

RIVER – PUENTE PEATONAL

Margueirat, Carlos Estanislao, Ing.; Kolmaier, Fernando Nicolás, Arq.;
Pola, Marcelo César, Ing.
SACEM Soluciones Estructurales
jornadas@sacem.com.ar

RESUMEN

Proyecto de cálculo y verificación de los elementos estructurales del puente peatonal que conecta los palcos con el nuevo hall en el estacionamiento del Estadio Monumental del Club Atlético River Plate.

El puente tiene una longitud de 32,40 m, una altura de 3,00 m y un ancho de 5,00 m. Su estructura lateral estará compuesta por vigas reticuladas, con una cubierta a dos aguas, un piso tipo "Steel Deck" y laterales vidriados.

Los puentes peatonales presentan la particularidad de ser muy sensibles a la circulación de personas, ya que en algunos casos pueden experimentar desplazamientos u oscilaciones provocados por el tránsito peatonal, generando una sensación incómoda para los usuarios. Por lo tanto, es fundamental determinar el factor de pandeo global, el período y la frecuencia de la estructura mediante un análisis no lineal.

ABSTRACT

Calculation and verification project of the structural elements comprising the pedestrian bridge connecting the skyboxes with the new hall in the parking lot of the Monumental Stadium of Club Atlético River Plate.

The bridge has a length of 32.40 m, a height of 3.00 m, and a width of 5.00 m. Its lateral structure will be composed of truss beams, with a gable roof, a "Steel Deck" type floor, and glazed sides.

Pedestrian bridges are particularly sensitive to foot traffic, as they may experience displacements or oscillations caused by pedestrian movement, leading to discomfort for users. Therefore, it is crucial to determine the global buckling factor, period, and frequency of the structure through a nonlinear analysis.

Organiza:

INTRODUCCION



Fotografías 1 y 2.

La reducción del aporticamiento respecto del proyecto estructural de licitación, lleva a una estructura menos rígida, con las consecuencias sobre el confort en un puente peatonal como se indica más abajo.

Se hace esta consideración, porque los puentes peatonales tienen la particularidad de ser muy sensibles a la circulación de personas, debido a que, en algunos casos, aparecen desplazamientos/oscilaciones producidas por la misma circulación peatonal, que provocan una sensación muy incómoda para el que lo transita.

Los causales de los posibles movimientos de la estructura del Puente, se describen más abajo con mayor detalle, pero se puede decir que fundamentalmente es un fenómeno dinámico, producido por las personas al caminar y/o correr sobre dicho Puente.

CAUSA QUE PRODUCE LAS OSCILACIONES

Aunque ha habido muchos estudios de puentes con problemas de vibraciones en el pasado, se empezó a prestar gran atención a este tema después del 10 de junio del año 2000, tras la apertura del Puente Millenium en Londres, el cual presentó vibraciones horizontales excesivas producidas por los peatones el día de su

Organiza:

inauguración.

La Ingeniería Estructural había sido desarrollada por la empresa ARUP, de trayectoria internacional.

Cuando una persona camina sobre la calzada, adicionalmente al peso, crea un patrón de carga conforme a la masa, sube y baja.

Se crea una fuerza fluctuante de aproximadamente 750 N. que se repite con cada paso.

También existe una pequeña fuerza lateral de aproximadamente 25 N. causada por el balanceo de la masa en movimiento, debido a que las piernas están separadas.

Por lo general el equilibrio no se ve afectado por movimientos verticales, en cambio, los movimientos laterales si lo afectan.

Si la superficie por donde se camina oscila lateralmente, la persona comienza a abrir más las piernas para mantener el equilibrio, incrementando la fuerza horizontal que ejerce en la superficie (> 25 N.).

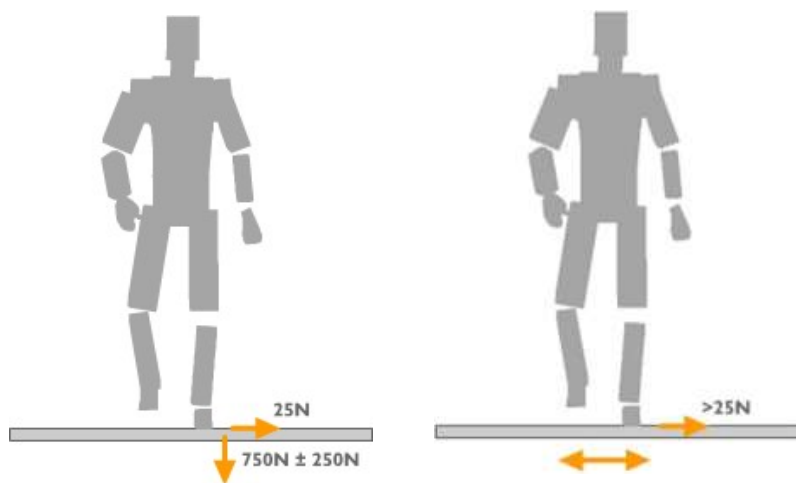


Figura N°1. Resultados de estudio. Fuerza horizontal.

En la Figura N°1, se puede observar un estudio realizado en laboratorio, en el cual se sometió a personas a transitar sobre una cinta que además de su movimiento regular de avance sobre rodillos, oscilaba lateralmente con amplitudes similares a las de estudio, para evaluar el equilibrio de los peatones y su comportamiento para contrarrestarlas, comprobándose la tendencia a separar las piernas para no perder el equilibrio.

En el gráfico de Figura N° 2, la línea roja representa la fuerza de excitación lateral que se incrementa con el movimiento de la superficie.

Organiza:

La línea celeste, representa la resistencia natural a la excitación de la pasarela (amortiguamiento de la estructura), que es una propiedad intrínseca que tienen todas las estructuras.

A medida que el número de peatones aumenta, la fuerza de excitación lateral puede incrementarse, pero el amortiguamiento de la estructura es el mismo, ya que es una propiedad inherente de la estructura.

Siempre que la fuerza de amortiguamiento sea mayor que la fuerza de excitación, los movimientos laterales serán pequeños (Figura N.º 2)

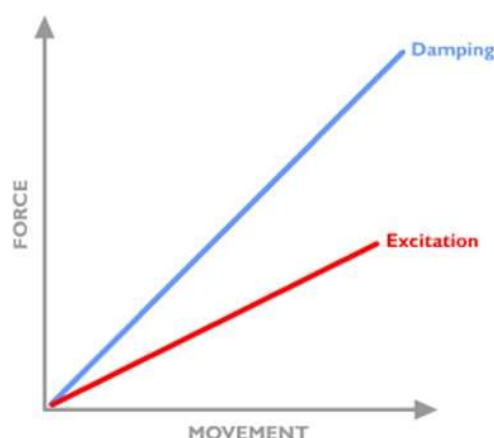


FIGURA N°2

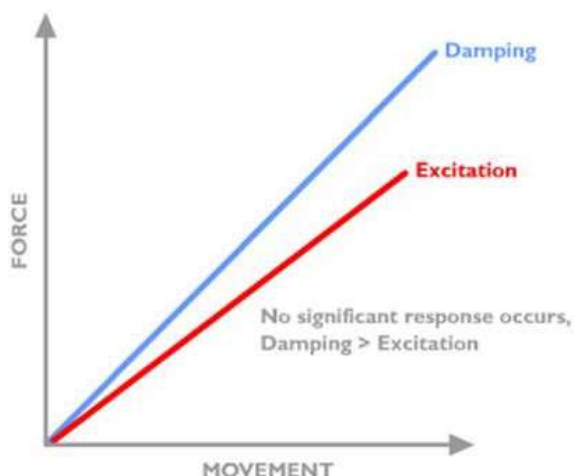


FIGURA N°3. Gráfica de fuerzas de excitación y amortiguamiento en función del movimiento.

Organiza:

Las fuerzas de excitación se incrementan, pero no superan las de amortiguamiento. Si el número de peatones aumenta de tal manera que la fuerza de excitación es mayor que la capacidad de amortiguamiento de la estructura, se produce la VIBRACIÓN LATERAL SINCRONIZADA, incrementándose los movimientos de manera extraordinaria

La Figura N°4 representa la Aceleración lateral en función del número de peatones y el tiempo.

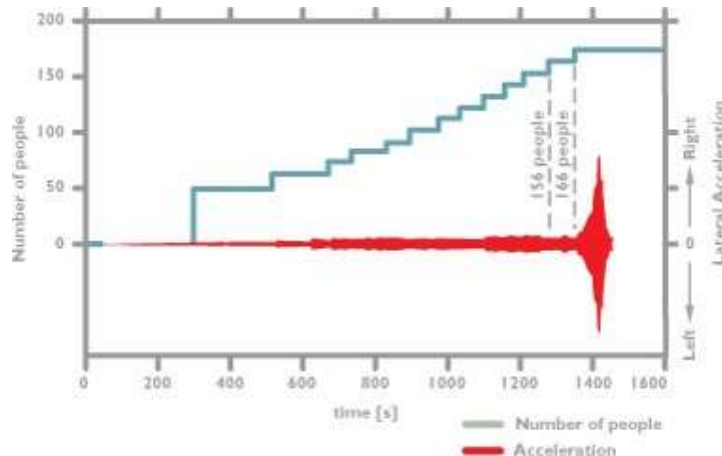


FIGURA N°4.

Los ingenieros de ARUP descubrieron que existe una relación clara y bien definida entre la fuerza que se ejerce hacia los lados cuando se camina por una superficie en movimiento, y la velocidad de esa superficie:

$$F = k \times V \quad (1)$$

Usando esta fórmula, es posible calcular cual será la cantidad de peatones que producirá la Vibración Lateral Sincronizada.

El siguiente gráfico, indica los resultados de una prueba de multitud realizada en diciembre del 2000 (Figura 16). El mismo consistía en el ingreso progresivo de peatones a la pasarela, y la medición de la aceleración de esta.

Organiza:

Partiendo de un número de 50 personas, los incrementos fueron graduales en el tiempo, ingresando en camadas de 10 personas, en períodos acotados de tiempo. Conforme se incrementaba el número de peatones, se fueron registrando pequeñas aceleraciones laterales del tablero, que parecían imperceptibles, ya que no se observaban signos de pérdida de equilibrio de estos.

Esto fue así hasta el momento en el que circulaban 156 personas sobre la pasarela, momento a partir del cual, al ingresar la siguiente camada de 10 personas, se produjo un incremento súbito de la aceleración lateral del tablero, tan intenso, que se produjo un fenómeno de inestabilidad de los transeúntes, perdiendo el equilibrio en el paso, y comprobando lo sucedido durante la inauguración del *Millennium Bridge*.

Se descubrió entonces, que una pequeña alteración de un parámetro de entrada, en este caso un incremento de tan solo 10 personas en un tablero en el que ya circulaban 156, produjo un repentino incremento asintótico de la aceleración horizontal que se tradujo en un fenómeno de inestabilidad.

En la Tabla siguiente se transcriben las frecuencias, velocidades y el paso, para las distintas formas en que una persona se desplaza.

	f_s	v_s	l_s
	[Hz]	[m/s]	[m]
slow walking	1.7	1.0	0.60
normal walking	2.0	1.5	0.75
fast walking	2.3	2.3	1.00
normal running	2.5	3.1	1.25
fast running	>3.2	5.5	1.75

TABLA N°1 – DESPLAZAMIENTO DE PERSONAS

Si se consideran las frecuencias entre caminar despacio y correr en forma normal, se puede observar que los valores críticos están comprendidos entre 1.7 Hz y 2.5 Hz, lo que indicaría que valores de frecuencia natural no puede tener el Puente Peatonal.

Vale decir, que la frecuencia natural del Puente Peatonal no puede estar comprendida dentro de esos valores, para no correr riesgo de sufrir oscilaciones no deseadas.

Organiza:

Tabla 2. Velocidades y frecuencias de paso ejercidas por un peatón (Bachmann *et al.*, 1995)

Actividad peatonal	Velocidad (m/s)	Frecuencia peatonal		
		Vertical (Hz)	Horizontal (Hz)	Longitudinal (Hz)
Caminata lenta	1.1	1.7	0.85	1.7
Caminata normal	1.5	2.0	1.0	2.0
Caminata rápida	2.2	2.3	1.15	2.3
Carrera lenta	2.5	2.1	1.05	2.1
Carrera normal	3.3	2.5	1.25	2.5
Carrera rápida	5.5	3.2	1.6	3.2

TABLA N°: 2 – COMPLEMENTARIA DE LA TABLA N°: 1

CONTROL DE VIBRACIONES INDUCIDAS POR PEATONES. GUÍAS DE DISEÑO.

Para evitar vibraciones excesivas, los puentes peatonales se diseñan usualmente siguiendo dos principios: el primero consiste en diseñar una estructura tal que sus propiedades dinámicas permanezcan fuera de un cierto rango de frecuencias críticas del paso humano, y el segundo, implica la realización de análisis dinámicos que permitan verificar la respuesta del puente a las acciones del paso peatonales, y que la misma cumpla con las premisas de confort y servicio impuestas como requisitos de partida en el diseño.

Estos dos principios fueron adoptados en códigos de diseño para puentes peatonales, que tuvieron en cuenta el efecto de vibraciones laterales y la sincronización.

La guía de diseño francesa para puentes peatonales SETRA [1] por ejemplo, define el criterio de aceleración específica como la transición entre el azar (peatones caminando normalmente) y la sincronización (peatones caminando en sincronía).

Sobre la base de los resultados del estudio del Millennium Bridge, la guía de diseño para puentes peatonales del FIB [2] especifica el factor de amortiguamiento necesario y el número crítico de peatones que provocaría la sincronización lateral.

Organiza:

Más recientemente, hubo un esfuerzo colectivo de los investigadores europeos para proporcionar una guía más completa para el diseño de pasarelas contra la vibración inducida por peatones H.I.V.O.S.S..

Esta última guía surgió a partir de un proyecto de investigación denominado SYNPEX (Advanced load models for synchronous pedestrian excitation and optimised design guidelines for Steel footbridges) subvencionado por el Research Fund for Coal Steel de la Comisión Europea, realizado de septiembre de 2003 a agosto de 2006 (Proyecto N° RFSR-CT-2002-00019), el cual, tomaba además bases conceptuales de las guías anteriormente mencionadas, y se tradujo en un extenso trabajo que impedía establecer una metodología práctica de diseño, llevando a la necesidad de elaborar una guía de diseño completa, denominada H.I.V.O.S.S. Human Induced Vibration of Steel Structures, Design of Footbridges Guideline. Esto llevó a la necesidad de actualizar diferentes códigos, como se cita a continuación:

Code / Standard	Limit values	
	Vertical	Horizontal
American Guide Spec.	< 3 Hz	< 1.3 Hz
Eurocode 2 (ENV 1992-2)	1.6 Hz - 2.4 Hz	0.8 Hz – 1.2 Hz
DIN-Fachbericht 102	1.6 Hz - 2.4 Hz, 3.5 Hz - 4.5 Hz	
Eurocode 5 (ENV 1995-2)	< 5 Hz	< 2.5 Hz
SBA (former East Germany)	1.0 Hz – 3 Hz	
SIA 260 (Switzerland)	1.6 Hz – 4.5 Hz	< 1.3 transverse < 2.5 longitudinal
BS 5400 (Great Britain)	< 5 Hz	
Austroroads (Australia)	1.5 Hz– 3 Hz	
Japanese Footbridge Design Code (1979)	1.5 Hz– 2.3 Hz	

TABLA N°3: RANGO DE FRECUENCIA CRÍTICAS

CONCLUSIONES

A criterio de este Estudio, el diseño del Puente Peatonal presentado por **LA EMPRESA CONSTRUCTORA** no cumple con los requisitos establecidos para que sea confortable por parte de los usuarios, por los motivos que mencionan más abajo.

RIGIDEZ.

Organiza:

A pesar de que se redujo la luz en comparación con el Puente Peatonal de licitación, se fueron eliminando elementos que rigidizaban la estructura.

Del análisis dinámico de ambos puentes, surge que el de LA EMPRESA CONSTRUCTORA tiene un período fundamental mucho más alto, y una frecuencia natural mucho más baja.

PORTICOS DE RIGIDIZACIÓN.

Se eliminaron los pórticos de rigidización del proyecto original de licitación, ubicados en los extremos del puente.

Además, estos pórticos contienen al plano horizontal formado por las estructuras del techo (cordones longitudinales, parantes y tensores).

UNIONES ABULONADAS.

En el proyecto de licitación, todas las uniones eran rígidas, o sea soldadas.

En la primera presentación que efectuaron de la Ingeniería, las uniones eran abulonadas, motivo por el cual no se aprobaron las mismas, porque el puente presentaba mecanismos (inestabilidades locales).

CAMBIO DE SECCIONES EN LOS CORDONES LONGITUDINALES.

El proyecto de licitación contemplaba secciones tubulares, que son las que ofrecen mayor rigidez torsional.

Por razones de existencia en el mercado de dichos perfiles tubulares, se convino en reemplazarlos por perfiles laminados.

La solución de reemplazo debería haber sido 2 perfiles U formando cajón, que poseen una rigidez torsional del orden de la sección anular. Pero LA EMPRESA CONSTRUCTORA optó por una sección tipo doble T (similar al IPN, pero fabricado) con acero F36 en lugar de F24, lo cual condujo a la pérdida de la propiedad de la rigidez torsional.

Además, el empleo de acero F36, conduce a una reducción del peso de acero, menor sección transversal equivalente a menor rigidez longitudinal.

REDUCCIÓN DEL ESPESOR DE LA LOSA DE HºAº.

En el proyecto de licitación, la losa de hormigón armado (steel-deck) tenía un espesor de 15 cm, mientras que en el proyecto de LA EMPRESA CONSTRUCTORA es de 10 cm. (espesor promedio 8 cm.)

La reducción del espesor de la losa trae como consecuencia dos situaciones, una es reducción de la masa y la otra es reducción de la rigidez.

LOSA DE HºAº SIN VINCULACIÓN.

Organiza:

En la Ingeniería de Detalle presentada por LA EMPRESA CONSTRUCTORA, la losa se apoya en los perfiles transversales (plano inferior) desconectada de los cordones longitudinales inferiores.

El hecho se agrava porque las vigas transversales están articuladas en su unión con los cordones longitudinales inferiores (no siendo una unión rígida).

ANÁLISIS DINAMICO DE LAS DISTINTAS VARIANTES.

A los efectos de establecer las distintas situaciones desde el punto de vista del comportamiento dinámico, se evaluaron distintos modelos que contemplan distintas condiciones de vínculos internos.

El detalle de estos y los valores de frecuencia y periodos naturales obtenidos, son los indicados más abajo.

MODELO DENOMINADO PUENTE 3.0 – SACEM.

Corresponde a un Modelo Matemático, en correspondencia con el de licitación, en el cual la losa se la representa por elemento finitos, vinculados al cordón inferior del puente y apoyada en las vigas transversales inferiores.

Las secciones transversales coinciden con los adoptados por LA EMPRESA CONSTRUCTORA, a los efectos de utilizar los perfiles adoptados en la Ingeniería de Detalle.

Como en el Proyecto de licitación, las uniones son todas rígidas, sin eliminación de vínculos interiores.

Resultados de frecuencias y periodos obtenidos.

Frecuencia natural $f = 3.321 \text{ Hz}$

Periodo Natural $T = 0.301 \text{ seg}$

MODELO DENOMINADO PUENTE 3.1

Corresponde a un Modelo Matemático, en el cual la losa se la representa por elemento finitos, **sin vincularla** a los cordones longitudinales inferiores del puente, apoyada sobre las vigas inferiores transversales, denominada losa desacoplada.

Las vigas transversales sobre las que apoya la losa están vinculadas rigidamente a los cordones longitudinales inferiores (soldadas)

Organiza:

Las secciones transversales coinciden con los adoptados por LA EMPRESA CONSTRUCTORA, a los efectos de utilizar los perfiles adoptados en la Ingeniería de Detalle.

Como en el Proyecto de licitación, las uniones son todas rígidas, sin eliminación de vínculos interiores.

Resultados de frecuencias y periodos obtenidos.

Frecuencia natural $f = 1.239 \text{ Hz}$

Periodo Natural $T = 0.307 \text{ seg}$

MODELO DENOMINADO PUENTE 3.2

Corresponde a un Modelo Matemático, en el cual la losa se la representa por elemento finitos, **sin vincularla** a los cordones longitudinales inferiores del puente, apoyada sobre las vigas inferiores transversales, denominada losa desacoplada.

Las vigas transversales sobre las que apoya la losa están articuladas a los cordones longitudinales inferiores.

Las secciones transversales coinciden con los adoptados por la empresa constructora, a los efectos de utilizar los perfiles adoptados en la Ingeniería de Detalle.

Resultados de frecuencias y periodos obtenidos.

Frecuencia natural $f = 1.214 \text{ Hz}$

Periodo Natural $T = 0.824 \text{ seg}$

MODELO DENOMINADO PUENTE 3.3

Corresponde a un Modelo Matemático, en el cual la losa se la representa por elemento finitos, **sin vincularla** a los cordones longitudinales inferiores del puente, apoyada sobre las vigas inferiores transversales, denominada losa desacoplada.

Las vigas transversales sobre las que apoya la losa, están articuladas a los cordones longitudinales inferiores en forma parcial, o sea en determinados nudos, donde no concurren diagonales.

Organiza:

Las secciones transversales coinciden con los adoptados por la empresa constructora, a los efectos de utilizar los perfiles adoptados en la Ingeniería de Detalle.

Resultados de frecuencias y periodos obtenidos.

Frecuencia natural $f = 1.234 \text{ Hz}$

Periodo Natural $T = 0.811 \text{ seg}$

MODELO DENOMINADO PUENTE 3

Corresponde a un Modelo Matemático, en el cual la losa se la representa por elemento finitos, **sin vincularla** a los cordones longitudinales inferiores del puente, apoyada sobre las vigas inferiores transversales, denominada losa desacoplada.

Las vigas transversales sobre las que apoya la losa están soldadas a los cordones longitudinales inferiores.

La diferencia con el MODELO 3.1., está en la reducción de los espesores de las diagonales realizados por la empresa constructora.

Las secciones transversales coinciden con los adoptados por LA EMPRESA CONSTRUCTORA, a los efectos de utilizar los perfiles adoptados en la Ingeniería de Detalle.

Resultados de frecuencias y periodos obtenidos.

Frecuencia natural $f = 2.251 \text{ Hz}$

Periodo Natural $T = 0.444 \text{ seg.}$

Organiza:

ADOPCIÓN DEL MODELO ADECUADO.

Se debe adoptar el modelo que ofrezca una frecuencia natural mayor a 2.5 Hz, para garantizar el alejamiento de la frecuencia de resonancia con la marcha peatonal.

La Contratista deberá ajustar la Ingeniería de Detalle para garantizar la situación de confort al tránsito de personas.

A criterio de este Estudio, las correcciones a realizar son las descriptas más abajo, las que son indicativas, pudiendo surgir algunas complementarias.

VINCULACION LOSA DE HºAº A CORDONES LONGITUDINALES INFERIORES.

En el desarrollo de la actual Ingeniería, la losa de piso se encuentra simplemente apoyada sobre los perfiles transversales.

En el Proyecto licitatorio, la losa se encontraba solidariamente vinculada a los cordones longitudinales inferiores, y del análisis de ese modelo surge un mejor comportamiento al tránsito personal.

Adjunto a este documento, se entrega un detalle que, a criterio de este Estudio, se corresponde con una propuesta a verificar por LA EMPRESA CONSTRUCTORA el estado tensional.

Se trata de llegar a la vinculación con un tramo de losas maciza, de 100 mm de espesor, vinculada a los cordones mediante conectores.

Asimismo, al tramo de losa que se vincula, se le agregará una armadura en correspondencia con los esfuerzos calculados.

UNIONES SOLDADAS.

Todas las uniones de los elementos concurrentes a los cordones longitudinales (superiores e inferiores) deben ser soldadas con el objeto de rigidizar al modelo global.

FIJACION DEL PLANO SUPERIOR.

El plano superior compuesto por los cordones longitudinales, las vigas transversales y los tensores, conforman una viga que se apoya en los extremos en los pórticos de arriostramiento.

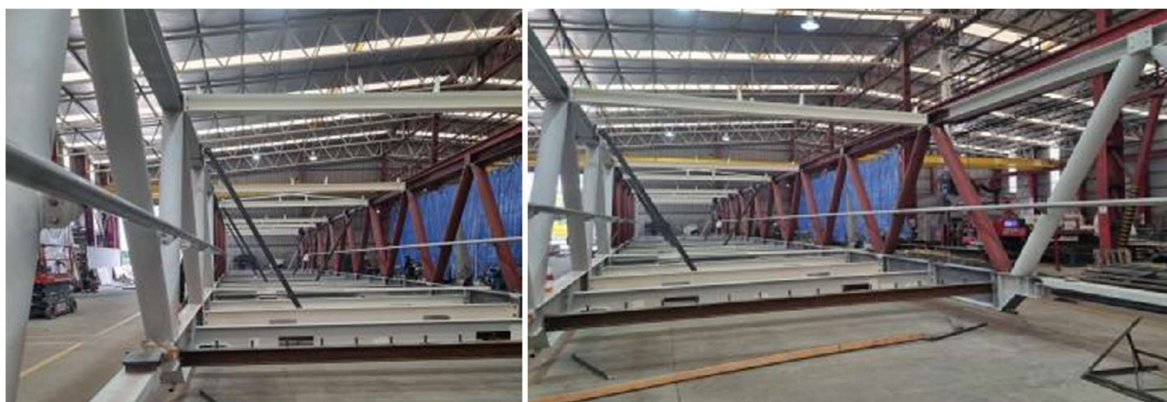
Eso conduce a verificar los pórticos extremos de rigidización para la acción del viento en la parte superior del puente.

Organiza:

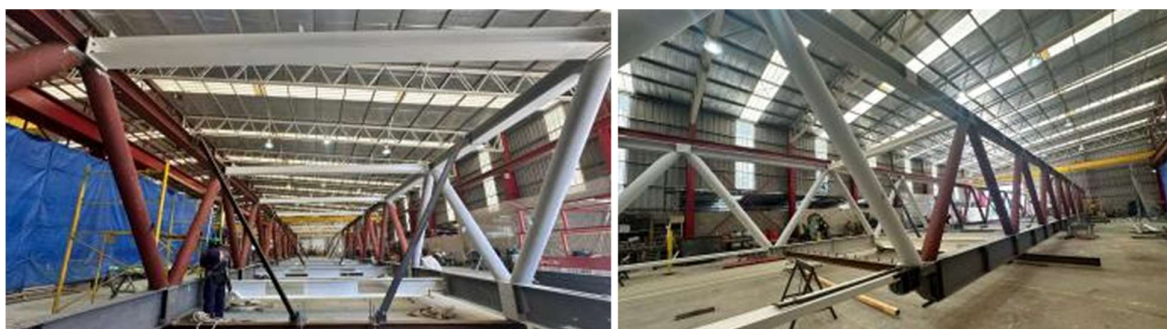
RESULTADOS ESPERADOS.

Una vez corregido el modelo de cálculo con las indicaciones señaladas más arriba, el Contratista deberá analizar nuevamente la estructura, y del análisis dinámico surgirá el valor de la frecuencia natural, que deberá estar comprendida entre 3.0 Hz y 5.0 Hz. De no obtener los valores aceptables, deberá comunicarlo a la DDO.

INSPECCIÓN EN TALLER DE FABRICACIÓN



Fotografías 3 y 4. Inspección de estructura en taller.



Fotografías 5 y 6. Inspección de estructura en taller.

Organiza: