

ISSN: 0123-3033 –ISSN-e: 2027-8284



INGENIERÍA CIVIL

Evaluación de secciones compuestas por perfiles de lámina delgada y concreto simple ante cargas de flexión

CIVIL ENGINEERING

Evaluation of composed thin-wall steel sections with unreinforced concrete under bending loads

German D. Herrera-Laverde , Jhon J. Gil , Katherin Duarte-Barón 

**Recinto Universitario de Mayagüez, Puerto Rico. Department of Civil Engineering and Surveying.*
german.herrera@upr.edu

***Universidad Santo Tomás, Villavicencio, Colombia. Facultad de Ingeniería Mecánica.*
jhon.gil@usantotomas.edu.co

****Universidad Santo Tomás, Villavicencio, Colombia. Facultad de Ingeniería Mecánica.* §
katherinduarte@usantotomas.edu.co

Recibido: 3 diciembre de 2021 **Aprobado:** 26 abril de 2023

Cómo citar: Herrera-Laverde, G.D., Gil, J.J., Duarte-Barón, K. Evaluación de secciones compuestas por perfiles de lámina delgada y concreto simple ante cargas de flexión. *Ingeniería y Competitividad* 2023; 25(2): e-20211800. doi: <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i2.11800>

Resumen

Esta investigación tuvo como objetivo principal evaluar el comportamiento de secciones compuestas de diferentes configuraciones sometidas a flexión, para esto se tuvieron en cuenta los parámetros establecidos por el ANSI/AISC, NSR-10, ACI-18 y pruebas de laboratorio como la prueba de flexión de cuatro puntos. A través de los estudios teóricos se evaluó la rigidez, resistencia y esfuerzos de las secciones para categorizarlas y compararlas entre sí, con secciones de hormigón armado y secciones de acero estructural. Mediante las pruebas de laboratorio se verificó la efectividad del cálculo teórico y el comportamiento real de los materiales. Los resultados de las pruebas demostraron una validación teórica cercana y un comportamiento de flexión dúctil y favorable debido al aislamiento de las partes comprimidas y las partes traccionadas.

Palabras clave: *Adherencia entre acero-hormigón, Elementos compuestos, Máxima resistencia, Vigas rellenas de hormigón.*



Abstract

The main objective of this research was to evaluate the behavior of composite sections of different configurations subjected to bending, considering the parameters established by ANSI/AISC, NSR-10, ACI-18 and laboratory tests such as the four-point bending test. Theoretical studies were used to evaluate the stiffness, strength and stresses of the sections in order to categorize and compare them with reinforced concrete sections and structural steel sections. Laboratory tests verified the effectiveness of the theoretical calculation and the real behavior of the materials. The test results showed a close theoretical validation and a ductile and favorable bending behavior due to the isolation of the compressed and tensioned parts.

Keywords: *Adherence between steel-concrete, Composite members, Maximum strength, Concrete-filled beam*

Introducción

La evolución tecnológica, arquitectónica y constructiva que satisface las necesidades de las estructuras ha traído consigo el aumento de las restricciones y solicitaciones a las que se somete una edificación, incrementando de manera significativa las cargas producidas por el peso propio, los efectos de las cargas variables accidentales, las condiciones mínimas de rigidez, resistencia, durabilidad y estabilidad que deben tener los miembros estructurales. Estos aumentos en el peso estructural conllevan también a un aumento en el costo de la estructura y poco aprovechamiento del material.

Los miembros estructurales de concreto poseen alta resistencia a fuerzas axiales de compresión, durabilidad y resistencia al fuego. Por otro lado, los miembros de acero de espesores de alma y aleta bajos (miembros esbeltos), son poco resistentes a fuerzas de compresión (debido a fallas prematuras por pandeo), pero de gran resistencia a fuerzas de tensión. Es por esta razón que el uso de secciones compuestas por dos o más materiales colocadas adecuadamente mejoraría el comportamiento y la capacidad de miembros estructurales (1).

El fenómeno de pandeo en el acero ocurre cuando se aplican cargas de compresión al elemento estructural, esto conlleva a que se presente una curvatura o flexión que afecta al funcionamiento y estabilidad de la estructura (2).

Al igual que el acero, el concreto posee propiedades mecánicas que lo hacen muy eficaz para soportar cargas de compresión. Cuando una viga de concreto reforzado es sometida a cargas de flexión (en el caso estático, aplicado a zonas de baja demanda sísmica) solo la parte superior con respecto al eje neutro está trabajando. Una vez es superado el momento de agrietamiento se convierte en un peso adicional en la sección sin contribuir a la resistencia, razón por la cual

se dice que no hay un máximo aprovechamiento del material.

Para solucionar estos problemas se han realizado estudios con el uso combinado del acero y concreto, no solo como miembros de concreto reforzados con varillas de acero, flejes y otros elementos, si no como losas de concreto soportadas por vigas de acero, miembros de acero embebidos en columnas de concreto, miembros de acero rellenos de concreto o como mejor se les conoce: tubos rellenos de concreto, sean estos de sección cuadrada, rectangular o circular. Para estas 3 últimas secciones el pandeo local producido en el acero es eliminado por el concreto, y la resistencia del concreto aumenta debido al confinamiento permanente del tubo de acero, además de tener un incremento de la inercia en la sección transversal del miembro que aumenta considerablemente la rigidez, resistencia y disminuye la esbeltez.

Considerando lo mencionado anteriormente, se han venido realizando pruebas para la optimización de materiales y mejoramiento de los procesos constructivos. Las investigaciones realizadas en miembros compuestos se han centrado en conocer el comportamiento de estos sometidos a cargas axiales. Gardner y Jacobson (3) evaluaron la carga final en tubos rellenos de concreto CFT cortos y la carga de pandeo de los CFT largos. Furlong (4) representó la carga axial, resistencia a flexión y rigidez de columnas CFT. Piotr Lacki, Anna Derlatka y Przemystaw Kasza (5) evaluaron las tensiones en elementos de acero y concreto por medio de una simulación en elementos finitos, además de un sin número de investigadores más como los ecuatorianos Daniel Carapaz y Elvis escudero (6) quienes evaluaron columnas tubulares rellenas y huecas por medio de una comparación o Han

y Li (7) para conocer el efecto sísmico en tubos de acero rellenos de concreto.

Entre las principales investigaciones en torno a miembros compuestos sometidos a flexión están la de Laghui Guo, Young Liu y Bing Qu (8) en la cual analizaron el comportamiento de estructuras compuestas de acero y concreto en conjunto con miembros compuestos (vigas y losas) por medio de

pruebas experimentales y modelos computacionales, utilizando diferentes medios como perfiles angulares para asegurar la acción conjunta entre la losa y la viga así como se muestra en la Figura 1. Se encontró finalmente que los modelos analizados tuvieron una adecuada relación y que el ángulo conector propuesto aumentó la interacción.

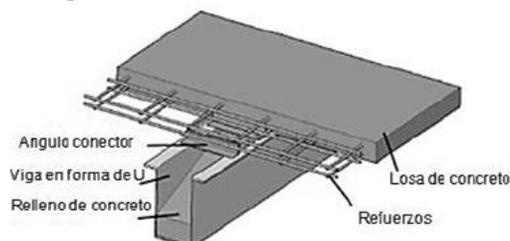


Figura 1. Viga compuesta
Fuente (8)

Otro estudio de secciones compuestas sometidas a flexión fue realizado por Li Hua chen, Shu-ting Ji, Hong-yang Zhang y Xiao-feng Wu (9), dichos autores propusieron un nuevo tipo de viga compuesta de concreto revestida de una lámina de acero diamantada de *steeldeck* con el fin de aumentar la resistencia y el efecto de adherencia entre los materiales, figura 2.

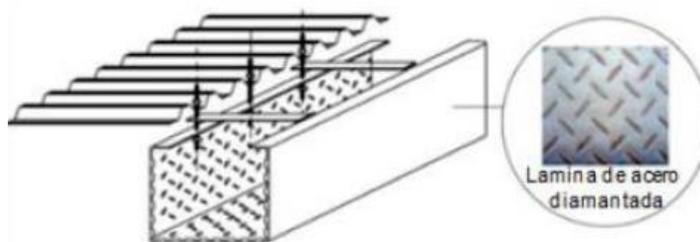


Figura 2. Viga compuesta
Fuente (9)

También se han realizado diferentes estudios de miembros en flexión como el de R.MarkLawson y Hogr Taufig (10) utilizando secciones en C incrustadas al concreto, o la del ecuatoriano Xavier Flores (11) en vigas rellenas sometidas a cargas de flexión, la de Liang Huangm, Chen Zhangm, Libo Yan y Bohumil Kasal (12) utilizando tubos de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP) en la zona de compresión en el tramo medio de la viga para confinar el concreto y mejorar la interacción de los materiales.

Por último, vale la pena resaltar que se debe verificar la acción completa y/o conjunta entre los materiales, así como lo indicaba Cedewwall Engstrom y Graves, en su estudio realizado en 1990 en el cual se concluyó que cuando los materiales estaban despegados, el núcleo de concreto no contribuía al comportamiento de la columna y esta se comportaba como un tubo de acero hueco. Si la carga está directamente aplicada en el perfil de acero, el concreto sufre un agrietamiento prematuro y el tubo de acero un pandeo local en las almas.

Bajo el contexto de la problemática planteada, el presente documento tuvo como objetivo realizar una evaluación comparativa de 8 tipos de secciones compuestas para determinar cuál era la más eficiente, luego a partir de la sección escogida validar los resultados por medio de pruebas de laboratorio (ensayo de flexión de 4 puntos) y compararla en términos de costo, rigidez y peso con secciones típicas equivalentes de concreto reforzado y acero estructural de lámina delgada, según lo establecido en las normas NSR-10 (13), ACI-18 (14) y ANSI/AISC 360-10 (15).

Materiales y métodos

El estudio utilizó un método de investigación cualitativo y comparativo para demostrar la eficiencia de secciones compuestas sometidas a flexión. La recopilación de los datos de las variables a comparar como la rigidez, resistencia y costo se obtuvieron teniendo en cuenta los parámetros establecidos por la mecánica de materiales y las normas de diseño aplicables como la NSR-10, ACI-18 y ANSI/AISC 360-10.

Para realizar una eficaz comparación y evaluación con vigas equivalentes de concreto reforzado y de acero estructural, se debería trabajar con longitudes típicas de 4, 5 o 6 m usadas en proyectos de vivienda y edificaciones. Para efectos de la validación experimental y por limitaciones del laboratorio se procedió a trabajar con una viga de menor longitud que permitió una adecuada manipulación, y posteriormente, con ayuda del modelo matemático y la ley de similitud se escaló a mayores longitudes (esto considerando el efecto adicional por cortante para vigas cortas). De acuerdo con lo anterior, se modificó la sección transversal de la viga para que cumpliera con las cargas de servicio estáticas propuestas y con una longitud de 1,2 m.

Determinación de las cargas

Por medio de un análisis estructural se estimaron las cargas gravitacionales (dadas por la carga muerta y viva de la estructura) para posteriormente calcular el momento actuante en la viga, los resultados se indican en la tabla 1.

Tabla 1. Análisis estructural

Luz Libre (m)	Cv (kgf)	Cm (kgf)	Wu (kgf/m)	R (kgf)	Mu (kgf.m)
1,2 m	1050	1400	3540	2180	668,118

Fuente: autores

Dónde: Cv es la carga viva, Cm es la carga muerta, R la reacción en los apoyos y Mu el momento actuante.

El valor numérico de las cargas fue determinado de acuerdo con la resistencia de la sección a fallar en el laboratorio, vale la pena mencionar que las dimensiones de la sección principal (sección compuesta) fueron determinadas teniendo en cuenta las limitaciones propuestas por el sitio en donde se laminó el perfil (longitud mínima de doblado y espesor de la lámina).

Nota: el valor de las cargas vivas y muertas varía en función del uso de la estructura y sirve para determinar numéricamente el momento nominal de la sección a fallar, experimentalmente debe ser comparado con el momento último resistente suministrado por el ensayo.

Posteriormente, teniendo en cuenta el método de distribución de tensiones plásticas y el análisis de miembros compuestos por medio de la sección transformada, se desarrolló el modelo matemático para conocer los esfuerzos a compresión y a tracción de una viga compuesta de sección dada y luego a partir de la posición de la fibra neutra plástica (FNP) de la sección, conocer el momento resistente, ver tabla 2.

También se desarrolló el modelo para el cálculo de miembros estructurales equivalentes de concreto reforzado y acero que permitieran efectuar la comparación con la sección compuesta en términos de resistencia, tamaño y costos.

Dimensionamiento de la viga compuesta para unas condiciones de carga dadas

Al igual que sucede en los sistemas constructivos de placas aligeradas con perfiles vigacero, bloquelones y placa fácil, la unión entre el perfil metálico propuesto y el relleno de concreto mejoran significativamente las características de la sección compuesta. Entre las principales ventajas se pueden observar:

- Presenta mayor resistencia en la zona de compresión debido al confinamiento permanente del concreto, que según la NSR-10 para estos casos se toma como $0,95f'_c$.
- Permite una mayor separación entre apuntalamientos temporales durante la etapa constructiva.
- No requiere el uso de formaletas.

Es importante resaltar que el análisis de la sección compuesta va enfocado en buscar una sinergia entre los dos materiales, es decir, aprovechar las cualidades de cada material, ubicando el concreto en la zona de compresión y el acero en la zona de tensión que es donde mejor trabajan. Con ayuda del modelo matemático de distribución de tensiones plásticas (figura 3) se cambiaron las dimensiones de la sección compuesta (altura, ancho y espesor) hasta llegar a suplir el momento de la solicitación calculado con el análisis de cargas.

La viga de sección compuesta inicial fue determinada de un diseño de viga equivalente en concreto reforzado y refinada a partir de las limitaciones del sitio de laminado. El diseño de la geometría, no solo de esta sección, si no de las demás secciones propuestas se hizo de acuerdo con el comportamiento del concreto a cargas de tensión; como lo indica la teoría, el concreto una vez ha superado su fuerza a tracción máxima (dada por el momento de agrietamiento) deja de dar un aporte relevante a los esfuerzos inferiores al eje neutro de una viga a flexión y se convierte en un peso muerto.

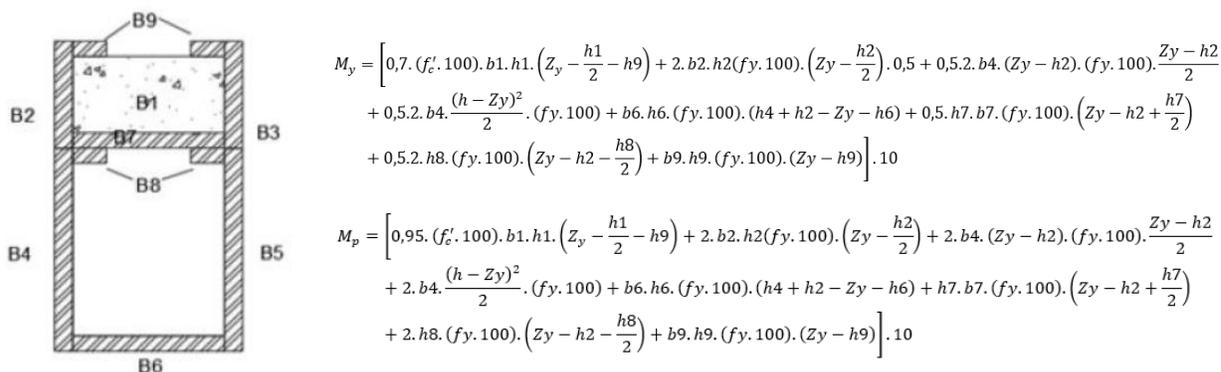


Figura 3. Distribución de tensiones en la viga compuesta

Fuente: autores

De acuerdo con lo anterior, se realizaron diferentes configuraciones de modo tal que se pudiera eliminar el peso o volumen de concreto que trabaja a tensión sin aumentar apreciablemente el costo del elemento estructural. La primera sección propuesta se ilustra en la figura 3.

Tabla 2. Propiedades geométricas de la viga de sección compuesta

Dimensiones parte superior de la sección										
Elemento	B1	B2	B3	B9	B7					
t	b ₁	h ₁	b ₂	h ₂	b ₃	h ₃	b ₉	h ₉	b ₇	h ₇
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
0,07	7,00	3,86	0,07	4,00	0,07	4,00	1,00	0,09	7,00	0,07
Dimensiones parte inferior de la sección										
Elemento	B4	B5	B6	B8						
t	b ₄	h ₄	b ₅	h ₅	b ₆	h ₆	b ₈	h ₈		
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)		
0,07	0,07	9,00	0,07	9,00	7,00	0,07	1,00	0,07		

Fuente: Autores

Se introdujeron variables como: la relación $\gamma = b/h$ y $R =$ ancho de las alas (B8 y B9), ver tabla 3.

Tabla 3 Restricciones de la sección principal

γ (cm)	R (cm)	h (cm)	b (cm)
0,54	1,00	13,00	7,14

Fuente: Autores

Para el diseño de esta y demás secciones se tuvo mucho cuidado en el dimensionamiento de los elementos del perfil con el objetivo de garantizar que el eje neutro de la sección correspondiera con la parte inferior del bloque de concreto, para que de esta manera el concreto trabajase netamente a compresión y se cumpliera con lo dicho anteriormente. También hay que recordar que el diseño de estos miembros fue planteado para el rango o estado elástico de la sección, el momento plástico o momento nominal último es calculado como referente nada más y fue calculado por medio de la distribución plástica de tensiones.

La representación gráfica de la viga de sección compuesta solo en concreto se ilustra en la Figura

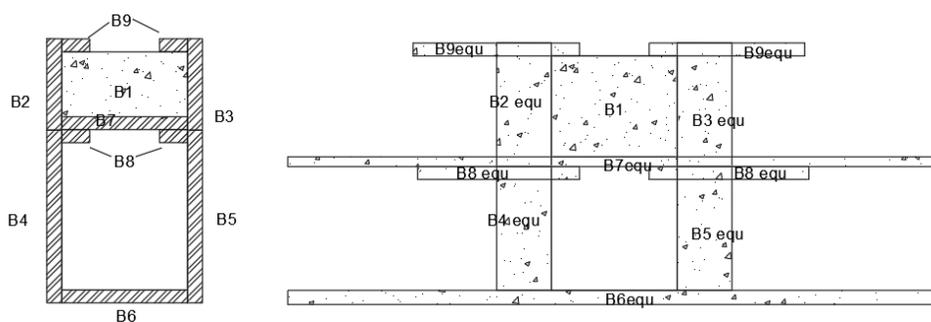


Figura 4. Sección principal homogeneizada toda en concreto

Fuente: autores

Los esfuerzos respectivos de la sección propuesta se muestran en la tabla 4 y los chequeos de momentos de la sección principal en la tabla 5.

Tabla 4. Esfuerzos de la sección principal

c1 (mm)	σ Concreto (kgf/mm ²)	c2 (mm)	σ Acero (kgf/mm ²)
44,70	2,960	-85,300	54.298

Fuente: autores

Tabla 5. Chequeo de momentos de la sección principal

r	K	J	Centroide inf (cm)	d (cm)	Mc (kgf.m)	Ms (kgf.m)	Chequeo
13,09	0,42	0,85	5,69	7,30	2898.033	1059.485	Falla dúctil

Fuente: autores

Después se calculó el momento último resistente de la sección dependiendo de la relación de esbeltez de sus miembros de acero. El perfil fue caracterizado por esbeltez de acuerdo con lo establecido en la norma ANSI/AISC 360-10 para miembros compuestos rellenos y para perfiles de acero sometidos a flexión.

Para caracterizar la esbeltez de la sección se utilizaron las dos tablas debido a que la parte superior está rellena de concreto y la inferior no, los resultados fueron tabulados en la tabla 6:

Tabla 6. Chequeo de esbeltez de los elementos de la sección principal

Miembros rigidizados (almas sup)		Miembros rigidizados (almas inf)	
Δf	57,14	λ_w	128,57
λ_{Pf}	82,90	λ_{Pw}	66,87
Δr_f	157,51	λ_{rw}	157,51
Máx	157,51	Máx	157,51
Chequeo	Compacta	Chequeo	No compacta

Miembros rigidizados (alas sup)		Miembros rigidizados (alas inf)	
Δf	14,28	λ_w	100,00
λ_{Pf}	62,45	λ_{Pw}	62,45
Δr_f	82,10	λ_{rw}	82,10
Máx	138,17	Máx	138,17
Chequeo	Compacta	Chequeo	Esbelta

Fuente: autores

En las Figura 5 y 4 se ilustra el comportamiento a flexión de la viga, en esta se hizo un equilibrio de tensiones.

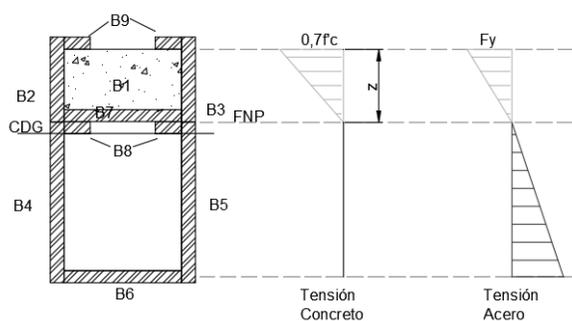


Figura 5. Distribución de tensiones o esfuerzos en el rango elástico

Fuente: autores

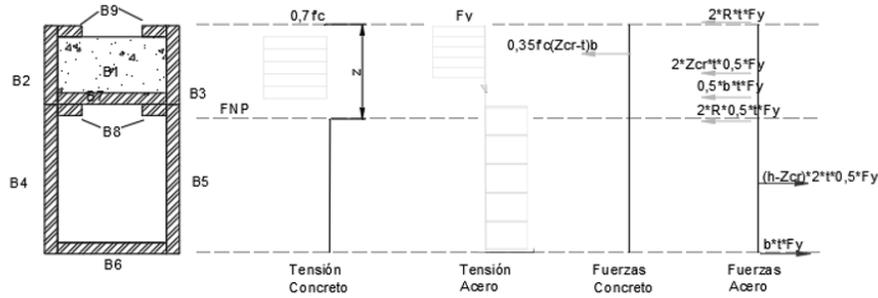


Figura 6. Distribución de tensiones o esfuerzos en el rango plástico

Fuente: autores

Donde:

- Z_{cr} es la posición de la fibra neutra plástica.
- f_y es el esfuerzo cedente del acero.
- f'_c es el esfuerzo último del concreto.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Chequeo de momentos

Zcr (cm)	S (cm³)	My=Mn (kgf.m)	Mp (kfg.m)	ΦMn (kgf.m)
3,35	223,63	675.004	932,227	607.360

Fuente: autores

Posteriormente, se verificó si la deflexión producida por las cargas en la viga cumplía con la establecida en la norma, y se tomó como un piso que soporta elementos no estructurales ($L/360$). Una vez se comprobó el cumplimiento, se calculó la longitud máxima resistente y el ancho efectivo de la sección.

Teniendo en cuenta el método de distribución de esfuerzos y los criterios mencionados se analizaron otras 7 secciones para efectos comparativos de geometría, resistencia, peso y costo y se dejaron cuatro propuestas adicionales, así como se ilustran en la figura 7. En esta primera aproximación no se han tenido en cuenta elementos a cortante, ya que se asume que hay adherencia y el principal objetivo es el estudio de la flexión, adicionalmente, haciendo una aproximación experimental preliminar se encontró que: en un trabajo posterior tendrá que evaluarse la adherencia.

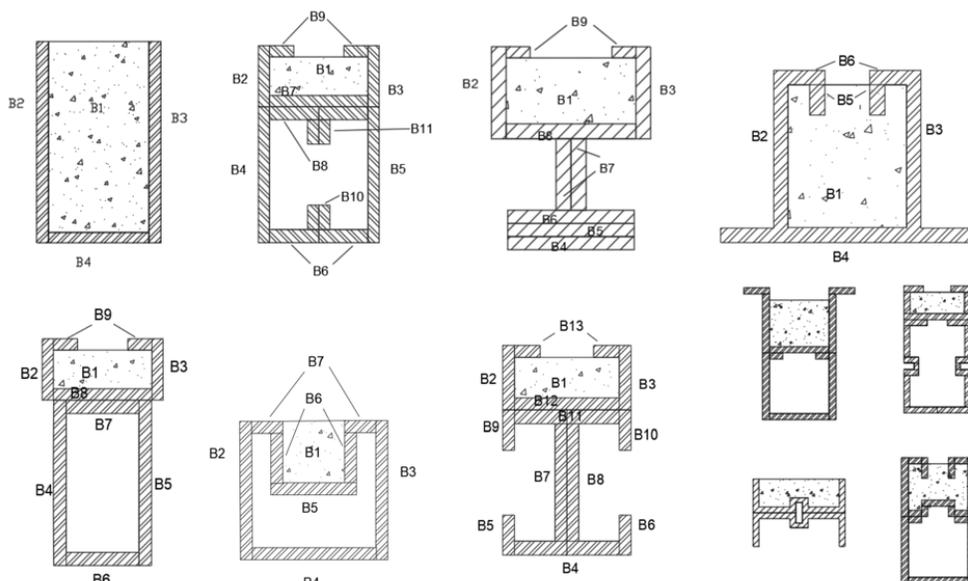


Figura 7. Secciones compuestas analizadas

Fuente: autores

Nota: las secciones propuestas se hacen desde el punto de vista geométrico y resistente teniendo en cuenta el concepto principal de que el hormigón trabaja bien a compresión y el acero a tensión, en la práctica algunas de ellas podrían presentar problemas por el uso de soldadura y dobleces particulares a la hora de laminarse que pueden generar esfuerzos residuales. Adicional se deberían hacer las respectivas consideraciones de esfuerzos cortante para cada una de ellas de modo que se garantice la adecuada interacción entre los materiales, así como se hizo con la sección escogida.

Análisis a flexión de la viga de concreto reforzado

Para el cálculo de la viga en concreto reforzado se tomaron en cuenta las especificaciones del ACI-318 Y NSR-10, de las cuales se extrapolaron las siguientes suposiciones:

- Las secciones transversales de la viga perpendicular al plano de flexión permanecen planas durante la flexión.
- Los esfuerzos en el concreto y en el acero se calcularon por medio de la sección transformada y la formula $G = Mc/I$, teniendo en cuenta que la distribución de esfuerzos deja de ser lineal en vigas muy peraltadas.
- Se supuso que el concreto no resiste esfuerzos en tensión, ya que la resistencia a tensión “fr” para concretos de peso normal es muy baja comparada con la del acero.
- Para conocer la falla final del concreto en su estado plástico se asumió la deformación unitaria máxima del mismo en la fibra externa a compresión como $\epsilon_{cu} = 0,003$.
- La relación de esfuerzo – deformación para el concreto fue asumida según la teoría del bloque equivalente de Whitney. Las propiedades resistentes de los materiales utilizados para el diseño de la viga de concreto reforzado fueron extraídas de las usadas convencionalmente, de acuerdo con la tabla 8.

Tabla 8. Propiedades de los materiales de la viga de concreto reforzado

$f'c$ (kgf/cm ²)	E_c (kgf/cm ²)	F_r (kgf/cm ²)	E_s (kgf/cm ²)	F_y (kgf/cm ²)
210	218819,79	28,98	2100000	4200

Fuente: autores

La altura mínima de la viga fue calculada mediante la relación $L/16$, generando como resultado 7,5 cm. Por efectos de capacidad de la sección la altura tuvo que ser modificada hasta los 15,42 cm (tabla 9), Adicionalmente, la base fue tomada como un 64% de la altura.

Tabla 9. Propiedades geométricas de la viga de concreto reforzado

h (cm)	b (cm)	r (cm)	d (cm)	Φ
15,42	10	4	11,42	0,9

Fuente: autores

A modo de visualización en la figura 8 se ilustra la distribución de tensiones de la viga de concreto reforzado.

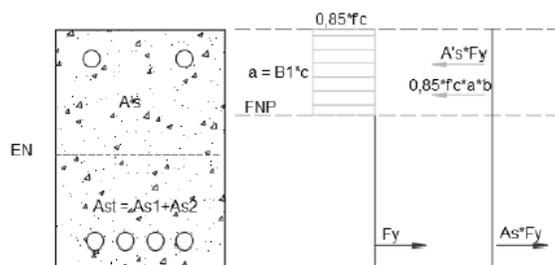


Figura 8. Distribución de tensiones de la viga de concreto reforzado

Fuente: autores

Se hizo el chequeo de los momentos de la sección para saber si la sección tenía una falla dúctil, frágil o balanceada, calculando también el momento último resistente de la sección en su rango elástico igualando tensiones, adicionalmente, se calculó el momento nominal resistente, la inercia antes del agrietamiento de la sección y el momento de agrietamiento. Se verificó la deflexión de la viga producida por las cargas, se tomó como un piso fijo a elementos no estructurales ($L/360$).

Nota: para efectos comparativos con los diferentes tipos de vigas propuestos se calculó la longitud máxima de la viga de concreto reforzado cumpliendo con la deflexión máxima permisible.

Análisis a flexión de la viga de acero estructural

Para el cálculo de la viga en acero a flexión se tomaron en cuenta las especificaciones del AISC-10 y la ANSI, de las cuales se extrapolaron las siguientes suposiciones:

- El material es homogéneo y obedece a la ley de Hooke.
- El módulo elástico (E) es igual a tracción que a compresión.
- El miembro inicialmente es recto y de sección constante.
- No hay cargas axiales actuando en el miembro.
- Los esfuerzos a compresión y a tensión se calculan con la fórmula $\sigma = Mc/I$, teniendo en cuenta que se trabaja con una sección simétrica.
- El diagrama de tensión-deformación para el acero es idealizado por dos líneas rectas. En cuanto a la tensión cedente, F_y , el material es linealmente elástico. Después se alcanza la tensión cedente, la deformación se incrementa en gran medida sin mayor aumento en la tensión.

En primera instancia se calculó el módulo de sección necesario para resistir el momento actuante, luego se procedió a elegir del catálogo un perfil que tuviera un módulo igual o mayor con respecto al eje fuerte del tubo.

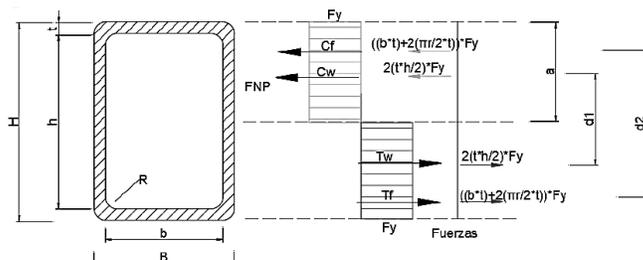
Con la sección escogida se calcularon los brazos de palanca a compresión y a tensión (d_1 y d_2) y se hizo la igualación de tensiones ($T_w = C_w$ y $T_f = C_f$), así como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Propiedades de la sección (H120x60x2,25)

H (mm)	B (mm)	t (mm)	R (mm)	A (cm ²)	Sx (cm ³)	Zx (cm ³)	Ix (cm ⁴)
120	60	2,5	7,5	8,54	26,55	32,88	159,29
r (mm)	h (mm)	b (mm)	d1 (mm)	d2 (mm)	a (mm)	Tw = Cw (kgf)	Tf = Cf (kgf)
8,75	108,75	48,75	54,38	126,25	56,88	9556,41	6216,38

Fuente: autores

Luego se realizó el chequeo de esbeltez de la sección para conocer su momento último, debido a que todos los elementos de la sección son compactos el momento nominal último es igual al momento plástico de la sección. A manera de ilustración en la figura 9 se representa la distribución de tensiones en la viga de acero.

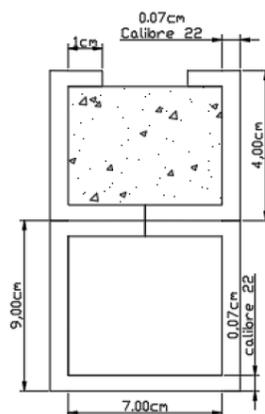
**Figura 9.** Distribución de tensiones plásticas de la viga de acero miembros de acero sometidos a flexión

Fuente: autores

Posteriormente se hizo el cálculo de esfuerzos de la sección utilizada sometida al momento propuesto. De acuerdo con los resultados, se aprecia que el esfuerzo a compresión es menor a los esperados según el módulo elástico de sección, esto es básicamente debido a que la altura útil del alma “H” al igual que el ancho efectivo del ala “B” se vieron disminuidos por un radio de curvatura “r” en las esquinas. Se verificó si la deflexión producida por las cargas cumplía con la establecida en la norma, se tomó como un piso que soporta elementos no estructurales. (L/360).

Ensayos de laboratorio

Armado del perfil compuesto: para la conformación del perfil compuesto se soldaron dos perfiles de dimensiones especificadas en la figura 10 con el fin de rellenar la parte superior de concreto que trabajará a compresión.

**Figura 10.** Dimensiones de la viga fallada en laboratorio

Fuente: autores

Luego, se procedió a lavar el interior del perfil superior para quitar la grasa y posteriormente aplicar 3 capas de anticorrosivo en las almas laterales y en el ala inferior, finalmente, se realizó la mezcla de concreto, se rellenaron los

perfiles y se dejaron en el tanque para el respectivo curado del concreto. En la práctica se sugiere utilizar perfiles galvanizados para evitar la corrosión de la lámina de acero (16).

Con la misma mezcla se rellenaron los cilindros testigos para el cálculo de la resistencia $f'c$.

Finalmente, se realizó el ensayo a flexión de la viga compuesta simplemente apoyada recibiendo la carga de dos fuerzas puntuales a una separación de 20 cm, así como se muestra en la figura 11.

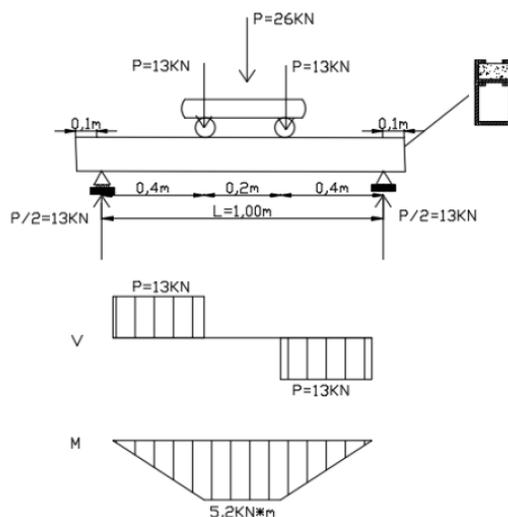


Figura 11. Cilindros de concreto y tubos para prueba de corte

Fuente: autores

Se aplica la carga a la sección compuesta (ver figura 12).



Figura 12 Falla de la sección compuesta

Fuente: autores

Tabla 11. Esfuerzos y momentos últimos de la sección fallada en laboratorio

c1 (cm)	$\bar{\sigma}$ Concreto (kgf/cm ²)	c2 (cm)	$\bar{\sigma}$ Acero (kgf/cm ²)	Zcr (cm)	S (cm ³)	My=Mn (kgf*m)	Mp (kgf*m)	ΦM_n (kgf*m)
4,52	198,845	-8,48	3748,069	3,35	223,63	662,816	925,503	60,27

Fuente: autores

Los resultados del ensayo a flexión en el laboratorio para las seis vigas de sección compuesta demostraron que en promedio tenían una capacidad de 662.816 kgf.m, adicional a esto, se presentó un aplastamiento en los apoyos por el

mismo hecho de ser una viga corta. Las proyecciones hechas a partir de la distribución de tensiones con el cálculo teórico para vigas con mayores longitudes deberán ser verificadas con los ensayos pertinentes para futuras investigaciones. (tabla 11)

El esfuerzo rasante se determinó de acuerdo con la figura 13 y la siguiente ecuación:

$$\Gamma = \frac{V \cdot Q}{I t}$$

Donde:

- Γ es el esfuerzo cortante en la sección.
- V es el cortante interno de la sección.
- Q es el primer momento de inercia con respecto a la fibra de interés.
- I es la inercia de la sección.
- t es el ancho sometido a corte.

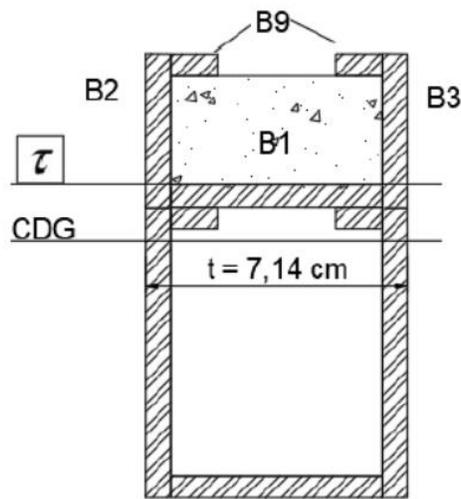


Figura 13 Evaluación teórica del esfuerzo rasante
Fuente: autores

El esfuerzo rasante calculado fue de 0,099 kgf/cm².

Para evaluar experimentalmente la resistencia por esfuerzo rasante de la sección se rellenaron 3 tubos de concreto con las siguientes características:

- Se dejó 2 cm libres en una de las caras del tubo.
- La otra cara fue rellena de concreto a ras del tubo.
- Los tubos tenían una longitud de 10 a 15 cm de largo.

Para dejar los 2 cm en una de las caras, primeramente, se introdujo arena y luego se rellenaron los tubos con concreto, se dejaron 1 día y luego de secada la mezcla se retiró la arena, figura 14.

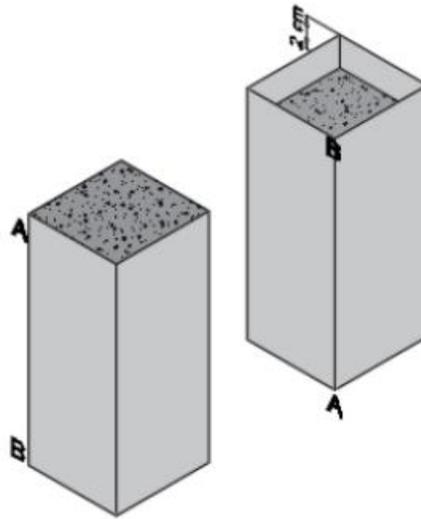


Figura 14 Evaluación experimental del esfuerzo rasante
Fuente: autores

Luego de los 28 días cumplidos de endurecimiento del concreto se sometieron los tubos a la prueba de rasante, aplicando una fuerza transmitida por una varilla en la cara “A” hasta que se produjo un deslizamiento en el tubo. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 12. Esfuerzos y momentos últimos de la sección fallada en laboratorio

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Carga por deslizamiento (kgf)	435.419	407,886	458.872
Carga última (kgf)	683.21	662.816	805.576

Teniendo en cuenta los resultados de carga última de la tabla 12 se determinó el esfuerzo por adherencia resistente entre las interfaces de los materiales, el cual dio como resultado 13.256 kgf/cm². Este valor es mucho mayor al actuante de 0,099 kgf/cm² mencionado anteriormente.

Resultados

Se realizó una comparación de las geometrías propuestas para la conformación de secciones compuestas, los resultados experimentales y computacionales suministrados por las pruebas.

Para cumplir con ello se compararon: la carga resistente de los perfiles, el efecto de los esfuerzos de corte por adherencia directa entre los materiales, los desplazamientos consecuentes a las cargas aplicadas, los costos de las secciones compuestas con referencia a la de concreto reforzado y acero estructural, y la veracidad de los resultados teóricos con respecto a los experimentales y computacionales.

En la figura 15 se pueden apreciar los resultados obtenidos de las distintas pruebas a las que se sometió la viga principal.

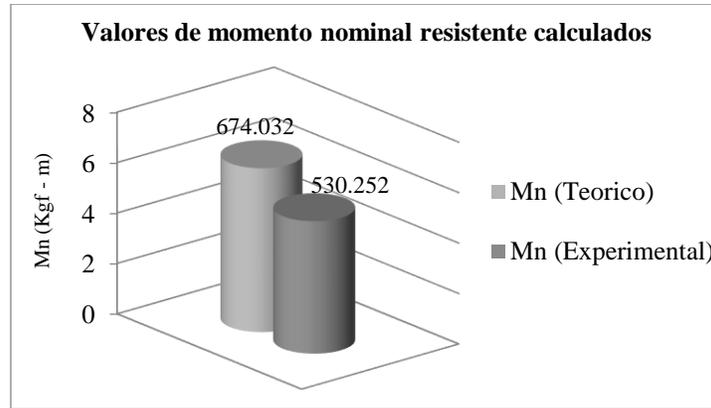


Figura 15 Momentos resistentes calculados

Fuente: autores

De igual manera, en la tabla 12 se observan los resultados obtenidos de los momentos elásticos y plásticos resistentes de las otras siete secciones propuestas y analizadas teóricamente (17).

Tabla 12. Momentos últimos resistentes de las secciones compuestas

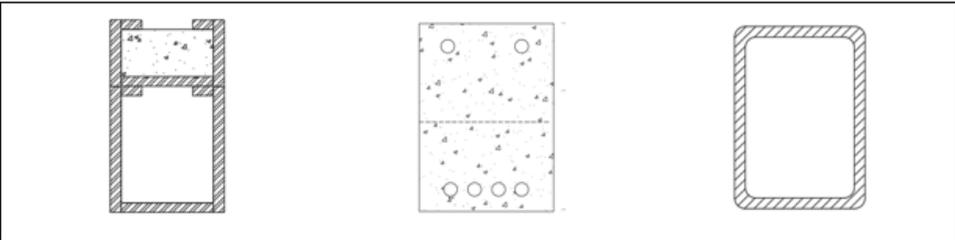
N°	Mue	Mup	W
	(Kgf.m)	(Kgf.m)	(Kg)
Sección 1	674.032	932.021	10,68
Sección 2	687.289	920.804	42,8
Sección 3	712.782	893.271	11,06
Sección 4	678.111	856.562	53,9
Sección 5	679.125	915.715	206,95
Sección 6	673.013	767.846	10,15
Sección 7	711.762	926.922	9,91
Sección 8	668.934	964.652	12,85

Fuente: autores

Nota: todas las secciones compuestas estudiadas teóricamente cumplen con las cargas aplicadas en el rango elástico, por tal razón, los momentos últimos plásticos no son los mismos, estos variaron directamente con la geometría del miembro y la cantidad de elementos de este.

Como se puede observar en los resultados teóricos y experimentales los valores de momento nominal de la sección son cercanos, validándose entre sí. Como bien se mencionó el proyecto de investigación tiene como principal objetivo la propuesta de una sección híbrida o compuesta de dos materiales como sistema alternativo de elementos sometidos a flexión (18), para esto primeramente debía ser validada la sección propuesta tal y como se hizo en la figura 15.

Una vez obtenida y evaluada la sección compuesta se observa en la figura 16 la comparación a nivel de costos, inercia y peso de las secciones en hormigón armado y acero estructural que serían equivalentes al momento nominal objetivo (19). En esta se observa claramente la eficiencia de la sección compuesta siendo la de menor costo, buena inercia llegando a tener casi la misma de la de concreto reforzado y poco peso siendo tan ligera como la de acero estructural.



Inercia (cm ⁴)	1007,84	1293,96	159,29
Peso (Kg)	10,68	47,38	6,70
Costo (\$)	9728,00	13109,00	22183,00
Mue (KN*m)	6,61	7,35	9,15
b _{eff} (cm)	54,08	32,42	33,93
L máx (cm)	216,35	129,17	135,74
Acero (cm ²)	3,08	3,15	8,54
Concreto (cm ³)	27,02	154,21	0,00

Figura 16 Comparativo de las vigas analizadas

Fuente: autores

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos es conveniente utilizar secciones compuestas debido a la eficiencia que tienen para resistir cargas de la misma magnitud con disminución de la sección transversal, peso, costos y aumento de la rigidez de los elementos estructurales (vigas) con respecto a secciones de concreto reforzado o acero estructural.

En el ensayo experimental se pudo observar la relación modular de la sección que trabajaba a compresión con respecto a la sección que trabajaba a tensión, esta mostró un comportamiento de deformación dúctil de la sección inferior y un comportamiento muy resistente de la sección a compresión debido al confinamiento permanente que le generaba el perfil superior al concreto y al aumento de la resistencia por pandeo local en las almas producida por el núcleo de concreto (20).

Una característica que se presentó en las vigas compuestas analizadas fue la optimización de la resistencia y rigidez del acero debido a su ubicación en la periferia de la sección transversal, lo cual permitió disminuir las dimensiones geométricas del miembro debido a que el núcleo de concreto actuaba como un reforzamiento en el alma retrasando el pandeo local interior del perfil (21).

En los resultados obtenidos del análisis teórico comparativo de las secciones compuestas se pudo evidenciar que la resistencia y rigidez de estas no son directamente proporcionales al tamaño, obteniendo secciones muy rígidas, pero poco resistentes en donde se tenía un aumento de área en las fibras exteriores. Esto quiere decir que la mejor combinación o propuesta de sección compuesta surgió como resultado de someter los materiales a los esfuerzos que mejor trabajan colocándolos estratégicamente y concentrando la mayor cantidad de área en las fibras extremas de la sección. Sin embargo, como se mencionó anteriormente en comparación con las secciones equivalente de hormigón armado y acero estructural sí presentaban mejora sustancial (22).

Un gran aporte de las secciones compuestas que se evidenció en los resultados fue la disminución del peso del miembro debido a la sustitución del volumen de concreto que normalmente se colocaba en la parte traccionada por un poco más de acero para dejar hueca dicha parte.

La respuesta de la viga como sección compuesta varía en función de la carga aplicada, quiere decir que a medida que la misma incrementa en función de sus solicitaciones o longitud, el esfuerzo rasante también, esto implicaría el uso de conectores de cortante que deben preverse en caso que el esfuerzo rasante resistente dado por la fricción entre los materiales no cumpla (23).

Referencias bibliográficas

- (1) Herrera G. Evaluación de secciones compuestas por perfiles de lámina delgada y concreto simple ante cargas de flexión [Online]. 2019. Available: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/16995>.
- (2) McCORMAC J. Diseño de estructuras de acero - 5a ed. Alfaomega Grupo Editor; 2016.
- (3) Herrera G. Estado del Arte de Miembros Compuestos Bajo Cargas [Online]. 2019. Available: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/16995/2019germanherrera1?sequence=2>
- (4) Furlong RW. AISC Column Design Logic Makes Sense for Composite Columns, Too, American Institute of Steel Construction. Engineering Journal [Online]. 1976; 13:1–7. Available: <https://www.aisc.org/AISC-Column-Design-Logic-Makes-Sense-for-Composite-Columns-Too>
- (5) Lacki P, Nawrot J, Derlatka A, Winowiecka J. Numerical and experimental tests of steel-concrete composite beam with the connector made of top-hat profile. Composite Structures. 2019 Mar;211(0263-8223):244–53. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822318340509>
- (6) Escudero E, Carapaz D. Estudio experimental de columnas tubulares de acero rellenas de hormigón, sometidas a carga axial [Online]. 2015. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10370>
- (7) Li W, Han LH. Seismic performance of CFST column to steel beam joint with RC slab: Joint model. Journal of Constructional Steel Research [Online]. 2012 Jun;73(0143-974X):66–79. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X12000132>
- (8) Guo L, Liu Y, Qu B. Fully composite beams with U-shaped steel girders: Full-scale tests, computer simulations, and simplified analysis models. Engineering Structures [Online]. 2018 Dec;177(0141-0296):724–38. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029618313725>
- (9) Chen L, Li S, Zhang H, Wu X. Experimental study on mechanical performance of checkered steel-encased concrete composite beam. Journal of Constructional Steel Research [Online]. 2018 Apr 1;143(0143-974X):223–32. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X16305041>
- (10) Lawson RM, Taufiq H. Partial shear connection in light steel composite beams. Journal of Constructional Steel Research [Online]. 2019 Mar;154(0143-974X):55–66. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X18306783>
- (11) Flores Sánchez XE. Estudio experimental de vigas compuestas tubulares sujetas a flexión [Online]. Escuela Politécnica Nacional. 2014. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8854>
- (12) Huang L, Sun X, Yan L, Kasal B. Impact Behavior of concrete Columns Confined by Both GFRP Tube and Steel Spiral Reinforcement. Construction and Building Materials [Online]. 2017 Jan; 131(0950-0618):438–48. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816318645>

- (13) Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial Dirección del Sistema Habitacional República de Colombia, Comisión Asesora Permanente para el régimen de Construcciones Sismo Resistentes. NSR – 10. Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente. Bogotá, Colombia – Título A. 2010. 186p.
- (14) American Concrete Institute. ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills, USA: ACI; 2019. 628p.
- (15) American Institute of Steel Construction. ANSI/AISC 360-10. Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, Illinois: AISC; 2010. 612p.
- (16) Shamass R, Cashell KA. Behavior of Composite Beams Made Using High Strength Steel. Structures [Online]. 2017 Nov;12(2352-0124):88–101. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012417300528>
- (17) J Y Richard Liew, Y H Ng, N E Shanmugam. Design of Haunched Composite Connections for Long Span Beam Construction. Department of Civil Engineering National University of Singapore [Online]. 2012: 424 – 433. Available: https://www.researchgate.net/publication/237500597_DESIGN_OF_HAUNCHED_COMPOSITE_CONNECTIONS_FOR_LONG_SPAN_BEAM_CONSTRUCTION.
- (18) Rana MM, Lee CK, Al-Deen S, Zhang YX. Flexural Behavior of Steel Composite Beams Encased by Engineered Cementitious Composites. Journal of Constructional Steel Research [Online]. 2018 Apr; 143(0143-974X):279–90. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X17312725>
- (19) Yang J, Chen H, Hu S, Gan VJL. Experimental Studies on the Flexural Behavior of Steel-Concrete Composite Beams with Transverse and Longitudinal Hidden Girders. Engineering Structures [Online]. 2019 Jan; 179(0141-0296):583–94. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014102961733208X>
- (20) Xing Y, Han Q, Xu J, Guo Q, Wang Y. Experimental and numerical study on static behavior of elastic concrete-steel composite beams. Journal of Constructional Steel Research [Online]. 2016 Aug 1; 123(0143-974X):79–92. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X16301122>
- (21) Han LH, Yao GH, Xiao Ling Zhao. Tests and calculations for hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC). Journal of Constructional Steel Research [Online]. 2005 Sep 1; 61(9):1241–69. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X05000258>
- (22) Ceballos Mora JP, Rodríguez Sabogal JD. Comparación Técnica y Económica del Diseño de una Estructura Mixta con Respecto a una Convencional de Concreto Reforzado. Universidad Javeriana [Online], 2016. Available: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/21409/CeballosMoraJuanPablo2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- (23) Hossain KMA, Mol L. Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. Construction and Building Materials [Online]. 2011 Aug 1;25(8):3495–501. Available:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061811000882>