

Aplicación Práctica

# Diseño, gestión y construcción de un puente de estructura mixta

Design, management and construction of a mixed structure bridge

Xavier Nieto-Cárdenas - Edwin Nieto Cárdenas - Paúl Illescas Cárdenas

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

jnietoc@unal.edu.co

Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción, Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Ecuador

esnietoc49@est.ucacue.edu.ec  
peillescasc@ucacue.edu.ec

## RESUMEN

El puente de estructura mixta que se presenta en este documento, fue desarrollado de manera privada, con el dueño de la propiedad que deseaba unir sus dos terrenos divididos por un afluente. La luz del puente es 12 metros. El puente debía cumplir con soportar un vehículo de carga liviana a capacidad máxima (1.5 ton. en total), según la necesidad del propietario. Por el tiempo y presupuesto, se optó por una estructura de losa de puente en concreto reforzado sobre vigas de acero ASTM A36, ensambladas en sección tipo "I". El diseño de vigas simétricas en acero se encontró limitado por la flexión, cortante, pandeo local y deflexión.

Para el efecto de flexión se consideró la inercia de la viga y su estabilidad torsional, para cumplir con efectos de compacidad en alma y alas.

Dentro del proceso constructivo, fue importante la coordinación entre la fabricación de los estribos y las vigas prefabricadas metálicas, el aprovechamiento en cortes de las placas de acero, el proceso de unión, soldadura y lanzado de vigas armadas en obra.

Las imágenes muestran un tipo de conector de cortante entre viga y losa, pero el mismo no forma parte del diseño, esta decisión fue tomada considerando la posibilidad a futuro de que el cliente desee usar el puente con un vehículo más pesado y la estructura tenga mayor resistencia por parte del tablero del puente.

## Palabras Claves

Contraflecha, prefabricación, puente mixto, vigas ensambladas de acero

## ABSTRAC

In this document, it is presented a mixed structure bridge, which was developed privately, with the property owner, who wanted to join his two plots of land divided by river, the distance is 12 meters. The bridge had to support a light load vehicle at maximum capacity (1.5 ton. in total), according to the owner's need. Due to the time and monetary investment available, we opted for a reinforced concrete bridge slab structure on ASTM A36 steel beams assembled in I-Shape section. The design of symmetrical steel beams was found to be limited by flexure, shear, local buckling and deflection.

For the flexure effect, the inertia of the beam and its torsional stability were considered, in order to comply with compact requirements in web and flange.

In the construction process, was important the coordination among the stirrup's fabrication, the prefabricated metal beams, the cut of steel plates to advantage material, the joining process, the welding process and the assembled beams assembly on site.

The images show a type of shear connector between beam and slab concrete, but this is not part of the design, this consideration was taken for a future possibility that the client may wish to use the bridge with a heavier vehicle and the structure would have greater resistance.

## Keywords

Precamber, prefabrication, mixed bridge, assembled steel beams

**I. Introducción**

El presente artículo muestra el diseño y construcción de un puente de estructura mixta, con vigas en tipo I con acero ASTM A-36 y losa de concreto de 210 Kg/cm<sup>2</sup>.

El puente remplazó una estructura de madera y muros de ciclópeo colapsado. Según las necesidades del dueño del terreno, se requería un puente de 12m de luz que cumpla las exigencias de carga y reducción de tiempo de ejecución.

El puente se ubica en la parroquia Javier Loyola de la Ciudad de Azogues-Ecuador. El documento presenta 4 partes:

**1. Introducción**

Describe la luz, materiales y tipología de construcción del puente.

**2. Método**

El método se subdivide en las siguientes partes:

- Análisis de carga sobre el puente: donde se expresa de manera general las recomendaciones y textos guías usados para determinar la carga sobre el tablero del puente.

- Diseño de elementos de Concreto Reforzado: donde se indica cuáles fueron los aspectos a considerar para las cargas en los elementos de concreto reforzado, además de mencionar los textos y normativa base para el diseño.

- Diseño de elementos de acero estructural: se enfoca en el diseño de las vigas de acero y el ensamble de los elementos.

- Se presenta todos los aspectos que se debe revisar para el diseño de vigas tipo I. El diseño de las vigas se rige por la flexión, el cortante y la deflexión.

- Gestión del proyecto: se explica los temas importantes a considerar para realizar la obra en menor tiempo y costo que otras propuestas presentadas para la licitación privada del proyecto.

- Se tocan temas como la prefabricación y la ruta crítica del proyecto.

**3. Resultado – Construcción**

Este capítulo muestra mediante registro fotográfico el proceso constructivo desarrollado en el proyecto, con los temas tratados en el capítulo del Método.

**4. Conclusiones**

Se indican las conclusiones más valiosas para compartir con los lectores, estudiantes, constructores, diseñadores y personal en general que tengan necesidad de conocer sobre proyectos de puentes mixtos.

**II. Método**

La ejecución del diseño del proyecto se divide en dos grupos; la evaluación de cargas de manera simplificada del puente y el diseño de la estructura mixta, tanto de elementos en concreto reforzado como en acero estructural.

**A. Análisis de carga sobre el puente**

Para el análisis de cargas de puentes de luces de hasta 15 metros de luz, el profesor Roberto Meli, sugiere un proceso de diseño básico, basado en esta metodología se evaluó un vehículo de carga de capacidad máxima de 1.50 tonelada, tomando la distribución de carga en sus ejes similar a la Fig. 1 [1].

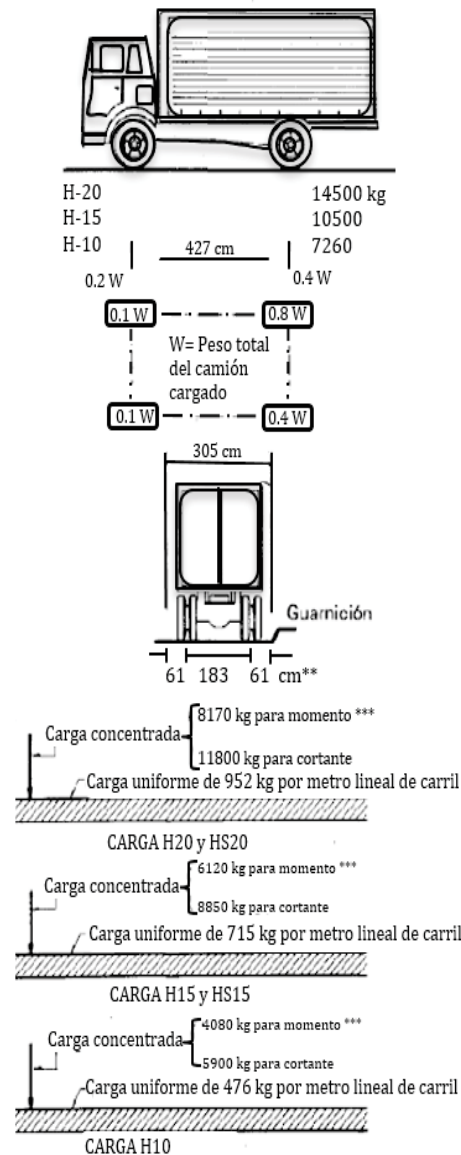


Fig. 1. Tipos de Cargas para puentes [1].

Con el análisis de carga y optimización de elementos dimensionados, se optó por una estructura de concreto sobre tres vigas de acero.

Se realizó el diseño de losa de concreto en base al cortante que puede desarrollar el peso de un eje longitudinal del vehículo de diseño. Además, se diseñan los refuerzos para la flexión que puede experimentar la losa.

La disposición de las vigas metálicas del puente está

dispuesta de manera que soporten la carga distribuida del tablero.

En resumen, en la losa se tiene el cortante y el momento positivo a flexión que debe soportar la placa de concreto reforzado para tolerar la carga móvil.

Se determinó las cargas sobre las vigas metálicas, considerando el peso propio de la losa que se distribuye en toda la luz, adicionalmente las consideraciones de la ubicación del tren posterior de carga del vehículo (eje posterior) para que genere los mayores momentos (ubicado aproximadamente al centro de la luz) y para el mayor cortante en vigas (ubicado en los extremos, cercano al apoyo).

Con este análisis se determinaron las cargas sobre las pilas del puente, para su diseño a volcamiento, presión sobre el suelo y cota inferior de cimentación.

El presupuesto del proyecto fue un reto que demandó de otras alternativas que sustituyan los estudios hidrológicos e hidráulicos, más el de socavación, por ello se realizó una encuesta sobre cotas de crecientes y experiencias vividas en el sector de emplazamiento del puente. Es importante mencionar que se toma este riesgo puesto que el puente no va a ser usado periódicamente, es solo de uso esporádico, sin embargo, se recomienda realizar los estudios preliminares que todo proyecto de puentes requiere.

**B. Diseño de elementos de Concreto Reforzado.**

- Los elementos en concreto reforzado son:
- La losa del tablero del puente mixto.
  - Los estribos del puente.

Para el primer caso con los valores de momento y cortante se asume la metodología de diseño de concreto para losas macizas [2], además se comprueba con recomendaciones que realizan para losas de puentes mixtos [3], esto lleva a una losa de 12 cm de alto, con refuerzo inferior y superior transversal al eje longitudinal del puente, que garantice soportar las cargas sobre el tablero.

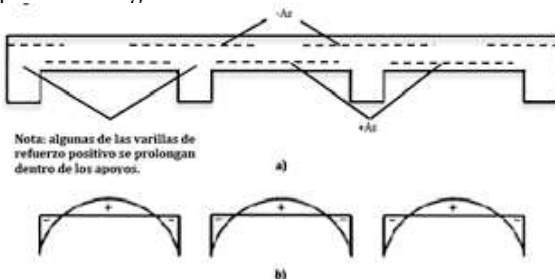


Fig. 2. a) Recomendación de distribución de hierros, b) momentos en sección transversal de una losa continua de concreto reforzado [2].

Respecto a los estribos, se tiene una estructura mixta,

debido a que se evaluó como muro en voladizo de contención y presentó problemas a volcamiento, considerando que el uso del puente es esporádico y por efectos sísmicos puede generar volcamiento. Se diseña el vástago y zapata a flexión, a cargas máximas y para volcamiento se considera un sobre ancho en el vástago en la cara interna con la fabricación de un muro ciclópeo.

Existen tres columnas embebidas que soportan directamente las cargas de las vigas metálicas, además colaboran con la flexión lateral del muro. Esto se evidencia en las fotografías del siguiente capítulo.

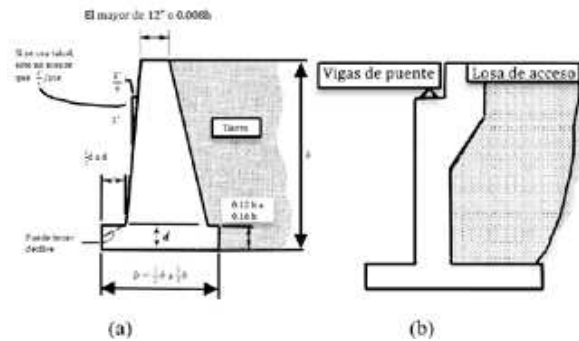


Fig. 3. Esquema básico para diseño de los estribos del puente. (a) Sección muro a gravedad. (b) Sección con soporte de las vigas de acero [2].

Para el diseño se usan los textos guías en sus respectivos capítulos para la evaluación de cargas y diseño [2] y [3], además de cumplir con la normativa vigente ACI318S-19 [4].

**C. Diseño de elementos de acero estructural [5]**  
*Flexión en general*

Sin desmerecer la importancia de la losa de concreto y su acción en el puente, en este capítulo se desarrolla el análisis y diseño de la viga de acero, elemento importante longitudinal que permite que el tablero y el puente en general trabaje adecuadamente.

Para entender de manera simplificada una viga de acero, se presenta en la Fig. 4. un esquema de la variación de las características de rango elástico y plástico en una viga simplemente apoyada.

En la Etapa 1 todas las fibras están bajo esfuerzos menores que la fluencia; por lo tanto, se encuentra en un comportamiento totalmente elástico. Etapa 2, las fibras extremas han llegado a fluencia, las deformaciones aún son proporcionales a los esfuerzos. Etapa 3, al incrementar nuevamente la carga, las fibras que se encuentran en fluencia no podrán resistir esfuerzos mayores, pero existe una porción muy importante de la sección que empieza a fluir. Etapa 4, la carga genera que todas las fibras de la viga se plastifiquen.

Los esfuerzos correspondientes de tensión y

compresión son:

En la Etapa 1:

$$M = S_x \cdot f_b \quad (1)$$

Al final de la Etapa 2, cuando el esfuerzo de flexión alcanza la fluencia:

$$M = M_y = S_x \cdot f_b \quad (2)$$

Para las Etapas 3 y 4, al completar el proceso de plastificación, el momento, denominado momento plástico, será:

$$M = M_p = Z_x \cdot F_y \quad (3)$$

Donde:

$S_x$  = Módulo elástico de la sección.

$Z_x$  = Módulo plástico de la sección.

$F_y$  = Esfuerzo de fluencia del material.

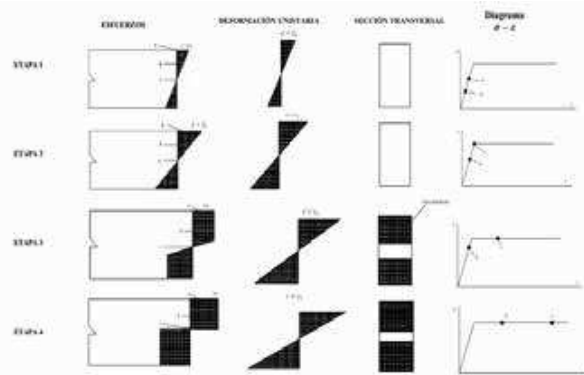


Fig. 4. Comportamiento de una viga bajo carga creciente [5].

Para garantizar que una viga de acero llegue a plastificar, es necesario que geoméricamente cumpla con dimensiones que le permitan desarrollar la característica estructural de soportar cargas en su rango plástico.

En caso de no tener las dimensiones necesarias, el fallo que puede darse es el pandeo local, que se puede originar cuando sus relaciones ancho - espesor son mayores a ciertos límites, en la Fig. 5, que muestra la tabla del AISC, se observa dichos valores.

Si en un perfil las aletas están conectadas a almas en forma continua y la relación ancho - espesor de un elemento es menor que  $\lambda_p$ , el perfil se denomina elemento compacto; si es mayor que  $\lambda_p$ , pero no que  $\lambda_r$ , será un elemento no compacto, y si es mayor que  $\lambda_r$  se denomina elemento esbelto. Los miembros de secciones compactas pueden desarrollar su resistencia total sin fenómenos de inestabilidad local, por lo que, no es necesario revisar el estado límite de pandeo local. Por el contrario, los miembros no compactos, o esbeltos, podrán presentar pandeo local, y su resistencia deberá evaluarse considerando este fenómeno.

Cuando se cumple con secciones compactas, se procede a evaluar su comportamiento torsional.

El valor del momento crítico depende de las

propiedades del material y los esfuerzos residuales que posea, dimensiones de la sección, separación entre arriostramiento laterales, condiciones y tipos de carga y tipos apoyos.

Case	Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	Limiting Width-to-Thickness Ratios		Examples
			$\lambda_p$ (compact/noncompact)	$\lambda_r$ (noncompact/slender)	
Unstiffened Elements	10 Flanges of rolled I-shaped sections, channels, and box	$b/t$	$0.30 \sqrt{E/F_y}$	$1.0 \sqrt{E/F_y}$	
	11 Flanges of doubly and singly symmetric I-shaped built-up sections	$b/t$	$0.35 \sqrt{E/F_y}$	$0.95 \sqrt{E/F_y}$	
	12 Legs of single angles	$b/t$	$0.54 \sqrt{E/F_y}$	$0.91 \sqrt{E/F_y}$	
	13 Flanges of all I-shaped sections and channels in flexure about the minor axis	$b/t$	$0.30 \sqrt{E/F_y}$	$1.0 \sqrt{E/F_y}$	
14 Storms of box	$d/t$	$0.04 \sqrt{E/F_y}$	$1.52 \sqrt{E/F_y}$		

Fig. 5. Tabla de límites de las relaciones ancho - espesor, tomado del AISC 360-16. [6]

El pandeo lateral podrá presentarse dentro del rango elástico si cuando se presenta el fenómeno, los esfuerzos no exceda en ningún punto el límite de proporcionalidad del material, o bien dentro del rango inelástico si la condición anterior no se cumple.

Para obtener la expresión teórica del momento crítico de pandeo lateral, de una viga simplemente apoyada, de sección abierta y de paredes delgadas, solicitada por flexión, se parte de las siguientes hipótesis:

La sección transversal y el momento a flexión son constantes a lo largo de la viga.

En ningún punto los esfuerzos exceden el límite de proporcionalidad.

Las cargas exteriores, y por tanto el plano de la flexión, permanecen paralelas a la dirección original cuando se producen desplazamientos.

Se desprecia la distorsión de la sección transversal. Por lo tanto, obtenemos la siguiente ecuación:

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_y G} \frac{\pi^2 E^2 C_w I_y}{L_b^2} \quad (4)$$

$L_b$  = Longitud del tramo de viga entre soportes laterales, mm.

$E$  = Módulo de elasticidad. Para el acero,  $E = 200.000$  MPa.

$I_y$  = Momento de inercia de la sección con respecto al eje débil, mm<sup>4</sup>.

$J$  = Constante de torsión, mm<sup>4</sup>.

$G$  = Módulo de rigidez. Para acero,  $G = 77.000$  MPa.

$C_w$  = Constante de alabeo, mm<sup>6</sup>.

Un miembro que esté lateralmente soportado, y si es

compacto, no presenta falla por inestabilidad flexo-torsional (pandeo lateral torsional); por tanto, podrá llegar a ser igual a la resistencia máxima de la viga.

$$M_{cr} = M_p = Z \cdot F_y \quad (5)$$

Para considerar que el miembro está lateralmente soportado, la distancia entre soportes laterales no debe superar:

$$L_p = 1.76r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (6)$$

$r_y$  = Radio de giro de la sección con respecto al eje débil.

Si la longitud sin soporte lateral de un miembro supera los valores dados en se presentará pandeo flexotorsional.

El momento máximo que puede aplicarse a la sección, sin que alcance fluencia en ninguna fibra, se le denomina  $M_r$  y por tanto su valor será:

$$M_r = S_x(F_y - F_r) = S_x(0.70F_y) \quad (7)$$

Para evaluar la resistencia de un miembro cuyo pandeo flexo-torsional se presenta en rango inelástico a través de la siguiente ecuación.

$$M_r = M_p - (M_p - 0.70F_y S_x) \left( \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \leq M_p \quad (8)$$

Si la flexión es variable, la aleta en compresión estará solicitada por un esfuerzo máximo en una sección, mientras que en el resto de su longitud el esfuerzo será menor. Para evaluar la resistencia, se incrementa el valor obtenido mediante un factor conocido como factor de gradiente de momento, a través de la siguiente ecuación.

$$C_b = \frac{12.5 M_{max}}{2.5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} R_m \leq 3 \quad (9)$$

Donde:

$M_{max}$  = Momento máximo en el tramo de longitud, en valor absoluto.

$M_A$  = Momento actuante en una sección ubicada en 0.25.

$M_B$  = Momento actuante en una sección ubicada en 0.50.

$M_C$  = Momento actuante en una sección ubicada en 0.75.

$R_m$  = Parámetro de simetría = 1.0 para vigas con doble simetría.

Dependiendo del tipo de carga y viga que se tiene puede tomar los siguientes valores que se muestran en la Tabla I.

Para el presente proyecto se asumió un valor de  $C_b = 1$  por seguridad.

Sin arriostramiento lateral intermedio	Arriostramiento en el punto cargado
Sin arriostramiento lateral intermedio	Arriostramiento en puntos cargados
Sin arriostramiento lateral intermedio	Arriostramiento en puntos cargados
Sin arriostramiento lateral intermedio	Arriostramiento en el centro de la luz

### 1. Diseño a flexión - Sección I

Para el adecuado diseño de vigas a flexión de perfiles I se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Separación entre soportes laterales,, una viga presentará uno de los siguientes estados límites:
  - Aparición de articulaciones plásticas, si  $L_b \leq L_p$ .
  - Pandeo flexotorsional en rango inelástico, si  $L_b < L_p \leq L_r$ .
  - Pandeo flexotorsional en rango elástico, si  $L_b > L_r$ .
- Relación ancho - espesor, si las vigas son compactas, no compactas o esbeltas.
- El diagrama de momento presente en el tramo de la viga entre soporte lateral en estudio.

#### a. Flexión con respecto al eje mayor, secciones compactas

- Vigas cortas:  $L_b \leq L_p$  por ser compacta no habrá pandeo local antes que se presente plastificación:

$$\phi M_n = \phi M_p \quad (10)$$

- Vigas de longitud intermedia:  $L_b < L_p \leq L_r$  la resistencia de diseño a la flexión de perfiles compactos, con flexión al eje mayor, con .

$$\phi M_n = \phi_b C_b \left[ M_p - (M_p - 0.70F_y S_x) \left( \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq \phi_b M_p \quad (11)$$

La longitud límite,  $L_r$ , para perfiles I de simetría doble y para canales, cargados en el plano del alma, se determinan como:

$$L_r = 1.96r_{ts} \frac{E}{0.7F_y} \sqrt{\frac{J_c}{S_x h_0}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6.76 \left( \frac{0.7F_y}{E} \frac{S_x h_0}{J_c} \right)^2}} \quad (12)$$

Tabla I. Valores de  $C_b$ .



Donde:

$$r^2_{ts} = \frac{\sqrt{I_y C_w}}{S_x} \quad (13)$$

Para perfiles I de simetría doble

$$c = \frac{h_0}{2} \sqrt{\frac{I_y}{C_w}} \quad \text{Para canales} \quad (14)$$

- Vigas de longitud larga  $L_b > L_r$ , la resistencia de diseño a la flexión de perfiles compactos, con flexión respecto al eje mayor, con  $C_b = 1$ , que presentan pandeo en rango elástico, se evalúa con la siguiente ecuación.

$$\phi M_n = \phi_b S_x \frac{\pi^2}{(L_b/r_{ts})^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{J_c}{S_x h_0} \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \quad (15)$$

La NSR-10 [7] plantea la resistencia nominal en función del esfuerzo crítico como se indica continuación:

$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p \quad (16)$$

Si hay pandeo local, la resistencia se reduce.

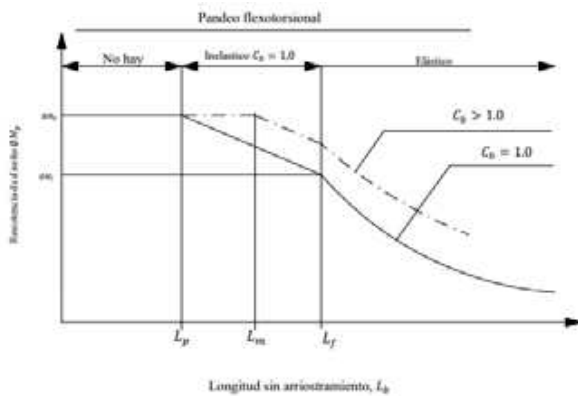


Fig. 6 Comportamiento de una viga bajo carga creciente [5].

## 2. Cortante

### Secciones I o C

Con respecto a la resistencia al cortante, la NSR-10 y la AISC en general establecen varias condiciones y especificaciones, las cuales se resumen a continuación:

El procedimiento especificado aplica a las almas sin atiesar de vigas con simetría doble o sencilla, incluyendo vigas híbridas, a canales, ángulos sencillos y perfiles tubulares, así como a perfiles doble simetría o simple cargados en el sentido débil.

Área del alma: se supone que el cortante es resistido en su totalidad por el alma, despreciando el esfuerzo tomado por las aletas.

Se denomina alma atiesada aquella a la que se le ponen platinas de refuerzo, normalmente perpendiculares al eje longitudinal de la viga, pudiendo ser paralelos a ese eje, denominadas rigidizadores o atiesadores.

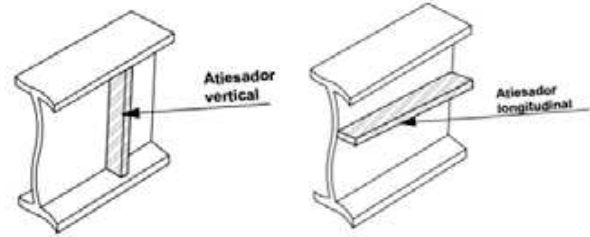


Fig. 7 Rigidizadores en vigas [5].

El factor de resistencia para el diseño a cortante es, salvo se presente otros factores de diseño.

1. Resistencia de diseño a cortante sin considerar la acción de campo.

$$V_n = 0.6 F_y A_w C_v \quad (17)$$

- a) Para almas perfiles laminados de sección I con  $h/t_w \leq 2.24 \sqrt{E/F_y}$ , se especifica:

$$\phi_v = 1.0 \text{ y } C_v = 1.0 \quad (18)$$

- b) Para almas de otros perfiles de doble simetría, incluidos los que no cumplan el límite dado en a),  $C_v$  se calcula considerando que no habrá pandeo del alma por portante, si la relación  $h/t_w$  es baja respecto a la siguiente ecuación, o que de lo contrario si se presentará pandeo, y éste podrá ocurrir en rango elástico o inelástico.

$$\text{Para: } h/t_w \leq 1.10 \sqrt{k_v E/F_y}$$

$$C_v = 1.0 \quad (19)$$

$$\text{Para rango elástico: } 1.10 \sqrt{k_v E/F_y} \leq h/t_w \leq 1.37 \sqrt{k_v E/F_y}$$

$$C_v = 1.10 \frac{\sqrt{k_v E/F_y}}{h/t_w} \quad (20)$$

$$\text{Para rango inelástico: } h/t_w > 1.37 \sqrt{k_v E/F_y}$$

$$C_v = 1.51 \frac{k_v E}{(h/t_w)^2 F_y} \quad (21)$$

2. Resistencia de diseño considerando la acción de campo tensionado: como resultado de la acción de una fuerza cortante, en el alma de una viga se desarrollan esfuerzos cortantes, a los que están asociados esfuerzos principales de compresión y de tensión, los que actúan en direcciones diagonales. Los de compresión pueden producir pandeo del alma, no obstante, si se dan ciertas condiciones, es posible aprovechar la resistencia al pos-pandeo, la que se basa en conseguir que los esfuerzos de tensión alcancen fluencia.

Los rigidizadores transversales empleados para desarrollar en el alma la resistencia de diseño al cortante deberán tener un momento de inercia con respecto a un eje ubicado en el plano medio del alma para el caso de un par de rigidizadores, y con respecto a la cara en contacto con el alma

para el caso de rigidizadores simples, tal que:

$$I = at_w^2 j \quad (22)$$

$$j = \frac{2.5}{(a/h)^2} - 2 \geq 0.5 \quad (23)$$

### 3. Deflexión

Varios reglamentos recomiendan requisitos para los estados límite de servicio, su tratamiento deja a criterio del diseñador, pues estos estados límite están relacionados con la funcionalidad de la estructura y no con la estabilidad. Definen la condición de funcionalidad como un estado en el cual la función de una edificación, su aspecto, facilidad para el mantenimiento, durabilidad y el confort.

Para el presente proyecto considerando que va a ser una construcción sin apuntalar se construyó con contraflecha las vigas, para garantizar un adecuado lineamiento al finalizar el hormigonado del tablero.

Las Fig. 8, 9 y 10, presentan unos diagramas de flujo del diseño para vigas de acero.

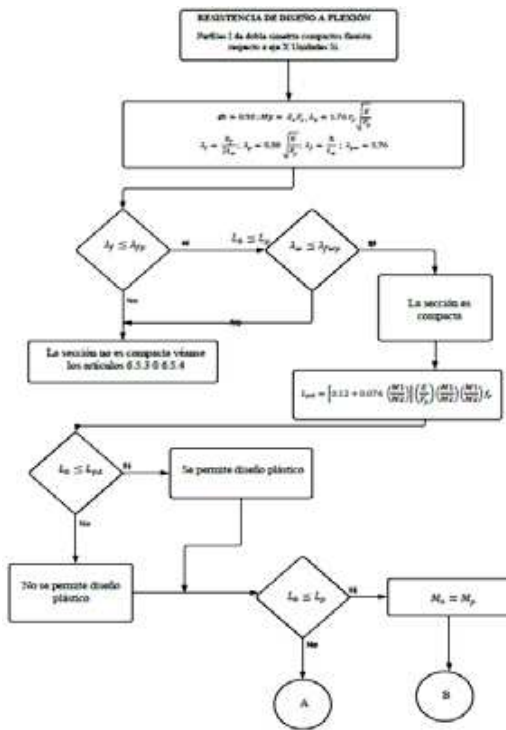


Fig. 8. Diagrama de flujo para evaluación de la resistencia de diseño a flexión de perfiles I de doble simetría compactos [5].

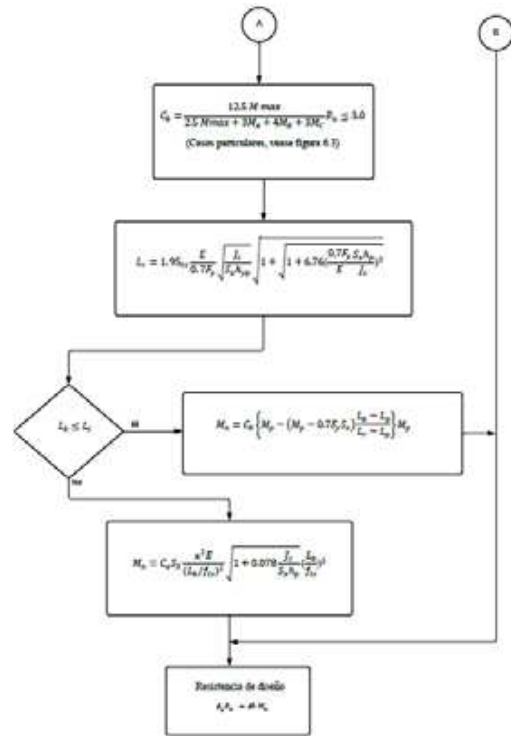


Fig. 9. Resistencia de diseño a la flexión de perfiles I de doble simetría compactos (continuación) [5].

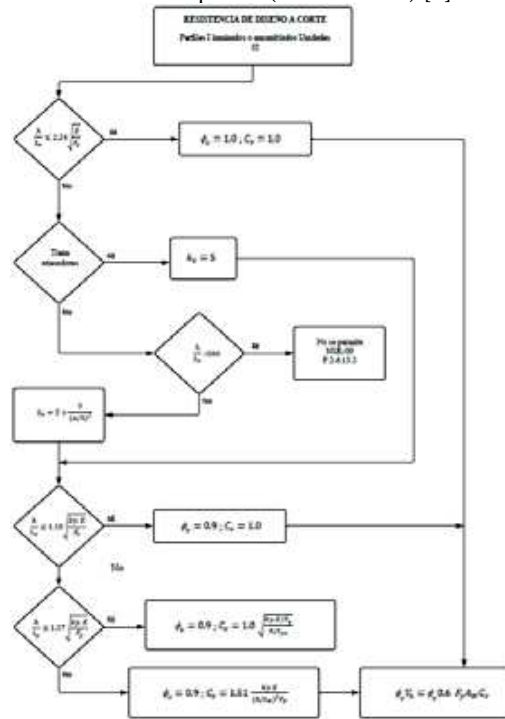


Fig. 10. Resistencia de diseño a cortante de vigas de sección I con rigidizadores o sin ellos [5].

### D. Gestión del proyecto.

La gestión del proyecto se enfoca en la prefabricación y análisis

de ruta crítica [8].

### *Prefabricación*

Un puente es una estructura que depende del estado del clima para su avance en obra, por tal motivo, considerando siempre la ventaja de trabajar en taller o bajo cubierta, se programó diversas actividades que permitan avanzar en el proyecto.

Para el proyecto, se realizaron actividades de prefabricación para el material acero, tanto para vigas como para acero de refuerzo.

Por economía, falta de maquinaria y accesibilidad a la obra, no se optó por prefabricados de concreto para la losa, solo se prefabricó el acero de refuerzo, es decir se figuró las varillas para la losa y los estribos [10].

Para lo cual se contaba con los planos definitivos de aceros analizados y confirmado en obra.

Para el proceso del armado de las vigas tipo I, se controla sus medidas, uso de la soldadura GMAW, proceso de enfriamiento, inspección visual en la totalidad de la soldadura, control de avance en taller y cumplimiento de espesores de soldadura para la unión de los perfiles.

El proceso de armado y soldadura fue alternado, para no generar excesiva carga calorífica en las piezas de unión. Esto ayuda a controlar deformaciones en el proceso de enfriamiento.

Se debe arrancar este proceso y optimización de materiales, desde el diseño y material que se consigue comercialmente en Ecuador para la zona Austral, como es el caso de planchas de acero, en dimensiones 2,44m\*1,22m.

En tramos de 2.44m de longitud fueron transportados al lugar de la obra, donde se preparó un espacio para el adecuado desarrollo del trabajo, donde se ensambló todos los elementos hasta generar las vigas completas del proyecto.

### *Ruta Crítica*

Recordando el concepto básico de ruta crítica como el camino de actividades que deben ser secuenciales y no pueden ser interrumpidos para evitar el avance general programado de la obra, se tiene como un orden general lo siguiente:

1. Excavación
2. Construcción de estribos de concreto reforzado
3. Construcción de vigas de acero
4. Montaje y hormigonado del tablero del puente

Dentro de estos campos generales existen actividades que deben ser organizadas para cumplir con el objetivo de evitar tiempos muertos de personal y maquinaria.

A pesar de estar todos estos aspectos controlados, sucedió una lluvia inesperada a la semana de trabajo, en una época de verano, que generó una creciente que inundó las excavaciones de las zapatas de los estribos, generando dos días de retraso y costos adicionales de alquiler de maquinaria.

En resumen, se menciona que las actividades en obra fueron

excavación, mientras se trabaja en taller en el armado de la estructura de refuerzo, para hormigonar de manera inmediata las zapatas y evitar inundaciones que perjudiquen el avance de obra.

Mientras se avanzaba en la construcción de los estribos, se trabajó de manera paralela en la fabricación de las vigas, por esta razón, al día siguiente de haber finalizado los estribos, se colocaron asientos de neopreno y se empezó con el montaje de las vigas.

No se generó sobre carga temprana en los estribos, puesto que el montaje de vigas, encofrado, colocación de hierros de losa, y hormigonado de losa pasaron más de 15 días calendario.

Considerando concretos de  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup> con aditivos acelerantes y un adecuado curado en obra, el concreto en esos 15 días ya llegó a superar 60% de su resistencia a la compresión.

### **III. Resultados - Construcción**

Los resultados obtenidos al finalizar el proyecto se evaluaron desde los siguientes aspectos:

- Económico: se generó un ahorro del 10.7% aproximado, referente a otras cotizaciones, sin perjudicar la calidad ni la ganancia del proyecto.
- Tiempo de ejecución: se realizó en 3 meses desde el día uno de la obra, con el desmontaje y desarmado de estructura pre-existente colapsada de madera y muros ciclópeo; hasta su culminación y prueba de carga.
- Práctica: todo lo usado en este proyecto, desde la etapa de análisis de cargas, diseño de elementos, fabricación, gestión, montaje, culminación y prueba de carga, fue nuevo para el grupo de trabajo, puesto que se tenía experiencia en concreto, acero, vialidad, por separado, pero no en puentes, así que se sumaron conocimientos y se cosecharon experiencias valiosas.

A continuación, se presenta el registro fotográfico de la obra como evidencia de lo expuesto.

#### **A. Lugar de emplazamiento.**



Fig. 11. Estructura anterior existente en el lugar del emplazamiento.



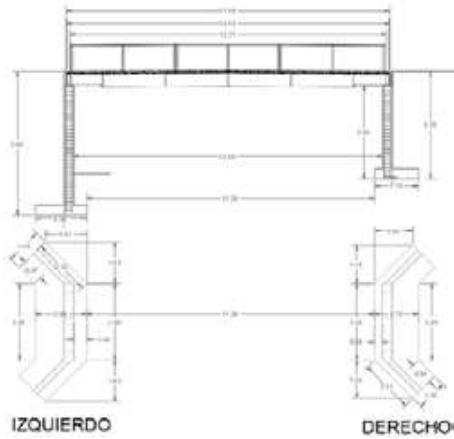


Fig. 12. Esquema propuesto para la nueva estructura del puente.

**B. Excavación y construcción de estribos.**



Fig. 13. Excavación del estribo izquierdo aguas abajo del puente.



Fig. 15. Proceso constructivo de estribo, colocación de refuerzo.



Fig. 16. Proceso constructivo de estribo de margen derecho aguas abajo, encofrado elevado.

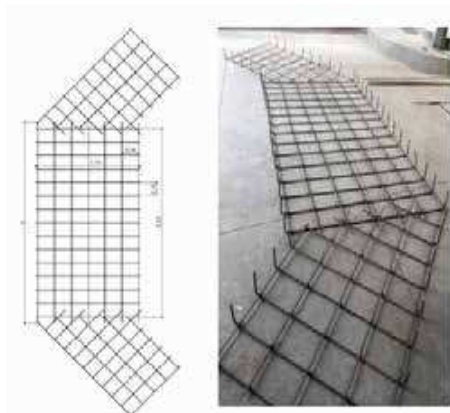


Fig. 14. Parte de la armadura planificada y la armada en taller. Para cimentación de estribos.



Fig. 17. Estribos finalizados.

**C. Construcción de vigas de acero.**



Fig. 18. Proceso de armado de vigas tipo I, con proceso de soldadura GMAW.



Fig. 21. Refuerzo para soportar cargas en losa.



Fig. 19. Vigas armadas en obra, se observa en el borde superior la curvatura que es la contraflecha con la que fue armada la viga.



Fig. 22. Losa completa del tablero mixto.

**D. Construcción del tablero del puente.**



Fig. 20. Montaje de vigas de acero sobre los estribos, mediante retroexcavadora y guía.

**E. Puente finalizado y prueba de carga.**



Fig. 23. Vista inferior del puente ya finalizado.





Fig. 24. Prueba de carga a los 21 días de edad del concreto con acelerante.



Fig. 25. Puente completo, donde se observa la linealidad de las vigas, donde la contraflecha sirvió para soportar los efectos constructivos de la losa de tablero.

#### IV. Conclusiones y Recomendaciones

Dentro de las conclusiones del proyecto se expresa lo siguiente:

A pesar de evaluar mapas de precipitación en la zona, las obras de subestructura o de excavaciones cercanas a ríos en la zona austral del Ecuador, deben contemplar en su ejecución y presupuesto el uso de protecciones con crecidas e inundaciones, además de bombeo para eliminar agua existente, previo el hormigonado de zapatas de estribos.

Considerar en este tipo de proyectos días de imprevistos y costos, referente a problemas que se puedan tener con el clima.

El proceso de soldadura en vigas en obra es muy complejo comparado con el proceso en taller, por ello se recomienda en lo posible prescindir acciones de soldadura en obra, para mejorar la calidad de los productos de acero ensamblados.

Un rubro importante por rendimiento es la colocación de pintura final anti-corrosiva, puesto que los elementos de acero poseen una capa inicial al salir de taller, pero la manipulación en obra conlleva a generar dos capas adicionales, con un rendimiento inferior.

Es muy importante la colocación de drenes por la parte posterior de los estribos para evitar acumulación de presiones hidrostáticas en los vástagos.

Los recubrimientos en estribos y losas deben ser controlados a cada instante, puesto que la complejidad de su colocación con los encofrados puede generar que no se respete sus dimensiones, y este punto es vital para la durabilidad de la estructura de concreto reforzado.

El montaje de las vigas debe ser parte de los cálculos, para determinar la maquinaria a usar y el acceso de la misma al lugar de la obra.

La contraflecha es fundamental en este tipo de proyectos. Se evidenció en el proceso constructivo como la contraflecha ayuda al momento del hormigonado del tablero, generando al final un puente horizontal alineado y sin vibraciones, que bajo cargas de servicio dan una sensación estructural adecuada.

Dentro de las recomendaciones se expresa lo siguiente:

Los atiesadores diagonales de las vigas pueden diseñarse emperradas, para mejorar el rendimiento en obra.

Se puede realizar un monitoreo de las vigas durante el uso bajo condiciones de servicio, con la finalidad de conocer los esfuerzos que están experimentando, considerando que la losa de concreto trabaja conjuntamente con la viga de acero.

El  $f'c$  del concreto de los estribos, de las muestras tomadas en obra entregaron resultados favorables, pero en caso de puentes, es importante llevar un análisis de control de envejecimiento o variación del  $f'c$ , considerando que el terreno adyacente se usa para siembra de vegetales y usan químicos en su proceso.

#### V. Agradecimientos

Como grupo se agradece al propietario del terreno donde se plasmó el puente, por la confianza depositada para desarrollar en totalidad el proyecto.

#### VI. Referencias

- [1] R. Meli, *Diseño Estructural*, Segunda Ed. Ciudad de México - México: Limusa, 2013.
- [2] J. C. McCormac y R. H. Brown, *Diseño de Concreto Reforzado*, 8va. ed. México D.F.: Alfaomega, 2011.
- [3] C. Vallecilla, *Manual de puentes en Concreto de Refuerzo*. Bogotá: Editorial Bauen, 2006.
- [4] American Concrete Institute, *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-19)*. ACI chapter Colombia: American Concrete Institute, 2019, p. 680.
- [5] G. Valencia, *Diseño básico de Estructuras de Acero de acuerdo con NSR-10*, Primera Ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010.
- [6] A. / A. 306-16, *Specification for Structural Steel Buildings*. EEUU, 2016, p. 677.
- [7] A.I.S, *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Colombia, 2010, p. 1625.
- [8] H. de Solminihac y G. Thenoux, *Procesos y técnicas de Construcción*, 6ta. ed. Bogotá: Alfaomega, 2018.
- [9] X. Nieto-Cárdenas y R. Gamón, "Diseño De Una Vivienda De Dos Plantas Con Soluciones Prefabricadas.", Universidad de Cuenca, 2012.
- [10] J. G. Consuegra, *Presupuestos de Construcción*, 2da. ed. Bogotá: Biblioteca de la Construcción, 2014.