PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE CIVIL



Trabajo de Titulación

Tema: Generación de un algoritmo basado en Matlab para el diseño y optimización del refuerzo en vigas de hormigón reforzado de un pórtico resistente a momento.

AUTOR:

OSCAR NICOLÁS NARANJO ASTUDILLO

QUITO DM, NOVIEMBRE DE 2022

RESUMEN

El presente trabajo titulado “Generación de un algoritmo basado en MATLAB para el diseño y optimización del refuerzo en vigas de hormigón reforzado de un pórtico resistente a momento” tiene como objetivo, en primera instancia, la generación de un algoritmo que permita al usuario diseñar vigas acordes al alcance propuesto y respetando la normativa vigente. Para ello se utilizó el lenguaje de programación “MATLAB” y se basó en las siguientes normativas: NEC 15, ASCE 7-16 y ACI 318-19.

En segunda instancia busca calcular el desperdicio de refuerzo al diseñar una viga y mediante una metodología propuesta reducir este desperdicio hasta conseguir un mejor armado del refuerzo.

Palabras clave: viga, hormigón reforzado, ACI, Matlab, algoritmo.

ABSTRACT

The present work entitled "Generation of an algorithm based on Matlab for the design and optimization of the reinforcement in reinforced concrete beams of a moment-resistant frame" has as its objective, in the first instance, the generation of an algorithm that allows the user to design beams according to the proposed scope and respecting current regulations. For this, it was based on the programming language "Matlab" and was based on the following regulations: NEC 15, ASCE 7-16 and ACI 318-19.

In the second instance, it seeks to calculate the reinforcement waste when designing a beam and through a proposed methodology to reduce this waste until a better reinforced reinforcement is achieved.

Keywords: beam, reinforced concrete, ACI, Matlab, algorithm.

ÍNDICE

RESUMEN II

ABSTRACT II

ÍNDICE III

FIGURAS V

TABLAS VI

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN 7

1.1. Justificación 7

1.2. Alcance 7

1.3. Planteamiento del problema 7

1.4. Hipótesis 8

1.5. Objetivos 8

1.5.1. Objetivo General: 8

1.5.2. Objetivos Específicos: 8

CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 9

2.1. Terminología 9

2.2. Simbología 9

2.3. Diseño de vigas de hormigón reforzado 11

2.3.1. Generalidades 11

2.3.2. Consideraciones iniciales 12

2.3.3. Diseño a flexión 15

2.3.4. Control de deflexiones 19

2.3.5. Adherencia, longitud de desarrollo o anclaje y empalmes 19

2.3.5.1. Adherencia 19

2.3.5.2. Longitud de desarrollo o anclaje 20

2.3.5.3. Ganchos 21

2.3.5.4. Empalmes 21

2.3.6. Diseño a Corte 23

2.4. Análisis Estructural 25

2.5. Diseño Sismorresistente 27

CAPÍTULO III: ELABORACIÓN DEL ALGORITMO PARA VIGAS DE HORMIGÓN REFORZADO y OPTIMIZACIÓN DEL REFUERZO *29*

3.1. Algoritmo para diseño de vigas de hormigón. **29**

3.1.1. Variables a ingresar 29

Datos principales 29

Datos para la obtención de la fuerza sísmica 29

Cargas a utilizar 29

Elementos para el análisis estructural 29

Consideraciones diseño a flexión 29

Consideraciones diseño a Corte 30

Consideraciones obtención porcentaje de desperdicio 30

3.1.2. Funcionamiento del código 30

3.1.3. Resultados 32

3.2. Optimización del refuerzo **36**

3.2.1. Optimización de recursos 36

3.2.2. Diseño de un algoritmo de optimización de recursos 36

CAPÍTULO IV: APLICACIÓN DEL ALGORITMO *37*

4.1. Diseño sin optimización **37**

4.2. Diseño optimizado **40**

4.3. Comparación de resultados **43**

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES *43*

5.1. Conclusiones **43**

5.2. Recomendaciones **44**

CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFÍA *44*

FIGURAS

Figura 1 Flujograma de dimensiones mínimas 14
Figura 2 Flujograma Diseño a flexión 22
Figura 3 Flujograma de diseño a Corte 24
Figura 4 Flujograma del método de la Rigidez 26
Figura 5 Flujograma de Corte Basal según NEC 15 28
Figura 6 Flujograma de la estructura del algoritmo 31
Figura 7 Dibujo del pórtico analizado 32
Figura 8 Envolvente de la fuerza axial de la viga 32
Figura 9 Envolvente de corte de la viga 33
Figura 10 Envolvente de flexión de la viga 33
Figura 11 Plano de diseño de aceros de la viga 33
Figura 12 Cortes para la varilla de 10 mm 34
Figura 13 Cortes para la varilla de 12 mm 34
Figura 14 Cortes para la varilla de 14 mm 35
Figura 15 Flujograma de la optimización de acero 37
Figura 16 Datos del pórtico a analizar 1 38
Figura 17 Datos del pórtico a analizar 2 38
Figura 18 Datos del pórtico a analizar 3 39
Figura 19 Diseño de la viga primera iteración 39
Figura 20 Diseño de la viga segunda iteración 41
Figura 21 Diseño de la viga tercera iteración 42

TABLAS

Tabla 1 Planilla de aceros (Ejemplo) 35
Tabla 2 Resumen y Porcentaje de desperdicio (Ejemplo) 35
Tabla 3 Planilla de aceros primera iteración 40
Tabla 4 Porcentaje de desperdicio primera iteración 40
Tabla 5 Planilla de aceros segunda iteración 41
Tabla 6 Porcentaje de desperdicio segunda iteración 41
Tabla 7 Planilla de aceros tercera iteración 42
Tabla 8 Porcentaje de desperdicio tercera iteración 42
Tabla 9 Comparación de resultados 43

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

En la construcción, como en cualquier otra área de trabajo, la optimización de los recursos es siempre uno de los principales objetivos a alcanzar. En el diseño y construcción de estructuras de hormigón reforzado, el acero de refuerzo, debido a su elevado costo es uno de los materiales en los que se busca minimizar su desperdicio. El poder generar un algoritmo que no solo permita diseñar el refuerzo de un elemento estructural, sino que además permita optimizar el uso de acero, es una herramienta de suma utilidad.

1.2. Alcance

El presente trabajo de titulación permite generar un algoritmo basado en Matlab que permita diseñar el refuerzo longitudinal y transversal de vigas de hormigón reforzado, no presforzado que cumplan con las siguientes características: que formen parte de un pórtico resistente a momento de entre dos y cinco vanos de un piso de altura, considerando solo deformaciones por flexión, que no estén conectados a paredes divisoras ni miembros que se puedan dañar por deflexiones, que no sean vigas de gran altura, construido en sitio, de peso normal, con refuerzo de 420 MPa y que cumplan con la normativa vigente (NEC y ACI 318-19).

1.3. Planteamiento del problema

De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística y Censos (2020), la gran mayoría de estructuras en el Ecuador son construidas con hormigón reforzado. El hormigón reforzado de acuerdo a la ACI 318-19 (2019) se puede definir de la siguiente manera: “Concreto estructural reforzado con no menos de las cuantías mínimas de refuerzo preesforzado, refuerzo no preesforzado o ambas…”, en donde el refuerzo es un elemento de acero embebido en el hormigón cuyo propósito es compensar las carencias del hormigón frente a diversos esfuerzos. Aunque en sí mismo el hormigón es uno de los elementos más baratos y eficientes con los que se puede construir, el acero de refuerzo, en cambio, representa un costo significativo a considerar. El formato de comercialización de las varillas de acero en Ecuador es por peso; sin embargo, la presentación individual de este material es en longitudes de doce metros. Rodríguez y Aguirre (2022) concluyen que el desperdicio de acero en obra puede llegar hasta un seis % debido solo a la parte de diseño. Esto se da debido a que no se diseñan

los cortes de las varillas, que tienen longitudes mínimas de acuerdo al diseño, para aprovechar al máximo la longitud comercial de varillas de doce metros.

Para la construcción de elementos de hormigón reforzado se necesita acero de refuerzo longitudinal y de estribos transversales de acero, lo que implica que se deben cortar las varillas de forma específica y que puede existir desperdicio. De todos los elementos que conforman una estructura, las vigas tienen el refuerzo más irregular, por ende, es en donde se encuentra la mayor posibilidad de optimización. Debido a ello el algoritmo generado en este trabajo se enfocará únicamente en vigas.

Con el objetivo de optimizar el uso de acero en el hormigón, en el presente trabajo se propone el diseño de un algoritmo basado en Matlab que permita, en primera instancia, diseñar las vigas de un pórtico de cualquier número de vanos y luego, mediante iteraciones, obtener la mejor distribución de cortes de varilla posible de tal manera que se evite desperdicios.

1.4. Hipótesis

El algoritmo desarrollado permitirá diseñar el refuerzo de vigas de hormigón reforzado y lograr una mayor eficiencia en su uso y minimizando desperdicios en el corte de varillas, como una alternativa al diseño tradicional.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General:

- Generar un algoritmo basado en Matlab que permita diseñar y optimizar el refuerzo de vigas de hormigón reforzado de un pórtico resistente a momento buscando la manera más eficiente para el corte de las varillas de acero.

1.5.2. Objetivos Específicos:

- Generar un algoritmo basado en Matlab para el diseño de vigas de hormigón reforzado a momento y corte, y para el uso eficiente de varillas de acero, de acuerdo a la normativa vigente.
- Presentar un caso de estudio de la aplicación del algoritmo basado en Matlab.
- Comparar el beneficio del uso del algoritmo basado en Matlab, considerando el diseño del mismo caso con una distribución convencional.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Terminología

Cargas: Fuerzas y otras acciones que resultan de los materiales de construcción, los ocupantes y sus enseres, efectos ambientales, movimientos diferenciales y cambios volumétricos restringidos (ACI, 2019).

Carga de servicio: Todas las cargas, estáticas y dinámicas que se aplican en una estructura sin considerar factores de carga (ACI, 2019).

Carga mayorada: La carga, multiplicada por los factores de carga apropiados (ACI, 2019).

Concreto: Mezcla de cemento Portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos (ACI, 2019).

Hormigón reforzado: Concreto estructural reforzado con no menos de las cuantías mínimas de refuerzo preesforzado, refuerzo no preesforzado o ambas (ACI, 2019).

Refuerzo: Elemento de acero embebido en el concreto y que cumple con especificaciones técnicas (ACI, 2019).

Viga: Miembro estructural, principalmente sometido a tensión y a cortante, con o sin fuerza axial o de torsión (ACI, 2019).

2.2. Simbología

a = profundidad del bloque rectangular equivalente de esfuerzos de Whitney, cm (ACI, 2019)

As = área de refuerzo longitudinal no preesforzado a tracción, cm^2 (ACI, 2019)

Asmin = área mínima de refuerzo a flexión, cm^2 (ACI, 2019)

Atr = área total de todo el refuerzo transversal dentro de un espaciamiento “s” que cruza el plano principal de hendimiento a través del refuerzo que está siendo desarrollado, cm^2 (ACI, 2019)

b = ancho de la cara de compresión del miembro, cm (ACI, 2019)

bw = ancho del alma de la viga, en secciones rectangulares es igual a “b” (ACI, 2019)

c = distancia medida desde la fibra extrema en compresión al eje neutro, cm (ACI, 2019)

c_b = la menor de: (a) la distancia medida del centro de una barra o alambre a la superficie más cercana del concreto o (b) mitad de la separación centro a centro de las barras o alambres que se desarrollan, cm (ACI, 2019)

d= distancia de la fibra extrema en compresión hasta el centro del refuerzo a tracción, cm (ACI, 2019)

d_{agg} = tamaño nominal máximo del agregado grueso, mm (ACI, 2019)

d_b = diámetro nominal del refuerzo de acero (ACI, 2019)

Ec = módulo de elasticidad del concreto, MPa (ACI, 2019)

Es = módulo de elasticidad del acero, MPa (ACI, 2019)

f´c = resistencia especificada a la compresión del concreto, MPa (ACI, 2019)

fy = resistencia especificada del refuerzo no pres forzado, MPa (ACI, 2019)

h = espesor total o altura de un miembro, cm (ACI, 2019)

Ktr = Índice de refuerzo transversal, cm (ACI, 2019)

Mn = momento resistente teórico o nominal de una sección (McCormac, J. C., & Brown, R. H., 2017).

Mu = momento factorizado calculado causado por cargas factorizadas (McCormac, J. C., & Brown, R. H., 2017).

n = número de barras (ACI, 2019)

l_d = longitud de desarrollo en tracción para barras corrugadas, cm (ACI, 2019)

Pu = fuerza axial mayorada; debe tomarse como positiva para compresión y negativa para tracción, N (ACI, 2019)

s = espaciamiento medido centro a centro del refuerzo longitudinal, cm (ACI 2019)

λ = factor de modificación que tiene en cuenta las propiedades mecánicas del concreto de peso liviano, relativa a los concretos de peso normal de igual resistencia a la compresión (ACI, 2019)

ρ = porcentaje de acero en tensión frente al concreto (McCormac, J. C., & Brown, R. H., 2017)

ρ_b = porcentaje de acero de equilibrio (McCormac, J. C., & Brown, R. H., 2017)

Φ = factor de reducción de resistencia (McCormac, J. C., & Brown, R. H., 2017).

εt = deformación unitaria neta en tracción del acero longitudinal extremo en tracción en el estado de resistencia nominal, excluyendo las deformaciones unitarias causadas por presfuerzo efectivo, flujo plástico, retracción de fraguado, y variación de temperatura (ACI, 2019)

εty = valor de la deformación unitaria neta en tracción en el acero longitudinal extremo en tracción, usado para definir una sección controlada por compresión (ACI, 2019)

Ψe = factor de modificación para la longitud de desarrollo con base en el recubrimiento del refuerzo (ACI, 2019)

Ψg = factor utilizado para modificar la longitud de desarrollo con base al grado de resistencia del refuerzo (ACI, 2019)

Ψs = factor de modificación para la longitud de desarrollo con base en el diámetro del refuerzo (ACI, 2019)

Ψt = factor utilizado para modificar la longitud de desarrollo en tracción debido a la localización de vaciado del concreto (ACI, 2019)

2.3. Diseño de vigas de hormigón reforzado

2.3.1. Generalidades

El hormigón reforzado es uno de los principales elementos de la construcción ecuatoriana (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2020). El uso de acero busca compensar la baja resistencia a la tracción generada por flexión que tiene el hormigón. El diseño de elementos estructurales de hormigón reforzado se los hace siguiendo la metodología Load and Resistance Factor Design (LRFD) y en el contexto ecuatoriano, de acuerdo a la norma ecuatoriana de la construcción (NEC) que a su vez tiene como referencia al Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318-19). El reforzamiento se lo realiza mediante varillas de acero corrugado y este generalmente es cortado y moldeado en obra. Según estadísticas, el desperdicio de acero en obra puede llegar hasta un 6,77% por lo que puede llegar a representar un rubro importante y hasta empeorar si se tiene un mal diseño (Rodríguez, C. E. A., & Aguirre, I. J. O. 2022).

2.3.2. Consideraciones iniciales

Para diseñar una viga se deben tomar en cuenta los siguientes conceptos:

-Al elegir las dimensiones de la viga y comenzar un análisis de prediseño se debe tomar en cuenta que la arquitectura no restrinja al diseño y que se debe evitar tener espacios de entrepiso muy grandes. La literatura recomienda que para vigas rectangulares cortas se use la relación de peralte y ancho entre 1½ a 2 para mantener un bajo costo, pero buen rendimiento. También se recomienda tener vigas altas y estrechas en medida de lo posible (McCormac, J. C., & Brown, R. H., 2017).

-El código ACI proporciona la tabla 9.3.1.1 para obtener la altura mínima en vigas de acuerdo a la luz de la misma (ACI, 2019).

-En la sección 9.2.3 el ACI (2019) establece que para una viga que no esté arriostrada lateralmente se debe cumplir con: la separación entre los apoyos laterales no debe exceder 50 veces el menor ancho de ala o cara a compresión y la separación entre apoyos laterales debe tener en cuenta los efectos de cargas excéntricas.

-Se debe considerar el peso propio de la viga para su diseño. Para el proceso de diseño se puede hacer una primera iteración usando el peso aproximado considerando las dimensiones de prediseño y ajustarlo a un cálculo más exacto una vez obtenidas las dimensiones de diseño (McCormac, J. C., & Brown, R. H., 2017).

-Generalmente se prefiere usar varillas de un solo tamaño para las vigas, aunque también se puede optar el usar diferentes varillas para el acero de compresión y los estribos (McCormac, J. C., & Brown, R. H., 2017).

-El módulo de elasticidad del hormigón reforzado se puede obtener con la fórmula 19.2.2.1.b del ACI:

$$Ec = 4700 * \sqrt{f´c} \quad \text{(ACI, 2019)}$$

En donde Ec es el módulo de elasticidad del hormigón en MPa y f´c es la resistencia a la compresión del hormigón en MPa. Esta ecuación solo es válida para hormigones de peso normal (ACI, 2019).

-El acero del hormigón reforzado se debe proteger de la intemperie, principalmente de la corrosión y de fuego. Por ello se debe proporcionar de un recubrimiento de hormigón que proteja a las varillas de acero. Se tiene que tomar en cuenta que las varillas longitudinales a compresión estarán rodeadas por los estribos y es a partir de la superficie de estos que se toma en cuenta la distancia para el recubrimiento (McCormac, J. C., & Brown, R. H., 2017). La ACI proporciona la tabla 20.5.1.3.1 con los requerimientos mínimos de recubrimiento de acuerdo a la situación de cada elemento estructural.

-El ACI (2019) en la seccion 20.2.2.2 indica que se debe tomar como modulo de elasticidad del acero “Es” el valor de 200000 MPa.

-El espaciamiento mínimo o distancia libre mínima entre refuerzos paralelos horizontalmente debe ser al menos el mayor entre 25 mm, d_b y (4/3) *d_{agg} de acuerdo a la sección 25.2.1 del ACI (2019). Para el refuerzo que se coloque verticalmente en dos o más capas horizontales el espaciamiento no será menor a 25 mm de acuerdo a la sección 25.2.2 del ACI (2019).

Para comprobar las dimensiones de los elementos analizados se usó el siguiente proceso:

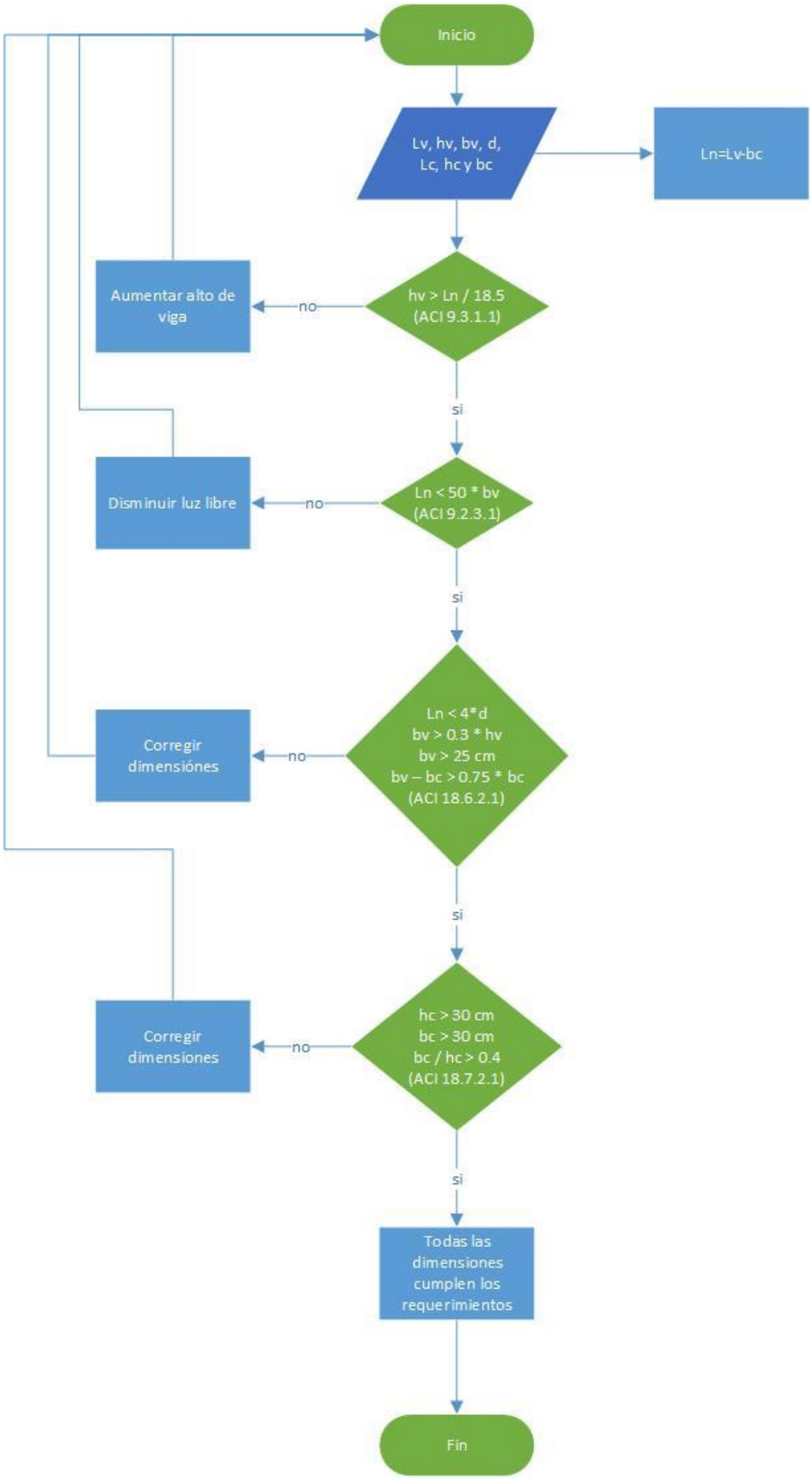


Figura 1 Flujograma de dimensiones mínimas

En donde:

Lv: Longitud de la viga a analizar

hv: Altura de la viga a analizar

bv: Ancho de la viga a analizar

d: Distancia desde el extremo a compresión de la viga hasta el refuerzo a tensión

Lc: Longitud de la columna a analizar

hc: Altura de la columna a analizar

bc: Ancho de la columna a analizar

Ln: Luz libre de la viga

En este flujograma como en los siguientes cuando se quiera nombrar al código ACI 318-19 se lo abreviara como “ACI”.

2.3.3. Diseño a flexión

Se usará el método de diseño por resistencia, en él las cargas aplicadas se multiplican por factores de carga, que funcionan como factores de seguridad y son mayores que 1, obteniendo así cargas factorizadas. Luego para tomar en cuenta la incertidumbre de las dimensiones, materiales y mano de obra en la construcción se multiplica la resistencia ultima teórica o resistencia nominal por el factor Φ de reducción de resistencia, que es menor que la unidad. Se busca que en cada miembro su capacidad ultima de carga multiplica por su factor de reducción sea igual o mayor a la suma de cargas de servicio multiplicadas por sus factores de carga. Este método, también llamado de resistencia ultima, es el único método de diseño permitido por el ACI desde el código del 2002 (McCormac, J. C., & Brown, R. H., 2017).

A lo largo de los años varias pruebas de laboratorio demuestran que las deformaciones unitarias aumentan proporcionalmente a medida que nos alejamos del eje neutro de una sección. Los esfuerzos de compresión hasta los 0,5 f´c varían de forma lineal, luego de este valor se entra en el rango de cedencia haciendo que el esfuerzo del hormigón caiga de forma curva (McCormac, J. C., & Brown, R. H., 2017).

La forma de diagramas de esfuerzo es diferente para cada viga dependiendo de sus dimensiones y de las cargas aplicadas junto a otros factores haciendo que los esfuerzos reales y la posición del eje neutro difieran de viga en viga. Suponiendo que el concreto se aplasta con una deformación unitaria de 0,003 y que el acero cede bajo fy se pueden obtener ecuaciones de flexión para vigas. Para obtener el valor de compresión y el centroide de dicha carga distribuida Whitney cambio la curva de esfuerzos mostrada en el grafico anterior por un bloque rectangular de esfuerzos equivalente a 0,85 f´c y con una altura "a" igual a β_1*c de tal forma que el centroide de este rectángulo y su valor de esfuerzos coincida con el de la distribución curva (McCormac, J. C., & Brown, R. H., 2017).

Con estas suposiciones se pueden obtener las ecuaciones de estática de suma de fuerzas horizontales y de suma de momentos del momento resistente producido debido al momento interno, de esa forma despejar los valores de "a" y de Mn. En donde Mn es el momento resistente teórico que al ser multiplicado por el factor de reducción Φ se obtiene la resistencia útil de un miembro Φ * Mn que debe ser igual o mayor que el momento factorizado calculado Mu causado por las cargas multiplicadas por su factor de aumento (McCormac, J. C., & Brown, R. H., 2017).

$$\Phi * \text{Mn} > Mu$$

Debido al momento externo se producen dos reacciones internas iguales: la fuerza de compresión del hormigón C y la fuerza de tensión del acero T. En donde C = 0,85*f'c*a*b de acuerdo al rectángulo de Whitney y a la definición de esfuerzo a su vez T = As * fy (McCormac, J. C., & Brown, R. H., 2017).

Al igualar estas fuerzas y despejar "a" se obtiene:

$$a = \frac{As * fy}{0{,}85 * f'c * b}$$

Al considerar $\rho = \frac{As}{b*d}$ que es el porcentaje de acero de una viga en particular

$$a = \frac{\rho * fy * d}{0{,}85 * f'c}$$

Realizando una sumatoria de momentos desde la fuerza C se obtiene la siguiente ecuación:

$$Mn = T * \left(d - \frac{a}{2}\right) = As * fy * \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

Al tomar en cuenta que al menos se busca que Φ * Mn>Mu

$$Mu = \Phi * b * d^2 * fy * \rho * \left(1 - \frac{\rho * fy}{1{,}7 * f'c}\right)$$

Al despejar ρ

$$\rho = \frac{0{,}85 * f'c}{fy} * \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 * Mu}{0{,}85 * f'c * \Phi * b * d^2}}\right)$$

De esta forma se obtiene el porcentaje de acero necesario para una viga cualquiera frente a un momento Mu.

Una viga puede tener una sección balanceada, una sección controlada por tensión y una sección controlada por compresión. Una viga con sección balanceada de acero es en la que el acero en tensión alcanzara su punto de cedencia en el momento exacto en el que el concreto alcance una deformación unitaria igual a 0,003, en otras palabras, quede inutilizable. En cambio, en un miembro controlado por compresión el acero ni siquiera llegara a la cedencia antes de que el hormigón llegue al 0,003 de deformación unitaria. En estos dos casos los elementos fallaran súbitamente sin ningún aviso sin mostrar deformaciones notables, estos elementos se llaman miembros frágiles y deben ser evitados. En cambio, un elemento de sección controlada por tensión avisara al usuario de su falla, mediante grandes deformaciones, ya que el acero entrara en el rango de fluencia antes de que el hormigón falle (McCormac, J. C., & Brown, R. H., 2017).

El código ACI (2019) establece en su sección 22.2.1.2 que las deformaciones unitarias del acero y del hormigón son proporcionales a la distancia respecto a eje neutro. Se establece también en la sección 22.2.2.1 que la deformación unitaria máxima en la que el hormigón es útil es de 0,003 en cambio en la sección 21.2.2.1 para el refuerzo corrugado de grado 420, su deformación unitaria εty que es igual a fy / Es se la puede tomar como 0,002. Las vigas no presforzadas en las que $Pu \leq 0{,}10 * f'c * Ag$ deben ser obligatoriamente controladas por tracción, esto acorde a la sección 9.3.3.1 del ACI (2019)

En deducciones anteriores se obtuvo que:

$$a = \frac{As * fy}{0{,}85 * f'c * b}$$

Y que la distancia c que es la distancia desde el eje neutro hasta las fibras extremas del concreto en compresión es igual a:

$$c = \frac{a}{\beta 1}$$

Con estas suposiciones y estas ecuaciones se puede calcular el valor de la deformación unitaria del acero εt. Con este valor se determinar si la viga está controlada por tracción o por compresión además de que permitirá obtener el factor de reducción de resistencia Φ de acuerdo a la tabla 21.2.2 del ACI (2019).

La literatura recomienda que siempre entre en el rango de secciones de vigas controladas por tensión, ya que además de ser más seguro para el usuario, resulta más económico, ya que se requiere un menor porcentaje de acero y la penalización por el factor de reducción es menor (McCormac, J. C., & Brown, R. H., 2017).

Una forma de comprobar si la sección se encuentra controlada por tensión o por compresión es obteniendo el porcentaje de acero de equilibrio ρ_b. Este es el porcentaje de acero requerido para obtener una viga balanceada. Al someter esta viga a su carga ultima teóricamente el concreto alcanzara la deformación unitaria de 0,003 al mismo tiempo que el refuerzo alcanzara su límite de cedencia. Se puede localizar el eje neutro de la condición balanceada mediante relaciones triangulares de las deformaciones unitarias del acero y del concreto (McCormac, J. C., & Brown, R. H., 2017).

$$\frac{c}{d} = \frac{0{,}003}{0{,}003 + (\frac{fy}{Es})} = \frac{0{,}003}{0{,}003 + (\frac{fy}{Es})} = \frac{0{,}003}{0{,}003 + (\frac{fy}{200000})}$$

Al ordenar la expresión:

$$c = \frac{600}{600 + fy} * d$$

Al usar ecuaciones previamente deducidas:

$$a = \frac{\rho * fy * d}{0{,}85 * f'c}$$

$$c = \frac{a}{\beta 1} = \frac{\rho * fy * d}{0{,}85 * f'c * \beta 1}$$

$$\frac{\rho * fy * d}{0{,}85 * f'c * \beta 1} = \frac{600}{600 + fy} * d$$

Con esto se obtiene:

$$\rho b = \left(\frac{0{,}85 \ * \ \beta 1 * f´c}{fy}\right) * \ (\frac{600}{600 + fy})$$

Esta ecuación permite obtener ρ_b usando los valores de f´c y fy en MPa. Lo ideal es obtener valores de ρ menores que ρ_b para obtener una sección de viga controlada por tracción (McCormac, J. C., & Brown, R. H., 2017).

Entre los modos de falla de vigas reforzadas se puede dar la posibilidad de que el momento resistente ultimo sea menor que el momento de agrietamiento, en este caso la viga fallara apenas se forme una grieta. Esto se da sobre todo en secciones de viga en las que las dimensiones son muy superiores a las necesarias mientras se tiene una cuantía de refuerzo pequeña. Para evitar esta situación el ACI (2019) estipula una cantidad de acero mínimo para miembros sometidos a flexión ya sea frente a momento positivo o negativo. La sección 9.6 nos habla del área de refuerzo mínima Asmin. El ACI especifica en 9.6.1.2 que Asmin debe tomarse como el mayor entre:

$$Asmin > \frac{0{,}25 * \sqrt{f´c}}{fy} * bw * d$$

$$Asmin > \frac{1{,}4}{fy} * bw * d$$

En donde fy y f´c están en MPa y Asmin, bw y d están en cm^2.

2.3.4. Control de deflexiones

En la sección 9.3.2 el ACI estipula que para vigas no presforzadas que cumplan con la sección 9.3.1 y con ello con la tabla 9.3.1.1 “Altura mínima de vigas no presforzadas” no será necesario calcular las deflexiones inmediatas ni a largo plazo.

2.3.5. Adherencia, longitud de desarrollo o anclaje y empalmes

2.3.5.1. Adherencia

En el diseño de concreto reforzado se busca que no haya deslizamiento de las varillas de acero frente al concreto, que haya adherencia. La idea es que el acero y el concreto permanezcan juntos y trabajen en unidad. Si no hubiera esta adherencia el acero se zafaría y el hormigón trabajaría como un miembro sin refuerzo.

La adherencia de las varillas de acero en el hormigón se da por diversas causar como: la fricción debido a rugosidades, adherencia química entre el hormigón y el acero y el apoyo del concreto en las corrugaciones de las varillas.

2.3.5.2. Longitud de desarrollo o anclaje

Se necesita que las varillas tengan una longitud mínima sobre todo en las zonas de condiciones más críticas de la viga para garantizar su adhesión al hormigón. Esta distancia l_d es llamada longitud de anclaje o longitud de desarrollo. Esta se la puede definir como la longitud mínima para que una varilla trabaje a su esfuerzo de fluencia además de una longitud adicional para asegurar la tenacidad del miembro.

Se deben tomar en cuenta estas secciones criticas para poder implementar correctamente la longitud de desarrollo. Las varillas trabajaran en sus esfuerzos máximos y por ende más críticos cuando tengamos los momentos máximos. Desde estos puntos a la izquierda y a la derecha se debe asegurar que la varilla tenga su longitud de desarrollo tal como lo indica la sección 9.7.3.1 del ACI (2019). A su vez también indica en la siguiente sección que los puntos críticos para el desarrollo del refuerzo son en donde se presenten los esfuerzos máximos y en donde el refuerzo a tracción doblado o terminado ya no es necesario para resistir flexión. En la figura R9.7.3.2 del ACI (2019) tenemos las secciones críticas de una viga representadas por una “c” y una “x” donde el refuerzo a tracción doblado ya no es necesario para resistir el momento.

Como lo estipula la sección 9.7.3.3 luego de un punto en el que ya no se necesite resistir flexión el refuerzo debe extenderse al menos el mayor entre d o $12*d_b$ excepto en los apoyos de las vigas simplemente apoyadas ni en el extremo libre de voladizos. En cambio, en 9.7.3.4 se dicta que el refuerzo continuo en tracción por flexión debe tener una longitud no menor que l_d luego del punto en donde haya refuerzo que este cortado o doblado por ya no ser necesario resistir a flexión (ACI, 2019).

En la sección 9.7.3.5 el código indica que el refuerzo en tracción por flexión no debe terminarse en una zona de tracción a menos que cumpla con que el requerimiento a corte es menor a 2/3 de la capacidad reducida a corte en esa zona (ACI, 2019)

El ACI (2019) normaliza en la sección 25.4 la longitud de desarrollo del refuerzo. Algunas indicaciones importantes son: las longitudes de desarrollo no requieren de un factor de

reducción de resistencia, de la sección 25.4.1.3 y los valores de $\sqrt{f'c}$ usados al calcular la longitud de desarrollo no deben pasar de 8.3 MPa, de la sección 25.4.1.4.

De acuerdo a la sección 25.4.2.1 del ACI (2019) la longitud de desarrollo para barras corrugadas en tracción l_d debe ser la mayor entre: 300 mm, y la longitud calculada de acuerdo a las secciones 25.4.2.3 o 25.4.2.4.

2.3.5.3. Ganchos

Cuando no se tiene disponible el espacio suficiente para anclar las varillas a tensión según sus longitudes de desarrollo requeridas se pueden utilizar ganchos. Los ganchos son inútiles a compresión. La sección 5.3 del ACI (2019) nos brinda la tabla 25.3.1 que nos indica la geometría del gancho a 90 grados y a 180 grados.

En el caso de usar ganchos la longitud de desarrollo parara a llamarse l_{dh} y se calculara de forma homologa a la longitud de desarrollo anterior, pero esta vez de acuerdo a la sección 25.4.3 del ACI.

En el caso que se tengan bordes discontinuos, recubrimiento a ambos lados del gancho y recubrimiento en el borde superior o inferior menor a 65 mm se debe cumplir lo siguiente de acuerdo a la sección 25.4.3.4 del ACI (2019): el gancho se debe circundar a lo largo de l_{dh} con estribos perpendiculares a l_{dh} con $s \leq 3d_b$ y el primer estribo debe circundar la parte doblada del gancho dentro de una distancia $2d_b$ del exterior del doblez.

2.3.5.4. Empalmes

Debido a la limitada longitud comercial de las varillas de refuerzo es necesario realizar empalmes. El método más sencillo es traslapar las varillas una sobre otra.

Se presenta a continuación un flujograma en el que se explica el procedimiento a seguir para el diseño a flexión considerando longitud de desarrollo, empalmes y ganchos:

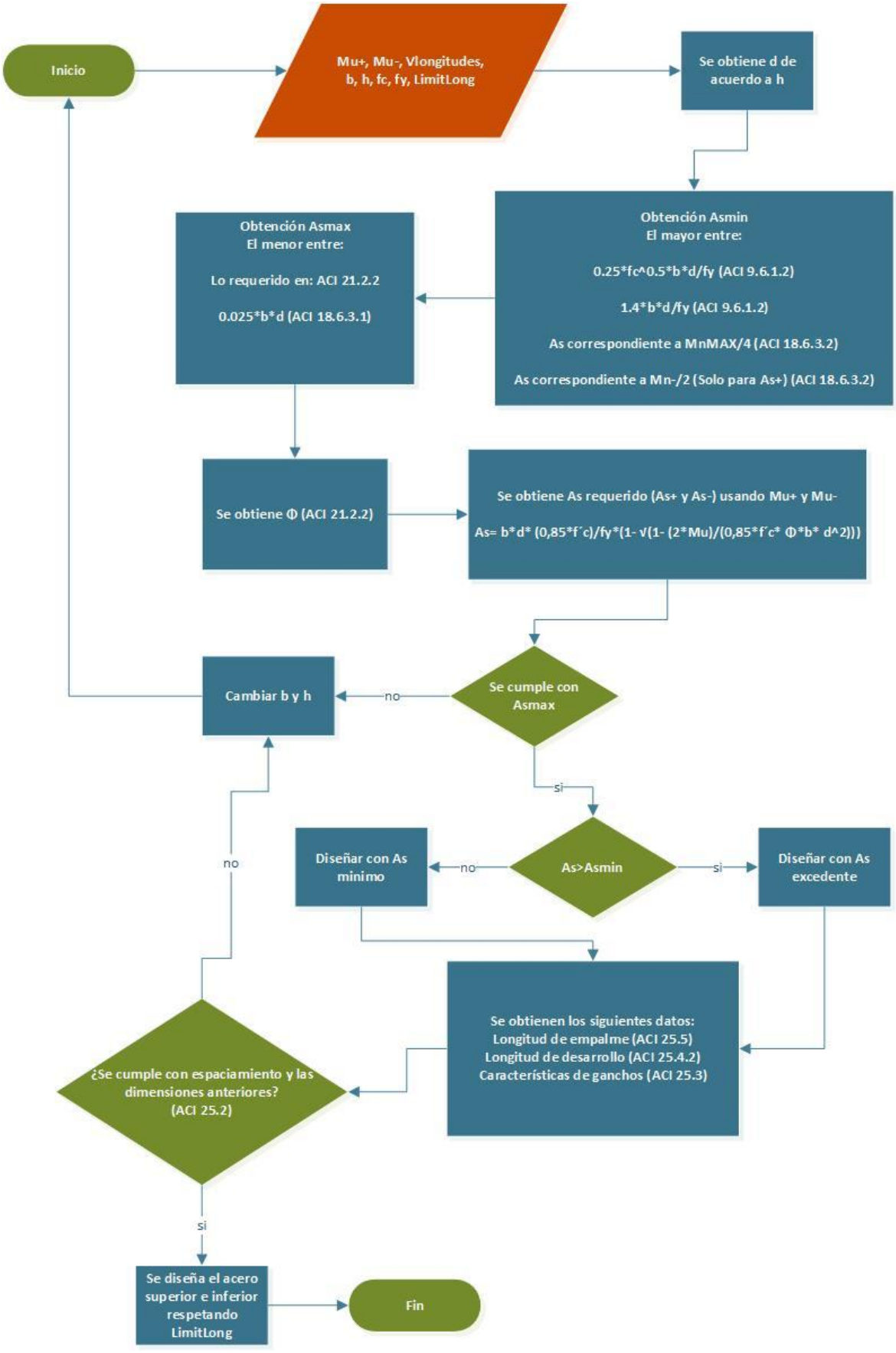


Figura 2 Flujograma Diseño a flexión

En donde:

Mu+: Momento ultimo máximo positivo

Mu-: Momento ultimo máximo negativo

Vlongitudes: Vector con las longitudes de las vigas

b: Ancho universal de vigas

h: Altura universal de vigas

fc: Resistencia a la compresión del hormigón

fy: Resistencia a la fluencia del refuerzo

LimitLong: longitud máxima de corte de varilla deseada

d: Distancia desde el extremo a compresión de la viga hasta el refuerzo a tensión

Asmin: Área de varillas mínima

Asmax: Área de varillas máxima

As: Área de varillas

Mn: Momento nominal en una sección

Mnmax: momento nominal máximo

As+: Área de varillas resistente a momento positivo

As-: Área de varillas resistente a momento negativo

As excedente: As requerido más allá que el Asmin

Φ: factor de reducción de resistencia

2.3.6. Diseño a Corte

El diseño a corte se explica con el siguiente algoritmo:

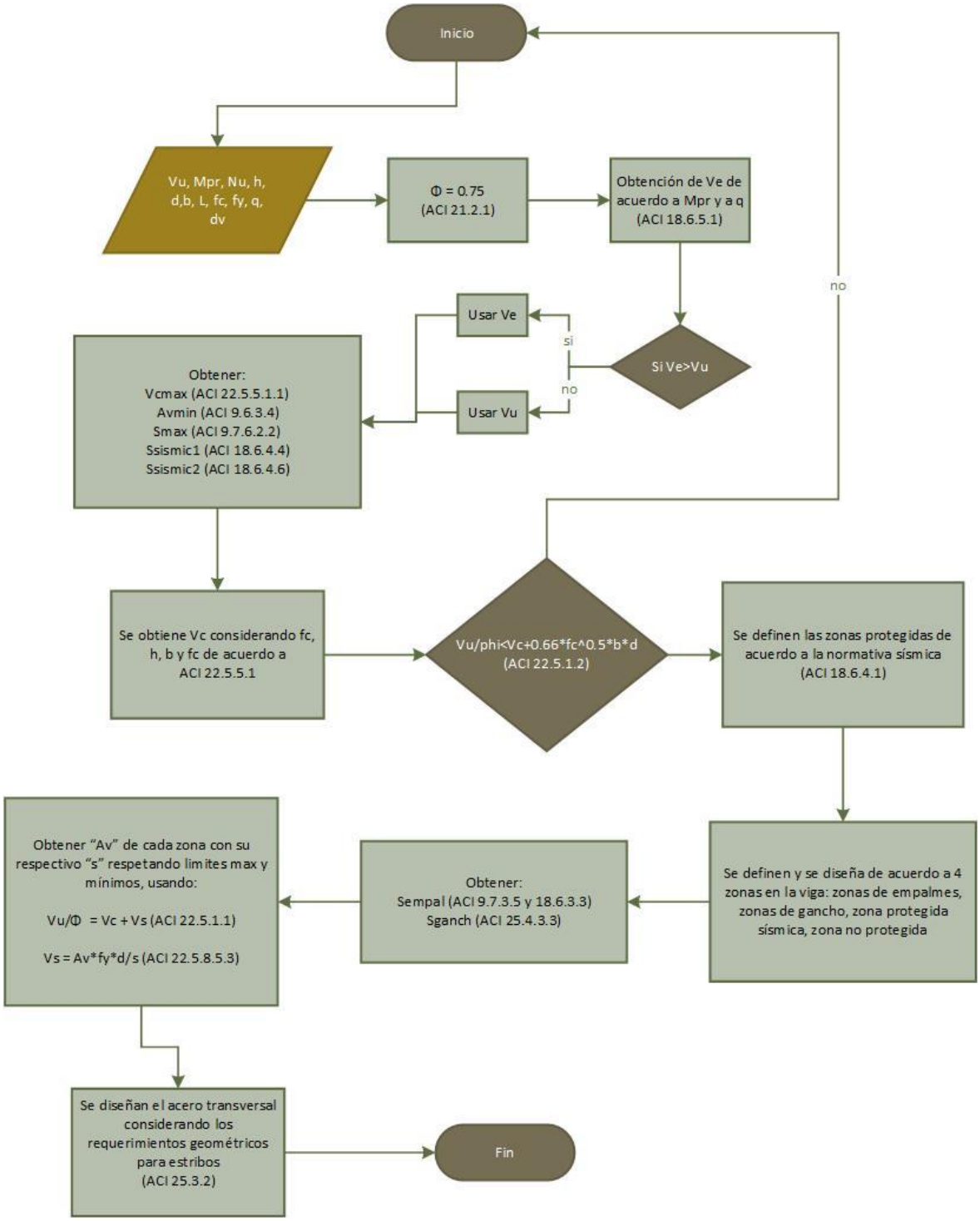


Figura 3 Flujograma de diseño a Corte

En donde:

Vu: Corte último en un punto de la viga

Mpr: Resistencia probable a la flexión

Nu: Fuerza axial ultima

b: Ancho universal de vigas

h: Altura universal de vigas

d: Distancia desde el extremo a compresión de la viga hasta el refuerzo a tensión

L: Vector de longitudes de las vigas

fc: Resistencia a la compresión del hormigón

fy: Resistencia a la fluencia del refuerzo

q: Carga distribuida gravitacional en la viga

dv: Diámetro de varilla a utilizar

Φ: Factor de reducción de resistencia

Ve: Fuerza cortante de diseño

Vcmax: Resistencia maxima al corte del concreto

Av: Area de acero para estribos

Avmin: Area de acero minima requerida para estribos

S: Espacimiento entre estribos

Smax: Espaciamiento maximo entre estribos

Ssismic1: Espaciamiento maximo para la zona protegida según normativa sismica

Ssismic2: Espaciamiento maximo para la zona no protegida según normativa sismica

Vc: Resistencia al corte del concreto

Vs: Resistencia al corte del refuerzo

Sempal: Espaciamiento máximo para empalmes

Sganch: Espaciamiento máximo para estribos

2.4. Análisis Estructural

Para realizar el análisis estructural y obtener las solicitaciones para las vigas se utilizó el método de la rigidez mediante vectores de colocación. Este proceso se explica en el siguiente flujograma:

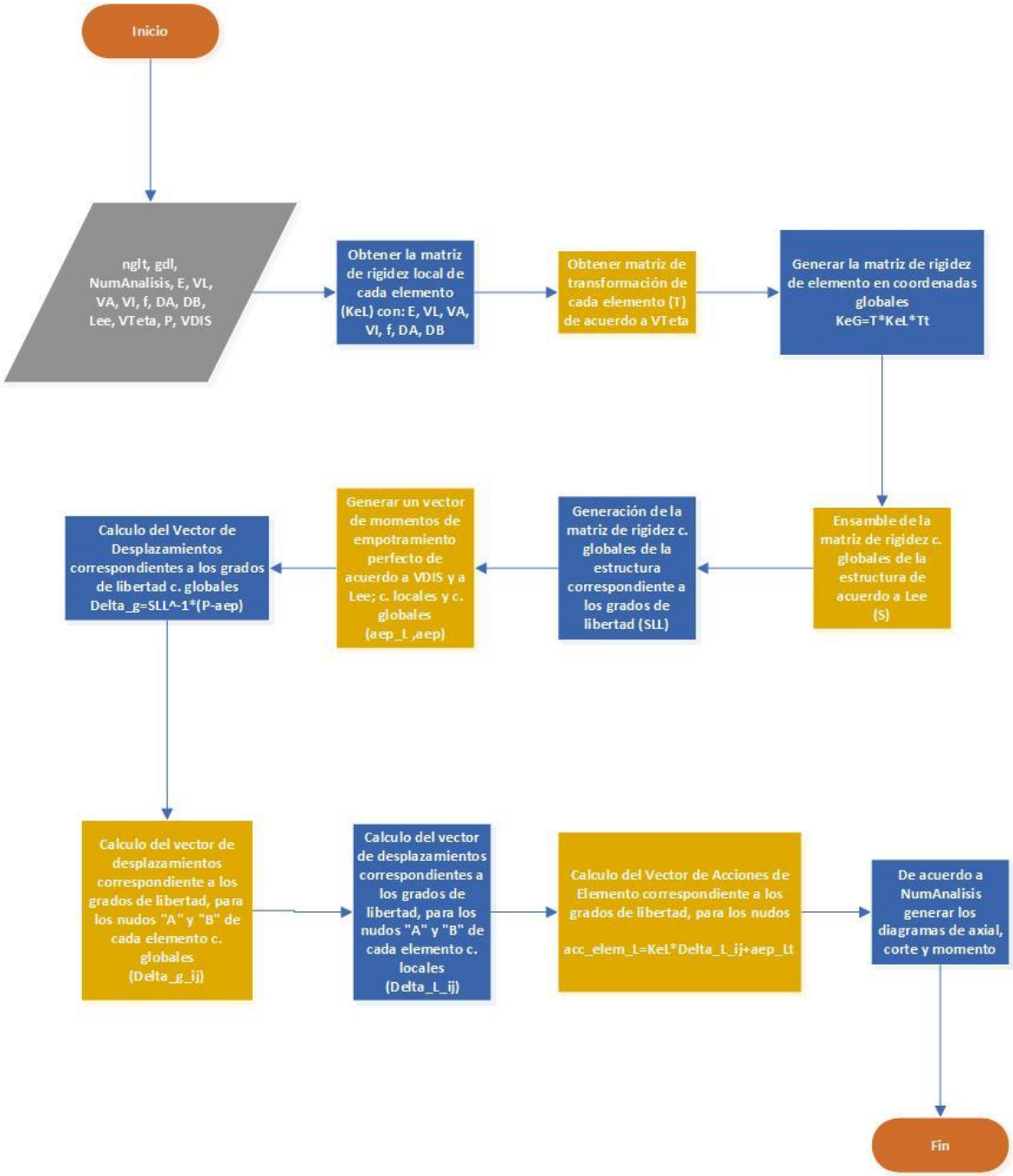


Figura 4 Flujograma del método de la Rigidez

En donde:

nglt: Número total de grados de libertad

gdl: Número de grados de libertad no restringidos

NumAnalisis: Número de datos que se desean para los diagramas

E: Modulo de elasticidad de los elementos

VL: Vector de longitudes de los elementos

VA: Vector de áreas de los elementos

VI: Vector de inercias de los elementos

f: factor de forma de los elementos

DA: Vector con los extremos rígidos del extremo “A”

DB: Vector con los extremos rígidos del extremo “B”

Lee: Vector de colocación de cada elemento

VTeta: Vector con los ángulos de acuerdo a los vectores de colocación de cada elemento

P: Vector con las cargas nodales de acuerdo a los grados de libertad

VDIS: Vector con las cargas distribuidas de cada elemento

2.5. Diseño Sismorresistente

Se realizo un análisis estático de acuerdo al espectro de la NEC-15 tal como lo muestra el siguiente diagrama:

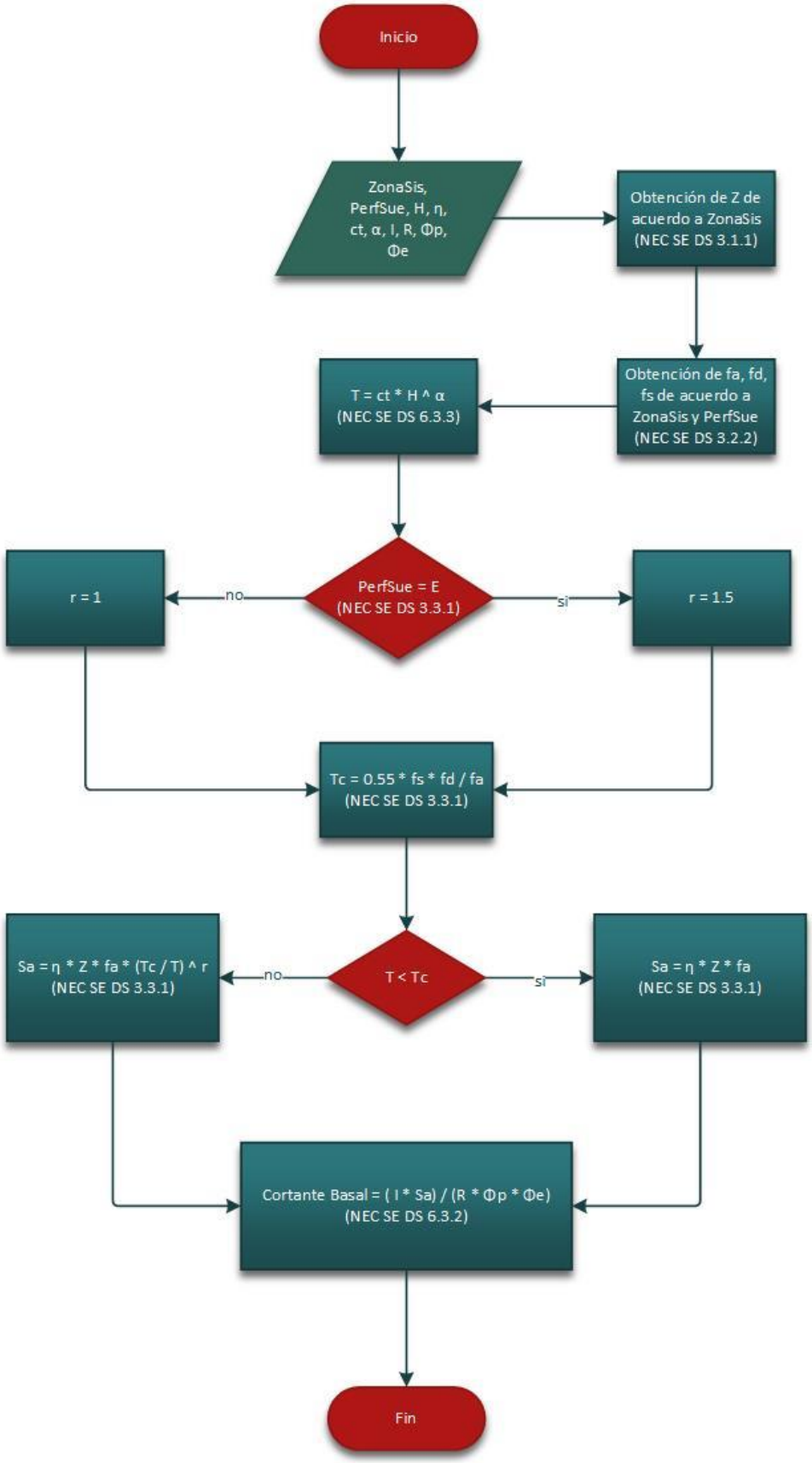


Figura 5 Flujograma de Corte Basal según NEC 15

CAPÍTULO III: ELABORACIÓN DEL ALGORITMO PARA VIGAS DE HORMIGÓN REFORZADO y OPTIMIZACIÓN DEL REFUERZO

3.1. Algoritmo para diseño de vigas de hormigón.

3.1.1. Variables a ingresar

Todas las unidades están en toneladas y en metros.

Datos principales

-Número de vanos a analizar

-Dimensiones de las vigas

-Dimensiones de las columnas

-Características del hormigón y el acero

(Opcional) Considerar deformaciones por corte y extremos rígidos

Datos para la obtención de la fuerza sísmica

-Zona Sísmica (1-6), (I=1 II=2 III=3 IV=4 V=5 VI=6)

-Tipo del perfil del suelo (A-E), (A=1 B=2 C=3 D=4 E=5)

-Índice η (Costa=1,8; Sierra, Esmeraldas y Galápagos=2,48; Oriente=2.6)

-Coeficientes que dependen del tipo de edificio

-Coeficiente de importancia

-Factor de reducción de resistencia sísmica

-Coeficientes de configuración de planta y de elevación

Cargas a utilizar

-Carga distribuida viva y muerta en (T/m)

Elementos para el análisis estructural

- ¿Cuántos puntos por elemento desea para los diagramas?

Consideraciones diseño a flexión

-Máximo número de varillas mínimas superiores deseadas

-Máximo número de varillas mínimas inferiores deseadas

-Longitud máxima de corte para armar el refuerzo longitudinal mínimo

-Base de datos de diámetros de varilla

- ¿Desde que varilla quiere que el algoritmo empiece a diseñar? (1=primera varilla, 2=segunda varilla...)

-Acero Mínimo Superior

-Acero mínimo inferior

-Acero extra superior

-Acero extra inferior

Consideraciones diseño a Corte

-Diámetro de varilla para estribos

Consideraciones obtención porcentaje de desperdicio

-Longitud de varilla comercial disponible

3.1.2. Funcionamiento del código

En el siguiente flujograma se explica la estructura del algoritmo de acuerdo a las diferentes funciones que lo conforman.

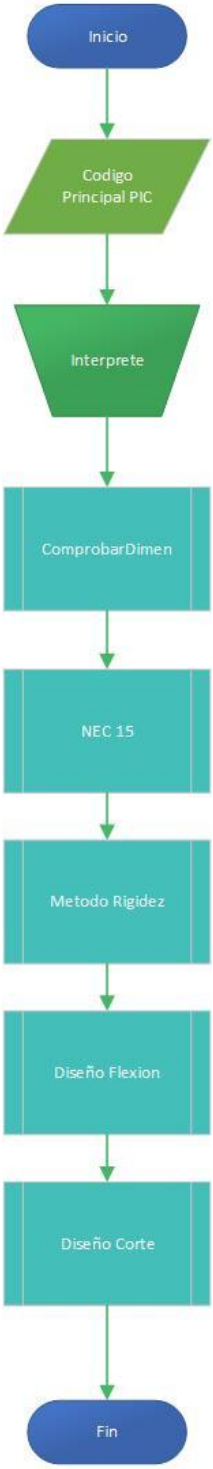


Figura 6 Flujograma de la estructura del algoritmo

En donde:

Código Principal PIC: Es la interfaz de usuario en donde se ingresan los datos.

Interprete: Esta función recibe los datos del usuario y llama a las demás de funciones de acuerdo a su uso, además interpreta los datos de cada una generando los gráficos y las tablas resultado.

ComprobarDimen: Esta función verifica que las dimensiones ingresadas por el usuario cumplan con la normativa, de no ser así detendrá el proceso y enviara un mensaje de error.

NEC 15: Permite obtener la fuerza sísmica acorde al espectro de la NEC

Método rigidez: Esta función realiza el análisis estructural de la estructura dada y entrega los diagramas de axial, corte y momento. Esta función se usará para cada combinación de cargas de acuerdo al capitulo dos de la ASCE 7-16 (2017).

Diseño Flexión: Con la envolvente de cargas esta función entrega todos los datos de las varillas longitudinales superiores e inferiores de la viga.

Diseño Corte: Esta función entrega todos los datos sobre el refuerzo transversal de la viga.

3.1.3. Resultados

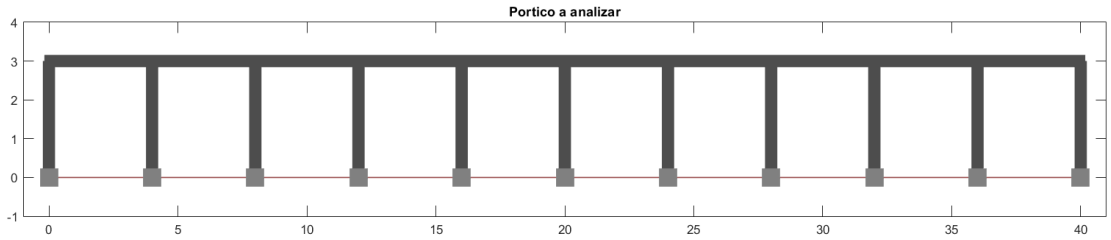


Figura 7 Dibujo del pórtico analizado

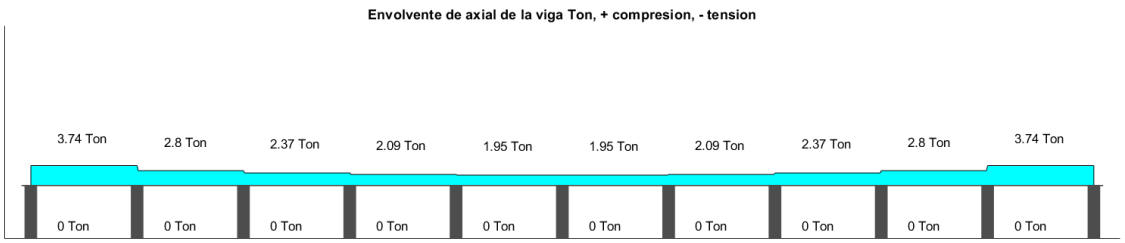


Figura 8 Envolvente de la fuerza axial de la viga

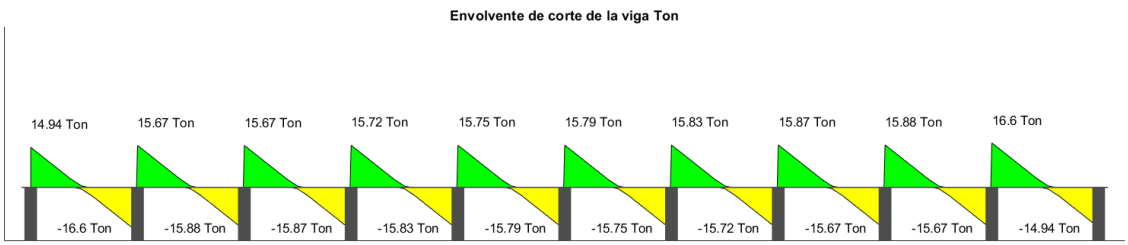


Figura 9 Envolvente de corte de la viga

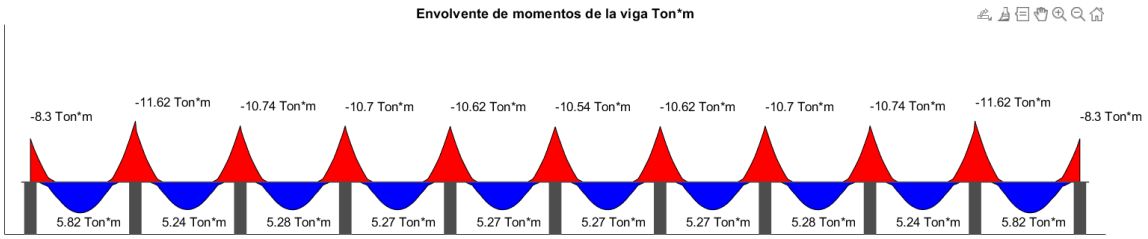


Figura 10 Envolvente de flexión de la viga

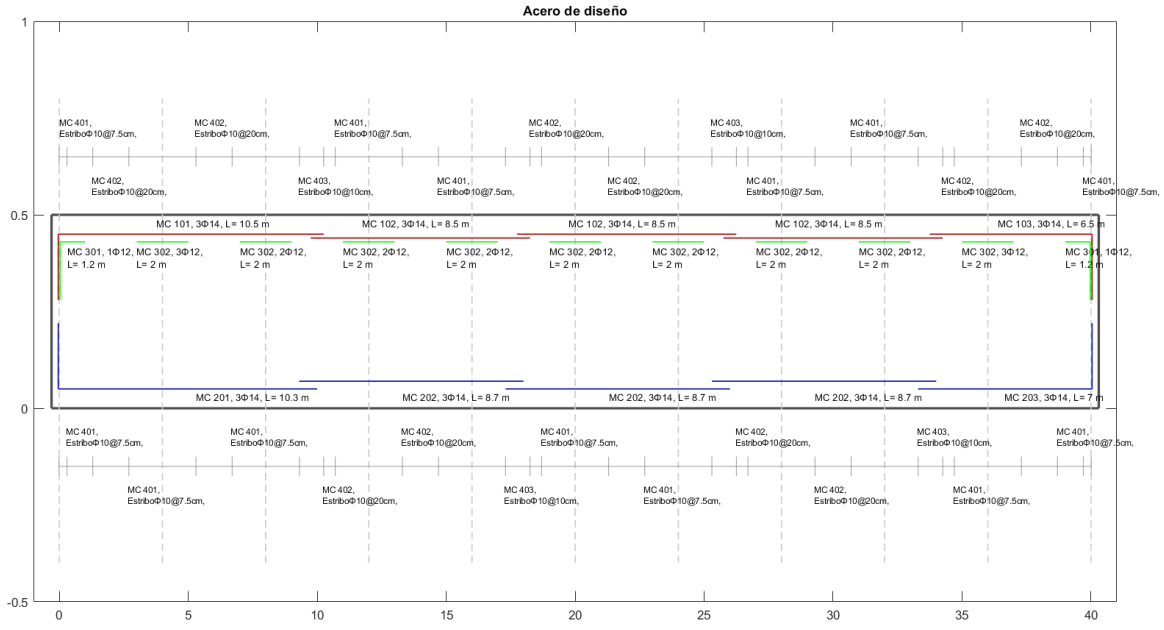


Figura 11 Plano de diseño de aceros de la viga

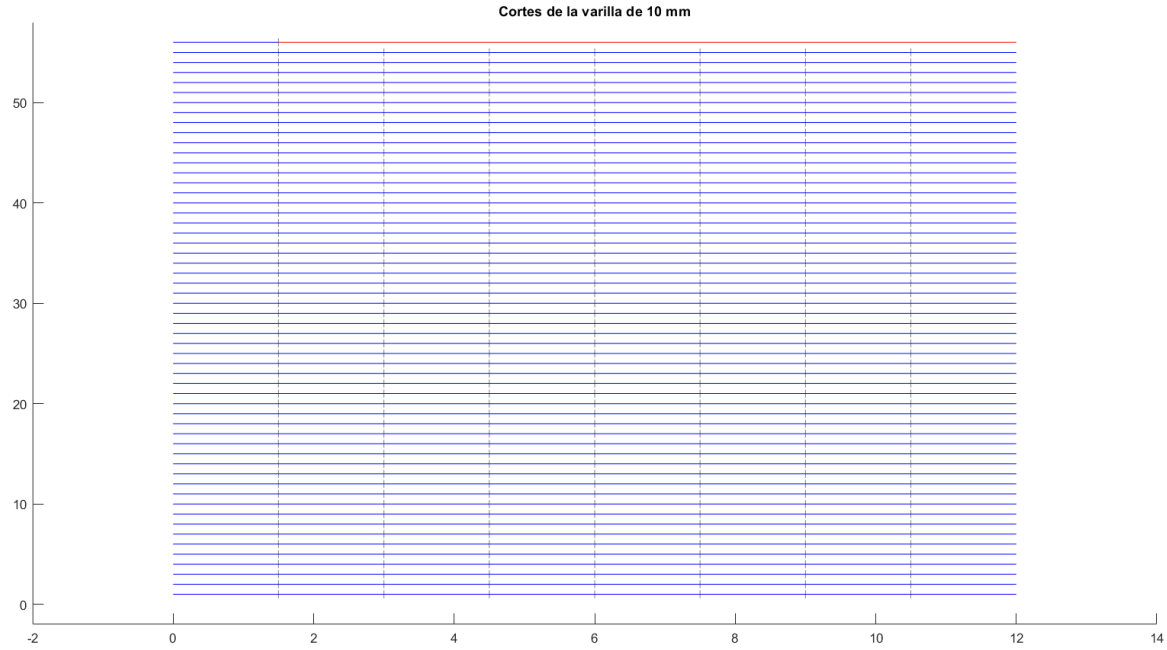


Figura 12 Cortes para la varilla de 10 mm

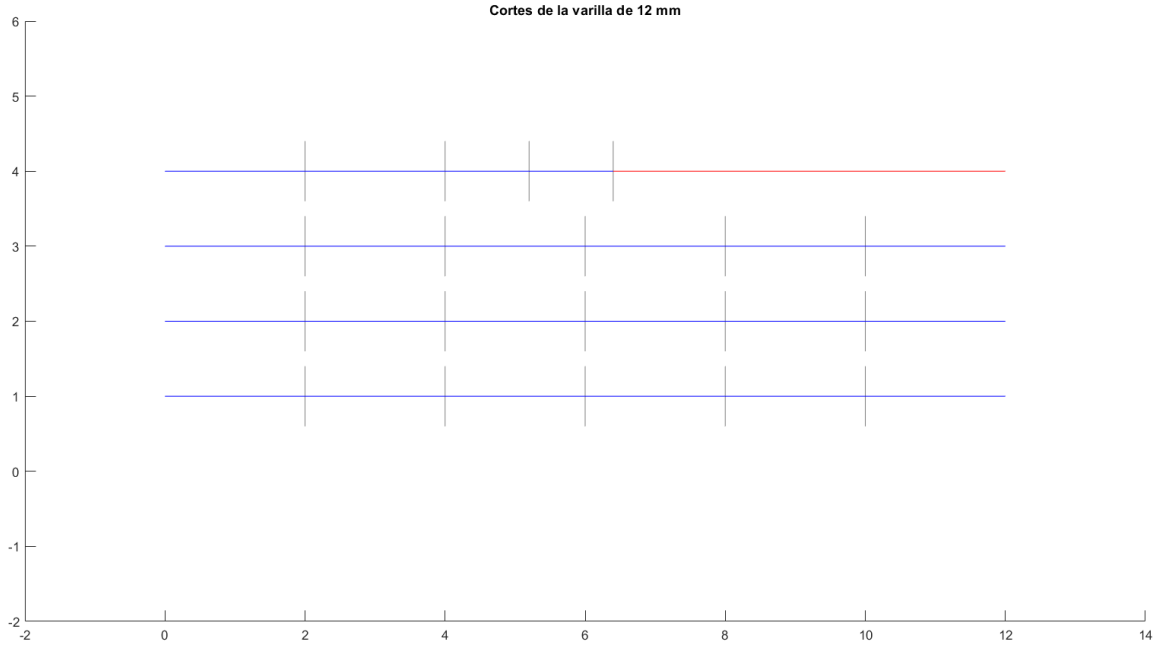


Figura 13 Cortes para la varilla de 12 mm

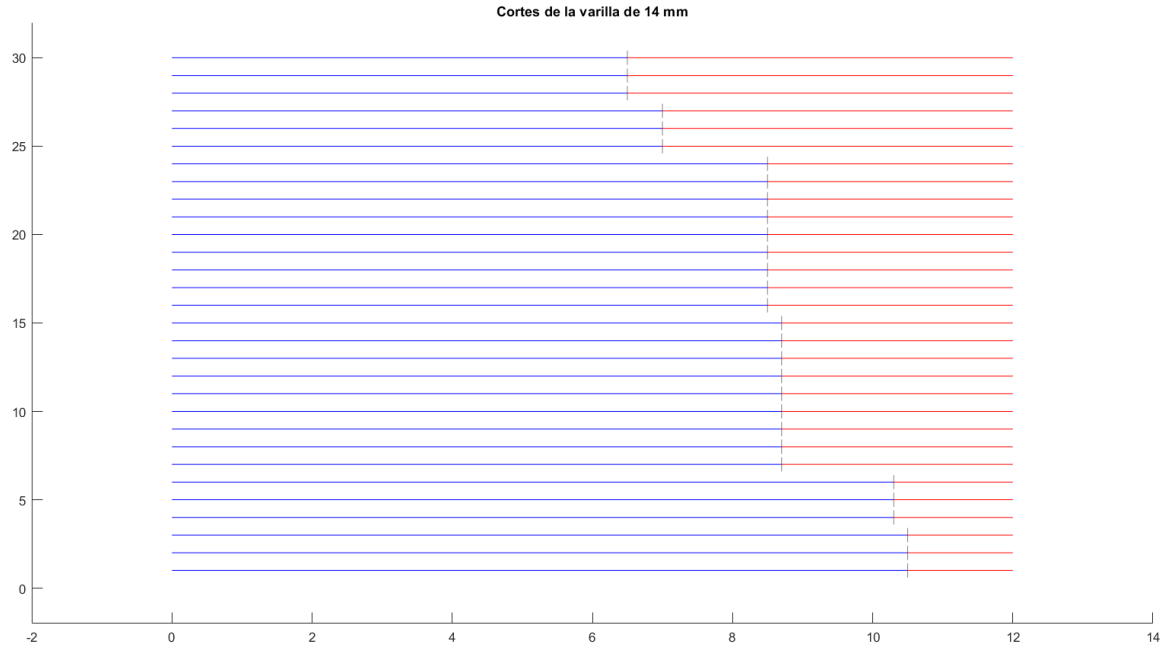


Figura 14 Cortes para la varilla de 14 mm

Planilla de aceros

Mc	Tipo	NumVar	ΦVar (mm)	a (m)	b (m)	c (m)	d (m)	e (m)	f (m)	LongParc (m)	LongTotal (m)
101	L	3	14	0	10.3	0.2	0	0	0	10.5	31.5
102	I	9	14	0	8.5	0	0	0	0	8.5	76.5
103	L	3	14	0	6.3	0.2	0	0	0	6.5	19.5
201	L	3	14	0	10.05	0.2	0	0	0	10.3	30.9
202	I	9	14	0	8.7	0	0	0	0	8.7	78.3
203	L	3	14	0	6.75	0.2	0	0	0	7	21
301	L	2	12	0	1	0.2	0	0	0	1.2	2.4
302	I	20	12	0	2	0	0	0	0	2	40
401	O	349	10	0.42	0.22	0.42	0.22	0.075	0.075	1.5	523.5
402	O	53	10	0.42	0.22	0.42	0.22	0.075	0.075	1.5	79.5
403	O	39	10	0.42	0.22	0.42	0.22	0.075	0.075	1.5	58.5

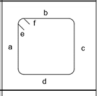
Forma de armadura	
Tipo	Forma
O	
I	
L	
C	
G	

Tabla 1 Planilla de aceros (Ejemplo)

Resumen y porcentaje de desperdicio

ΦVar (mm)	Cantidad	Longitud total (m)	Longitud desperdiciada (m)	Porcentaje desperdiciado (%)
10	56	672	10.5	1.5625
12	4	48	5.6	11.667
14	30	360	102.3	28.417

Tabla 2 Resumen y Porcentaje de desperdicio (Ejemplo)

3.2. Optimización del refuerzo

3.2.1. Optimización de recursos

En el diseño de vigas se tienen dos tipos de refuerzos: refuerzo transversal y refuerzo longitudinal. En el primero no se puede optimizar más allá de tener un buen diseño en cambio es en el acero longitudinal en donde se pueden evitar la mayor cantidad de desperdicios. El acero longitudinal se conforma con un acero mínimo que va de forma continua en toda la viga tanto en la parte superior como en la inferior de la misma en cambio y un acero longitudinal excedente que se lo tiene en ciertas zonas. El acero excedente no se puede reducir más allá de tener un buen diseño por otro lado el acero mínimo continuo se lo puede poner de diversas formas en donde entran en juego cuatro aspectos: diámetro de varilla usado, numero de varillas, longitud máxima de corte y que el diseño cumpla con las solicitaciones y características de la viga.

El último punto es primordial, no importa cómo se varíen los puntos anteriores si es que el diseño no funciona. Por el lado de las varillas y su número, siempre se tratará de usar el menor diámetro de varilla posible, siendo el número de varillas condicionado a este aspecto y a que no podemos poner más varillas que las permitidas de acuerdo a los espaciamientos normados y a la geometría de la viga. En cambio, en a la longitud de corte es en donde podemos disminuir el desperdicio de varilla. Debido a que si diseñamos como se lo hace normalmente poniendo la varilla más larga posible en el diseño se presenta un problema: acabamos con varillas de ocho a diez metros que generan un desperdicio al no poder completar entre si a las varillas comerciales disponibles (doce metros). Con esto en cuenta se propone la siguiente metodología de diseño: ajustar los números de varilla longitudinal para que todas tengan un mismo diámetro, luego se deberá estipular la longitud de corte mínima posible. De esta forma obtenemos varias varillas pequeñas que entre sí pueden completar a la varilla comercial.

3.2.2. Diseño de un algoritmo de optimización de recursos

El proceso a seguir para optimizar el uso de acero en la viga se muestra en el siguiente flujograma:

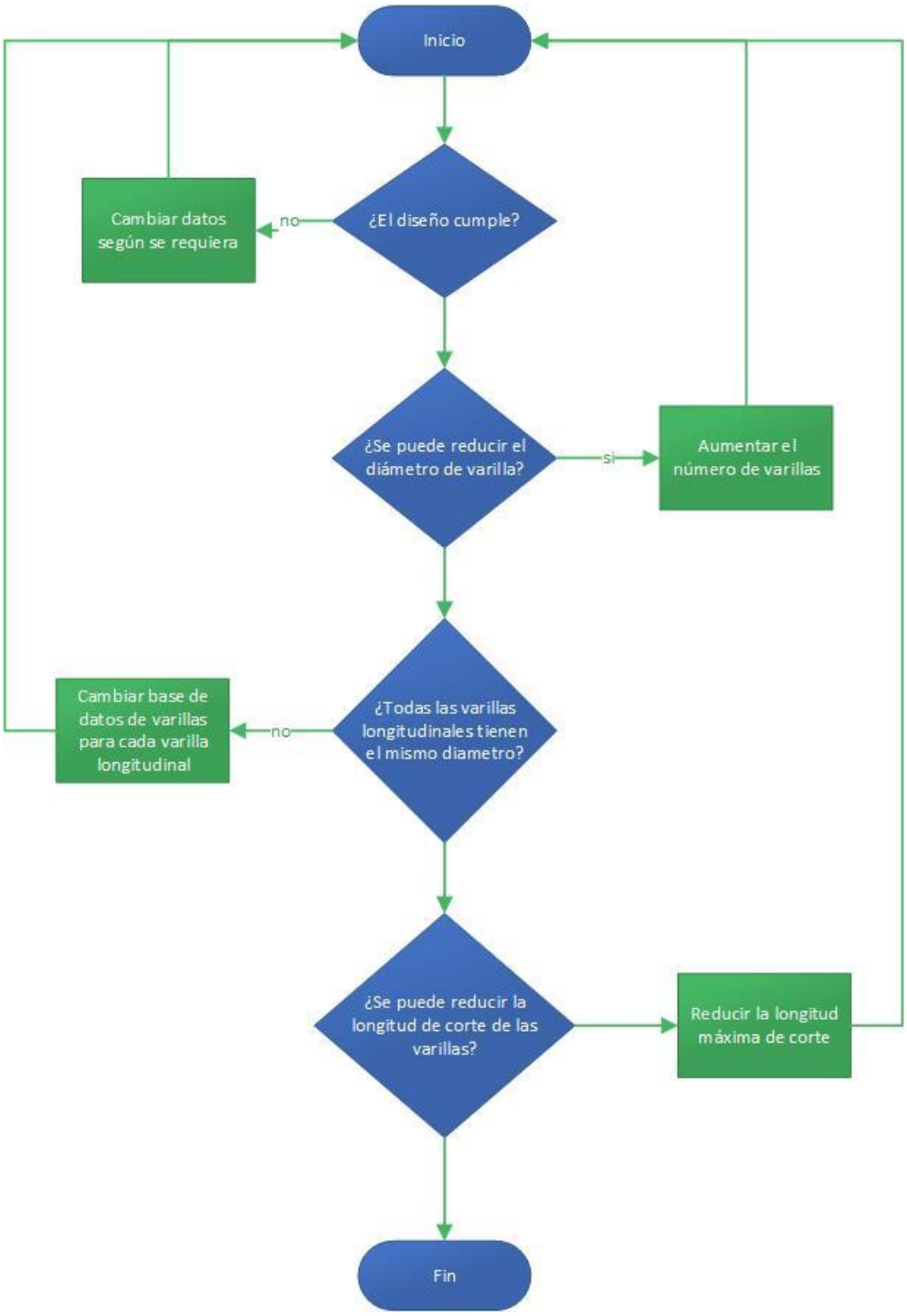


Figura 15 Flujograma de la optimización de acero

CAPÍTULO IV: APLICACIÓN DEL ALGORITMO

4.1. Diseño sin optimización

Se presenta el diseño de la siguiente viga:

Numero de vanos a analizar

```
num_vanos=10;
```

Dimensiones de las vigas

```
anch_viga=0.3;
alt_viga=0.5;
long_viga=4;
```

Dimensiones de las columnas

```
anch_col=0.6;
alt_col=0.6;
long_col=3;
```

Caracteristicas del hormigon y el acero

```
fy=42000;
fc=2100;
```

Figura 16 Datos del pórtico a analizar 1

```
PesoHorm=2.4;
```

Carga distribuida viva y muerta en (T/m)

```
L=2.88;
D=2.73;
```

Figura 17 Datos del pórtico a analizar 2

Zona Sismica (1-6), (I=1 II=2 III=3 IV=4 V=5 VI=6)

```
ZonaSis=5;
```

Tipo del perfil del suelo (A-E), (A=1 B=2 C=3 D=4 E=5)

```
PerfSue=4;
```

Indice η (Costa=1,8; Sierra, Esmeraldas y Galapagos=2,48; Oriente=2.6)

```
eta=2.48;
```

Coeficientes que dependen del tipo de edificio

```
Ct=0.055;
alpha=0.9;
```

Coeficiente de importancia

```
I=1;
```

Factor de reduccion de resistencia sismica

```
R=8;
```

Coeficientes de configuracion de planta y de elevacion

```
phiP=0.9;
phiE=0.9;
```

Figura 18 Datos del pórtico a analizar 3

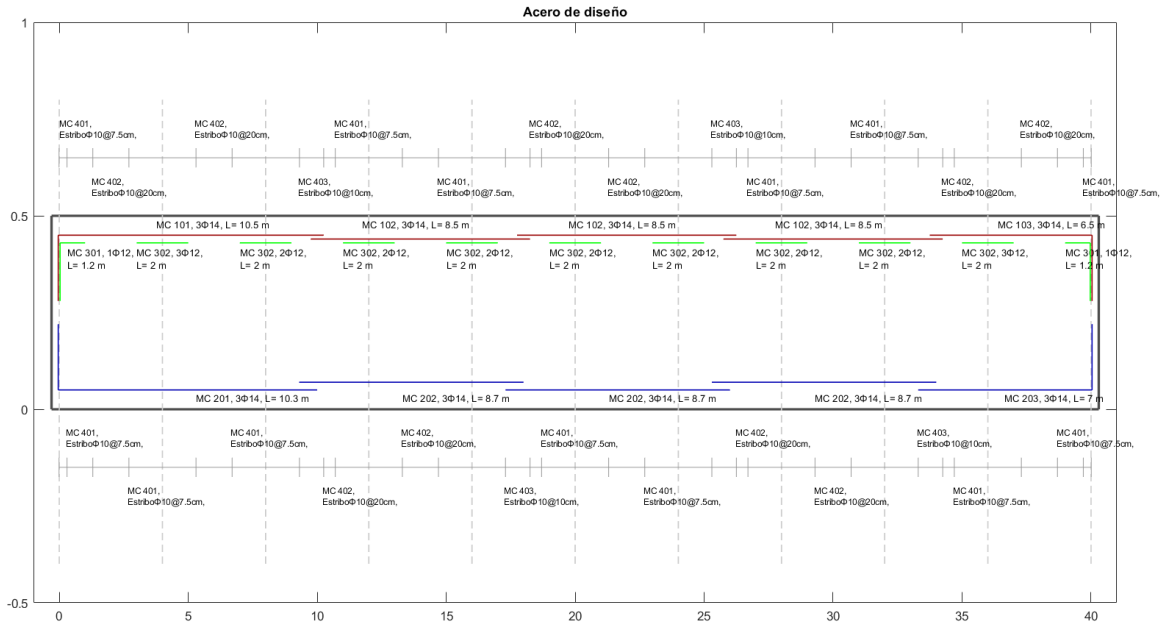


Figura 19 Diseño de la viga primera iteración

Planilla de aceros

Mc	Tipo	NumVar	ΦVar (mm)	a (m)	b (m)	c (m)	d (m)	e (m)	f (m)	LongParc (m)	LongTotal (m)
101	L	3	14	0	10.3	0.2	0	0	0	10.5	31.5
102	I	9	14	0	8.5	0	0	0	0	8.5	76.5
103	L	3	14	0	6.3	0.2	0	0	0	6.5	19.5
201	L	3	14	0	10.05	0.2	0	0	0	10.3	30.9
202	I	9	14	0	8.7	0	0	0	0	8.7	78.3
203	L	3	14	0	6.75	0.2	0	0	0	7	21
301	L	2	12	0	1	0.2	0	0	0	1.2	2.4
302	I	20	12	0	2	0	0	0	0	2	40
401	O	349	10	0.42	0.22	0.42	0.22	0.075	0.075	1.5	523.5
402	O	53	10	0.42	0.22	0.42	0.22	0.075	0.075	1.5	79.5
403	O	39	10	0.42	0.22	0.42	0.22	0.075	0.075	1.5	58.5

Tabla 3 Planilla de aceros primera iteración

Resumen y porcentaje de desperdicio

ΦVar (mm)	Cantidad	Longitud total (m)	Longitud desperdiciada (m)	Porcentaje desperdiciado (%)
10	56	672	10.5	1.5625
12	4	48	5.6	11.667
14	30	360	102.3	28.417

Tabla 4 Porcentaje de desperdicio primera iteración

Como se puede apreciar si se suma la longitud total desperdiciada de todas las varillas se tiene 118.4 m de varilla desperdiciada y un porcentaje máximo de desperdicio del 28.42%.

La cantidad de varillas necesaria es de noventa.

4.2. Diseño optimizado

4.2.1. Segunda iteración: normalización de diámetros de varillas

Se usarán para todas las varillas longitudinales un Φ de 14 mm.

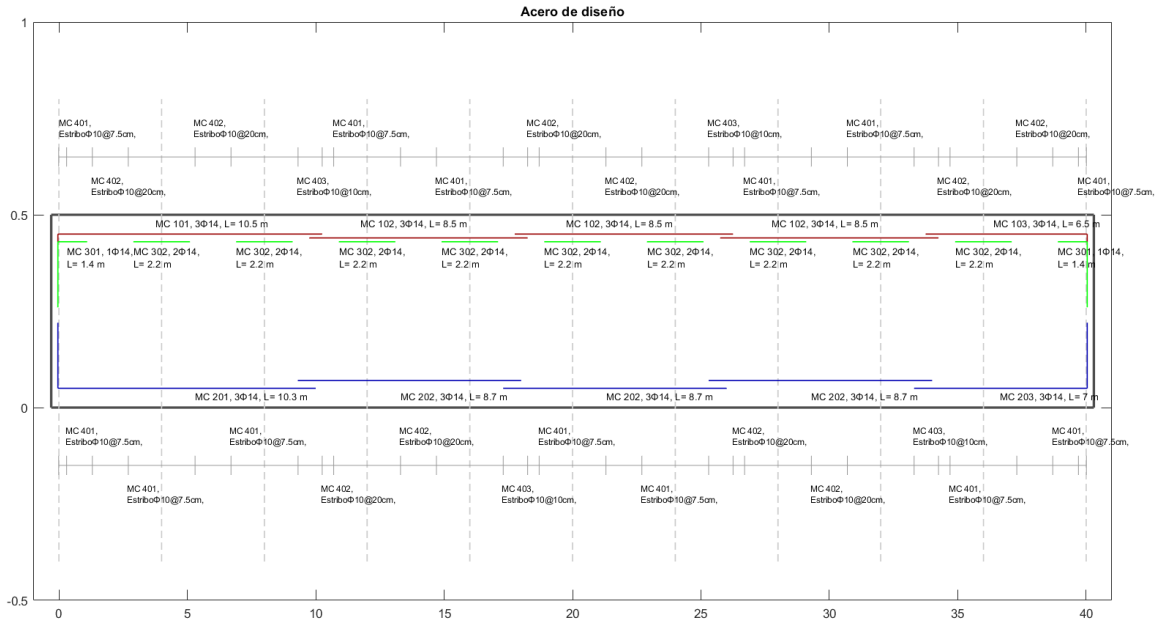


Figura 20 Diseño de la viga segunda iteración

Planilla de aceros

Mc	Tipo	NumVar	ΦVar (mm)	a (m)	b (m)	c (m)	d (m)	e (m)	f (m)	LongParc (m)	LongTotal (m)
101	L	3	14	0	10.3	0.2	0	0	0	10.5	31.5
102	I	9	14	0	8.5	0	0	0	0	8.5	76.5
103	L	3	14	0	6.3	0.2	0	0	0	6.5	19.5
201	L	3	14	0	10.05	0.2	0	0	0	10.3	30.9
202	I	9	14	0	8.7	0	0	0	0	8.7	78.3
203	L	3	14	0	6.75	0.2	0	0	0	7	21
301	L	2	14	0	1.2	0.2	0	0	0	1.4	2.8
302	I	18	14	0	2.2	0	0	0	0	2.2	39.6
401	O	349	10	0.42	0.22	0.42	0.22	0.075	0.075	1.5	523.5
402	O	53	10	0.42	0.22	0.42	0.22	0.075	0.075	1.5	79.5
403	O	39	10	0.42	0.22	0.42	0.22	0.075	0.075	1.5	58.5

Tabla 5 Planilla de aceros segunda iteración

Resumen y porcentaje de desperdicio

ΦVar (mm)	Cantidad	Longitud total (m)	Longitud desperdiciada (m)	Porcentaje desperdiciado (%)
10	56	672	10.5	1.5625
14	30	360	59.9	16.639

Tabla 6 Porcentaje de desperdicio segunda iteración

Se puede apreciar que el porcentaje máximo de desperdicio ha disminuido a 16.64% y la longitud total desperdiciada da un total de 70.4 m. La cantidad de varillas requeridas ha disminuido a ochenta y seis.

4.2.1. Tercera iteración: reducción de la longitud de corte de varilla

Se usará una longitud de corte máxima de 6 m.

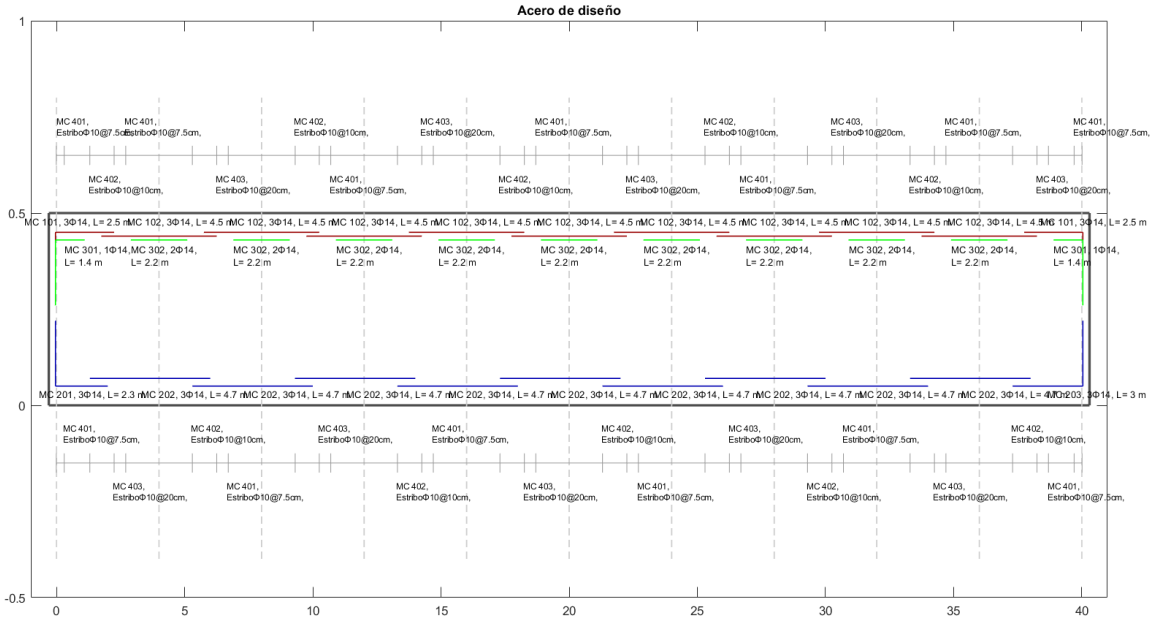


Figura 21 Diseño de la viga tercera iteración

Planilla de aceros

Mc	Tipo	NumVar	ΦVar (mm)	a (m)	b (m)	c (m)	d (m)	e (m)	f (m)	LongParc (m)	LongTotal (m)
101	L	6	14	0	2.3	0.2	0	0	0	2.5	15
102	L	27	14	0	4.5	0	0	0	0	4.5	121.5
201	L	3	14	0	2.05	0.2	0	0	0	2.3	6.9
202	I	27	14	0	4.7	0	0	0	0	4.7	126.9
203	L	3	14	0	2.75	0.2	0	0	0	3	9
301	L	2	14	0	1.2	0.2	0	0	0	1.4	2.8
302	I	18	14	0	2.2	0	0	0	0	2.2	39.6
401	O	349	10	0.42	0.22	0.42	0.22	0.075	0.075	1.5	523.5
402	O	96	10	0.42	0.22	0.42	0.22	0.075	0.075	1.5	144
403	O	24	10	0.42	0.22	0.42	0.22	0.075	0.075	1.5	36

Tabla 7 Planilla de aceros tercera iteración

Resumen y porcentaje de desperdicio

ΦVar (mm)	Cantidad	Longitud total (m)	Longitud desperdiciada (m)	Porcentaje desperdiciado (%)
10	59	708	4.5	0.63559
14	28	336	14.3	4.256

Tabla 8 Porcentaje de desperdicio tercera iteración

En este caso el porcentaje máximo de desperdicio se ha reducido aún más hasta llegar a un 4.26% y la suma de longitud desperdiciada es de 18.8 m. En cambio, se tiene que la cantidad de varillas requerida total ha aumentado en una, pero ello conlleva que se ha

reducido la cantidad de varillas de 14 mm al poder mejorar los cortes, pero se requieren más varillas de 10 mm, ya que se requieren más estribos para empalmes.

4.3. Comparación de resultados

Iteracion	Maximo Porcentaje desperdiciado (%)	Longitud desperdiciada (m)	Cantidad de varillas necesarias (Φ Maximo)	Cantidad de varillas necesarias (Total)
1	28,42	118,4	30	90
2	16,64	70,4	30	86
3	4,26	18,8	28	87

Tabla 9 Comparación de resultados

Luego de tres iteraciones acorde a la metodología de aprovechamiento de acero se obtuvo que el máximo porcentaje de desperdicio de una varilla bajo de un 28,42% a un 4,26% mostrando un uso mas completo del acero disponible. Se redujo en dos unidades la cantidad de varillas de mayor diámetro solicitado, aunque aumento en tres unidades la cantidad de varillas para estribos de empalmes.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se generó un algoritmo basado en Matlab para el diseño de vigas de hormigón reforzado a momento y corte esto se lo puede apreciar en la figura 11 en donde se muestra un plano a detalle del diseño de una viga usando dicho algoritmo
- El algoritmo permite el uso eficiente de varillas de acero mostrando en un resumen (tabla 2) el % de acero desperdiciado de cada varilla y abriendo la posibilidad a usar diferentes metodologías, como la propuesta en este texto para poder reducir dicho desperdicio (caso de la tabla 9).
- Se presentó un caso de estudio de la aplicación del algoritmo basado en Matlab, tal como se lo aprecia en la figura 19 en donde la viga esta armada de forma convencional, tratando de usar la varilla más larga posible y menor diámetro posible de varilla.

- Se comparó en 3 iteraciones el uso del algoritmo siguiendo la metodología de reducción de desperdicio de varillas de acero, comparando sus resultados de como se lo aprecia en la tabla 9.
- Aunque en el caso presentado se logró reducir el número de varillas de mayor tamaño se requirió un mayor número de varillas de menor diámetro para empalmes acorde al análisis de la tabla 8.
- Se redujo el porcentaje de desperdicio de varillas máximo en el diseño, como lo muestra la tabla 9, esto puede ser beneficioso, ya que se reduce la cantidad de varillas de mayor diámetro que representan un mayor costo que las de menor diámetro, pero si este acero sobrante se lo puede aplicar en otras estructuras entonces es mejor recurrir al armado convencional presentado en el caso inicial.

5.2. Recomendaciones

- Aunque el programa permite diseñar vigas siguiendo toda la normativa vigente tal como lo muestra la figura 11 y acorde al proceso explicado en las figuras 1, 2, 3, 4, 5 y 6; se recomienda su uso solo a nivel de prediseño, ya que el criterio del ingeniero a cargo siempre tendrá un peso mayor para el diseño final.
- Queda a criterio del usuario del algoritmo en que casos aplicar la metodología de reducción de desperdicios acorde a la figura 15 representa una mejora frente al armado inicial, teniendo en cuenta que puede llegar a usarse al acero desperdiciado en otras estructuras.

CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFÍA

ACI Committee. (2019). Building code requirements for structural concrete:(ACI 318-19) and commentary (ACI 318R-19). American Concrete Institute.

American Society of Civil Engineers. (2017). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers.

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). 2020. Encuesta Nacional de Edificaciones (ENED) 2020. Recuperado de https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-

inec/Estadisticas_Economicas/Encuesta_Edificaciones/2020/2.%202020_ENED_Principales_resultados.pdf

McCormac, J. C., & Brown, R. H. (2017). Diseño de concreto reforzado. Alpha Editorial.

Normativa Ecuatoriana de la Construcción. 2015. NEC-SE-HM: Estructuras de Hormigón Armado. https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/

Rodríguez, C. E. A., & Aguirre, I. J. O. (2022). Determinación de porcentaje de desperdicios del acero estructural de refuerzo en diversos elementos de hormigón reforzado perteneciente a la estructura de una vivienda de 2 plantas. RECIAMUC, 6(1), 25-39.