

Análisis dinámico de vigas simplemente apoyadas con propiedades distribuidas

Dynamic analysis of simply leaning beams with distributed properties

Oscar Leonardo Celis Fonseca

Ingeniero Civil, Universidad Minuto de Dios año 2007 Bogotá D.C., Instituto Nacional de Vías -Oficina de Emergencias. Puede contactarlo en Leonardo_celisf@hotmail.com

Luis Alejandro Cuestas Martín

Ingeniero Civil, Universidad Minuto año 2007 Bogotá D.C. lacm.ingenieria@gmail.com

Resumen

Existe una gran incertidumbre sobre la acción de las cargas móviles o dinámicas, producidas por peatones y vehículos sobre las vigas de los puentes. El presente artículo describe de manera sencilla una metodología para el análisis dinámico de vigas simplemente apoyadas con propiedades distribuidas, vigas muy frecuentes en la gran mayoría de puentes de nuestro país. La metodología se centra en la recolección de datos de aceleración mediante un acelerómetro, luego estas aceleraciones son procesadas mediante la transformada rápida de Fourier "FFT", algoritmo que determina la máxima frecuencia o periodo de oscilación de la viga. Mediante la ecuación diferencial de movimiento forzado con amortiguamiento y la forma modal de vibración para una viga simplemente apoyada, programada en lenguaje de bajo nivel, se obtiene el desplazamiento máximo en el centro de la viga. Este desplazamiento permite evaluar esfuerzos dinámicos que sumados con los esfuerzos estáticos se obtiene el esfuerzo máximo total, luego es comparado con el esfuerzo máximo admisible de la estructura.

Todos estos cálculos y descripción del puente, se almacenan en una base de datos programada en Oracle, bajo Windows XP.

Palabras clave. Vigas simplemente apoyadas, Cargas móviles o dinámicas, acelerómetro, transformada rápida de Fourier, máxima frecuencia, movimiento forzado, forma modal de vibración, desplazamiento máximo, esfuerzos dinámicos, esfuerzos estáticos, esfuerzo máximo total, base de datos.

Abstract

A great uncertainty exists about the action of mobile or dynamic loads produced by pedestrians and vehicles on the beams that support bridges. The present article describes in a simple way a methodology for the dynamic analysis of simply supported beams with distributed properties. These beams are very frequently used in the majority of bridges of our country. The methodology is centered in the gathering of data of acceleration by means of an accelerometer. These accelerations are subsequently processed by means of the Fast Fourier Transformer "FFT", algorithm that

determines the maximum frequency or period of oscillation of the beam. The maximum displacement at the center of the beam is obtained by means of the differential equation of forced movement with reduction and the modal form of vibration for a simply supported beam, programmed in a low level language. This displacement allows an evaluation of the dynamic efforts. The total maximum efforts is obtained when the dynamic efforts are added to the static efforts. And this is

compared with the acceptable maximum effort of the structure. All these calculations and description of the bridge are stored in a database programmed in Oracle, under Windows XP.

Keywords. Mobile or dynamic loads, accelerometer, Fast Fourier Transformer, maximum frequency, forced movement, modal forms of vibration, maximum displacement, dynamic efforts, static efforts, maximum total effort, database.

Introducción

Las vigas son sistemas mecánicos oscilantes constantemente, sometidos a excitación de fuerzas externas, como cargas vivas al igual que a la acción de los vientos y fuerzas sísmicas que actúan sobre la estructura, permitiendo el desplazamiento de la misma en el sentido de la fuerza actuante, pero una vez desaparezca esta oscilará a una o varias frecuencias que son propias del sistema, esta oscilación decaerá en forma exponencial hasta disipar totalmente la energía que ha absorbido.

Por tanto, este tipo de sistemas estructurales como cualquier otro tales como: edificios, puentes, etc., presentan una serie de oscilaciones como consecuencia de una fuerza actuante propia, que la identifican normalmente. Las estructuras civiles son elásticas en su forma normal de funcionamiento, presentan movimientos oscilatorios propios; un cambio en el estado de las mismas, ya sea por fatiga de los materiales o por rompimiento, conlleva al cambio en la distribución de los esfuerzos y afecta su vida útil. Afectación presentada por la excitación de agentes internos o externos.

De esta manera, se busca medir los desplazamientos provocados por excitaciones forzadas debido a cargas dinámicas o móviles aplicadas por los vehículos y peatones. Las cargas muertas no son tomadas en cuenta para este análisis

puesto que se consideran cargas de naturaleza estática como es el peso total de la estructura incluyendo aditamentos constructivos como capa de rodadura, andenes, barandas, ductos y demás elementos de servicio público.

El presente trabajo muestra, de manera general, los procedimientos para hacer un análisis dinámico en vigas simplemente apoyadas con propiedades distribuidas, utilizando transductores e instrumentos para la medición de vibraciones, "acelerómetros" que con el concurso de un software de análisis programado en lenguaje de bajo nivel y una base de datos donde se recopilaban toda la información y los cálculos realizados a la viga durante su vida útil.

Análisis del problema

En Colombia no existen especificaciones contempladas en los códigos de diseño para revisión de las vigas como elemento estructural de los puentes, en cuanto a esfuerzos dinámicos producidos por cargas forzadas, es decir por variación del flujo de tráfico.

En la actualidad, se lleva a cabo el mantenimiento de la estructura a partir de la observación subjetiva, eventuales análisis destructivos y no se desarrollan otras alternativas, para evaluar y revisar sistemas estructurales, con el fin de mejorar y ampliar el conocimiento de la estructura para prolongar su vida útil a un bajo costo y formular políticas en materia de infraestructura a

largo plazo, basadas en el comportamiento de las mismas.

Justificación

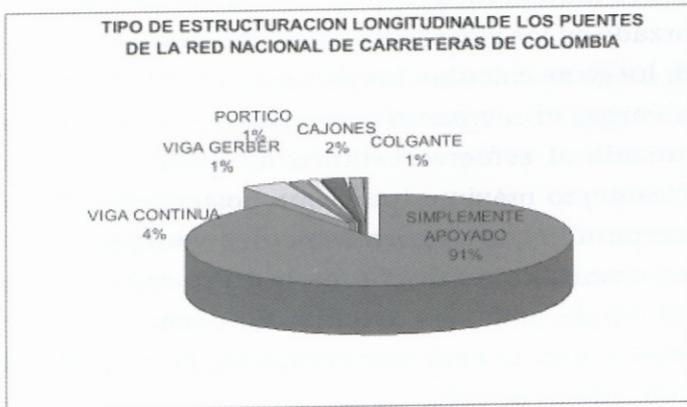


Figura 1. Distribución porcentual del tipo de estructura longitudinal, en puentes de Colombia. Fuente: INVÍAS

Teniendo en cuenta la necesidad de establecer mecanismos que permitan evaluar la capacidad de disipación de la energía en las estructuras y/o puentes capaces de soportar y operar, durante y después de los efectos producidos por cargas dinámicas o la ocurrencia de un sismo importante. Por esto, se plantea un sistema de seguimiento y análisis del comportamiento dinámico, mediante instrumentación (acelerómetro) que recopila la información necesaria de la estructura en tiempo real y permite tomar decisiones inmediatas sobre el mantenimiento o cambio de una estructura, para mantener la estabilidad y el servicio de las estructuras

Ante un inminente riesgo de colapso de las diferentes estructuras vigas y puentes, se ha propuesto dar inicio al proyecto Análisis dinámico de vigas simplemente apoyadas con propiedades distribuidas.

1. Antecedentes

En Colombia se está desarrollando un sistema de monitoreo, en tiempo real, de estructuras civiles; el sistema está basado en la medida de las aceleraciones a las cuales se ve sometida cual-

quier estructura, por efecto de cargas dinámica que actúan sobre ella. El Centro Internacional de Física, en convenio con el Instituto de Desarrollo Urbano IDU, desarrolla un sistema que permite, en tiempo real, medir las aceleraciones y la vibraciones importantes en los puentes dentro de la ciudad, mediante la utilización de comunicación vía telefónica a una central de información.

Para el Centro Internacional de Física, el sistema de comunicación del equipo sensor, el diseño de alarmas colocadas en la estructura y una central que administra la situación general de los puentes son lo mas importante. La comunicación se realiza mediante vía celular, a cargo de la empresa Comcel y su tecnología 3GSM. Otra preocupación para el Centro es la fuente de alimentación eléctrica de la tarjeta recopiladora de datos "planta celular". En un primer momento diseñaron paneles solares como medio de recarga de la batería de alimentación pero, por razones de inseguridad en la ciudad de Bogotá, optaron por un convenio con Codensa, para la carga de las baterías de la planta celular directamente con energía eléctrica.

A nivel latinoamericano se han implementado diferentes sistemas para el control dinámico de puentes; uno de estos sistemas es el denominado metrología óptica, ciencia que estudia los sistemas de unidades, métodos y normas de los instrumentos de medición ópticos aplicado al control de puentes desarrollado por el centro de investigaciones ópticas CIPO, en diciembre de 1996, el cual consiste en la utilización de elementos de la óptica geométrica física e instrumental, complementada en algunos casos con las cualidades que posee la radiación generada por el láser. Estas constituyen herramientas de invaluable potencial para la solución de problemas metrológicos que plantea la ingeniería actual cuando se presenta la posibilidad de control, a distancias mayores, de puntos de difícil acceso sin perturbar la estructura; de esta forma, se pueden medir los desplazamientos, las deformaciones y/o vibracio-

nes en un rango de valores comprendidos entre algunos micrómetros y decenas de centímetros, llegando el rango en distancias de observaciones de centenares de metros.

2. Ilustración del proyecto

Con este proyecto se crea un software en lenguaje de programación c++ vinculado internamente en Oracle, para una mejor presentación y manipulación del programa al usuario; aplicado a herramientas e instrumentos modernos basados en principios matemáticos que permitan, de manera aproximada, evaluar y cubrir las deficiencias que, en la actualidad, se presentan en la revisión de las estructuras en servicio.

3. Objetivo principal

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar e implementar un aplicativo informático utilizando un acelerómetro como instrumento de medición, que permita analizar una viga con propiedades distribuidas bajo la acción de cargas dinámicas; implementado en puentes vehiculares.

4. Metodología

Los argumentos expuestos con anterioridad, conducen al desarrollo de una herramienta práctica para la evaluación de la vulnerabilidad de puentes. Con base en los resultados obtenidos, se plantean soluciones que permiten una disminución del riesgo de la estructura.

El procedimiento matemático por el cual se determina el cálculo del desplazamiento en vigas simplemente apoyadas con propiedades distribuidas, se obtiene a partir de los datos de aceleración, que son adquiridos por una unidad de instrumentación llamada acelerómetro, el cual se instala en la estructura capaz de realizar las mediciones de aceleración en tiempo real; estos datos son procesados mediante la FFT (transformada rápida de Fourier) con el fin de obtener una

frecuencia máxima del patrón de la estructura, debido a cargas dinámicas.

Esta frecuencia patrón es incluida en las ecuaciones matemáticas que gobiernan el movimiento forzado en las vigas y así obtener el desplazamiento; luego se calculan los factores dinámicos como la carga, el momento y el esfuerzo, este último sumado al esfuerzo estático da como resultado el esfuerzo máximo total, que posteriormente es comparado con el porcentaje del esfuerzo máximo admisible de diseño de la estructura (). Es allí donde podemos determinar, como un factor importante, si está comprometida la estabilidad global de la misma.

4. Contexto general de la aplicación

Una vez establecidos los parámetros, mediante una inspección visual, el usuario ingresa los datos de inventario y descripción básica para un almacenamiento informático; una vez recolectada la información, existente en campo, se carga para alimentar la base de datos en la plataforma ORACLE Versión 6 y un archivo compatible con Visual Basic, donde se corre la FFT procesamiento de los datos y con interfaz gráfica donde se visualizan y se obtiene la frecuencia máxima; posteriormente este valor se trata en un programa de c++, vinculado con el programa ORACLE.

El código fuente que se procesa es parte indispensable para realizar estas operaciones ya que en él se encuentran las fórmulas que permiten la ejecución de cálculos y las rutinas de iteración, que se deben hacer en los diferentes procesos.

Tomando como base la definición y los propósitos del proyecto se pueden plantear de una manera más específica las labores o funciones de la aplicación, como también los resultados que debe producir. El proyecto tendrá la capacidad de realizar monitoreos y verificaciones de las vigas que componen un puente vehicular en los aspectos tales como deformaciones y revisión de esfuerzos.

Estas aplicaciones deberán hacer uso de formularios, etiquetas, cuadros de texto y una base de datos que permita almacenar, modificar y eliminar los datos de entrada y salida, generados por el programa.

El código fuente del programa para el análisis dinámico de las vigas se procesa en lenguaje c y la transformada rápida de Fourier se realiza con un aplicativo en visual Basic y sus ejecutables son vinculados internamente en el programa Oracle, con el fin de dar mejor presentación al usuario sobre los cálculos y gráficas; a su vez, estos reportes serán registrados en una base de datos con fecha y hora elaborada en Oracle. Este aplicativo es indispensable para realizar diversos monitoreos o inspecciones a las vigas de los puentes, ya que en este aplicativo se encuentran las fórmulas y las operaciones, que permiten la ejecución de cálculos y las rutinas de iteración que se deben hacer en los diferentes procesos; también, en él se encuentran el análisis y toma de decisiones según las características de cada estructura.

5. Fundamentos teóricos

5.1. Sistemas con un grado de libertad y amortiguación

Se ha visto que, en condiciones idealizadas sin amortiguación, el oscilador simple una vez excitado oscila indefinidamente con una amplitud constante a su frecuencia natural; sin embargo, no es posible tener un mecanismo que vibre en estas condiciones ideales. Fuerzas llamadas de fricción o de amortiguación están siempre presentes en cualquier sistema en movimiento. Estas fuerzas disipan energía; en otras palabras, la presencia inevitable de estas fuerzas de fricción constituye un mecanismo por el cual la energía mecánica del sistema, energía cinética o potencial, se transforma en otros tipos de energía como el calor. El mecanismo de esta transformación, o disipación de energía, es complejo y en la actua-

lidad no se comprende totalmente. Para considerar estas fuerzas de disipación en el análisis de sistemas dinámicos, es necesario introducir simplificaciones de los sistemas basados en la experiencia real.

5.2. Amortiguación viscosa

Cuando se consideran las fuerzas de amortiguación o fricción en el análisis dinámico de estructuras, generalmente se presume que éstas son proporcionales a la magnitud de la velocidad y opuestas a la dirección del movimiento. Este tipo de fricción se conoce como amortiguación viscosa; es el tipo de fuerza de fricción que se produce en un cuerpo, restringido en su movimiento por un medio viscoso.

Existen situaciones en las cuales la suposición de amortiguación viscosa es realista y en las que el mecanismo de disipación es aproximadamente viscoso. Sin embargo, la suposición de amortiguación viscosa se hace, a menudo, sin tener en cuenta las diferentes características disipativas de los sistemas reales. La razón principal del uso generalizado de esta suposición es que conduce a un análisis matemático relativamente simple.

5.3. Sistema subamortiguado

El valor del coeficiente de amortiguación es menor que el valor crítico ($C < C_r$), luego el valor de la razón de amortiguamiento en estructuras reales, con un grado de libertad $\xi = C/C_r$, debe ser menor de 1.

El valor del coeficiente de amortiguación en estructuras reales es menor que el crítico. Normalmente, este fluctúa del 2% y el 20% de valor crítico.

5.4. Decremento logarítmico

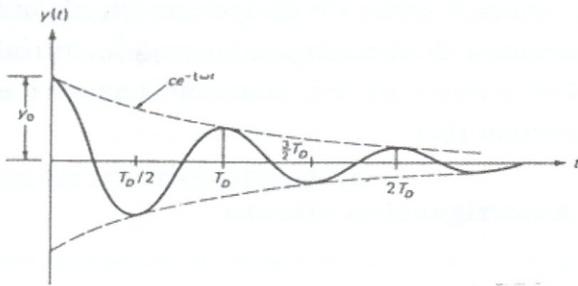


Figura 2. Vibración libre para un sistema subamortiguado

La amplitud de vibración no se mantiene constante, durante el movimiento, sino que decrece exponencialmente en ciclos sucesivos de tiempo, por acción del porcentaje de amortiguación que tiene el sistema. Las oscilaciones ocurren en intervalos iguales de tiempo "TD", fenómeno del sistema subamortiguado.

5.5. Vibración forzada en vigas simplemente apoyadas con propiedades distribuidas

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = p(x,t) - \bar{m} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$\bar{m} = \rho A$$

Ecuación diferencial parcial de cuarto orden que rige el movimiento forzado en vigas simplemente apoyadas con propiedades distribuidas. La solución a esta ecuación es:

$$y(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(x) Z_n(t)$$

Donde:

$$\Phi_n(x) = \text{sen} \frac{n\pi x}{L}$$

Es el modo normal de vibración para una viga simplemente apoyada con carga distribuida.

$$Z_n''(t) + 2\xi \omega_n Z_n'(t) + \omega_n^2 Z_n(t) = \frac{F_n(t)}{M_n}$$

$$F_n(t) = \int_0^l \Phi_n(x) \rho(x,t) dx$$

$$M_n = \int_0^l \bar{m} \Phi_n^2(x) dx$$

Esta es la ecuación diferencial no homogénea de segundo orden, que rige el movimiento forzado con amortiguación. La solución de esta ecuación está dada por:

$$Z_n(t) = e^{-\xi \omega_n t} \left[C_1 \cos \sqrt{(\omega_n^2 - \xi^2 \omega_n^2)} \times t + C_2 \text{sen} \sqrt{(\omega_n^2 - \xi^2 \omega_n^2)} \times t \right] + \frac{F_n \text{sen}(\bar{\omega} t + \phi)}{\sqrt{(\omega_n^2 - \bar{\omega}^2)^2 + 4\xi^2 \omega_n^2 \bar{\omega}^2}}$$

$$C_1 = - \frac{F_n \text{sen}(\bar{\omega} t + \phi)}{\sqrt{(\omega_n^2 - \bar{\omega}^2)^2 + 4\xi^2 \omega_n^2 \bar{\omega}^2}}$$

$$C_2 = \left(\frac{-F_n [\bar{\omega} \cos(\bar{\omega} t + \phi) + \xi \omega_n \text{sen}(\bar{\omega} t + \phi)]}{\sqrt{(\omega_n^2 - \xi^2 \bar{\omega}^2)} [\omega_n^2 - \bar{\omega}^2] + 4\xi^2 \omega_n \bar{\omega}^2} \right)$$

5.6. Frecuencias naturales para vigas simplemente apoyadas con propiedades

$$\omega_n = n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$$

distribuidas

Esta es la frecuencia natural, para vigas simplemente apoyadas con propiedades distribuidas, donde:

E: módulo de elasticidad del material.

I: inercia del material.

L: longitud de la viga.

n: número del modo (n=1,2,3,4,5.....).

m: masa de la viga.

$$\omega_n D = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

Esta es la frecuencia con amortiguamiento, donde:

ω_n : frecuencia natural.

ξ : porcentaje de amortiguamiento.

5.7. Desplazamiento en vigas simplemente apoyadas, con propiedades distribuidas con

$$Z_n(t) = e^{-\xi w_n t} \left[\left[C1 \cos \sqrt{(w_n^2 - \xi^2 w_n^2)} \times t_i + C2 \operatorname{sen} \sqrt{(w_n^2 - \xi^2 w_n^2)} \times t_i \right] + \frac{F \operatorname{sen}(\bar{w}_i + \varphi)}{\sqrt{(w_n^2 - \bar{w}^2)^2 + 4\xi^2 w_n^2 \bar{w}^2}} \right]$$

$$\Phi_n(x) = \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{L}$$

$$I_n = \frac{4(1 - \cos \frac{n\pi}{2})}{2n\pi - \operatorname{sen} 2n\pi}$$

$$Y(x,t) = \Phi_n \times Z_{n_i}(t_i) I_{n_i}$$

forzamiento.

5.8. Comentarios sobre la fórmula de desplazamiento

La fórmula del desplazamiento es una sumatoria de un número infinito de términos pero, en la gran mayoría de los problemas estructurales, sólo los tres primeros modos contribuyen significativamente a la respuesta total del desplazamiento. La solución $Z_n(t)$ de la ecuación diferencial es aplicable a vigas con cualquier tipo de distribución de cargas.

La extensión de este análisis a vigas de múltiples tramos (vigas continuas) es tediosa y poco práctica, aunque se puede realizar.

6. Equipo



Foto 1. Acelerómetro adquirido a la firma Summit Instruments.

Principio

El acelerómetro sirve para detectar y medir la aceleración, se fundamenta en la primera ley de Newton; la aceleración consta de una masa que implica una fuerza $f=m \cdot a$, donde f =fuerza y m =masa y a =aceleración.

Se considera un sistema mecánico simple, que consta de una masa fija m con un resorte con una rigidez K constante; si la masa desplaza una distancia X la aceleración, debido a esa fuerza restaurada del muelle es $f=K \cdot x/m$, podemos derivar la magnitud de la aceleración observando el desplazamiento x de la masa fija. Este principio es utilizado en los mas sofisticados acelerómetros.

La aceleración es el cambio de velocidad la unidad de medida es m/seg^2 .

La medida de la aceleración es muy utilizada, hoy en día, en la industria los acelerómetros; son sensores inerciales que miden la segunda derivada de la posición. Un acelerómetro mide la fuerza de inercia generada cuando una masa es afectada por un cambio de velocidad, esta fuerza puede variar la tensión de un resorte, la deformación de un elemento y la frecuencia de vibración de una masa.

La elección del sensor se efectuó de acuerdo a los siguientes criterios:

- Gravedades
- Ancho de banda de acuerdo a los valores esperados.
- La forma y la facilidad de montaje.
- La salida de los cables a los puertos.
- Costos.

La aceleración es una cantidad física fundamental que nos permite obtener información tanto de gravedades, vibraciones y sismos, además de otras aplicaciones como en nuestro caso: monitorear y efectuar seguimiento a los desplazamientos de la estructura.

Los datos de aceleración, tomados a la viga, se harán mediante un acelerómetro análogo y uniaxial, suministrado por la empresa Summit Instruments.

6.1. Ficha técnica del acelerómetro

| | |
|-----------------------|-------------------|
| Sensibilidad: | 450 mV/g |
| Rango de aceleración: | +/- 1 a +/- 5g |
| Alimentación: | 8 a 30 v 6 a 9 mA |
| Sellado: | Hermético |
| Peso: | 35 g |
| Conector: | 9 pines |
| Ancho de Banda: | 15Hz |

6.2. Tarjeta de adquisición externa

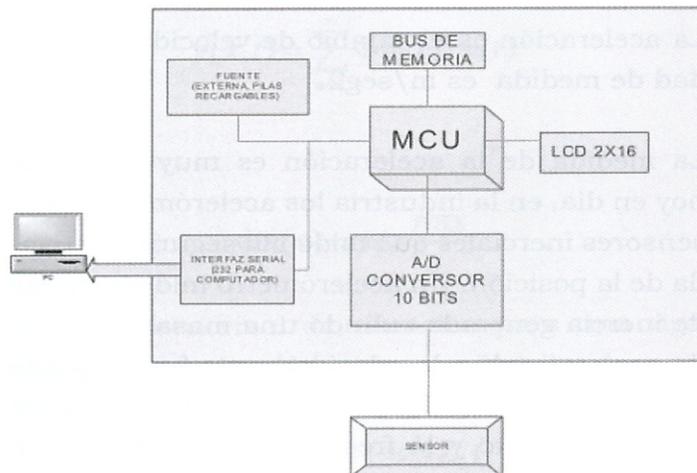


Figura 3. Diagrama procesamiento tarjeta de adquisición de datos.

Notas

1. La comunicación es serial al PC vía puerto COM.
2. El diseño de esta tarjeta es para un ancho de banda máximo de 20 KHz. (El máximo ancho de banda soportado por el dispositivo es de 10 KHz, de acuerdo con la hoja de datos.)
3. La conversión tendrá una resolución de 10 bits (capacidad para 1024 valores discretos).



Foto 2. .Procesamiento de instrumentación dinámica.

7. Procesamiento de los datos arrojados por el sensor

Una vez recolectados los datos de aceleración por parte del sensor y la tarjeta de adquisición externa, estos son llevados a un algoritmo de cálculo llamado: transformada rápida de Fourier, el cual tiene la finalidad de encontrar la frecuencia máxima de una muestra o población de datos de aceleración.

7.1. Transformada rápida de Fourier FFT.

Existe un método numérico que es notablemente eficiente para calcular una función, en el dominio de las frecuencias; este método se conoce como transformada rápida de Fourier. El análisis de Fourier no es concepto nuevo; desde que su autor lo desarrolla, a principios del año 1800, una gran cantidad de libros y artículos han ido

apareciendo sin interrupción, a pesar de ello aun hoy en día el análisis de Fourier puede presentarse en un nuevo contexto, con una interesante transformación matemática que genera información en el dominio de las frecuencias y que es, generalmente, difícil de aplicar a mano con lápiz y papel en la mayoría de los casos prácticos.

Aún con la aparición del ordenador personal, un análisis de Fourier útil consumía demasiado tiempo y resultaba caro de realizar. Fue en 1960 a raíz de la publicación, de P.M. Cooley y J. W. Tukey, del famoso algoritmo de transformada rápida cuando se crea el nuevo contexto del análisis de Fourier, de forma que se obtienen las condiciones de rapidez y economía, para desarrollar dichas técnicas a una amplia gama de procesos y medidas.

De hecho, la FFT puede ser considerada como técnica general de análisis. Las rutinas FFT se encuentran en todas las librerías de software y los analizadores FFT han aparecido en todos los campos de la instrumentación.

Sin embargo, no existe en este proceso de implantación progresiva de la FFT la correspondiente divulgación de la teoría, a nivel general, que permita al usuario la familiarización de la misma. No se requiere saber todos los detalles de las ecuaciones y sus variantes; sí es fundamental tener claro los conceptos que llevan implícitos. Así, por ejemplo, en el caso de utilizar la FFT como instrumento de medida, es necesario entender bien lo que el dominio frecuencia puede descubrir y cómo le afectan las técnicas de digitación.

7.2. Algoritmo de la FFT

Como se ha dicho, se han desarrollado muchos algoritmos para el cálculo digital eficiente de la transformada discreta de Fourier. Hasta hoy, los multiplicadores digitales necesarios para implantar la transformada discreta son costosos gran-

des y relativamente lentos, los microprocesadores de propósito general extremadamente lentos para ejecutar multiplicaciones; en consecuencia, ha sido necesario calcular la transformada discreta usando un número mínimo de multiplicaciones, utilizando un almacenamiento óptimo de los datos y coeficientes, lo que ha conducido al desarrollo de varios algoritmos rápidos para la transformada de Fourier.

Para el caso de nuestro aplicativo, la FFT fue tomada del programa Matlab y vinculadas a Visual Basic; donde aparece como una rutina matemática incorporada y desarrollada; en este programa, convertido en ejecutable, se vincula al Oracle versión 6i; luego se puede visualizar gráficamente: "Periodo contra el espectro de Potencia" y el valor del periodo máximo será nuestra finalidad con esta función. Básicamente, la transformada rápida de Fourier se define como el manejo de la frecuencia máxima con respecto al tiempo de una muestra de datos, donde se extraen coeficientes imaginarios y reales que luego son tratados en un espectro de potencia de donde se saca el valor máximo representativo del periodo.

El programa en visual Basic recolecta los datos del muestreo y los almacena en un vector $X(J)$ y una vez procesados por la función $y=fft(X(J))$ se genera otro vector $y(j)$ con los datos de salida (reales y complejos). La condición de función real implica que los valores modulares del espectro son simétricos, respecto a la frecuencia de Nyquist ($n/2$), por lo que los cálculos se han reducido a la mitad; los componentes de frecuencia se obtienen desde cero (valor medio, componentes de continua), hasta $n/2-1$; los valores restantes, desde $n/2$ hasta $n-1$. Una vez utilizado este paso se llega al periodo máximo, mostrado en un periodograma gráfica de periodo contra espectro de potencia.

8. Programa para el análisis dinámico de vigas simplemente apoyadas con propiedades distribuidas.

8.1. Datos de entrada

- Longitud de la viga (L). Longitud total de la expresada en centímetros.
- Área (A). Área de la sección transversal expresada cm^2 .
- Inercia (I). Valor de la inercia dependiendo la geometría transversal de la estructura expresada en cm^4 .
- Distancia al eje neutro (C). Distancia tomada de las fibras extremas al eje que está ubicado en el centroide de la sección transversal. Expresado en centímetros.
- Módulo de elasticidad (E). Esfuerzo límite proporcionalidad del material dado en kg/cm^2 . Dado por el diseño de la viga o estructura.
- Resistencia del material (F_c o F_y). Resistencia especificada a la compresión o flexión. Dado por el diseño de la viga en kg/cm^2 .
- Porcentaje de amortiguamiento (ξ). Porcentaje de amortiguamiento, valor que oscila entre un 2% a 20% y generalmente es del 10%.
- Peso específico (ρ). Peso o densidad específica del material de la viga, proporcionada por el diseño o tomada según normatividad para los distintos materiales dado en kg/cm^3 .
- Tiempo de cálculo (t). Incremento de tiempo para el cálculo; está relacionado con el tiempo de adquisición de datos del equipo (acelerómetro). Expresado en segundos.
- Carga armónica (F_0). Carga inicial de sometimiento proporcionada por aforos de campo sobre cargas vehiculares y procesadas por métodos estadísticos. Esta carga viene expresada en kg/cm .
- Porcentaje admisible de diseño (%ADM). Porcentaje tomado de la resistencia del material f_c ó f_y , puede estar entre 45 a 60% respectivamente.

- Número de modos (n). Número de modos normales que desea calcular.
- Periodo (T). Máximo periodo dado por la transformada rápida de Fourier y el espectro de potencia mostrado en un peridiograma. Expresado en (seg. /ciclo).
- Frecuencia WB (Rad/seg). Frecuencia máxima expresada en rad/seg. Derivada del periodo T.
- Impacto. Dependiendo del material aplica, o no aplica, la fórmula de impacto para la mayoración de cargas "Ver fórmula 2.249".
- Porcentaje impacto. Porcentaje obtenido de la fórmula: $I=16/(L+40)$. En función de la longitud de la viga. Ver sección 2.44.

8.2. Datos de salida

- Modo. Indica el número del modo normal de cálculo.
- Tiempo. Incremento de tiempo en segundos.
- W_n . Frecuencia natural de la viga.
- W_{nd} . Frecuencia natural de la viga con amortiguación.
- FI. Modo normal de vibración para vigas simplemente apoyadas.
- FI2. Ángulo fase.
- IN. Factor dinámico definido por la integral de la sección 3.7, en vigas simplemente apoyadas con propiedades distribuidas.
- C1 Y C2. Constantes de integración de la solución de la ecuación diferencial de movimiento forzado con amortiguamiento, aplicado a vigas simplemente apoyadas con propiedades distribuidas.
- Y_{xt} (Desplazamiento). Desplazamiento total en el centro de la viga.

8.3. Datos finales del programa

- **DESPLAZ.MAX.** Desplazamiento máximo de la viga dado en centímetros.
- **W.MAX.DINAMICO.** Carga dinámica de-

bida al desplazamiento máximo expresado en kg/cm.

- **M.MAX.DINAMICO.** Momento máximo dinámico debido a la carga máxima dinámica en kg*cm.
- **Ef.MAX.DINAMICO.** Esfuerzo máximo dinámico originado por el momento máximo dinámico. Dado en kg/cm².
- **M.MAX.ESTATICO.** Momento máximo estático originado por la carga inicial "Fo" sin contar la mayoración por impacto. Dado en kg*cm.
- **Ef.MAX.ESTATICO:** Esfuerzo máximo estático originado por el momento máximo estático en el centro de la viga, expresado en kg/cm².
- **Ef.MAX.TOTAL.** Esfuerzo máximo total que es la suma del esfuerzo máximo dinámico y el esfuerzo máximo estático, dado en kg/cm².
- **Ef.ADMISIBLE.** Esfuerzo admisible. Es un porcentaje tomado de la resistencia de la material y que luego es comparado con el esfuerzo máximo total.

8.4. Formularios del programa

8.4.1. Procesamiento de los datos FFT

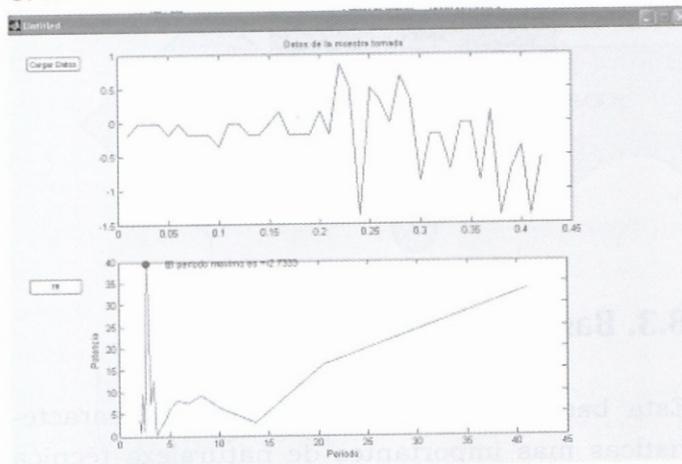


Figura 4. Formulario de visualización de peridograma # periodo.

Descripción

Recopilados los datos de aceleración estos son enviados a la transformada de Fourier, para luego calcular el máximo periodo.

8.4.2. Formulario de entrada

Figura 5. Formulario de captura de datos y cálculo del desplazamiento de acuerdo al número de modos.

Descripción

Datos básicos de los elementos, que conforman el sistema estructural de la viga a analizar.

8.4.3. Datos finales del programa

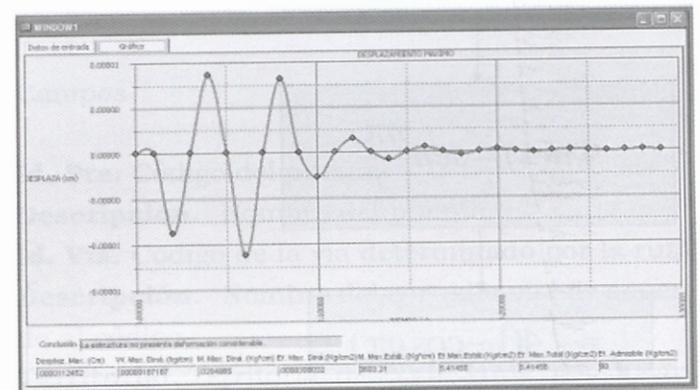


Figura 6. Formulario de desplazamiento # tiempo.

Descripción

La gráfica muestra los resultados del programa para el cálculo del desplazamiento máximo que ha sufrido la estructura, por el tránsito de cargas dinámicas.

8.2. Diagrama de flujo

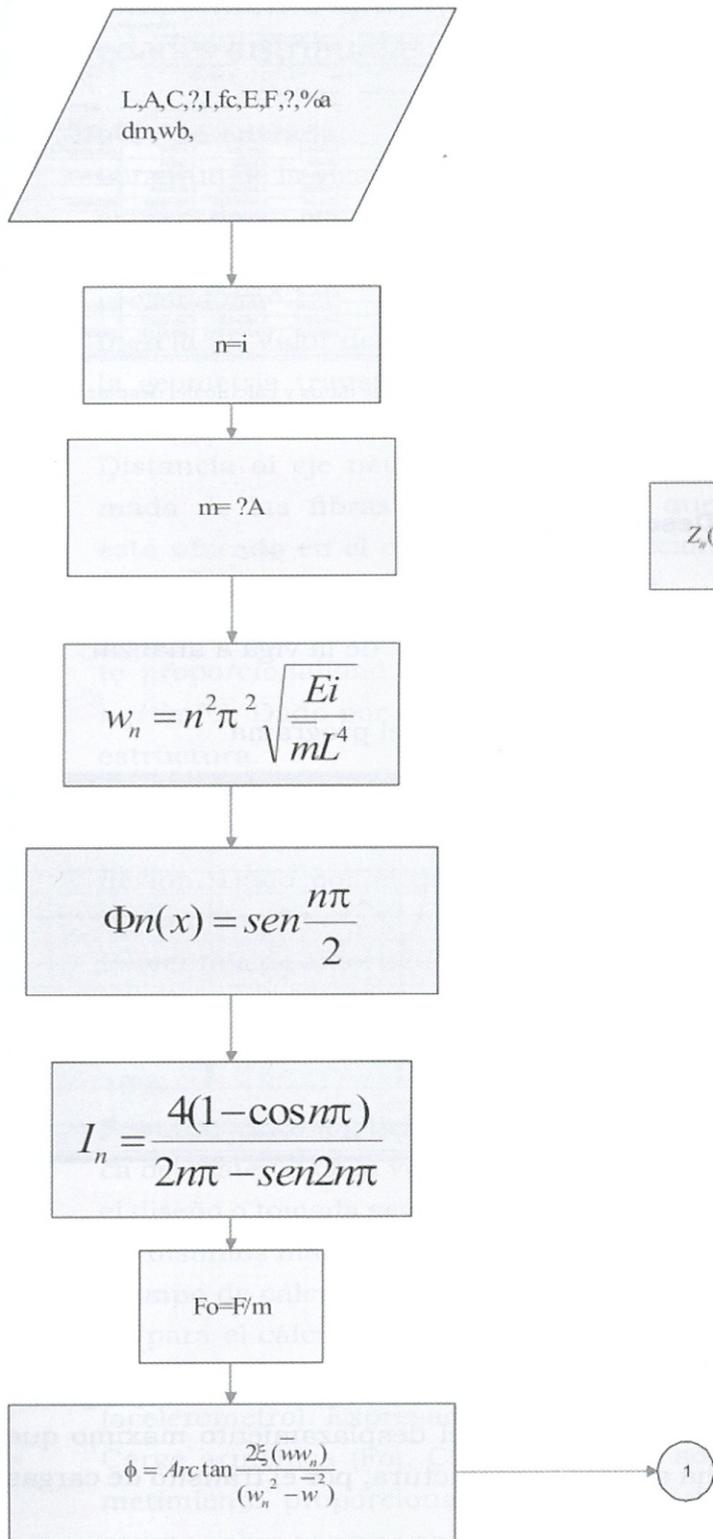
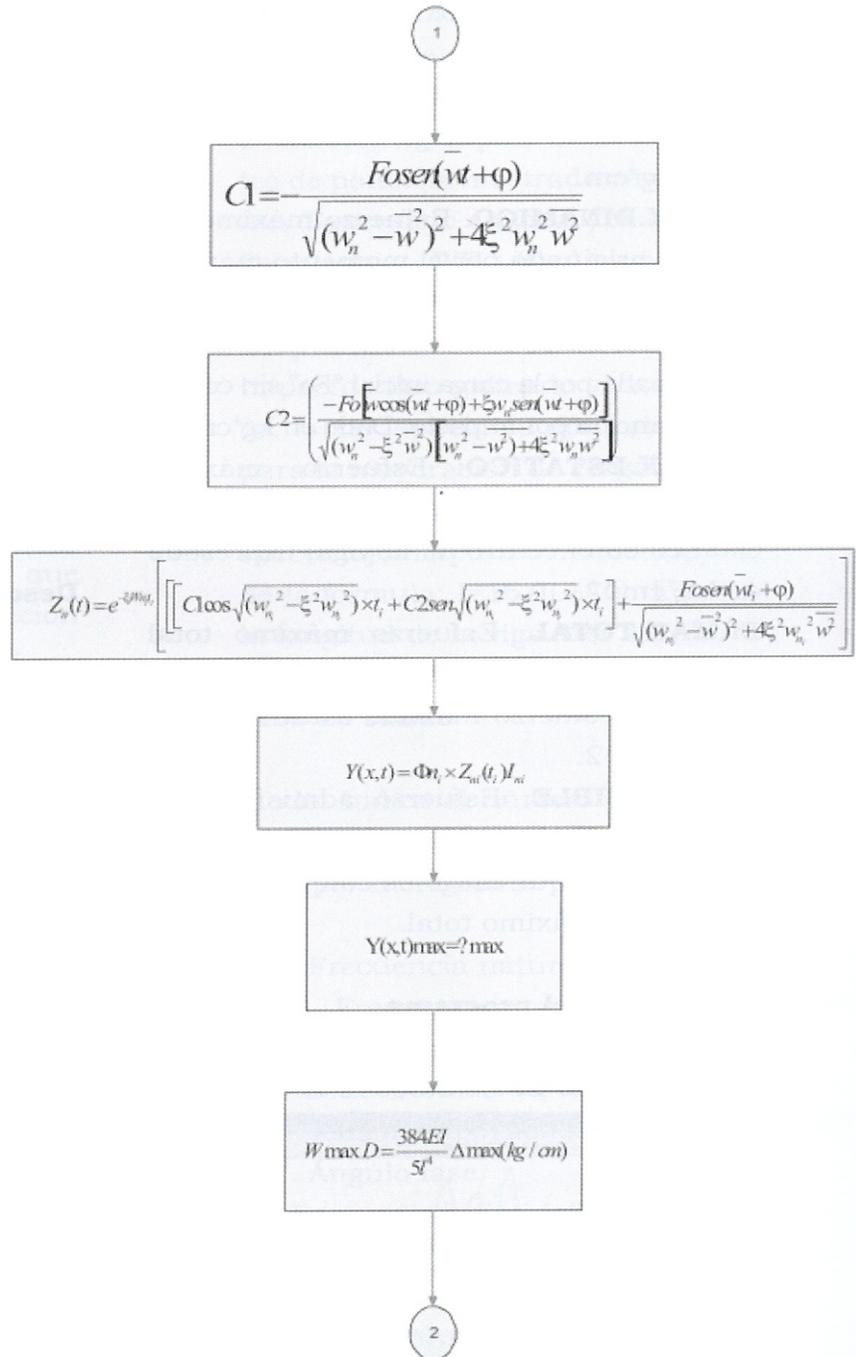
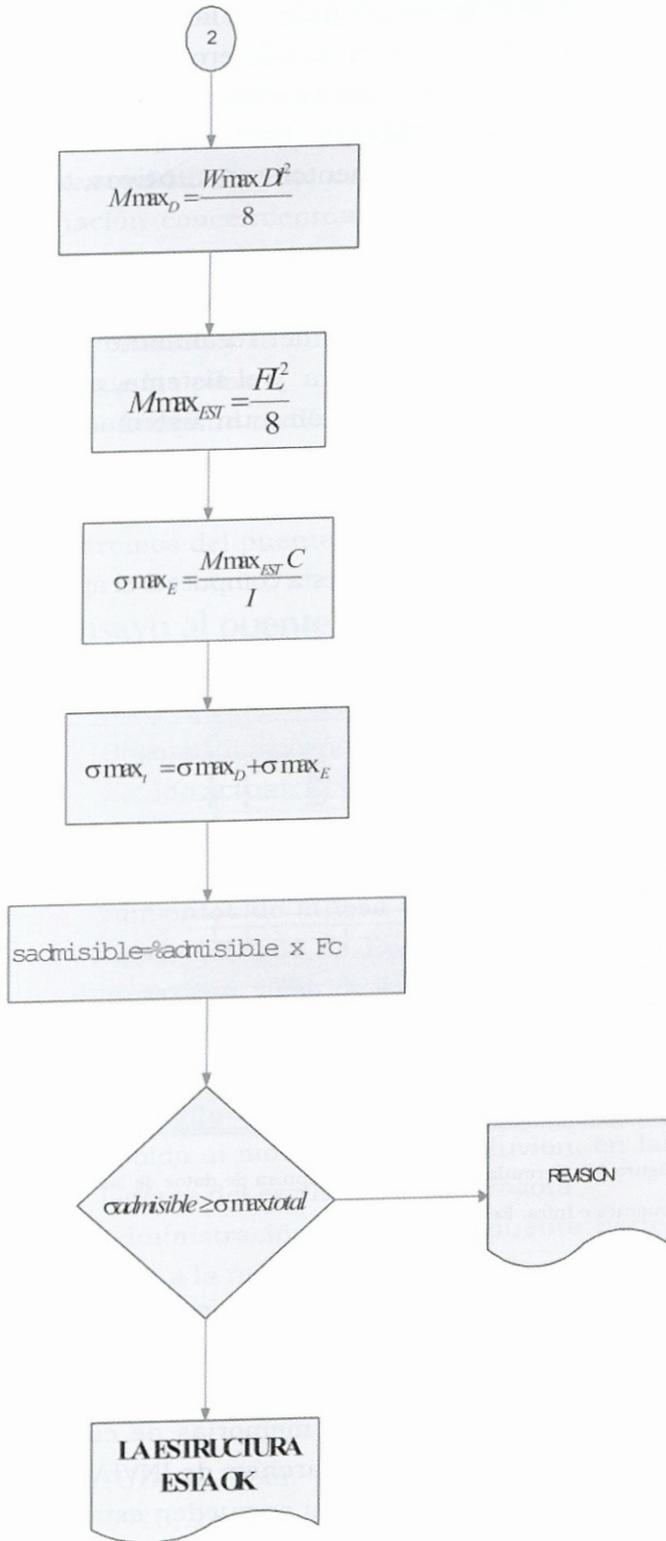


Figura 7. Diagrama de flujo del procesamiento de la información.



8.3. Base de datos

Esta bases de datos nos registra las características mas importantes de naturaleza técnica y de inspección visual de los puentes en la red vial, parte de la inspección presenta características propias de los puentes, para efectuar una buena administración de la información que es indispensable de los datos obtenidos en campo se registra almacenando información, esta base de datos se realizó teniendo en cuenta la base



denominada SIPUCOL del Instituto Nacional de Vías, se tuvo en cuenta para el desarrollo de este aplicativo desarrollada en Oracle V 8, para una buena gestión y administración de mantenimiento en puentes.

En este aplicativo vinculamos la información obtenida a partir de los datos obtenidos del sensor y registrados en MATLAB, vinculando cada uno de los registros capturados en cada uno de los puentes, almacenando y registrando información histórica necesaria para efectuar un seguimiento adecuado.

6.3.1. Formulario denominado: datos básicos

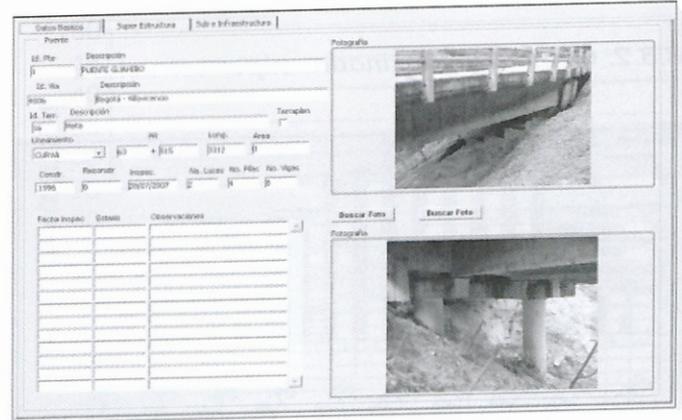


Figura 8. Formulario principal de captura de datos básicos

Campos

Id. Pte. Código del puente

Descripción. Nombre del puente

Id. Vía. Código de la vía determinado por la ruta

Descripción. Nombre del corredor vial de acuerdo al código

Territorial. Territorial de INVIAS que tiene a cargo la administración del puente

Terraplén. Casilla de verificación de tipo de acceso.

Lineamiento. Tipo de alineamiento horizontal.

PR. Punto de referencia de la ubicación del puente.

Longitud. Longitud total de la estructura.

Área. Área total de la losa de tablero.

Construido. Año de construido del puente

Reconstruido. Año de reparado o intervenido la estructura

Inspección. Fecha de inspección del puente

No. Luces. Número de luces que componen el puente

No. Pilas. Número de pilas del puente

No. Vigas. Número de vigas que cuenta la estructura

Fecha de Inspección. Fecha en la cual se efectuó la instrumentación.

Observaciones. De acuerdo a la inspección visual presentada y a los cálculos obtenidos esta información es registrada en este campo.

Botón Buscar foto. Botón que efectúa la búsqueda del registro fotográfico obtenido.

8.3.2. Carpeta denominada: súper estructura

Figura 9. Formulario de captura de datos de la súper estructura.

Este formulario nos permite ingresar tanto información de elementos estructurales como no estructurales, que componen la súper estructura, es de vital importancia para el inventario de puentes.

Campos

Superficie de Rodadura. Carpeta o pavimento del cual está compuesta la estructura en la losa, como elemento no estructural

Junta de expansión. Juntas o uniones entre las losa y los enfoques con el fin de absorber las deformaciones y dilataciones de la losa.

Baranda. Tipo de baranda de protección.

Material. Material que compone la baranda.

Ancho de losa o tablero. Distancia total de la losa en su sección transversal; compuesta por el tablero, la distancia de la calzada y los andenes.

Luz. Sub. Formulario que recopila la información

de los elementos estructurales de la superestructura, teniendo en cuenta el número de luces y la descripción de cada una de ellas.

Tipo de superestructura. Está compuesta por diferentes tipos de elementos constitutivos, tales como la losa o viga/losa.

Tipo de sistema de apoyo. Esta información está dada en relación con la transmisión de los esfuerzos y disminución del rozamiento de la súper con la subestructura y el sistema, para lo cual fue diseñado: si es como un sistema continuo o articulado; por esta transmisión de cargas podemos encontrar sistemas como los basculantes, neopreno o tipo plot.

Material. Material del cual está compuesto el apoyo.

8.3.3. Carpeta de infraestructura

Figura 10. Formulario principal de captura de datos de las Sub. Estructura e Infra. Estructura

En esta carpeta encontramos información relacionada con el tipo de cimentación existente; esta información se debe establecer con una investigación de los diseños y memorias de cálculos que deben reposar en los archivo de INVIAS; sin embargo, en algunos casos se pueden establecer las condiciones de cimentación, evidenciadas por problemas de socavación.

Campos

Pilas. Elemento fundamental en la interacción suelo estructura; en este campo, ingresamos

información relacionada con el tipo de pila o de apoyo.

Material. El material que consta o se compone la pila.

Cimentación. En este campo ingresamos la información concerniente al tipo de cimentación; bien sea, caisson, pilotes, en tubería etc.

Altura. Este campo se refiere al distancia entre la cimentación y la superestructura, es decir la altura de las pilas.

Ancho. Longitud medida de la sección longitudinal de las pilas.

Estribos. Información básica de los apoyos en los extremos del puente.

9. Ensayo al puente Guahibo

- Localización. PR 60+510 de la carretera Bogotá Villavicencio.
- Estado actual. El puente, en la actualidad, se encuentra en estado crítico, teniendo en cuenta que se han presentado desplazamientos de la losa y en algunas de las vigas, del lado de Bogotá. Es un puente curvo con vigas de luces rectas con una luz central hecha en viga postensada y prelasas en sección compuesta. El desplazamiento de las losas del lado Bogotá es debido al movimiento del coluvion, en las laderas del estribo del lado Bogotá
- Administración puente. El puente pertenece a la red vial nacional, a cargo del Instituto Nacional de Vías. regional Meta.
- Datos básicos para el análisis dinámico de la viga:

LONGITUD: 3312cm.

ÁREA: 5915,2cm².

INERCIA: 22722583cm⁴

ρ . CONCRETO: 0.0024Kg/cm³

F^c: 280Kg/cm²

E: 300000kg/cm²

TIEMPO DE CÁLCULO (t): 0.05s

%ADMISIBLE DE DISEÑO: 60%

ξ % :10%

T (PERIODO):4.7615 S/CICLO

DIST AL EJE NEUTRO C: 91cm

CARGA DE SOMETIMIENTO Fo:

• Análisis estadístico sobre cargas vehiculares

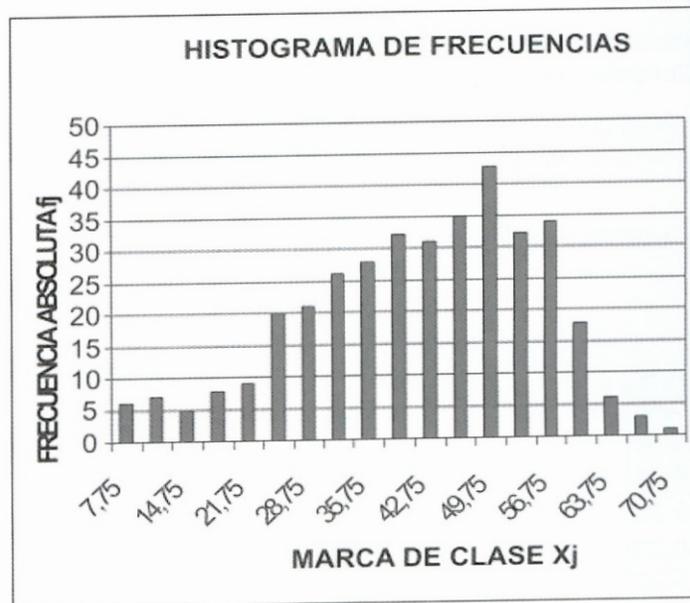


Figura 11. Marcas de clase de las cargas, según el aforo realizado en el momento de la toma de datos.

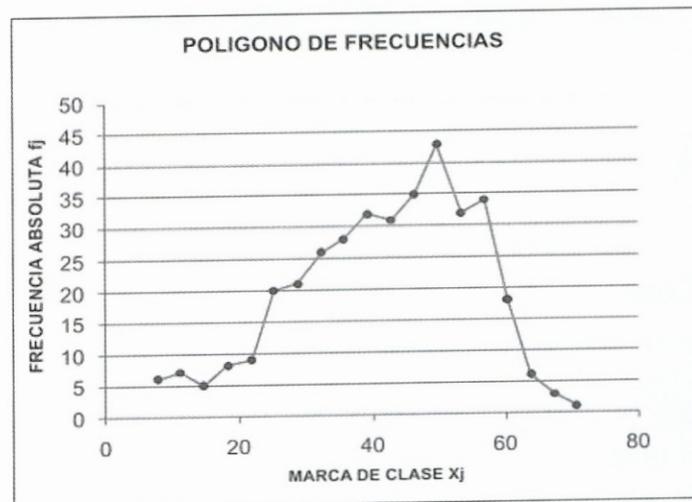


Figura 12. Diagrama de la frecuencia absoluta de la marca de clase.

Número de datos de la muestra= 365 vehículos

Valor máximo= 53.6 ton.

Valor mínimo= 7 ton.

Media aritmética= 41.6 ton.

Mediana= 43.3 ton.

Desviación media= 11.0 ton.

Desviación típica= 9.62 ton.

Corrección de sheppard= 91.6 ton².

Desviación típica corregida=9.6 ton.

Campana de Gauss

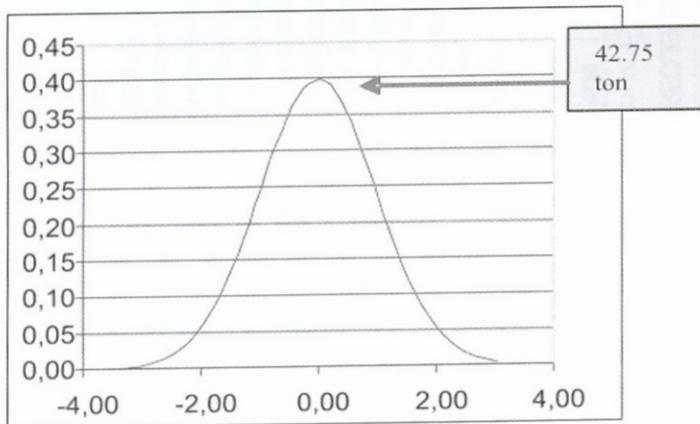


Figura 13. Diagrama de la Campana de Gauss, con los datos procesados.

Conclusión

Una vez hecho el análisis estadístico se definió que la carga armónica patrón, que se obtuvo en el momento de la toma de datos del sensor, fue de 42.75 ton.

9.1. Instalación del acelerómetro en la viga del puente



Foto 3. Instalación del acelerómetro en la parte inferior de una de las vigas centrales del Puente Guahibo .



Foto 4. Acelerómetro fijado y adherido en la base de la viga .

Sensor dispuesto bajo de la viga del margen derecho de Villavicencio a Bogotá.



Foto 5. Verificación por parte del ingeniero electrónico, para confirmar su correcto funcionamiento

Instalación del sensor, en la parte inferior de la viga intermedia se aprecia al ingeniero electrónico preparando los equipos para iniciar a la toma de datos.



Foto 6. Verificación del estado actual de los apoyos

Se aprecia el apoyo en neopreno en aparente funcionamiento, es decir en buen estado con desgaste normal.

9.2. Procesamiento de los datos tomados en el puente

Diagramas de recolección de datos con el espectro de potencia, para encontrar el periodo máximo

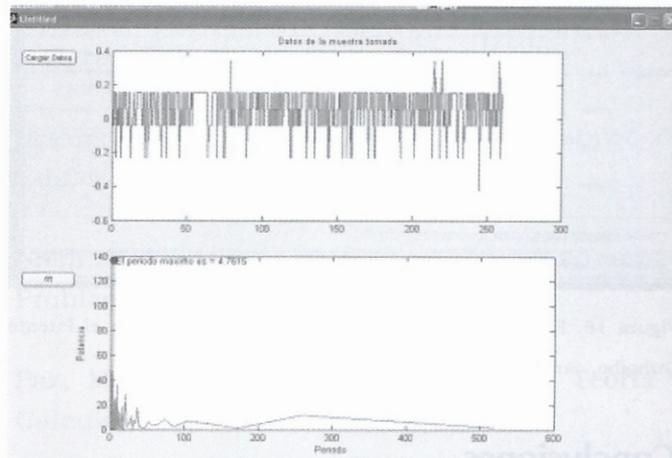


Figura 14. Formulario de visualización de peridograma # periodo, para el puente Guhaibo, Carretera Bogotá -Villavicencio.

Una vez procesada la información se puede determinar que el periodo máximo es de 4.7615 segundos /Ciclos valor que, posteriormente, se convierte en la frecuencia expresada en rad/seg y se procesa en el formulario principal denominado datos de entrada

9.3. Formulario principal

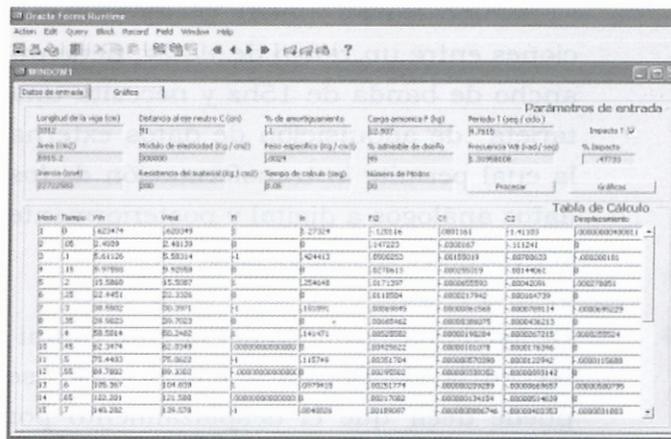


Figura 15. Formulario de captura de datos y cálculo del desplazamiento de acuerdo al número de modos Puente Guahibo.

Formulario principal con los datos iniciales de la viga y tabla de cálculo para los diferentes modos con sus respectivos desplazamientos.

9.4. Datos de salida

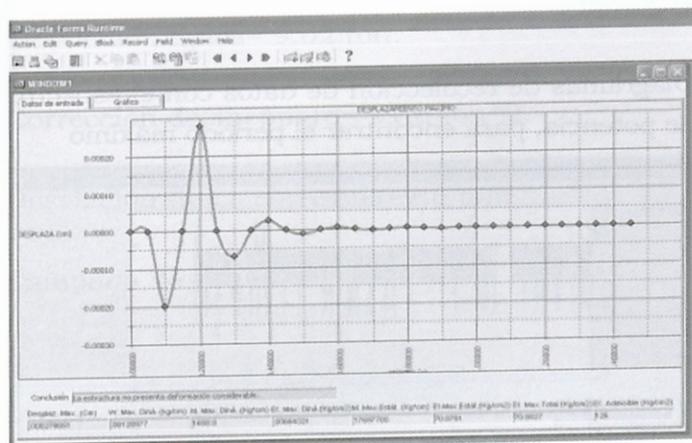


Figura 16. Formulario de desplazamiento # tiempo, para el Puesto Guahibo, carretera Bogotá-Villavicencio.

Conclusiones

1. El análisis dinámico y programa desarrollado permite realizar el cálculo del desplazamiento, los esfuerzos que pueden ocurrir en la estructura (vigas), por causa de cargas móviles.
2. El equipo sensor, con su tarjeta de adquisición de datos, permite medir las aceleraciones o vibraciones en tiempo real.
3. El equipo sensor puede medir aceleraciones entre un rango de $\pm 2g$, tiene un ancho de banda de 15hz y necesita una tarjeta de adquisición de datos externa la cual permite la transformación de los datos analógicos a digital y posteriormente ser enviados al computador.
4. De los datos extraídos del puente Guahibo, en la vía Bogotá – Villavicencio, se puede decir que el desplazamiento por carga dinámica es casi despreciable y que el esfuerzo total comparado con el por-

centaje de esfuerzo de diseño es menor, lo que se deduce que la viga del puente no presenta cambios bruscos por la acción de cargas dinámicas.

5. Una limitación presentada, en la prueba de campo, fue falta de abastecimiento directo de energía eléctrica para la recarga de la batería que alimentaba los equipos de medición, lo que originó lentitud en la toma de datos y una duración muy corta en la toma de los mismos. Se realizaron mediciones de aceleración durante una hora, debido a este impedimento.
6. Únicamente se hizo prueba al puente Guahibo debido a que esta estructura permitía el fácil acceso y colocación del sensor en una de las vigas del puente. Otros puentes eran demasiado altos y el cable de alimentación no alcanzaba y no se podía colocar el acelerómetro en cualquiera de las vigas.
7. La falta de datos básicos de diseño de la viga, del puente Guahibo, se convirtió en un impedimento para el ejercicio de los cálculos, lo que ocasiona inconsistencias en los resultados, ya que se recurrió a tomar medidas directas a la viga y luego a hacer cálculos muy aproximados como es el caso del área y la inercia de la sección transversal.
8. La falta de sensibilidad del sensor causó pérdida de información importante; puesto que, a la hora de la revisión de los datos recolectados por el acelerómetro, se observaron datos que no correspondían a una situación real del evento. Este análisis se hizo cuando se bajaron y procesaron los datos en una gráfica de aceleración contra tiempo.
9. De la información recolectada y analizada por el sistema de adquisición y el

programa de análisis dinámico para vigas simplemente apoyadas con propiedades distribuidas se puede dar un bosquejo, aproximado, de la situación real, de la viga de un puente sometida a cargas móviles.

Recomendaciones

1. Para cubrir el problema de la batería de alimentación puede recurrirse a sistemas de adquisición (tarjeta recopiladora y sensor) con bajo consumo de energía; para el caso del acelerómetro uniaxial, que nosotros adquirimos, el consumo era elevado. Podría pensarse en sensores piezoeléctricos.
2. Respecto a la sensibilidad del sensor, se debería buscar uno con un ancho de banda superior 20 hz y un rango de gravedad de +/- 5g, que por costos no se pudo adquirir.
3. Para el problema de colocación del instrumento a puentes de galibos significativos, se podría recurrir a sistemas inalámbricos de comunicación entre el sensor y la tarjeta de adquisición de datos.
4. Siempre que se instrumente un puente se deben tener, con anterioridad si existen, los datos básicos de diseño del mismo para que los cálculos posteriores sean aproximados a la realidad.

Bibliografía

- Chapra. 2001. Métodos Numéricos Para Ingenieros.
- Código Sísmico de Puentes. 1995. INVIAS.
- Cuestas A - Celis O. 2007. Análisis Dinámico en Vigas con Propiedades Distribuidas.
- Fitgerad Robert. Mecánica de Materiales.
- Maldonado y Chio. 2004. Análisis Sísmico de Edificaciones, UIS .
- Nash, William. Resistencia de Materiales Teoría y Problemas de aplicación. Serie Schaum.
- Paz, M. 1992. Dinámica Estructural Teoría y Calculo; Editorial Reverte .España.
- Segura Franco J. Estructuras en Concreto.
- Timoshenko. Dinámica Superior. Pág. 369-365
- Timoshenko. Vibration Problems.