

# Efecto de la excentricidad en nudos en superestructuras de armaduras espaciales mixtas de puentes (tridilosas)

## Effect of the eccentricity in joints of mixed spatial truss superstructure of bridges (tridilosos)

Moisés Nazar-Beutelspacher<sup>1a</sup>, Francisco Alberto Alonso-Farrera<sup>1b</sup>, José Ernesto Castellanos-Castellanos<sup>1c</sup>,  
Ricardo Gabriel Suárez-Gómez<sup>1d</sup>

<sup>1</sup> Cuerpo Académico de Construcción Sustentable, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, México. Orcid: <sup>b</sup> 0000-0001-8160-3724. Correos electrónicos: <sup>a</sup> moisesnazarbeu@gmail.com, <sup>b</sup> alfa@unach.mx, <sup>c</sup> jecc69@hotmail.com, <sup>d</sup> ranzou@hotmail.com

Recibido: 23 julio, 2018. Aceptado: 15 abril, 2019. Versión final: 5 agosto, 2019.

### Resumen

En este artículo se presenta el estudio efectuado para conocer la relevancia en la resistencia de las barras, de la excentricidad en los nudos de un puente con superestructura de armaduras espaciales mixtas. Este tipo de superestructuras de puentes fueron construidas en un número importante en México a partir de su desarrollo tecnológico propuesto por el Ing. Heberto Castillo Martínez en la década de 1960 del siglo XX [1]. Algunas de estas superestructuras aún siguen en uso. En este artículo, se presenta el puente Santo Domingo, sobre el río del mismo nombre ubicado en la Selva Lacandona de Chiapas, México. En una primera fase, se analiza la superestructura considerando las barras concéntricas en los nudos y en una segunda fase se analiza tomando en cuenta los momentos flexionantes generados en las barras por la excentricidad en los nudos de media altura de la tridilosa. Se calcula la resistencia de los elementos críticos considerando de manera separada los efectos de las cargas axiales, de los momentos flexionantes provocados por el peso propio y la flexión en la losa y los momentos flexionantes provocados por la excentricidad de las barras en los nudos. Se concluye mostrando que aproximadamente la mitad de la resistencia de las barras es requerida para tomar los momentos flexionantes provocados por la excentricidad de las barras en los nudos.

**Palabras clave:** tridilosa; estructuras mixtas; puentes; armaduras.

### Abstract

The authors present a case study carried out to know the relevance, in the resistance of the bars, of the eccentricity in the joints of a bridge with mixed spatial truss superstructure. This type of superstructures was built in a significant number in Mexico, from its technological development. This technique was proposed by Ing. Heberto Castillo Martínez in the 1960s (1). Some of these superstructures are still in use. In this article, the case study is the Santo Domingo bridge, on the river of the same name located in Chiapas, Mexico. As a first phase, the superstructure is analyzed considering the concentric bars in the joints. In a second phase, the flexing moments generated by the eccentricity in the mid-height joints of the tridilose are taken into account. The resistance of critical elements is calculated considering separately the effects of the axial loads, of the bending moments caused by the own weight and the flexion in the slab and the bending moments caused by the eccentricity of the bars in the joints. The authors conclude that approximately half of the resistance of the bars is required to take the bending moments caused by the eccentricity of the bars in the joints.

**Keywords:** tridilose; mixed structures; bridges; truss.

**1. Introducción**

En México se han empleado las armaduras mixtas tridimensionales, conocidas como tridilosas, para salvar claros medianos en puentes libremente apoyados y continuos, como se observa en la Figura 1 del Puente Boca Lacantún .



Figura 1. Puente Boca Lacantún, de tridilosa continua

El diseño de estas estructuras considera la participación de la losa de concreto armado como elemento de cuerda en compresión. La cuerda en tensión se solventa empleando varillas corrugadas de acero, mientras que para las diagonales se emplean ángulos dobles formando cajón o perfiles tubulares cuadrados. Las tridilosas se caracterizan por estar formadas por “piñas”, ver Figura 2, estos son elementos básicos de la armadura tridimensional mixta y está formada por ocho barras, cuatro forman una pirámide de base cuadrada y las otras cuatro forman otra pirámide de base cuadrada pero

invertida, uniéndose ambas en una placa intermedia. Este tipo de estructuras es particularmente liviana lo que ha permitido su empleo para librar claros del orden de hasta 60 m, con un considerable ahorro en materiales. Debido al incremento en la magnitud de cargas, a la sensibilidad de la estructura a la corrosión, por formarse con elementos de acero de poco espesor, así como por la gran cantidad de soldaduras involucradas, se presentaron casos de fallas en estos puentes, lo que conllevó a un programa de rehabilitación o sustitución de los mismos.

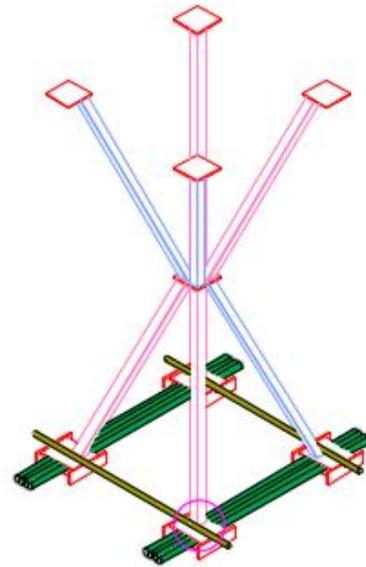


Figura 2. Elemento estructural básico (piña)

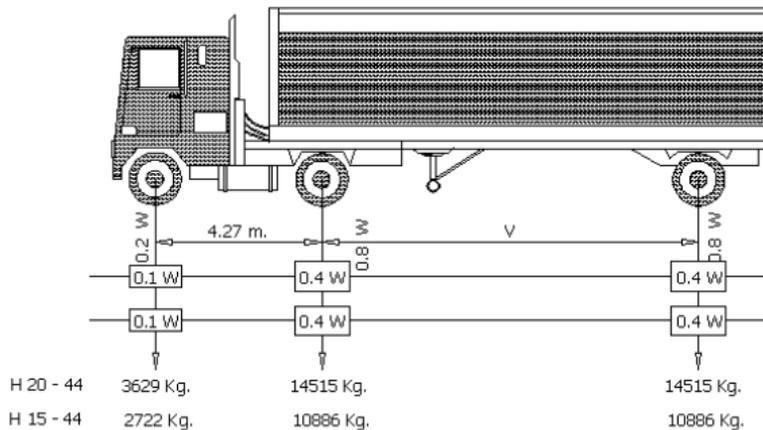


Figura 3. Camión Tipo HS

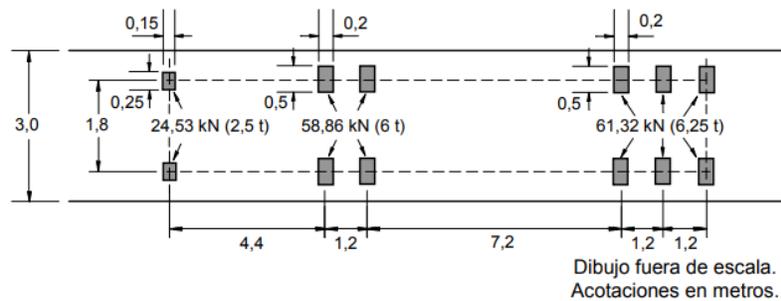


Figura 4. Carga Viva Vehicular Tipo IMT 66.5

La carga viva vehicular de diseño en la época en que fue construido este puente (1980) era la HS-20, con un peso total de 32,700 kg, como se observa en la Figura 3. Actualmente la carga viva de diseño en México es la establecida por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) nombrada IMT 66.5 (ver Figura 4), misma que supera en más del doble en peso a la HS-20 [2][3].

De la revisión de las estructuras existentes, se pudo constatar que en las placas de conexión, el diseño particular de las armaduras obliga a una excentricidad en los nudos, lo que se traduce en momentos flexionantes en dos sentidos para cada barra. Este fenómeno ha sido estudiado [4][5] para el caso de una piña aislada, analizando la estructura por medio de elementos finitos, revisando los estados límite de las barras y placa, en su estudio concluye con la necesidad de examinar otras barras que pudiesen quedar más esforzadas.

En el presente estudio se ha considerado el análisis de un claro de 50 m, libremente apoyado, del Puente Santo Domingo (ver Figura 5), el cual es un puente en servicio ubicado sobre la Carretera Fronteriza del Sur, en el Estado de Chiapas, México, considerando las dimensiones reales de los elementos y las cargas de diseño actuales.



Figura 5. Puente Santo Domingo

## 2. Metodología

Se propuso el siguiente procedimiento:

- Levantamiento topográfico y fotográfico detallado en campo de las dimensiones y posiciones de cada barra del tramo en análisis.
- Modelación de la estructura empleando un programa de análisis estructural basado en rigideces, considerando la losa como un emparrillado.
- Se consideran las cargas vivas de diseño IMT 66.5 incrementadas por impacto de acuerdo a la normativa vigente en México.
- Se revisan las barras de la primera y segunda piñas cercanas al apoyo, como se observa en la Figura 6, para la condición de carga viva más crítica para estos elementos, que ocurre cuando el camión de diseño se considera que ha entrado completamente al puente y su eje pesado trasero está sobre la piña en análisis. Se realiza un análisis por piña, calculando el momento flexionante generado por la excentricidad de las fuerzas en la placa intermedia de la piña y se distribuye dicho momento de acuerdo a las rigideces de las barras concurrentes. Se parte de los elementos mecánicos de interés obtenidos del análisis de la armadura espacial. Con base en estos y en las excentricidades medidas se calculan los momentos que generan las fuerzas axiales en las barras respecto al nudo central, considerando para esto las componentes verticales de las fuerzas de cada barra ( ver figura 7) y multiplicándolas por las excentricidades correspondientes. Se suman los momentos en el nudo respecto a los ejes “X” y “Y” y se distribuyen de acuerdo a sus rigideces angulares.
- Se revisa la resistencia de cada elemento empleando el criterio de los esfuerzos permisibles.
- Se resumen los datos obtenidos y se generan conclusiones.

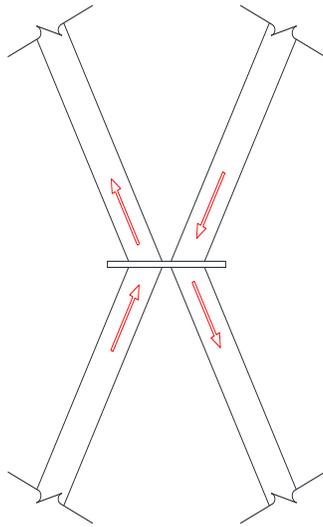


Figura 6. Proyección de fuerzas en el plano X-Z

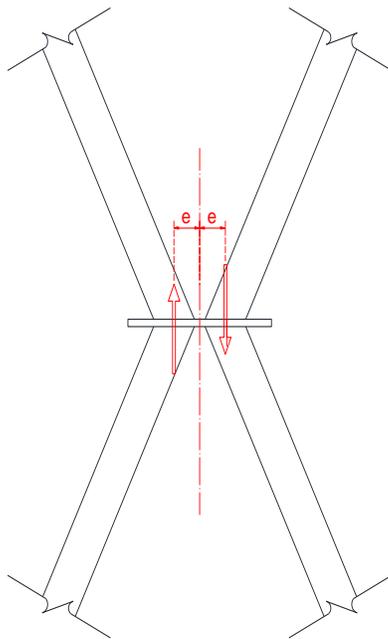


Figura 7. Resultante de fuerzas verticales

### 3. Resultados.

Para la Piña No. 1 se obtuvieron los elementos mecánicos corregidos que se presentan en la Tabla 1, donde  $M_{x2}$  y  $M_{y2}$  son los momentos flexionantes en las barras debido a la excentricidad de las mismas en el nudo intermedio:

Tabla 1. Elementos mecánicos en barras de Piña 1

Barra	P	Mx	My	Mx2	My2
OR 76X3.2	-17601	-2258	8633	-4439	75902
OR 76X3.2	14299	5046	-3148	-4439	75902
OR 76X3.2	13761	-2541	-6420	-4439	75902
OR 76X3.2	-22204	5461	2514	-4439	75902
OR 76X3.2	-25034	4221	4027	-4439	75902
OR 76X3.2	15797	-5797	-1045	-4439	75902
OR 76X3.2	17254	-2048	-1134	-4439	75902
OR 76X3.2	-19573	-4019	3587	-4439	75902

Los cocientes entre los esfuerzos actuantes y los esfuerzos permisibles se presentan en la Tabla 2, donde  $f_a$  representa los esfuerzos actuantes por carga axial, mientras que  $f_b$  representa los esfuerzos axiales por flexión:

Tabla 2. Cocientes de esfuerzos actuantes y esfuerzos permisibles

Barra	$f_a/F_a$	$f_{bx}/F_b$	$f_{by}/F_b$	$f_{bx2}/F_b$	$f_{by2}/F_b$
OR 76X3.2	1.4682	0.0718	0.2746	0.1412	2.4144
OR 76X3.2	1.1928	0.1605	0.1001	0.1412	2.4144
OR 76X3.2	1.1479	0.0808	0.2042	0.1412	2.4144
OR 76X3.2	1.8522	0.1737	0.0800	0.1412	2.4144
OR 76X3.2	2.0883	0.1343	0.1281	0.1412	2.4144
OR 76X3.2	1.3178	0.1844	0.0332	0.1412	2.4144
OR 76X3.2	1.4393	0.0651	0.0361	0.1412	2.4144
OR 76X3.2	1.6328	0.1278	0.1141	0.1412	2.4144

Para la Piña No. 2 se obtuvieron los elementos mecánicos que se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Elementos mecánicos en barras de Piña 2

Barra	P	Mx	My	Mx2	My2
OR 64X3.2	-8912	-444	2746	-2170	45822
OR 76X3.2	16932	1654	2019	-3887	82068
OR 76X3.2	13314	658	-3824	-3887	82068
OR 64X3.2	-15297	275	-98	-2170	45822
OR 64X3.2	-18725	-564	-470	-2170	45822
OR 76X3.2	16716	-2153	2339	-3887	82068
OR 76X3.2	20362	-5551	3307	-3887	82068
OR 64X3.2	-12342	-899	-577	-2170	45822

Considerando las características de las barras de esta piña y los materiales que la forman, se calcularon los esfuerzos permisibles y se obtuvieron los cocientes de esfuerzos que se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4 Cocientes de esfuerzos actuantes y esfuerzos permisibles

Barra	$f_a/F_a$	$f_{bx}/F_b$	$f_{by}/F_b$	$f_{bx2}/F_b$	$f_{by2}/F_b$
OR 64X3.2	0.9745	0.0211	0.1303	0.1030	2.1748
OR 76X3.2	1.4124	0.0526	0.0642	0.1236	2.6105
OR 76X3.2	1.1106	0.0209	0.1216	0.1236	2.6105
OR 64X3.2	1.6726	0.0131	0.0047	0.1030	2.1748
OR 64X3.2	2.0474	0.0268	0.0223	0.1030	2.1748
OR 76X3.2	1.3944	0.0685	0.0744	0.1236	2.6105
OR 76X3.2	1.6986	0.1766	0.1052	0.1236	2.6105
OR 64X3.2	1.3495	0.0427	0.0274	0.1030	2.1748

De estas tablas se puede observar que los esfuerzos axiales llegan a exceder hasta el doble de los esfuerzos permisibles, mientras que los esfuerzos por flexión debida a efectos distintos a la excentricidad en nudos es pequeña. Para los esfuerzos debidos a la excentricidad de las barras en los nudos, en el sentido transversal al tránsito el efecto es pequeño, pero en el sentido del tránsito los esfuerzos por flexión superan en más del doble a los permisibles.

El pequeño efecto de la flexión transversal se justifica porque las componentes de las cargas axiales en el sentido transversal se anulan parcialmente entre sí, mientras que en el sentido longitudinal estos efectos se suman.

El incremento en las cargas vivas desde la carga viva vehicular HS-20 hasta la actual IMT 66.5 (un poco más del doble), justifica en parte los incrementos observados en los esfuerzos por cargas axiales, sin embargo la flexión debida a la excentricidad provoca esfuerzos aun mayores a provocados por las cargas axiales. Como se puede observar en la Figura 8, en el promedio de los elementos mecánicos de las barras de las Piña No. 1 y 2, la mayor participación en las acciones sobre las barras es debida a la flexión por excentricidad ( $f_{by2}/F_b = 57\%$ ), seguida de la acción debida a la carga axial (36%)

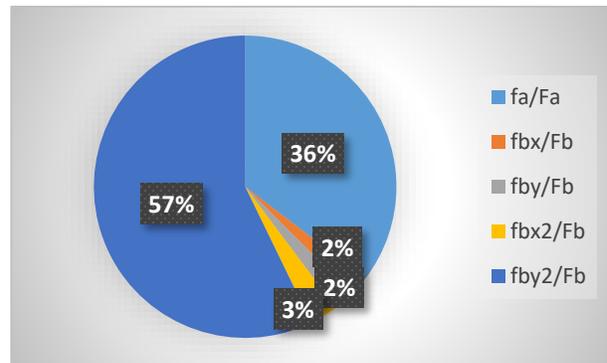


Figura 8. Participación de las acciones sobre las barras en las demandas de resistencia.

#### 4. Conclusiones

Del análisis del comportamiento de la estructura tridimensional mixta se pudo constatar que las excentricidades de las barras en los nudos provoca momentos flexionantes que demanda aproximadamente la mitad de la capacidad de la resistencia de las barras. El caso del puente analizado resultó en una grave deficiencia de capacidad portante, sin embargo, siendo su estado de condición estructural bueno, se optó por la opción del reforzamiento de las barras y nudos. Los momentos flexionantes relevantes por excentricidad se presentan respecto a los ejes perpendiculares al sentido del tránsito y superan por un orden de magnitud a los momentos provocados por peso propio y flexión de la losa. La flexión transversal provoca momentos respecto a ejes paralelos al eje del camino cuya magnitud si bien no es despreciable, es mucho menor a la anteriormente descrita, y es del mismo orden de magnitud que los momentos generados por peso propio y flexión de la losa. Éste fenómeno de la flexión transversal se explica por la anulación parcial de las componentes de las fuerzas de las barras entre sí.

#### 5. Recomendaciones

El diseño tradicional de las tridilosas genera excentricidad en los nudos que es muy relevante en cuanto a la resistencia de los elementos, por lo que resulta deseable modificar el diseño para permitir nudos en los que las barras concurren concéntricamente. Dentro de las alternativas de diseño de estos nudos se pueden emplear dos placas de conexión unidas en forma de "X" que conecten a las barras ranuradas, conectando cada placa a cuatro barras. Este tipo de conexión también permitiría mejorar la unión soldada limitando los esfuerzos en éstas [5][6].

Por otra parte, con base en lo observado en campo, se recomienda para el diseño de nuevas armaduras mixtas tridimensionales lo siguiente:

- Sustituir las varillas corrugadas de acero por perfiles o placas de acero grado 50 que permitan una conexión concéntrica, disminuyan en número de soldaduras y eviten la formación de resquicios difíciles de mantener.
- Emplear perfiles de mayor espesor, que sean menos sensibles a las pérdidas de área por corrosión.
- Experimentar nuevas configuraciones espaciales, tales como variantes de armaduras Pratt, que disminuyan el número de barras flexocomprimidas, así como el número de soldaduras.
- Generar propuestas de sistemas constructivos de losas que permitan que se eviten deficiencias provocadas por cimbrados deficientes y avancen en el camino de la industrialización de la construcción, disminuyendo tiempos y costos de ejecución.

## Referencias

[1] H. Castillo Juárez, *Estructura tridilosa para grandes claros*. Trillas, 2013.

[2] E. I. Hernández Quinto, “Normativa Nacional De Cargas Vivas En Puentes,” in *XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, 2010.

[3] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, *Cargas y acciones*. México, 2001.

[4] R. Lorenzo, B. Arcos, J. A. Escobar, and R. Gómez, “Comportamiento estructural de una piña de un puente de tridilosa,” in *XI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, 1998.

[5] R. Sánchez, D. Muriá-Vila, and R. Gómez, “Evaluación de Conexiones Soldadas a Tope de Superestructuras Espaciales de Puentes,” in *XI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, 1998.

[6] R. Gomez M, D. Muria-Vila, R. Sanchez R, And J. A. Escobar S, “Evaluacion Del Comportamiento Estructural De Dos Puentes Carreteros,” In *Xi Congreso Nacional De Ingeniería Estructural. Tomo I*, 1998.