

CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO DE PUENTES VIGA CAJÓN EN
CONCRETO, UTILIZANDO ENSAYOS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL. CASO DE
ESTUDIO: NUEVO PUENTE GÓMEZ ORTIZ

MARÍA CAMILA CORREDOR PÉREZ

CAROLINA CASTELLANOS RANGEL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2015

CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO DE PUENTES VIGA CAJÓN EN
CONCRETO, UTILIZANDO ENSAYOS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL. CASO DE
ESTUDIO: NUEVO PUENTE GÓMEZ ORTIZ

MARÍA CAMILA CORREDOR PÉREZ
CAROLINA CASTELLANOS RANGEL

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Civil

Director
ÁLVARO VIVIESACAS JAIMES
Ingeniero Civil, PhD.

Codirector
GUILLERMO MARTÍNEZ
Ingeniero Civil, PhD.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2015

DEDICATORIA

A los dos pilares de mi vida, mi familia por darme las bases para afrontarla y a Dios por permitirme disfrutarla.

A mi mamá y papá por su amor, sacrificios y dedicación incondicional, por siempre confiar en mí, por dejarme ser y por siempre sentirse orgullosos. Porque me brindaron todas las herramientas para cumplir mi objetivo y quisieron recorrer este camino conmigo. Por enseñarme el significado de familia, son la motivación de todos mis logros.

A mis abuelos por enseñarme que la bondad, la humildad y la nobleza hacen a la persona. Por presentarme el amor más genuino y vulnerable.

A mis compañeros de estudio y nuevos amigos de vida, Cami por ser mi compañera de estudio, de luchas y dudas existenciales. Qué mejor que terminar este recorrido de 5 años que como comenzó, juntas. A Vic por ser esa persona de luz que todos necesitamos en el camino.

A cada uno de mis compañeros con quien compartí dentro y fuera de las aulas, por esas largas jornadas de las cuales ahora vemos frutos.

A mis amigas que me hicieron disfrutarme el camino y me recordaron siempre el balance de la vida. Cada una construyendo sus sueños, pero seguras de que al final siempre nos tendríamos para levantarnos en momentos difíciles, reírnos y gozar.

Carolina Castellanos Rangel

DEDICATORIA

A Dios por mi vida, mi salud, mi familia y por todas las oportunidades que ha puesto en mi camino.

A mis padres por el apoyo incondicional que me han brindado durante toda la vida, por todos los sacrificios que han realizado por mi bienestar y por ser mi inspiración para continuar en el camino de la vida.

A mi hermana Johana, por ser mi mejor amiga, mi confidente, y por todo el apoyo que me ha brindado.

A todos los docentes que me acompañaron durante toda mi carrera, por todos los conocimientos brindados.

A mi familia, mis amigos y compañeros por su apoyo y consejos brindados.

María Camila Corredor Pérez

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander y a su Escuela de Ingeniería Civil por hacernos parte de su comunidad y permitirnos alcanzar tan importante logro. A todos los docentes y administrativos que formaron parte de este proceso de aprendizaje, especialmente al docente Álvaro Viviescas Jaimes por ser nuestro mentor y por permitirnos aprender a su lado. Por los conocimientos, dedicación y motivación brindados en la orientación de este trabajo. A los docentes Gustavo Chio Cho, Guillermo Martínez y Edison Osorio por su amable disposición y recomendaciones.

A nuestros compañeros de investigación gracias por todos sus aportes y gran calidad humana.

.

CONTENIDO

	PÁG.
INTRODUCCIÓN	16
1. ESTADO DEL ARTE	17
1.1 ANÁLISIS DINÁMICO	17
1.1.2 Modelo Matemático	18
1.1.3 Caracterización Experimental De Los Parámetros Dinámicos	19
2. CASO DE ESTUDIO: PUENTE GOMEZ ORTÍZ	28
2.1 Descripción Del Puente	28
2.2 Localización Del Puente	29
2.3 Metodología para la realización del modelo numérico.	30
3. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE VIBRACIÓN AMBIENTAL:	36
3.1 Equipo De Adquisición De Datos:	36
3.2 Configuraciones De Sensores En La Estructura	38

3.3 Registros Obtenidos Del Ensayo De Vibración Ambiental (AVT).....	39
3.4 Identificación De Las Características Dinámicas	40
3.4.1 Corrección de Unidades.....	41
3.4.2 Corrección de Línea Base.....	41
3.4.3 Filtro De Señales	41
3.4.4 Funciones de Densidad Espectral de Potencia (PSD).....	42
3.4.5 Función De Densidad Espectral De Potencia Normalizada (NPSD)	43
3.4.6 Selección De Picos	45
3.4.7 Funciones De Coherencia.....	45
3.4.8 Resultados Ensayos De Vibración Ambiental (AVT).....	47
4. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	48
5. CONCLUSIONES	50
6. RECOMENDACIONES.....	53
CITAS	54
BIBLIOGRAFÍA.....	57

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Porcentaje de amortiguamiento.	18
Figura 2. Principio del sensor.....	22
Figura 3. Representación del proceso que ocurre desde la señal captada por el sensor hasta la almacenada en la computadora	23
Figura 4. Puente Gómez Ortiz Sección Longitudinal.	28
Figura 5. Nuevo Puente Gómez Ortiz.	29
Figura 6. Puente Gómez Ortiz y sus accesos planta general.	29
Figura 7. Sección transversal dovela típica.	31
Figura 8. Sección transversal pila eje 3.	32
Figura 9. Modelo numérico con asignación de cargas Puente Gómez Ortiz.	33
Figura 10. Modo fundamental Puente Gómez Ortiz F: 0.703 Hz.	35
Figura 11. Modo armónico Puente Gómez Ortiz F: 1.81 Hz.	35
Figura 12 (a) Sensor de aceleraciones, ES-T. (b) Sistema de adquisición de datos multicanal, K2.	36
Figura 13. Configuración del Equipo de adquisición de datos.	37
Figura 14. (a) Ubicación equipo de adquisición de datos vista en planta Puente Gómez Ortiz. (b) Configuración de los sensores Pila eje 3, Posición [1-9].	38
Figura 15. Serie temporal de aceleraciones longitudinales.....	40
Figura 16. Serie temporal de aceleraciones longitudinales con aplicación de corrección de la línea base y filtro pasabanda butterworth.	42
Figura 17. Funciones de densidad espectral normalizado.	44
Figura 18. Espectro medio normalizado en dirección X.	44
Figura 19. Funciones de Coherencia (a) Medición No. 2(b) Medición No. 5 (c) Medición No. 8.....	46

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades de los materiales.....	30
Tabla 2. Características dinámicas del modelo.....	34
Tabla 3. Configuraciones de los sensores en las mediciones realizadas.	39
Tabla 4. Frecuencias de modos de vibración experimentales obtenidas del método de selección de picos.....	45
Tabla 5. Resultados del ensayo de vibración ambiental modos de vibración, sus respectivas frecuencias y periodos.	47
Tabla 6. Frecuencia fundamental del modelo numérico y AVT.....	48
Tabla 7. Frecuencias modos armónicos del modelo numérico y AVT.	48

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Realización del modelo en el software midas civil.....	59
Anexo B. Configuraciones de sensores en la estructura.....	69
Anexo C. Información correspondiente a los planos del puente Gómez Ortiz.....	87
Anexo D. código de Matlab para procesamiento de las señales de obtenidas del ensayo de vibración ambiental.....	96
Anexo E. Cálculos necesarios para la realización del modelo de elementos finitos en el software midas civil.....	102

RESUMEN

TÍTULO: CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO DE PUENTES VIGA CAJÓN EN CONCRETO, UTILIZANDO ENSAYOS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL. CASO DE ESTUDIO: NUEVO PUENTE GÓMEZ ORTIZ*.

AUTORES: CAROLINA CASTELLANOS RANGEL
MARÍA CAMILA CORREDOR PÉREZ**

DESCRIPCIÓN:

Debido a la gran inversión que han representado los nuevos puentes que se han construido para la sustitución de las vías que dejó fuera de servicio la inundación del embalse de la represa de Hidrosogamoso en Santander-Colombia, donde se han ejecutado varios puentes viga-cajón en concreto postensado de grandes luces, es necesario establecer un plan de monitoreo permanente a estas estructuras, el cual permita tener información de su salud estructural durante todo su ciclo de vida y en su caso a partir de ello, poder tomar las medidas preventivas necesarias.

Por lo anterior el grupo INME de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander está ejecutando un proyecto de investigación con el fin de establecer este plan de monitoreo para estos puentes. Como caso de estudio se ha tomado el Nuevo Puente Gómez Ortiz, que es un puente viga-cajón en concreto postensado y el cual tiene una distribución de luces de 85m+ 170m+ 170m + 85m, un ancho de calzada de 10,55 metros y una altura de pilas en la luz central de 47 metros. Como herramienta fundamental para entender detalladamente el comportamiento estructural del puente y poder diseñar el plan de monitoreo, es necesario la elaboración de un modelo numérico por elementos finitos, que permita en función del análisis modal y otros factores, establecer con mejor precisión la ubicación de los sensores y demás elementos que compondrían el sistema de instrumentación.

Esta investigación se limitará al desarrollo de la etapa inicial del plan, la obtención de un modelo numérico debidamente calibrado de la estructura y para esto se han utilizado los resultados de una campaña preliminar de ensayos de vibración ambiental que fueron realizados en el puente antes del llenado del embalse.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes. Co-Director: PhD. Guillermo Martínez.

ABSTRACT

TITLE: CALIBRATION OF THE NUMERIAL MODEL OF A BOX-GIRDER BRIDGE APPLAYING AMBIENTAL VIBRATION TESTES. CASE OF STUDY: NUEVO PUENTE GÓMEZ ORTIZ.*

AUTHORS: CAROLINA CASTELLANOS RANGEL
MARÍA CAMILA CORREDOR PÉREZ**

DESCRIPTION:

Due to the large investment that have represented the new bridges that have been builited to replace routes that were left out becouse of the flooding of the reservoir of the dam of Hidrosogamoso in Santander-Colombia, where several post-tensioned concrete girder- drawer bridges of large spans have been executed, it is necessary to establish a plan of permanent monitoring of these structures which allow information of its structural health throughout their life cycle and if it is the case from this, to take the necessary preventive measures.

Therefore the INME group of the school of Civil Engineering of the Industrial University of Santander is running a research project in order to establish this plan of monitoring for these bridges. As case of study has been taken the new bridge Gómez Ortiz (Figure No.1), which is a post-tensioned concrete girder- drawer bridge, which has a distribution of lights of 85 m 170 m 170 m 85 m, a width of carriageway of 10.55 meters and a height of piles in the central lumen of 47 meters. As a fundaental tool to understand in detail the structural bridge behavior and be able to design the plan of monitoring, is necessary the development of a numerical model by finite elements, which allow based on modal analysis and other factors, set the location of the sensors and other elements that would compose the instrumentation system with better accuracy.

This research will be limited to the development of the initial stage of the plan , obtaining a numerical model adequately calibrated of the structure and for this we used the results of a preliminary campaign of Ambiental Vibration Tests (AVT) developed on the bridge before filling the reservoir.

* Graduate Project

** Faculty of Physicist-Mechanics, School of Civil Engineering. Director: PhD. Álvaro Viviescas Jaimes. Co-Director: PhD. Guillermo Martínez.

INTRODUCCIÓN

A pesar de los grandes avances en el modelamiento y análisis numérico de estructuras con los diferentes software desarrollados en la actualidad que buscan simular la respuesta real de éstas, es necesario confrontar los resultados de estos modelos con características reales de las estructuras una vez construidas. De esta forma se busca asegurar que lo representado teóricamente efectivamente se ajuste a lo que ocurre en campo, pues la exactitud del modelo numérico se ve afectada por incertidumbres presentes en el modelamiento debidas a la idealización de las condiciones de frontera y la definición de las propiedades mecánicas de los materiales que varían del diseño, a las presentes en la estructura una vez construida. Para lograr una coherencia entre la información experimental y la teórica se hace uso de la caracterización de las propiedades dinámicas de la estructura en campo, las cuales brindan parámetros como periodos fundamentales y modos de vibración, información a partir de la cual es posible confrontar el modelo numérico de la estructura con el comportamiento real de la misma.

Estos modelos son el punto de partida para el análisis del comportamiento del puente ante diferentes solicitaciones y la base de futuros planes de monitoreo que permitirán conocer el estado estructural, detectando y previniendo daños.

1. ESTADO DEL ARTE

1.1 ANÁLISIS DINÁMICO

Se entiende por análisis dinámico de una estructura al proceso sistemático que concluye con el conocimiento de las características de su respuesta estructural bajo cargas que varían con el tiempo. Es decir, de este tipo de análisis se conocen parámetros dinámicos que describen la respuesta de la estructura. Conocer los parámetros dinámicos de una estructura como un edificio o un puente, puede ser útil para: Calibrar sus propiedades elásticas en modelos numéricos. Detectar modificaciones de su comportamiento. Predecir su comportamiento bajo eventos sísmicos. [1]

1.1.1 Parámetros Dinámicos. *Frecuencia y periodo:* La frecuencia (f) de vibración de una estructura indica el número de oscilaciones que realiza en un tiempo determinado. El periodo (T) indica el tiempo que se demora la estructura en realizar una oscilación completa, es el valor inverso de la frecuencia.

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Amortiguamiento: Indica la capacidad (no la forma) con la que la estructura disipa energía.

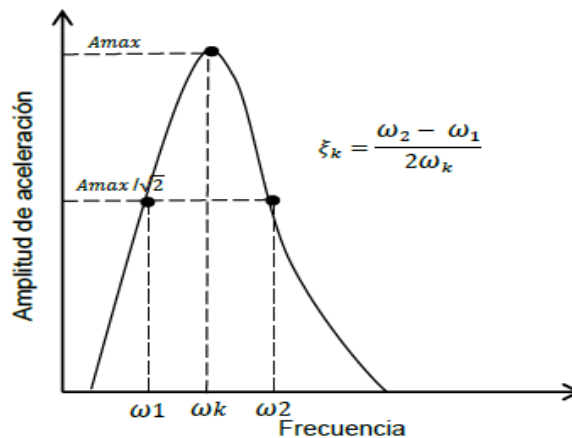
La estimación del coeficiente de amortiguamiento (ξ_k) asociado a un modo de vibración “ k ” se define a partir de la siguiente expresión:

$$\xi_k = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_k} \quad (2)$$

Donde ω_1 y ω_2 son frecuencias vecinas de la frecuencia de resonancia, estimadas como las que coinciden con la amplitud máxima del espectro, en la frecuencia de resonancia, dividido entre dos. [2]

En la Figura 1 se observa una representación gráfica del método.

Figura 1. Porcentaje de amortiguamiento. [3]



Modos de vibración: Son las formas de vibrar de una estructura relacionadas a una frecuencia que caracteriza a ese modo.

1.1.2 MODELO MATEMÁTICO

Al realizar un análisis estructural, implícitamente se está describiendo por medio de un modelo matemático el comportamiento de la estructura ante unas sollicitaciones preestablecidas. La selección del modelo a emplear en el análisis, es un aspecto fundamental en la bondad de los resultados obtenidos; si el modelo

no describe el comportamiento adecuadamente, todo el esfuerzo realizado en el análisis puede ser inútil. Este aspecto que de por sí es importante en el caso de solicitaciones estáticas, se vuelve crítico en el caso de solicitaciones dinámicas. [4]

En el modelamiento de estructuras pueden utilizarse los siguientes métodos de discretización:

- Método de las masas concentradas.
- Método de los desplazamientos generalizados.
- Método de los elementos finitos. [5]

En la actualidad el método de los elementos finitos es el más aceptado debido a su capacidad de discretizar todo tipo de estructuras a partir de la idealización de la estructura continua como un conjunto finito de elementos (con propiedades de geometría, materiales, condiciones de frontera y cargas externas) conectados entre sí por puntos llamados nodos, calculando valores de deformaciones y esfuerzos para cada uno de los nodos y funciones solución para cualquier otro punto a través de las funciones de interpolación. A medida que se definan una mayor cantidad de nodos la exactitud del método incrementará. Para esto se debe contar con una herramienta de procesamiento de estas ecuaciones por lo que el desarrollo en la tecnología de procesadores cada vez de mayor capacidad han fomentado y facilitado la utilización de este método. [6]

1.1.3 CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DINÁMICOS

Para caracterizar las propiedades dinámicas de estructuras en campo se han desarrollado ensayos de vibración. Su objetivo es, mediante un equipo de

adquisición de datos captar por medio de sensores y con ayuda del digitalizador amplificar y almacenar señales de voltaje producidas por la vibración de la estructura, las cuales mediante un adecuado procesamiento numérico de identificación modal se traducen en aceleraciones de la estructura y nos proporcionan las características dinámicas propias de la estructura que se buscan, como el periodo fundamental de la estructura, sus armónicos y los modos de vibración.[7] La implementación inicial de estos ensayos de vibración se desarrolló midiendo la respuesta en aceleración de las estructuras ante un estímulo o fuerza externa inducida controlada o también midiendo la respuesta debida una deformación inicial liberada rápidamente, a estas pruebas se les denominó Ensayos de vibración forzada y libre respectivamente. Pero la poca practicidad de estas pruebas se evidenció con la necesidad de costosos dispositivos y dispendiosos trabajos de campo que logran excitar las estructuras.[6] Es por esto que finalmente fueron desarrolladas las pruebas de vibración ambiental (AVT), donde se mide la respuesta de la estructura debida sólo a excitaciones producidas por el ambiente y cargas de servicio.

➤ **Tipos de Ensayos de Vibración**

Vibración forzada: En este ensayo se debe además de contar con el equipo de adquisición de datos de aceleración (datos de salida o señal OUTPUT), con un equipo que produzca una excitación controlada sobre la estructura (señal de entrada o INPUT). Este tipo de ensayos representa una mayor complejidad pues producir una excitación controlada a una estructura como un puente o un edificio además de ser peligroso con la seguridad de la estructura, requiere un gran equipo especializado de elevado costo. [6]

Vibración libre: Este tipo de ensayo al igual que el anterior utiliza una excitación externa sobre la estructura, esta vez es producida por una deformación inicial que

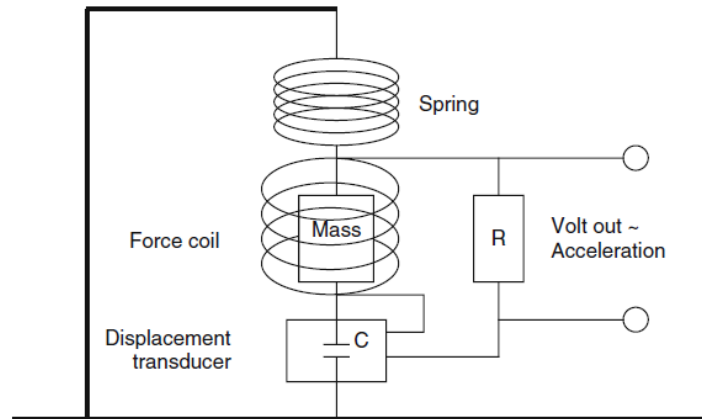
se libera rápidamente y deja a la estructura en un movimiento libre. Debido a la necesidad de generar esta deformación inicial es una prueba peligrosa y costosa.[2]

Vibración ambiental: Esta nueva técnica llegó debido a la necesidad de identificar las características dinámicas de las estructuras con un procedimiento que no involucrara daños a las mismas ni costosos equipos para excitarlas. Las vibraciones de la estructura que se captan con el acelerómetro son las producidas por el ambiente, las cargas de servicio de vehículos y humanas. Esta simplificación del ensayo sin embargo, trae consigo la identificación de señales no deseadas que no son propias de los modos de vibración de la estructura y se conocen como ruidos, el más común es el ruido causado por la acción del viento.[2]

➤ **Equipo**

Sensores: Los sensores miden el movimiento de la estructura y lo transforman a voltaje. El movimiento de la estructura puede describirse matemáticamente como desplazamiento, velocidad o aceleración. Ya que la medición se realiza en un marco de referencia en movimiento (el sensor se mueve con la estructura), el principio de inercia establece que solo pueden ser medidos los movimientos que causen aceleración (cambio de velocidad). Por lo tanto, el principio de todos los sensores es que una masa debe moverse relativamente a una referencia, en respuesta a la aceleración la estructura. [1]

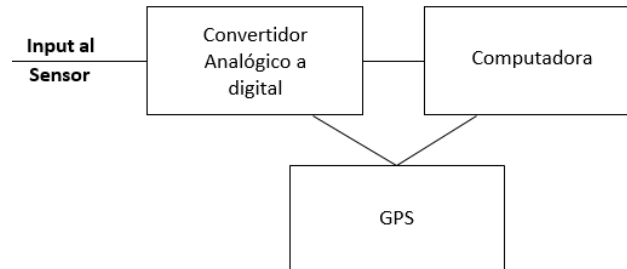
Figura 2. Principio del sensor. Una masa magnética está suspendida por un resorte y el movimiento (velocidad) es detectado por una bobina, la cual genera una salida de voltaje proporcional a la velocidad de la masa. [7]



Estos sensores del equipo que pueden ser de tipo uniaxial, biaxial o triaxial, es decir que captan señales en una, dos o las tres direcciones ortogonales. Y se caracterizan por el ancho de banda de las frecuencias que pueden captar, así como su rango de Voltios /gravedad, según estas características se clasifican en: sismómetros (Frecuencias altas) y acelerómetros (frecuencias bajas).

Digitalizador: La señal debe ser amplificada y filtrada antes de ser grabada. El digitalizador es la unidad que convierte la señal analógica a series de números discretos que serán leídos, procesados y almacenados en una computadora. El digitalizador es usualmente también la unidad que estampa la unidad de tiempo sobre la señal, ahora exclusivamente mediante un GPS. [7]

Figura 3. Representación del proceso que ocurre desde la señal captada por el sensor hasta la almacenada en la computadora. [7]



➤ Identificación Modal

Así como el equipo de vibración de adquisición de los datos en campo es de gran atención, lo es la técnica de identificación modal con la cual se procesan estos datos. El ensayo de vibración no está completo sin un correcto procesamiento de la información recolectada donde se obtengan los parámetros dinámicos de la estructura.

Para esto como primer paso en el procesamiento se realiza el filtrado de la señal para realizar un ajuste por mínimos cuadrados y obtener la curva del polinomio que mejor se adapte a las parejas de valores de tiempo y aceleración con los que se cuenta y de esta forma mitigar la tendencia creciente e irregular que suelen tomar los datos.

Después se realiza el filtrado de las señales, quitando un rango de señales indeseadas y dejando solamente los valores de frecuencias donde se conoce que se van a encontrar las asociadas a los modos de la estructura, evitando así que datos que no interesan como por ejemplo frecuencias asociadas a instrumentación

externa presente en el momento de la toma, corrientes eléctricas, motor de maquinaria, etc., oculten la información que se busca. [8]

Para evitar este problema se cuentan con tres tipos de filtros:

- Filtro pasa baja: Remueve las señales por debajo de la frecuencia indicada.
- Filtro pasa alta: Remueve las señales por encima de la frecuencia indicada.
- Filtro pasa banda: Remueve las señales por fuera del rango indicado.[2]

Una vez se cuentan con los datos deseados para la realización del análisis se procede a la identificación modal. [8]

En el dominio del tiempo: Las técnicas de identificación en el dominio del tiempo estiman los parámetros modales directamente de las series temporales medidas. Los parámetros modales medidos son la frecuencia modal, el amortiguamiento y las formas modales. Se puede decir entonces que se está ante “Técnicas Paramétricas”, ya que se cuenta con una señal de entrada en el dominio del tiempo.

Las técnicas de Identificación de Subespacio Estocástico [9], con sus siglas en inglés SSI (Stochastic Subspace Identification), son aplicadas en el dominio del tiempo y son uno de los métodos más conocidos. Esta técnica se ajusta a un espacio de estado estocástico discreto en el tiempo, siguiendo la ecuación:

$$x_{k+1} = Ax_k + v_{k+1} \quad (3)$$

$$y_k = Cx_k \quad (4)$$

Donde A es la matriz de transición de estado, x_k es el vector de estado que contiene al estado actual del sistema en el instante de tiempo k , y v_{k+1} es el proceso de ruido blanco Gaussiano que se está desarrollando en el sistema. La

salida del sistema está localizada dentro de y_k y se obtiene mediante la pre-multiplicación de x_k por una matriz observación A . [7]

En el dominio de la frecuencia:

Función de densidad espectral: Para propósitos de identificación modal esta técnica es una de las más comunes para sistemas estructurales donde las cargas son desconocidas (Técnicas no paramétricas). Se basa en un proceso simple de la señal empleando la Transformada Discreta de Fourier (DFT), utilizando el hecho de que se pueden estimar modos bien separados entre sí; esta técnica también es conocida como Técnica Básica en el Dominio de la Frecuencia (BFD) ó Técnica Peak Picking.[7][10]

$\mu(t)$ es la excitación no conocida que experimenta la estructura.

La función de correlación depende de dos instantes de tiempo que se encuentran desfasados $\tau = t_j - t_i$, por lo tanto se puede establecer una única relación dependiendo del tiempo ($x_r(t)$). La función de auto correlación puede ser calculada a través de:

$$\begin{aligned}
 R_{xx}(\tau) &= E[x_r(t)x_r(t + \tau)] \\
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T x_{rk}(t)x_{rk}(t + \tau) \\
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x_r(t)x_r(t + \tau)dt \tag{5}
 \end{aligned}$$

La función de auto correlación puede ser llevada al dominio de la frecuencia, a través de la transformada de Fourier, donde se obtiene una función que se denomina como auto espectro de potencia.

$$S_{xx}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-i w \tau} dt \quad (6)$$

El auto espectro o función de densidad espectral, es una función real que cuantifica la distribución del contenido energético de la señal a lo largo de la frecuencia. El área del gráfico representa el contenido total de energía de la señal. [2]

Una vez conocemos las Funciones de Densidad Espectral (PSD) (Amplitud vs Frecuencia) es posible identificar las frecuencias asociadas a los modos de vibración del sistema mediante el método de selección de picos o Técnica Peak Picking, donde se seleccionan los valores de frecuencias asociados a las mayores amplitudes.

Función de Densidad Espectral Normalizada: Sin embargo con un solo grado de libertad no es posible asegurar que se han encontrado las frecuencias asociadas a los modos de vibración de la estructura, es por esto que se deben analizar varios grados de libertad y relacionar sus PSD, pues puede ocurrir que uno de los grados de libertad coincida con uno de los nodos de los modos de vibración y no produzca ninguna información. [8]

Para esto se realiza la Normalización de las funciones de Densidad Espectral de Potencia de varios grados de libertad, la cual permite visualizar en un solo Espectro (NPSD) los resultados de varios grados de libertad. Se obtiene dividiendo la estimación de los autos-espectros (PSDi) por las suma de sus N ordenadas. [2]

$$NPSD_i(w) = \frac{NPSD_i(w)}{\sum_{k=1}^N PSD(w_k)} \quad (7)$$

Función de Densidad Espectral Media Normalizada: Para mayor facilidad es posible generar un Espectro Medio Normalizado de Densidad Espectral (ANPSD) donde se identifica en una sola curva la información de todos los grados de libertad, facilitando la identificación de las frecuencias que se midieron.

$$ANPSD(w) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l NPSD_i(w) \quad (8)$$

Donde l es el número de grados de libertad instrumentados y $NPSD_i$ son los espectros normalizados. [2]

➤ **Calibración de Modelos Numéricos**

Se dice que un modelo se encuentra calibrado cuando aquel parámetro que se seleccionó como el de ajuste, difiere en su magnitud entre su valor experimental y su valor teórico proporcionado por el modelo numérico en un porcentaje considerado como aceptable para que la representación de la estructura no se aleje del comportamiento real.

Si este porcentaje es mayor, es necesario ajustar el modelo numérico para que su representación del sistema sea fiel a la realidad y esto se logra modificando las propiedades del modelo que influyen en su rigidez como lo son el módulo de Elasticidad E de los materiales y las condiciones de frontera, parámetros que aportan grandes incertidumbres a la idealización. [8]

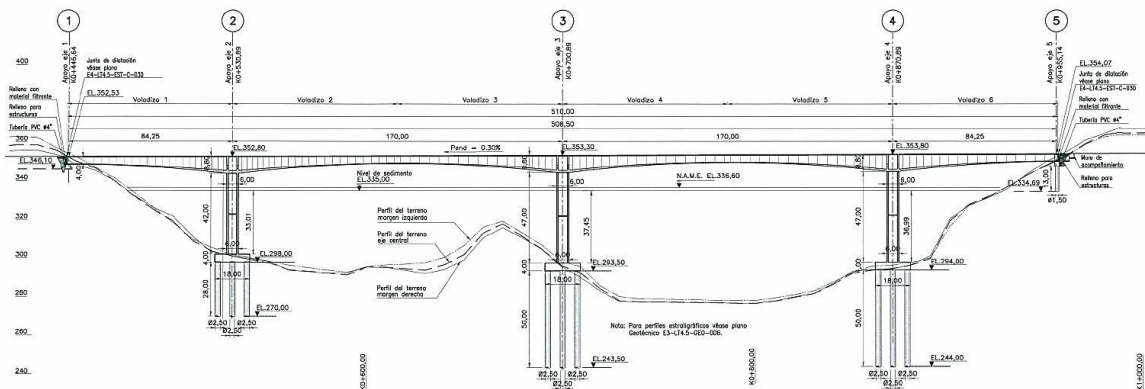
2. CASO DE ESTUDIO: PUENTE GÓMEZ ORTÍZ

Se presenta a continuación la descripción del puente Gómez Ortiz, su ubicación y metodología para la realización del modelo numérico por elementos finitos.

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PUENTE

Es un puente construido por voladizos sucesivos de 510 metros de planta recta que consta de cuatro vanos, dos extremos de 85 metros de luz y dos centrales con 170 metros de longitud, los vanos están soportados por tres pilas huecas, de sección transversal de tipo cajón rectangular variable, con alturas entre 42 y 47 metros y con unión monolítica entre ellos. Las pilas están apoyadas sobre zapatas de dimensiones de 18 por 18 por 4m, sustentadas cada una sobre 8 pilotes de 2.50 metros de diámetro con profundidades que varían entre 25 y 41 metros. El tablero es de sección tipo cajón de canto variable de anchura de 10.55 metros y de canto entre 8.80 y 4 metros. Ver Figura 4.

Figura 4. Puente Gómez Ortiz Sección Longitudinal. ISAGEN



2.2 LOCALIZACIÓN DEL PUENTE

El nuevo puente “Gómez Ortiz” se localiza en la vía departamental que comunica a la capital santandereana Bucaramanga con los municipios Girón y Zapatoca sobre el cauce del río Sogamoso y es resultado del programa para la restitución de la infraestructura que fue ocupada por el embalse del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso. Ver Figura 5 y 6.

Figura 5. Nuevo Puente Gómez Ortiz.



Figura 6. Puente Gómez Ortiz y sus accesos planta general. ISAGEN



2.3 METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.

El modelo analítico del puente en estudio se elaboró en el programa de análisis de estructuras Midas Civil 2015(v2.2) desarrollado por MIDAS Information Technology Co., Ltd. [11], el cual lleva a cabo la idealización de las estructuras por medio de elementos finitos. La definición de las propiedades de los materiales y de la geometría, así como la evaluación de las condiciones de frontera y asignación de cargas al modelo se basaron en los planos constructivos proporcionados por la Secretaría de Infraestructura de Santander (Ver anexo C). Mediante el siguiente procedimiento. (Ver anexo A y E)

Definición de las propiedades de los materiales a utilizar. En la siguiente tabla se encuentra las propiedades de los materiales empleados en el modelo, obtenidas según los planos utilizados en la construcción (Ver anexo E).

Tabla 1. Propiedades de los materiales.

Concreto	F'c [Mpa]	E [Mpa]
Tablero	35	22.925
Pilas	28	20.637

Acero de pre-esfuerzo. En esta investigación no se modeló el pre-esfuerzo de la estructura. Se despreció esta acción basados en la investigación de [12] que desarrolló un modelo matemático en el cual considera el análisis no lineal del comportamiento de vigas preesforzadas donde las ecuaciones de movimiento, las condiciones de frontera y continuidad son derivadas del principio del trabajo virtual según el principio de Hamilton [12]. El modelo prueba que las fuerzas de

preesfuerzo no afectan el comportamiento dinámico de las vigas y contempla la variación de la excentricidad de la trayectoria de los cables, la fuerza del cable durante la vibración de la viga y también el efecto de la carga de compresión axial causada por los cables, sobre la vibración de la viga.

Generación de la geometría de las secciones transversales de cada una de las dovelas tipo viga cajón y de las secciones transversales de las pilas. El puente consta de seis voladizos con 117 dovelas de canto variable en forma parabólica y con tres pilas tipo cajón rectangular de variación lineal. Por medio de los planos constructivos se obtuvo la variación en las alturas de dovelas de los voladizos y con esta variación se realizó una regresión polinómica obteniendo como resultado una curva de orden dos. La pila del eje dos de 42 m de altura se modeló en 12 secciones de 3.5m, la pila del eje tres y cuatro se modeló con 12 secciones de 3.5m y 2 secciones de 2.5 m de altura acorde a las especificaciones de los planos constructivos. En la Figura 7 y 8. Se muestra la sección transversal de la dovela típica y de una de las tres pilas del puente Gómez Ortiz, obtenidas de los planos constructivos. (Ver anexo E)

Figura 7. Sección transversal dovela típica. ISAGEN

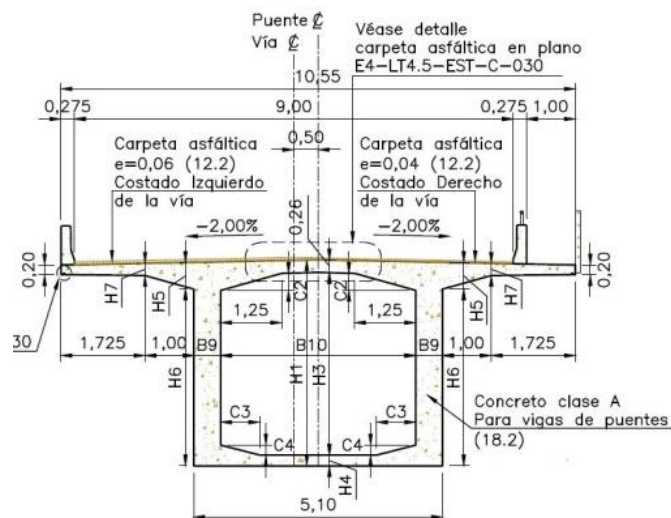
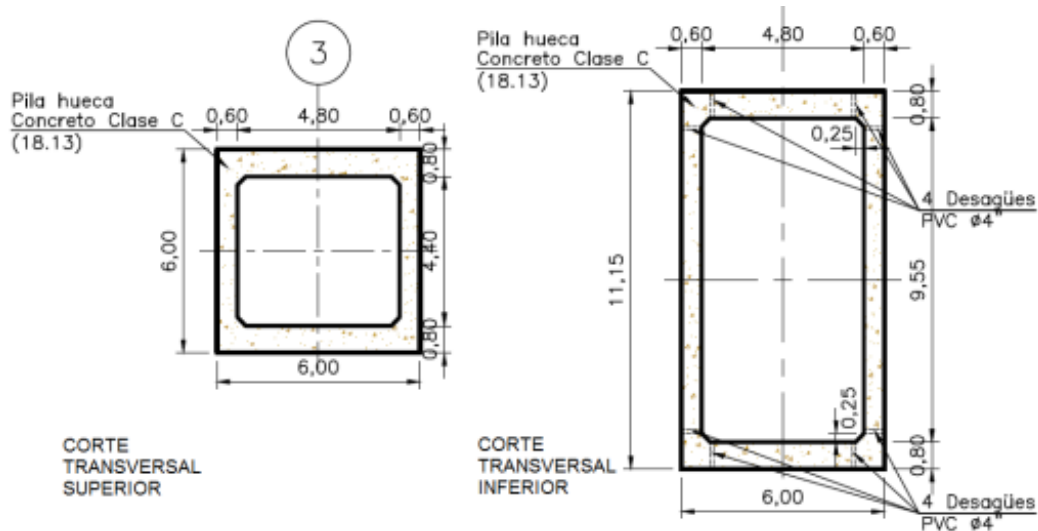


Figura 8. Sección transversal pila eje 3. ISAGEN



Creación de todos los elementos que integran la estructura tipo Beam (viga). La unión entre la superestructura y la subestructura se realizó mediante restricciones (Rigid Link) que igualan todos los grados de libertad traslacionales y rotacionales, lo cual garantiza una unión monolítica.

El modelo se ubica dentro de un sistema global de coordenadas donde la dirección longitudinal del puente corresponde al eje X, y la dirección perpendicular al tablero corresponde al eje Z.

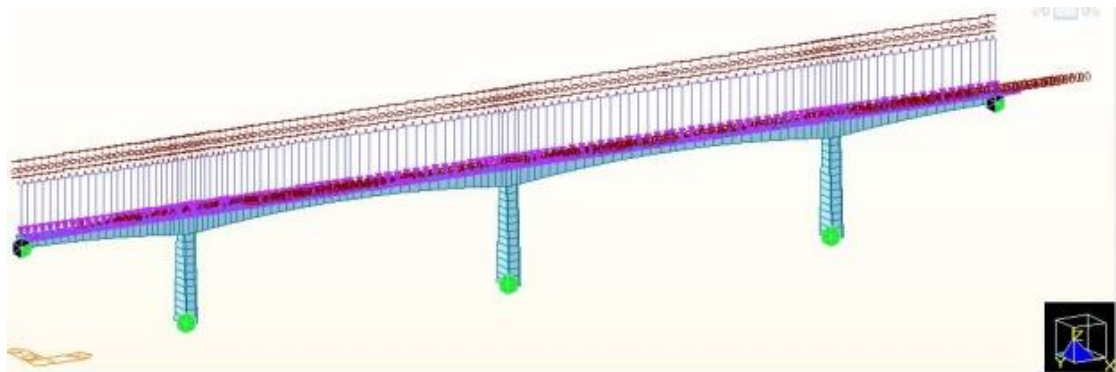
Evaluación de las condiciones de frontera, se estableció los apoyos de tipo empotramiento para modelar la interacción suelo- estructura.

En los apoyos de los extremos del tablero se restringió el movimiento traslacional en la dirección Y (transversal al tablero) y Z (perpendicular al tablero). La consideración de la restricción en Y es producto de la magnitud de la distancia entre la dovela maciza y el estribo, aproximadamente de cinco centímetros, la cual

no permite movimiento en dirección transversal al tablero. La restricción en Z es producto de dos cables de 12 torones diámetro $\frac{1}{2}$ " anclados al estribo que restringen el movimiento traslacional en Z. (Ver anexo A)

Asignación de cargas al modelo, los casos de carga permanente que se ingresaron al programa fueron peso propio y sobrepuesta. (Ver anexo A y E)

Figura 9. Modelo numérico con asignación de cargas Puente Gómez Ortiz.



Evaluación de las características dinámicas del puente tales como frecuencias y periodos naturales de la estructura, mediante un análisis de valores propios, por medio del método Lanczos bajo la acción de vectores propios. [11]

La frecuencia fundamental obtenida del modelo es de 0.702 [Hz] y cuenta con un porcentaje de participación de masas del 73.24% en dirección x (longitudinal del puente), y la frecuencia del primer armónico del puente en dirección x es de 1.779 [Hz], y cuenta con una participación de masas del 10.18%.

Tabla 2. Características dinámicas del modelo.

Modo No	Frecuencia		Periodo	Participación Masas	Participación Masas Acumulado
	(rad/seg)	(Hz)	(seg)	(%)	(%)
1	3.388	0.539	1.855	0.000	0.000
2	3.610	0.575	1.740	0.000	0.000
3	4.411	0.702	1.425	73.240	73.240
4	4.970	0.791	1.264	1.320	74.570
5	5.681	0.904	1.106	0.000	74.570
6	6.084	0.968	1.033	0.240	74.800
7	6.481	1.032	0.969	0.000	74.800
8	7.831	1.246	0.802	0.000	74.800
9	10.087	1.605	0.623	0.000	74.800
10	10.698	1.703	0.587	2.740	77.550
11	11.181	1.779	0.562	10.180	87.720
12	12.976	2.065	0.484	0.000	87.730

Obtención de las principales formas de vibración observadas en el modelo de elementos finitos. En las figuras 10 y 11 se presenta el modo fundamental y el primer armónico del puente.

Figura 10. Modo fundamental longitudinal Puente Gómez Ortiz F: 0.703 Hz.

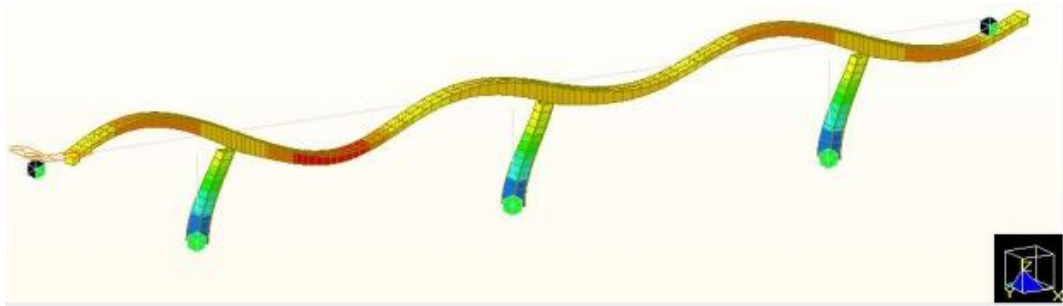
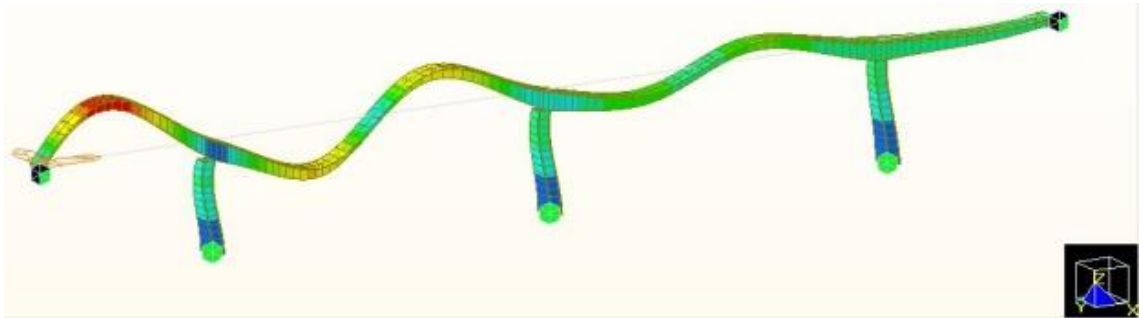


Figura 11. Modo armónico longitudinal Puente Gómez Ortiz F: 1.81 Hz.



En el anexo A y E se encuentra la información correspondiente a la realización del modelo numérico en el programa Midas Civil.

3. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE VIBRACIÓN AMBIENTAL:

A continuación se enuncia el procedimiento que se realizó en las pruebas de vibración ambiental del puente Gómez Ortiz, comenzando con las especificaciones del equipo de adquisición de datos y configuraciones de los sensores en la estructura, seguido de los registros obtenidos y su posterior tratamiento para la identificación de las características dinámicas de la estructura, tales como la frecuencia fundamental y la frecuencia del primer armónico, por último se encuentra la sección resultados del ensayo de vibración ambiental con los cuales se realizó la validación del modelo numérico presentado anteriormente.

3.1 EQUIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS:

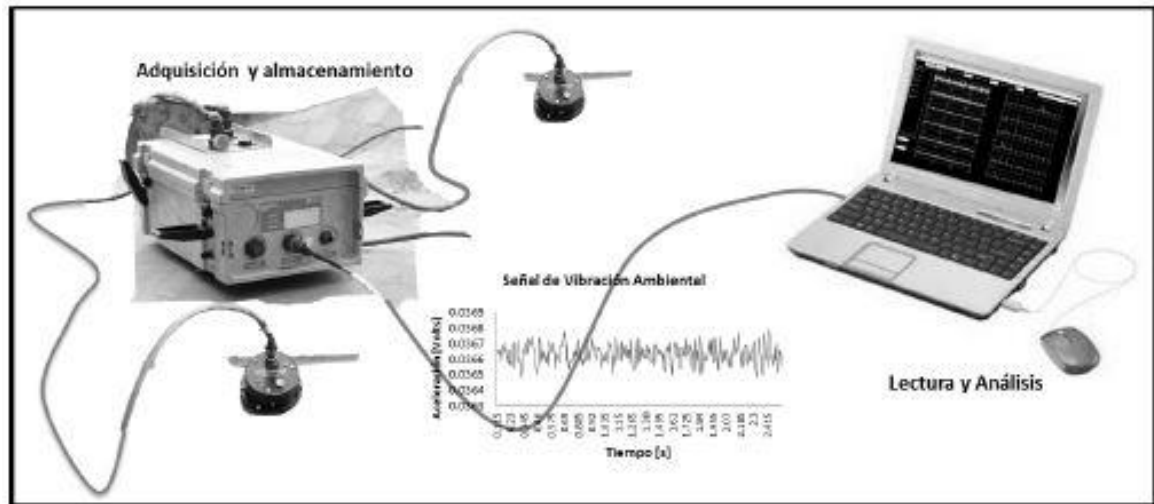
EL equipo de adquisición de datos utilizado en el ensayo de vibración ambiental consta de un acelerómetro K2 de la compañía Kinometrics con nueve canales de expansión, tres canales ocupados por un episensor interno triaxial, el cual no fue utilizado en el ensayo y dos sensores triaxiales externos de fuerza balanceada de referencia Episensor, FBA ES-T, con una frecuencia de adquisición de datos de 200 Hz, un rango de frecuencia de entre 0.15 y 1000 Hz y una configuración de sensibilidad de hasta 10 V/g.

Figura 12 (a) Sensor de aceleraciones, ES-T. (b) Sistema de adquisición de datos multicanal, K2. [13]



Para el manejo del software que realiza la configuración del sistema de adquisición y la lectura de los datos, *Altus File Assistant* provisto por el fabricante, se utilizó un computador portátil.

Figura 13. Configuración del Equipo de adquisición de datos. [13]

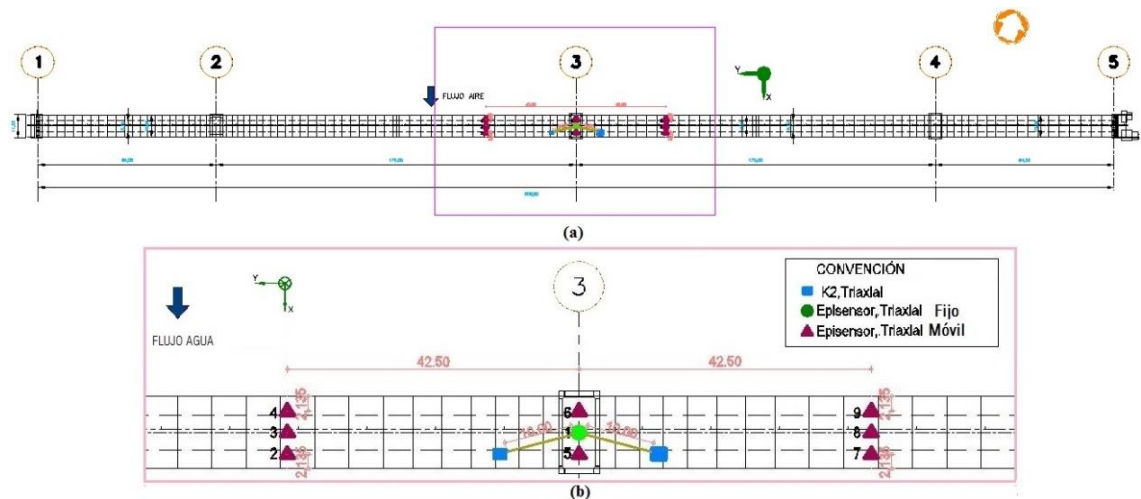


3.2 CONFIGURACIONES DE SENSORES EN LA ESTRUCTURA

Según [2] [14], se recomienda contar previamente al ensayo de campo con un modelo numérico que proporcione una idea acerca de los modos de vibración principales de la estructura para realizar la instrumentación sísmica identificando así las ubicaciones donde se obtendrá una mayor información. Las mediciones de aceleración se realizaron en las tres direcciones ortogonales para dos luces de la estructura, teniendo en cuenta que la dirección longitudinal del puente corresponde a la dirección denominada X, y la dirección perpendicular al tablero corresponde a la dirección Z.

La configuración de la ubicación de los sensores se estableció con la localización de un episensor de referencia, este corresponde a uno de los dos sensores externos conectados al K2, y se movilizó el otro a través de los puntos de medición. El K2 permaneció fijo.

Figura 14. (a) Ubicación equipo de adquisición de datos vista en planta Puente Gómez Ortiz. (b) Configuración de los sensores Pila eje 3, Posición [1-9].



En la Figura 14 se muestra las configuraciones de los sensores (el sensor de referencia, el sensor móvil y el K2) sobre la pila del eje 3 y los voladizos de esta. En la tabla 3 se enumeran las mediciones realizadas con su respectiva posición de los sensores en la estructura. Los datos de vibración fueron obtenidos en ocho mediciones “setup” cada una con seis canales de los dos episensores y con una duración entre cinco y seis minutos. Las aceleraciones fueron medidas con una frecuencia de muestreo de 200Hz.

Tabla 3. Configuraciones de los sensores en las mediciones realizadas.

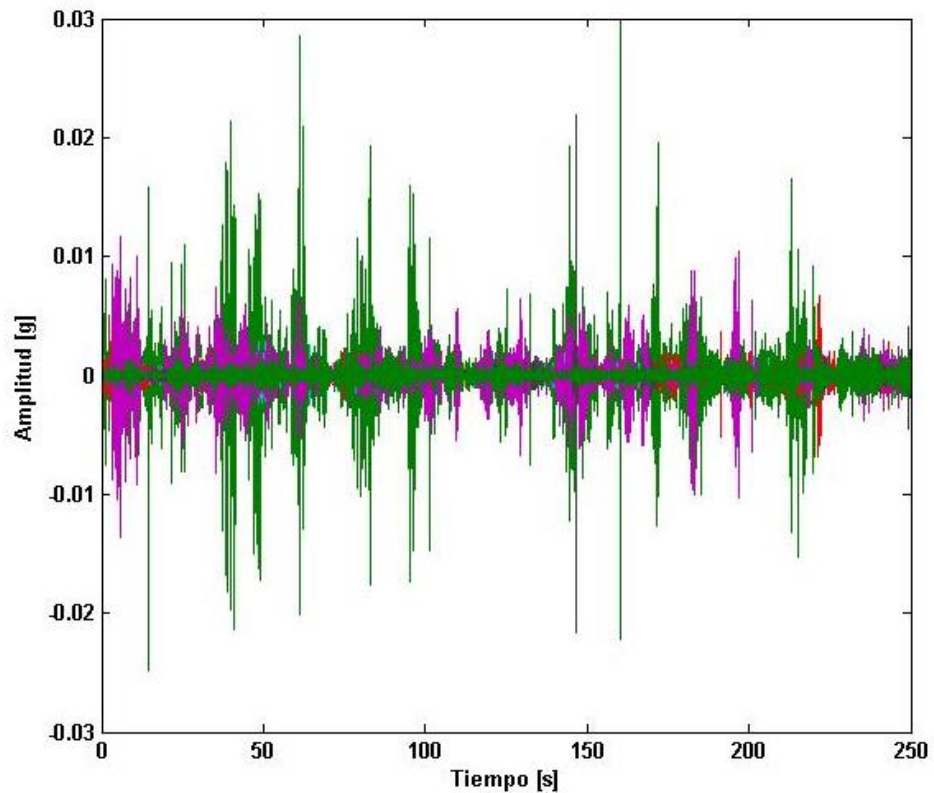
Medición Número	Posición [Sensor fijo, Sensor móvil]
1	[1,3]
2	[1,4]
3	[1,2]
4	[1,5]
5	[1,6]
6	[1,7]
7	[1,8]
8	[1,9]

3.3 REGISTROS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE VIBRACIÓN AMBIENTAL (AVT)

Los registros del ensayo de vibración ambiental se obtuvieron cuando el puente Gómez Ortiz después de su ejecución no se había puesto en servicio, razón por la cual fuentes de excitación como tráfico de vehículos, no estuvieron presentes en las tomas.

En la Figura 15. Se presenta una medición de las aceleraciones en el sentido longitudinal del puente.

Figura 15. Serie temporal de aceleraciones longitudinales.



3.4 IDENTIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS

Se llevó a cabo la identificación de las características dinámicas como frecuencias y periodos naturales de la estructura por medio del Método de selección de picos (PP), empleando la metodología planteada en [15] que contempla las siguientes pasos: conversión de las unidades de los valores captados por el acelerómetro de Voltios a gravedad(g), corrección de línea base, filtrado de la señal en el rango de interés, obtención de picos por medio de las funciones de densidad espectral de

potencia (PSD), funciones de densidad espectral normalizadas (NPSD) y espectro medio normalizado (ANPSD), finalizando con las funciones de coherencia que permiten verificar los resultados del análisis de selección de picos.

En el programa de MATLAB R2014a desarrollado por The MathWorks, Inc, con la herramienta ToolBox se adoptó un algoritmo suministrado por los ingenieros Sebastián Castellanos y Johannio Marulanda, para la obtención de los resultados del Método de selección de picos en esta investigación. (Ver anexo D) A continuación se menciona el procedimiento realizado para el procesamiento y análisis de las señales obtenidas en la prueba de vibración ambiental realizada a la estructura. (Ver anexo B)

3.4.1 CORRECCIÓN DE UNIDADES

Debido al principio de funcionamiento de los sensores donde el cambio de velocidad (aceleración) que se midió es captado y almacenado en Voltios, es necesario convertir a unidades de aceleración en este caso (g), esto se consigue dividiendo los datos de las señales por la constante de los sensores que es según sus especificaciones, de 5 [Volt/g].

3.4.2 CORRECCIÓN DE LÍNEA BASE

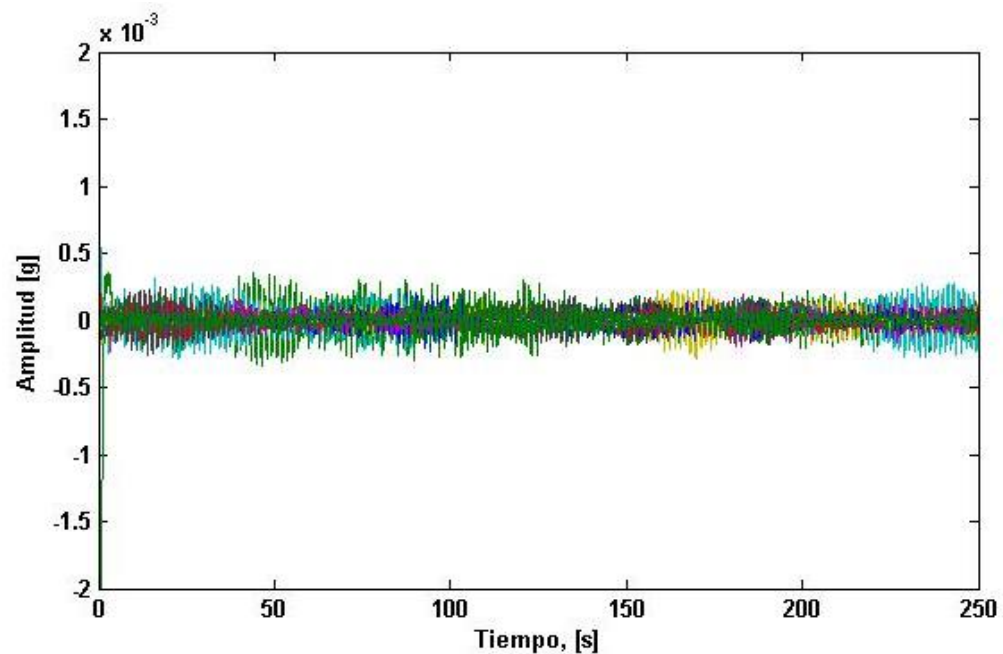
Se aplicó una corrección de línea base a los registros de las series de aceleraciones para mitigar la tendencia creciente e irregular que suelen tomar los datos.

3.4.3 FILTRO DE SEÑALES

En la obtención de señales de vibraciones ambientales existe una contribución de datos por parte de fuentes no deseadas, con el fin de separar esas contribuciones

es necesario la aplicación de un filtro pasabanda, en este caso de butterworth en un rango tal que permita determinar los valores aproximados de la frecuencia natural y los modos experimentales del puente, identificados previamente a partir del modelo numérico realizado, para este caso en el rango de [0.2-3] Hz.

Figura 16. Serie temporal de aceleraciones longitudinales con aplicación de corrección de la línea base y filtro pasabanda butterworth.



3.4.4 FUNCIONES DE DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA (PSD)

Para el cálculo de los auto-espectros o funciones de densidad espectral (PSD) asociados a las diferentes mediciones, se aplica la transformada rápida de Fourier (FFT) que permite procesar los datos convirtiéndolos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Para ello se empleó el método de Welch [2],[16] dividiendo las series temporales en segmentos de 10200 puntos, considerando un traslapo del 50% y usando ventanas tipo Hanning con el fin de reducir el efecto de

“leakage”, el cual es un error de escurrimiento de la frecuencia debido a la no periodicidad de la señal y al carácter finito de la serie temporal que se manifiesta a través de la distribución de energía asociada a una frecuencia específica de las demás frecuencias vecinas [2].

Los auto-espectros que se obtienen están en función de amplitud de potencia (contenido energético) versus frecuencia en Hertz (Hz) y es posible extraer las frecuencias del sistema a partir de los picos de los espectros o funciones de densidad espectral.

3.4.5 FUNCIÓN DE DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA NORMALIZADA (NPSD)

Con el fin de evitar el análisis de varios gráficos de densidad espectral en cada grado de libertad instrumentado es usual calcular el espectro medio normalizado [15].

Se calcularon los espectros medios normalizados a partir de los auto-espectros para cada dirección ortogonal y posteriormente se calculó el espectro medio normalizado. En la Figura 17 se muestran las funciones de densidad espectral normalizadas (NPSD) y en la figura 18 se muestra el espectro medio normalizado (ANPSD) para las señales en dirección de X, dirección en la cual se encontraron frecuencias características del puente.

Figura 17. Funciones de densidad espectral normalizado.

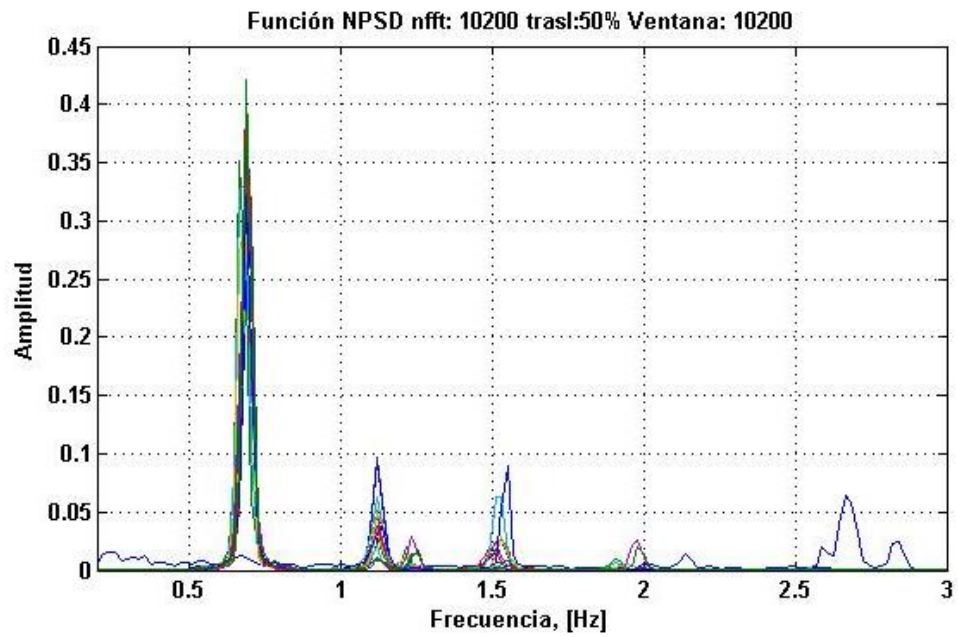
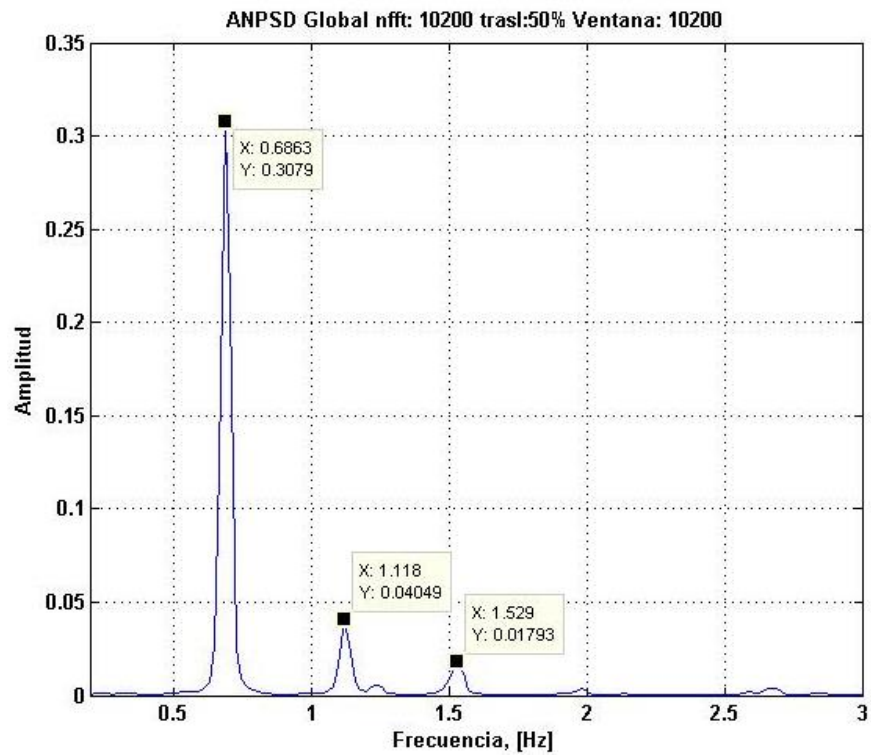


Figura 18. Espectro medio normalizado en dirección X.



En los espectros medios normalizados (ANSPD) de los sentidos transversal (Y) y perpendicular (Z) al tablero no se encontraron frecuencias características de la estructura.

3.4.6 SELECCIÓN DE PICOS

Una vez obtenido el gráfico de espectro medio normalizado en dirección longitudinal (X) acorde a la metodología planteada en [15], se procede a identificar los picos de las posibles frecuencias del puente. (Tabla 4)

Tabla 4. Frecuencias de modos de vibración experimentales obtenidas del método de selección de picos.

Frecuencia [Hz]	Amplitud Potencia[g/Hz]
0.686 Hz	0.307
1.118 Hz	0.040
1.529 Hz	0.017

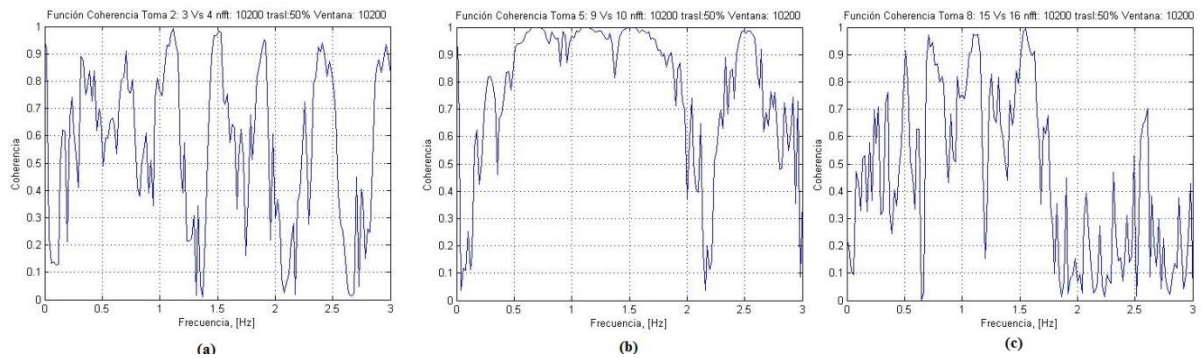
3.4.7 FUNCIONES DE COHERENCIA

Los picos obtenidos del espectro medio normalizado (ANSPD) pueden corresponder a frecuencias naturales de la estructura, sin embargo es necesario efectuar un análisis mediante las funciones de coherencia entre espectros para distinguir de los picos observados aquellos que si corresponden a modos naturales de vibración de la estructura.

Este análisis se realizó para cada una de las ocho mediciones que se generaron entre los dos grados de libertad, el sensor fijo y el sensor móvil, determinando la correlación entre las dos señales mediante un rango que varía entre 0 y 1. Los valores de coherencia próximos a 1, demuestran una alta relación de linealidad entre las señales y los valores próximos a 0, indican niveles de ruidos elevados. [3]

Los valores de las funciones de coherencia en este caso sirvieron para corroborar las frecuencias de los modos de vibración obtenidas anteriormente. (Tabla 4.). Debido a que estas frecuencias se encuentran en rangos de frecuencias con valores de coherencia mayores a 0.7. En el anexo B se presentan las gráficas de correlación obtenidas.

Figura 19. Funciones de Coherencia (a) Medición No. 2 (b) Medición No. 5 (c) Medición No. 8



A continuación se presentan las funciones de coherencia para las mediciones en la dirección Longitudinal con una ubicación de los sensores en el costado derecho de la vía sentido Zapatoca-Bucaramanga, mediciones números 2,5, 8.

3.4.8 RESULTADOS ENSAYOS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL (AVT)

De acuerdo a los picos obtenidos en la sección Selección de picos (tabla 4) y al análisis de coherencia realizado, se identifica la frecuencia de 0.686 [Hz] como la frecuencia del modo fundamental de la estructura debido a su alto contenido energético. Las frecuencias de 1.118 [Hz] y 1.529 [Hz] con menor contenido energético se relacionan a frecuencias de modos armónicos de la estructura. En la tabla 5. Se presenta los resultados obtenidos del ensayo de vibración ambiental realizado al Puente Gómez Ortiz.

Tabla 5. Resultados del ensayo de vibración ambiental modos de vibración, sus respectivas frecuencias y periodos.

Modo de vibración	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]
Fundamental	0.686 Hz	1.458
Armónico	1.118 Hz	0.894
Armónico	1.529 Hz	0.654

4. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Partiendo de los resultados del ensayo de vibración ambiental (4.4.8) y de los valores propios del modelo numérico (3.3) se realiza la siguiente comparación. (Tabla 6.), para el modo fundamental de la estructura y (Tabla 7.), para los armónicos.

Tabla 6. Frecuencia fundamental del modelo numérico y AVT.

Frecuencia Fundamental [Hz]		Part. Masas %	Error %
Ensayo vibración ambiental (AVT)	Modelo numérico		
0.686	0.702	73.24	1.7

Tabla 7. Frecuencias modos armónicos del modelo numérico y AVT.

Frecuencias Armónicos [Hz]		Part. Masas %	Error %
Ensayo vibración ambiental (AVT)	Modelo numérico		
1.118	1.779	10.18	3.8
1.529	1.779	10.18	1.4

El modo fundamental de la estructura en el modelo numérico tiene una frecuencia de 0.702 Hz con una participación de masas del 73.24% en dirección x (longitudinal del puente), la frecuencia que se asemeja en valor obtenida de los datos de vibración ambiental es de 0.686 Hz y se obtiene un error del 1.7% el cual se considera está dentro del rango admisible. El cálculo del error se realiza mediante el porcentaje de la diferencia entre los valores del ensayo de vibración y

los valores del modelo numérico multiplicado por el porcentaje de participación de masas respectivo.

Las frecuencias de 1.118 Hz y 1.52 Hz que también se encuentran en los espectros PSD del análisis en la dirección x (longitudinal del puente) se comparan con el valor de 1.779 Hz correspondiente a la frecuencia del primer modo armónico del puente en dirección x, que tiene una participación de masas del 10.18% y se obtiene un error del 3.8%.

Como resultado de lo anterior, el modelo numérico del puente Gómez Ortiz realizado en el programa Midas Civil (3.3) con las especificaciones de los planos utilizados en su construcción, proporcionados por la secretaría de infraestructura de Santander, se validó para el modo fundamental de la estructura mediante ensayos de vibración ambiental, no fue necesario el proceso de calibración que contempla el ajuste mediante la variación de los parámetros como el Módulo de Elasticidad y la idealización de las condiciones de frontera.

5. CONCLUSIONES

Como resultado de esta investigación se cuenta con un modelo numérico del puente Nuevo Gómez Ortiz, modelado por elementos finitos en el software Midas Civil. Dicho modelo se encuentra validado por medio de ensayos de vibración ambiental realizados a la estructura, mediante el parámetro dinámico de la frecuencia fundamental en el sentido longitudinal del puente.

A partir del modelo numérico realizado en el software Midas Civil se efectuó la evaluación de las características dinámicas del puente tales como frecuencias y periodos naturales de la estructura, mediante un análisis de valores propios, por medio del método Lanczos. La frecuencia fundamental obtenida del modelo es de 0.702 [Hz] y cuenta con un porcentaje de participación de masas del 73.24% en dirección x (longitudinal del puente), y la frecuencia del primer armónico del puente en dirección x es de 1.779 [Hz], y cuenta con una participación de masas del 10.18%. Los parámetros dinámicos identificados se obtuvieron para la dirección longitudinal del puente, en la cual se presenta una mayor participación de masas, con respecto a la dirección transversal y vertical.

Como criterio de validación del modelo numérico se utilizó la frecuencia correspondiente al modo fundamental. Los parámetros de validación empleados tales como el valor nominal de resistencia a la compresión (f'_c) de 35 [Mpa] para pilas y 28 [Mpa] para el tablero, con un módulo de elasticidad de diseño de 22925 [Mpa] para las pilas y de 20637 [MPa] para el tablero, se obtuvieron de los planos constructivos.

En los resultados obtenidos mediante los ensayos de vibración ambiental realizados, se identificaron en base al método de Peak Picking tres valores de frecuencias que caracterizaron la vibración del puente, todos en su dirección

longitudinal, valores semejantes se obtuvieron del análisis numérico del modelo realizado por elementos finitos, con errores de 1.7%, 3.8% y 1.4%, pertenecientes al modo fundamental de vibración de la estructura y a dos de sus armónicos correspondientemente, tanto en los resultados de vibración ambiental como en el modelo numérico, las frecuencias encontradas presentan una mayor participación de masas en la dirección longitudinal del puente (X).

De los tres valores de frecuencias identificados experimentalmente y según los resultados teóricos del modelo numérico realizado, el valor de la frecuencia perteneciente al modo fundamental de vibración presenta la mayor amplitud de potencia en los espectros visualizados. Lo que indica que el puente vibró principalmente en este modo cuando se realizaron las pruebas de vibración ambiental.

La tolerancia entre la respuesta obtenida en los ensayos de vibración ambiental y la respuesta del modelo numérico en este caso de 1.7% para la frecuencia fundamental de la estructura es consecuencia tanto de las discrepancias entre los planos constructivos y la ejecución en la construcción, como las señales de ruido e imprecisiones en la idealización del modelo numérico de la estructura.

En la sección de identificación de las características dinámicas a partir de los registros obtenidos del ensayo de vibración ambiental, se obtuvo respuestas sólo del análisis de las señales en dirección longitudinal del puente, debido a que las señales en las otras direcciones no evidenciaban picos propios de los modos de vibrar de la estructura, las señales eran de poco contenido energético y cuando alguna frecuencia presentaba un contenido alto no era persistente en todos los grados de libertad, es decir su coherencia era baja, lo que indica que se trataba de señales indeseadas sobre los sensores provocadas por el viento o como consecuencia de la frecuencia de vibración de la planta eléctrica utilizada en los ensayos de vibración ambiental. Lo anterior es consistente con los resultados del

modelo numérico, en el cual en la dirección longitudinal (X) se encontró la frecuencia fundamental de la estructura con una mayor participación de masas.

La ausencia de frecuencias pertenecientes a modos de vibración en las direcciones transversal y vertical del puente, indican que las excitaciones presentes en los ensayos, debidas solo a condiciones del ambiente no fueron suficientes para que la estructura vibrara en estas direcciones. Sólo fue excitado el modo fundamental en el cual, según el modelo numérico, la mayor participación de masas ocurre en el sentido longitudinal.

El puente Gómez Ortiz es una estructura de reciente construcción, razón por la cual la calibración del modelo de elementos finitos en el software Midas Civil, consistió en una validación de los parámetros de ajuste, en esta investigación de las propiedades de los materiales tales como el módulo de elasticidad del concreto de las pilas y del tablero. Estos parámetros se obtuvieron de los planos constructivos proporcionados por la secretaría de infraestructura de Santander.

Los ensayos de vibración ambiental permiten la identificación de las propiedades dinámicas de una estructura a través de la medición de su respuesta ante excitaciones no forzadas como el viento, microsismos, sismos y cargas de servicio.

En el presente trabajo de investigación se empleó el método de Peak Picking (PP) en la estimación de los parámetros modales a partir de mediciones de aceleraciones realizadas en la prueba de vibración ambiental, lo cual pudo proveer una base sólida para la validación del modelo de elementos finitos realizado.

6. RECOMENDACIONES

Para realizar un análisis modal experimental que nos pueda brindar una mayor información acerca de una mayor cantidad de modos de vibración que los tres encontrados en esta investigación, es necesario contar con más que la excitación ambiental, unos nuevos ensayos de vibración realizados a esta estructura con las cargas de servicio actuando, podría llegar a excitarla hasta evidenciar más modos de vibración en las señales.

Las pruebas de vibración ambiental realizadas a la estructura se ejecutaron cuando el embalse de Hidrosogamoso, proyecto que contempla la creación de una represa, no se había llenado. Realizar ensayos de vibración ambiental a la estructura cuando el espejo de agua se encuentre dentro de las cotas de funcionamiento del embalse permitirá estudiar el cambio en el comportamiento de la estructura debido a las nuevas condiciones a las que se verá sometida. Por ende para continuar con el monitoreo de la estructura se invita el grupo INME de la Universidad Industrial de Santander a realizar ensayos de vibración ambiental con los cuales se lleve un seguimiento del cambio en sus propiedades dinámicas, para su respectivo control sobre su salud estructural y obtención del modelo ajustado a las condiciones finales de funcionamiento de la estructural, ya que este modelo final será el que proporcionará la información para el plan de monitoreo.

CITAS

[1] CLOTAIRE Michel, PHILIPPE Guéguen y PIERRE-Yves Bard. Dynamic parameters of structures extracted from ambient vibration measurements: an aid for the seismic vulnerability assessment of existing buildings in moderate seismic hazard regions. En: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, August 2008, vol. 28, p. 593–604.

[2] GÓMEZ ARAUJO, Iván Darío. Caracterización dinámica experimental de puentes de hormigón simplemente apoyados a partir de mediciones de vibración ambiental. Tesis de Maestría. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, 2010. 196p.

[3] MENDES, Paulo and OLIVEIRA, Sergio. Análise dinâmica de estruturas: Utilização integrada de modelos de identificação modal e modelos de elementos finitos. Lisboa, 2008, 170p.

[4] GARCÍA REYES, Luis Enrique. Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico. 2 ed. Bogotá D.C.: Uniandes, 2008. 574p.

[5] MALDONADO, Esperanza, y CHIO CHO, Gustavo. Análisis Sísmico de Edificaciones. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, 2004. 298p.

[6] GÓMEZ, Iván, MALDONADO, Esperanza y CHIO, Gustavo. Pruebas de Vibración Ambiental en Puentes. En: UIS Ingenierías. Junio 2010. Vol. 9, no. 1, p. 55 – 68.

[7] MARTÍNEZ RUIZ, Guillermo. Estudio de vibración ambiental en estructuras. Conferencia en Universidad Industrial de Santander: Taller de vibraciones ambientales [Bucaramanga, 2014]. p. 4-36.

- [8] MARULANDA, Johannio, CASTELLANOS, Sebastián. Dinámica experimental. Conferencia en Universidad Industrial de Santander: Dinámica experimental y análisis espectral [Bucaramanga, 2015]. p. 98
- [9] VAN OVERSCHEE, Peter y DE MOOR, Bart. Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation, Applications. Boston: Kluwer Academic Publishers. 1996. 254p.
- [10] BENDAT, Julius .S y PIERSOL, Allan. G. Random Data. Analysis and Measurement Procedure. New York: Wiley Interscience, 1989.
- [11] MIDAS Information Technology Co., Ltd. (2015). On-line manual- Civil structure design system.
http://manual.midasuser.com/EN_Common/Civil/835/index.htm
- [12] HAMED E. y FROSTIG Y. Natural frequencies of bonded and unbonded prestressed beams-prestress force effects. En: Journal of Sound and Vibration, Mayo 2006, p. 28–39.
- [13] FRANCO ARIZA, Graciela Carolina. Calibración del modelo numérico existente de una edificación de valor histórico mediante mediciones de vibración ambiental. Caso de estudio: Templo de San Francisco de Asís de Bucaramanga. Trabajo de grado Ingeniera Civil. Bucaramanga Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, 2012. 132 p.
- [14] REN Wei-Xin, ZATAR Wael, y HARIK Issam E. Ambient vibration-based seismic evaluation of a continuous girder bridge. En: Engineering Structures, April 2004, vol. 26, p. 631-640.

[15] FELBER, Andreas Johann. Development of a hybrid bridge evaluation system. Tesis de Doctorado. Vancouver, Canadá: University of British Columbia. Department of Civil Engineering, 1993. 149 p.

[16] WELCH, Peter. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. En: Audio and Electroacoustics, IEEE Transactions, June 1967, vol. 15, p. 70-73.

BIBLIOGRAFÍA

CLOTAIRE Michel, PHILIPPE Guéguen y PIERRE-Yves Bard. Dynamic parameters of structures extracted from ambient vibration measurements: an aid for the seismic vulnerability assessment of existing buildings in moderate seismic hazard regions. En: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, August 2008, vol. 28, p. 593–604.

FELBER, Andreas Johann. Development of a hybrid bridge evaluation system. Tesis de Doctorado. Vancouver, Canadá: University of British Columbia. Department of Civil Engineering, 1993. 149 p.

FRANCO ARIZA, Graciela Carolina. Calibración del modelo numérico existente de una edificación de valor histórico mediante mediciones de vibración ambiental. Caso de estudio: Templo de San Francisco de Asís de Bucaramanga. Trabajo de grado Ingeniera Civil. Bucaramanga Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, 2012. 132p.

GARCÍA REYES, Luis Enrique. Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico. 2 ed. Bogotá D.C.: Uniandes, 2008. 574p.

GÓMEZ ARAUJO, Iván Darío. Caracterización dinámica experimental de puentes de hormigón simplemente apoyados a partir de mediciones de vibración ambiental. Tesis de Maestría. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, 2010. 196p.

GÓMEZ, Iván, MALDONADO, Esperanza y CHIO, Gustavo. Pruebas de Vibración Ambiental en Puentes. En: UIS Ingenierías. Junio 2010. Vol. 9, no. 1, p. 55 – 68.

HAMED E. y FROSTIG Y. Natural frequencies of bonded and unbonded prestressed beams-prestress force effects. En: Journal of Sound and Vibration, Mayo 2006, p. 28–39.

MALDONADO, Esperanza, y CHIO CHO, Gustavo. Análisis Sísmico de Edificaciones. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, 2004. 298p.

MARTINEZ RUIZ, Guillermo. Estudio de vibración ambiental en estructuras: Taller Teórico- Práctico. México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2014. 39p.

MIDAS Information Technology Co., Ltd. (2015). On-line manual- Civil structure design system.

http://manual.midasuser.com/EN_Common/Civil/835/index.htm

REN Wei-Xin, ZATAR Wael, y HARIK Issam E. Ambient vibration-based seismic evaluation of a continuous girder bridge. En: Engineering Structures, April 2004, vol. 26, p. 631-640.

ANEXOS

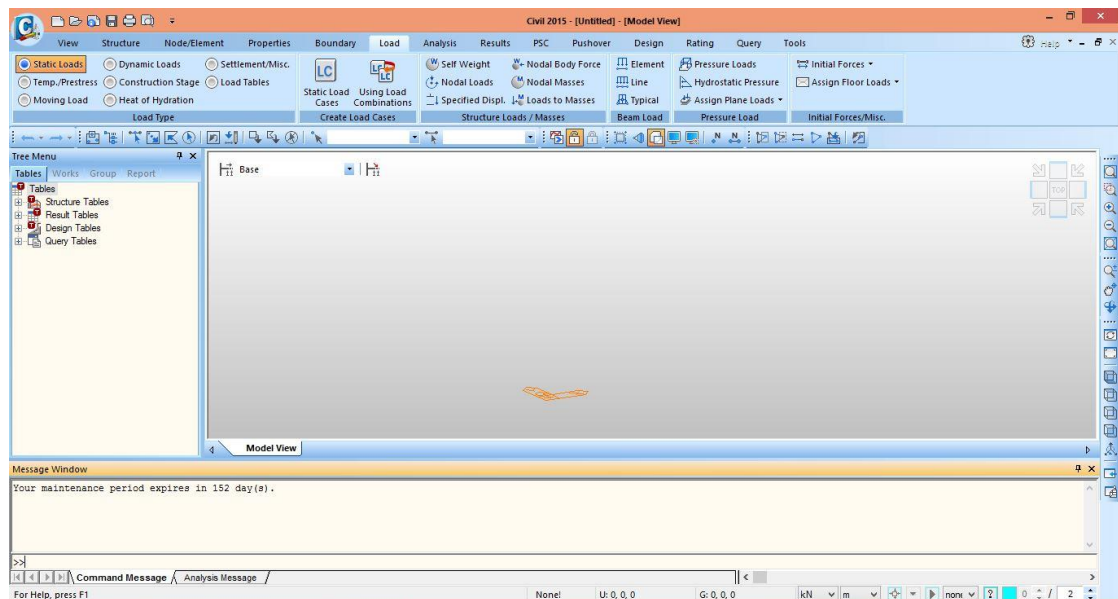
ANEXO A.

REALIZACIÓN DEL MODELO EN EL SOFTWARE MIDAS CIVIL

El modelo del puente se elaboró en el software MIDAS Civil 2015. La información correspondiente a las dimensiones de la estructura, propiedades de los materiales, condiciones de frontera y asignación de cargas al modelo se obtuvo de los planos constructivos del puente diseñado por INGETEC Ingeniería y diseño S.A. y que fueron facilitados por la Secretaría de Infraestructura de Santander.

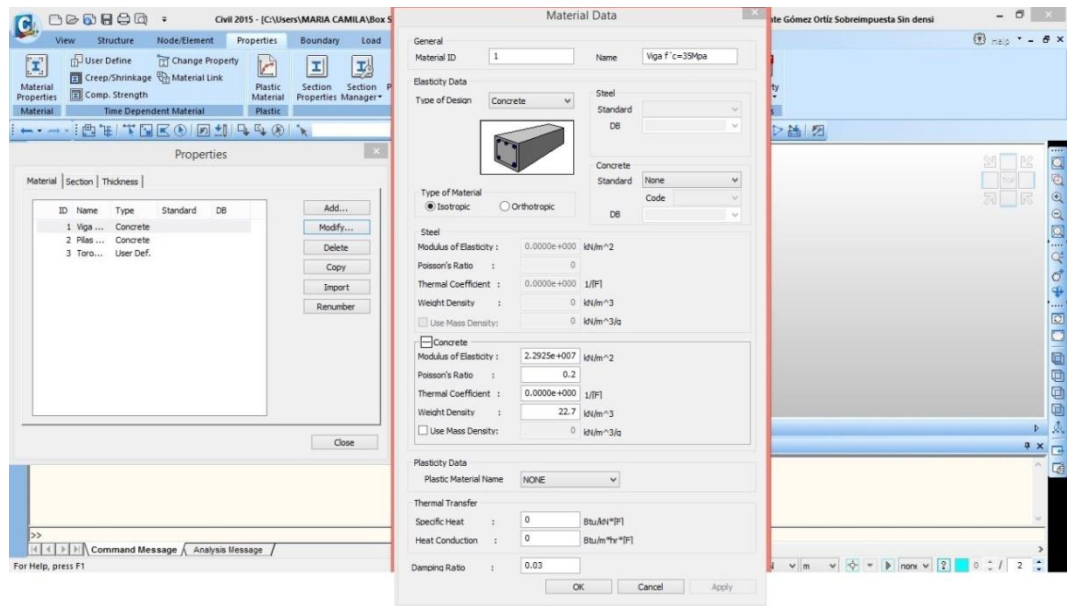
Metodología empleada para realizar el modelo numérico por elementos finitos.

- Creación de un nuevo proyecto, asignación de unidades KN, m En la interfaz del programa MIDAS Civil se crea un nuevo proyecto y se guarda en una carpeta. Asignación de unidades KN,m.

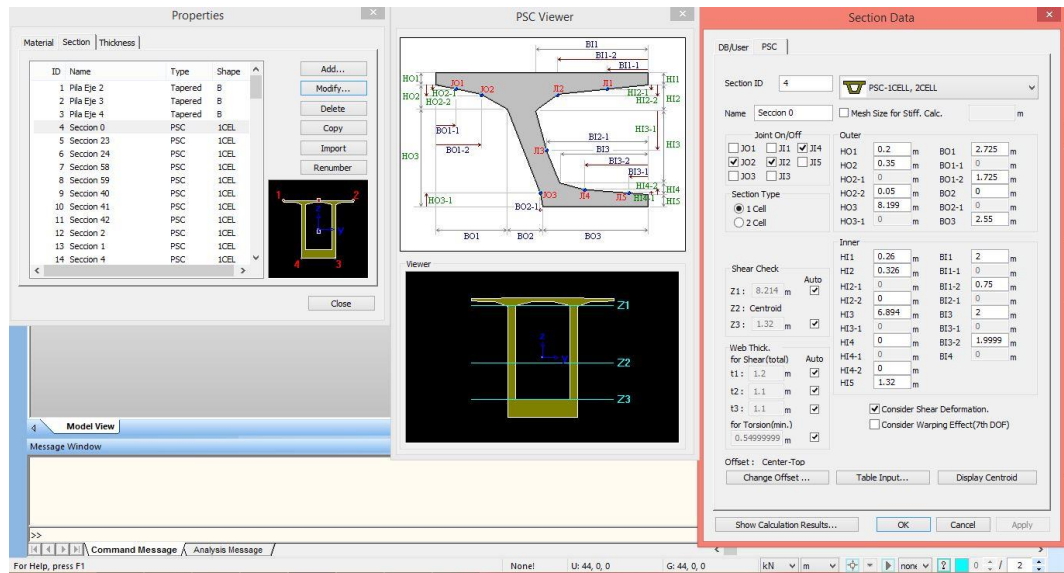


- Definición de las propiedades de los materiales a utilizar. En la siguiente tabla se encuentra las propiedades de los materiales empleados en el modelo, obtenidas según los planos utilizados en la construcción (Ver anexo1).

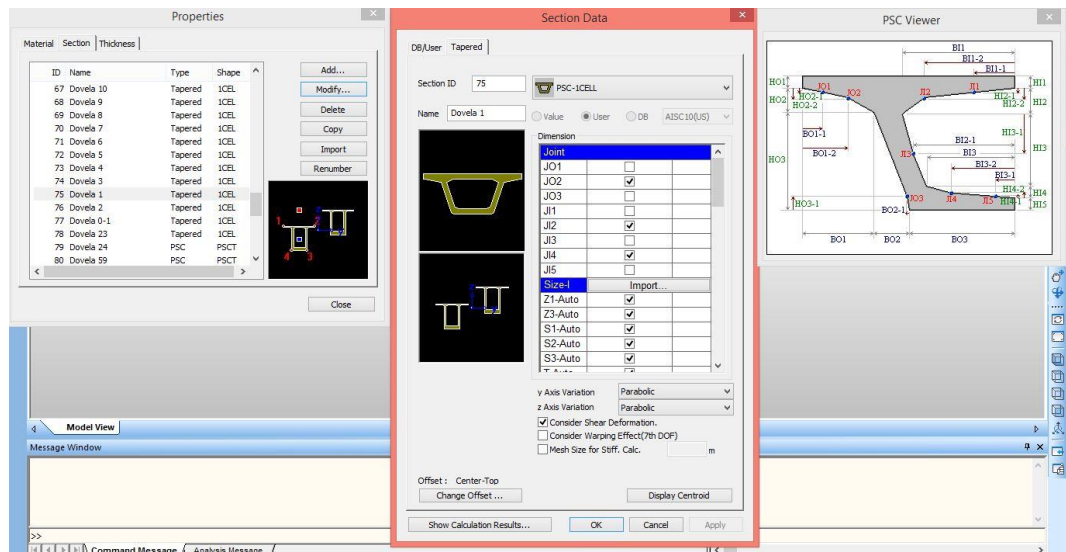
Ruta: *Propeties>>Material Properties>>Material>>Add*



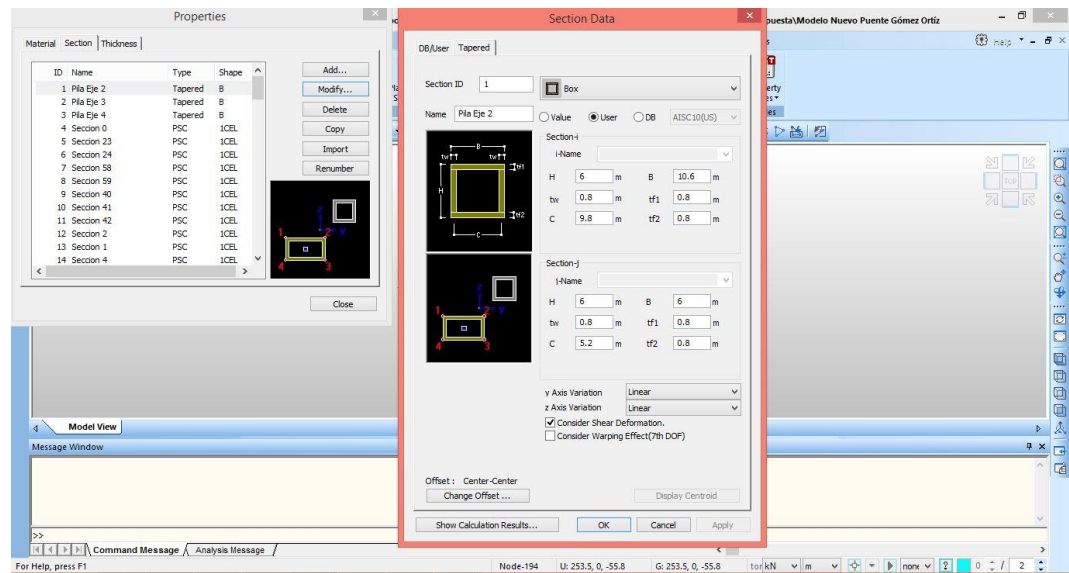
- Creación de las secciones transversales de cada una de las dovelas del puente, identificando de los planos las dimensiones requeridas por el programa. Ver Anexo C y Anexo E.
- Ruta: *Propeties>>Section Properties>>Section>>PSC>>PSC-1CELL, 2CELL*



- Creación de cada una de las dovelas, indicando la sección transversal en la que inicia y finaliza, para esto se importó las secciones creadas en el paso anterior. La variación de la geometría de la sección transversal de las dovelas se considera cuadrática y de las pilas lineal. Ver Anexo E. Ruta: *Propeties>>Section Properties>>Section>>Tapered>>PSC-1CELL*

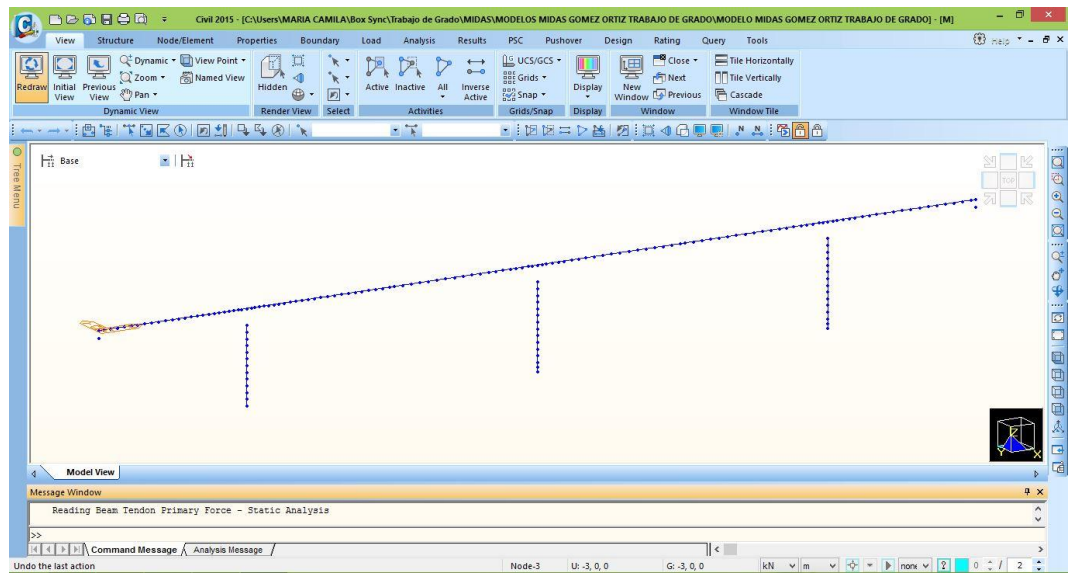


- Creación de las secciones transversales de las tres pilas del puente, identificando de los planos las dimensiones requeridas por el programa. La variación de la geometría de la sección transversal de las pilas es lineal. La pila número 2 se dividió en doce segmentos de 3.5m y las pilas 3 y 4 en catorce segmentos, doce de 3.5m y dos de 2.5m. Ver Anexo E. Ruta: *Propeties>>Section >>Tapered>>Box*

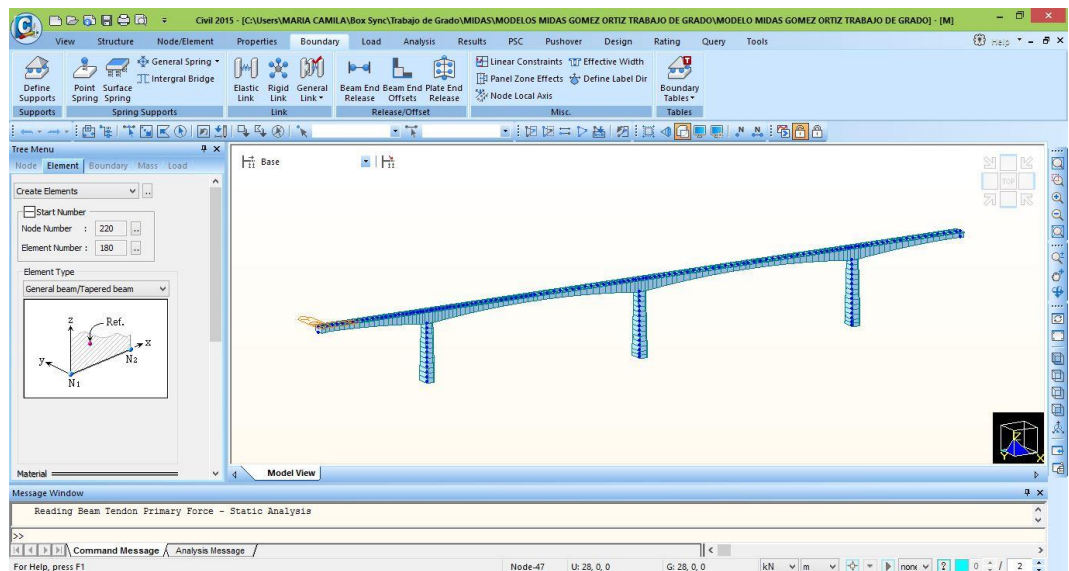


- Creación de los nodos de la estructura situándolos por medio de coordenadas, ubicación de la coordenada (0,0,0) en el estribo correspondiente al sentido Zapatoca-Girón. Cada dovela y cada pila tienen dos nodos.

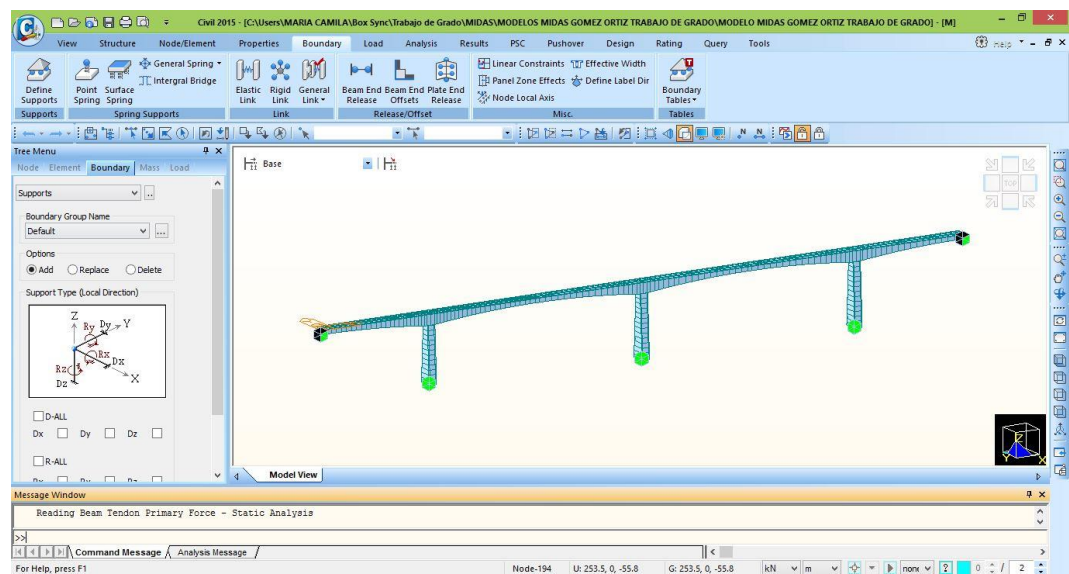
Ruta: *Node/Element>>Create Nodes*



- Creación de los elementos de la estructura definiendo a cada uno su longitud, tanto la superestructura como la subestructura está conformada por elementos de tipo Beam, con sus respectivas definiciones de materiales y sección transversal. El puente consta de seis voladizos con 117 dovelas de canto variable en forma parabólica y con tres pilas tipo cajón rectangular de variación lineal.
 Ruta: *Node/Element*>>*Create Element*

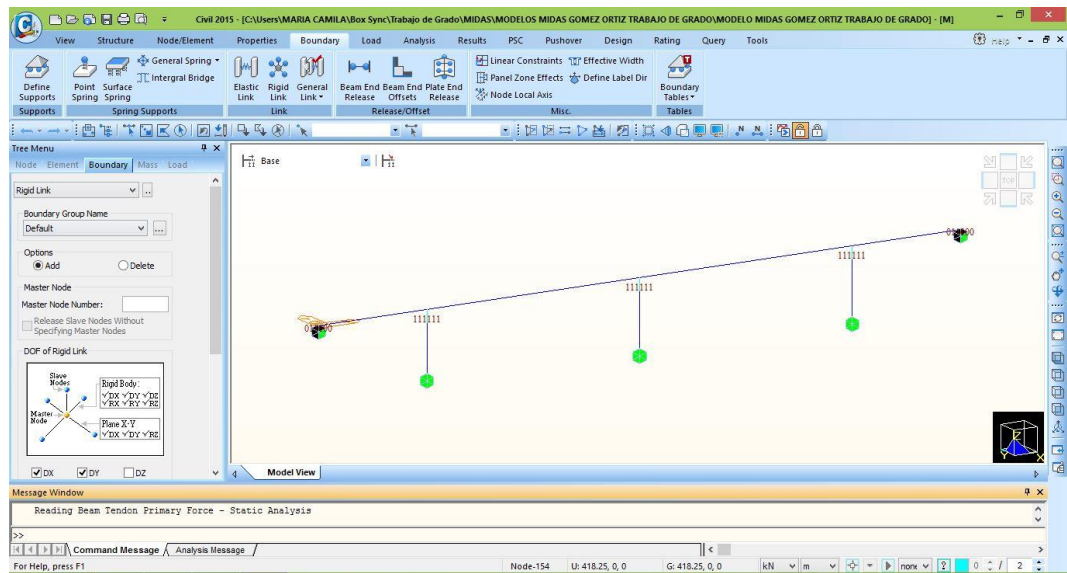


- Evaluación de las condiciones de frontera, se estableció los apoyos de tipo empotramiento (con restricciones traslacional y rotacional en todas las direcciones) para modelar la interacción suelo- estructura. En los apoyos de los extremos del tablero se restringió el movimiento traslacional en la dirección Y (transversal al tablero) y Z (perpendicular al tablero). Ver Anexo3 Figura A.9 y Figura A.10.
Ruta: *Se seleccionan los nodos>> Boundary>>DefineSupports*

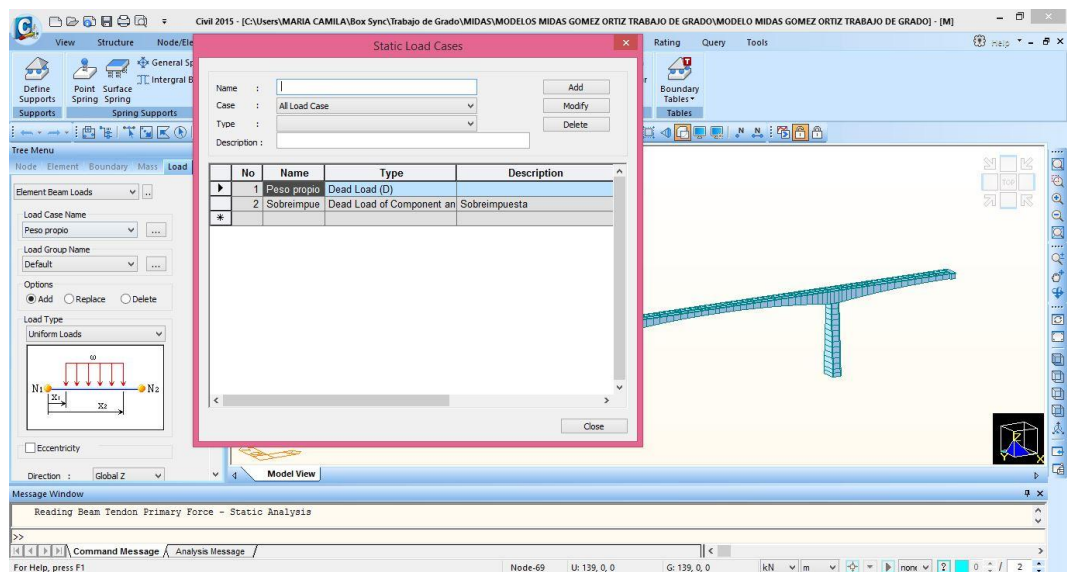


- Establecer la unión monolítica entre cada pila y la superestructura, mediante restricciones (Rigid Link) que igualan todos los grados de libertad traslacionales y rotacionales, lo cual permite que sus movimientos no sean independientes.

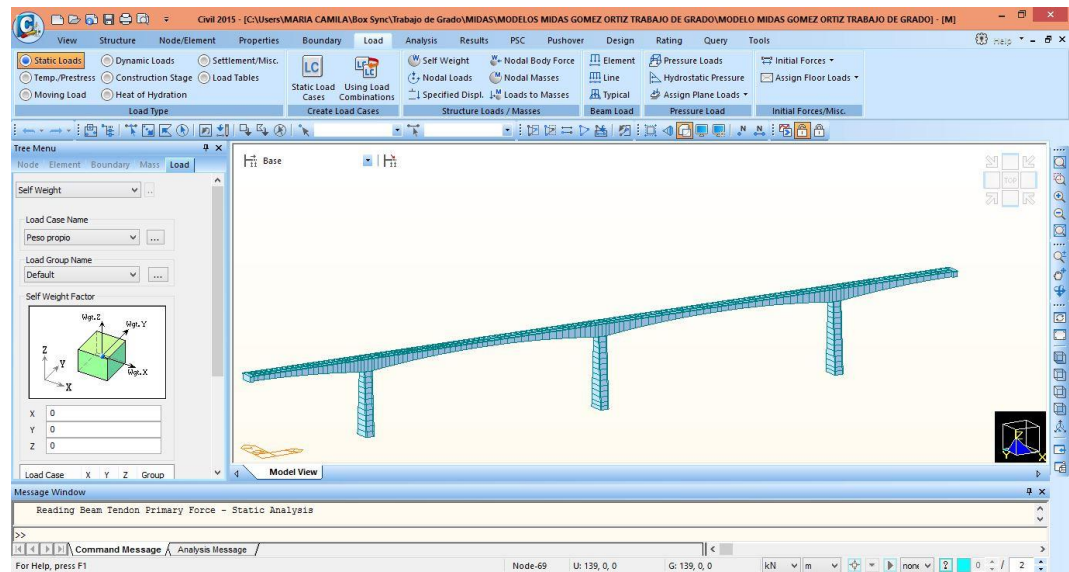
Ruta: *Se seleccionan los nodos>>>> Boundary>>Rigid Link>>Rigid Body*



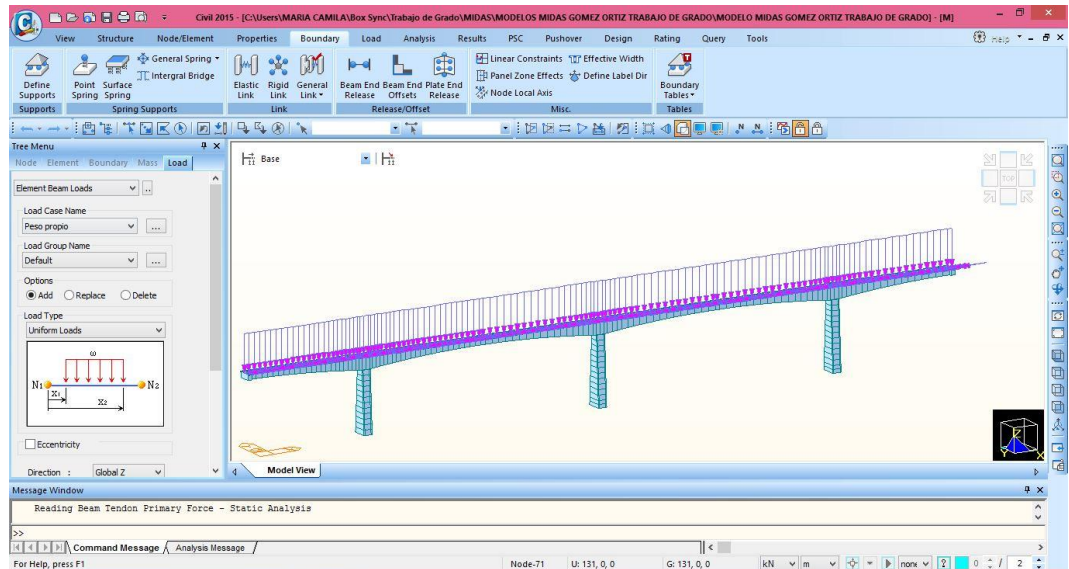
- Casos de cargas, los casos de carga permanente que se ingresaron al programa fueron Peso propio y Sobre impuesta. Ver anexo C.
Ruta: *Load>>Static Load Cases>>Peso Propio(Dead Load); Sobre impuesta(Dead Load of Component and Attachments)*



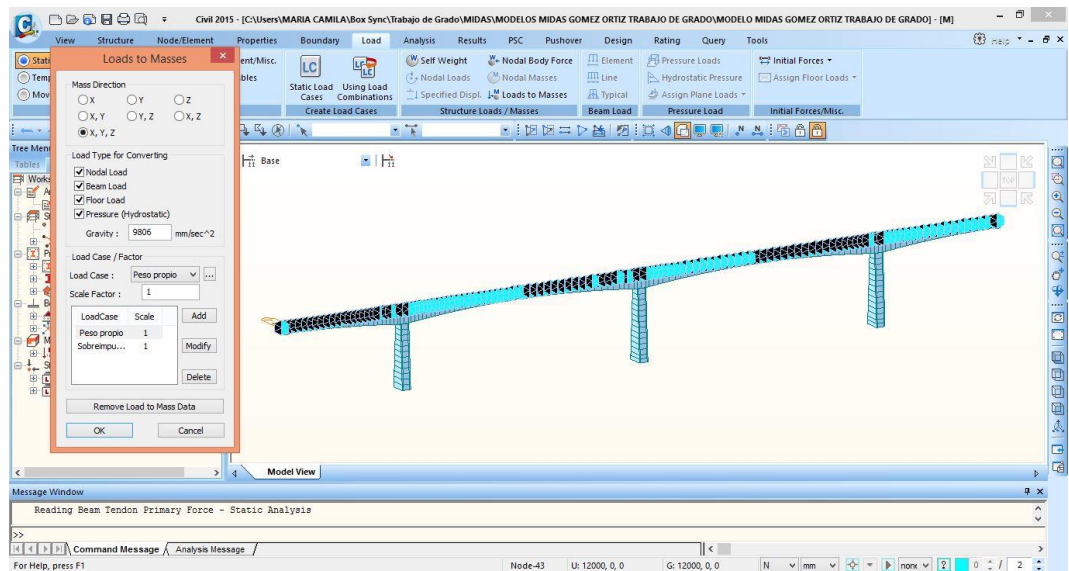
- El peso propio de la estructura es calculado por el programa.
Ruta: *Load>>Static Loads>>Self Weight*



- La carga Sobreimpuesta considera el peso de barandas, parapeto y pavimento, debido a que no hay simetría en la sección transversal de la viga-cajón se genera un momento torsor, calculado a continuación. Ver anexo E. Ruta: *Load>>Static Loads>>Sobreimpuesta>>Uniform Loads/Uniform Moments/Torsions*



- Análisis dinámico del modelo, es necesario convertir a masas las cargas permanentes de la estructura (Peso Propio y Sobre impuesta). Ruta: *Load>>Static Loads>>Loads to Masses*



- Evaluación de las características dinámicas del puente, análisis utilizado: Eigenvalue Analysis Control- Eigen Vectors- Lanczos (Análisis de valores propios- método -vectores de Lanczos), el cual permite conocer periodos y frecuencias de la estructura con su respectiva participación de masas. Se obtuvieron los siguientes resultados.
Ruta: *Load>>RS Load Cases>>Eigenvalue Analysis Control >>Eigen Vectors>>Lanczos*

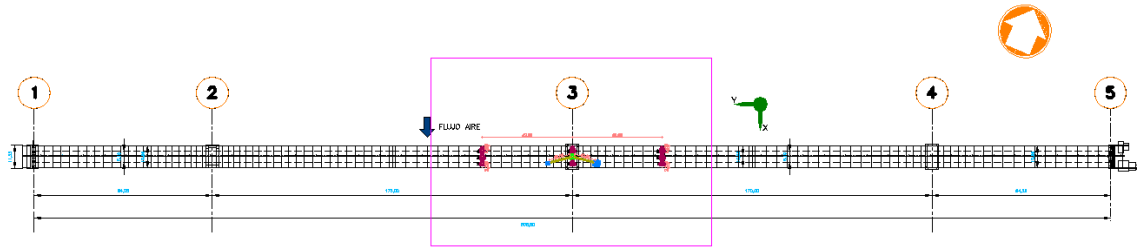
Mode No	Frecuencia (Hz)	Periodo (Seg)	Tolerance
1	3.38047	0.295824	1.3841E-6
2	3.81029	0.262456	1.19222E-6
3	4.47263	0.223553	1.42442E-6
4	4.86956	0.205355	1.26423E-6
5	6.66764	0.150002	1.15046E-6
6	6.98427	0.143183	1.02287E-6
7	6.48175	1.01911	0.86942E-6
8	7.51482	1.34421	0.82297E-6
9	10.07382	1.62447	0.82237E-6
10	10.81913	1.10272	0.82747E-6
11	11.10762	1.179477	0.81396E-6
12	12.07068	2.068188	0.692177E-6
13	13.11051	2.18053	0.47020E-6
14	14.289124	2.27919	0.439411E-6
15	16.797427	2.87433	0.17428E-6
16	17.02463	2.83771	0.15326E-6
17	20.40768	2.55588	0.207463E-6
18	21.28828	3.388347	0.20153E-6
19	23.79828	3.78385	0.264484E-6
20	24.86291	3.98334	0.282751E-6

Mode No	TRNLY MASS(%)	TRNLY SUM(%)	TRNLY MASS(%)	TRNLY SUM(%)	TRNLY MASS(%)	TRNLY SUM(%)	TRNLY MASS(%)	TRNLY SUM(%)	TRNLY MASS(%)	TRNLY SUM(%)
1	0.00	0.00	16.80	16.80	0.00	0.00	2.87	2.87	0.00	0.00
2	0.00	0.00	39.84	56.64	0.00	0.00	6.98	13.24	0.00	0.00
3	72.24	72.24	0.00	72.24	0.00	0.00	13.24	0.71	0.71	0.00
4	1.82	74.07	0.00	75.89	0.00	0.00	13.24	6.78	8.47	0.00

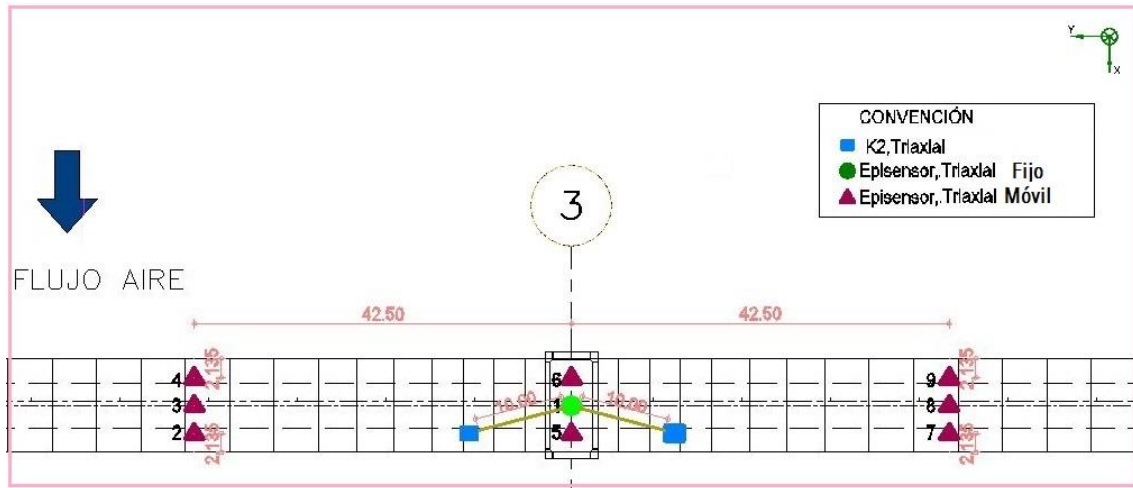
ANEXO B

CONFIGURACIONES DE SENSORES EN LA ESTRUCTURA

Figura B.1 Ubicación equipo de adquisición de datos vista en planta Puesto Gomez Ortíz. (b) Configuración de los sensores Pila eje 3, Posición [1-9].

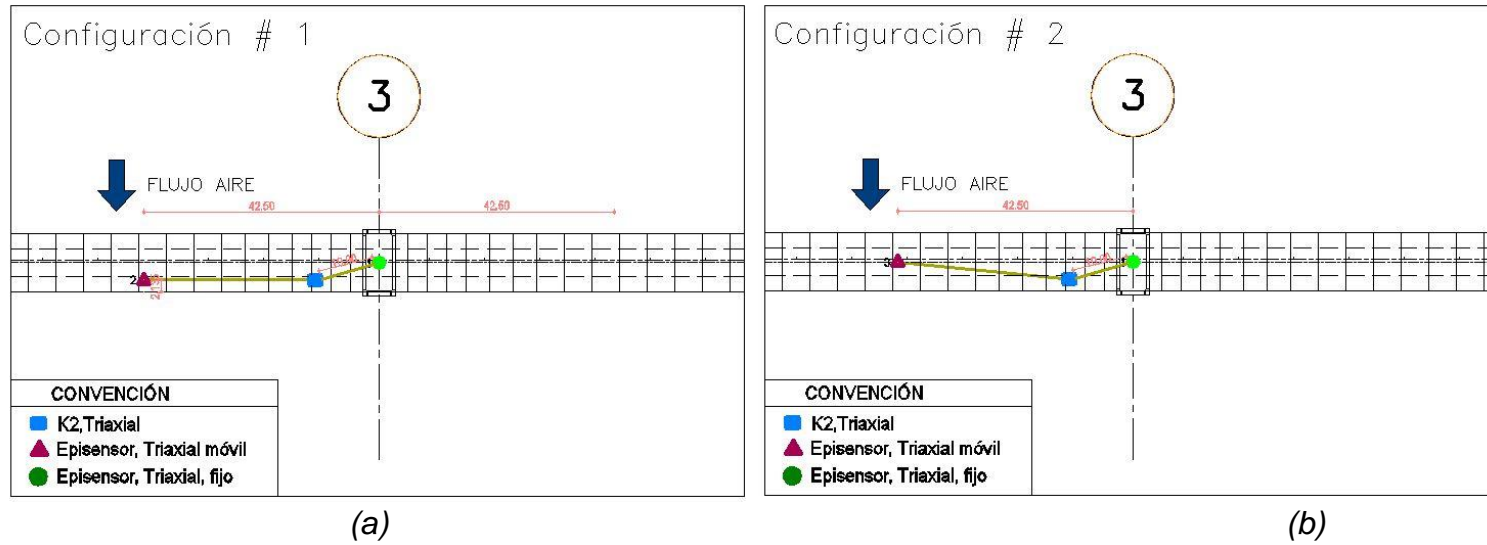


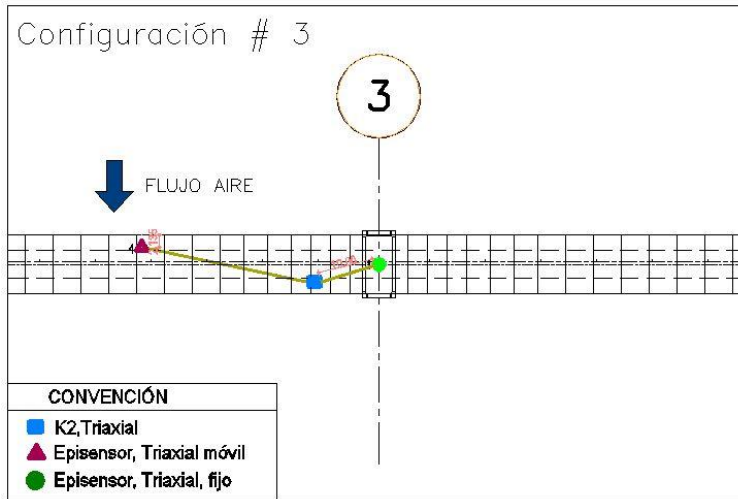
(a)



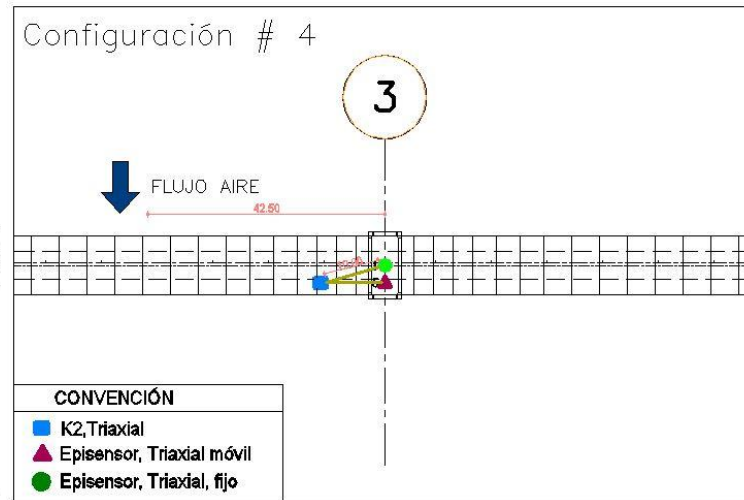
(b)

Figura B.2 Configuración de los sensores Pila eje 3: (a) Configuración # 1, (b) Configuración # 2, (c) Configuración # 3, (d) Configuración # 4, (e) Configuración # 5, (f) Configuración # 6, (g) Configuración # 7, (h) Configuración # 8.





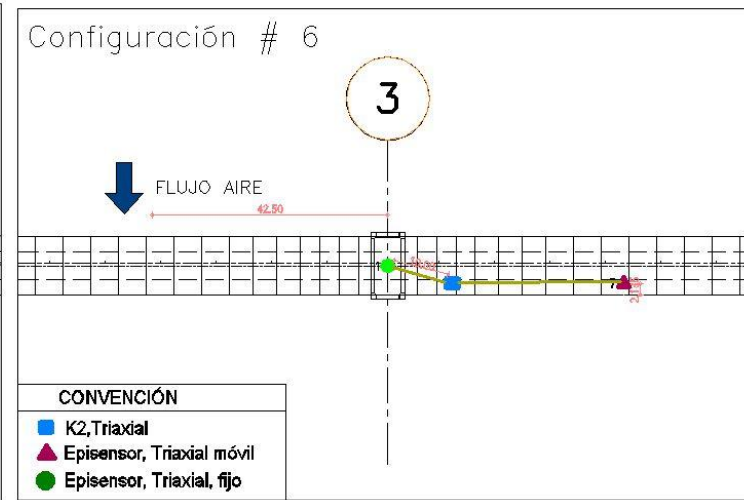
(c)



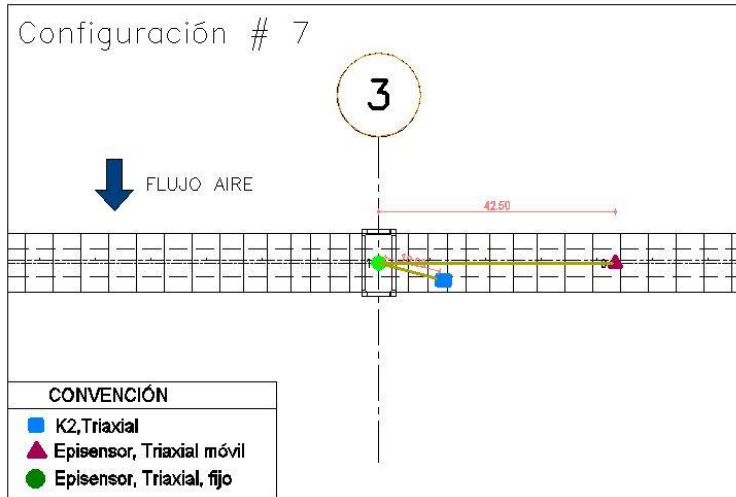
(d)



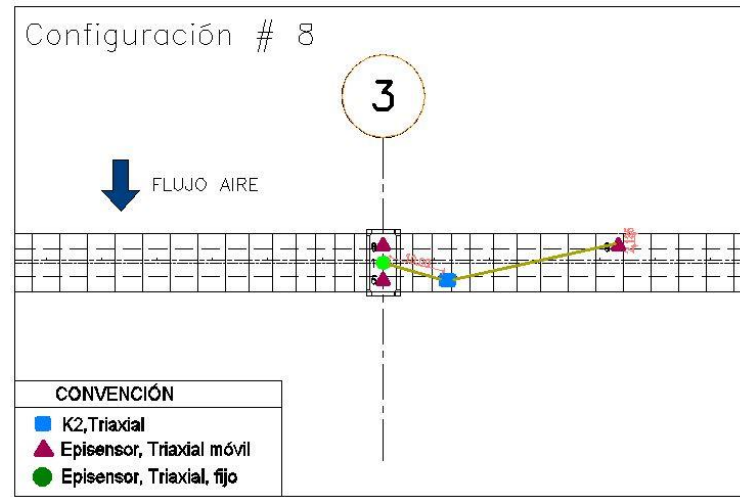
(e)



(f)



(g)



(h)

IDENTIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS EN LA DIRECCIÓN LONGITUDINAL (X) DEL PUENTE GÓMEZ ORTÍZ

Figura B.3 Registros Obtenidos Del Ensayo De Vibración Ambiental (AVT) Con Corrección De Línea Base

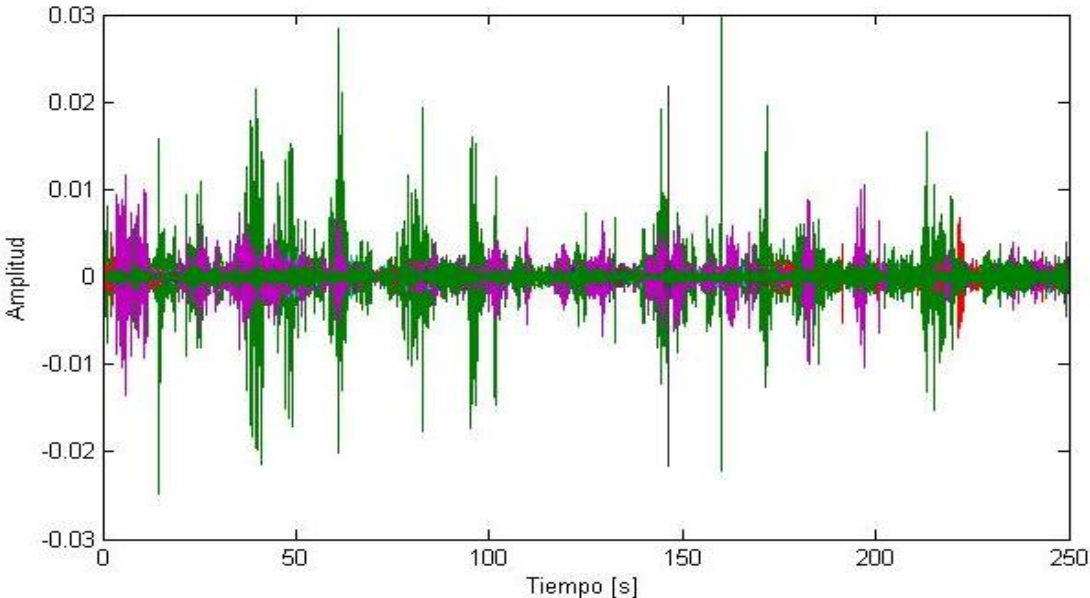


Figura B.4 Filtro De Señales longitudinales.

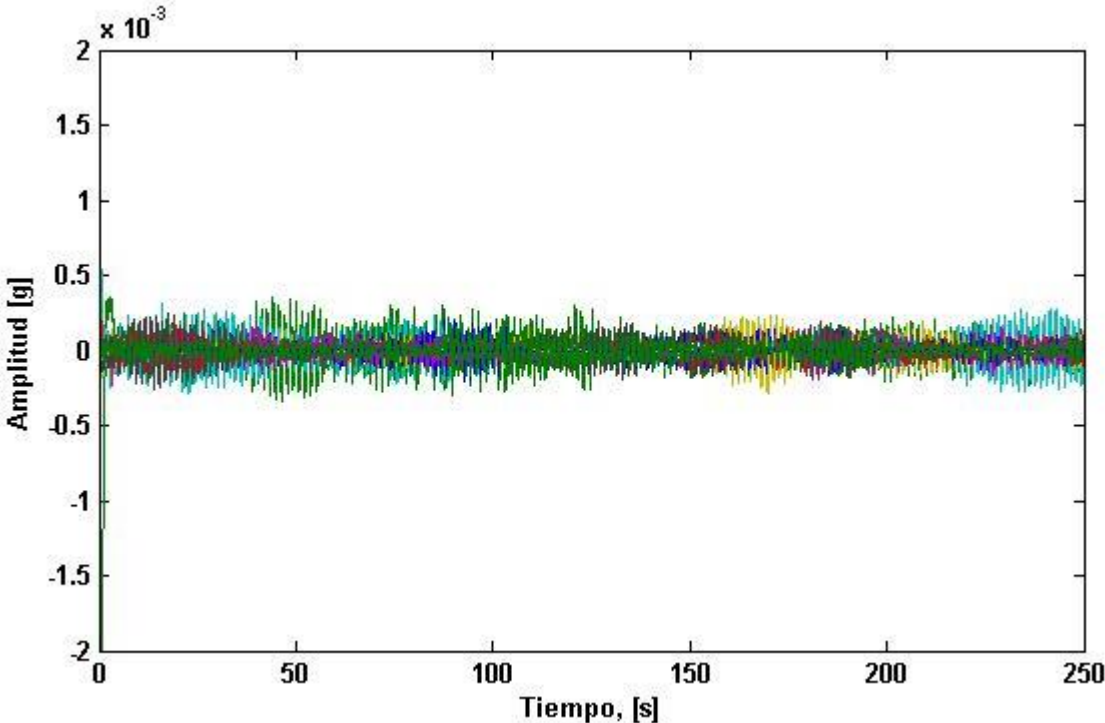
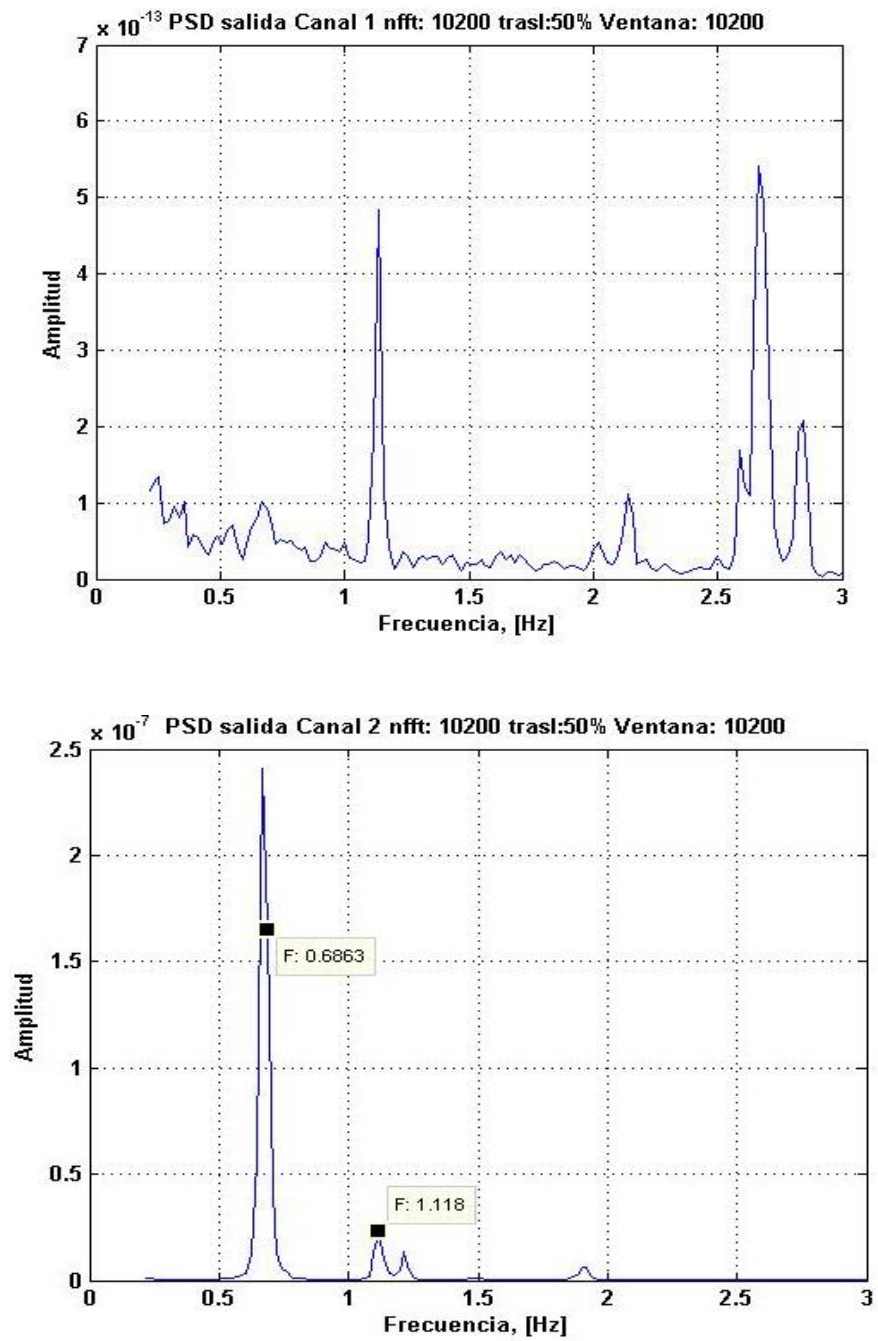
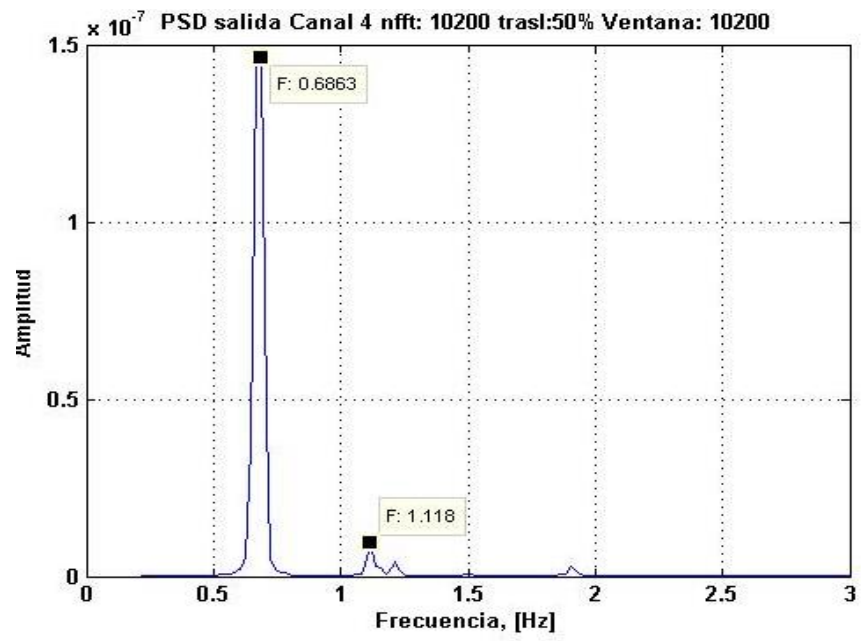
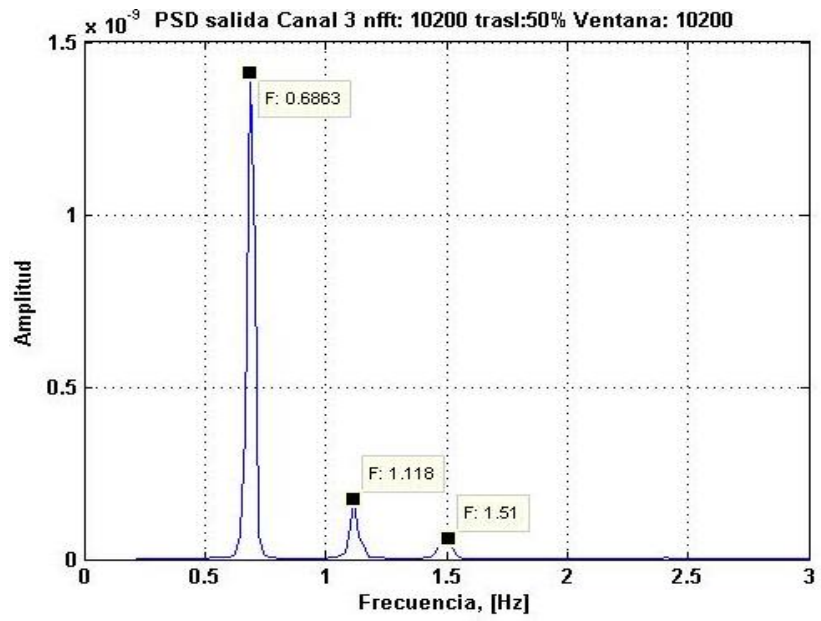
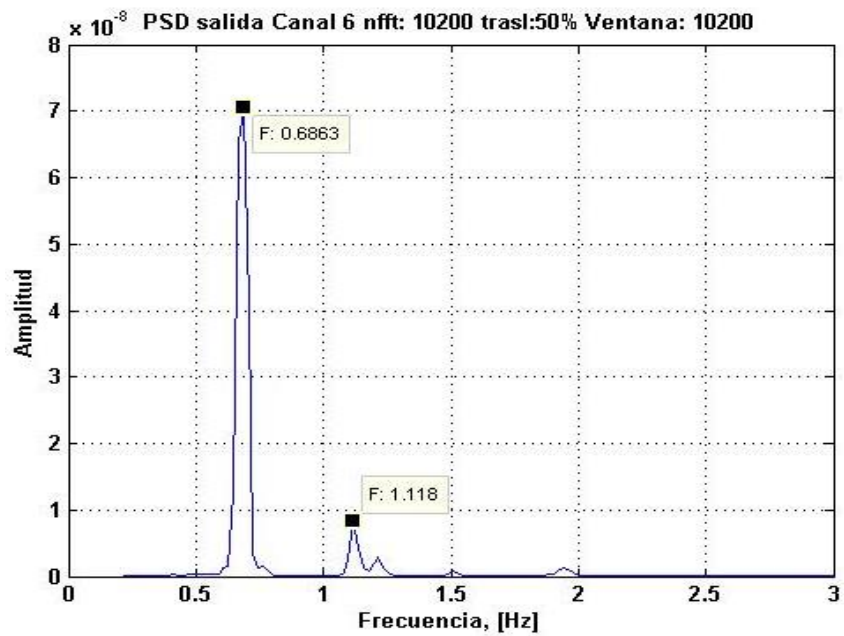
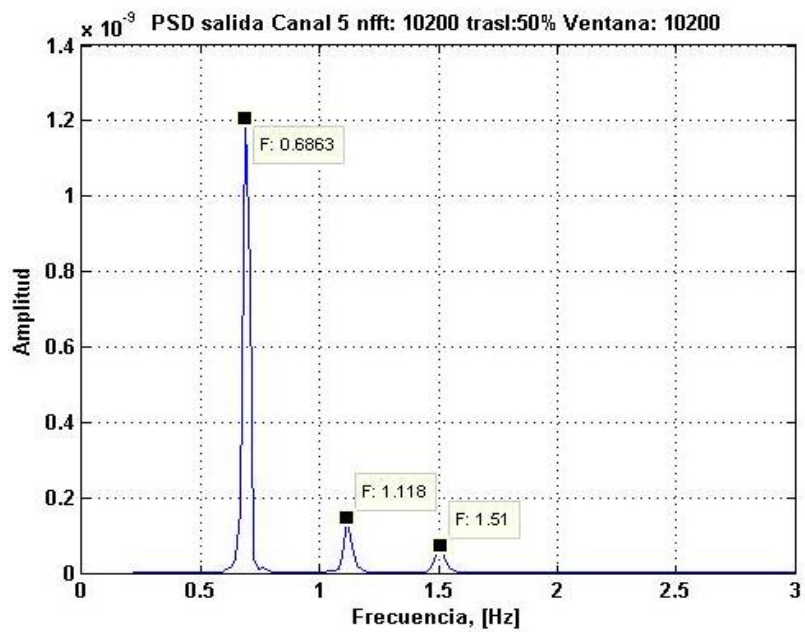
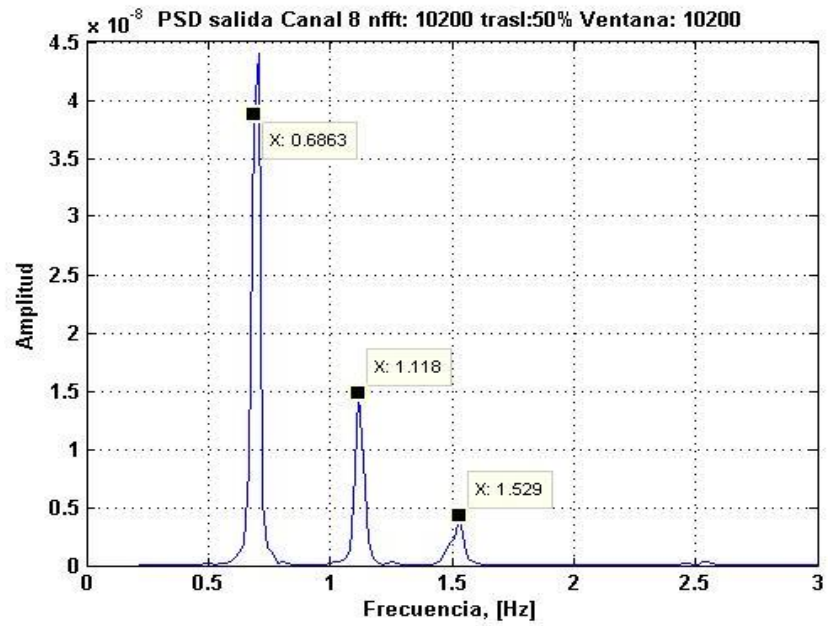
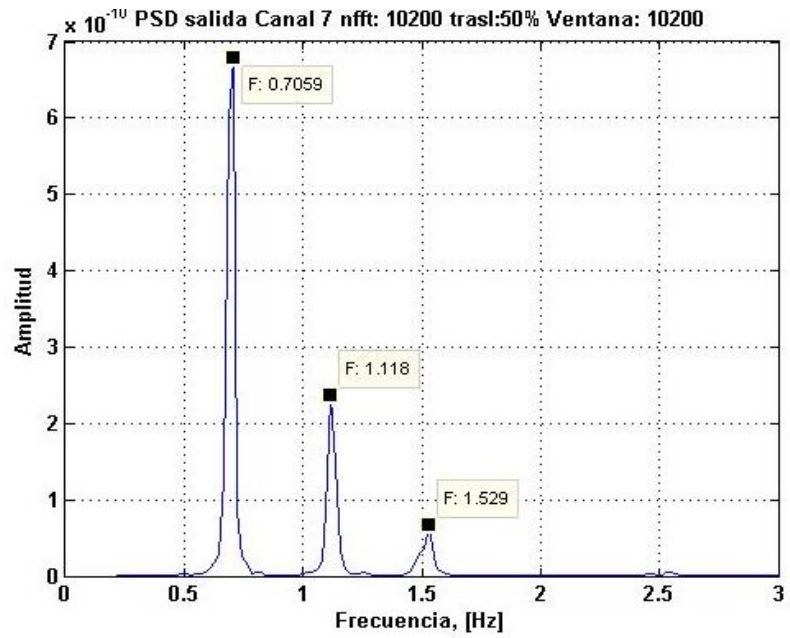


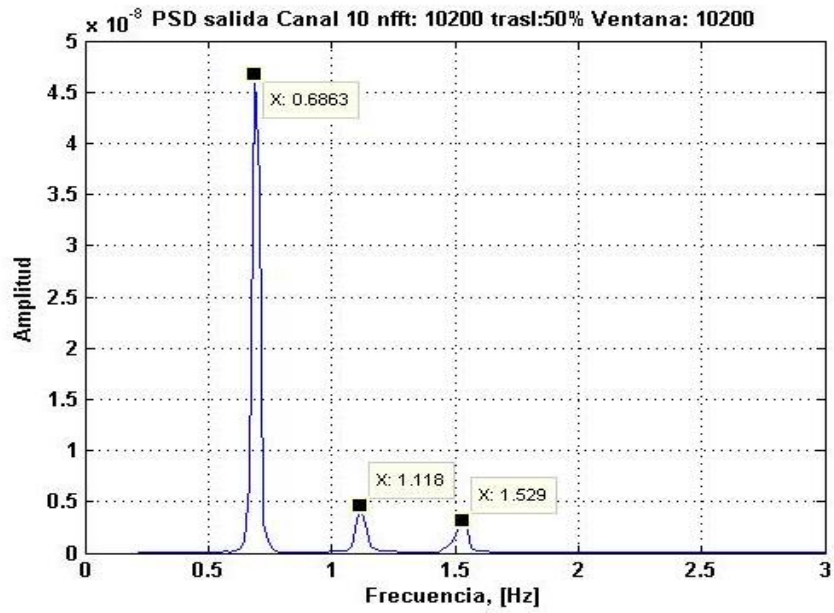
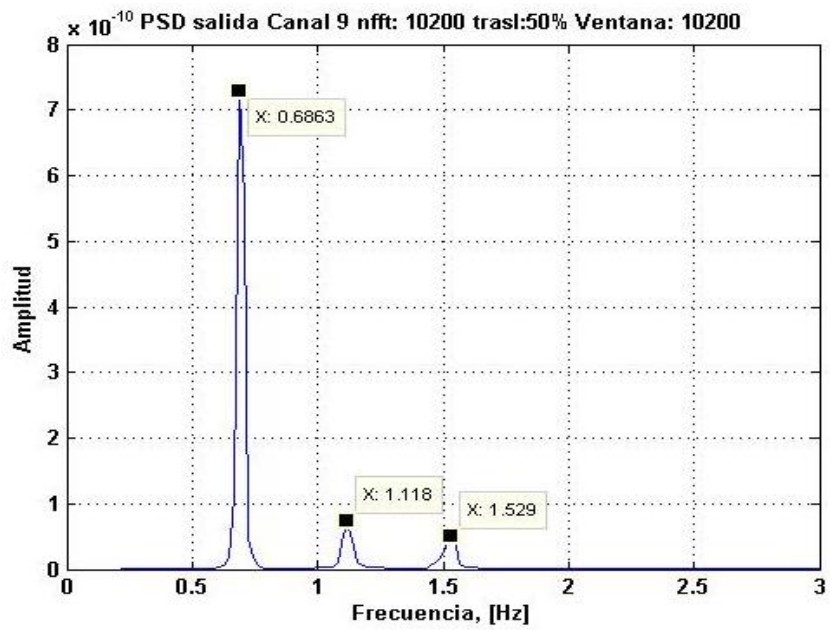
Figura B.5 Funciones de Densidad Espectral De Potencia (PSD)

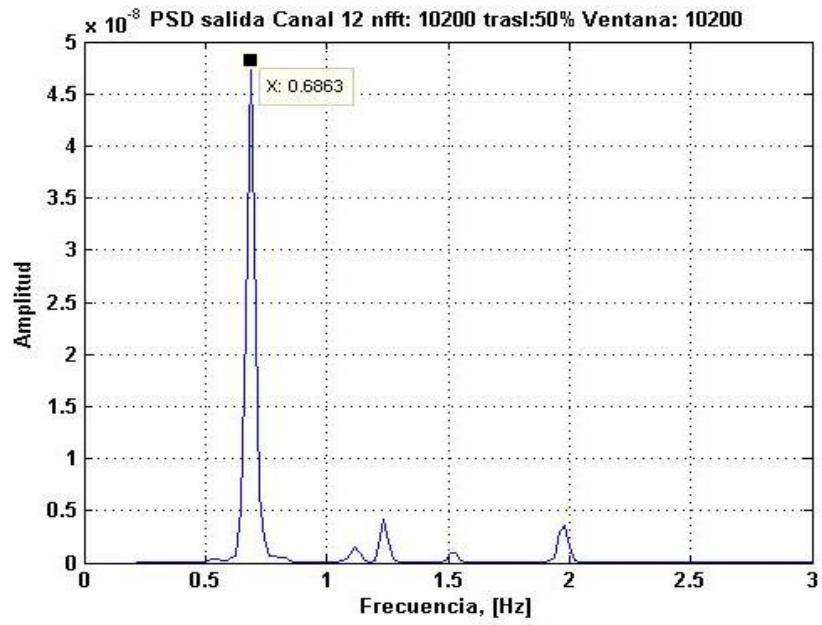
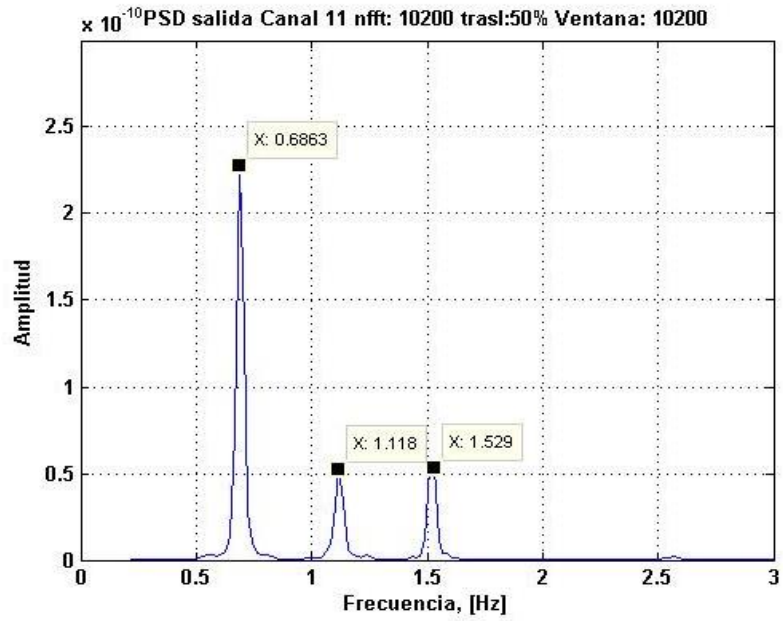


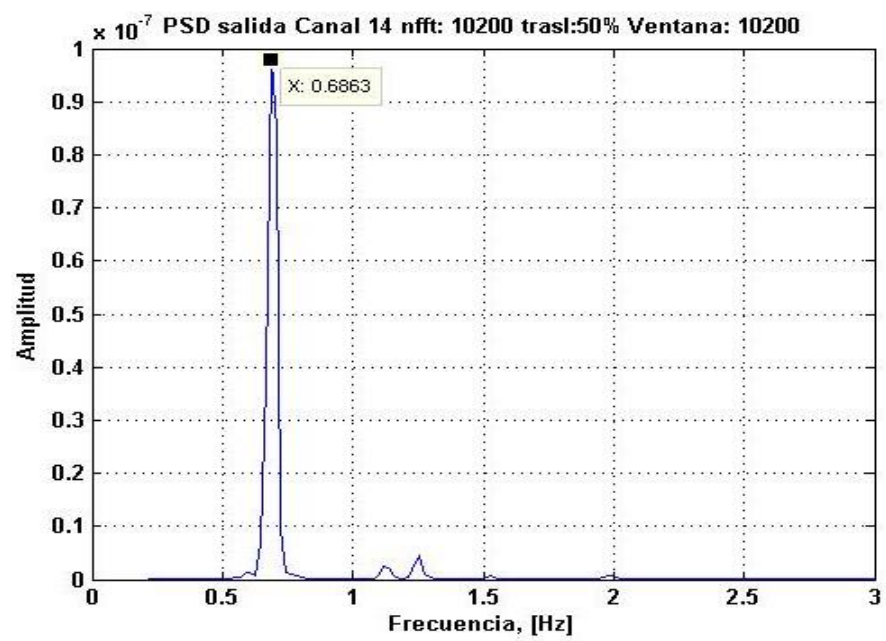
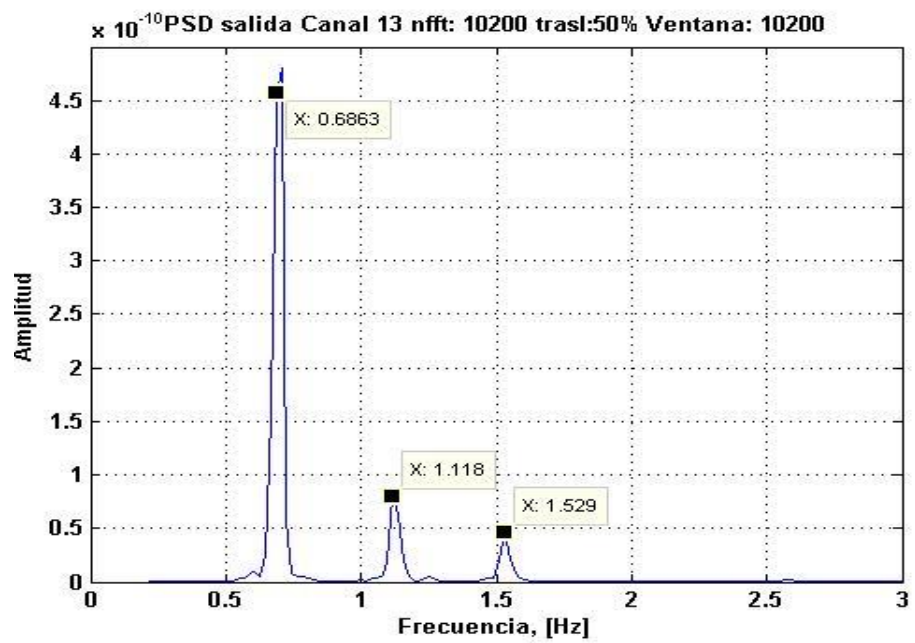












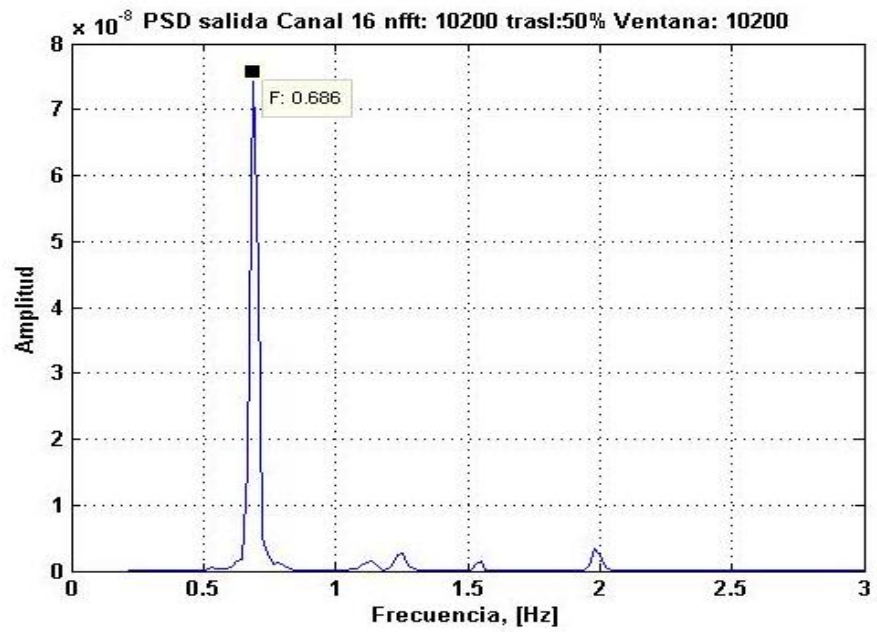
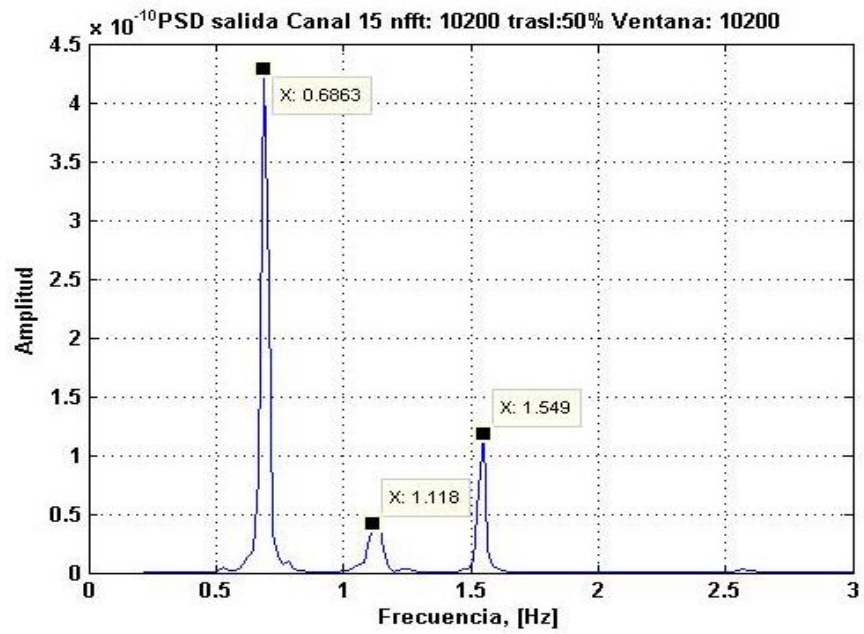


Figura B.6 Función de Densidad Espectral de Potencia Normalizada (NPSD)

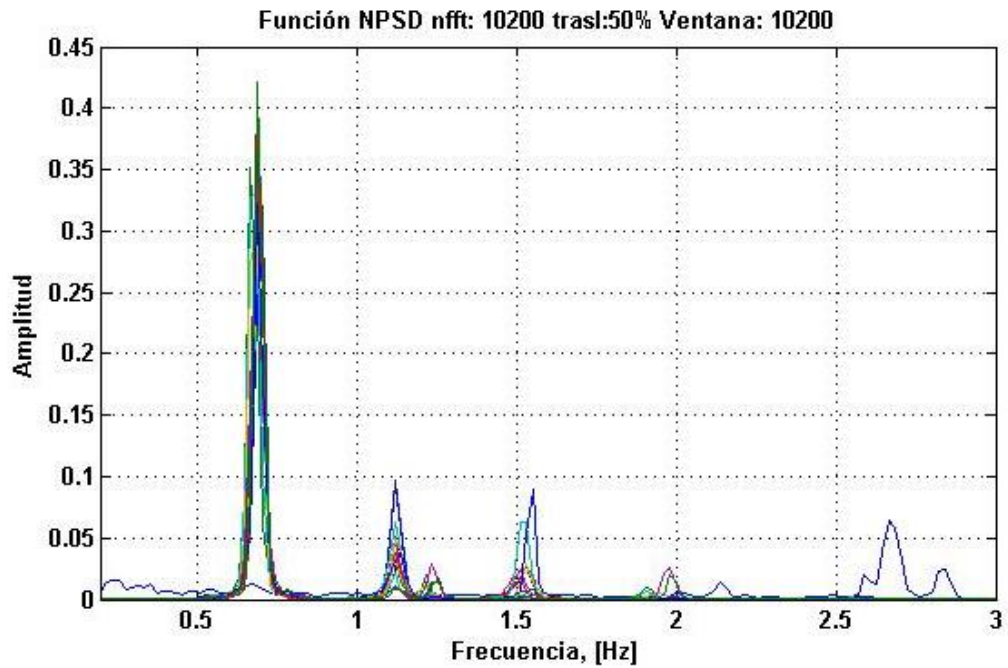


Figura B.7 Espectro Medio Normalizado (ANSP)

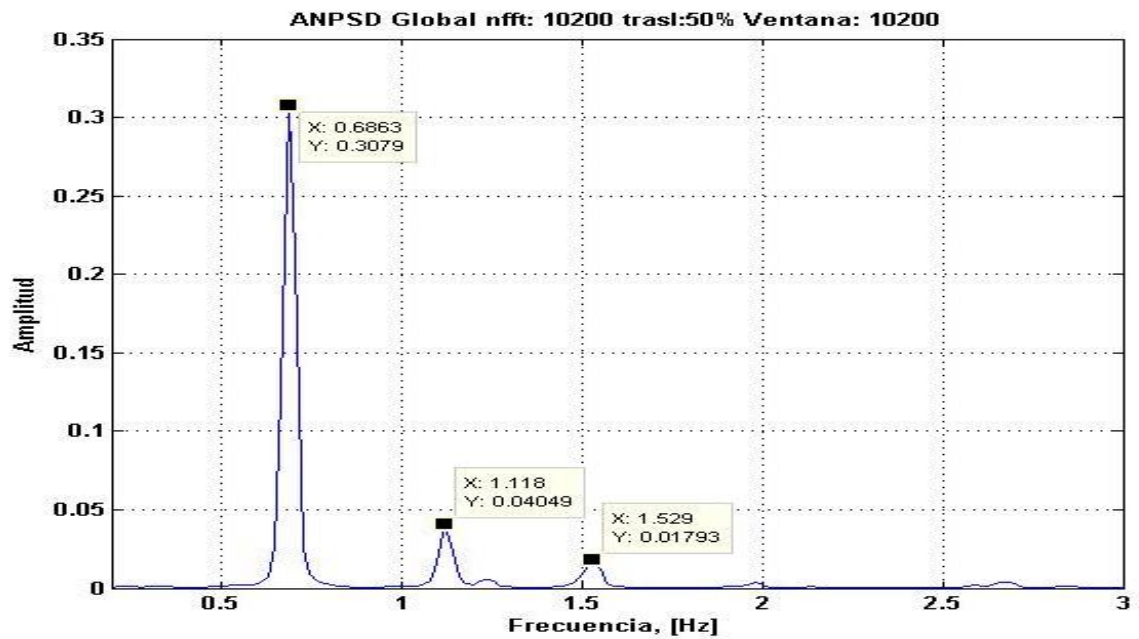


Figura B.8 Funciones De Coherencia Toma 1

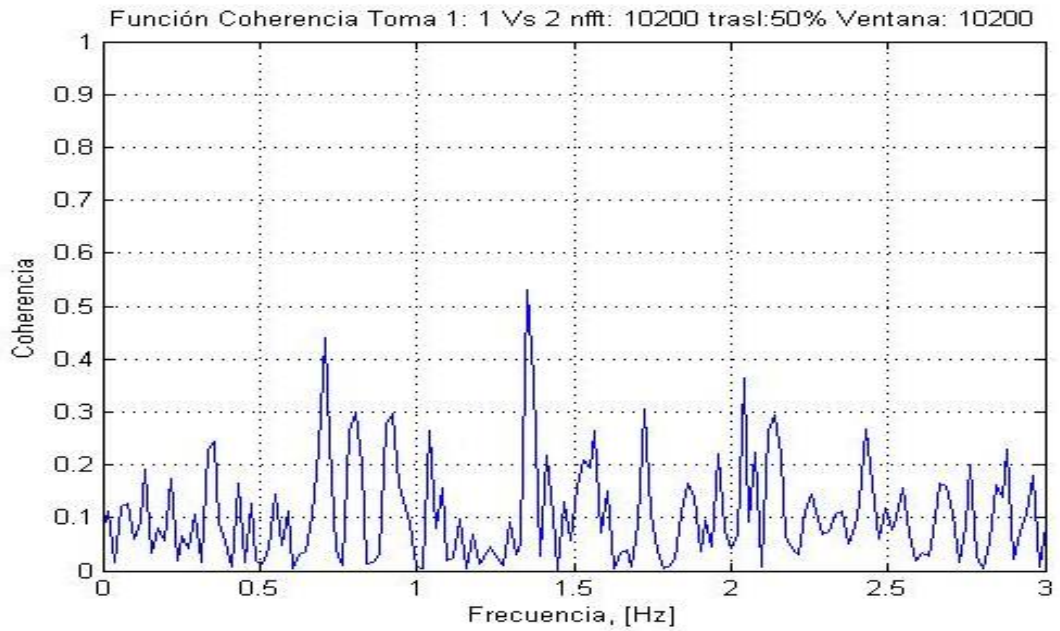


Figura B.9 Funciones De Coherencia Toma 2

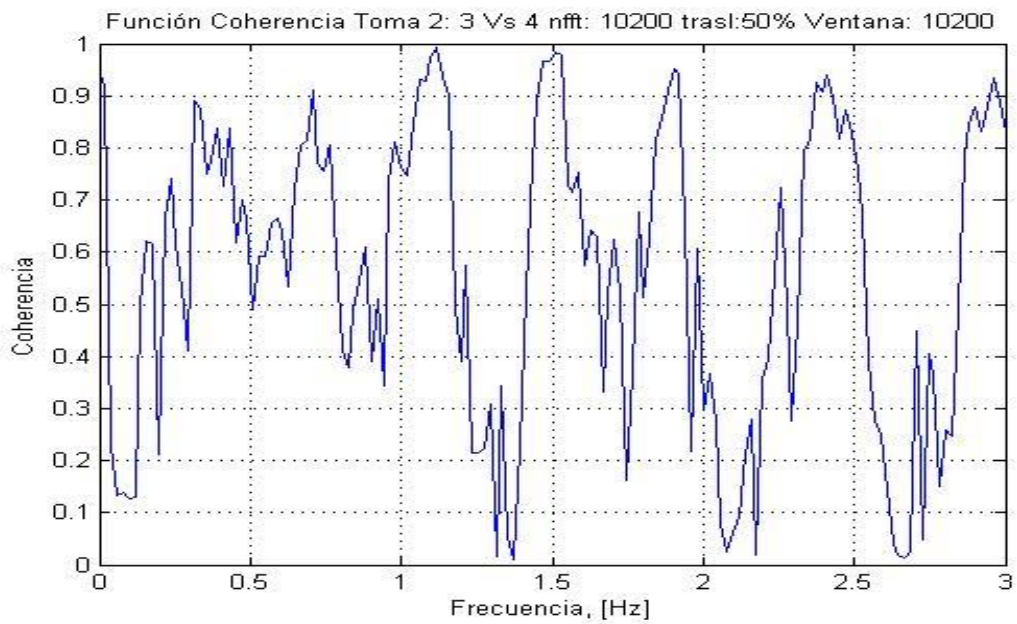


Figura B.10 Funciones De Coherencia Toma 3

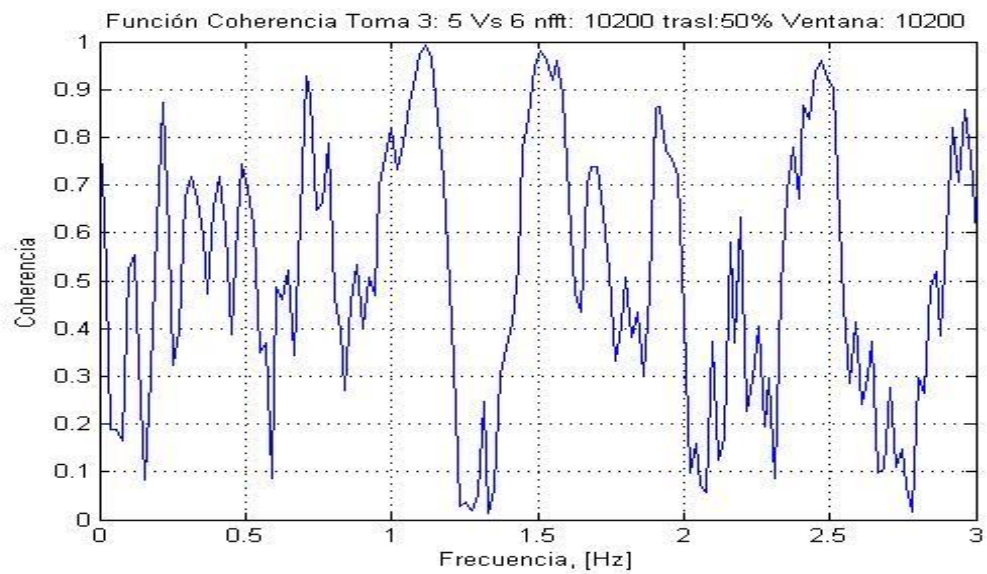


Figura B.11 Funciones De Coherencia Toma 4

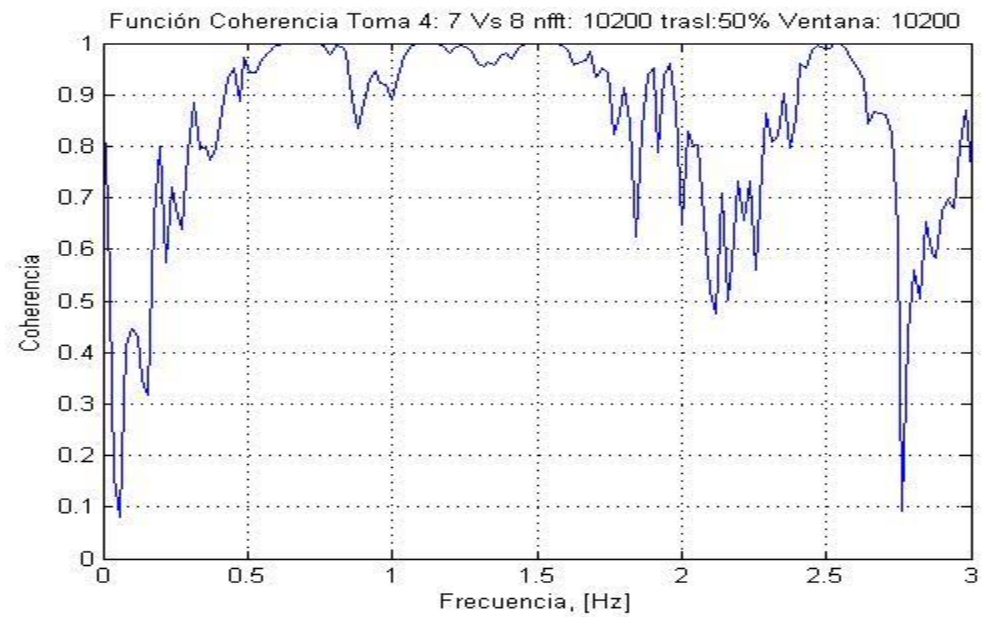


Figura B.12 Funciones De Coherencia Toma 5

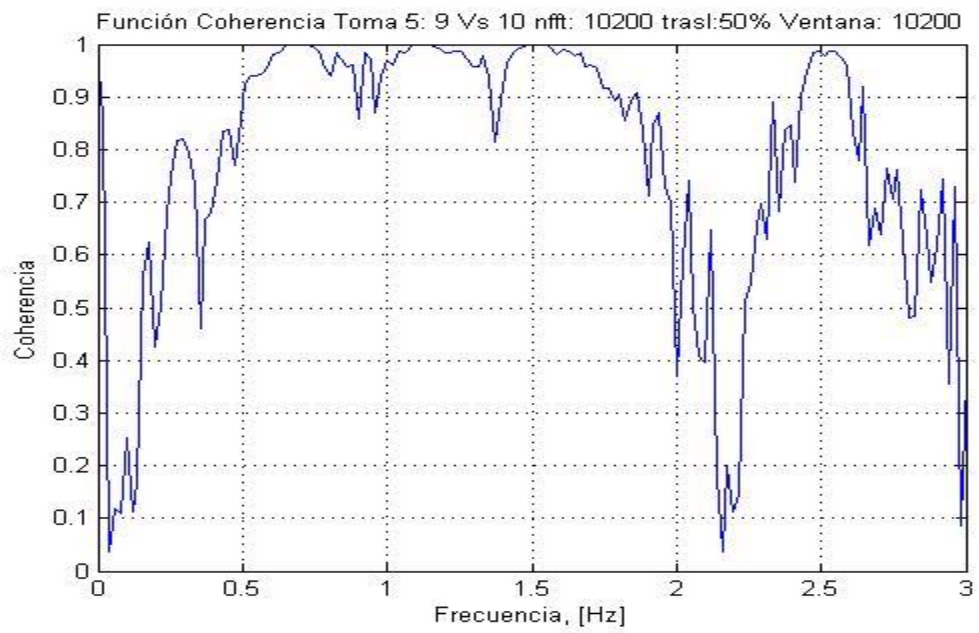


Figura B.13 Funciones De Coherencia Toma 6

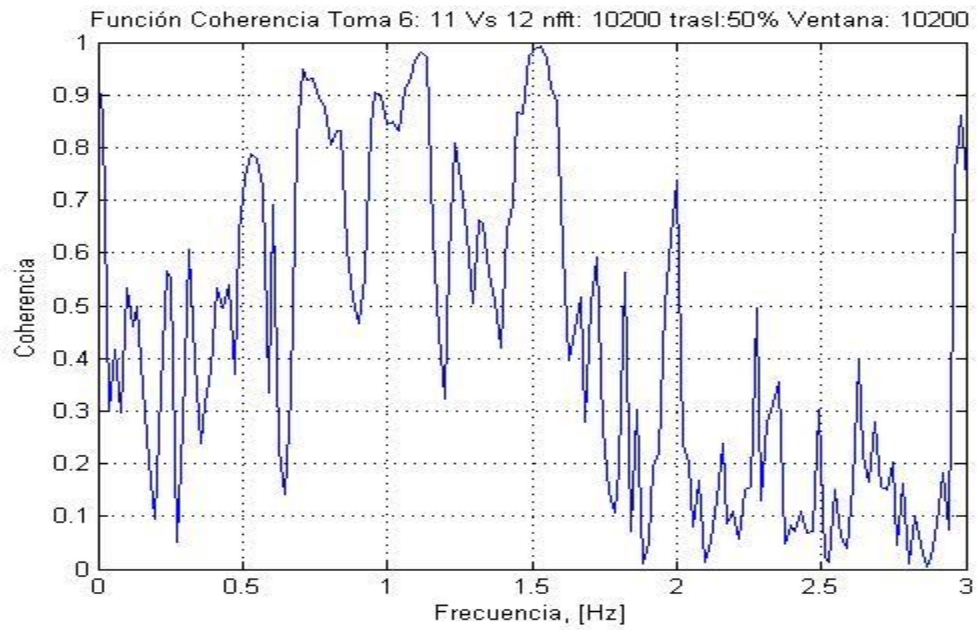


Figura B.14 Funciones De Coherencia Toma 7

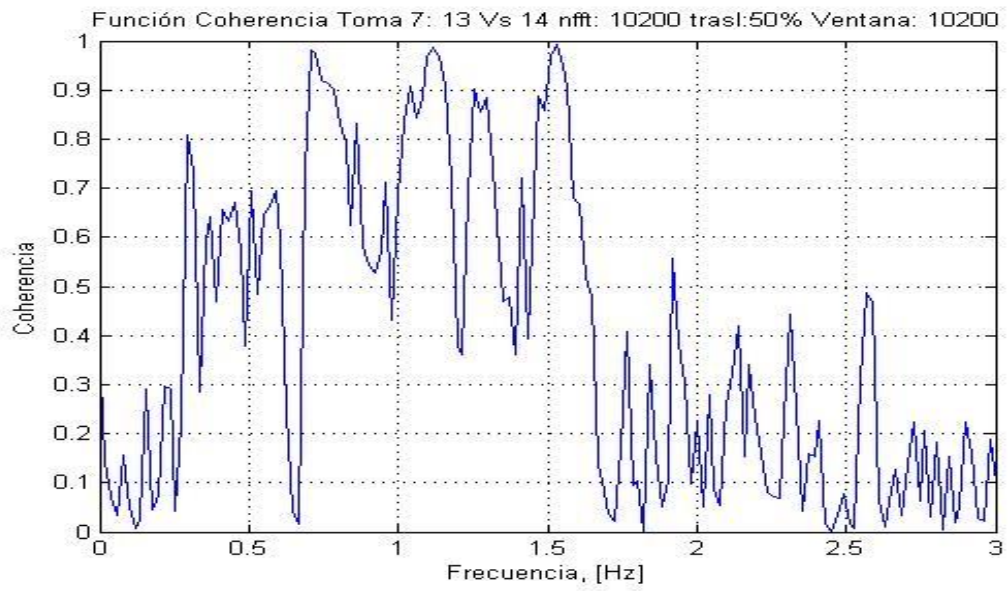
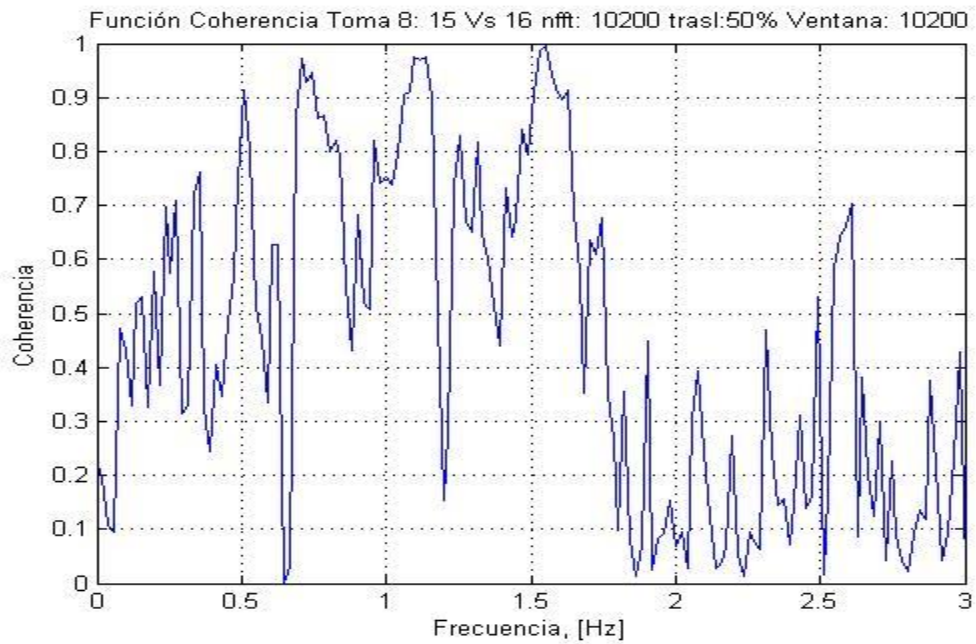


Figura B.15 Funciones De Coherencia Toma 8



ANEXO C

INFORMACIÓN CORRESPONDIENTE A LOS PLANOS DEL PUENTE GÓMEZ ORTIZ

Localización del puente Gómez Ortiz

Figura C1. Puente Gómez Ortiz y sus accesos planta general. ISAGEN

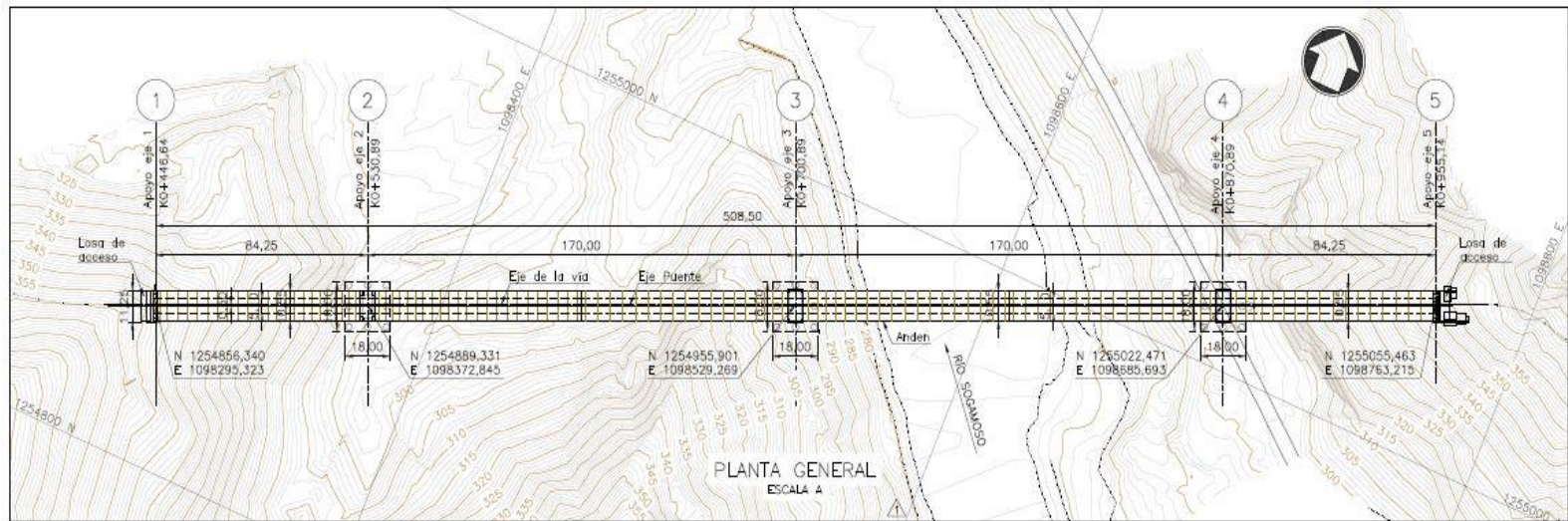


Figura C2. Puente Gómez Ortiz Sección Longitudinal. ISAGEN

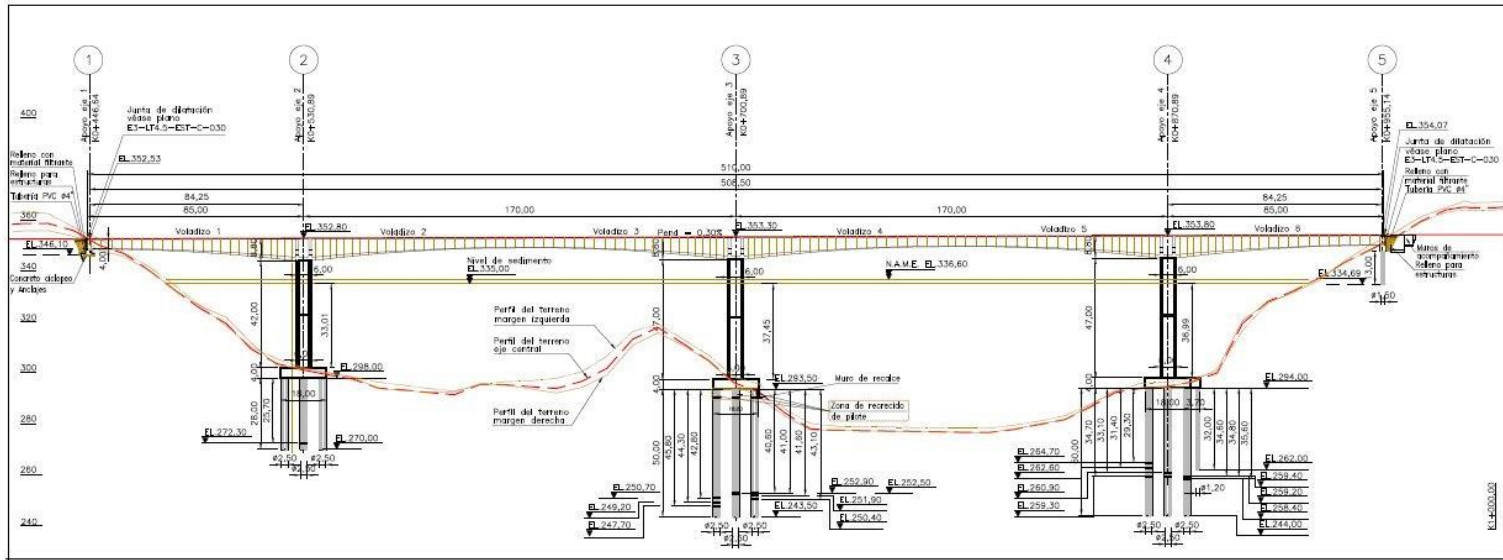


Figura C3. Puente Gómez Ortiz Variación Dovelas por Voladizos 1-6. ISAGEN

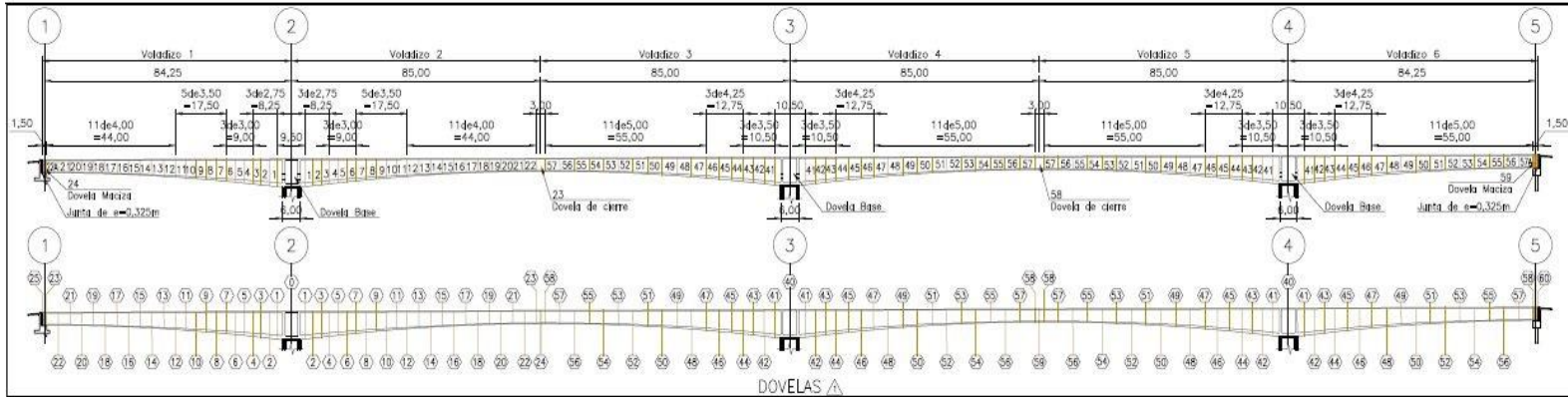


Figura C4. Puente Gómez Ortiz Variación Medidas Dovelas. ISAGEN

SECCIÓN	(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)	
H1	8,800	8,597	8,288	7,989	7,701	7,399	7,110	6,833	6,527	6,239	5,968	5,714	5,478	5,229	5,004	4,801	4,621	4,464	4,330	4,219	4,130	4,064	4,022	4,002	4,000	
H3	7,220	7,088	6,837	6,615	6,402	6,180	5,968	5,767	5,545	5,336	5,141	4,959	4,789	4,610	4,445	4,291	4,141	3,984	3,850	3,739	3,650	3,584	3,542	3,522	3,520	
H4	1,320	1,289	1,190	1,113	1,038	0,959	0,881	0,806	0,723	0,642	0,566	0,495	0,428	0,359	0,299	0,250	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	
H5	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	
H6	8,199	7,996	7,687	7,388	7,100	6,798	6,509	6,232	5,926	5,638	5,367	5,113	4,877	4,628	4,403	4,200	4,020	3,863	3,729	3,618	3,529	3,463	3,421	3,401	3,399	
H7	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	
B9	0,550	0,550	0,541	0,532	0,524	0,514	0,505	0,495	0,484	0,473	0,462	0,450	0,439	0,428	0,414	0,401	0,388	0,375	0,365	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	
B10	4,000	4,000	4,018	4,035	4,053	4,072	4,091	4,110	4,132	4,155	4,177	4,198	4,222	4,247	4,273	4,298	4,324	4,349	4,375	4,400	4,400	4,400	4,400	4,400	4,400	4,400
C2	0,326	0,326	0,326	0,326	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	0,324	0,324	0,324	0,324	0,324	0,323	0,323	0,323	0,323	0,322	0,322	0,322	0,322	0,322	0,322	0,322	
C3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,247	0,529	0,811	1,093	1,375	1,375	1,375	1,375	1,375	1,375	1,375	1,375	1,375	
C4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,049	0,108	0,162	0,219	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	

VARIABLES DOVELAS VOLADIZOS 1 Y 2 EJE PUENTE Δ															
SECCIÓN	(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
H1	8,800	8,540	8,150	7,778	7,423	7,016	6,630	6,279	5,963	5,644	5,229	4,851	4,708	4,501	4,330
H3	7,490	7,261	6,919	6,595	6,288	5,939	5,618	5,319	5,002	4,721	4,475	4,253	4,091	3,953	3,850
H4	1,050	1,019	0,921	0,823	0,875	0,817	0,758	0,700	0,632	0,563	0,494	0,426	0,357	0,289	0,220
H5	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700
H6	8,049	7,789	7,399	7,027	6,672	6,285	5,884	5,528	5,142	4,793	4,478	4,200	3,957	3,750	3,579
H7	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300
B9	0,550	0,550	0,538	0,528	0,514	0,499	0,485	0,470	0,453	0,436	0,419	0,402	0,384	0,367	0,350
B10	4,000	4,000	4,024	4,048	4,072	4,101	4,130	4,160	4,194	4,228	4,263	4,297	4,331	4,366	4,400
C2	0,476	0,476	0,476	0,476	0,475	0,475	0,474	0,474	0,473	0,473	0,473	0,472	0,472	0,437	0,402
C3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,275	0,550	0,825	1,100	1,375	
C4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,055	0,110	0,165	0,220	0,275	

VARIABLES DOVELAS VOLADIZOS 3, 4, 5 Y 6 - EJE PUENTE Δ															
SECCIÓN	(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
H1	8,800	8,540	8,150	7,778	7,423	7,016	6,630	6,279	5,963	5,644	5,229	4,851	4,708	4,501	4,330
H3	7,490	7,261	6,919	6,595	6,288	5,939	5,618	5,319	5,002	4,721	4,475	4,253	4,091	3,953	3,850
H4	1,050	1,019	0,921	0,823	0,875	0,817	0,758	0,700	0,632	0,563	0,494	0,426	0,357	0,289	0,220
H5	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700
H6	8,049	7,789	7,399	7,027	6,672	6,285	5,884	5,528	5,142	4,793	4,478	4,200	3,957	3,750	3,579
H7	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300
B9	0,550	0,550	0,538	0,528	0,514	0,499	0,485	0,470	0,453	0,436	0,419	0,402	0,384	0,367	0,350
B10	4,000	4,000	4,024	4,048	4,072	4,101	4,130	4,160	4,194	4,228	4,263	4,297	4,331	4,366	4,400
C2	0,476	0,476	0,476	0,476	0,475	0,475	0,474	0,474	0,473	0,473	0,473	0,472	0,472	0,437	0,402
C3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,275	0,550	0,825	1,100	1,375	
C4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,055	0,110	0,165	0,220	0,275	

Figura C5. Puente Gómez Ortiz Sección Dovela Maciza. ISAGEN

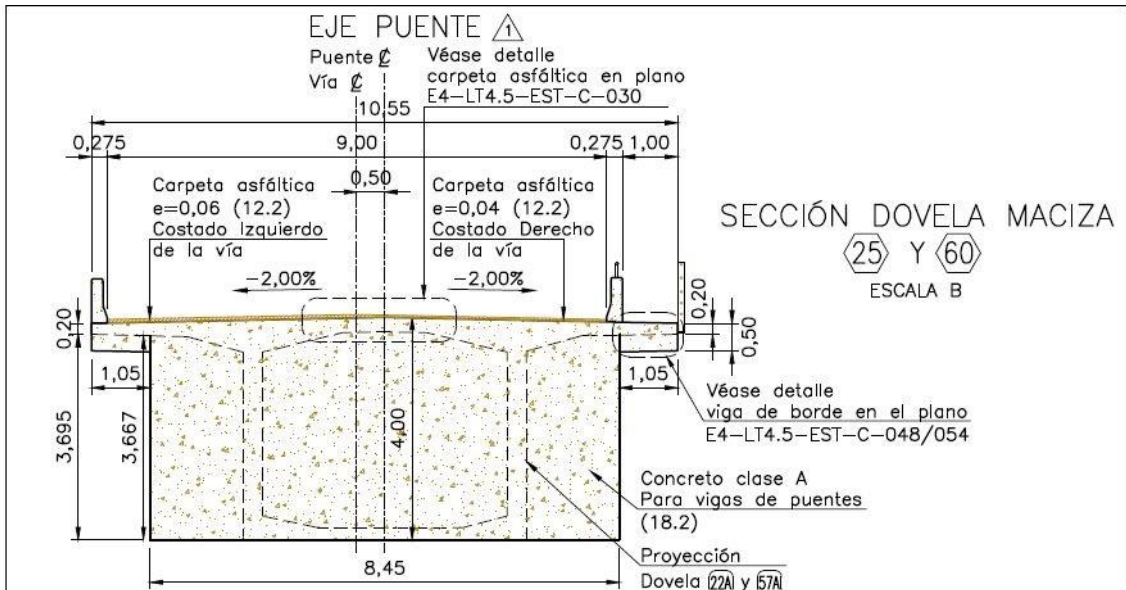


Figura C6. Puente Gómez Ortiz Sección Transversal Dovela Típica. ISAGEN

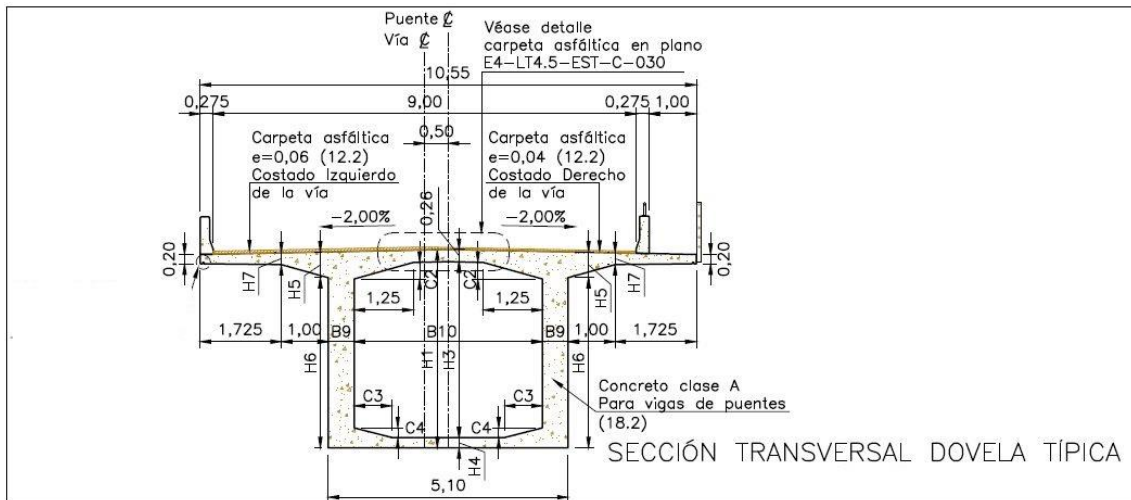


Figura C7. Puente Gómez Ortiz Columna eje 2 Dimensiones Cortes. ISAGEN

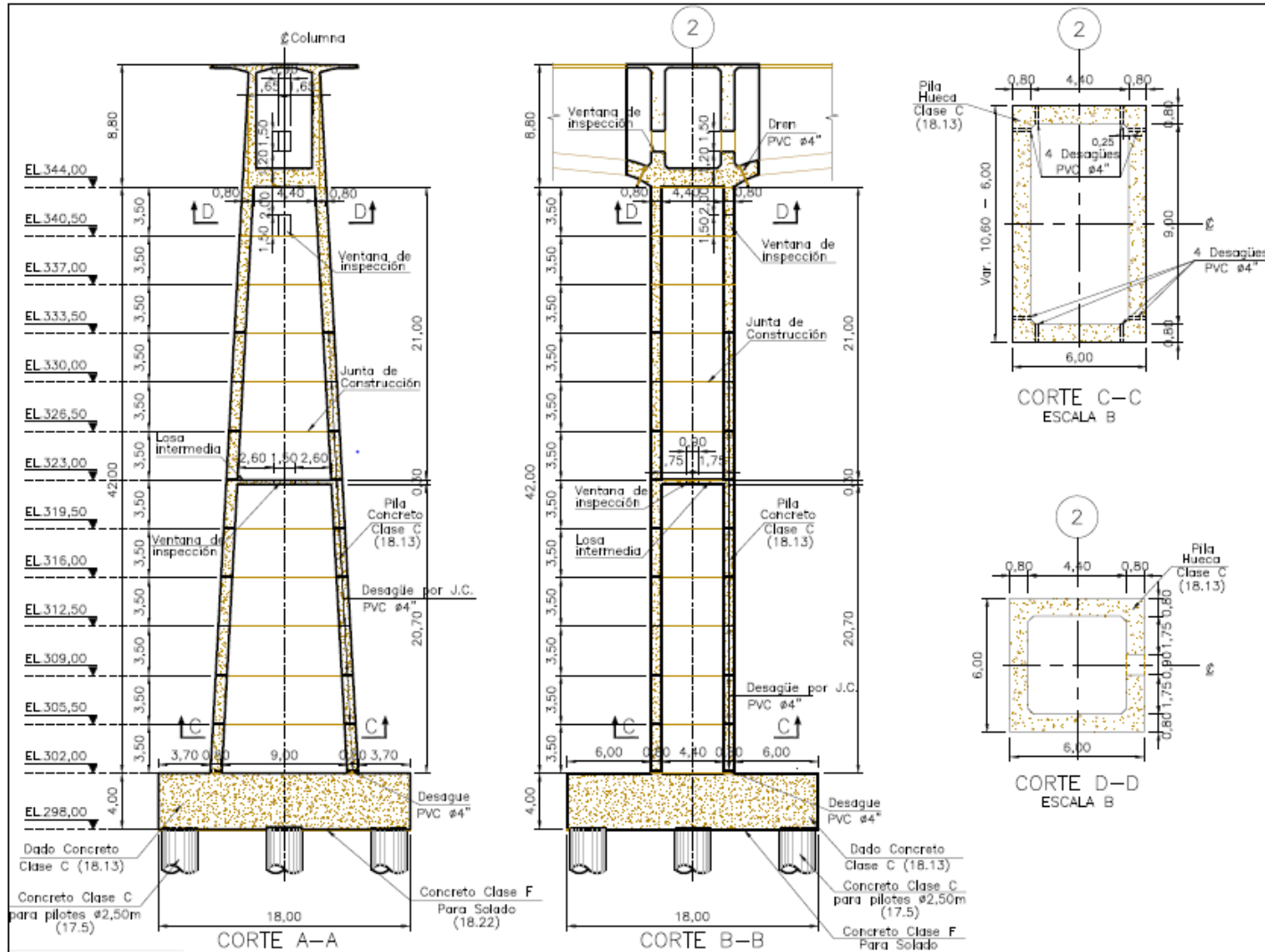


Figura C8. Puente Gómez Ortiz Columna eje 3 y 4 Dimensiones Cortes. ISAGEN

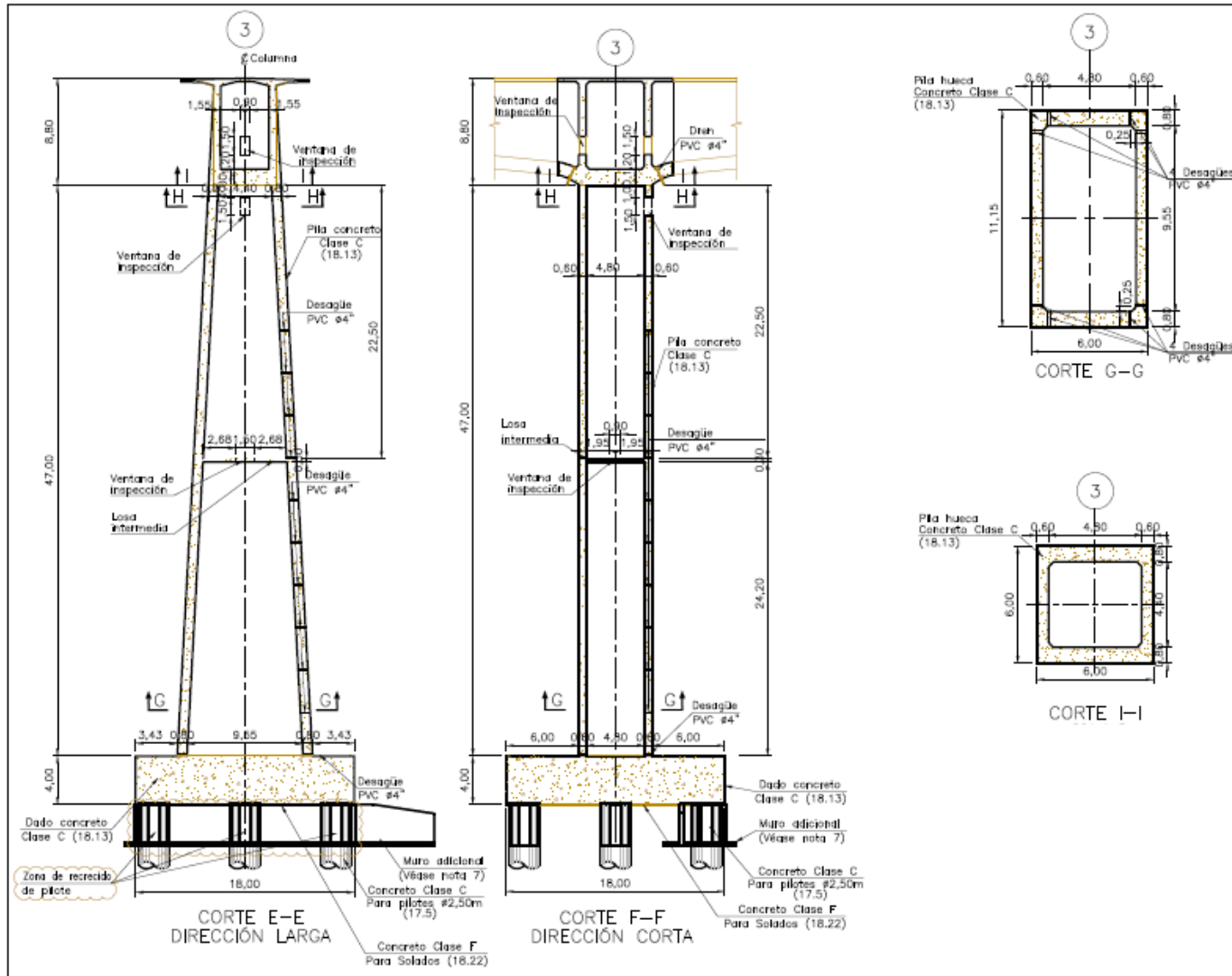


Figura C9. Puente Gómez Ortiz Condiciones de Frontera Corte Transversal. ISAGEN

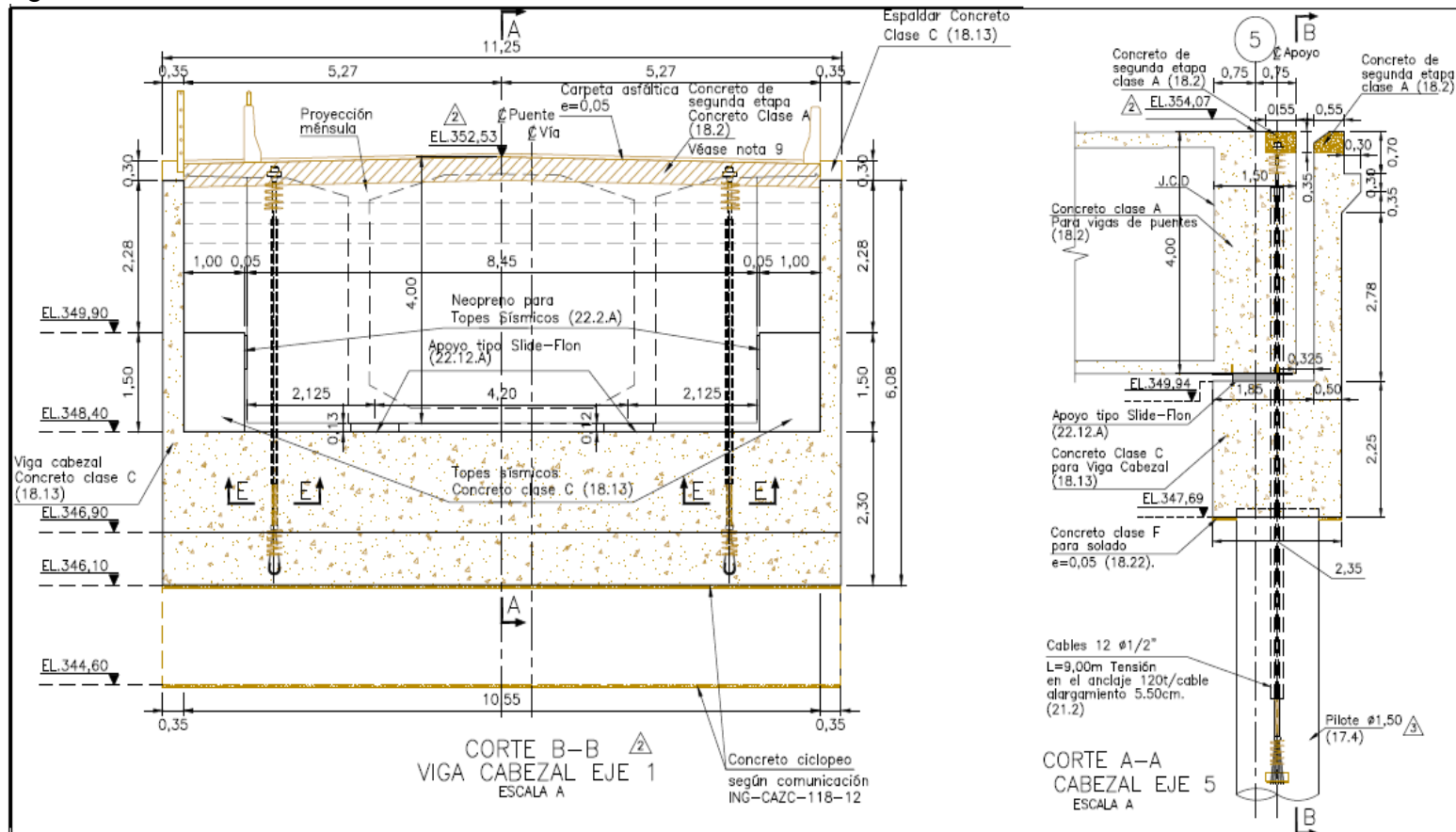


Figura C10. Puente Gómez Ortiz Condiciones de Frontera Planta. ISAGEN

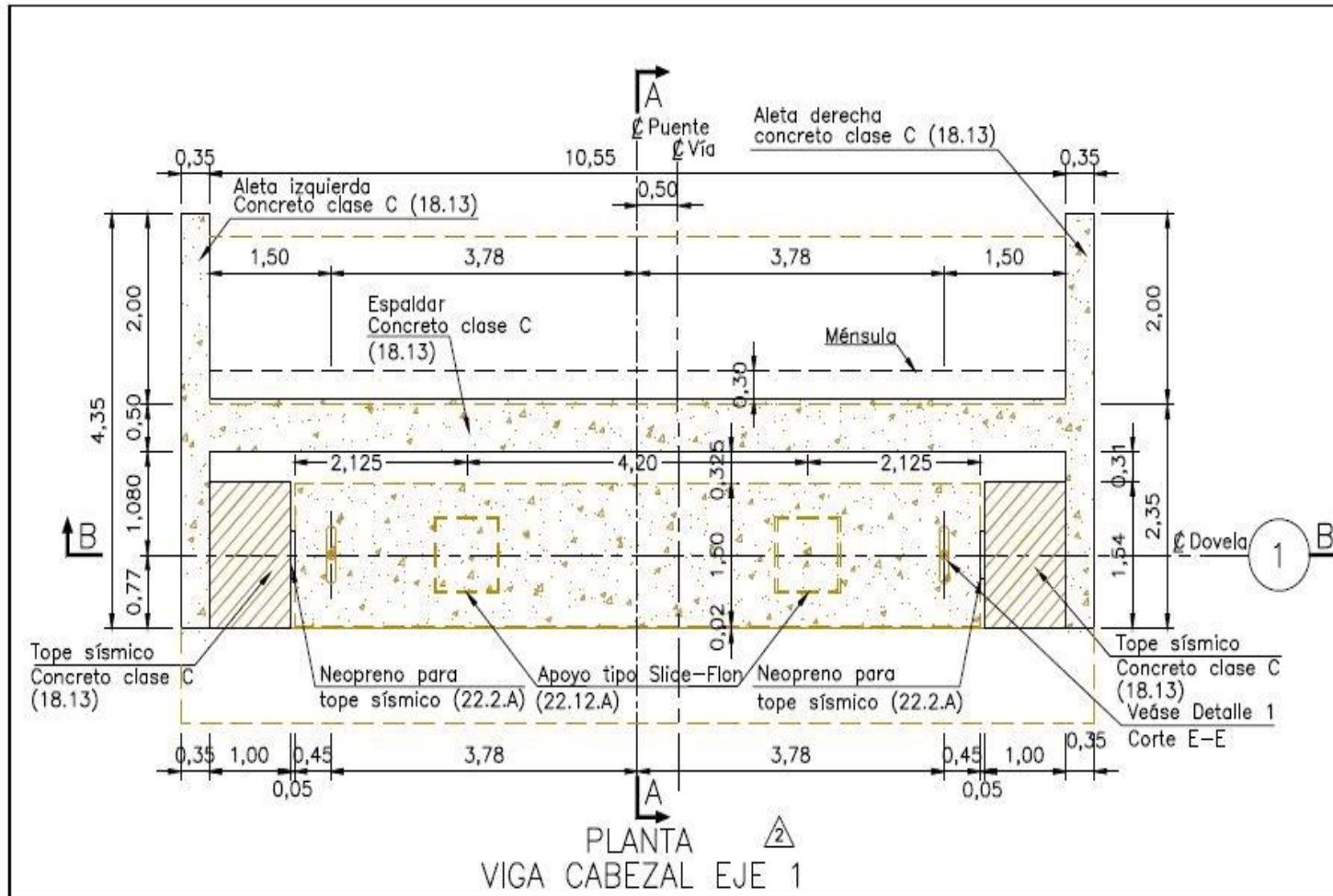


Figura C11. Puente Gómez Ortiz Especificaciones de Diseño y Construcción. ISAGEN

CANTIDADES DE OBRA			
INVIAS ARTICULO	ÍTEM DE PAGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
BARANDA			
650-07	23.1	Acero ASTM-A500C en perfilería para parales (Incluye accesorios)	5984 kg
650-07	23.2	Acero ASTM-A53B en tubería para travesaños (Incluye accesorios)	14083 kg
PARAPETO			
630-07	18.16	Concreto Clase D f'c=21MPa T.M.A.=19mm	180 m3
640-07	20.1	Acero de refuerzo fy=420MPa ASTM A-706 Gr 60	31006 kg
650-07	23.3	Acero ASTM-A53B en tubería para barandas (Incluye accesorios)	5062 kg
SUPERESTRUCTURA			
630-07	18.2	Concreto Clase A f'c 35MPa T.M.A.=19mm para vigas de puentes con dovelas	5876 m3
640-07	20.7	Acero de refuerzo fy=420MPa ASTM A-706 Gr 60	946073 kg
641-07	21.2	Acero de preesfuerzo ASTM A-416 Gr 270 fu=1860MPa Baja Relajación (Incluye accesorios)	3732414 ton-m
450-07	12.2	Mezcla densa en caliente tipo MDC-2, para capa de rodadura	230 m3
APOYOS			
642-07	22.4	* Apoyo para Viga Cajón Tipo FL-VSL o equivalente (Incluye accesorios)	4 u
642-07	22.2.A	Apoyo Elastomérico en Neopreno Reforzado Dureza 60 para topes sísmicos (50x50x5)	4 u
JUNTA DE DILATACIÓN			
642-07	22.P.1	* Junta de dilatación tipo FREYSSINET WP 550 o equivalente (Incluye accesorios)	21 m
SUBESTRUCTURA			
630-07	18.22	Concreto Clase F f'c=14MPa T.M.A.=12.5mm para solados de limpieza	47 m3
621-07	17.4	Pilote de concreto reforzado fundido in situ, de diámetro 1.50m en Concreto Clase D f'c=21MPa T.M.A.=25mm	39 m
621-07	17.5	Pilote de concreto reforzado fundido in situ, de diámetro 2.50m en Concreto Clase C f'c=28MPa T.M.A.=25mm	1024 m
630-07	18.13	Concreto Clase C f'c=28MPa T.M.A.=19mm para estribo, pilas, vigas cabezal, topes sísmicos, aletas y dados.	6700 m3
640-07	20.11	Acero de refuerzo fy=420MPa ASTM A-706 Gr 60 para pilotes	846635 kg
640-07	20.8	Acero de refuerzo fy=420MPa ASTM A-706 Gr 60 para estribo, pilas, viga cabezal, topes sísmicos, aletas y dados.	1146572 kg
600-07	13	Excavaciones varias sin clasificar	**
610-07	14.1	Rellenos para estructuras	**
610-07	14.2	Rellenos con material filtrante (Incluye Geotextil NT, Tubería para drenaje en PVC y Accesorios según planos)	45 m3
LOSA DE ACCESO			
630-07	18.19	Concreto Clase D f'c=21MPa T.M.A.=19mm	25 m3
640-07	20.4	Acero de refuerzo fy=420MPa ASTM A-706 Gr 60	3510 kg
MUROS DE CONTENCIÓN			
630-07	18.20	Concreto Clase D f'c=21MPa T.M.A.=19mm para muros de contención (Incluye junta de dilatación y junta de construcción)	14 m3
640-07	20.5	Acero de refuerzo fy=420MPa ASTM A-706 Gr 60	947 kg
**			
Las especificaciones y recomendaciones serán dadas por el proveedor y/o fabricante del producto. Las cantidades de excavación y rellenos serán presentadas en los planos de Geotécnia.			

ANEXO D

CÓDIGO DE MATLAB PARA PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES DE OBTENIDAS DEL ENSAYO DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

%% CARGAR DATOS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

```
clc, clear all, close all  
S=xlsread('SeñalesGO_X.xls');
```

```
sens=5; %Sensibilidad del equipo [Voltios/g]  
y=S./sens;%Vector aceleraciones
```

%% CORRECCION LÍNEA BASE

```
for ii=1:16  
    y(:,ii)=detrend(y(:,ii));
```

```
end
```

%%DATOS REGISTROS

```
fm=200; %Frecuencia de muestreo [Hz]  
t=0:1/fm:(length(y)-1)/fm; %Vector tiempo [s]  
% 3.0 GRÁFICO DE REGISTRO  
plot(t,y)  
grid on  
xlabel('Tiempo [s]')  
ylabel('Amplitud [g]')
```

%% FILTRO DE SEÑALES

% Filtro digital pasabanda (Bandpass)

```
Fc1 = 0.2;           %Frecuencia de corte inferior en Hz  
Fc2 = 3;            %Frecuencia de corte superior en Hz  
den = fm/2;         %Frecuencia de muestreo dividida 2 (Nyquist)  
fbp = [Fc1/den Fc2/den];  
[B,A]=butter(2,fbp,'bandpass'); % Frecuencia de corte Wn  
y_fil = filtfilt(B,A,y);  
% sis = tf(B,A);  
% bode(sis)
```

```

figure(3)
plot(t,y_fil), grid on
ylabel('Amplitud [g]')
xlabel('Tiempo, [s]')

```

%% FUNCIONES DE DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA (PSD)

```

for k=1:16;
    anchoventana=round(length(y_fil)/5);

[H1,fh1]=cpsd(y_fil(:,k),y_fil(:,k),hamming(anchoventana),anchoventana/2,anchoventana,fm);
    %[Pxy,F]=cpsd(x,y>window,noverlap,nfft,fs)

    warning off
    % Recorte (Acotando para las frecuencias de interes [Hz])
    f_lim_1 = 0.2;           %Menor a la frecuencia mas baja de la Est. [Hz]
    f_lim_2 = 3;            %Mayor a la frecuencia mas alta de la Est. [Hz]
    P = find(fh1 >= f_lim_1,1,'first');
    Q = find(fh1 <= f_lim_2,1,'last');
    figure
    plot(fh1(P:Q),abs(H1(P:Q)))
    title(['PSD salida Canal ',num2str(k),' nfft: ',num2str(anchoventana), ' trasl:50% Ventana: ',num2str(anchoventana)])
    ylabel('Amplitud')
    xlabel('Frecuencia, [Hz]')
    grid on

    for i=1:length(H1)
        PSD(i,k)=H1(i,1);
    end
end

```

%% FUNCIÓN DE DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA NORMALIZADA (NPSD)

```

SUM=sum(PSD);
for kk=1:16;
    for j=1:length(PSD)
        NPSD(j,kk)=PSD(j,kk)./SUM(1,kk);
    end
    warning off
    plot(fh1,abs(NPSD))

```

```

    title (['Función NPSD', ' nfft: ', num2str(anchoventana), ' trasi:50% Ventana: ', num2str(anchoventana)])
    ylabel('Amplitud')
    xlabel('Frecuencia, [Hz]')
    xlim([0.2 3]) %Rango de frecuencias de interés
    grid on
end

```

%% FUNCIÓN ESPECTRO MEDIO NORMALIZADO (ANPSD)

```

GDL=16; %Grados de libertad medidos (número de registros)
ANPSD=(1/GDL)*(sum(NPSD,2));

```

```

plot(fh1,abs(ANPSD))
title (['ANPSD Global', ' nfft: ', num2str(anchoventana), ' trasi:50% Ventana: ', num2str(anchoventana)])
ylabel('Amplitud')
xlabel('Frecuencia, [Hz]')
xlim([0.2 3])
grid on

```

%% FUNCIONES DE COHERENCIA

```

% TOMA 1

```

```

for a=1:2;

```

```

[H2,fh2]=mscohere(y(:,1),y(:,a),hamming(anchoventana),anchoventana/2,anchoventana,fm);

```

```

    %[Cxy,F] = mscohere(x,y>window,noverlap,nfft,fs)
    warning off
    figure
    plot(fh2,abs(H2))
    title (['Función Coherencia Toma 1: 1 Vs ', num2str(a), ' nfft: ', num2str(anchoventana), ' trasi:50% Ventana: ', num2str(anchoventana)])
    ylabel('Coherencia')
    xlabel('Frecuencia, [Hz]')
    axis ([0 3 0 1])
    grid on
end

```

```

%% TOMA 2

```

```

for b=3:4;

```

```

[H3,fh3]=mscohere(y(:,3),y(:,b),hamming(anchoventana),anchoventana/2,anchoventana,fm);

```

```

    %[Cxy,F] = mscohere(x,y>window,noverlap,nfft,fs)

```

```

warning off
figure
plot(fh3,abs(H3))
title (['Función Coherencia Toma 2: 3 Vs ',num2str(b),' nfft:
',num2str(anchoventana), ' trasl:50% Ventana: ',num2str(anchoventana)])
ylabel('Coherencia')
xlabel('Frecuencia, [Hz]')
axis ([0 3 0 1])
grid on
end
%% TOMA 3
for c=5:6;

[H4,fh4]=mscohere(y(:,5),y(:,c),hamming(anchoventana),anchoventana/2,anchove
ntana,fn);
    %[Cxy,F] = mscohere(x,y>window,noverlap,nfft,fs)
warning off
figure
plot(fh4,abs(H4))
title (['Función Coherencia Toma 3: 5 Vs ',num2str(c),' nfft:
',num2str(anchoventana), ' trasl:50% Ventana: ',num2str(anchoventana)])
ylabel('Coherencia')
xlabel('Frecuencia, [Hz]')
axis ([0 3 0 1])
grid on
end
%% TOMA 4
for d=7:8;

[H5,fh5]=mscohere(y(:,7),y(:,d),hamming(anchoventana),anchoventana/2,anchove
ntana,fn);
    %[Cxy,F] = mscohere(x,y>window,noverlap,nfft,fs)
warning off
figure
plot(fh5,abs(H5))
title (['Función Coherencia Toma 4: 7 Vs ',num2str(d),' nfft:
',num2str(anchoventana), ' trasl:50% Ventana: ',num2str(anchoventana)])
ylabel('Coherencia')
xlabel('Frecuencia, [Hz]')
axis ([0 3 0 1])
grid on
end

% TOMA 5
for e=9:10;

```

```

[H6,fh6]=mscohere(y(:,9),y(:,e),hamming(anchoventana),anchoventana/2,anchoventana,fm);
    %[Cxy,F] = mscohere(x,y>window,noverlap,nfft,fs)
    warning off
    figure
    plot(fh6,abs(H6))
    title (['Función Coherencia Toma 5: 9 Vs ',num2str(e),' nfft: ',num2str(anchoventana), ' trasl:50% Ventana: ',num2str(anchoventana)])
    ylabel('Coherencia')
    xlabel('Frecuencia, [Hz]')
    axis ([0 3 0 1])
    grid on
end
% TOMA 6
for e=11:12;

```

```

[H6,fh6]=mscohere(y(:,11),y(:,e),hamming(anchoventana),anchoventana/2,anchoventana,fm);
    %[Cxy,F] = mscohere(x,y>window,noverlap,nfft,fs)
    warning off
    figure
    plot(fh6,abs(H6))
    title (['Función Coherencia Toma 6: 11 Vs ',num2str(e),' nfft: ',num2str(anchoventana), ' trasl:50% Ventana: ',num2str(anchoventana)])
    ylabel('Coherencia')
    xlabel('Frecuencia, [Hz]')
    axis ([0 3 0 1])
    grid on
end
% TOMA 7
for e=13:14;

```

```

[H6,fh6]=mscohere(y(:,13),y(:,e),hamming(anchoventana),anchoventana/2,anchoventana,fm);
    %[Cxy,F] = mscohere(x,y>window,noverlap,nfft,fs)
    warning off
    figure
    plot(fh6,abs(H6))
    title (['Función Coherencia Toma 7: 13 Vs ',num2str(e),' nfft: ',num2str(anchoventana), ' trasl:50% Ventana: ',num2str(anchoventana)])
    ylabel('Coherencia')
    xlabel('Frecuencia, [Hz]')
    axis ([0 3 0 1])
    grid on

```

```

end
%TOMA 8
for e=15:16;

[H6,fh6]=mscohere(y(:,15),y(:,e),hamming(anchoventana),anchoventana/2,anchoventana,fm);
    %[Cxy,F] = mscohere(x,y>window,noverlap,nfft,fs)
    warning off
    figure
    plot(fh6,abs(H6))
    title (['Función Coherencia Toma 8: 15 Vs ',num2str(e),' nfft: ',num2str(anchoventana), ' trasl:50% Ventana: ',num2str(anchoventana)])
    ylabel('Coherencia')
    xlabel('Frecuencia, [Hz]')
    axis ([0 3 0 1])
    grid on
end

```

ANEXO E

CÁLCULOS NECESARIOS PARA LA REALIZACIÓN DEL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS EN EL SOFTWARE MIDAS CIVIL

La información correspondiente a las dimensiones de la estructura, propiedades de los materiales, condiciones de frontera y asignación de cargas al modelo se obtuvo de los planos constructivos del puente diseñado por INGETEC Ingeniería y diseño S.A. y que fueron facilitados por la Secretaría de Infraestructura de Santander.

- Tabla 1. Definición de las propiedades de los materiales a utilizar en el Pilas.

CONCRETO PARA PILAS		
Propiedad	Valor	Especificación
F'c [Mpa]	28	Ver figura A11 Anexo C
Módulo de Poisson	0,2	NSR-10 Título C -CR8.5
E [Mpa]	20.673	Fórmula NSR-10 CR8.5.1 Código de puentes Tabla
Peso Unitario[KN/m3]	22,7	3.5.1-1
Coefficiente de amortiguamiento	0,05	NRS-10 Título A A-2.6.1

Tabla 2. Definición de las propiedades de los materiales a utilizar en las Tablero.

CONCRETO PARA TABLERO		
Propiedad	Valor	Especificación
F'c [Mpa]	35	Ver figura A11 Anexo C
Módulo de Poisson	0,2	NSR-10 Título C -CR8.5
E [Mpa]	22.925	Ver figura A11 Anexo C Código de puentes Tabla
Peso Unitario[KN/m3]	22,7	3.5.1-1
Coefficiente de amortiguamiento	0,05	NRS-10 Título A A-2.6.1

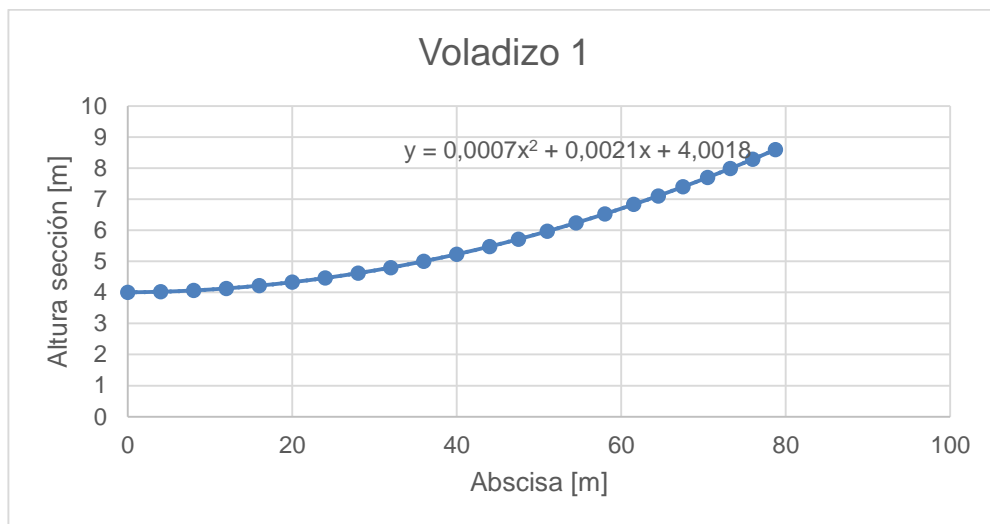
- Conversión de las dimensiones de dovelas a dimensiones requeridas por el software Midas Civil. Ver Anexo C Figura A.4.

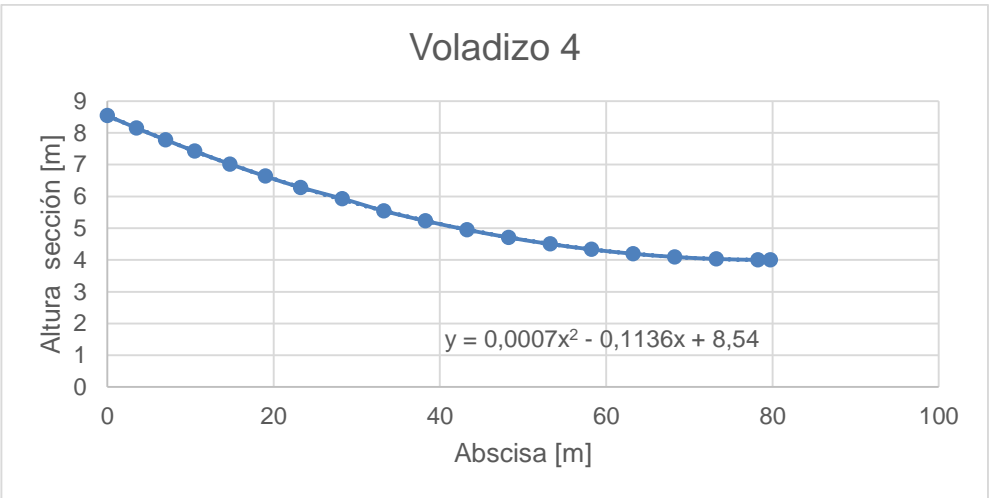
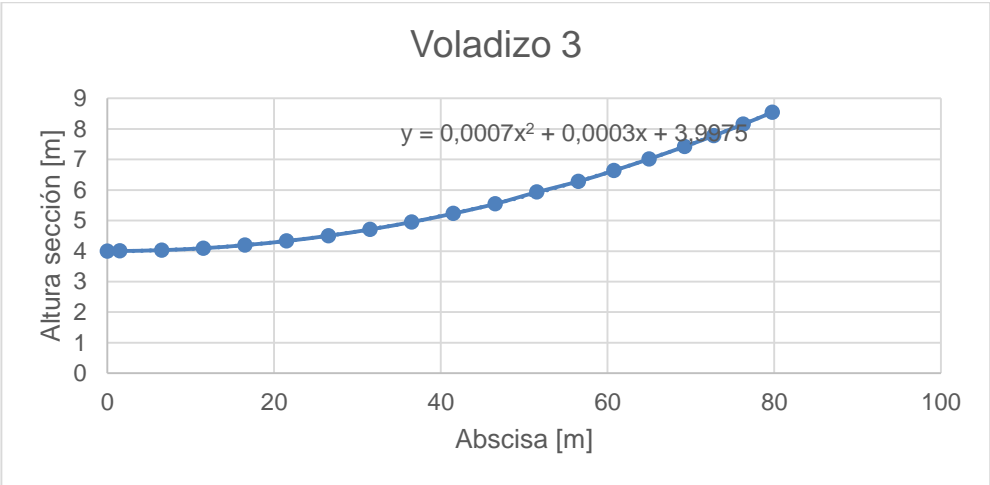
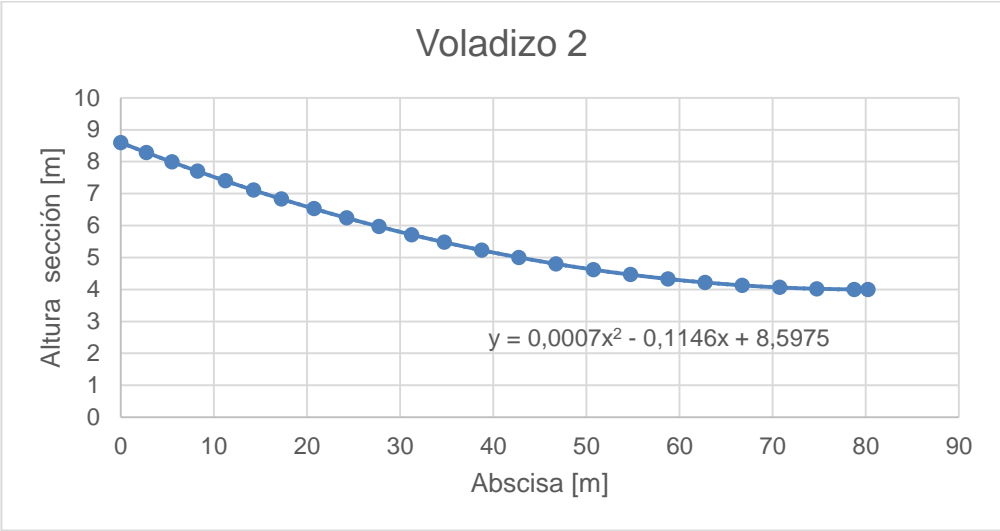
Tabla 3. Medidas ingresadas secciones transversales de las dovelas

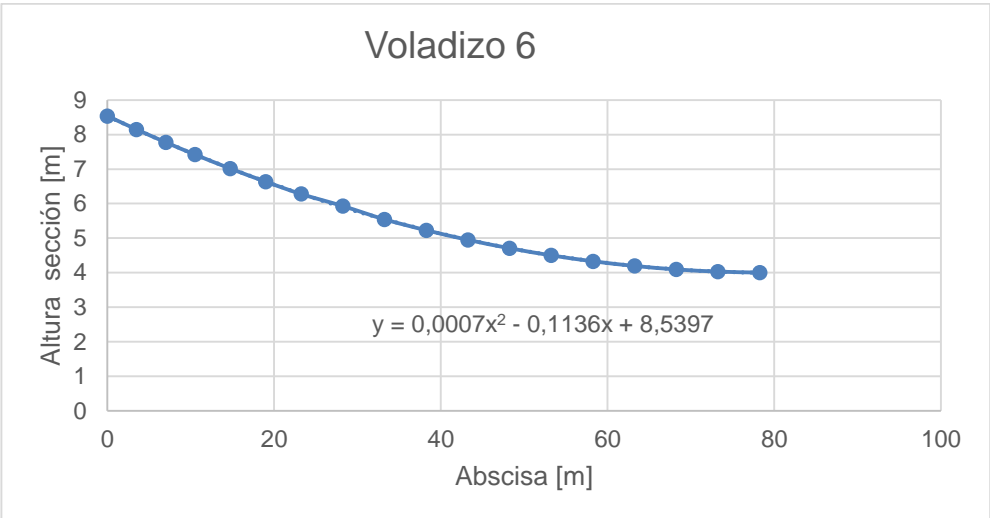
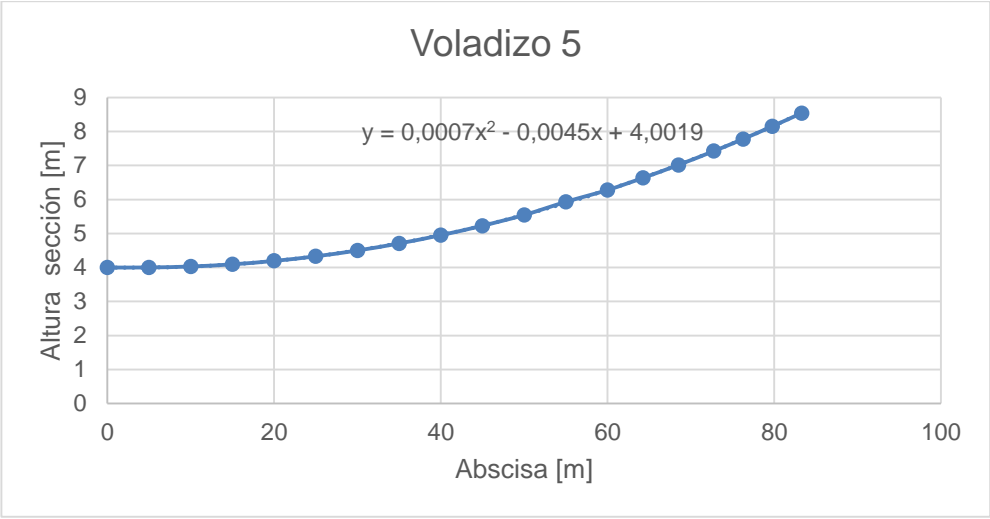
Dimensión	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
HO1	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
HO2	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350
HO2-2	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
HO3	8.199	7.996	7.687	7.388	7.100	6.798	6.509	6.232	5.926	5.638	5.367	5.113	4.877	4.628	4.403	4.200	4.020	3.863	3.729	3.618	3.529	3.463	3.421
BO1	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725
BO1-2	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725
BO2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
BO3	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550
HI1	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260
HI2	0.326	0.320	0.326	0.326	0.325	0.325	0.325	0.325	0.325	0.324	0.324	0.324	0.324	0.324	0.323	0.323	0.323	0.323	0.322	0.322	0.322	0.322	0.322
HI2-2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
HI3	6.894	6.748	6.511	6.289	6.077	5.855	5.643	5.442	5.200	5.012	4.817	4.635	4.416	4.180	3.960	3.749	3.543	3.356	3.253	3.142	3.053	2.987	2.945
HI4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.049	0.106	0.162	0.219	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275
HI4-2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
HI5	1.320	1.269	1.190	1.113	1.038	0.959	0.881	0.806	0.723	0.642	0.566	0.495	0.428	0.359	0.299	0.250	0.220	0.220	0.220	0.220	0.220	0.220	0.220
BI1	2.000	2.000	2.009	2.018	2.027	2.036	2.046	2.055	2.066	2.078	2.089	2.100	2.111	2.124	2.137	2.149	2.162	2.175	2.188	2.200	2.200	2.200	2.200
BI1-2	0.750	0.750	0.759	0.768	0.777	0.786	0.796	0.805	0.816	0.828	0.839	0.850	0.861	0.874	0.887	0.899	0.912	0.925	0.938	0.950	0.950	0.950	0.950
BI3	2.000	2.000	2.009	2.018	2.027	2.036	2.046	2.055	2.066	2.078	2.089	2.100	2.111	2.124	2.137	2.149	2.162	2.175	2.188	2.200	2.200	2.200	2.200
BI3-2	2.000	2.000	2.009	2.017	2.026	2.036	2.045	2.055	2.066	2.077	2.088	2.099	1.864	1.595	1.326	1.056	0.787	0.800	0.813	0.825	0.825	0.825	0.825
Dimensión	23	24	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	
HO1	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
HO2	0.350	0.350	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
HO2-2	0.050	0.050	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
HO3	3.401	3.399	8.049	7.789	7.399	7.027	6.672	6.265	5.884	5.528	5.142	4.793	4.478	4.200	3.957	3.750	3.579	3.478	3.414	3.384	3.390	3.399	3.399
BO1	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725
BO1-2	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725	1.725
BO2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
BO3	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550	2.550
HI1	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260
HI2	0.322	0.322	0.476	0.476	0.476	0.476	0.475	0.475	0.475	0.474	0.474	0.474	0.473	0.473	0.473	0.472	0.472	0.472	0.472	0.472	0.472	0.472	0.472
HI2-2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
HI3	2.925	2.923	7.014	6.785	6.443	6.119	5.813	5.464	5.141	4.845	4.528	4.247	3.947	3.682	3.453	3.261	3.103	3.002	2.937	2.908	2.915	2.923	2.923
HI4	0.275	0.275	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
HI4-2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
HI5	0.220	0.220	1.050	1.019	0.971	0.923	0.875	0.817	0.758	0.700	0.632	0.563	0.494	0.426	0.357	0.289	0.220	0.220	0.220	0.220	0.220	0.220	0.220
BI1	2.200	2.200	2.000	2.000	2.012	2.024	2.036	2.051	2.150	2.080	2.097	2.114	2.132	2.149	2.166	2.183	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200
BI1-2	0.950	0.950	0.750	0.750	0.762	0.774	0.786	0.801	0.900	0.830	0.847	0.864	0.882	0.899	0.916	0.933	0.950	0.950	0.950	0.950	0.950	0.950	0.950
BI3	2.200	2.200	2.000	2.000	2.012	2.024	2.036	2.051	2.150	2.080	2.097	2.114	2.132	2.149	2.166	2.183	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200
BI3-2	0.825	0.825	2.000	2.000	2.012	2.024	2.036	2.050	2.150	2.080	2.097	2.114	1.857	1.599	1.881	1.082	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825

- Cálculo regresión polinómica obteniendo como resultado una curva de orden dos para la variación de las dovelas de los seis voladizos.

Figura E.1 Regresión polinómica Voladizo [1-6]







- Cálculo de las cargas sobreimpuestas.

Tabla3. Cargas Sobreimpuestas

ARTÍCULO INVIAS	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	ESPECIFICACIONES	DENSIDAD	DISTANCIA EJE PUENTE		CARGA	MOMENTO				
BARANDA							0.387	KN*m	2.042	KN*m/m		
650-07	Acero ASTM A-500C en perfilera para parales (incluye accesorios)	5984	kg		5.275	m	0.115	KN*m	0.609	KN*m/m		
650-07	para travesaños (incluye accesorios)- Artículo INVIAS 650-07	14083	Kg		5.275	m	0.272	KN*m	1.433	KN*m/m		
PARAPETO							8.731	KN*m	-3.904	KN*m/m		
630-07	Concreto - clase D - f'c= 21 MPa- T.M.A= 19mm	180	m3	Tabla 3.5.1-1.código de puentes	22.7	KN/m3	-1.000	m	8.035	KN*m	-4.018	KN*m/m
	Costado Derecho	90	m3		4.275	m						
	Costado Izquierdo	90	m3		-5.275	m						
640-07	Acero de refuerzo fy=420 Mpa- ASTM A- 706- Gr 60	31006	kg		-1.000	m	0.598	KN*m	-0.299	KN*m/m		
	Costado Derecho	15503	kg		4.275	m						
	Costado Izquierdo	15503	kg		-5.275	m						
650-07	Acero ASTM -A53B en tubería para barandas (incluye accesorios)	5062	kg		4.225	m	0.098	KN*m	0.413	KN*m/m		
PAVIMENTO							9.951	KN*m	-9.205	KN*m/m		
450-07	Mezcla densa en caliente tipo MDC-2, para capa de rodadura	230	m3	Tabla 3.5.1-1.código de puentes	22	KN/m3	-0.5000	m				
	Costado Derecho	80.5			2.0000	m	3.483	KN/m	6.966	KN*m/m		
	Costado Izquierdo	149.5			-2.5000	m	6.468	KN/m	-16.170	KN*m/m		
TOTAL							19.069	KN*m	-11.067	KN*m/m		