

ALGORITMO DE DISEÑO POR ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA DE VIGAS PLANAS EMBEBIDAS EN LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO

**MSc. Ing. Carlos Rodríguez García¹, Ing. Liset León Consuegra²,
Ing. Reniel Navarro Rodríguez**

1. *Empresa de Construcción y Montaje de Obras del Turismo de Varadero, Brigada de Construcción de Obras de Arquitectura No.47”, Avenida Primera entre Calle 9 y 10, Santa Marta. Cárdenas. Matanzas. Cuba. crodriguez@atrium.co.cu*
2. *Universidad de Matanzas, Departamento de Construcciones, Carretera Matanzas Varadero, km 3 1/2, Matanzas, Cuba.*

RESUMEN

Las losas son elementos estructurales planos que muchas veces son necesarias reforzar para poder resistir esfuerzos de flexión y cortante. La mayoría de las veces son utilizados refuerzos tan comunes como capiteles, ábacos o vigas peraltadas, sin embargo en determinadas ocasiones y por requerimientos arquitectónicos esos refuerzos no son factibles, apareciendo entonces las vigas planas embebidas dentro de las losas como un nuevo refuerzo, más complejo, con mayores exigencias en su diseño y construcción. En el presente trabajo se muestra el algoritmo para el diseño según los estados límite de resistencia de este tipo de elementos estructurales, partiendo de un análisis de las características de las losas y las vigas de forma en general, conjuntamente con recomendaciones a tener en cuenta en estos diseños.

Palabras claves: *viga plana; viga embebida; viga chata; losa plana; hormigón armado; algoritmo, estados límite de resistencia.*

LAS VIGAS PLANAS EMBEBIDAS EN LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO

Vigas

Las vigas son elementos estructurales en los que una de las dimensiones predomina sobre las otras dos, estas generalmente reciben las cargas desde las losas, y las transmiten hacia las columnas o muros dependiendo del caso.

Las vigas pueden ser peraltadas (de canto) o planas (chatas), dependiendo de su altura; aunque dentro de las vigas peraltadas pueden aparecer otras según la geometría de su sección (sección T). Se denominan vigas peraltadas a aquellas que tienen una altura superior a su ancho, y al su altura ser relativamente grande pues son visibles aunque tengan una parte de la misma embebidas en las losas, estas vigas además pueden ser invertidas (figura 1). Mientras que las vigas planas con alturas relativamente pequeñas y anchos considerables son elementos que pueden estar completamente embebidos en las losas, y por lo tanto no estar visibles; siendo esto una característica determinante a la hora de la selección de su utilización desde el punto de vista estructural o arquitectónico. Estas vigas casi siempre necesitan acero de refuerzo en compresión para así aumentar las propiedades que no les confiere su escasa altura (Blanco, 1999)

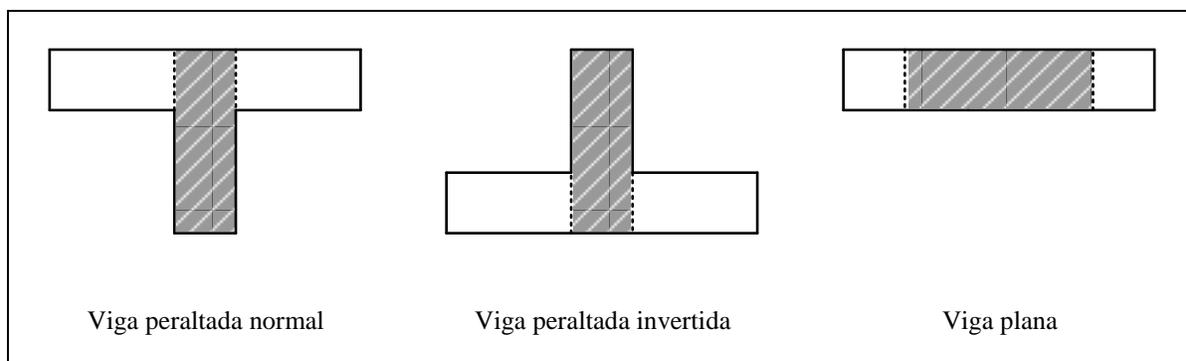


Figura 1. Tipos de vigas

Las diferencias entre las vigas planas y las vigas peraltadas son notorias, puesto que comprenden no solo su capacidad resistente por flexión y por cortante, sino su capacidad de deformación (rigidez o flexibilidad).

Losas

Las losas o placas son elementos estructurales planos, de pequeño espesor respecto a sus otras dimensiones, cargadas perpendicularmente a su plano medio, incluyendo su peso propio (Medina y Ruiz, 2008). Estas son utilizadas como entrepiso y cubiertas, transmitiendo las cargas a vigas columnas, u otros elementos soportantes. Las losas de hormigón armado gozan de muy buenas propiedades, lo que ha determinado su uso

extensivo edificaciones. Entre estas propiedades podemos mencionar la durabilidad, la resistencia al fuego, la rigidez, la higiene y la transmisión de las cargas etc. Igualmente podemos mencionar sus buenos índices técnicos-económicos y la posibilidad cada vez mayor del uso de métodos industriales de prefabricación y montaje (Blanco, 1999; Rodríguez, 2018)

Las losas planas consisten en losas o placas apoyadas directamente sobre las columnas, determinando un estado tensional y de deformación en las direcciones de los apoyos, generalmente en dos direcciones, a causa de las grandes cargas que transmiten a las columnas, presentan, en la mayoría de los casos, un incremento del espesor de las losas (ábacos) y de las columnas (capiteles). Estas losas casi siempre son fundidas in situ, aunque actualmente han tomado impulso la construcción de losas planas prefabricadas. (Medina y Ruiz, 2008)

Vigas planas

El sistema de vigas planas se ha desarrollado de manera considerable. La razón básica es que unido a losas de igual canto que las vigas constituye una alternativa de los sistemas de losas sin vigas, en cuanto a conducir a techos planos, sin la rigidez que este sistema presenta para la distribución de pilares en planta. La ventaja citada es evidente, pero no debe olvidarse que las vigas usuales, con cantos apreciables y ancho pequeño, el ancho de la viga es escasamente importante frente a la luz de la estructura. (Calavera, 2000)

Este tipo de vigas son necesarias cuando no es posible proyectar una viga peraltada común. Según (Blanco, 1999) a la hora de emplear en un proyecto este tipo de vigas planas se debe tener especial atención a grandes luces y al uso sistemático de las mismas, unido muchas veces a la ausencia de tabiquería en las plantas más bajas, que darían lugar a una deformación excesiva de los entrepisos. En este caso, se debe calcular el entrepiso con la luz entre los ejes de apoyo y tener en cuenta que la escasez de altura las hace muy sensibles a errores de posición de las armaduras y propicias a presentar en servicio deformaciones excesivas.

ALGORITMO DE DISEÑO POR ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA

Algoritmo general de diseño

Para el diseño por estados límites de resistencia de las losas planas embebidas en losas de hormigón se propone la utilización del como bibliografía básica para el diseño de los elementos de hormigón la (ACI 318, 2014) *Building Code Requirements for Concrete Structures*, así como los textos *Hormigón estructural. Diseño por estados límites, parte 1*, de Hernández y Hernández (2013), *Diseño de Concreto Reforzado* de (McCormac y Brown, 2011) y *Design of concrete structures, thirteenth edition*, de (Nilson, et al., 2004), los cuales tienen como base a la normativa estadounidense. Conjuntamente con esto se siguen criterios válidos de otras bibliografías clásicas así como de las normas vigentes en

Cuba relacionadas con el diseño de elementos de hormigón. (Rodríguez, 2018; Rodríguez y Lima, 2017; Verdecia, 2016).

El diseño general del elemento está compuesto por dos diseños independientes, los que pueden ser llamados como subprocesos de diseño (figura 2).

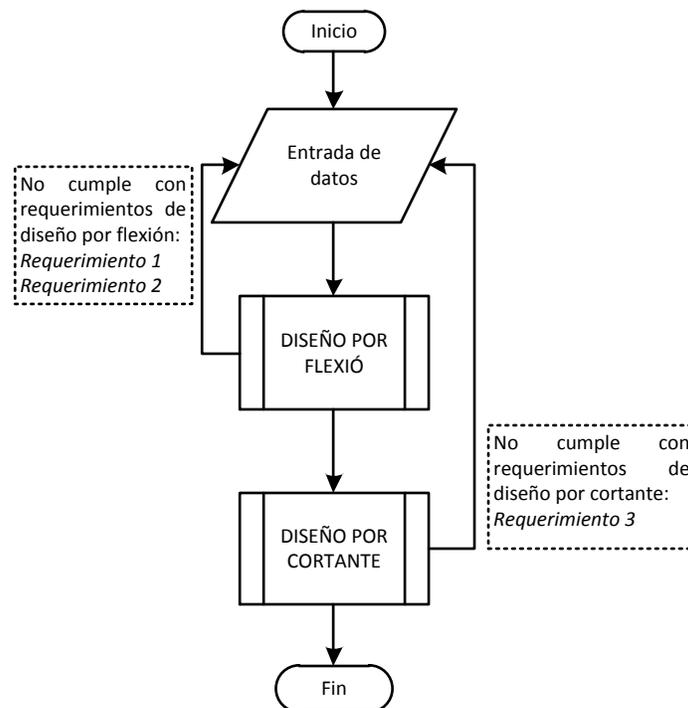


Figura 2. Algoritmo general de diseño

Entrada de datos

- ✓ Solicitaciones, momento (M), cortante (V)
- ✓ Espesor de la losa (peralte de la viga plana) (h)
- ✓ Resistencia de los materiales (f_c' y f_y)
- ✓ Recubrimiento neto (r_n)
- ✓ Diámetro del acero (ϕ_b)
- ✓ Ancho de los apoyos de la viga plana (B)

Tanto en el subproceso de flexión como en el de cortante deben cumplirse criterios generales de diseño a la hora de seleccionar los datos de entrada, resistencias de materiales, espesor del elemento, diámetro de las barras a utilizar, etc. (NC 7, 2016; NC 120, 2014; NC 250, 2005)

A pesar de tener en cuenta estos criterios durante el subproceso de flexión se deben cumplir dos requerimientos necesarios:

Requerimiento 1

El momento actuante sobre la sección tienen que ser menor que el 133 % del momento balanceado de la sección disminuido por el factor de reducción de la resistencia (ϕ)

$$M < \phi 1,33M_b$$

Requerimiento 2

En caso de requerir refuerzo en compresión la relación entre el recubrimiento mecánico en compresión (d'_s) y el peralte efectivo de la sección (d) no puede superar el valor de 0.375.

$$\frac{d'_s}{d} < 0.375$$

En el caso del subproceso de cortante debe cumplirse el siguiente requerimiento:

Requerimiento 3

Se limita el valor de cortante externo (V) debido a las tensiones admitidas en las bielas de compresión que se generan, que se suponen asumidas totalmente por el hormigón, representando esta resistencia por el cortante resistido por el hormigón (V_c), por lo que:

$$V \leq 5\phi V_c$$

Diseño por flexión

Como ya fue comentado, la acción de la carga sobre la viga provoca la sollicitación principal de flexión. El objetivo final del algoritmo es obtener las dimensiones de la viga plana y su refuerzo de acero.

En este punto se hace necesario determinar el valor del peralte efectivo (d) y el momento nominal (M_n), para esto se utilizan las expresiones siguientes:

$$d = h - r_n - \frac{\phi_b}{2} \quad (1)$$

$$M_n = \frac{M}{\phi} \quad (2)$$

Conjuntamente con esto se determinan en este punto otros valores necesarios para el diseño como el factor que relaciona la profundidad del bloque rectangular equivalente de esfuerzos de compresión con la profundidad del eje neutro (β) y los valores correspondientes a las áreas de acero mínima, tanto en la parte traccionada ($A_{s_{min}}$) como en la comprimida ($A'_{s_{min}}$), para esto se siguen criterios de (Hernández y Hernández, 2013; Medina y Ruiz, 2008; Rodríguez, 2018).

$$A_{s_{min}} = 0,002 \cdot b_w \cdot d \quad (3)$$

$$A'_{s_{min}} = 0,04 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \cdot b_w \cdot d \quad (4)$$

Posteriormente a estos cálculos iniciales, se debe decidir la variante de diseño a utilizar, la variante 1 corresponde a fijar la profundidad del bloque de compresiones de forma tal que asegure el fallo por tracción controlada. En la variante 2 es fijado el ancho de la viga plana.

Variante 1

En esta variante, como se comentó anteriormente, el diseño parte de adoptar la profundidad relativa del bloque de compresiones (k) como 0.375.

Se determina el ancho de la sección (b_w) al que le corresponde la profundidad del bloque de compresiones fijado.

$$b_w = \frac{M_u}{\phi \cdot 0.85 \cdot f'_c \cdot a \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right)} \quad (5)$$

El término a refiere a la profundidad del bloque de compresiones y se obtiene a partir de la ecuación 4.

$$a = k \cdot \beta_1 \cdot d \quad (6)$$

Con el fin de que los elementos trabajen con mejor confinamiento y así garantizar una adecuada transmisión de los esfuerzos, además para garantizar así una racionalidad en el diseño, se establecen las siguientes recomendaciones:

Recomendación 1

$$b_w \leq 3B$$

Recomendación 2

$$b_w \leq 5h_t$$

De no cumplirse alguna de las recomendaciones (1 y 2) no es posible continuar con el diseño por esta variante y se hace necesario pasar a la variante 2.

Para la determinación del acero traccionado se utiliza la siguiente ecuación:

$$A_s = \frac{0.85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b}{f_y} \quad (7)$$

Esta área de acero se compara con el área de acero mínima, tomándose la mayor entre estas. El área de acero en compresión se toma según la recomendación de área de acero mínimo.

Variante 2

Esta variante del diseño corresponde a fijar el ancho de la sección según las recomendaciones 1 y 2.

En este punto el diseño tiene que cumplir el requerimiento 1 y como se comentó de no cumplirse se pasa a redimensionar la sección.

Para determinar la profundidad del bloque de compresiones (a):

$$a = d - \sqrt{d^2 - \frac{2M_u}{\phi \cdot 0.85 \cdot f'_c \cdot b}} \quad (8)$$

Si el valor de a supera el valor de 0.375 indica que la sección necesita refuerzo en compresión, para lo cual se utilizan las ecuaciones siguientes:

$$A'_s = \frac{M_n - M_w}{\eta' \cdot f_y \cdot (d - d'_s)} \quad (9)$$

$$M_w = 0.85 \cdot f'_c \cdot b_w \cdot 0.375 \left(d - \frac{0.375}{2} \right) \quad (10)$$

$$\eta' = \frac{E_s}{f_y} \left(\frac{0.375 - \delta'}{0.375} \right) 0.003 \quad (11)$$

$$\delta' = \frac{d'_s}{d} \quad (12)$$

Donde el término de E_s corresponde con el módulo de elasticidad el acero ($2 \cdot 10^5$ MPa). En estos casos es de obligatorio cumplimiento el requerimiento 2.

Para el cálculo del acero traccionado:

$$A_s = \frac{0.85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a + \eta' \cdot A'_s \cdot f_y}{f_y} \quad (13)$$

En caso de que la ecuación 6 arroje un valor inferior a 0.375 se procede de igual forma a la variante 1. En ambos casos es necesario comprobar las áreas de acero mínimas.

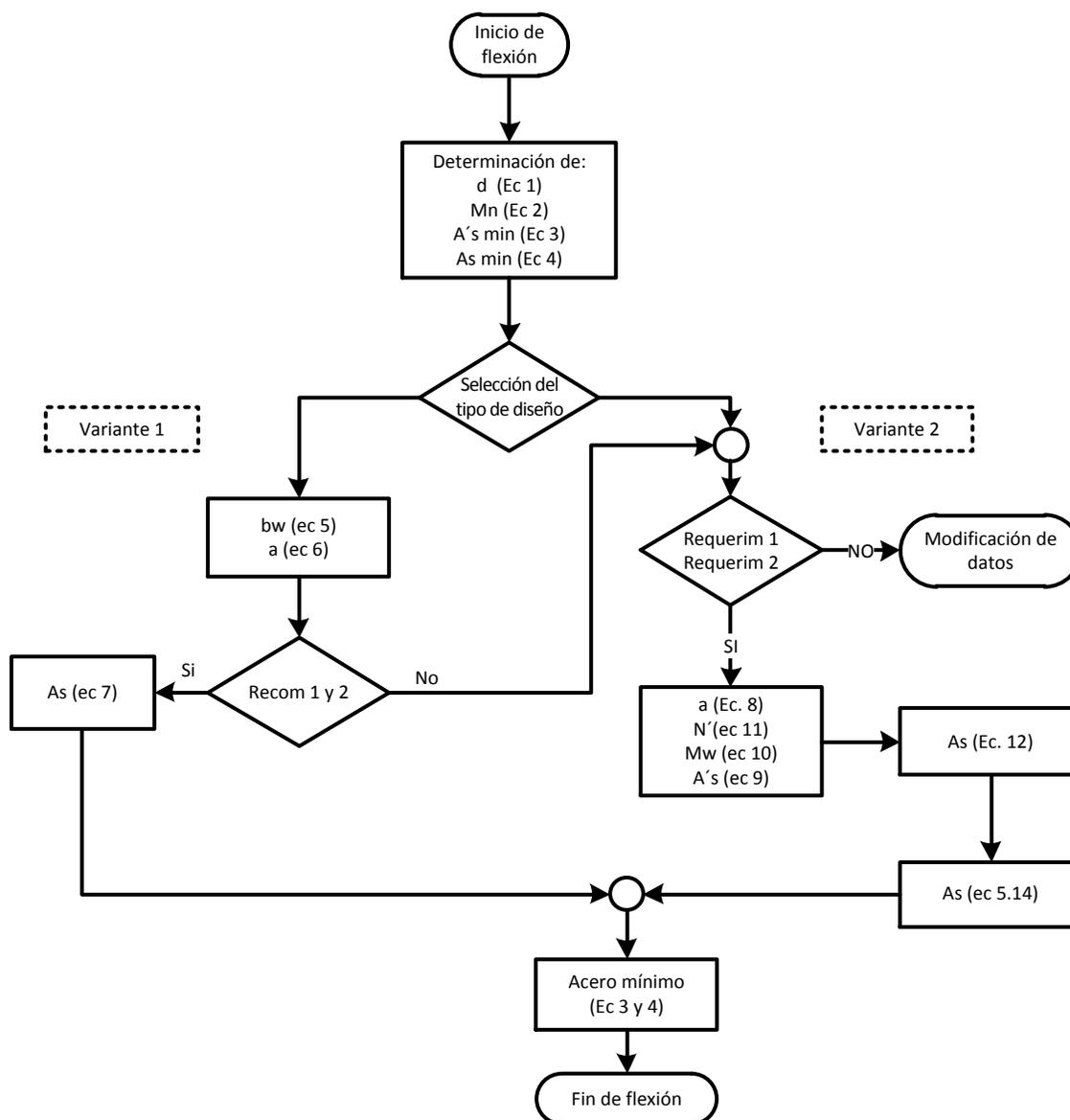


Figura 3. Algoritmo de diseño por flexión.

DISEÑO POR CORTANTE DE LA VIGA PLANA

Además de la flexión, las vigas deben ser diseñadas o revisadas para otro tipo de sollicitación, el cortante, acción que puede ser más peligrosa por la fragilidad de su fallo.

Los valores de cortante para el cálculo en vigas isostáticas, sin carga concentradas en las zonas cercanas a los apoyos, se consideran ocurren a una distancia d de los mismos, pues el cortante en esa distancia se transmite directamente a los apoyos (ACI 318, 2014; Hernández y Hernández, 2013; Nilson, *et al.*, 2004). Para determinar este valor de cortante es necesario definir la longitud (l_{r0}) entre el centro del apoyo y el punto a una distancia d de la cara del mismo (figura 4).

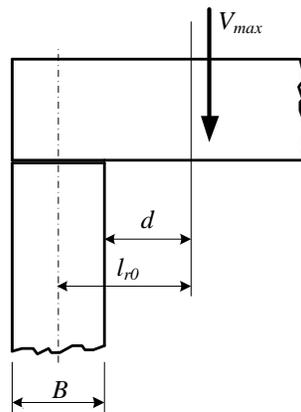


Figura 4. Sección crítica de cortante.

$$l_{r0} = d + 10 \text{ cm} \quad (14)$$

Finalmente el valor el cortante máximo (crítico) se obtiene mediante una simple relación de triángulos, quedando:

$$V_{\max} = \frac{V_u \cdot \left(\frac{L}{2} - l_{r0} \right)}{\frac{L}{2}} \quad (15)$$

El aporte del hormigón puede ser calculado como:

$$V_c = 0,17 \cdot b \cdot d \cdot \sqrt{f'_c} \quad (16)$$

En este punto se comprueba el requerimiento 3, de no cumplirse este se procede a cambiar la sección como fu explicado con anterioridad.

El refuerzo de acero transversal de la viga se separará en tres partes (figura 2.7), la primera (l_{r1}) donde se requiere acero por cálculo (ecuación 2.26), la segunda donde solo se requiere acero por especificaciones (l_{re}) y finalmente donde no se requiere refuerzo (l_{rm}). Para un cálculo más económico la distancia l_{r1} puede ser separada en varias, en dependencia de la exactitud que se requiera.

$$l_{r1} = \frac{0,5L \cdot (V_u - \phi V_c)}{V_u} \quad (17)$$

Según el reglamento ACI 318 (2014) no se requiere refuerzo de acero en las zonas donde el la mitad del aporte del hormigón supere el cortante existente, difiriendo de algunos reglamentos, como la NC 207 (2003), la cual no contempla esta posibilidad.

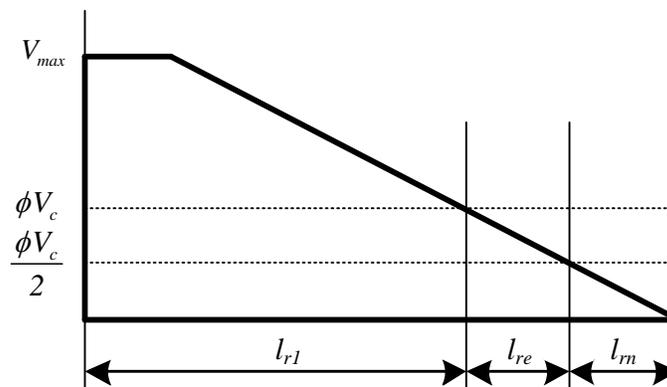


Figura 5. Distribución de zonas para cortante

Las longitudes l_{re} y l_{rm} , a las que corresponde solo refuerzo por especificaciones y ningún refuerzo respectivamente son iguales, por lo que pueden obtenerse de forma muy sencilla:

$$l_{re} = l_{rm} = \frac{0,5 \cdot L - l_{r1}}{2} \quad (18)$$

El área de acero requerida y el espaciamiento del refuerzo se obtienen mediante las ecuaciones 2.28 y 2.29 respectivamente.

$$A_{v1} = \frac{(V_{max} - \phi V_c) l_{r1}}{\phi f_{yt} \cdot d} \quad (19)$$

$$@ = \frac{l_{r1} \cdot n_p \cdot a_{bt}}{A_{v1}} \quad (20)$$

El refuerzo por cortante colocado en la viga, en toda su longitud, debe cumplir con la siguiente especificación:

Especificación 1

$$@_{Max} \leq \begin{cases} d/2 \\ 60 \text{ cm} \end{cases}$$

Para los casos donde $V_s > 2 \cdot V_c$, se deberá tomar como espaciamiento máximo:

Especificación 2

$$@_{Max} \leq \begin{cases} d/4 \\ 30 \text{ cm} \end{cases}$$

El número de patas (n_p) que se utilizara estará totalmente en dependencia del ancho (b_w) de cada viga en particular. Según la norma NC 207: 2003 para vigas de menos de 30 centímetros se colocaran cercos sencillos de 2 patas, mientras que para vigas con anchos mayores de 30 centímetros se deben colocar cercos dobles de 4 patas. En el caso de vigas planas donde los anchos pueden llegar a ser considerablemente grandes se recomienda un cerco de 2 patas por cada 30 centímetros de ancho.

Se recomienda para las vigas planas la utilización de cercos de acero de 6 milímetros para colaborar con un recubrimiento mecánico menor y por consecuencia un peralte efectivo más elevado, siendo esto importantísimo en estas vigas donde la altura total es escasa.

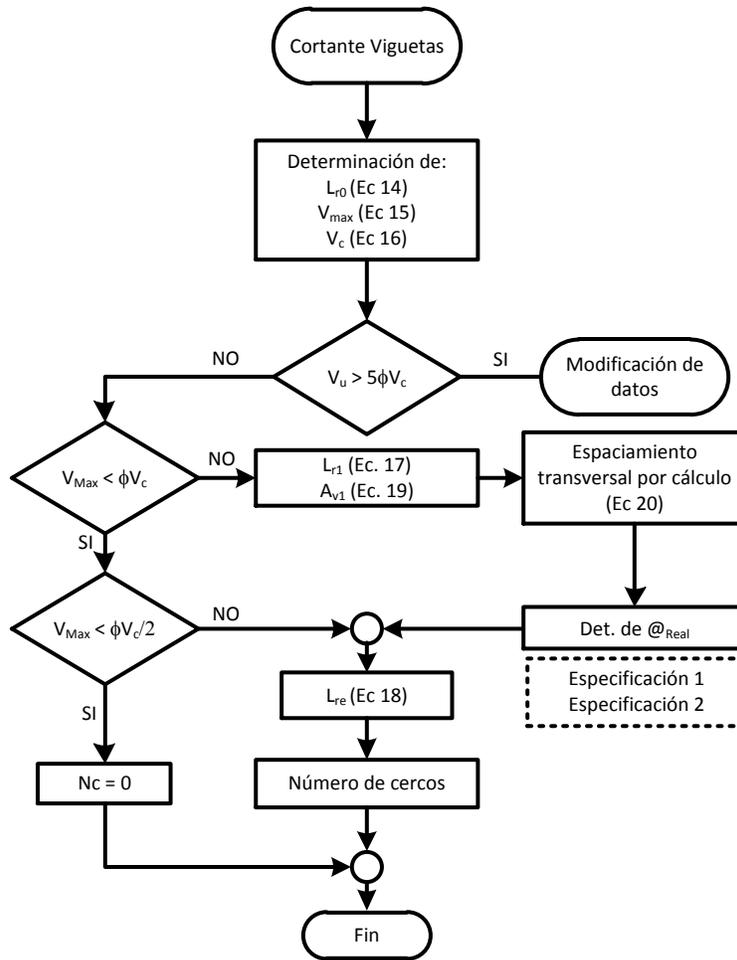


Figura 5. Algoritmo del subproceso de cortante.

CONCLUSIONES

Un buen algoritmo es la clave para lograr un acertado diseño de los elementos estructurales componentes de un sistema. Siendo factible la utilización de las vigas planas es necesario tener en cuenta varias recomendaciones, especificaciones y requerimientos, conjuntamente con los procedimientos establecidos a tales efectos se obtiene el algoritmo para el diseño según los estados límites de resistencia.

BIBLIOGRAFÍA

- ACI 318, 2014. *Building Code Requirements for Concrete Structures*. Michigan, USA: American Concrete Institute,.
- Blanco, E., 1999. *Estructuración y Diseño de Edificaciones de Concreto*. Lima, Perú: PRINCELINNESS E.I.R.I.
- Calavera, J., 2000. *Proyecto y Calculo de Estructuras de Hormigon*. Madrid, España: INFOPRINT, S.A.
- Hernández, J.J. ; Hernández, J.A., 2013. *Hormigón Estructural. Diseño por Estados Límites. Parte I*. La Habana (Cuba): Félix Varela.
- McCormac, J.C. ; Brown, R.H., 2011. *Diseño de Concreto Reforzado*. 8va Ed. México: Alfaomega Grupo Editor, ISBN 978-607-707-231-7.
- Medina, F. ; Ruiz, L., 2008. *Hormigón Estructural 1*. Tercera Ed. La Habana, Cuba: Editorial Félix Varela, ISBN 978-959-07-0773-5.
- NC 7, 2016. *Barras de acero para refuerzo de hormigón - Requisitos*. La Habana, Cuba: Oficina Nacional de Normalización.
- NC 120, 2014. *Hormigón Hidráulico. Especificaciones*. La Habana, Cuba: Oficina Nacional de Normalización.
- NC 207, 2003. *Requisitos generales para el diseño y construcción de estructuras de hormigón*. La Habana, Cuba: Oficina Nacional de Normalización.
- NC 250, 2005. *Requisitos de durabilidad para el diseño y construcción de edificaciones y obras civiles de hormigón estructural*. La Habana, Cuba: Oficina Nacional de Normalización.
- Nilson, A.; Darwin, D. ; Dolan, C., 2004. *Design of Concrete Structures*. 13 Ed.: The McGraw-Hill Companies.
- Rodríguez, C., 2018. *Optimización del diseño del sistema de entrepiso y cubierta de viguetas y plaquetas*. Tesis de Maestría. Matanzas, Cuba: Universidad de Matanzas.

- Rodríguez, C. ; Lima, R., 2017. “Algoritmo para el diseño de elementos componentes del Sistema de Vigueta y Plaqueta”. *VIII Convención Científica Internacional de la Universidad de Matanzas, CIUM'2017*. Matanzas, Cuba.
- Verdecia, J., 2016. *Análisis del diseño estructural del sistema constructivo de cubiertas y entrepisos del tipo vigueta y plaqueta de hormigón para viviendas*. Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniería Civil. Matanzas, Cuba: Universidad de Matanzas.