



REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- SCOPUS
- Compendex
- Chemical Abstracts
- Metal Abstracts
- World Aluminium Abstracts
- Mathematical Reviews
- Petroleum Abstracts
- Current Mathematical Publications
- MathSci
- Revencyt
- Materials Information
- Periódica
- Actualidad Iberoamericana

UNIVERSIDAD DEL ZULIA



REVISTA TÉCNICA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Hacia los 130 años de creación de la Universidad del Zulia

"Buscar la verdad y afianzar
los valores trascendentales",
misión de las universidades en
su artículo primero, inspirado
en los principios humanísticos.
Ley de Universidades 8 de
septiembre de 1970.

Experiment design for beams with hybrid nodes

Yordy Mieles Bravo^{1*} , Rafael Larrúa Quevedo² , Stalin Alcivar Moreira³ 

¹Departamento de Construcciones Civiles de la Universidad Técnica de Manabí, Avenida Urbina, Portoviejo, Ecuador, Teléfono: +593999977709, correo yordimieles@gmail.com

²Centro para el Estudio de Estructuras y Sistemas Constructivos, Universidad de Camagüey, Cuba. Tel: 53 32 262487, correo rafaellarrua57@gmail.com

³Departamento de Construcciones Civiles de la Universidad Técnica de Manabí, Avenida Urbina, Portoviejo, Ecuador, Teléfono: +593991702009, correo wsalcivar@hotmail.com

*Autor de correspondencia: yordimieles@gmail.com

<https://doi.org/10.22209/rt.ve202020n2a07>

Recepción: 21/02/2020 | Aceptación: 21/04/2020 | Publicación: 31/07/2020

Abstract

For buildings with reinforced concrete frames and a steel deck floor system supported with metal beams, composite connections have constructed based on empiricisms or steel detailing rules, due to the lack of algorithms and procedures for the design of the node hybrid concrete beam - steel beam. This paper presents the design of the factorial experiment 2^3 to test specimens and know the behavior of hybrid nodes in reinforced concrete beams. Factorial experiments are frequently applied in civil engineering, as they have the advantage of containing all possible combinations of independent variables. The moment - shear relation, the relation between the height of the node - the height of the beam and the use of suspensions were considered as influential factors for the minimum and maximum level of each independent variable, resulting in eight experiments plus one replica for a total of 16 specimens and 4 control beams without nodes as standard. Using the factorial experiment three direct effects, three double combinations and a triple combination of the dependent variables can be studied for which statistical acceptance hypotheses are established.

Keywords: Hybrid nodes; steel deck; factorial experiment; beams nodes.

Diseño de experimento para vigas con nudos híbridos

Resumen

Para edificios de pórticos de hormigón armado y sistema de piso de losa steel deck sostenidos con vigas de metal, las conexiones compuestas se han construido en base a empirismos o reglas de detallado del acero, por la carencia de algoritmos y procedimientos para el diseño del nudo compuesto viga de hormigón - viga de acero. En este trabajo se presenta el diseño del experimento factorial 2^3 para ensayar especímenes y conocer el comportamiento de nudos híbridos en vigas de hormigón armado. Los experimentos factoriales se aplican con frecuencia en la ingeniería civil, pues tienen la ventaja de contener todas las combinaciones posibles de las variables independientes. Se consideró como factores influyentes en la respuesta la relación momento - cortante, la relación altura del nudo - altura de la viga y el uso de suspensores, para un nivel mínimo y máximo de cada variable independiente, lo que da como resultado ocho experimentos más una réplica para un total de dieciséis especímenes y cuatro vigas sin nudos como patrón. Con el experimento factorial se pueden estudiar tres efectos directos, tres combinaciones dobles y una combinación triple de las variables independientes para las cuales se establecen hipótesis estadísticas de aceptación.

Palabras clave: nudos híbridos; steel deck; experimento factorial; nudos en vigas.

Introducción

Los entrepisos con losas compuesta fueron desarrollados como un sistema constructivo para pórticos de acero y después se adaptó su uso en pórticos de hormigón armado (HA) por las bondades en tiempo de ejecución y doble propósito del steel deck como encofrado y lámina colaborante, para lo cual existen normas para su diseño y construcción [1, 2]. Los nudos híbridos en vigas de hormigón mostrados en la Figura 1(a) y 1(b), son el resultado de buscar una solución constructiva a entrepisos formados por losas steel deck apoyados por marcos de vigas y columnas de hormigón armado. Las vigas que sostienen al steel deck son por lo general metálicas y para conectarse a la viga de acero se han desarrollado varias alternativas y dispersiones constructivas como las mostradas en la Figura 1(c) y (d) con una viga secundaria de acero pasante o viga anclada a la viga de hormigón armado, luego sobre las vigas metálicas se coloca la losa steel deck como sistema de piso. Por efecto del sismo de Ecuador de abril de 2016 de 7,8 Mw, muchas de este tipo de edificaciones tuvieron fallas prematuras en sus nudos aun sin responder, por lo que el estudio resulta pertinente.



Figura 1. (a)(b) Entrepiso de losa steel deck; (c) Nudo de viga pasante; (d) Nudo viga anclada.

En vigas de hormigón armado con perturbaciones no se cumplen la distribución lineal de deformaciones y estas zonas son conocidas como región D o sitios de discontinuidad geométrica. Una discontinuidad en la distribución de esfuerzos se produce en los nudos, por el cambio de geometría de un elemento estructural, por el paso de tuberías por el alma de vigas, en una carga o reacción concentrada [3] lo cual se cumple en los nudos híbridos y debe aplicarse métodos como el modelo puntal tensor o de elemento finito que describan la distribución de esfuerzos los cuales deben ser respaldados con experimentación [4, 5]. En la literatura hasta ahora revisada no existe una descripción del comportamiento, análisis y diseño de nudos híbridos en vigas como los mostrados en la Figura 1 y se requiere de experimentación

en laboratorios. Hacer experimentación demanda muchos recursos, por lo que las variables elegidas para ensayos estructurales deben ser las más adecuadas para responder todas las interrogantes del problema. En este artículo se analizan los principales factores a tener en cuenta en un ensayo estructural de vigas con nudos híbridos.

Metodología

Un experimento es una prueba donde se hacen modificaciones deliberadas a las variables de entrada para identificar la razón de los cambios en la variable de salida. Es fundamental elegir adecuadamente el tipo de experimento y las variables a medir, para que respondan las hipótesis y conduzcan a deducciones válidas al problema investigado [6]. Los resultados experimentales permiten después calibrar y respaldar modelos matemáticos o computacionales que guarden relación con el fenómeno investigado. El diseño de experimento factorial se aplica con mayor frecuencia en ingeniería, consiste en variar sistemáticamente todos los factores de forma simultánea, incluye todas las combinaciones posibles de los niveles de las variables y permite observar la respuesta de las variables dependientes en cada corrida [7].

Para caracterizar el comportamiento de vigas principales de hormigón armado con nudos híbridos de vigas de acero pasantes, la resistencia y rigidez son las principales variables a medir, pues a partir de esos parámetros se diseña la viga. En base a observaciones del daño durante el sismo del 16 de abril de 2016 de Ecuador y ensayos exploratorios realizados en el año 2018 [8] se decide por las variables dependientes siguientes:

1. Momento flector (M), como una medida de la resistencia a flexión.
2. Fuerza Cortante (V) como medida su resistencia a carga, y
3. Deflexión (δ) como medida de rigidez.

Sección transversal de la viga de hormigón

La sección transversal para todas las vigas es como la mostrada en la Figura 2(a) con un ancho de $b=25$ cm que es el mínimo normativo del American Concrete Institute (ACI) y también de la Norma Ecuatoriana de la Construcción [9], una altura de $h=40$ cm, aproximadamente 1,5 veces el ancho de la viga, se fija la altura efectiva en $d=35$ cm. El área de acero mínimo recomendada el ACI 318 sección 9.6.1, expresado como un porcentaje de la sección, es el mayor valor entre: $\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} = 0,0033$ y $\rho_{min} = \frac{0,25 \cdot \sqrt{f'_c}}{f_y} = 0,0029$. El porcentaje de acero máximo en función de las máximas deformaciones admisibles de los materiales sugeridos por el ACI para el hormigón en

22.2.2.1 de $\varepsilon'_c = 0,003$ y la del acero para elementos controlados por tracción $\varepsilon_t = 0,005$ de la Figura R21.2.2.2(b) [3]: $\rho_{max} = \alpha_1 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \cdot \frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon'_c + \varepsilon_t} = 0,0155$. Se asume un valor que de $\rho = 0,007$; entonces el área de acero será: $A_s = \rho \cdot b \cdot d = 0,007 \cdot 25 \text{ cm} \cdot 35 \text{ cm} = 6,12 \text{ cm}^2 \Rightarrow 3 \phi 16 \text{ mm} = 6,03 \text{ cm}^2$

Esta cantidad de acero longitudinal da una separación de 5 cm entre barras colocadas en una sola capa. El área de acero en el lado de compresiones es el mayor valor entre el 50% del acero a tracción y el acero mínimo, lo que resulta en $2\phi 16 \text{ mm} = 4,02 \text{ cm}^2$, el diámetro de estribos de 10 mm y separación de 10 cm tal como se ilustra en la Figura 2(a).

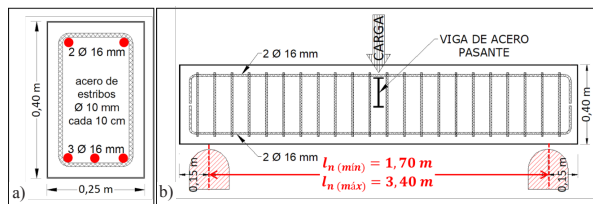


Figura 2. (a) Sección transversal para viga de ensayo; (b) Luz mínima y máxima del espécimen.

Las estructuras de hormigón se pueden dividir en regiones tipo viga donde son aplicables las hipótesis de distribución lineal de las deformaciones de la teoría flexional, y regiones perturbadas, adyacentes a los cambios abruptos de carga correspondientes a cargas concentradas y reacciones, o adyacentes a cambios abruptos de geometría tales como huecos o cambios de sección transversal. En estas secciones perturbadas las distribuciones de deformaciones no son lineales [10]. Estas diferentes zonas se conocen como regiones B y regiones D, respectivamente [11]. Una viga es considerada elemento en flexión si su longitud es al menos 4 veces su mayor sección transversal, por lo tanto se fija en 1,70 m la luz mínima y 3,40 la luz máxima, representados en la Figura 2(b)

Variable independiente 1: relación momento cortante

Representa la relación entre momento y cortante de la sección debido a las diferentes posiciones de los nudos a lo largo de la viga de hormigón, visto en la Figura 3(a), lo cual se logra variando la distancia entre el nudo y el apoyo. Los valores relativos de M (momento) y V (cortante) afectarán tanto la magnitud como la dirección de las tensiones y el agrietamiento. El principio de Saint-Venant y análisis elásticos de tensiones indican que el efecto de una región D desaparece a una distancia de la mayor sección transversal donde se origina la perturbación [4]. Los ensayos deben representar vigas de hormigón armado, por lo tanto la menor distancia entre el

nudo y el apoyo debe ser al menos 0,80 m. Fijando la luz mínima como luz patrón e igual a $l_n = 1,70 \text{ m}$ y la relación momento cortante mínimo y máximo en ese límite será:

- Un espécimen con nivel mínimo $M/V = 0,5$ $l_n = 0,85 \text{ m}$, Figura 3(b), es gobernada por cortante, su relación momento/cortante es también la que daría los mayores cortantes posibles y la viga seguirá siendo elemento a flexión [3, 12].
- Un espécimen con nivel máximo $M/V = l_n = 1,70 \text{ m}$, Figura 3(c), representa un nudo gobernado por flexión, con momento relativamente grande y cortante pequeño.

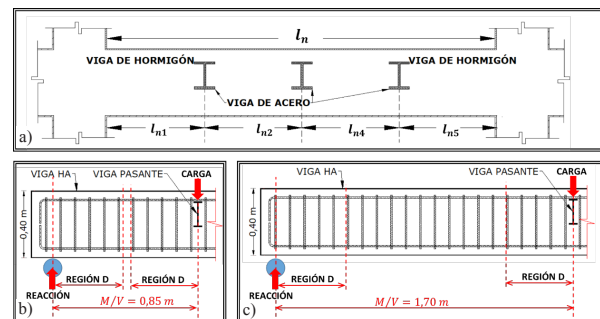


Figura 3. (a) Diferentes distancias de las vigas secundarias. (b) Relación momento/cortante = 0,85. (c) Relación momento/cortante = 1,70.

Variable independiente 2: relación entre altura de la conexión y altura de la viga de hormigón (h_c/h)

Representa el nivel de mayor o menor perturbación de la discontinuidad de la región D causada por la viga pasante, debido a una relación entre la altura de la conexión y la altura de la viga como se muestra en la Figura 4(a). Se ha observado ciertos nudos construidos que ocupan prácticamente toda la viga, tanto como lo permite la altura del estribo (ver Figura 1), e hipotéticamente pueden originar grietas prematuras para nudos híbridos. En la Figura 4(b) se observan las diversas alturas de nudos de los especímenes y los niveles descritos a continuación:

- Nivel mínimo de perturbación con una viga pasante $h_c = 140 \text{ mm}$ aproximadamente $1/3$ de la altura de la viga de hormigón, tal como el mostrado en la Figura 4(b), que es una relación altura de nudo/altura de viga de $h_c/h = 0,35$.
- Un nivel máximo de perturbación con una viga pasante $h_c = 260 \text{ mm}$ superior a $1/2$ la altura de la viga de hormigón, como se ilustra en la Figura 4(c), que es una relación altura de nudo/altura de viga de $h_c/h = 0,65$

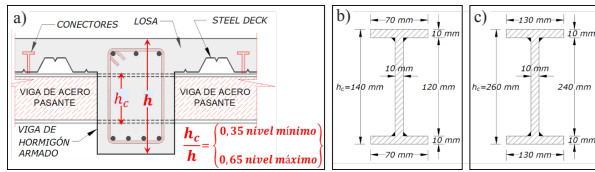


Figura 4. (a) Relación de altura de la perturbación. (b) viga de acero para relación $h_c/h = 0,35$ c) viga de acero para relación $h_c/h = 0,65$

Variable independiente 3: Suspensor en el nudo

En el levantamiento de información de las vigas con nudos híbridos del terremoto del 16 de abril de 2016 de Ecuador se observó un patrón de daño de formación de grietas diagonales y un puntal de compresión desde la parte superior del nudo. En la primera serie de ensayos de exploración se observó la misma falla por formación de puntales como la Figura 5(b). Hacen falta suspensores que restrinjan la formación de grietas y para que las fuerzas verticales equilibren con tensores y transfiera la carga a la parte superior de la viga anclado en la zona de compresión [13, 14].

La transmisión de fuerzas de la viga metálica a la viga de hormigón la convierte en un apoyo indirecto. En este tipo de apoyo las fuerzas de la viga de acero deben ser transferidas a la viga principal por medio de suspensores, codificada en el ACI 318-19 en R9.7.6.2 [3]. Los suspensores o estribos se ubican dentro de la intersección del alma de la viga principal de hormigón y la viga que transfiere la carga para satisfacer el equilibrio de nudo [13]. Un buen detallado del acero para un nudo en vigas de hormigón, requiere el uso de estribos de suspensión bien anclados a la viga principal [15]. La forma de los estribos suspensores son mostrados en la Figura 5(a) y 5(c) y los niveles en el experimento son:

- Nivel mínimo: no usa estribos suspensores
- Nivel máximo: usa estribos suspensores

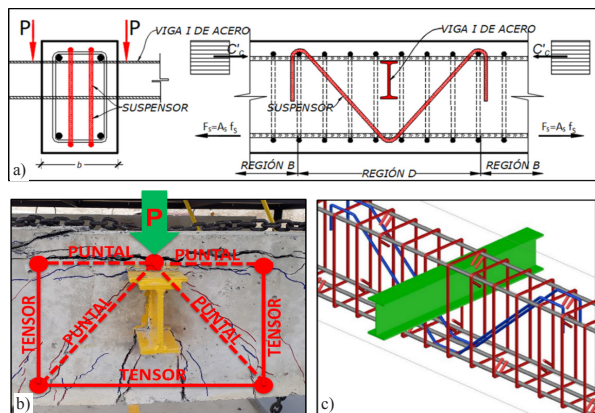


Figura 5. Estribos de suspensión para transmitir la reacción de la viga I.

Como hipótesis se espera que los suspensores mejoren la resistencia del nudo que en ensayos previos y nudos observados luego del terremoto del 16 de abril de 2016 de Ecuador muestran un patrón de daño como la Figura 5(b) con un puntal de compresión desde la parte superior del nudo. Se consideró además para usar los suspensores los resultados de la primera serie de experimentos resultados mostrados en la referencia [8].

Resultados y Discusión

Se busca que los experimentos representen lo más general posible a los nudos híbridos, y a partir de estos experimentos calibrar modelos computacionales con otras variables no tratadas. El diseño factorial con tres variables independientes y dos niveles resultan en un experimento 2³, (dos niveles con tres variables), ocho experimentos más una réplica de cada uno, para un total de 16 experimentos. El objetivo de la experimentación es determinar la influencia del cambio de las variables independientes, la interacción o efecto doble entre ellas y determinar cómo influyen en la respuesta de las variables dependientes. Se pueden estudiar hasta 2³-1=7 efectos, tres principales, tres interacciones dobles y una interacción triple [6] en las variables dependientes elegidas para una viga con nudo compuesto:

1. Efecto de la resistencia de la viga mediante la relación momento/cortante
2. Efecto de la perturbación por el nudo, mediante la relación altura del nudo/altura de la viga de hormigón
3. Efecto del uso de suspensores
4. Efecto doble de la perturbación y el uso de suspensores
5. Efecto doble de la perturbación y resistencia de la viga
6. Efecto doble de la resistencia y el uso de suspensores
7. Efecto de la resistencia, perturbación y el uso de suspensores

El tratamiento estadístico posterior mostrará la influencia entre variables independientes, para lo que se establecen dos hipótesis: Ho (hipótesis nula), las variables independientes o la interacción entre variables no influyen en el valor de las variables dependiente y H1 (hipótesis alternativa), las variables independientes o la interacción de estas variables influyen en el valor de las variables dependientes. El p-valor indica que para valores menores

de 0,05, prueba que hay suficiente evidencia estadística como para rechazar H_0 con un nivel de significación del 5%. En la Figura 6 se muestra un esquema de las tres variables independientes, sus dos niveles y la matriz de experimentación resumida en la Tabla 1.

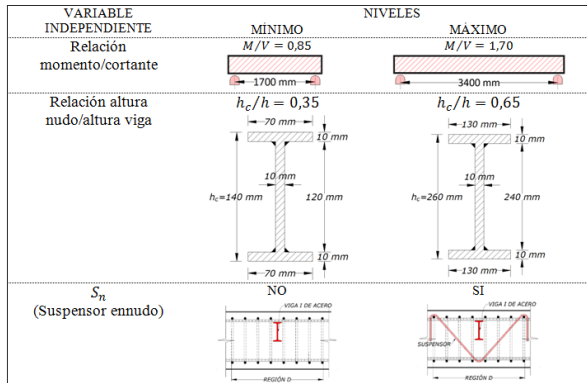


Figura 6. Esquema de variables independientes y niveles del experimento 2³.

de veinte especímenes, desglosada en ocho especímenes con una réplica por cada experimento, más cuatro vigas de contraste o patrón que no tienen nudos pero si los mismos materiales y secciones. Los resultados de estos ensayos están en una etapa de validación estadística, los primeros resultados observados durante la experimentación indican que la resistencia disminuye hasta un 72% con respecto a las vigas de control sin nudo.

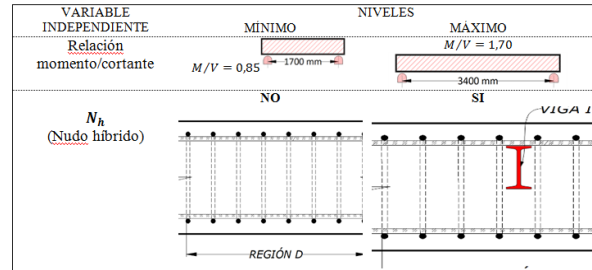


Figura 7. Esquema de variables independientes y niveles.

Tabla 1. Matriz experimento 2³ para vigas con nudos híbridos

Experimento	Relación Momento/Cortante (mm)			Relación Altura nudo/altura viga (mm)			Suspensor en nudo	
	niveles	$\frac{M}{V}$	Luz libre l_n (mm)	niveles	$\frac{h_c}{h}$	Altura nudo (h_c) (mm)	niveles	S_n
E1	-	0,85	1700	-	0,35	140	-	NO
E2	+	1,70	3400	-	0,65	140	-	NO
E3	-	0,85	1700	+	0,35	260	-	NO
E4	+	1,70	3400	+	0,65	260	-	NO
E5	-	0,85	1700	-	0,35	140	+	SI
E6	+	1,70	3400	-	0,65	140	+	SI
E7	-	0,85	1700	+	0,35	260	+	SI
E8	+	1,70	3400	+	0,65	260	+	SI
Viga de patrón de control								
E9	-	0,85	1700		0,35			
E10	+	1,70	3400		0,65			

Para contrastar el comportamiento y tener datos patrón de una viga sin nudo se deben construir dos vigas de control sin nudo híbrido más una réplica que puede adaptarse a un experimento 2² al combinarlo con cualquiera de las tres variables independientes del experimento 23. La Figura 7 muestra las variables independientes para el experimento 22 antes ya explicadas. En la Figura 8 se observan las vigas construidas y ensayadas en el marco de reacción de la Universidad Técnica de Manabí, en Ecuador entre los meses de agosto a noviembre de 2019 en un total



Figura 8. Ensayos de los especímenes de vigas con nudos híbridos y vigas de control.

Conclusiones

El experimento factorial 2³ elegido contiene las principales variables que influyen en la respuesta para el análisis y diseño de vigas, como son el momento flector y el cortante como una medida de la resistencia y la deflexión como una medida de la rigidez.

Existen distintas variables independientes que modifican la respuesta de la viga, pero por economía se eligieron: la luz pues modifica el momento y la carga de falla de la viga, la altura del nudo dado que influye en la formación de grietas prematuras y origina la perturbación de la región D, finalmente el uso de suspensores probará si este puede controlar la fisuración por la discontinuidad de la sección.

Se recomienda el uso de estribos suspensores en la construcción de vigas de hormigón armado con nudos híbridos de vigas secundarias pasantes como una regla de detallado del acero de refuerzo, pues actualmente se ha observado que no se colocan. En los ensayos realizados se observó menor fisuración a iguales cargas que en vigas sin suspensor y aumento de la resistencia.

Los datos de los ensayos del diseño de experimento se encuentran en una etapa de validación estadística y estudio de los mecanismos de fallo por flexión y cortante, cuyos resultados aún no están completos por lo extenso de cada registro de datos de cada ensayo.

Referencias Bibliográficas

- [1] 1.SDI-C: "Composite Steel Deck Floor Deck-Slabs". Steel Deck Institute, 2017.
- [2] SDI-N: "Non Composite Steel Floor Deck". Steel Deck Institute, 2017.
- [3] ACI-318S-19: «Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural». Farmington Hills: American Concrete Institute, 2019.
- [4] Schlaich J., Schäfer K. y Jennewein M.: "Toward a consistent design of structural concrete". PCI journal, Vol. 32, (1987) 74-150.
- [5] Dewobroto W. y Reineck K.: «Viga con cargas y apoyos indirectos». Diseño de Vigas de Hormigón usando Bielas y Tirantes, (2002).
- [6] Montgomery D.: "Diseño y análisis de experimentos". Octava edición, 2017.
- [7] Yang X., Liu L. y Wang Y.: "Experimental Test and Numerical Simulation of the Initial Crack Reinforced Concrete Beam in Bending". Presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (2018).
- [8] Mieles Y. y Larrúa R.: «Modelo puntal tensor para un nudo híbrido viga de hormigón y viga de acero bajo cargas gravitatorias». Revista Ingeniería de Construcción, Vol. 34, N° 3 (2019) 330-343.
- [9] Norma Ecuatoriana de la Construcción: «Viviendas de hasta dos pisos con luces de hasta 5 metros». MIDUVI, 2015.
- [10] Aguiar R.: "Análisis Matricial de Estructuras". Cuarta ed. Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, 2019.
- [11] Wight J. y MacGregor J.: "Reinforced Concrete Mechanics and Design". Prentice Hall Upper Saddle River, NJ Sixth ed. 2012.
- [12] Collins M. P. y Mitchell D.: "Prestressed concrete structures". Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ Vol. 9, (1991).
- [13] Novak L.C.: "SP-273: Further Examples for the Design of Structural Concrete with Strut-and-Tie Models" American Concrete Institute, Special Publication. Vol. 273, (2010).
- [14] Mattock A. y Shen J.: "Joints between Reinforced Concrete Members of Similar Depth". Structural Journal, Vol. 89, (1992) 290-295.
- [15] Darwin D., C. W. Dolan C.V, y Nilson A. H.: "Design of concrete structures". McGraw-Hill Education, 2016.



UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Volumen Especial, 2020, No. 2, pp. 04 - 110 _____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en Julio de 2020, por el **Fondo Editorial Serbiluz**, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela*

www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
www.produccioncientifica.org