**Capítulo 8. Puente San Cristóbal**

**8.1 Introducción**

México es una zona donde los sismos y el viento son factores que afectan las construcciones de manera importante, es por ello que se requiere de un análisis para ambos casos. Los puentes carreteros que llegan a ser muy largo tienen periodos largos lo cual los hace susceptibles a efectos del viento es por ello que se decidió hacer el análisis de viento del puente San Cristóbal ya que en el 2006 colapso siendo el viento una posible causa.

**8.2 Descripción del proyecto**

El puente conecta San Cristóbal de las casas con Tuxtla Gutiérrez ubicado en las coordenadas 16.694278, -92.821903 en la carretera de cuota Tuxtla Gutiérrez – San Cristóbal de las casas. Debido a la orografía de la zona era necesario construir en puente para salvar un claro de aproximadamente 324m como se muestra en la Figura 8.1.

|  |
| --- |
|  |
| Figura 8.1 Localización del puente San Cristóbal |

El puente se localiza en una curva horizontal con una curvatura de 2°45’ y pendientes transversales y longitudinales de 10% y 5%, respectivamente. La subestructura está compuesta de dos estribos de concreto reforzado convencionales y dos pilas del mismo material de sección transversal rectangular hueca, aproximadamente, de 61 m de altura cada una. La profundidad máxima desde la superestructura al fondo de la barranca era de 192 m.

La superestructura consiste en un cajón de tres tramos con una longitud total de 324 m y una altura de 192 m (Figura 10.2). El ancho de calzada es de 13.64 m con dos carriles (Figura 10.4) (Instituto Ingeniera UNAM, 2006).

|  |
| --- |
|  |
| Figura 8.2 Elevación del puente San Cristóbal |

|  |
| --- |
|  |
| Figura 8.3 Dimensiones de las dovelas |

El método constructivo que se empleó para el puente fue a partir del empujado de dovelas donde se van colocando a partir de los extremos hasta unirse en el centro (García, 2007). Esto causa que el puente se encuentre en voladizo haciéndolo más flexible en la construcción que en operación, es por ello se revisó en esta etapa. Los datos mostrados en la tabla 10.1 describen las propiedades para 14 dovelas.

**8.3 Propiedades de la estructura**

Para el análisis eólico de la estructura, se consideró solo la superestructura. Los coeficientes aerodinámicos se obtuvieron de (Rosales, 2016) los cuales se muestran en la Tabla 10.2, las propiedades dinámicas se obtuvieron en colaboración de Francisco, los cuales se muestran en la Tabla 10.1. En el apéndice B se muestra la obtención de las masas modales y momentos másico de inercia.

Tabla 8.1 Propiedades dinámicas del puente San Cristóbal

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Dato | Símbolo | Valor |
| Masa modal () |  | 18936.72 |
| Momento másico de inercia  () |  | 154172.74 |
| Frecuencia angular horizontal () |  | 6.10 |
| Frecuencia angular vertical () |  | 3.98 |
| Frecuencia angular a torsión () |  | 13.92 |
| Longitud total () |  | 159.80 |
| Amortiguamiento crítico en ambas direcciones |  | 0.05 |
| Ancho del tablero () |  | 13.64 |
| Peralte del tablero () |  | 7.74 |
| Altura sobre el terreno () |  | 192.00 |

Tabla 8.2 Coeficientes aerodinámicos del puente San Cristóbal

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Angulo de ataque |  | 0° |
| Coeficiente de arrastre |  | 1.83 |
| Coeficiente de levante |  | 1.27 |
| Coeficiente de momento |  | 0.76 |
| Derivada del coeficiente de arrastre |  | -0.3 |
| Derivada del coeficiente de levante |  | 0.5 |
| Derivada del coeficiente de momento |  | -0.05 |

**8.4 Resultados**

**8.4.1 Velocidad de diseño e intensidad de turbulencia**

Basado en la tabla C.1 del apéndice del manual de Diseño de Obras Civiles (MDOC, 2008) se tiene que la velocidad regional es lo que equivale a , la categoría de terreno, basado en la Tabla 3.2, se tomó como 2. Los valores necesarios para la obtención de la velocidad diseño son: ,  y de acuerdo a la Tabla 3.2..

Dado que la velocidad de diseños del manual de Diseño de Obras Civiles está promediada a 3 s y las ecuaciones empeladas del Eurocódigo son a 10 min se aplica la Tabla 3.1 considerando que es un terreno casi abierto se elige el factor «en tierra», por lo que la velocidad de regional promediada a 10 min es

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

Con esta velocidad se puede obtener la velocidad de diseño para la altura del puente quedando

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

La intensidad turbulenta es:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

**8.4.2 Ráfagas**

A partir de la velocidad diseño y las propiedades del puente de la Tabla 8.1 y 8.2 se obtuvo la respuesta en el dominio del tiempo con el programa «buffeting.m» de MATLAB del apéndice C.

La función de densidad de Kaimal se muestra en la Figura 10.4

|  |
| --- |
|  |
| Figura 8.4 Función de densidad de Kaimal para San Cristóbal de las casas |

Se puede observar que se tiene mayor respuesta en la dirección paralela al viento en frecuencias bajas, pero a partir de frecuencias mayores las funciones de densidad llegan a tener valores similares.

En la Figura 10.5 se pueden observar las funciones de admitancia mecánica, es decir, en que frecuencias tiene mayor respuesta mecánica. Se puede observar que la componente  (paralela al flujo de viento) tiene mayor respuesta para las frecuencias cercanas a 4 y la componente  (transversal vertical) tiene mayor respuesta para frecuencias cercanas a 6 aunque son menores comparadas a la componente . Hay que tener en cuenta que esta función depende del amortiguamiento aerodinámico y este a su vez de la velocidad de diseño por lo que la admitancia varía dependiendo de la velocidad de diseño, en este caso 38.24 m/s.

|  |
| --- |
|  |
| Figura 8.5 Función de admitancia mecánica para el puente San Cristóbal |

En la Figura 8.6 se muestra la función de admitancia conjunta, la cual correlaciona la fuerza del viento con las propiedades aerodinámicas del puente. Se puede observar que la admitancia en ambos casos es similar aunque su pico máximo sea en diferentes frecuencias.

|  |
| --- |
|  |
| Figura 8.6 Función de admitancia conjunta del puente San Cristóbal |

Las frecuencias de los modos horizontales y verticales son 6.10 y 3.98 respectivamente los cuales corresponden a valores muy bajos de la función de admitancia conjunta, esto quiere decir que la respuesta del puente ante ráfagas es baja por lo que la mayor contribución será de la parte estática.

A partir de estos datos se puede obtener la función de respuesta la cual se muestra en la Figura 8.7, el cual muestra valores pequeños para ambos sentidos siendo la componente vertical la que tiene mayor respuesta.

|  |
| --- |
|  |
| Figura 8.7 Espectro de respuesta del puente San Cristóbal |

En la Figura 10.8 se muestra la simulación en el dominio del tiempo donde se puede observar que los desplazamientos son pequeños llegando a 2 cm para la componente horizontal y 8 cm en la vertical. En la Tabla 8.3 se muestran las desviaciones estándar, factores pico y desplazamientos máximos en las dos direcciones.

|  |
| --- |
|  |
| 1. Desplazamientos verticales |
|  |
| 1. Desplazamientos horizontales |
| Figura 8.8 Desplazamientos del puente San Cristóbal |

Tabla 8.3 desviación estándar, desplazamientos máximos y factores picos del puente San Cristóbal ante efectos de ráfaga

|  |  |
| --- | --- |
|  | 0.008 m |
|  | 0.0243 m |
|  | 0.0236 m |
|  | 0.0798 m |
|  | 2.9406 |
|  | 3.5756 |

En la Figura 8.9 se puede observar la variación de los desplazamientos a diferentes velocidades, se puede observar como a mayor velocidad el desplazamiento vertical se incrementa más que la componente horizontal.

|  |
| --- |
|  |
| Figura 8.9 Variación de los desplazamientos contra velocidad |

**8.4.2 Vórtices**

Para el desprendimiento de vórtices se usaron los datos los cuales propone (Helliesen, 2013) debido a que no se cuenta con estas propiedades del puente San Cristóbal a excepción del número de Strouhal el cual se obtuvo del Eurocodigo, 2004. En la Tabla 8.4 se muestran los valores usados. Se usó el programa en el apartado C.3 del apéndice C.

Tabla 8.4 Propiedades ante efectos de vórtices del puente San Cristóbal

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Dato | Símbolo | Valor |
| Valor asociado con la naturaleza autolimitante del desprendimiento de vórtices |  | 0.4 |
| Longitud de escala adimensional de la coherencia en dirección vertical |  | 2.0 |
| Coeficiente adimensional de la raíz cuadrada media de la fuerza de levante |  | 1.0 |
| Parámetro de ancho de banda en la dirección vertical |  | 0.15 |
| Número de Strouhal |  | 0.11 |
| Coeficiente de velocidad dependiente al amortiguamiento |  | 0.2 |

Para el desprendimiento de vórtices, se considera que es altamente resonante por lo que los desplazamientos ya no se le agrega el desplazamiento medio. En el caso del puente San Cristóbal la velocidad resonante fue de 44.43 m/s lo cual es superior a la velocidad media. En la Figura 8.10 se muestra la respuesta en el dominio del tiempo donde se puede ver que los desplazamientos llegan a ser de 1 m, lo cual se considera alto para el puente.

|  |
| --- |
|  |
| Figura 8.10 Respuesta del puente San Cristóbal en el dominio del tiempo para una velocidad resonante de 44.43 m/s |

En la Figura 8.11 Se muestra la función de transferencia mecánica donde se puede observar que es superior a las de ráfagas debido a que el amortiguamiento aerodinámico en los vórtices es negativo mientas que para las ráfagas es positivo.

|  |
| --- |
|  |
| Figura 8.11 Función de transferencia mecánica para el desprendimiento de vórtices |

En la Figura 8.12 se muestra el espectro de carga el cual ya incluye la correlación. Se puede observar que para la frecuencia circular de 3.98 rad/s el cual equivale a la frecuencia del modo vertical la función de transferencia y es espectro de carga tienen su pico máximo.

|  |
| --- |
|  |
| Figura 8.12 Función de espectro de carga para el desprendimiento de vórtices |

En la Figura 8.13 Se muestra el espectro de respuesta el cual se muestran valores altos aunque no abarca un rango grande de frecuencias por lo que lo hace de banda estrecha.

|  |
| --- |
|  |
| Figura 8.13 Espectro de respuesta del puente San Cristóbal para desprendimiento de vórtices |

Si se grafican los desplazamientos máximos a diferentes velocidades como se muestra en la Figura 8.14 se puede observar que los desplazamientos son grandes incluso para velocidades resonantes mayores a la calculada, también se puede observar que el incremento considerable se da a partir de los 30m/s.

|  |
| --- |
|  |
| Figura 8.14 Desplazamientos máximos del puente San Cristóbal a diferentes velocidades |

**8.5 Aeroelasticidad**

**8.5.1 Divergencia estática**

Para la divergencia estática se considera que la forma modal expuesta y la de la estructura es la misma, el momento másico de inercia es y su frecuencia 

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

La velocidad crítica supera las velocidad máximas registradas por huracanes de categoría 5 por lo que la divergencia estática no se presentará.

**8.5.2 Galopeo**

Para que se dé el galopeo se requiere que se cumpla la siguiente desigualdad

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

Dado que la desigualdad es falsa no se presentará galopeo. Otra forma de comprobarlo es con la derivada aerodinámica  (Figura 8.15) donde se la inestabilidad con valores positivos para esta derivada aerodinámica donde el puente San Cristóbal presenta valores negativos.

**8.5.3 Inestabilidad a torsión**

Usando el método Quasy-Steady no se presenta la inestabilidad por torsión

**8.5.4 Aleteo**

Para considerar el aleteo se requieren las derivadas aerodinámicas del puente San Cristóbal las cuales se presentan en la Figura 8.15 (Arias,2012). Para obtener la velocidad crítica de la Figura 8.16 se empleó el programa «Vortices.m» del apéndice C

|  |
| --- |
|  |
|  |
| Figura 8.15 Derivadas aerodinámicas para el puente San Cristóbal |

En la figura 8.16 se tienen las gráficas de los valores reales e imaginarios, siendo el punto de intersección el valor de la velocidad crítica donde se genera la inestabilidad.

|  |
| --- |
|  |
| Figura 8.16 Raíces de la parte imaginaria y real de la determinante de la matriz de impedancia para el puente San Cristóbal |

El punto de intersección es  y  por lo que

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

**8.5.5 Respuesta en el dominio del tiempo ante aleteo**

Para obtener la respuesta primero se requiere obtener la simulación de velocidad como se mostró en el capítulo 5. Para el puente San Cristóbal se muestra la simulación de ráfagas en las dos direcciones en la Figura 10.17 las cuales se obtuvieron considerando coherencia entre los puntos aplicando el programa «SimulacionesWAWS.m» del apéndice C.

|  |
| --- |
|  |
| 1. Velocidad fluctuante en la dirección u |
|  |
| 1. Velocidad fluctuante en la dirección w |
| Figura 8.17 Simulación de velocidades para el puente San Cristóbal |

En la Figura 8.18 se muestra la respuesta ante aleteo y en la tabla 8.5 se muestran los desplazamientos, desviación estándar y factor pico. Para ello es empleo el programa «flutterOde45.m» del apéndice C

|  |
| --- |
|  |
| Figura 8.18 Respuesta ante el efecto de aleteo del puente San Cristóbal |

Siendo el desplazamiento vertical máximo 0.3772 m

Tabla 8.5 Resultados de la respuesta ante el aleteo

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Dato | Símbolo | Valor |
| Desviación estándar a torsión |  | 0.0016 |
| Desviación estándar a flexión vertical |  | 0.09538 |
| Rotación máxima |  | 0.0068 rad |
| Desplazamiento máximo vertical |  | 0.3772 m |
| Factor pico a torsión |  | 4.3592 |
| Factor pico a flexión vertical |  | 4.0224 |

Se puede observar que el desplazamiento es considerablemente mayor que al efecto ante ráfagas, a pesar de que no presenta inestabilidad aeroelástica por aleteo a esta velocidad. Para verificar si existe inestabilidad, por medio del programa «flutterOde45.m» se asigno la velocidad fluctuante en las direcciones u y w igual a 0, además se escogió de forma arbitraria las condiciones iniciales de desplazamiento horizontal de 1 cm y rotación de 0.001 rad. En la Figura 8.19 se muestra su comportamiento en vibración libre.

|  |
| --- |
|  |
| Figura 8.18 Respuesta ante el efecto de aleteo del puente San Cristóbal |

Esta es otra forma de verificar que la estructura es estable ante aleteo, sin embargo tiene desplazamientos considerables.

A continuación se muestra el resultado para diferentes velocidades ante efecto de aleteo en la Tabla 8.6, donde la segunda columna se muestra el valor de la velocidad fluctuante con media de cero, y la tercera columna es el desplazamiento de la velocidad media más la velocidad fluctuante.

Tabla 8.6 Desplazamientos máximos debido al aleteo a diferentes velocidades

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Velocidad(m/s) | Desplazamiento vertical fluctuante(m) | Desplazamiento vertical total (m) |
| 39.16 | 0.3772 | 0.4930 |
| 50 | 0.5396 | 0.7269 |
| 60 | 1.1809 | 1.4488 |
| 70 | 1.3339 | 1.6963 |
| 80 | 1.8069 | 2.2777 |
| 90 | 2.5538 | 3.1468 |
| 100 | 2.6996 | 3.4287 |

**8.6 Conclusiones**

En este capítulo se obtuvo la respuesta del puente San Cristóbal ante diferentes cargas, siendo las ráfagas las que menor efecto tenia, también se observó que ante las cuatro condiciones de inestabilidad la velocidad crítica esta fuera del rango de velocidades que se pueden alcanzar en la naturaleza. En el caso del aleteo se puede observar que los desplazamientos fueron muy superiores a las ráfagas por lo que la torsión influyó en los desplazamientos alcanzando un valor de 0.49m. En cuanto al desprendimiento de vórtices, se puede ver que tiene desplazamientos importantes, logrando alcanzar hasta 1 m por lo que este pudo ser un causante de que la columna fallara en 2006.

**8.7 Referencias**

Arias Rojas, H. (Agosto de 2012). Respuesta eólica de un puente en curva . Universidad Michacana de San Nicolás de Hidalgo.

Eurocode (Junio de 2002). Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions Windactions

García Pérez, D. (2007). Reconstrucción del puente San Cristóbal, en el estado de Chiapas. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México.

Rosales García, I. (Junio de 2016). Coeficientes Aerodinámicos de Tableros de Puentes. Universidad Nacional Autónoma de México.

UNAM, I. d. (2006). Instituto de Ingeniera UNAM. Obtenido de http://eventos.iingen.unam.mx/Informe2005\_2006/A\_2\_3\_san\_cristobal.html