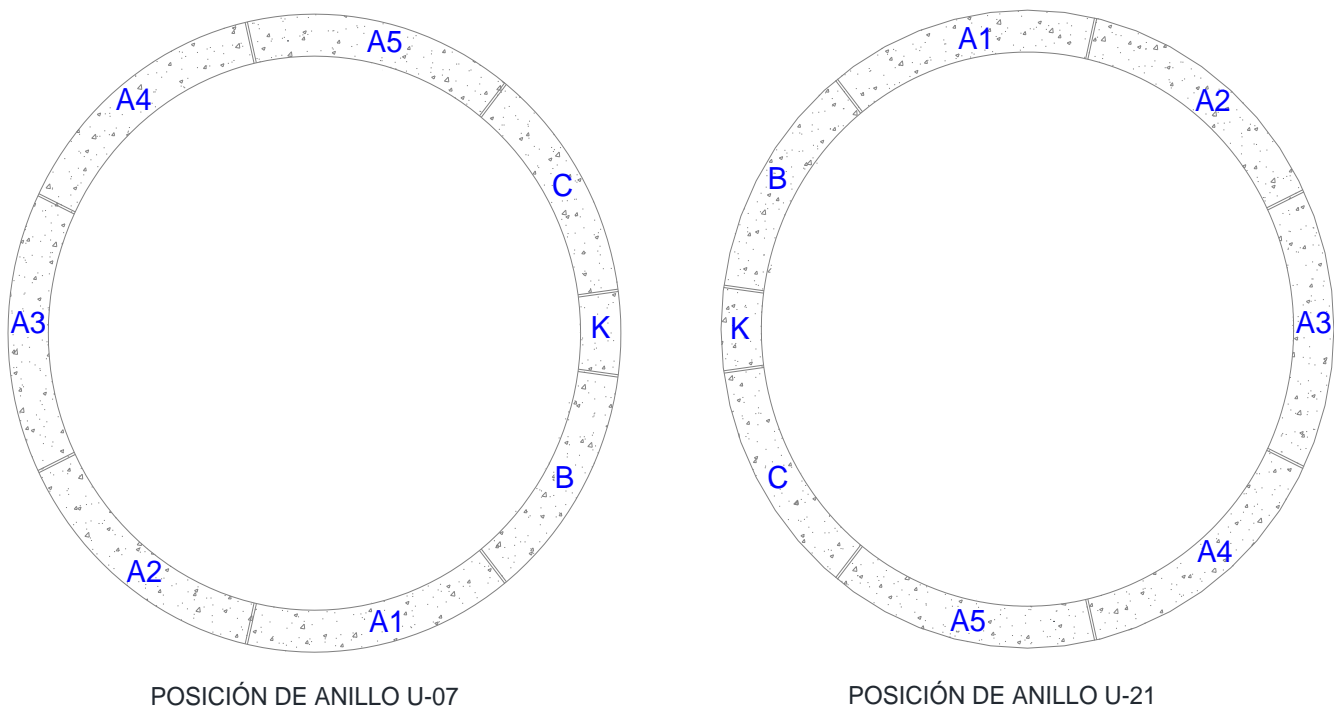
|  |   |
|--|---|
| <b>PRECISIÓN DEL SISTEMA</b>                                     | 1 mm DE CONVERGENCIA TÍPICA                                       |
| <b>SENSOR</b>  | MEMS (MICRO-ELECTRO-SISTEMA MECÁNICOS) ACELERÓMETROS, BUS DIGITAL |
| <b>TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO</b>                             | -40 HASTA '85°C (-40 HASTA 185°F)                                 |
| <b>4 CONDUCTORES, CABLE CALIBRE 22 CON CAMISA DE POLIURETANO</b> | EL380004  |

Tabla 5. ESPEFICACIONES TÉCNICAS TILTMETER

## 4. PROCEDIMIENTOS DE INSTALACIÓN

Los instrumentos que formaran parte del anillo instrumentado son instalados previos al colado para poder identificar el comportamiento de este, desde su construcción hasta el momento que forma parte del revestimiento primario, basándose en los modelos conceptuales, se ubica la localización de dichos aparatos, así como el arreglo de instrumentos por dovela y el cadenamiento del trazo del túnel en el que se deben ubicar.

La posición de anillo instrumentado será la posición U-7 y U-21 que son las posiciones en donde las dovelas a instrumentar forman parte importante del anillo como son las cubeta, la clave y ambos hastiales del anillo, Figura



#### **4.1 Materiales y herramientas**

Para la instalación de dichos instrumentos es necesario contar con los siguientes materiales y herramientas:

##### **Materiales**

- Deformímetro para concreto
- Deformímetro para acero
- Celda de presión de tierra
- Collarín (cinta de acero)
- Protectores de acero
- Caja reforzada galvanizada de 3¾" X 3¾" X 2½" modelo 691 marca RACO
- Tapa cuadrada de 4" modelo 752 marca RACO
- Pija galvanizada de 3/16 X 3/4
- Cinta de aislar
- Cinta para ducto
- Cera
- Caucho (masilla para aislamiento)
- Cinchos plásticos
- Desarmador de cruz
- Pinzas de corte
- Alambre recosido

##### **Herramientas**

- VW Data Recorder
- Mini planta con soldadura de puntos en acción corta
- Esmeril
- Disco para desbastado del acero
- Extensión

- Caja con diversas herramientas de montaje manual

## **4.2 Celda de presión**

La instalación de estos instrumentos tiene lugar en el proceso previo al colado de las dovelas, basándose en los modelos conceptuales como se ha explicado previamente. La configuración para el arreglo de celdas de presión es de una celda de presión por dovela, por lo que el anillo tendrá cuatro celdas con el fin de monitorear las cuatro zonas importantes para determinar los empujes en las zonas mencionadas.

Para la instalación de la celda de presión se recomienda realizar estas actividades previas con el fin de optimizar el proceso.

- Identificar que el área de acero donde será fijado nuestro instrumento se encuentre libre de grasa o corrosión.
- Identificar que el acero de refuerzo se encuentre fijo.
- Se realiza una prueba de verificación del instrumento con la ayuda de una consola (VW DATA RECORDER), tomando los cables de la celda conectándolos a los polos del aparato de monitoreo.
- 

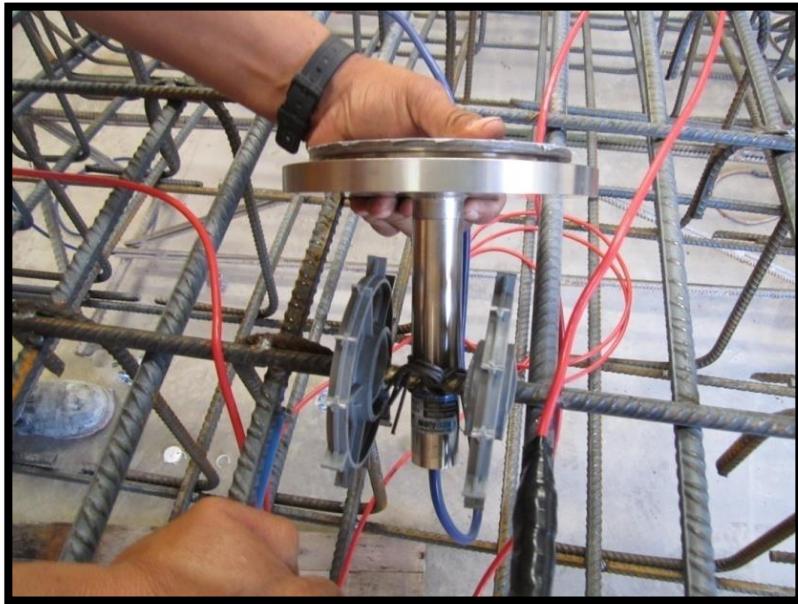
Una vez realizado las actividades previas se procede con la instalación del instrumento, a continuación se describe detalladamente la fijación de este en el acero de refuerzo.

- Con ayuda del alambre recocado se fija el transductor en el acero de refuerzo. Ver fotografía No. 1.



Fotografía 1.

- Se hace uso de separadores, los cuales servirán para fijar en el fondo la celda en el acero de refuerzo. Ver fotografía No. 2.



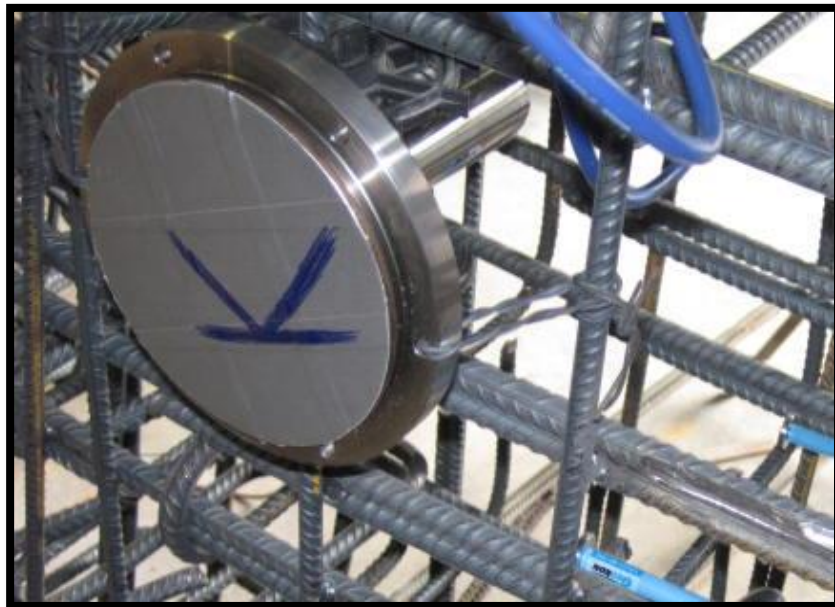
Fotografía 2.

- Para la fijación completa de la celda de presión, se utiliza de nuevo el alambre recosido para sujetarlo por medio de sus orificios al acero de refuerzo. Ver fotografía No. 3.



Fotografía 3.

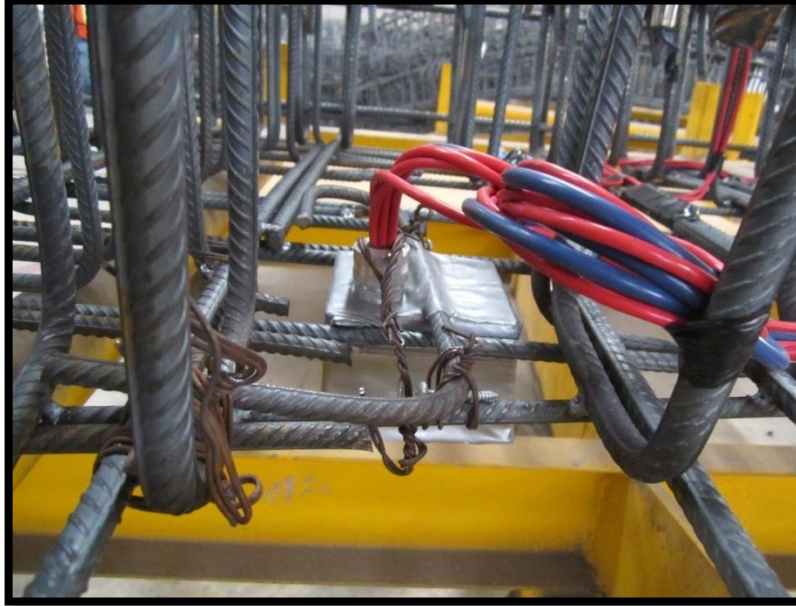
- Una vez que se ha colocado de manera correcta la celda, se procede a cubrir con cinta de aislar la cara sensible del instrumento, con el fin de que no se vea dañada en el colado de la dovela. Ver fotografía No. 4.



Fotografía 4.

- En el lecho interior del armado de la dovela se procede a colocar la caja galvanizada, fijándola con el fin de asegurar los cables excedentes de los instrumentos, además de facilitar el procedimiento de monitoreo.

- La ubicación de la caja galvanizada estará en función de evitar obstruir la cimbra para el colado de la dovela. Ver fotografía No. 5.



Fotografía 5.

- Posteriormente a la fijación de la caja galvanizada y la celda de presión, se comienza con el canalizado de los cables al acero de refuerzo utilizando cinchos plásticos. Ver fotografía No. 6.



Fotografía 6.

- Se coloca el excedente de los cables en la caja galvanizada y se tapa la caja con ayuda de pijas, sellando de manera correcta cada uno de los huecos con cinta para ducto de manera que al momento del colado no se filtren algunos agregados finos. Ver fotografía No. 7.



Fotografía 7

- Una vez que se encuentra el acero de refuerzo en la cimbra de la dovela, se procede a nivelar la cara sensible de la celda con los límites del molde, quedando lista para el colado. Ver fotografía No. 8.





Fotografía 8.

- Terminado el colado se retira la cinta que cubre la cara sensible para limpiarla y delimitarla, para continuar con el curado de la dovela. Ver fotografía No. 9.



Fotografía 9.

- Por último, se realiza el monitoreo que corresponde a la verificación del funcionamiento de los instrumentos después del colado. Ver fotografía No. 10.



Fotografia 10.

A continuación se muestra de manera de detallada la ubicación de los instrumentos una vez instalados:

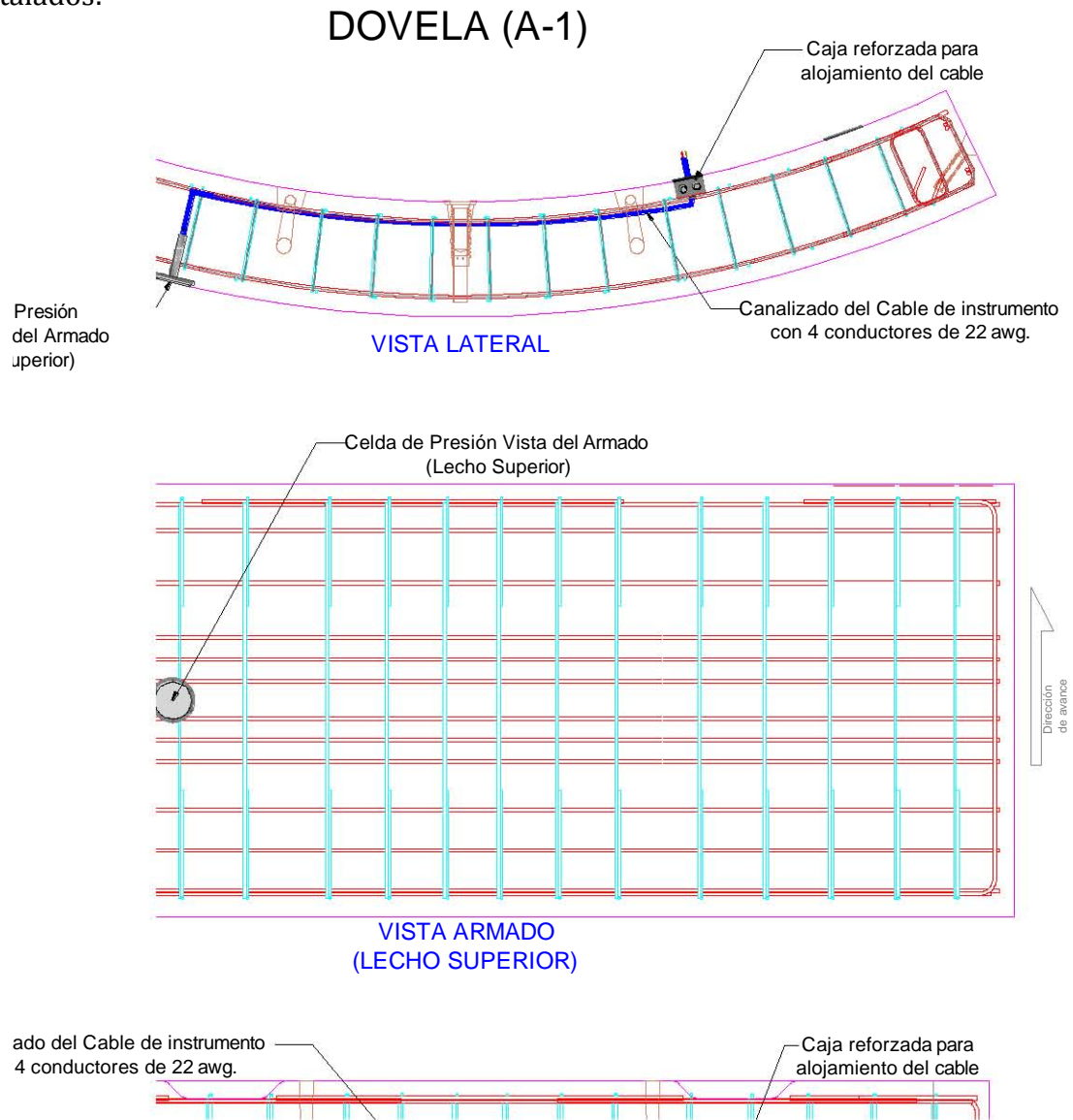


Figura 10. LOCALIZACIÓN DE CELDA DE PRESIÓN EN ARMADO

### 4.3 Deformímetro de acero

Estos instrumentos también son instalados previos al colado en la planta de dovelas, y su localización está determinada por el modelo conceptual. Cada dovela a instrumentar está integrada por dos deformímetros de acero los cuales se situarán en lecho superior e inferior de cada dovela. Por lo que en cada anillo instrumentado se cuenta con un total de ocho deformímetros de acero.

A continuación se desglosa el procedimiento a seguir para la instalación de estos instrumentos, tomando en cuenta también algunas actividades preliminares como son:

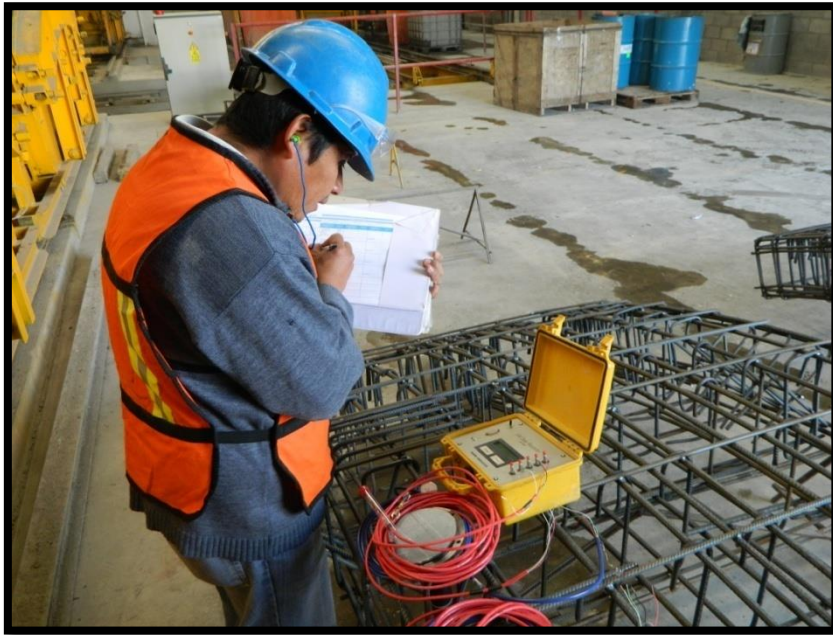
- Identificar en el modelo conceptual la localización de nuestros instrumentos en el armado de acero. Ver fotografía No. 11.



Fotografía 11.

- Identificar que el área de acero donde será fijado nuestro instrumento se encuentre libre de grasa o corrosión.
- Identificar que el acero de refuerzo se encuentre fijo.

- Se realiza una prueba de verificación del instrumento con la ayuda de una consola (VW DATA RECORDER), tomando los cables de la celda conectándolos a los polos del aparato de monitoreo. Ver fotografía No. 12.

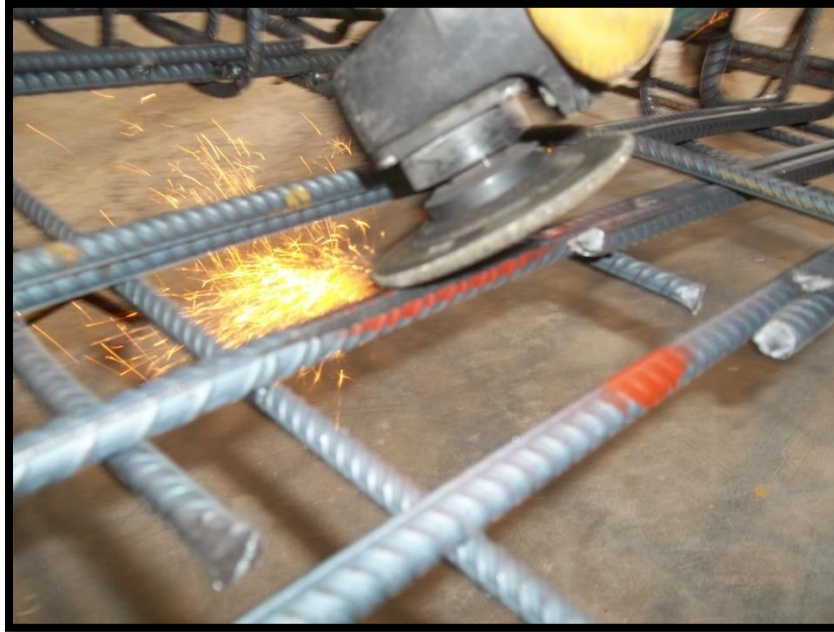


Fotografía 12.

- Previo a soldar el instrumento al acero de refuerzo se realiza una prueba en donde se verifique que la soldadura por puntos y la mini planta funcionen de manera correcta y se utilice la energía adecuada.

Ya que se han realizado las actividades preliminares, se procede con la instalación del deformímetro de acero, para ello, se describirá el procedimiento para la instalación de dicho instrumento.

- Se realiza un debastado en el acero de refuerzo con la ayuda de un esmeril eléctrico de manera de quedar una superficie plana y limpia que servirá como base para la colocación del deformímetro de acero. Ver fotografía No. 13.



Fotografía 13.

- Comienza con el proceso de fijación de las fichas de montaje del deformímetro que consiste en dos fichas planas que son adheridas a la superficie plana por medio de soldadura de puntos. Ver fotografía No. 14.



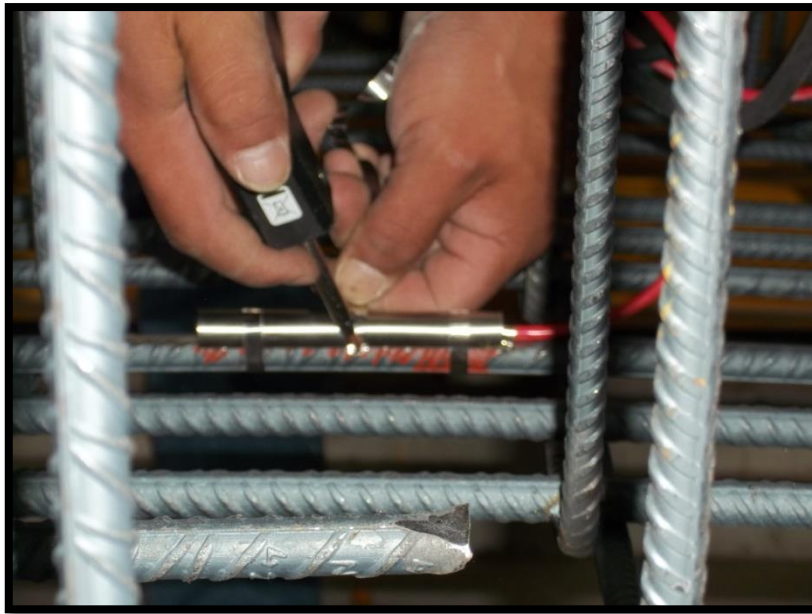
Fotografía 14.

- Continúa con la fijación de un collarín el cual servirá para controlar el cable del instrumento, la cubierta de acero y el protector de terminales. Ver fotografía No. 15.



Fotografía 15.

- Se realiza la colocación de otro collarín la fijar la cubierta de acero inoxidable con el fin de que quede adherida al acero de refuerzo. Ver fotografía No. 16.



Fotografía 16.

- Con ayuda de cera se sella todos los orificios, posteriormente se forra con caucho (masilla de aislamiento), con el fin de evitar que el agregado fino del concreto pueda dañar el instrumento y para finalizar se cubre totalmente con cinta de aislar. Ver fotografía No. 17.





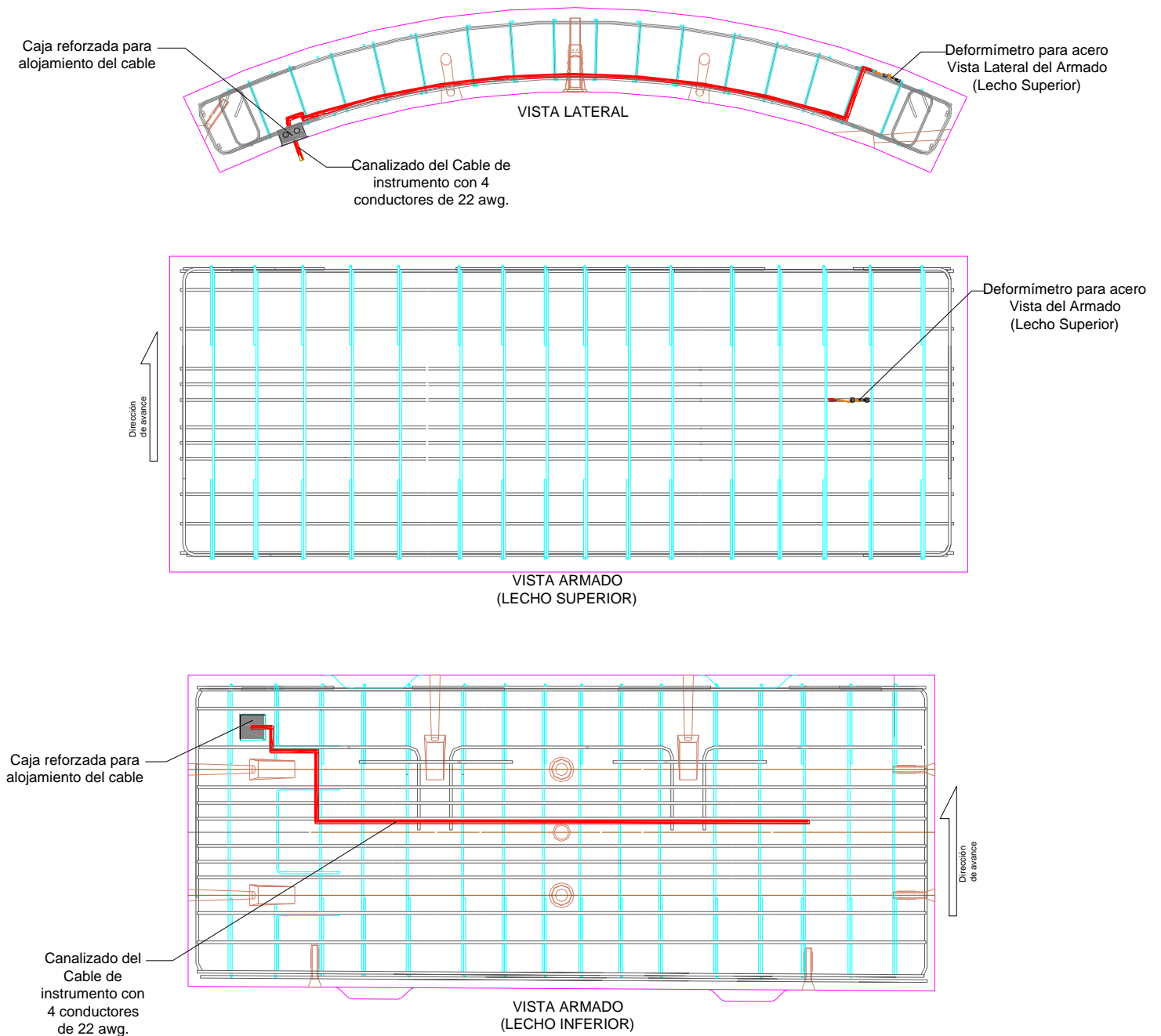
Fotografía 17.

- Una vez que se ha instalado el deformímetro de acero, procede la canalización de los cables sujetándolos al acero de refuerzo por medio de cinchos plásticos y se coloca el cable excedente dentro de la caja galvanizada instalada previamente. Ver fotografía No. 18.



Fotografía 18

A continuación, se muestra de manera detallada la ubicación de los instrumentos una vez instalados:



**Figura 11. LOCALIZACIÓN DE DEFORMÍMETRO DE ACERO EN ACERO**

#### 4.4 Deformímetros de concreto

Al igual que las celdas de presión y los deformímetros de acero, los deformímetros de concreto deben ser instalados en el armado de las dovelas previo al colado de estas, y su ubicación está definida por modelo conceptual, por lo que se cuenta con dos deformímetros de concreto por dovelas a instrumentar, para un total de ocho deformímetros de concreto por anillo.

Antes de la instalación de deformímetro de concreto se deben realizarse las siguientes actividades preliminares con el fin de optimizar el procedimiento de la fijación de los aparatos al armado de la dovela, a continuación se describen dichas actividades:

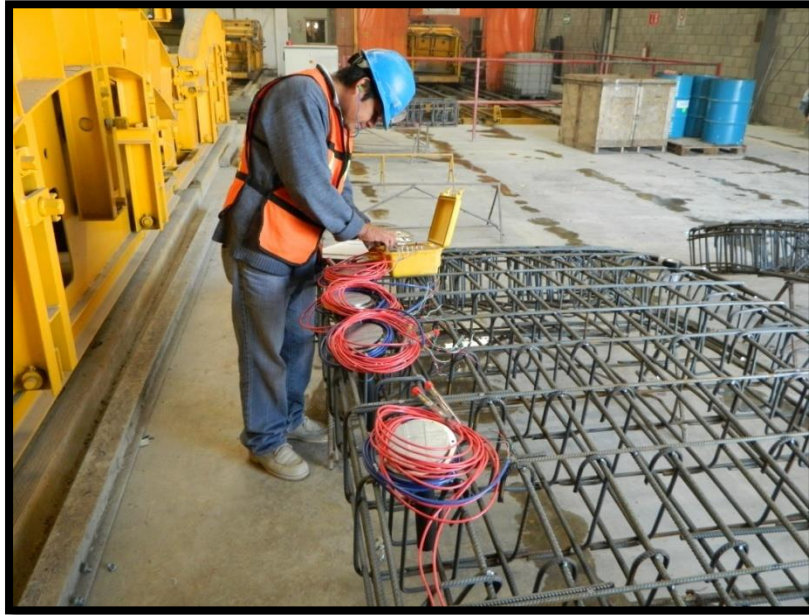
- Basándose en el modelo conceptual, definir la ubicación de la zona donde serán instalados los instrumentos en el armado de acero. Ver fotografía No. 19.



Fotografía 19.

- Identificar que el área de acero donde serán fijados nuestros instrumentos se encuentre libre de grasa o corrosión.
- Identificar que el acero de refuerzo se encuentre fijo.

- Es importante realizar una prueba de verificación del instrumento con la ayuda de una consola (VW DATA RECORDER), tomando los cables de la bobina y del termistor del deformímetro conectándolos a los polos del aparato de monitoreo. Ver fotografía No. 20.



Fotografía 20.

A continuación, se describe el procedimiento para la instalación de los deformímetros de concreto:

- Con la ayuda de una abrazadera se empalma la bobina al tubo protector. Ver fotografía No. 21.



Fotografía 21.

- Haciendo uso del alambre recosido se sujeta alrededor de la bobina para que quede unida al acero de refuerzo de la dovela a instrumentar. Ver fotografía No. 22.



Fotografía 22.

- Se coloca caucho (masilla para aislamiento) sobre la bobina para comenzar con la primera capa de protección, posteriormente, se cubre con cinta de aislar como ya se ha mencionado con el objetivo de impedir que el concreto dañe el instrumento. Ver fotografía No. 23.



Fotografía 23.

- Ya que se ha instalado el deformimetro de concreto, se procede con la canalización de los cables sujetándolos al acero de refuerzo por medio de cinchos plásticos y se coloca el cable excedente dentro de la caja galvanizada instalada previamente. Ver fotografía No. 24.



Fotografía 24.

A continuación se muestra de manera de tallada la ubicación de los instrumentos una vez instalados:

## DOVELA (A-3)

Deformímetro para Concreto  
Vista Lateral del Armado  
(Lecho Superior)

para  
able

VISTA LATERAL

Canalizado del Cable de instrumento  
con 4 conductores de 22 awg.

Deformímetro para Concreto  
Vista del Armado  
(Lecho Superior)

Dirección  
de avance

VISTA ARMADO  
(LECHO SUPERIOR)

ra  
le

Dirección  
de avance

lel

on  
s

VISTA ARMADO

**Figura 12. LOCALIZACIÓN DE DEFORMÍMETRO DE CONCRETO EN ARMADO**

## 4.5 Sistema de convergencias automatizado

La instalación de este sistema, se basa en el manual instructivo del proveedor RST Instruments donde se indica las conexiones macho-hembra de cada uno de los sensores, generando el circuito definido que conformará el sistema de convergencias automatizado.

La configuración que debe llevar el sistema instalado sólo puede ser de las siguientes formas; tendiendo una secuencia en orden horario o antihorario, teniendo principio y fin en las dovelas ubicadas en la cubeta del anillo, en las posiciones del anillo U-07 y U-11, descritas con anterioridad.

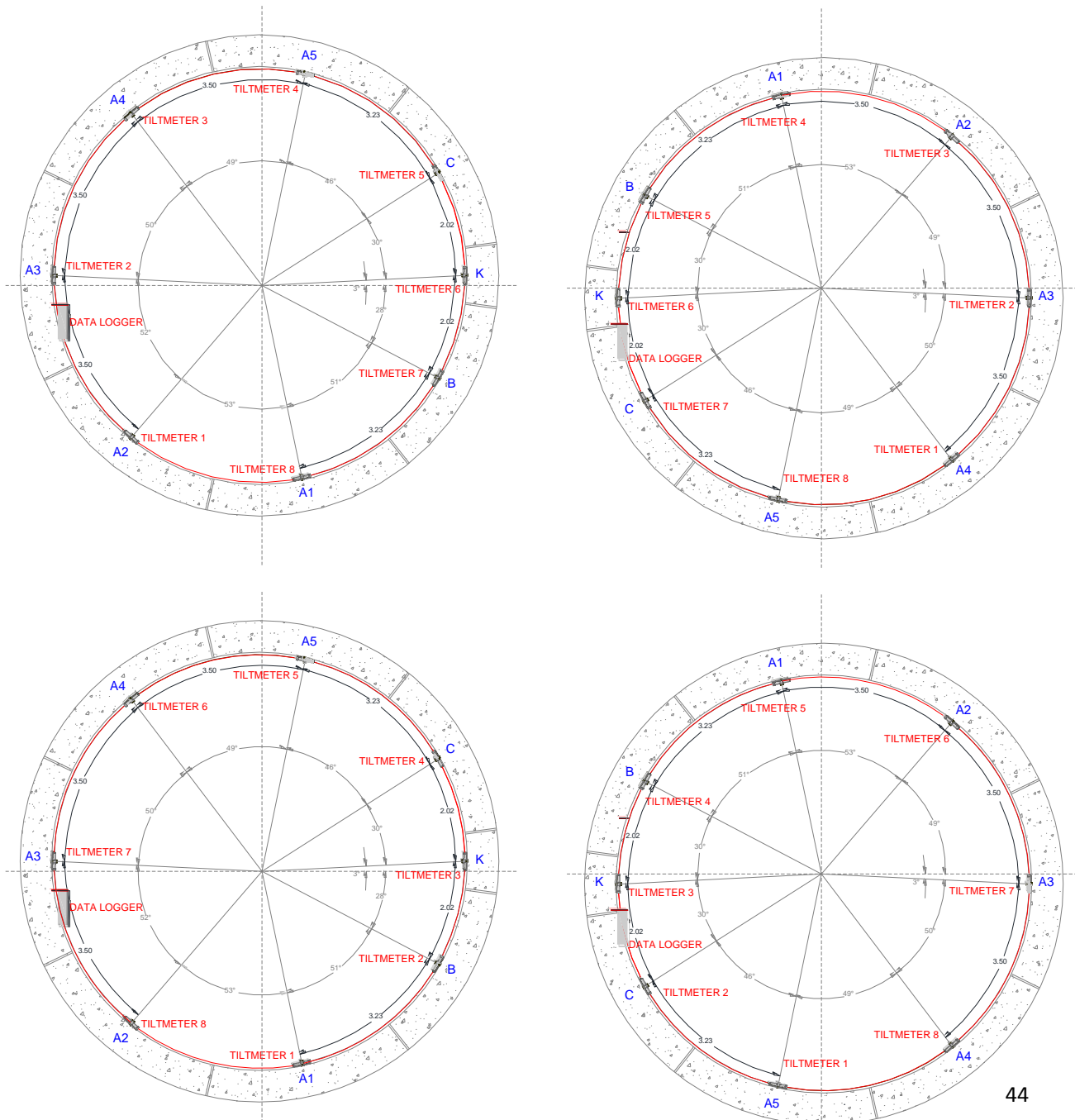


Figura 13. POSICIONES DEL SISTEMA DE CONVERGENCIAS AUTOMATIZADO



Debido a las características del sistema, el control del monitoreo será automatizado, por lo que a continuación se describirá el procedimiento para el traspaso de información de túnel al gabinete.

#### **4.5.1 Materiales y herramientas**

Para la instalación de dichos instrumentos es preciso contar con los siguientes materiales y herramientas:

##### **Materiales**

- Abrazaderas tipo uñas
- Cintas de aislar
- Cinturones de plástico para inmovilidad
- Manguera para canalizado
- Pijas
- Pinzas de corte
- Taquetes de plástico
- Taquetes expansivos
- Brocas para concreto
- Cajas de acero para protección
- Cúter

##### **Equipo**

- Taladro
- Desarmador de cruz
- Extensiones
- Flexómetro
- Juego de llaves Allen
- Llave de astrias
- Niveleta
- Data Logger modelo CR800 (Sistema de Convergencias Automatizado)
- Sensores de inclinación (Tiltmeters)
- Cable de conexión del Data Logger al equipo de cómputo
- Equipo de Cómputo.

Como actividad preliminar para la instalación del sistema de convergencias automatizado, se realiza el biselado en la parte que trabajara como junta de cada dovela del anillo donde se instalará el sistema y el anillo anterior a él. Una vez hecho el biselado e instalado en ambos anillos, se generará una cavidad triangular que servirá para la protección del canalizado del circuito. De ello se desprende el siguiente procedimiento para el óptimo proceso de instalación del sistema de convergencias automatizado:

- Determinar el lugar donde será instalado el Tiltmeter. Se recomienda colocarse al centroide geométrico de cada dovela. Ver fotografía No. 25.



Fotografía 25.

- Con el rotomartillo se hacen dos agujeros de 1/4" para la instalación del tiltmeter, posteriormente, se colocan taquetes expansivos en los agujeros generados, fijando la base del tiltmeter a cada dovela. Ver fotografías No. 26 y 27.



Fotografía 26.



Fotografía 27.

- Los tiltmeters deben ser instalados conforme al diagrama de conexión del proveedor (en este caso RST Instruments).

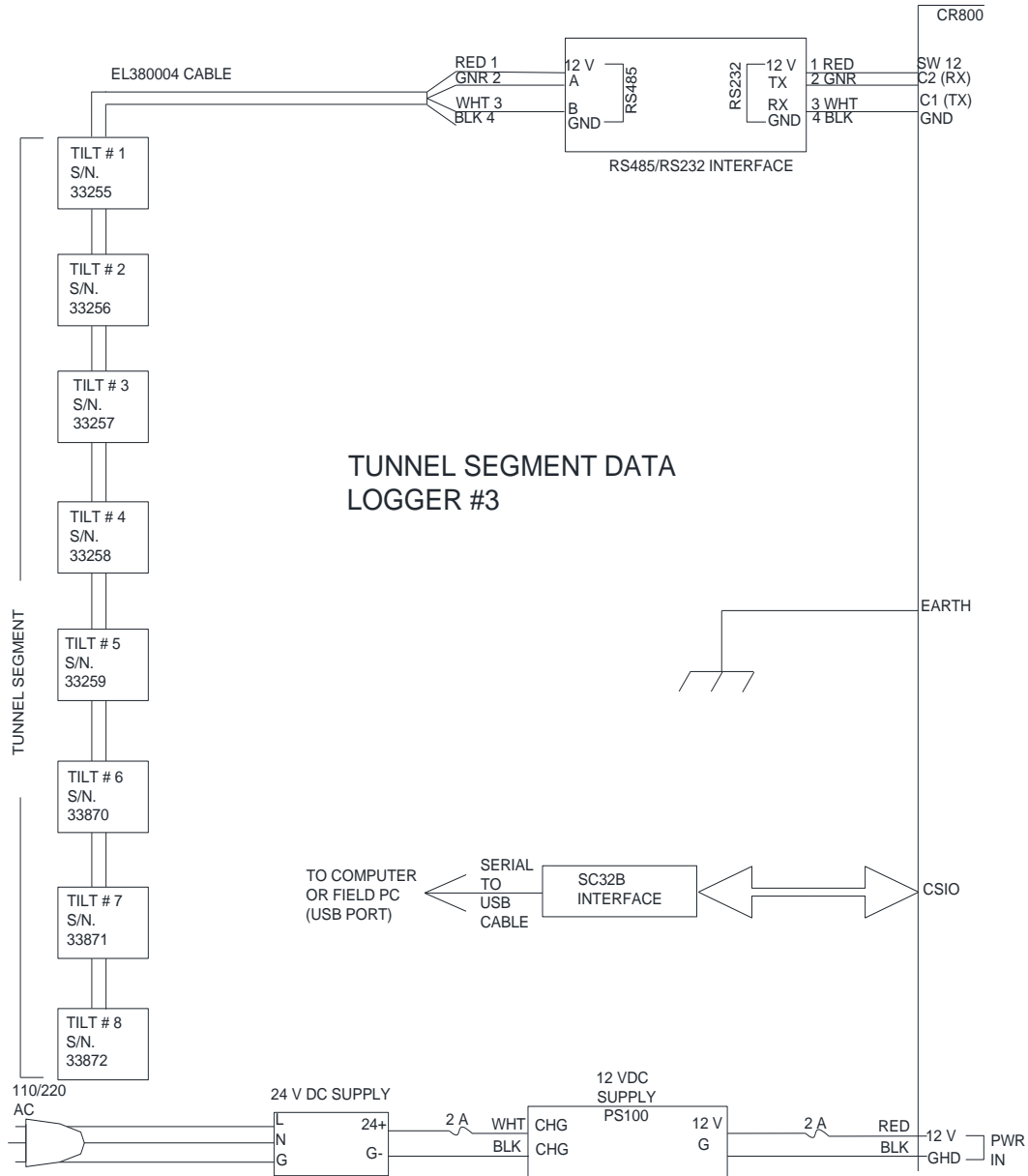
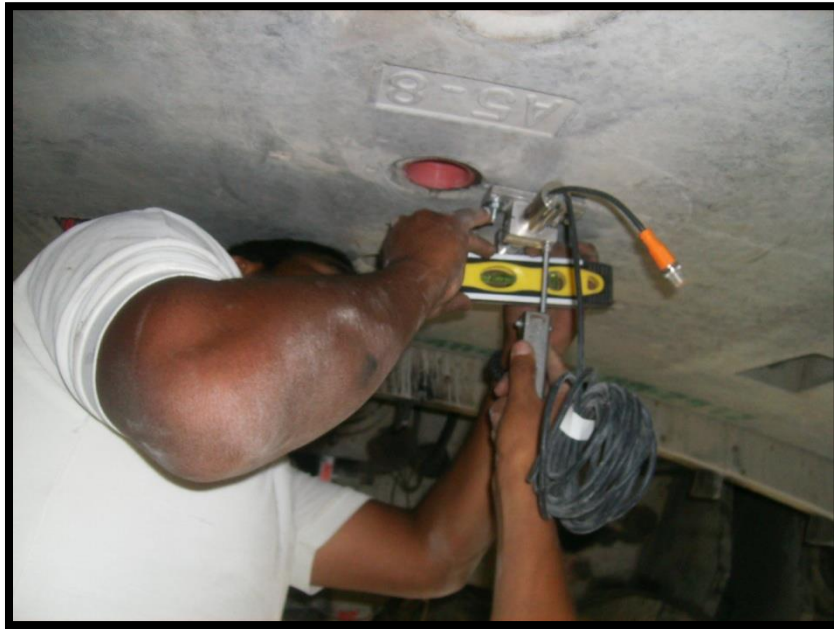


Figura 14. DIAGRAMA DE CONEXIÓN RST INSTRUMENTS.

- Para la alineación adecuada de los tiltmeter, en cada dovela se hace uso del destornillador hexagonal; se libera sólo un poco el medidor de convergencias de la base del tiltmeter para que pueda deslizarse a la mitad de su longitud sin apretar los tornillos previamente liberados, con ayuda de un nivel de mano se coloca el medidor de convergencias con la flecha hacia arriba y que el “top” quede por arriba. Ver fotografías No. 28, 29 y 30.



Fotografía 28.



Fotografía 29.

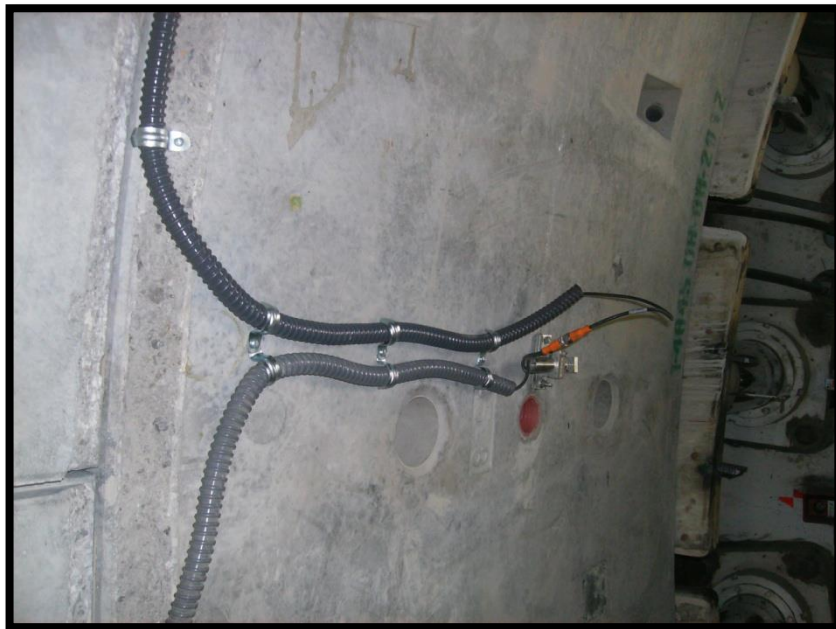


Fotografía 30.

- Una vez que se ha orientado de manera correcta el medidor de convergencias, se fija el medidor de convergencias a la base.
- Se conectan los tiltmeter en serie con sus conexiones macho y hembra, creando el circuito continuo que se ha mencionado anteriormente; este circuito será canalizado por una manguera de poliducto gris que será fijada a la periferia del anillo con ayuda de abrazaderas de uña galvanizadas, a su vez que serán fijadas por medio de pijas y taquetes plásticos como se muestra en las fotografías No. 30, 31 y 32. Una vez fija, será conectada a un equipo que almacenará los datos obtenidos llamado Datalogger. Ver fotografías No. 33 y 34.



Fotografía 31.



Fotografía 32.



Fotografía 33.



Fotografía 34.





Fotografía 35.

- Se hacen las perforaciones por cada dovela para la fijación de cajas metálicas de acero de  $\frac{1}{4}$ " de calibre que protegerán los tiltmeters, éstas serán fijadas con taquetes expansivos. Ver fotografías No. 36 y 37.



Fotografía 36.



Fotografía 37.

- Ya que se encuentre instalado el sistema de convergencias automatizado, se realiza una prueba de funcionamiento para verificar la conexión de todo el circuito, además, con ayuda del software (Logger Net) se programa los intervalos de tiempo a los que se monitorea los desplazamientos generados en el anillo, finalizando la instalación del Sistema de Convergencias Automatizado. Ver fotografías No. 38 y 39.



Fotografía 38



Fotografía 39.

---

## 5. MONITOREO DE ANILLO INSTRUMENTADO

---

Una vez que se han definido los procedimientos de instalación de los instrumentos, continuamos con el procedimiento de monitoreo, cálculo de los esfuerzos y deformaciones a los que están expuestos los materiales así como el elemento rígido que conforma el anillo (dovela).

El monitoreo consiste en unir los polos de la consola VW Data Recorder a los instrumentos, generando en la pantalla del equipo de medición un valor numérico que estará en unidades de  $Hz^2$  (frecuencia de vibración) y temperatura ( $^{\circ}C$ ) debido al método de funcionamiento en el que están basados estos aparatos, que serán convertidos en unidades de esfuerzos ( $Ton/m^2$ ,  $Kg/cm^2$ ).

El periodo de monitoreo está regido por una frecuencia conciliada con la supervisión, sin embargo, previa a esta, se realizan monitoreos preliminares a los instrumentos con el fin de identificar el comportamiento de estos antes de formar parte del revestimiento primario. La primera etapa de estas mediciones será al instante de su instalación en el armado de la dovela (antes y después de ser colada), la segunda será al momento de su instalación en el túnel (antes y después de ser instalado el anillo instrumentado) y para finalizar al momento que el terreno natural entra en contacto

con el anillo (éste se da al instante, debido que al avance de la tuneladora el anillo instrumentado sale del faldón (dos anillos después de su instalación).

La frecuencia mencionada entra en acción después de las lecturas previas ya mencionadas, tomando como origen la lectura cero (después de la instalación del anillo instrumentado). La frecuencia del monitoreo del anillo instrumentado está en función de cuatro parámetros los cuales darán la pauta para aumentar o reducir el lapso de tiempo entre una y otra lectura, los cuales son:

- El avance de la tuneladora TBM: ya que debido a la excavación y los movimientos generados por la máquina, puede existir deformaciones o movimientos dentro de la estructura del anillo.
- La estabilización del anillo: Por medio de gráficas se analiza el comportamiento de los instrumentos con el fin de identificar el instante que estos tenga una tendencia parecida entre ellos.
- Estratigrafía: se debe identificar los cambios de estratos que son de alta relevancia ya que afectan de manera distinta los esfuerzos a los que está siendo sometido el anillo.
- Convergencias topográficas: al igual que en el caso de la estabilización del comportamiento de las cargas, se identifica como se vienen presentando las deformaciones mediante este método topográfico.

### **5.1 Cálculo de esfuerzos y deformaciones**

Como se ha mencionado, los datos obtenidos de los instrumentos por medio de la consola de medición, arrojan valores en unidades de frecuencia de vibración por lo que recurre a realizar ciertos cálculos para obtener datos con unidades más prácticas. Cada instrumento cuenta con una ficha de calibración la cual contiene ciertos parámetros iniciales, además de algunos otros que serán anexados para realizar correctamente la determinación de dichos cálculos.

## 5.2 Celda de presión

Es necesario comenzar definiendo la nomenclatura que identificará al instrumento, además de algunas características que nos darán control de nuestros equipos.

|   |                            |
|---|----------------------------|
| <b>CELDA DE PRESIÓN:</b>                    | <b>CELPD-T4-A819-A3-10</b> |
| <b>Fecha de instalación en la estación:</b> | <b>03-Oct-13</b>           |
| <b>Número de Serie:</b>                     | <b>1022551</b>             |
| <b>Longitud de cable:</b>                   | <b>3.00m</b>               |

Para ello, se requiere calcular los esfuerzos ejercidos en las celdas de presión es necesario determinar los parámetros iniciales contenidos en su ficha de calibración:

|  |                 |                   |   |
|--|-----------------|-------------------|---|
| <b>PARÁMETROS OBTENIDOS DE LA HOJA DE CALIBRACIÓN (Ajuste Lineal):</b> |                 |                   |   |
| <b>BC =</b>  | <b>994.20</b>   | <b>mbar</b>       | <b>mbar (Presión barométrica en fábrica)</b>                    |
| <b>Bi =</b>  | <b>982.60</b>   | <b>mbar</b>       | <b>(Presión barométrica en fábrica, después de calibración)</b> |
| <b>Ti =</b>  | <b>21.50</b>    | <b>°C</b>         | <b>(Temperatura en fábrica)</b>                                 |
| <b>R0 =</b>  | <b>8,633.00</b> | <b>(digits)</b>   | <b>(Lectura del instrumento en fábrica)</b>                     |
| <b>K=</b>  | <b>-0.0265</b>  | <b>(KPa/°C)</b>   | <b>(Factor térmico)</b>   |
| <b>G=</b>  | <b>0.1720</b>   | <b>kPa/digits</b> | <b>(Factor de calibración)</b>                                  |

Mediante la siguiente ecuación se procede a realizar la conversión de unidades de frecuencia ( $Hz^2/1000$ ), a unidades de presión ( $Ton/m^2$ ).

$$P = G_0(R_0 - R_1) + K(T_1 - T_0)$$

Antes de iniciar, se hace mención que la unidad básica utilizada por los equipos de medición (VW Data Recorder) para la medición son los “digits” (dígitos), por lo que la siguiente equivalencia ayudara para los cálculos posteriores:

$$Digits = \left( \frac{1}{\text{periodo (seg.)}} \right)^2 \times 10^{-3} \quad \text{ó} \quad Digits = \frac{Hz^2}{1000}$$

Se dará inicio al realizar los cálculos de los esfuerzos correspondientes a los monitoreos preliminares mencionados en el capítulo anterior, para posteriormente realizar los cálculos de las lecturas obtenidas después de la instalación del anillo instrumentado (éstos serán los esfuerzos que realmente están actuando en el anillo y que serán identificados detalladamente para analizar el comportamiento del anillo a través del tiempo).

Para hacerlo más práctico, se construirá una tabla para ir realizando cada uno de los cálculos por separado.

| No. | Fecha     | LECTURA   |         | AJUSTE LINEAL |          |         |                       | PRESIÓN DESPUÉS DE<br>INSTALAR ANILLO EN<br>TÚNEL<br>ton/m <sup>2</sup> | Observaciones                        |
|-----|-----------|---|---------|---------------|----------|---------|-----------------------|---|--------------------------------------|
|     |           | $L_c = Hz^2 \times 10^{-5}$<br>(datos de campo) | T (° c) | G0(R0-R1)     | k(T1-T0) | P (kPa) | P (t/m <sup>2</sup> ) |   |                                      |
| 1   | 09-jul-12 | 8,826.40  | 18.7    |               |          |         |                       |   | LECTURA CERO, INICO<br>DEL MONITOREO |

Se comienza determinando el valor del primer sumando.

$$G_0(R_0 - R_1)$$

$$G_0 = 0.1720 \text{ KPa/Digits (factor de calibración)}$$

$$R_0 = 8,826.40 \text{ Digits (primer lectura en } Hz^2)$$

Para el caso de la primera lectura los valores de las lecturas  $R_0$ ,  $R_1$  tendrán el mismo valor.

$$R_0 = R_1$$

Por lo tanto al realizar las operaciones para obtener el primer sumando, se obtiene:

$$G_0(R_0 - R_1) = 0.1720 \text{ KPa/Digits (8,826.40 - 8,826.40) Digits} = \mathbf{0.000 \text{ KPa}}$$

| No. | Fecha     | LECTURA   |        | AJUSTE LINEAL |          |         |                       | PRESIÓN DESPUÉS DE<br>INSTALAR ANILLO EN<br>TÚNEL<br>ton/m <sup>2</sup> | Observaciones                                      |
|-----|-----------|---|--------|---------------|----------|---------|-----------------------|---|--|
|     |           | $L_c = Hz^c \times 10^{-c}$<br>(datos de campo) | T (°c) | G0(R0-R1)     | k(T1-T0) | P (kPa) | P (t/m <sup>2</sup> ) |   |  |
| 1   | 09-jul-12 | 8,826.40  | 18.7   | 0.000         |          |         |                       |   | VERIFICACION DE<br>FUNCIONAMIENTO DE<br>LAS CELDAS |

A continuación se realiza el cálculo del segundo sumando de nuestra ecuación principal.

$$K(T_1 - T_0)$$

$$K = -0.0265 \text{ KPa}/^\circ\text{C} \text{ (factor térmico)}$$

$$T_0 = 18.7 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (primera lectura en temperatura)}$$

Para el caso de la primera lectura los valores de las lecturas  $T_0, T_1$  serán el mismo valor.

$$T_0 = T_1$$

Se sustituyen los valores mencionados previamente

$$K(T_1 - T_0) = -0.0265 \text{ KPa}/^\circ\text{C} (18.7 - 18.7)^\circ\text{C} = \mathbf{0.000 \text{ KPa}}$$



| No. | Fecha     | LECTURA   |      | AJUSTE LINEAL                                    |                                    |         |                       | PRESIÓN DESPUÉS DE<br>INSTALAR ANILLO EN<br>TÚNEL<br>ton/m <sup>2</sup> | Observaciones                                      |
|-----|-----------|---|------|--|------------------------------------|---------|-----------------------|---|--|
|     |           | $L_c = Hz^c \times 10^{-5}$<br>T (°c)<br>(datos de campo) |      | G <sub>0</sub> (R <sub>0</sub> -R <sub>1</sub> ) | k(T <sub>1</sub> -T <sub>0</sub> ) | P (kPa) | P (t/m <sup>2</sup> ) |   |  |
| 1   | 09-jul-12 | 8,826.40  | 18.7 | 0.000  | 0.000                              |         |                       |   | VERIFICACION DE<br>FUNCIONAMIENTO DE<br>LAS CELDAS |

Ahora se realiza la suma de nuestra ecuación principal:

$$P = G_0(R_0 - R_1) + K(T_1 - T_0)$$

Sustituyendo valores:

$$P = 0.000 + 0.000 = \mathbf{0.000\ KPa}$$

| No. | Fecha     | LECTURA   |      | AJUSTE LINEAL                                    |                                    |         |                       | PRESIÓN DESPUÉS DE<br>INSTALAR ANILLO EN<br>TÚNEL<br>ton/m <sup>2</sup> | Observaciones                                      |
|-----|-----------|---|------|--|------------------------------------|---------|-----------------------|---|--|
|     |           | $L_c = Hz^c \times 10^{-5}$<br>T (°c)<br>(datos de campo) |      | G <sub>0</sub> (R <sub>0</sub> -R <sub>1</sub> ) | k(T <sub>1</sub> -T <sub>0</sub> ) | P (kPa) | P (t/m <sup>2</sup> ) |   |  |
| 1   | 09-jul-12 | 8,826.40  | 18.7 | 0.000  | 0.000                              | 0.000   |                       |   | VERIFICACION DE<br>FUNCIONAMIENTO DE<br>LAS CELDAS |

Para realizar a la conversión a  $Ton/m^2$  se recurre a la siguiente operación:

$$P = (0.000\ KPa) \left( \frac{1\ Ton/m^2}{9.81\ Kpa} \right) = \mathbf{0.000\ Ton/m^2}$$

| No. | Fecha     | LECTURA   |         | AJUSTE LINEAL |          |         |                       | PRESIÓN DESPUÉS DE INSTALAR ANILLO EN TÚNEL ton/m <sup>2</sup> | Observaciones                                |
|-----|-----------|---|---------|---------------|----------|---------|-----------------------|--|--|
|     |           | $L_c = Hz^2 \times 10^{-5}$<br>(datos de campo) | T (° c) | G0(R0-R1)     | k(T1-T0) | P (kPa) | P (t/m <sup>2</sup> ) |  |  |
| 1   | 09-jul-12 | 8,826.40  | 18.7    | 0.000         | 0.000    | 0.000   | 0.000                 |  | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CELDAS |

Para el llenado de la última columna que corresponde a la “PRESIÓN DESPUÉS DE INSTALAR ANILLO EN TÚNEL” se requiere de datos de la siguiente lectura, pero será llenada en la lectura cero (después de la colocación del anillo instrumentado).

Para la siguiente lectura se hará uso de las mismas operaciones, sólo que ahora en adelante se hará uso de los datos de la lectura “n” (en este caso la No. 2) y la lectura inicial.

$$P = G_0(R_0 - R_1) + K(T_1 - T_0)$$

| No. | Fecha     | LECTURA   |         | AJUSTE LINEAL |          |         |                       | PRESIÓN DESPUÉS DE INSTALAR ANILLO EN TÚNEL ton/m <sup>2</sup> | Observaciones                                |
|-----|-----------|---|---------|---------------|----------|---------|-----------------------|--|--|
|     |           | $L_c = Hz^2 \times 10^{-5}$<br>(datos de campo) | T (° c) | G0(R0-R1)     | k(T1-T0) | P (kPa) | P (t/m <sup>2</sup> ) |  |  |
| 1   | 09-jul-12 | 8,826.40  | 18.7    | 0.000         | 0.000    | 0.000   | 0.000                 |  | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CELDAS |
| 2   | 10-jul-12 | 8,803.90  | 21.3    |               |          |         |                       |  | CELDA YA INSTALADA EN DOVELA                 |

$$G_0(R_0 - R_1)$$

$G_0 = 0.1720$  (factor de calibración)

$R_0 = 8,826.40$  (primer lectura en Hz<sup>2</sup>)

$$R_1 = 8,803.90 \text{ (lectura "n" en Hz}^2\text{)}$$

$$G_0(R_0 - R_1) = 0.1720(8,826.40 - 8,803.90) = \mathbf{3.8700 \text{ KPa}};$$

$$K(T_1 - T_0)$$

$$K = -0.0265 \text{ (factor térmico)}$$

$$T_0 = 18.7 \text{ (primera lectura en temperatura)}$$

$$T_1 = 21.3 \text{ (lectura "n" en temperatura)}$$

$$K(T_1 - T_0) = -0.0265 (21.3 - 18.7) = \mathbf{-0.0689 \text{ KPa}};$$

$$P = G_0(R_0 - R_1) + K(T_1 - T_0)$$

$$P = 3.8700 - 0.0689 = \mathbf{3.8011 \text{ KPa}}$$

Conversión:

$$P = (3.8011 \text{ KPa}) \left( \frac{1 \text{ Ton/m}^2}{9.81 \text{ Kpa}} \right) = \mathbf{0.38747 \text{ Ton/m}^2}$$

| No. | Fecha     | LECTURA   |         | AJUSTE LINEAL |          |         |                       | PRESIÓN DESPUÉS DE<br>INSTALAR ANILLO EN<br>TÚNEL<br>ton/m <sup>2</sup> | Observaciones |
|-----|-----------|---|---------|---------------|----------|---------|-----------------------|---|---------------|
|     |           | $L_e = Hz^c \times 10^{-2}$<br>(datos de campo) | T (° c) | G0(R0-R1)     | k(T1-T0) | P (kPa) | P (t/m <sup>2</sup> ) |   |               |
| 1   | 09-jul-12 | 8,826.40  | 18.7    | 0.000         | 0.000    | 0.000   | 0.000                 | VERIFICACION DE<br>FUNCIONAMIENTO DE<br>LAS CELDAS                      |               |
| 2   | 10-jul-12 | 8,803.90  | 21.3    | 3.870         | -0.689   | 3.801   | 0.38747               | CELDA YA INSTALADA<br>EN DOVELA   |               |

Una vez que se ha determinado el cálculo de esfuerzos de los monitoreos preliminares, se procede a hacer el cálculo de la lectura cero y las siguientes, esto para obtener la presión después de instalar el anillo que serán los parámetros de análisis en el comportamiento del anillo debido a su interacción con el terreno natural.

Se realizan los cálculos ya conocidos:

| No. | Fecha     | LECTURA   |         | AJUSTE LINEAL |          |          |                       | PRESIÓN DESPUÉS DE<br>INSTALAR ANILLO EN<br>TÚNEL<br>ton/m <sup>2</sup> | Observaciones                                      |
|-----|-----------|---|---------|---------------|----------|----------|-----------------------|---|--|
|     |           | $L_z = Hz^r \times 10^{-5}$<br>(datos de campo) | T (° c) | G0(R0-R1)     | k(T1-T0) | P (kPa)  | P (t/m <sup>2</sup> ) |   |  |
| 1   | 09-jul-12 | 8,826.40  | 18.7    | 0.000         | 0.000    | 0.000    | 0.000                 |   | VERIFICACION DE<br>FUNCIONAMIENTO DE<br>LAS CELDAS |
| 2   | 10-jul-12 | 8,803.90  | 21.3    | 3.870         | -0.689   | 3.801    | 0.38747               |   | CELDA YA INSTALADA<br>EN DOVELA                    |
| 3   | 11-jul-12 | 8,436.10  | 75.0    | 67.132        | -1.492   | 65.640   | 6.691                 |   | DOVELA COLADA                                      |
| 4   | 03-oct-13 | 8,823.10  | 23.2    | 0.568         | -0.11925 | 0.44835  | 0.0457                |   | ANTES DE LA<br>INSTALACION                         |
| 5   | 03-oct-13 | 8,455.80  | 23.4    | 63.7432       | -0.12455 | 63.61865 | 6.48508               |   | LECTURA CERO                                       |

Para el cálculo del esfuerzo generado después de la instalación sobre el anillo se recurre a la siguiente operación:

$$P_t = P_n - P_i$$

En el caso de la lectura inicial las presiones ( $P_n, P_i$ ) tendrán el mismo valor.

$$P_t = 6.48508 - 6.48508 = \mathbf{0.000 \text{ Ton/m}^2}$$

|   |           |          |      |         |          |          |         |       |              |
|---|-----------|----------|------|---------|----------|----------|---------|-------|--------------|
| 5 | 03-oct-13 | 8,455.80 | 23.4 | 63.7432 | -0.12455 | 63.61865 | 6.48508 | 0.000 | LECTURA CERO |
|---|-----------|----------|------|---------|----------|----------|---------|-------|--------------|

Para la siguiente lectura se procede con los mismos cálculos. En adelante el valor de la presión ejercida en el anillo después de su instalación dependerá de la presión generada en la lectura “n” y la presión inicial (de la “LECTURA CERO”).

| No. | Fecha     | LECTURA   |         | AJUSTE LINEAL |          |          |                       | PRESIÓN DESPUÉS DE INSTALAR ANILLO EN TÚNEL ton/m <sup>2</sup> | Observaciones                                |
|-----|-----------|---|---------|---------------|----------|----------|-----------------------|--|--|
|     |           | $L_z = Hz^c \times 10^{-s}$<br>(datos de campo) | T (° c) | G0(R0-R1)     | k(T1-T0) | P (kPa)  | P (t/m <sup>2</sup> ) |  |  |
| 1   | 09-jul-12 | 8,826.40  | 18.7    | 0.000         | 0.000    | 0.000    | 0.000                 |  | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CELDAS |
| 2   | 10-jul-12 | 8,803.90  | 21.3    | 3.870         | -0.689   | 3.801    | 0.38747               |  | CELDA YA INSTALADA EN DOVELA                 |
| 3   | 11-jul-12 | 8,436.10  | 75.0    | 67.132        | -1.492   | 65.640   | 6.691                 |  | DOVELA COLADA                                |
| 4   | 03-oct-13 | 8,823.10  | 23.2    | 0.568         | -0.11925 | 0.44835  | 0.0457                |  | ANTES DE LA INSTALACION                      |
| 5   | 03-oct-13 | 8,455.80  | 23.4    | 63.7432       | -0.12455 | 63.61865 | 6.48508               | 0.000  | LECTURA CERO                                 |
| 6   | 03-oct-13 | 6,978.90  | 24.3    | 317.77        | -0.1484  | 317.6216 | 32.37733              |  | PRIMERA LECTURA E INICIO DEL MONITOREO       |

$$P_t = P_n - P_i$$

$P_t$  = Presión en el anillo después de su instalación en el túnel

$P_n$  = presión de la lectura "n"

$P_i$  = presión de la lectura inicial (LECTURA CERO)

$$P_t = 32.37733 - 6.48508 = 25.89 \text{ Ton/m}^2$$

|   |           |          |      |        |         |          |          |       |  |
|---|-----------|----------|------|--------|---------|----------|----------|-------|--|
| 6 | 03-oct-13 | 6,978.90 | 24.3 | 317.77 | -0.1484 | 317.6216 | 32.37733 | 25.89 | PRIMERA LECTURA E INICIO DEL MONITOREO |
|---|-----------|----------|------|--------|---------|----------|----------|-------|--|

Continuamos con este último procedimiento para determinar los esfuerzos ejercidos en el túnel de los monitoreos subsecuentes.

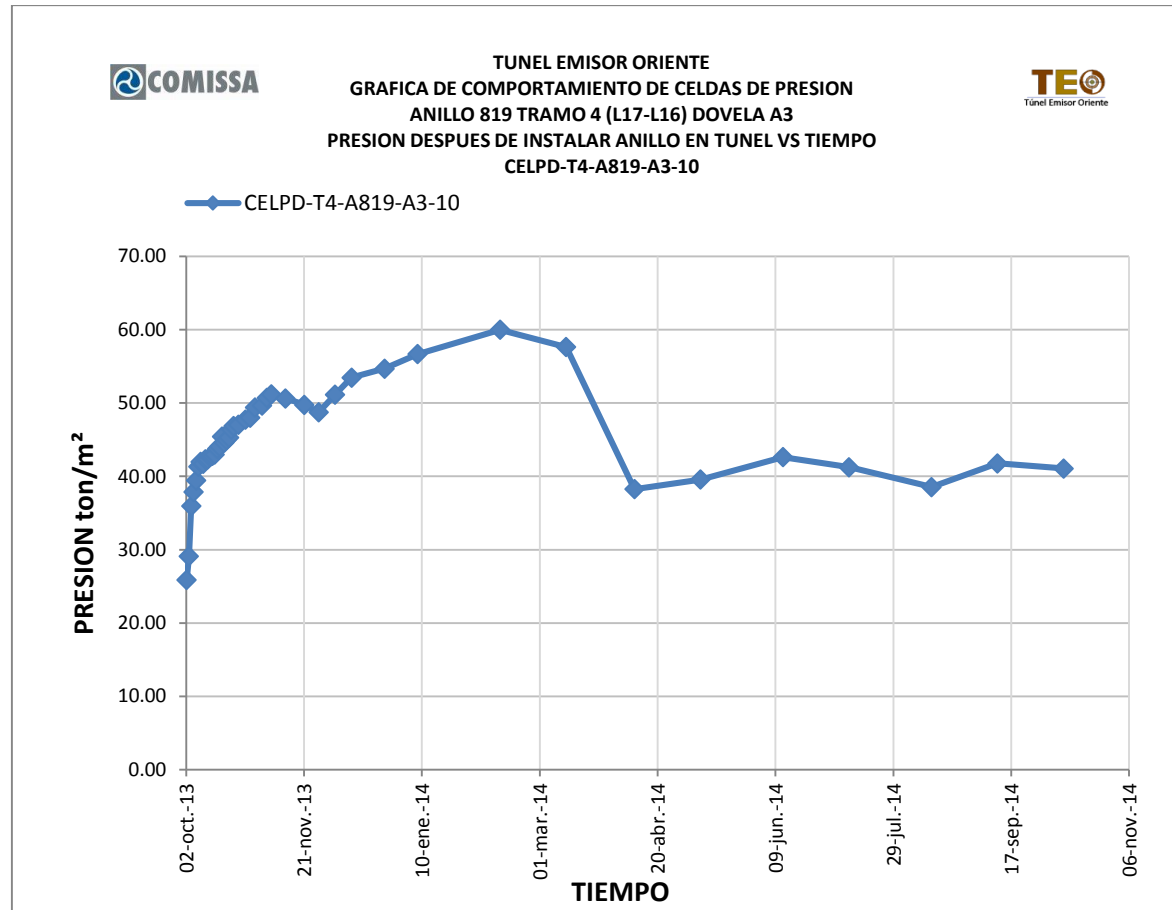


Figura 15. REGISTRO DE LECTURAS ESFUERZO CELDA DE PRESIÓN DEL ANILLO INSTRUMENTADO No. 819 EN TÚNEL, TRAMO 4.

### 5.3 Deformímetros de acero

En el caso de los deformímetros de acero también se debe tener un control de ellos por lo que se cuenta con los siguientes datos para identificarlos:

|  |   |
|--|---|
| <b>SENSORES DE ACERO:</b>                | <b>DEFAI-T4-A819-A3-06</b>  |
| <b>Fecha de instalación en el túnel:</b> | <b>03-Oct-13</b>  |
| <b>UBICACIÓN:</b>                        | <b><u>LECHO INFERIOR COSTADO IZQUIERDO A MEDIA SECCIÓN DE TÚNEL</u></b> |

También se cuenta con ciertos parámetros iniciales del instrumento, para el cálculo de esfuerzos ejercidos.

| <b><i>Parámetros iniciales</i></b> |                  |                              |   |
|------------------------------------|------------------|------------------------------|---|
| <b>B =</b>                         | <b>0.92</b>      | Adim.                        | (Factor nominal de lote)                    |
| <b>CF1 =</b>                       | <b>12.20</b>     | $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ | (Coeficiente térmico de expansión de acero) |
| <b>CF2 =</b>                       | <b>10.40</b>     | $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ | (Coeficiente térmico del concreto)          |
| <b>Lw =</b>                        | <b>51.00</b>     | mm                           | (Longitud de la cuerda vibrante)            |
| <b>Fy=</b>                         | <b>4,200</b>     | $\text{Kg}/\text{cm}^2$      | (Resistencia a la fluencia del acero)       |
| <b>E=</b>                          | <b>2,000,000</b> | $\text{Kg}/\text{cm}^2$      | (Módulo de elasticidad del acero)           |



Por medio de las siguientes ecuaciones se determinan los esfuerzos a los que está sometido el acero de refuerzo de nuestra estructura, así como los desplazamientos que se presentan como consecuencia de la instalación del anillo instrumentado al túnel.

Mediante la siguiente metodología, se determinarán las deformaciones en el acero, las cuales están expresadas en frecuencias debido al sistema de funcionamiento de los deformímetros. Previo a los cálculos a realizar, se hará una conversión de las lecturas, multiplicándolas por un factor de medición el cual transformará las frecuencias (Hz) en deformaciones, y éstas, posteriormente serán ajustadas por deformaciones aparentes, correcciones y temperatura, para finalmente obtener los esfuerzos y desplazamientos reales en nuestro material. Para la conversión de unidades de frecuencia a deformación se utiliza la siguiente fórmula:

$$\mu\varepsilon = (0.391)(10^{-3} F^2)$$

$\mu\varepsilon$  = lectura modificada expresada en deformación unitaria ( $\mu\varepsilon$  adim.)

0.391 = factor de teorico de medición

$(10^{-3} F^2)$  = 6194.00 (lectura obtenida en unidades de frecuencia) ( $\text{Hz}^2/1000$ )

$$\mu\varepsilon = (0.391)(6194.00) = \mathbf{2421.854 \text{ adim.}}$$

Como una medida de control se opta por una tabla en la cual se irán plasmando los cálculos realizados paso a paso:

| No. | Fecha     | LECTURA                                 |  |         | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                 | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Observaciones   |
|-----|-----------|---|--|---------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|--|---|
|     |           | datos de campo<br>Hz <sup>2</sup> /1000 | $\mu\varepsilon = 0.391(10^{-3})(F^2)$ | T (° c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L$ (mm) |                                |  |   |
| 1   | 09-jul-12 | 6194.00                                 | 2421.854                               | 18.6    |                   |                            |                 |                 |                                |  | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO |

A continuación se comienza a calcular las deformaciones aparentes, para el caso de la primera lectura los valores de los esfuerzos  $R_1, R_0$  tendrán el mismo valor

$$\mu\epsilon_{APARENTE} = (R_1 - R_0)B$$

$R_0 = 2421.854$  (lectura inicial expresada en deformaciones unitarias)

$B = 0.92$  (factor nominal de lote)

Sustituyendo valores:

$$\mu\epsilon_{APARENTE} = (2,421.854 - 2,421.854) 0.92 = \mathbf{0.000 \text{ adim.}}$$

| No. | Fecha     | LECTURA                              |                                     |         | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                 | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Observaciones   |
|-----|-----------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|--|---|
|     |           | datos de campo Hz <sup>2</sup> /1000 | $\mu\epsilon = 0.391(10^{-3})(F^2)$ | T (° c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L$ (mm) |                                |  |   |
| 1   | 09-jul-12 | 6194.00                              | 2421.854                            | 18.6    | 0.000             |                            |                 |                 |                                |  | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO |

Ahora se continúa con el cálculo para obtener la deformación por corrección por temperatura, cabe mencionar que para la primera lectura el valor de las temperaturas  $T_1, T_0$  serán el mismo valor, por lo que recurriremos a la siguiente expresión:

$$\mu\epsilon_{CORRECCION} = (T_1 - T_0)(CF_1 - CF_2)$$

$T_0 =$  temperatura de la lectura inicial

$CF_1 =$  coeficiente térmico de expansión del acero

$CF_2 =$  coeficiente térmico del concreto

Sustituyendo:

$$\mu\varepsilon_{CORRECCI\acute{O}N} = (18.6 - 18.6)(12.20 - 10.40) = \mathbf{0.000 \text{ adim.}}$$

| No. | Fecha     | LECTURA                              |  |        | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                 | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm <sup>2</sup> )      | Observaciones |
|-----|-----------|--------------------------------------|--|--------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|---|---------------|
|     |           | datos de campo Hz <sup>2</sup> /1000 | $\mu\varepsilon = 0.391(10^{-3})(F^2)$ | T (°c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L$ (mm) |                                |   |               |
| 1   | 09-jul-12 | 6194                                 | 2421.854                               | 18.6   | 0.000             | 0.000                      |                 |                 |                                | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO |               |

A continuación se determina la deformación actual, mediante la siguiente ecuación, la cual está basada en los dos cálculos anteriores:

$$\mu\varepsilon_{ACTUAL} = (R_1 - R_0)B + (T_1 - T_0)(CF_1 - CF_2)$$

Sustituyendo valores:

$$\mu\varepsilon_{ACTUAL} = 0.000 + 0.000 = \mathbf{0.000 \text{ adim.}}$$

| No. | Fecha     | LECTURA                                 |  |         | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                 | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm <sup>2</sup> )      | Observaciones |
|-----|-----------|---|--|---------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|---|---------------|
|     |           | datos de campo<br>Hz <sup>2</sup> /1000 | $\mu\varepsilon = 0.391(10^{-3})(F^2)$ | T (° c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L$ (mm) |                                |   |               |
| 1   | 09-jul-12 | 6194.00                                 | 2421.854                               | 18.6    | 0.000             | 0.000                      | 0.000           |                 |                                | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO |               |

Para determinar el desplazamiento generado se recurre a la siguiente expresión:

$$\Delta L = \frac{\mu\varepsilon_{ACTUAL} * LW}{10^6}$$

$\mu\varepsilon_{ACTUAL} = 0.000$  *adim. (deformación)*

$LW = 51$ mm *(longitud de la cuerda vibrante)*

$\frac{1}{10^6} =$  *factor de periodo de vibración (manual del proveedor)*

Sustituyendo:

$$\Delta L = \frac{(0.000 \text{ adim})(51 \text{ mm})}{10^6} = \mathbf{0.000 \text{ mm}}$$

| No. | Fecha     | LECTURA                              |  |         | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                 | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Observaciones   |
|-----|-----------|--------------------------------------|--|---------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|--|---|
|     |           | datos de campo Hz <sup>2</sup> /1000 | $\mu\varepsilon = 0.391(10^{-3})(F^2)$ | T (° c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L$ (mm) |                                |  |   |
| 1   | 09-jul-12 | 6194.00                              | 2421.854                               | 18.6    | 0.000             | 0.000                      | 0.000           | 0.000           |                                |  | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO |

Ahora se calcula el esfuerzo mediante la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{\mu\varepsilon_{ACTUAL} * E}{10^6}$$

$\mu\varepsilon_{ACTUAL} = 0.000$  *adim. (deformación)*

$E = 2,000,000$  *kg/cm<sup>2</sup> (Módulo Elástico del acero)*

$\frac{1}{10^6}$  = *factor de periodo de vibración (manual del proveedor)*

Sustituyendo:

$$\sigma = \frac{(0.000)(2,000,000 \text{ kg/cm}^2)}{10^6} = 0.000 \text{ kg/cm}^2$$

|   | Fecha     | LECTURA                              |  |         | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                 | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm <sup>2</sup> )      | Observaciones |
|---|-----------|--------------------------------------|--|---------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|---|---------------|
|   |           | datos de campo Hz <sup>2</sup> /1000 | $\mu\varepsilon = 0.391(10^{-3})(F^2)$ | T (° c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L$ (mm) |                                |   |               |
| 1 | 09-jul-12 | 6194.00                              | 2421.854                               | 18.6    | 0.000             | 0.000                      | 0.000           | 0.000           | 0.000                          | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO |               |

Para el llenado de la última columna que corresponde al “ESFUERZO DESPUÉS DE INSTALACIÓN ANILLO EN TÚNEL” se requiere de datos de la siguiente lectura, pero será llenada en la lectura cero (después de la colocación del anillo instrumentado).

Para la siguiente lectura se hará uso de las mismas operaciones, sin embargo, de ahora en adelante se hará uso de los datos de la lectura “n” (en este caso la No. 2) y la lectura inicial.

$$\mu\varepsilon_{ACTUAL} = (R_1 - R_0)B + (T_1 - T_0)(CF_1 - CF_2)$$

| No. | Fecha     | LECTURA                              |  |         | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                 | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm <sup>2</sup> )            | Observaciones |
|-----|-----------|--------------------------------------|--|---------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|---|---------------|
|     |           | datos de campo Hz <sup>2</sup> /1000 | $\mu\varepsilon = 0.391(10^{-3})(F^2)$ | T (° c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L$ (mm) |                                |   |               |
| 1   | 09-jul-12 | 6194.00                              | 2421.854                               | 18.6    | 0.000             | 0.000                      | 0.000           | 0.000           | 0.000                          | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO       |               |
| 2   | 10-jul-12 | 6100.1                               |  | 22.2    |                   |                            |                 |                 |                                | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO, DESPUES DE LA INSTALACION DEL INSTRUMENTO |               |

Conversión de unidades de frecuencia a deformación:

$$\mu\varepsilon = (0.391)(10^{-3} F^2)$$

$\mu\varepsilon$  = lectura modificada expresada en deformación unitaria (  $\mu\varepsilon$  *adim.* )

0.391 = factor de teorico de medición

$(10^{-3} F^2)$  = lectura obtenida en unidades de frecuencia ( $Hz^2/1000$ )

$$\mu\varepsilon = (0.391)(6100.10) = \mathbf{2385.139 \textit{ adim.}}$$

Calculo de las deformaciones aparentes:

$$\mu\varepsilon_{APARENTE} = (R_1 - R_0)B$$

$R_0$  = lectura inicial expresada en deformaciones unitarias

$R_1$  = lectura "n" expresada en deformaciones unitarias

$B$  = factor nominal de lote

Sustituyendo valores:

$$\mu\varepsilon_{APARENTE} = (2,385.139 - 2,421.854) 0.92 = \mathbf{-33.78 \textit{ adim.}}$$

Cálculo para obtener la deformación por corrección por temperatura:

$$\mu\varepsilon_{CORRECCIÓN} = (T_1 - T_0)(CF_1 - CF_2)$$

$T_0$  = temperatura de la lectura inicial

$T_1$  = temperatura de la lectura "n"

$CF_1$  = coeficiente térmico de expansión del acero

$CF_2$  = coeficiente térmico del concreto

Sustituyendo:

$$\mu\varepsilon_{CORRECCIÓN} = (22.2 - 18.6)(12.20 - 10.40) = \mathbf{6.48 \text{ adim.}}$$

Deformación actual:

$$\mu\varepsilon_{ACTUAL} = (R_1 - R_0)B + (T_1 - T_0)(CF_1 - CF_2)$$

Sustituyendo valores:

$$\mu\varepsilon_{ACTUAL} = -33.78 + 6.48 = \mathbf{-27.30 \text{ adim.}}$$



El desplazamiento generado:

$$\Delta L = \frac{\mu \varepsilon_{ACTUAL} * Lw}{10^6}$$

$$\mu \varepsilon_{ACTUAL} = -27.30 \text{ adim. (deformación)}$$

$$Lw = 51 \text{ mm (longitud de la cuerda vibrante)}$$

$$\frac{1}{10^6} = \text{factor de periodo de vibración (manual del proveedor)}$$

Sustituyendo:

$$\Delta L = \frac{(-27.30 \text{ adim})(51 \text{ mm})}{10^6} = -0.00139 \text{ mm}$$

Calculo del esfuerzo:

$$\sigma = \frac{\mu \varepsilon_{ACTUAL} * E}{10^6}$$

$$\mu \varepsilon_{ACTUAL} = -27.30 \text{ adim. (deformación)}$$

$$E = 2,000,000 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Módulo Elástico del acero)}$$

$$\frac{1}{10^6} = \text{factor de periodo de vibración (manual del proveedor)}$$

Sustituyendo:

$$\sigma = \frac{(-27.30)(2,000,000 \text{ kg/cm}^2)}{10^6} = 54.60 \text{ kg/cm}^2$$

| No. | Fecha     | LECTURA                              |  |         | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                 | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Observaciones   |
|-----|-----------|--------------------------------------|--|---------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|--|---|
|     |           | datos de campo Hz <sup>2</sup> /1000 | $\mu\varepsilon = 0.391(10^{-3})(F^2)$ | T (° c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L$ (mm) |                                |  |   |
| 1   | 09-jul-12 | 6194.00                              | 2421.854                               | 18.6    | 0.000             | 0.000                      | 0.000           | 0.000           | 0.000                          |  | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO       |
| 2   | 10-jul-12 | 6100.1                               | 2385.139                               | 22.2    | -33.78            | 6.48                       | -27.3           | -0.00139        | -54.6                          |  | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO, DESPUES DE LA INSTALACION DEL INSTRUMENTO |

Ya que se ha determinado el cálculo de esfuerzos de los monitoreos preliminares, se procede a hacer el cálculo de la lectura cero y las siguientes para obtener el esfuerzo en el acero después de instalar el anillo, que serán los parámetros de análisis en el comportamiento de los materiales debido a su interacción con el terreno natural.

Se realizan los cálculos ya conocidos:

| No. | Fecha     | LECTURA                              |  |         | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                 | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm <sup>2</sup> )            | Observaciones |
|-----|-----------|--------------------------------------|--|---------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|---|---------------|
|     |           | datos de campo Hz <sup>2</sup> /1000 | $\mu\varepsilon = 0.391(10^{-3})(F^2)$ | T (° c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L$ (mm) |                                |   |               |
| 1   | 09-jul-12 | 6194                                 | 2421.854                               | 18.6    | 0.000             | 0.000                      | 0.000           | 0.000           | 0.000                          | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO       |               |
| 2   | 10-jul-12 | 6100.1                               | 2385.139                               | 22.2    | -33.78            | 6.48                       | -27.3           | -0.00139        | -54.6                          | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO, DESPUES DE LA INSTALACION DEL INSTRUMENTO |               |
| 3   | 11-jul-12 | 5937.2                               | 2321.445                               | 63.7    | -92.38            | 81.18                      | -11.2           | -0.00057        | -22.39                         | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO DEL INSTRUMENTO, CON DOVELA YA COLADA      |               |
| 4   | 03-oct-13 | 6153.6                               | 2406.058                               | 23.9    | -14.53            | 9.54                       | -4.99           | -0.00025        | -9.99                          | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE LA INSTALACION DEL ANILLO.        |               |
| 5   | 03-oct-13 | 6253.5                               | 2445.119                               | 23.7    | 21.4              | 9.18                       | 30.58           | 0.00156         | 61.17                          | LECTURA CERO, DESPUES DE INSTALAR EL ANILLO                               |               |

Para el cálculo del esfuerzo generado después de la instalación sobre el anillo se recurre a la siguiente operación:

$$P_t = P_n - P_i$$

En el caso de la lectura inicial, los esfuerzos ( $P_n, P_i$ ) tendrán el mismo valor.

$$P_t = 61.17 - 61.17 = \mathbf{0.00 \text{ Kg/cm}^2}$$

|   |           |        |          |      |      |      |       |         |       |      |   |
|---|-----------|--------|----------|------|------|------|-------|---------|-------|------|---|
| 5 | 03-oct-13 | 6253.5 | 2445.119 | 23.7 | 21.4 | 9.18 | 30.58 | 0.00156 | 61.17 | 0.00 | LECTURA CERO, DESPUES DE INSTALAR EL ANILLO |
|---|-----------|--------|----------|------|------|------|-------|---------|-------|------|---|

Para la siguiente lectura se procede con los mismos cálculos, sin embargo, cabe aclarar que a partir de esta lectura en adelante el valor del esfuerzo ejercido en el acero después de su instalación del anillo instrumentado dependerá del esfuerzo generado en la lectura “n” y la presión inicial (de la “LECTURA CERO”).

| No. | Fecha     | LECTURA                              |  |        | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                 | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Observaciones   |
|-----|-----------|--------------------------------------|--|--------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|--|---|
|     |           | datos de campo Hz <sup>2</sup> /1000 | $\mu\varepsilon = 0.391(10^{-3})(F^2)$ | T (°c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L$ (mm) |                                |  |   |
| 1   | 09-jul-12 | 6194                                 | 2421.854                               | 18.6   | 0.000             | 0.000                      | 0.000           | 0.000           | 0.000                          |  | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO       |
| 2   | 10-jul-12 | 6100.1                               | 2385.139                               | 22.2   | -33.78            | 6.48                       | -27.3           | -0.00139        | -54.6                          |  | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO, DESPUES DE LA INSTALACION DEL INSTRUMENTO |
| 3   | 11-jul-12 | 5937.2                               | 2321.445                               | 63.7   | -92.38            | 81.18                      | -11.2           | -0.00057        | -22.39                         |  | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO DEL INSTRUMENTO, CON DOVELA YA COLADA      |
| 4   | 03-oct-13 | 6153.6                               | 2406.058                               | 23.9   | -14.53            | 9.54                       | -4.99           | -0.00025        | -9.99                          |  | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE LA INSTALACION DEL ANILLO.        |
| 5   | 03-oct-13 | 6253.5                               | 2445.119                               | 23.7   | 21.4              | 9.18                       | 30.58           | 0.00156         | 61.17                          | 0.000  | LECTURA CERO, DESPUES DE INSTALAR EL ANILLO                               |
| 6   | 03-oct-13 | 5930.5                               | 2318.826                               | 24.7   | -94.79            | 10.98                      | -83.81          | -0.00427        | -167.61                        |  | PRIMERA LECTURA E INICIO DEL MONITOREO                                    |

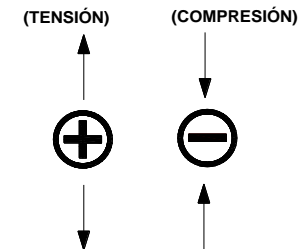
$$P_t = P_n - P_i$$

$P_t$  = esfuerzo en el acero después de la instalación del anillo en túnel

$P_n$  = esfuerzo de la lectura "n"

$P_i$  = esfuerzo de la lectura inicial (LECTURA CERO)

$$P_t = -167.61 - 61.17 = -228.78 \text{ Kg/cm}^2$$



Se continúa con este último procedimiento para determinar los esfuerzos ejercidos en el túnel de los monitoreos subsecuentes.

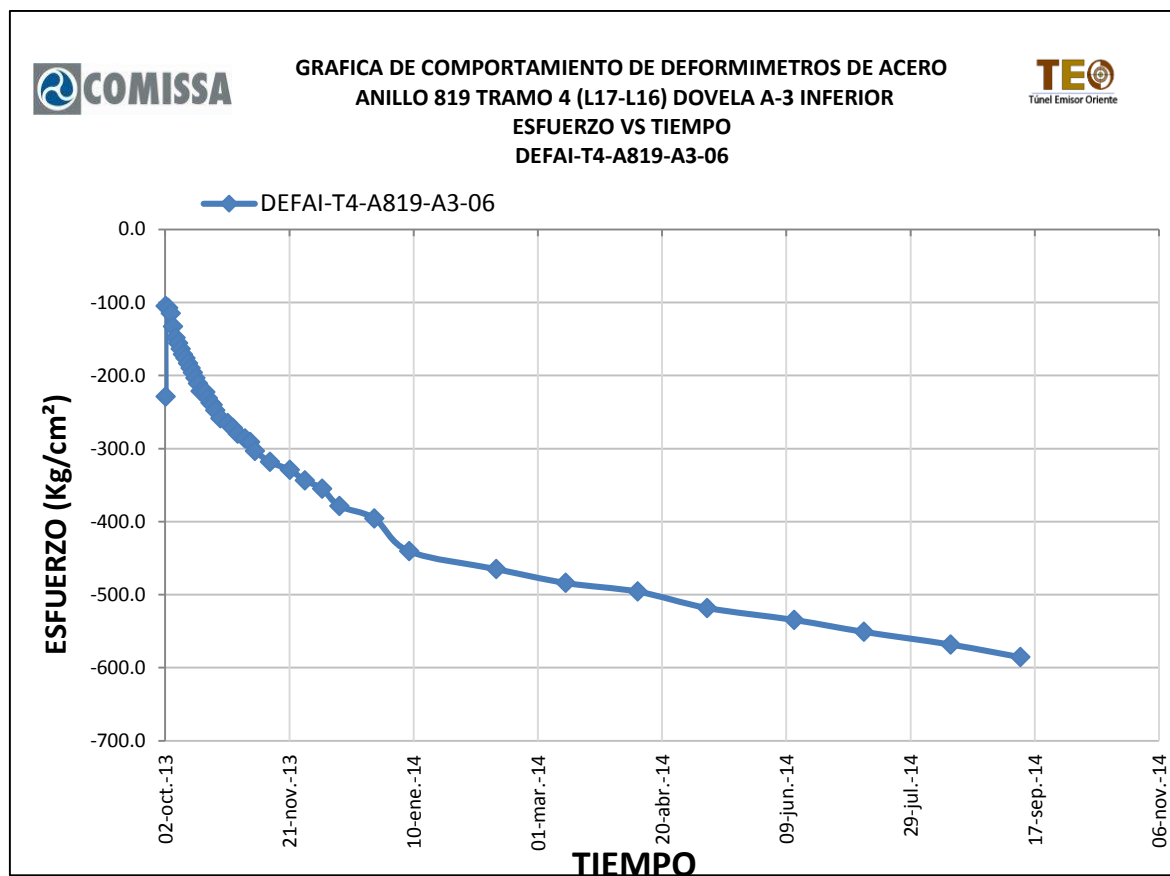


Figura 16. REGISTRO DE LECTURAS ESFUERZO EN DEFORMÍMETRO PARA EL ACERO DEL ANILLO INSTRUMENTADO No. 819 EN TÚNEL, TRAMO 4.

#### 5.4 Deformímetros de concreto

Para los deformímetros de acero también se tiene un control de ellos por lo que se cuenta con los siguientes datos para identificarlos:

|  |   |
|--|---|
| <b>SENSORES DE ACERO:</b>                | <b>DEFI-T4-A819-A3-08</b>   |
| <b>Fecha de instalación en el túnel:</b> | <b>03-Oct-13</b>  |
| <b>UBICACIÓN:</b>                        | <b><u>LECHO INFERIOR COSTADO IZQUIERDO A MEDIA SECCIÓN DE TÚNEL</u></b> |

También se cuenta con ciertos parámetros iniciales del instrumento, para el cálculo de esfuerzos ejercidos.

| <b>Parámetros iniciales</b> |                   |                              |  |
|-----------------------------|-------------------|------------------------------|--|
| <b>B =</b>                  | <b>0.98</b>       | Adim.                        | (Factor nominal de lote)                     |
| <b>CF1 =</b>                | <b>12.20</b>      | $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ | (Coeficiente térmico de expansión de acero)  |
| <b>CF2 =</b>                | <b>10.40</b>      | $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ | (Coeficiente térmico del concreto)           |
| <b>Lw =</b>                 | <b>153.00</b>     | mm                           | (Longitud de la cuerda vibrante)             |
| <b>F'c=</b>                 | <b>550.00</b>     | $\text{Kg}/\text{cm}^2$      | (Resistencia del concreto a 28 días)         |
| <b>E=</b>                   | <b>328,329.10</b> | $\text{Kg}/\text{cm}^2$      | (Módulo de elasticidad del concreto clase 1) |

Al igual que los deformímetros de acero y con base ecuaciones siguientes se determinan los esfuerzos a los que está sometido el concreto, así como los desplazamientos que se presentan como consecuencia de la instalación del anillo instrumentado al túnel. El procedimiento para el cálculo de deformaciones y esfuerzos en el concreto es idéntico que el caso anterior, por lo que se repetirá dicho logaritmo.

Como se describió recientemente, se hace una conversión de las lecturas, multiplicándolas por su factor de medición el cual transformará las frecuencias (Hz) en deformaciones; basándonos en las ecuaciones ya conocidas se obtienen los esfuerzos y desplazamientos reales en nuestro material.

En la conversión de unidades de frecuencia a deformación se utiliza la siguiente ecuación, variando el factor teórico del instrumento:

$$\mu\varepsilon = (3.304)(10^{-3} F^2)$$

$\mu\varepsilon =$  lectura modificada expresada en deformación unitaria ( $\mu\varepsilon$  adim.)

3.304 = factor de teorico de medición

$(10^{-3} F^2) = 6194.00$  (lectura obtenida en unidades de frecuencia) ( $\text{Hz}^2/1000$ )

$$\mu\varepsilon = (3.304)(866.90) = \mathbf{2864.24 \text{ adim.}}$$

Como una medida de control se opta por una tabla en la cual se irán plasmando los cálculos realizados paso a paso:

| No. | Fecha     | LECTURA                              |                                     |         | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                       | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Observaciones   |
|-----|-----------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------------|--------------------------------|--|---|
|     |           | datos de campo Hz <sup>2</sup> /1000 | $\mu\varepsilon=3.304*(10^{-3})f^2$ | T (° c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L(\text{mm})$ |                                |  |   |
| 1   | 09-jul-12 | 866.90                               | 2864.24                             | 19.0    |                   |                            |                 |                       |                                |  | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO |

Se comienza a calcular las deformaciones aparentes, para el caso de la primera lectura los valores de los esfuerzos  $R_1, R_0$  tendrán el mismo valor.

$$\mu\varepsilon_{APARENTE} = (R_1 - R_0)B$$

$R_0 = 2864.24$  (lectura inicial expresada en deformaciones unitarias)

$B = 0.98$  (factor nominal de lote)

Sustituyendo valores:

$$\mu\varepsilon_{APARENTE} = (2,864.24 - 2,864.24) 0.92 = \mathbf{0.000 \text{ adim.}}$$

| No. | Fecha     | LECTURA                              |                                     |         | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                 | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Observaciones   |
|-----|-----------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|--|---|
|     |           | datos de campo Hz <sup>2</sup> /1000 | $\mu\varepsilon=3.304*(10^{-3})f^2$ | T (° c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L$ (mm) |                                |  |   |
| 1   | 09-jul-12 | 866.90                               | 2864.24                             | 19.0    | 0.000             |                            |                 |                 |                                |  | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO |

A continuación veremos el cálculo para obtener la deformación por corrección por temperatura. Cabe mencionar que para la primera lectura el valor de las temperaturas  $T_1, T_0$  serán el mismo valor, por lo que recurriremos a la siguiente expresión:

$$\mu\varepsilon_{CORRECCION} = (T_1 - T_0)(CF_1 - CF_2)$$



$T_0 =$  temperatura de la lectura inicial

$CF_1 =$  coeficiente térmico de expansión del acero

$CF_2 =$  coeficiente térmico del concreto

Sustituyendo:

$$\mu\varepsilon_{CORRECCI\acute{O}N} = (19.0 - 19.0)(12.20 - 10.40) = \mathbf{0.000 \text{ adim.}}$$

| No. | Fecha     | LECTURA                              |                                     |         | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                 | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Observaciones   |
|-----|-----------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|--|---|
|     |           | datos de campo Hz <sup>2</sup> /1000 | $\mu\varepsilon=3.304*(10^{-3})f^2$ | T (° c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L$ (mm) |                                |  |   |
| 1   | 09-jul-12 | 866.90                               | 2864.24                             | 19.0    | 0.000             | 0.000                      |                 |                 |                                |  | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO |

Se determina la deformación actual, mediante la siguiente ecuación, la cual está basada en los dos cálculos anteriores:

$$\mu\varepsilon_{ACTUAL} = (R_1 - R_0)B + (T_1 - T_0)(CF_1 - CF_2)$$

Sustituyendo valores:

$$\mu\varepsilon_{ACTUAL} = 0.000 + 0.000 = \mathbf{0.000 \text{ adim.}}$$

| No. | Fecha     | LECTURA                              |                                     |         | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                 | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Observaciones   |
|-----|-----------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|--|---|
|     |           | datos de campo Hz <sup>2</sup> /1000 | $\mu\varepsilon=3.304*(10^{-3})f^2$ | T (° c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L$ (mm) |                                |  |   |
| 1   | 09-jul-12 | 866.90                               | 2864.24                             | 19.0    | 0.000             | 0.000                      | 0.0000          |                 |                                |  | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO |

Para determinar el desplazamiento generado se recurre a la siguiente expresión:

$$\Delta L = \frac{\mu \varepsilon_{ACTUAL} * Lw}{10^6}$$

$\mu \varepsilon_{ACTUAL} = 0.000$  *adim. (deformación)*

$Lw = 153$  *mm (longitud de la cuerda vibrante)*

$\frac{1}{10^6}$  = *factor de periodo de vibración (manual del proveedor)*

Sustituyendo:

$$\Delta L = \frac{(0.000 \text{ adim})(153 \text{ mm})}{10^6} = \mathbf{0.000 \text{ mm}}$$

| No. | Fecha     | LECTURA                 |   |         | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                 | Esfuerzo (Kg/cm²) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm²) | Observaciones   |
|-----|-----------|-------------------------|---|---------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|-------------------|---|---|
|     |           | datos de campo Hz²/1000 | $\mu \varepsilon = 3.304 * (10^{-3}) f^2$ | T (° c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L$ (mm) |                   |   |   |
| 1   | 09-jul-12 | 866.90                  | 2864.24                                   | 19.0    | 0.000             | 0.000                      | 0.0000          | 0.000           |                   |   | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO |

Ahora se calcula el esfuerzo mediante la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{\mu\varepsilon_{ACTUAL} * E}{10^6}$$

$\mu\varepsilon_{ACTUAL}=0.000$  *adim. (deformación)*

$E = 328,329.1 \text{ kg/cm}^2$  (*Módulo Elástico del concreto*)

$\frac{1}{10^6} =$  *factor de periodo de vibración (manual del proveedor)*

Sustituyendo:

$$\sigma = \frac{(0.000)(328,329.1 \text{ kg/cm}^2)}{10^6} = 0.000 \text{ kg/cm}^2$$

| No. | Fecha     | LECTURA                 |                                     |         | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                 | Esfuerzo (Kg/cm²) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm²)                   | Observaciones |
|-----|-----------|-------------------------|-------------------------------------|---------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|-------------------|---|---------------|
|     |           | datos de campo Hz²/1000 | $\mu\varepsilon=3.304*(10^{-3})f^2$ | T (° c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L$ (mm) |                   |   |               |
| 1   | 09-jul-12 | 866.90                  | 2864.24                             | 19.0    | 0.000             | 0.000                      | 0.0000          | 0.000           | 0.000             | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO |               |

Para el llenado de la última columna que corresponde al “ESFUERZO DESPUES DE INSTALACIÓN ANILLO EN TÚNEL” se requieren datos que aportará la siguiente lectura, por lo pronto, será llenada en la lectura cero (después de la colocación del anillo instrumentado).

Para la siguiente lectura se hará uso de las operaciones conocidas; de ahora en adelante se hará uso de los datos de la lectura “n” (en este caso la No. 2) y la lectura inicial.

$$\mu\epsilon_{ACTUAL} = (R_1 - R_0)B + (T_1 - T_0)(CF_1 - CF_2)$$

| No. | Fecha     | LECTURA                              |                                  |         | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm <sup>2</sup> )            | Observaciones |
|-----|-----------|--------------------------------------|----------------------------------|---------|-------------------|----------------------------|-----------------|----------------|--------------------------------|---|---------------|
|     |           | datos de campo Hz <sup>2</sup> /1000 | $\mu\epsilon=3.304*(10^{-3})f^2$ | T (° c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L(mm)$ |                                |   |               |
| 1   | 09-jul-12 | 866.90                               | 2864.24                          | 19.0    | 0.000             | 0.000                      | 0.0000          | 0.000          | 0.000                          | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO       |               |
| 2   | 10-jul-12 | 859.1                                |                                  | 22.4    |                   |                            |                 |                |                                | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO, DESPUES DE LA INSTALACION DEL INSTRUMENTO |               |

Conversión de unidades de frecuencia a deformación:

$$\mu\epsilon = (3.304)(10^{-3} F^2)$$

$\mu\epsilon =$  lectura modificada expresada en deformación unitaria ( $\mu\epsilon$  adim.)

3.304 = factor de teorico de medición

$(10^{-3} F^2) =$  lectura obtenida en unidades de frecuencia (Hz<sup>2</sup>/1000)

$$\mu\varepsilon = (3.304)(859.10) = \mathbf{2838.47 \text{ adim.}}$$

Calculo de las deformaciones aparentes:

$$\mu\varepsilon_{APARENTE} = (R_1 - R_0)B$$

$R_0$  = lectura inicial expresada en deformaciones unitarias

$R_1$  = lectura "n" expresada en deformaciones unitarias

$B$  = factor nominal de lote

Sustituyendo valores:

$$\mu\varepsilon_{APARENTE} = (2,864.24 - 2,838.47) 0.92 = \mathbf{-25.26 \text{ adim.}}$$

Cálculo para obtener la deformación por corrección por temperatura:

$$\mu\varepsilon_{CORRECCIÓN} = (T_1 - T_0)(CF_1 - CF_2)$$

$T_0$  = temperatura de la lectura inicial

$T_1 = \text{temperatura de la lectura "n"}$

$CF_1 = \text{coeficiente térmico de expansión del acero}$

$CF_2 = \text{coeficiente térmico del concreto}$

Sustituyendo:

$$\mu\varepsilon_{CORRECCIÓN} = (22.4 - 19.0)(12.20 - 10.40) = \mathbf{6.12 \text{ adim.}}$$

Deformación actual:

$$\mu\varepsilon_{ACTUAL} = (R_1 - R_0)B + (T_1 - T_0)(CF_1 - CF_2)$$

Sustituyendo valores:

$$\mu\varepsilon_{ACTUAL} = -25.26 + 6.12 = \mathbf{-19.14 \text{ adim.}}$$

El desplazamiento generado:

$$\Delta L = \frac{\mu\varepsilon_{ACTUAL} * Lw}{10^6}$$

$$\mu\varepsilon_{ACTUAL} = -19.14 \text{ adim. (deformación)}$$

$$Lw = 153 \text{ mm (longitud de la cuerda vibrante)}$$

$$\frac{1}{10^6} = \text{factor de periodo de vibración (manual del proveedor)}$$

Sustituyendo:

$$\Delta L = \frac{(-19.14 \text{ adim})(153 \text{ mm})}{10^6} = -0.00293 \text{ mm}$$

Calculo del esfuerzo:

$$\sigma = \frac{\mu\varepsilon_{ACTUAL} * E}{10^6}$$

$$\mu\varepsilon_{ACTUAL} = -19.14 \text{ adim. (deformación)}$$

$$E = 2,000,000 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Módulo Elástico del acero)}$$

$$\frac{1}{10^6} = \text{factor de periodo de vibración (manual del proveedor)}$$

Sustituyendo:

$$\sigma = \frac{(-19.14)(2,000,000 \text{ kg/cm}^2)}{10^6} = -6.28 \text{ kg/cm}^2$$

| No. | Fecha     | LECTURA                              |                                     |         | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                 | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm <sup>2</sup> )            | Observaciones |
|-----|-----------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|---|---------------|
|     |           | datos de campo Hz <sup>2</sup> /1000 | $\mu\varepsilon=3.304*(10^{-3})f^2$ | T (° c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L$ (mm) |                                |   |               |
| 1   | 09-jul-12 | 866.90                               | 2864.24                             | 19.0    | 0.000             | 0.000                      | 0.0000          | 0.000           | 0.000                          | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO       |               |
| 2   | 10-jul-12 | 859.1                                | 2838.47                             | 22.2    | -25.26            | 6.12                       | -19.14          | -0.00293        | -6.28                          | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO, DESPUES DE LA INSTALACION DEL INSTRUMENTO |               |

Ya que se ha determinado el cálculo de esfuerzos de los monitoreos preliminares, se procede a hacer el cálculo de la lectura cero y las siguientes para obtener el esfuerzo en el acero después de instalar el anillo, que serán los parámetros de análisis en el comportamiento de los materiales debido a su interacción con el terreno natural.

Se realizan los cálculos ya conocidos:

| No. | Fecha     | LECTURA                              |                                     |         | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                 | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm <sup>2</sup> )            | Observaciones |
|-----|-----------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|---|---------------|
|     |           | datos de campo Hz <sup>2</sup> /1000 | $\mu\varepsilon=3.304*(10^{-3})f^2$ | T (° c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L$ (mm) |                                |   |               |
| 1   | 09-jul-12 | 866.90                               | 2421.854                            | 19.0    | 0.000             | 0.000                      | 0.0000          | 0.000           | 0.000                          | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO       |               |
| 2   | 10-jul-12 | 859.1                                | 2838.47                             | 22.4    | -25.26            | 6.12                       | -19.14          | -0.00293        | -6.28                          | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO, DESPUES DE LA INSTALACION DEL INSTRUMENTO |               |
| 3   | 11-jul-12 | 800.0                                | 2643.2                              | 65.4    | -216.62           | 83.52                      | -133.1          | -0.02036        | -43.7                          | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO DEL INSTRUMENTO, CON DOVELA YA COLADA      |               |
| 4   | 03-oct-13 | 869.1                                | 2871.51                             | 23.8    | 7.12              | 8.64                       | 15.76           | 0.00241         | 5.18                           | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE LA INSTALACION DEL ANILLO.        |               |
| 5   | 03-oct-13 | 873.1                                | 2884.72                             | 23.7    | 20.08             | 8.46                       | 28.54           | 0.00437         | 9.37                           | LECTURA CERO, DESPUES DE INSTALAR EL ANILLO                               |               |



Para el cálculo del esfuerzo generado después de la instalación sobre el anillo se recurre a la siguiente operación:

$$P_t = P_n - P_i$$

En el caso de la lectura inicial, los esfuerzos  $(P_n, P_i)$  tendrán el mismo valor.

$$P_t = 9.37 - 9.37 = \mathbf{0.00 \text{ Kg/cm}^2}$$

|   |           |       |         |      |       |      |       |         |      |       |  |
|---|-----------|-------|---------|------|-------|------|-------|---------|------|-------|--|
| 5 | 03-oct-13 | 873.1 | 2884.72 | 23.7 | 20.08 | 8.46 | 28.54 | 0.00437 | 9.37 | 0.000 | LECTURA CERO, DESPUES DE<br>INSTALAR EL ANILLO |
|---|-----------|-------|---------|------|-------|------|-------|---------|------|-------|--|

Para la siguiente lectura se procede con los mismos cálculos. A partir de esta lectura en adelante el valor del esfuerzo ejercido en el concreto después de su instalación del anillo instrumentado dependerá del esfuerzo generado en la lectura “n” y la presión inicial (de la “LECTURA CERO”).

| No. | Fecha     | LECTURA                              |                                     |         | AJUSTE LINEAL     |                            |                 |                 | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo después de instalación en túnel (Kg/cm <sup>2</sup> )            | Observaciones |
|-----|-----------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|---|---------------|
|     |           | datos de campo Hz <sup>2</sup> /1000 | $\mu\varepsilon=3.304*(10^{-3})f^2$ | T (° c) | ESFUERZO APARENTE | CORRECCION POR TEMPERATURA | ESFUERZO ACTUAL | $\Delta L$ (mm) |                                |   |               |
| 1   | 09-jul-12 | 866.90                               | 2421.854                            | 19.0    | 0.000             | 0.000                      | 0.0000          | 0.000           | 0.000                          | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE INSTALACION DEL INSTRUMENTO       |               |
| 2   | 10-jul-12 | 859.1                                | 2838.47                             | 22.4    | -25.26            | 6.12                       | -19.14          | -0.00293        | -6.28                          | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO, DESPUES DE LA INSTALACION DEL INSTRUMENTO |               |
| 3   | 11-jul-12 | 800.0                                | 2643.2                              | 65.4    | -216.62           | 83.52                      | -133.1          | -0.02036        | -43.7                          | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO DEL INSTRUMENTO, CON DOVELA YA COLADA      |               |
| 4   | 03-oct-13 | 869.1                                | 2871.51                             | 23.8    | 7.12              | 8.64                       | 15.76           | 0.00241         | 5.18                           | VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO ANTES DE LA INSTALACION DEL ANILLO.        |               |
| 5   | 03-oct-13 | 873.1                                | 2884.72                             | 23.7    | 20.08             | 8.46                       | 28.54           | 0.00437         | 9.37                           | LECTURA CERO, DESPUES DE INSTALAR EL ANILLO                               |               |
| 6   | 03-oct-13 | 847.5                                | 2800.14                             | 24.6    | -62.82            | 10.08                      | -52.74          | -0.00807        | -17.31                         | PRIMERA LECTURA E INICIO DEL MONITOREO                                    |               |

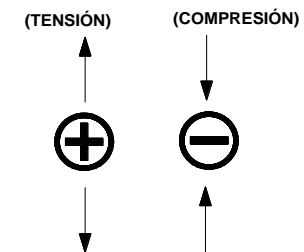
$$P_t = P_n - P_i$$

$P_t$  = esfuerzo en el acero después de la instalación del anillo en túnel

$P_n$  = esfuerzo de la lectura "n"

$P_i$  = esfuerzo de la lectura inicial (LECTURA CERO)

$$P_t = -17.31 - 9.37 = -26.68 \text{ Kg/cm}^2$$



|   |           |       |         |      |        |       |        |          |        |        |  |
|---|-----------|-------|---------|------|--------|-------|--------|----------|--------|--------|--|
| 6 | 03-oct-13 | 847.5 | 2800.14 | 24.6 | -62.82 | 10.08 | -52.74 | -0.00807 | -17.31 | -26.28 | PRIMERA LECTURA E INICIO DEL MONITOREO |
|---|-----------|-------|---------|------|--------|-------|--------|----------|--------|--------|--|

Se continúa con este último procedimiento para determinar los esfuerzos ejercidos en el túnel de los monitoreos subsecuentes.

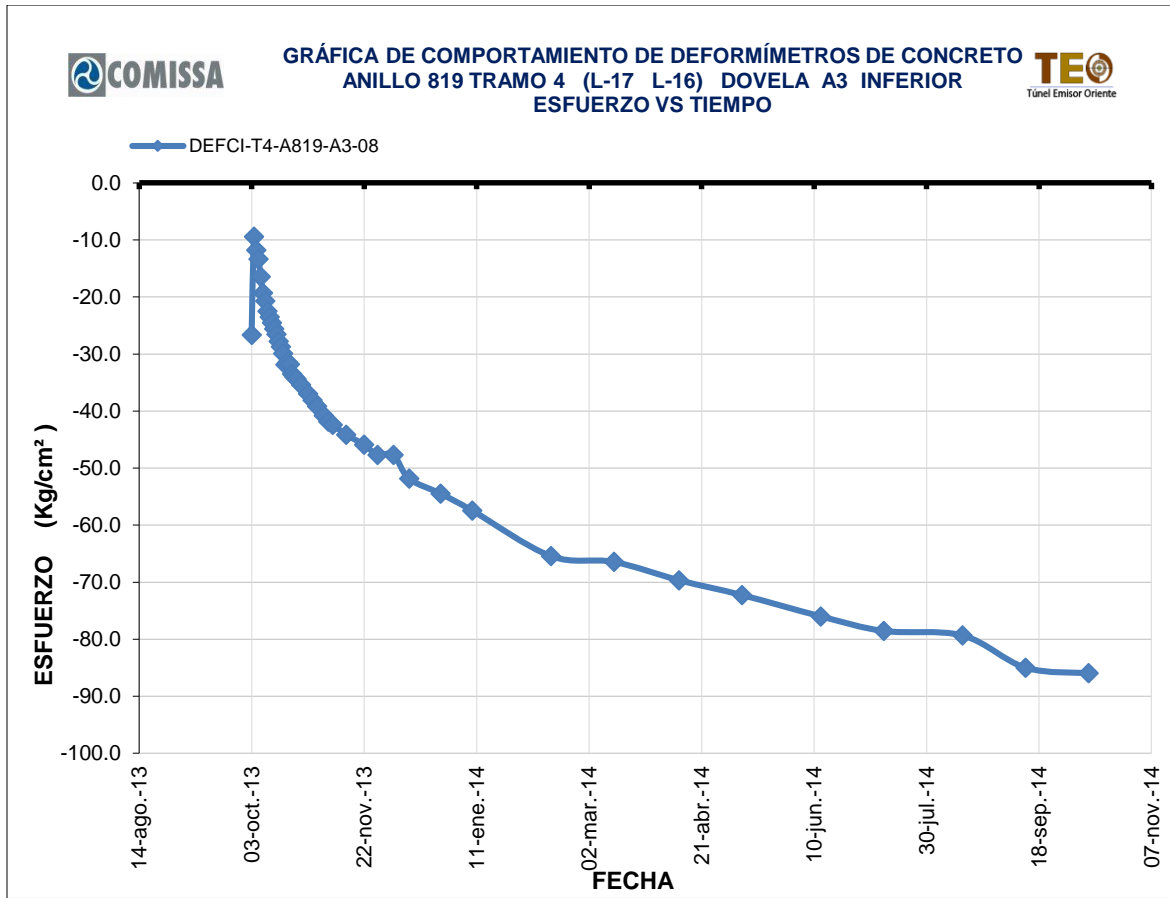


Figura 17. REGISTRO DE LECTURAS ESFUERZO EN DEFORMÍMETRO PARA EL CONCRETO DEL ANILLO INSTRUMENTADO No. 819 EN TÚNEL, TRAMO 4

---

## 6. MONITOREO Y REPORTE DE SISTEMA DE CONVERGENCIAS AUTOMATIZADO

---

El monitoreo de este sistema comprende desde el instante de su instalación hasta el momento que debido al avance de la tuneladora TBM, el sistema se encuentre saliendo de la zona de gantries. Esta zona corresponde a dónde se alojan los aditamentos que requiere la tuneladora como son las unidades de poder, variadores de frecuencia, tanque de mortero, cabina del operador, además de los soportes para el tornillo que ayuda a la extracción del material producto de excavación.

Se retira el sistema de convergencias automatizado en conjunto con la unidad de almacenamiento de datos (Data Logger), para realizar trabajos de limpieza y mantenimiento menor a los sensores (tiltmeters).

Una vez que el sistema se encuentra afuera de la zona de gantries, se descarga la información almacenada en una pc portátil, para posteriormente ser procesada por un software denominado Geoviewer, el cual interpreta los datos permitiendo obtener un polígono de deformaciones generado por cada uno de los tiltmeters que conforman el sistema.

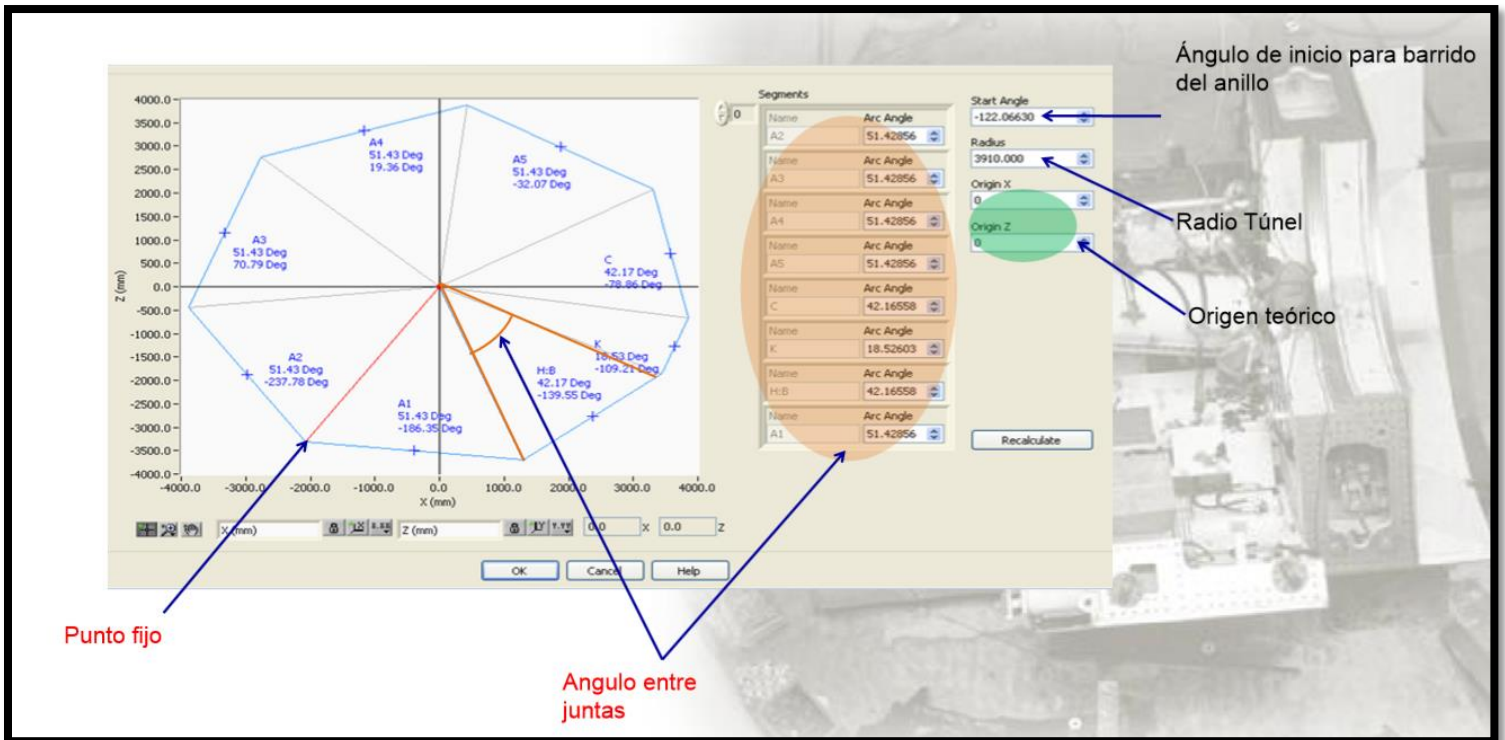


Figura 18. POLÍGONO VIRTUAL GENERADO POR EL SISTEMA DE CONVERGENCIAS AUTOMATIZADO.

Se hace una comparación del polígono inicial con el final, determinando la convergencia y divergencia de mayor magnitud, por lo que en este caso se determina un aumento en su diámetro horizontal y una disminución en su diámetro vertical.

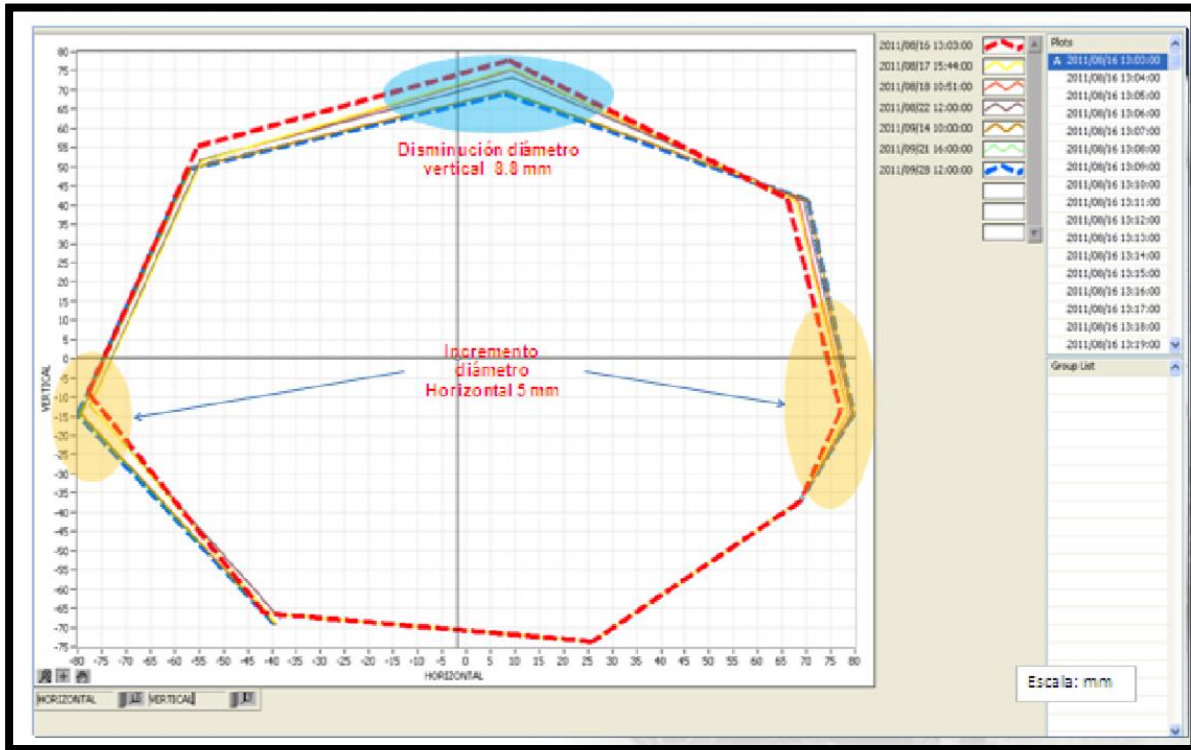
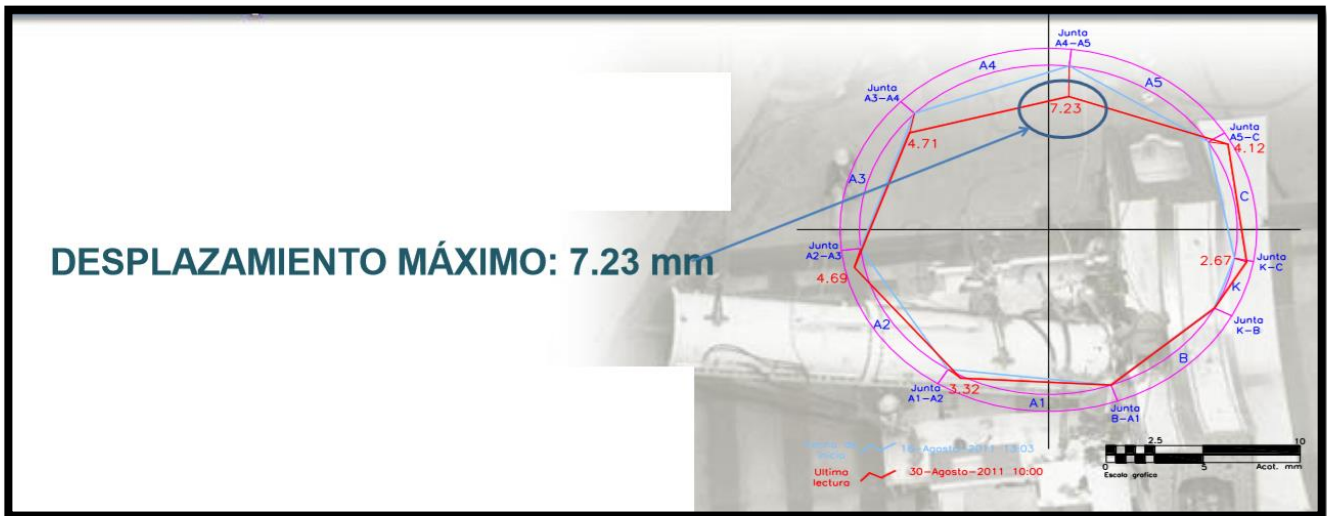


Figura 19. DESPLAZAMIENTO DEL POLÍGONO VIRTUAL



**DESPLAZAMIENTO MÁXIMO: 7.23 mm**

Figura 20. MAGNITUD DEL DESPLAZAMIENTO EN EL POLÍGONO VIRTUAL

También se grafica los desplazamientos generador por cada tiltmeter.

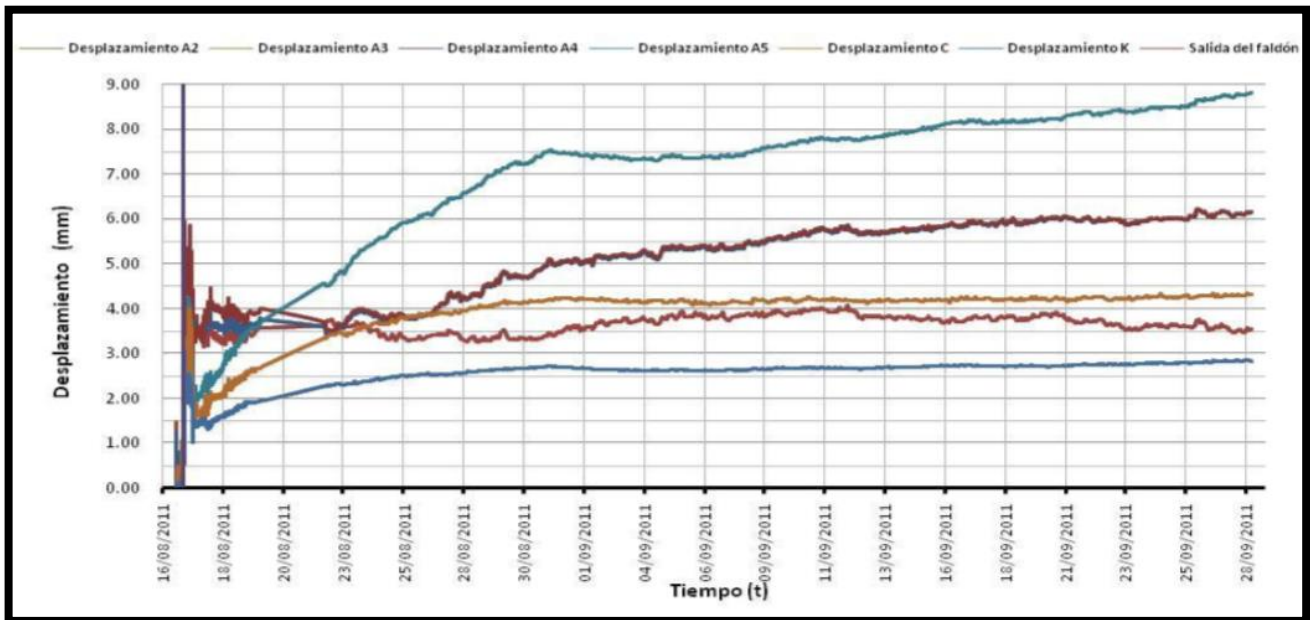


Figura 21. DESPLAZAMIENTO EN CADA TILT METER

Se ha observado que a partir del paso de los carros que conforman la caravana del escudo, las velocidades de deformación disminuyen tanto en los hastiales como en la zona de la clave. La mayor deformación por lo tanto ocurre durante el paso de los carros de la maquina tuneladora por el anillo instrumentado, posterior a su paso las velocidades disminuyen considerablemente.

Para finalizar, se realiza el reporte correspondiente al monitoreo, mencionando una comparación de la deformación diametral del anillo registrada en Sistema de Convergencias Automatizado y las registradas por medio topográficos.

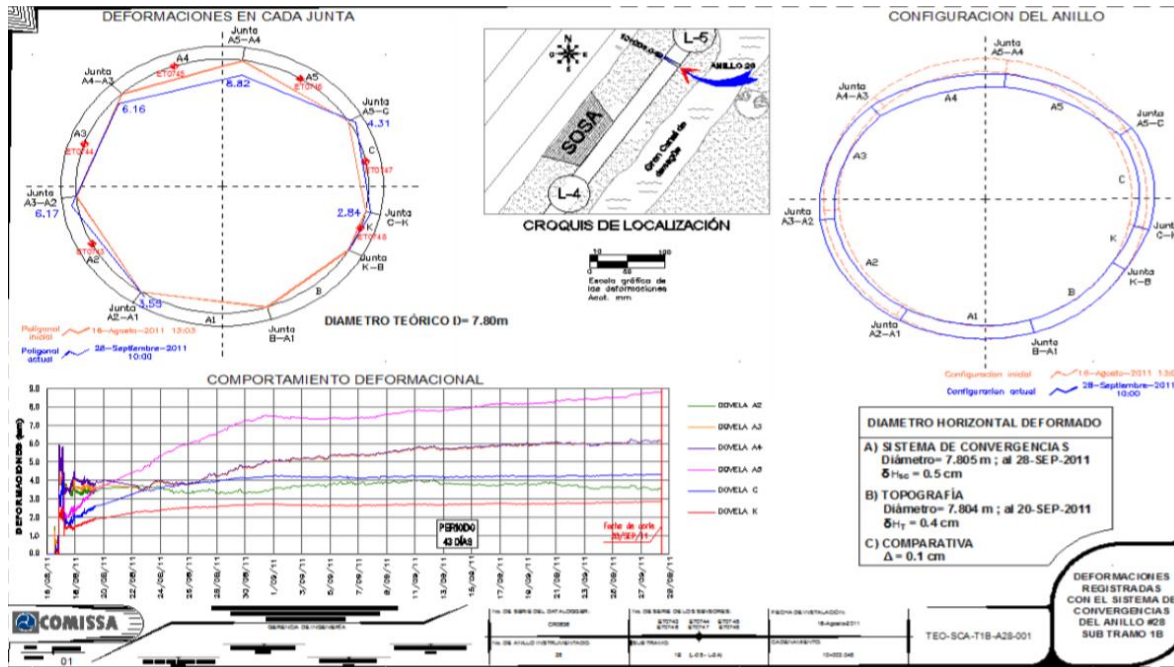


Figura 22. REPORTE DE SISTEMA DE CONVERGENCIAS AUTOMATIZADO



---

## 7. CONCLUSIONES

---

La aplicación de la instrumentación es primordial para monitorear el comportamiento de los indicadores esenciales para la excavación y las estructuras cercanas, verificando que los datos obtenidos vayan acorde con lo preestablecido en el proyecto, tomando alguna acción en caso de verse alguna situación extraordinaria. Además del cuidado adecuado del personal técnico debe considerar al instante de la instalación de tan sofisticado equipo.

El procedimiento se describe de manera de optimizar cada una de las etapas del procedimiento, evitando alguna anomalía o retraso al momento de ejecución tanto en la instalación, monitoreo y procesamiento de datos, esto basándose en los múltiples ejercicios realizados a través de los Anillos instrumentados y Sistemas de Convergencias Automatizados colocados en el tramo III y IV, específicamente en los subtramos de lumbrera L-16 a L-15 (Tramo IV) y de lumbrera L-10 a L-11 (Tramo III).

Es de vital importancia que el personal encargado de los procesos se encuentre totalmente capacitado ya que debido al mecanismo con el que trabajan pueden verse afectados por simples movimientos, también es primordial contar con las calibraciones de los equipos a instalar y el equipo de monitoreo, esto para constatar que los trabajos a realizar se ejecuten conforme al proveedor y los parámetros iniciales para realizar de manera exacta los cálculos ya descritos.

---

## BIBLIOGRAFÍA

---

- ❖ Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, A.C. Julio de 1987. Curso Victor Hardy “Túneles y excavaciones subterráneas”. México D.F. CAVM.
- ❖ Geokon. (1986-2010). Instruction Manual. Models 4200/ 4202/ 4204/ 4210, Vibrating Wire strain Gages. 48 Spencer Street Lebanon, NH 03766, USA. Geokon, Inc.
- ❖ Geokon. (1984- 2010). Instruction Manual, Models 4800, 4810, 4815, 4820 and 4830 VW Earth Pressure Cells. 48 Spencer Street Lebanon, NH 03766, USA. Geokon, Inc.
- ❖ Slope Indicator. 2006. VW data Recorder.
- ❖ Fichas técnicas, [www.rstinstruments.com](http://www.rstinstruments.com) .