

Software educativo en Python para el análisis estructural y diseño de vigas de concreto reforzado: Una solución y herramienta didáctica para estudiantes de Ingeniería Civil.



GARZÓN OBANDO, JUAN DAVID Autor 01. 1020793527

TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR : JUAN DAVID TOLE LOZANO

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C – 2025

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	7
1.1.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	7
1.2.	JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	9
2.	OBJETIVOS	10
2.1.	OBJETIVO GENERAL	10
2.2.	OBJETIVOS ESPECIFICOS	10
3.	ANTECEDENTES - ESTADO DEL ARTE	11
4.	MARCO TEÓRICO	15
4.1.	FUNDAMENTOS ESTRUCTURALES	15
4.1.1	DIAGRAMA DE FLUJO	16
4.1.2	SISTEMA ESTRUCTURAL	17
4.1.3	CARGAS EN LAS ESTRUCTURAS	18
4.1.4	IDEALIZACIÓN ESTRUCTURAL	19
4.1.5	IDEALIZACIÓN DE LOS APOYOS	21
4.1.6	GRADO DE INDETERMINACIÓN DE LOS APOYOS	22
4.1.7	DISEÑO DE CONCRETO	23
4.1.8	PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES	24
4.1.9	CONCRETO REFORZADO	27
4.2	FUNDAMENTOS CONCRETO REFORZADO	28
4.2.1	HIPÓTESIS FUNDAMENTALES DEL DISEÑO DE CONCRETO REFORZADO	28
4.2.2	COMPORTAMIENTO ELÁSTICO, SECCIÓN NO FISURADA	29
4.2.3	COMPORTAMIENTO ELÁSTICO SECCIÓN FISURADA	32
4.2.4	COMPORTAMIENTO INELÁSTICO	33
4.2.5	FALLA POR TRACCIÓN	34
4.2.6	FALLA POR COMPRESIÓN	35
4.2.7	RESISTENCIA DE CONCRETO REFORZADO A FLEXIÓN	37
4.2.8	TEORÍA DEL DIAGRAMA EQUIVALENTE DE WHITNEY	38
4.2.9	MÉTODOS DE DISEÑO	44
4.3.	DISEÑO FLEXIÓN CON EL MÉTODO DE RESISTENCIA ÚLTIMA	51
4.3.1	REQUISITOS DE LA NORMA NSR-10	53
4.3.2	PROTECCIÓN DEL ACERO	55
4.3.3	CONTROL DE DEFLEXIONES	56

4.3.4	CRITERIOS LONGITUD DESARROLLO NSR-10	57
4.3.5	CONDICIONES PARA GARANTIZAR ADHERENCIA.....	60
4.3.6	LONGITUD DESARROLLO PARA GANCHOS A TRACCIÓN	61
4.3.7	DISEÑO A CORTANTE.....	62
4.3.8	FALLA A CORTANTE	63
4.3.9	REQUISITOS DE LA NSR-10.....	64
4.4.	RESISTENCIA A CORTANTE DEL CONCRETO	64
4.4.1	RESISTENCIA A CORTANTE DEL ACERO	65
4.4.2	LIMITES DE SEPARACIÓN.....	65
4.4.3	REFUERZO MÍNIMO.....	66
4.4.4	DISEÑAR ESTRIBOS.....	67
4.4.5	CONTROL TAMAÑO DE LA SECCIÓN	68
5.	MARCO METODOLOGICO	68
5.1.	DESARROLLO DEL SOFTWARE PILOT STRUCTURAL.....	68
5.1.2	CREACIÓN DE INTERFAZ GRAFICA DE USUARIO	70
5.1.3	CONFIGURACIÓN DE LA DE INTERFAZ GRÁFICA.....	71
5.1.4	PANEL DE VISUALIZACIÓN VENTANA PRINCIPAL.....	74
5.1.5	TOOLBARS DE HERRAMIENTAS	76
5.1.6	NOTEBOOK VISUALIZACIÓN DE DATOS.....	77
5.1.7	IMPLEMENTACIÓN DE LIBRERIAS PYTHON.....	78
5.1.8	LIMITACIONES DEL SOFTWARE PILOT STRUCTURAL	79
5.1.9	ETAPAS DE DESARROLLO DEL SOFTWARE PILOT STRUCTURAL.....	80
6.	ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA VIGA DOBLEMENTE EMPOTRADA.....	81
6.1.1	ANÁLISIS CUALITATIVO.....	82
6.1.2	ANÁLISIS CUANTITATIVO	83
6.1.3	CÁLCULOS Y EJERCICIOS DE APLICACIÓN	85
6.1.4	EJERCICIOS DE APLICACIÓN	85
6.1.5	GEOMETRÍA DE LA VIGA.....	87
6.1.6	USO DEL SOFTWARE PILOT STRUCTURAL.....	87
6.1.7	ASIGNAR CARGAS GRAVITACIONALES.....	88
6.1.8	CÁLCULO DEL PESO PROPIO DE LA VIGA.....	88
6.1.9	CÁLCULO CARGA ULTIMA DE SERVICIO	89
6.2	USO DEL SOFTWARE PILOT STRUCTURAL	90

6.2.1	ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA VIGA DOBLEMENTE EMPOTRADA	91
6.2.2	CÁLCULO DE REACCIONES.....	91
6.2.3	DIAGRAMAS DE FUERZA CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR.....	93
6.2.4	METODOLOGÍA DISEÑO A FLEXIÓN.....	94
6.2.5	CÁLCULO DE RESISTENCIA REQUERIDA.....	95
6.2.6	CÁLCULO DE CUANTIA REQUERIDA.....	97
6.2.7	CÁLCULO DE AREA DE ACERO REQUERIDO	101
6.2.8	CÁLCULO DE LA CAPACIDAD NOMINAL DE LA SECCIÓN.....	104
6.2.9	CÁLCULO DE ASIGNAR BARRAS DE REFUERZO LONGITUDINAL	109
6.3	CÁLCULO DEL ANCHO MINIMO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL.....	114
6.3.1	CÁLCULO MOMENTO DE AGRIETAMIENTO	118
6.3.2	CÁLCULO LONGITUD DE DESARROLLO	123
6.3.3	CÁLCULAR LONGITUD DE DESARROLLO BARRAS A TRACCIÓN	124
6.3.4	CÁLCULAR LONGITUD DE DESARROLLO REFUERZO COMPRESIÓN.....	130
6.3.5	CÁLCULAR LONGITUD DE DESARROLLO CON GANCHOS ESTÁNDAR.....	132
6.3.6	USO DEL SOFTWARE PILOT STRUCTURAL DESPIECE ACEROS A FLEXIÓN.....	136
6.3.7	METODOLOGÍA DISEÑO A CORTANTE	137
6.3.8	SOLICITACIONES FUERZA CORTANTE	138
6.3.9	CALCULAR CORTANTE DE DISEÑO.....	142
6.4	CALCULAR RESISTENCIA A CORTANTE DEL CONCRETO.....	146
6.4.1	CALCULAR RESISTENCIA A CORTANTE DEL ACERO.....	149
6.4.2	REQUISITO NSR-10 RESISTENCIA A CORTANTE DEL ACERO.....	151
6.4.3	CALCULAR ÁREA DE ACERO MÍNIMO	152
6.4.4	CALCULAR NUMERO DE RAMAS DEL ESTRIBO	153
6.4.5	CALCULAR RESISTENCIA DE ESTRIBOS	154
6.4.6	CALCULAR CAPACIDAD DE RESISTENCIA A CORTANTE	155
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	156
8.	CONCLUSIONES.....	159
9.	RECOMENDACIONES.....	160
9.1	REQUISITOS DEL SISTEMA PARA EJECUTAR PILOT STRUCTURAL	160
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	161
10.1	ANEXOS.....	163

Listado de ilustraciones

<i>Ilustración 1. diagrama de flujo del diseño estructural. Fuente: propia.....</i>	<i>16</i>
<i>Ilustración 2. idealización de estructuras. tomado del libro resistencia de materiales. Fuente: (cervera-ruiz and blanco-díaz 2001)</i>	<i>20</i>
<i>Ilustración 3. idealización de apoyos en una estructura. Fuente: propia</i>	<i>21</i>
<i>Ilustración 4. grado de indeterminación apoyos. Fuente: propia</i>	<i>22</i>
<i>Ilustración 5. esfuerzo vs deformación del concreto. Fuente: (botero 2019)</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 6. esfuerzo vs deformación del acero. Fuente:(solaguren-beascoa fernández 2016)</i>	<i>25</i>
<i>Ilustración 7. dimensiones nominales barras de refuerzo. Fuente: (asociación colombiana de ingeniería 2010).</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 8. comportamiento elástico sección no fisurada. Fuente: propia</i>	<i>30</i>
<i>Ilustración 9. comportamiento elástico sección fisurada. Fuente: propia</i>	<i>32</i>
<i>Ilustración 10. comportamiento inelástico de la curva de concreto y el acero. Fuente: propia.....</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 11. diagrama de esfuerzos y deformaciones de la falla a tracción. Fuente: propia</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 12. diagrama de esfuerzos y deformaciones de la falla a compresión. Fuente: propia.....</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 13. diagrama de esfuerzos y deformaciones en la etapa de resistencia ultima. Fuente: propia</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 14. curvas de capacidad de los materiales concreto y acero. Fuente: propia.....</i>	<i>39</i>
<i>Ilustración 15. curva constitutiva del acero condición balanceada. Fuente: propia</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 16. diagrama de flujo teoría de whitney. Fuente: propia.....</i>	<i>41</i>
<i>Ilustración 17. sección con comportamiento elástico fisurada . Fuente: propia</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 18. condiciones para el valor del factor de reducción ϕ . Fuente: propia.....</i>	<i>48</i>
<i>ilustración 19. ganchos estándar de 90° y 180° . Fuente: propia</i>	<i>60</i>
<i>Ilustración 20. comportamiento de esfuerzos cortantes y normales en una sección. Fuente: propia</i>	<i>62</i>
<i>Ilustración 21. interfaz gráfica de usuario del software pilot structural. Fuente: propia.....</i>	<i>70</i>
<i>Ilustración 22. diagrama de flujo etapas de desarrollo software pilot structural. Fuente: propia.....</i>	<i>80</i>
<i>Ilustración 23. viga doblemente empotrada con carga uniformemente distribuida. Fuente: propia.....</i>	<i>82</i>
<i>Ilustración 24. corte de viga doblemente empotrada . Fuente: propia.....</i>	<i>83</i>
<i>Ilustración 25. recorte del uso del software para entradas de datos de la sección transversal. Fuente: propia.....</i>	<i>87</i>
<i>Ilustración 26. recorte del uso del software para entradas de datos de asignar cargas. Fuente: propia..</i>	<i>90</i>
<i>Ilustración 27. recorte del uso del software diagramas fuerza cortante y momento flector. Fuente: propia</i>	<i>93</i>

<i>Ilustración 28. resultados de area de acero requerido obtenido por el software pilot structural. Fuente: propia.....</i>	<i>103</i>
<i>Ilustración 29. dimensiones nominales de las barras de refuerzo según la nsr-10. Fuente: nsr-10 (2010), título c, tabla c.3.5.3-2.....</i>	<i>109</i>
<i>Ilustración 30. recorte de la interfaz del software pilot structural, cálculo número de barras. Fuente: propia</i>	<i>113</i>
<i>Ilustración 31. recorte de la interfaz del software pilot structural, cálculo ancho mínimo. Fuente: propia</i>	<i>117</i>
<i>Ilustración 32. recorte de la interfaz del software pilot structural, cálculo momento de agrietamiento. Fuente: propia</i>	<i>122</i>
<i>Ilustración 33.uso del software pilot structural, optimización despiece de aceros. Fuente: propia.....</i>	<i>136</i>
<i>Ilustración 34. esquema de viga empotrada y cortante solicitado. Fuente: propia</i>	<i>143</i>

Listado de tablas

<i>Tabla 1. Propiedades Geométricas de la viga y materiales f'_c , f_y. Fuente: Propia</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 2. Solicitaciones cargas de servicio y densidad del concreto reforzado.</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 3. Parámetros y Solicitaciones internas de la viga. Fuente: Propia.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 4. Resultados de los cálculos de resistencia requerida para cada momento solicitante. Fuente: Propia</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 5. Cuantía requerida: Calculo manual vs Software Pilot Structural. Fuente: Propia.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 6. Area de acero requerido: Resumen datos calculados para cada momento solicitante. Fuente: Propia</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 7. Analisis comparativo de solicitaciones y capacidad de resistencia nominal. Fuente: Propia... ..</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 8. Area de aceros requeridos para resistir los momentos solicitados. Fuente: Propia</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 9. Resultados número de barras longitudinales. Fuente: Propia.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 10. Solicitaciones de la viga y refuerzo suministrado. Fuente: Propia.....</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 11. Análisis de longitud de desarrollo mínimo a tracción L_d. Fuente: Propia.....</i>	<i>130</i>
<i>Tabla 12. Resultados de los ganchos estándar en tracción y compresión. Fuente: Propia</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 13. Parámetros y solicitaciones de la viga, método diseño cortante. Fuente: Propia</i>	<i>137</i>
<i>Tabla 14.Valores de la cortante para diferentes posiciones a lo largo de la viga. Fuente: Propia.....</i>	<i>140</i>

1. INTRODUCCIÓN

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La propuesta aborda la necesidad de mejorar la enseñanza mediante un software educativo en el análisis estructural y diseño de vigas de concreto reforzado, desarrollado en base a los principios de programación orientada a objetos y el lenguaje de programación Python, se busca optimizar el proceso de aprendizaje de los estudiantes, ofreciendo una herramienta didáctica que permita comprender los conceptos de análisis estructural y diseño de vigas de concreto reforzado de manera didáctica. En esta iniciativa del problema quiero presentar la idea como se puede tomar las herramientas tecnológicas y aplicarlas en la educación, específicamente en la Ingeniería Civil, actualmente la integración de estas herramientas tecnológicas representa una oportunidad para mejorar las capacidades cognitivas y desarrollo del proceso de aprendizaje de los estudiantes. Hay una nueva tendencia en la Ingeniería Civil que está tomando rumbo y se trata de la implementación de herramientas tecnológicas, haciendo uso del lenguaje de programación Python, esta tendencia ha ganado fuerza en la Ingeniería Civil, especialmente en el tema de diseño de estructuras, algunos ingenieros han optado por aplicar la programación Python para optimizar procesos de cálculo y mejorar la precisión de los diseños.(Velasquí López et al. 2021)

¿Cómo desarrollar un software educativo en Python que integre el análisis estructural y el diseño de vigas de concreto reforzado de manera comprensible e interactiva, proporcionando una herramienta didáctica que facilite el aprendizaje de los estudiantes de Ingeniería Civil?

Para dar respuesta esta pregunta del problema, es fundamental tener en cuenta varios aspectos para el desarrollo del software, hay que iniciar desde lo más conceptual utilizando las herramientas que se conocen como GUI y OPP , la herramienta GUI nos aporta para la creación de interfaces graficas de usuario a través de elementos visuales como widgets , ventanas, botones, slider, label,

labelframe, frame, combobox, entry, treeview ,canvas, radiobutton, checkbutton, scrollbar, spinbox , text , optionmenu, scale, progressbar, notebook, estos elementos widgets permiten interactuar con el desarrollo del software, y la programación orientada a objetos se complementa con la herramienta GUI , esta herramienta OPP nos aporta a poner la estructura del código más modular y a crear funciones específicas.(Shipman 2013)

El lenguaje Python está entrando a una nueva tendencia en la actualidad en la Ingeniería Civil, porque es un lenguaje que contiene una sintaxis intuitiva y sencilla también ofrece una amplia variedad de librerías de ingeniería, algunas de las librerías que son útiles, por ejemplo. Numpy está librería realiza cálculos avanzados y también aplica para el análisis estructural. Matplotlib está librería permite crear gráficos dinámicos en 2D y 3D muy útil para visualizar gráficos de los diagramas de fuerza cortante y momento flector, también para crear superficies 3D como vigas, columnas, muros, pórticos.

Para proporcionar una herramienta didáctica que facilite el aprendizaje de los estudiantes, debe ser una interfaz gráfica clara y comprensible , también intuitivo para garantizar que los estudiantes puedan interactuar con el programa sin problemas, este software se basara en los temas conceptuales vistos en los cursos de la rama de estructuras de ingeniería civil también se tiene en cuenta los requisitos de la norma NSR10, una de sus partes principales del programa será su enfoque visual, con gráficos interactivos que harán que la experiencia del usuario sea más agradable.(González et al. 2024)

1.2. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Se propone desarrollar un programa educativo en lenguaje Python, para el análisis estructural y diseño de vigas de concreto reforzado la intención es que se fortalezca la enseñanza de los estudiantes de Ingeniería Civil y promover el uso de estas herramientas tecnológicas en la educación, los estudiantes podrán interactuar con una herramienta accesible que les permita aplicar los conceptos teóricos de manera práctica y visual, facilitando la comprensión de los temas de análisis de cargas, cálculo de reacciones en los apoyos, cálculo de los diagramas fuerza cortante y momento flector, dimensionar sección transversal de las vigas, y los requisitos de diseño a flexión y diseño cortante. Este programa servirá como una herramienta didáctica innovadora para reforzar el aprendizaje de los estudiantes también la idea es promover estas herramientas tecnológicas en el proceso educativo, conforme va pasando el tiempo es fundamental que los estudiantes se adapten a los avances de la tecnología, ayudándoles a estar actualizados con las nuevas herramientas que están cambiando la práctica profesional. Hay que aclarar que los temas abordados en el desarrollo del software Pilot Structural se basan en las metodologías de los docentes y también por el entendimiento de mi experiencia en la rama de estructuras de la ingeniería civil, el programa será inicialmente aplicable a casos académicos específicos, pero puede mejorar para abordar análisis y diseños más complejos, entre las limitaciones es un programa que se orienta al análisis estructural y diseño de vigas de concreto reforzado para hacer el cálculo de una viga de una única luz y no de un sistema indeterminado de vigas continuas. Se tuvo en cuenta información de diversos autores, principalmente el libro de “Diseño de Concreto Reforzado” del autor el Ingeniero Jack C. McCormac y no olvidar también los requisitos mínimos del reglamento colombiano, la norma sismo resistente NSR-10.(Real Perez, Leyva Carreras, and Gonzalez Gonzalez 2018)

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un software educativo en Python que permita profundizar los temas conceptuales vistos en los cursos de la rama de estructuras como el análisis estructural y diseño de vigas de concreto reforzado, facilitando el aprendizaje a los estudiantes de ingeniería civil y promoviendo el uso de herramientas tecnológicas en la formación académica.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar los conceptos clave de análisis estructural y diseño de vigas en concreto reforzado que deben ser integrados en el programa.
- Desarrollar una interfaz gráfica de usuario intuitiva y didáctica usando la librería Tkinter, cuyo código será escrito en un entorno de desarrollo integrado [IDE], como Visual Studio Code.
- Implementar algoritmos en Python para el cálculo estructural y Diseño conforme a los requisitos de la NSR-10 usando las herramientas GUI y OPP con la capacidad de mostrar gráficos dinámicos interactivos.

3. ANTECEDENTES - ESTADO DEL ARTE

“Kai-Sad software educativo para el análisis y asignación de aceros a compresión, tensión y cortante en vigas rectangulares de concreto reforzado”

En este presente trabajo de tesis titulado Kai-Sad software educativo para el análisis y asignación de aceros a compresión, tensión y cortante en vigas rectangulares de concreto reforzado, se presenta el desarrollo de un programa que utiliza el método de Hardy Cross y los momentos de empotramiento perfecto para el análisis estructural y cálculo de vigas indeterminadas de más de una luz , menciona que este programa está diseñado para ayudar a los estudiantes en la asignación de refuerzo a compresión y tensión y cortante, este es un software escrito en lenguaje C#, también incluye funcionalidades para generar gráficos de cortante y momento flector. Sin embargo al revisar la metodología utilizada , surgen algunas inquietudes con respecto a la claridad y precisión con la que se definen ciertos conceptos y ecuaciones relacionadas con la norma NSR-10, hay dudas de como calculan los cuantías requeridas y como se alinea las ecuaciones propuestas con los requisitos de diseño flexión y cortante, aunque el programa muestra resultados, gráficos, esto no parece tener una base sólida en los cálculos de flexión y cortante en los ejemplos que realizan, aunque la tesis menciona el cumplimiento de la NSR-10 no queda claro cómo se definen algunos conceptos del diseño de vigas de concreto reforzado(Monroy Ardila and Beltrán Bonilla 2019).

“Software para el análisis y diseño de escaleras en concreto reforzado en forma de I,L y U, utilizando el lenguaje de programación Java”

Aunque el enfoque de este trabajo de tesis está centrado en el diseño de escaleras de concreto reforzado, se encuentra en la línea de investigación similar al diseño de vigas de concreto reforzado, ambos enfoques comparten el mismo objetivo de desarrollar herramientas educativas que faciliten el aprendizaje de los estudiantes, la diferencia radica en los elementos estructurales

que cada uno aborda y también en el lenguaje de código para este programa usaron Java, además el lenguaje Python tiene una sintaxis más adecuada a los estudiantes de ingeniería civil en su proceso de aprendizaje y facilita la integración de librerías más interactivas de ingeniería(Bustos Ruiz and Velásquez Blanco 2019).

“Desarrollo de un Aplicativo Web Didáctico sobre el diseño de Pórticos de Concreto según el Reglamento NSR-10”

Este trabajo de tesis tiene un enfoque similar se centra en realizar un prediseño de elementos estructurales que tiene en conjunto un sistema de pórtico, como las vigas y columnas me parece interesante como inicia este programa web haciendo una revisión de la secciones transversales de estos elementos para vigas y columnas, no muestra en detalle como asigna cargas o visualizar los gráficos de cortante y momento pero me parece que usa una correcta metodología para hacer los prediseños a flexión y cortante alineados a la norma NSR-10, este trabajo utiliza tecnologías web como JavaScript ,HTML, CSS, sin embargo uno de las partes que no aborda este trabajo es la asignación y análisis de cargas y visualización de gráficos dinámicos que son partes esenciales para un análisis más completo, en si este trabajo es un programa web que se centra más al prediseño , igual mantiene una buena metodología alineada con la norma NSR-10 para los cálculos de diseño a flexión y cortante(Ruales, Puenayan, and Maya 2023).

“Software Educativo para el Análisis y Diseño de Elementos de Concreto Reforzado-Edición Única”

En este presente trabajo me parece muy interesante por la metodología rigurosa que utiliza para abordar el análisis de vigas indeterminadas y el diseño de vigas y columnas de concreto reforzado, una de las características que tiene este programa es su capacidad de calcular vigas indeterminadas

y aplicando el diseño flexión y cortante con secciones transversales de tipo T, L , Cajón , triangulares, lo cual es muy interesante porque este es un programa que no se basa solamente en secciones transversales estandarizadas, este software realiza un plano de despiece de aceros longitudinal y transversal , también genera un gráfico de momento vs curvatura esto ya es una funcionalidad más especializada que entrega el programa como es el comportamiento de los materiales bajo las cargas aplicadas , este programa fue desarrollado en Visual Basic 5.0, otro dato interesante la elección del método para calcular las vigas indeterminadas fue por el método de análisis matricial , este software se alinea con la normativa ACI -318-95, En sí este software cubre un amplio contenido de temas, pero tiene en común facilitar el aprendizaje de los estudiantes para entender los conceptos de diseño estructural(López Salgado 2000).

“Software para diseño de vigas a peraltadas de concreto reforzado aplicando el modelo puntal-tensor según, ACI 318-14.”

En este presente trabajo muestra un análisis de las vigas de concreto reforzado con secciones transversales discontinuas longitudinalmente este enfoque resulta muy interesante por que aborda diversos tipos de fallas que pueden ocurrir en las vigas a peraltadas y este programa realiza un análisis detallado de su comportamiento bajo condiciones de carga el enfoque normativo del programa se basa en el ACI 328-14, el código que se desarrollo fue Visual Basic(Gutiérrez Aldana, Moreno Guevara, and Sevilla Rugama 2019).

“Desarrollo de software para el diseño de vigas, columnas, uniones viga-columna, muros de cortes y vigas de acople de concreto reforzado en base al ACI 318-14”

En este trabajo de tesis se enfocan en el desarrollo de un software para el diseño de varios elementos estructurales de concreto reforzado, como vigas, columnas, muros, uniones viga-columna, muros de corte y vigas de acople con base al ACI 318-14 se menciona que el software

es autodidáctico, su enfoque principal es el diseño sísmico en esta tesis no menciona específicamente el código o lenguaje de programación usado para el desarrollo del software(González Rodríguez and López Barraza 2018).

“Software educativo para el diseño de vigas isostáticas de concreto presforzado, usando programación en Visual Basic”

En este trabajo presentan el desarrollo de un software educativo para el diseño de vigas isostáticas de concreto presforzado utilizando Visual Basic como lenguaje de programación, la funcionalidad de este programa el cálculo de esfuerzos. esfuerzos cortantes y momentos resistentes de vigas, este programa está orientado a escoger varias configuraciones de secciones transversales y diferentes tipos de apoyos(Possos Pedroza and Alba Mendoza 2014).

“Software para diseño de vigas de hormigón armado en pórticos especiales resistentes a momentos”

En el presente trabajo de tesis es desarrollar un software para el diseño de vigas de hormigón armado en pórticos especiales resistentes a momentos utilizando Matlab, en este trabajo menciona que se combina la capacidad de análisis de SAP 2000 con la programación en Matlab, también permite la visualización de gráficos de la demanda y capacidad de las vigas y también implementa análisis sísmico el programa, el detalle es que Matlab es más un entorno de desarrollo integrado cerrado por que tiene licencia y por eso limita las herramientas para crear interfaces graficas de usuario(Anon n.d.-e).

4. MARCO TEÓRICO

4.1. FUNDAMENTOS ESTRUCTURALES

En este capítulo se presenta los fundamentos conceptuales de la rama de estructuras , los cuales son temas relevantes para el análisis y diseño estructural y cómo se comporta las estructuras bajo los efectos de las cargas gravitacionales y la influencia de las propiedades mecánicas de los materiales y de qué manera aporta la resistencia de los materiales en los elementos estructurales. El diseño estructural no solo consta de física y matemática también hace falta el criterio y el sentido común del Ingeniero para saber cuál va a ser el sistema estructural , que tipo de conexiones , que materiales se va a utilizar para poder producir una estructura segura, funcional y económica, el Ingeniero debe estar en coordinación a otras especialidades como en la arquitectura en los costos y presupuestos , el estudio de suelos , el manejo de aguas , instalaciones entre otras. Las funciones de las estructuras dependen de muchos factores , de resistir cargas , transmitir cargas, cerrar o delimitar espacios , proteger espacios etc. Antes de llegar a un cálculo el diseño estructural tiene un flujo de trabajo se inicia con un planeamiento de la arquitectura , hacer una correcta estructuración o pre dimensionamiento de los elementos estructurales , posteriormente pasamos al análisis de cargas y se define cuáles van a ser las solicitaciones o las cargas actuantes que van incidir en la estructura , ya teniendo esto pasamos al análisis estructural se hace verificaciones si el modelo matemático cumple por ejemplo con las derivas si están dentro del límite establecido por la norma es importante hacer el análisis estructural porque nos entrega las fuerzas internas los momentos , deformaciones , reacciones de los apoyos luego todo la información que se obtiene del análisis estructural lo vamos a utilizar en la etapa de diseño y evaluación de elementos estructurales.

4.1.1 DIAGRAMA DE FLUJO

Se presenta el diagrama de flujo por etapas del diseño estructural , el flujo no es lineal si no cíclico hasta lograr una estructura segura y optimizada.

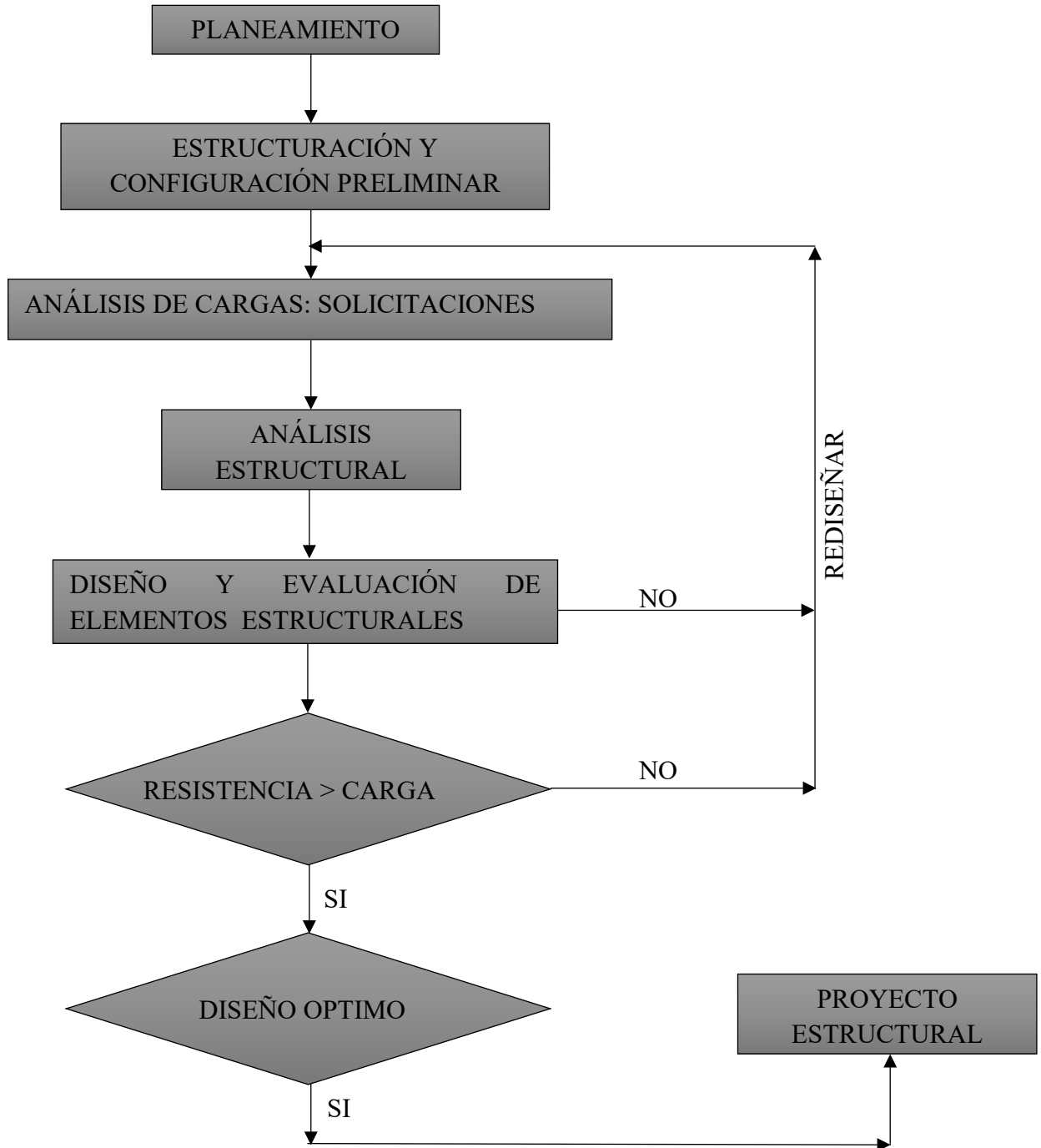


Ilustración 1. Diagrama de flujo del diseño estructural. Fuente: Propia

4.1.2 SISTEMA ESTRUCTURAL

Un sistema estructural está compuesto de elementos estructurales que trabajan conjuntamente para resistir y transmitir cargas, los sistemas estructurales pueden estar compuestos de diferentes materiales , un sistema estructural se define teniendo en cuenta principalmente los materiales , la disposición de los elementos estructurales y también el comportamiento de la estructura. Según la norma NSR-10 de diseño sismo resistente colombiano tiene definido 4 sistemas estructurales, para las estructuras de concreto , tenemos sistemas a porticados, sistemas de muros estructurales , sistemas de duales y sistemas combinados. En el sistema de pórticos son los marcos estructurales de columnas y vigas que son los que soportan las solicitaciones, en el sistema de muros estructurales vamos a tener los elementos muros de cargas y mampostería, en el sistema dual y combinado vamos a tener pórticos y muros de carga pero en qué se diferencia estos dos sistemas , en el sistema combinado se tiene que las cargas verticales son resistidas por un pórtico no resistente a momentos y las fuerzas horizontales son resistidas por muros estructurales a diferencia del sistema dual , este sistema estructural que tiene un pórtico espacial resistente a momentos combinado con muros estructurales debe ser capaz de soportar cargas verticales.(Asociación Colombiana de Ingeniería 2010) . Un sistema a porticado es muy conveniente para aprovechar el espacio en planta, cuando se tiene una distribución arquitectónica diferente en cada nivel. Los muros estructurales tienen como elemento estructural principal los muros de carga de concreto reforzado en ambas direcciones, este sistema es conveniente para controlar los desplazamientos laterales ante sismos o vientos, además de los muros soportan más carga que las columnas, así que se pueden construir edificios más altos. En el sistema dual y combinado ambos sistemas colaboran resistiendo un porcentaje de la fuerza cortante basal

4.1.3 CARGAS EN LAS ESTRUCTURAS

Las cargas en las estructuras es un tema de mucha importancia , porque son fundamentales para definir las dimensiones de los elementos estructurales , en la realidad las estructuras están expuestas a diferentes tipos de cargas es sumamente importante identificar cuales actuarán en la estructura y como la podemos idealizar , las cargas también tienen una relación directa con las dimensiones de los elementos estructurales, estas cargas pueden ser estáticas , dinámicas y otros tipos de cargas. Los tipos de cargas que podemos tener en las estructuras son las cargas estáticas como es la carga muerta y la carga viva , en las cargas muertas tenemos las cargas permanentes, el peso propio de la estructura, objetos no estructurales, en las cargas vivas vamos a tener por ejemplo cargas móviles , cargas de ocupación , cargas variables, tenemos también las cargas dinámicas , por ejemplo cargas de viento, cargas por sismo, cargas causadas por la maquinaria, cargas accidentales, otros tipos de cargas que pueden existir en las edificaciones por ejemplo asentamiento de los apoyos , cargas de nieve, deslizamiento del suelo, presiones de agua, las contracciones por secado del concreto.(Asociación Colombiana de Ingeniería 2010). Para el desarrollo del software Pilot Structural se basará en el análisis de las cargas gravitacionales y cálculo de vigas de una única luz y no en el análisis de sistemas indeterminado de vigas continuas, lo que simplifica el proceso del análisis estructural para estos elementos estáticamente determinados y sin abordar sistemas más complejos que requieran un análisis de indeterminación para el cálculo de estos elementos que tienen más de una luz o apoyos continuos. Entonces para este análisis el programa Pilot Structural se va a enfocar en el cálculo de vigas isostáticas.

4.1.4 IDEALIZACIÓN ESTRUCTURAL

La idealización estructural, es todo lo que podemos ver a nuestro alrededor y se compone de una estructura incluyéndonos a nosotros los humanos también somos una estructura, pero el problema sería en cómo podemos analizar una estructura compleja, en los cursos vistos de la rama de estructuras como en estática, resistencia de materiales etc. Se pudo idealizar una viga simplemente apoyada que es un tipo de estructura isostática y si vamos a suponer que tiene una longitud y una carga distribuida, entonces por cada metro lineal de la viga la carga se expresa de forma distribuida, podemos hallar el momento máximo y fuerza cortante, pero en realidad se entiende que estos elementos estructurales son tridimensionales pero para facilitar el cálculo se hace una idealización con modelos matemáticos más simples para que el análisis estructural sea menos complejo. La ingeniería civil no se trata de buscar una precisión absurda, la ingeniería se trata de ser más prácticos y buscar modelos matemáticos más simples que nos den resultados muy precisos al comportamiento de la estructura real, el comportamiento estructural es muy incierto si bien es cierto en las obras de construcción nos podemos dar cuenta que una columna cuando se construya no va a tener exactamente la misma resistencia que las demás columnas. Entonces la idealización nos permite hacer el trabajo más rápido, más simple y con una precisión bastante cercana a la que podría ser el comportamiento real de una estructura.(Cervera-Ruiz and Blanco-Díaz 2001)

Las tres características más importantes de una estructura es que sea segura, funcional, económica, para llegar a un diseño estructural óptimo se debe representar la estructura y todas las condiciones a la que está expuesta la estructura para eso tenemos que hacer una idealización, por ejemplo su geometría, los materiales, su comportamiento mecánico, la idealización de las conexiones internas,

también la idealización de las condiciones de apoyos de las estructuras, las solicitaciones o cargas las que está expuesta la estructura.

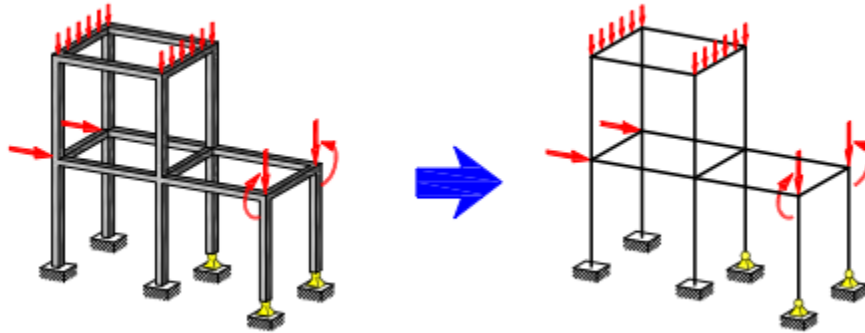


Ilustración 2. Idealización de estructuras. Tomado del libro Resistencia de Materiales. Fuente: (Cervera-Ruiz and Blanco-Díaz 2001)

La idealización como se muestra en la imagen 1. Se observan dos modelos de una misma estructura, este proceso de idealización es clave en el análisis estructural porque permite hacer el modelo más simplificado de las dimensiones y formas de la estructura real para lo cual se debe discretizar el sistema estructural, cada elemento de la estructura sea viga o columna debe estar conectado por nodos. La discretización es la idealización de un elemento estructural en partes más pequeñas o en elementos lineales, las estructuras se pueden idealizar de diversas maneras, ya sea por elementos lineales o también por elementos finitos entonces la idealización va a depender de cómo se va a construir en la realidad.

4.1.5 IDEALIZACIÓN DE LOS APOYOS

Principalmente el software Pilot Structural , hace el análisis estructural para calcular vigas que tienen un comportamiento isostático y no para un sistema estructuras con un comportamiento hiperestático o elementos que tienen un equilibrio indeterminado, por lo tanto, el software se va a centrar en la idealización de vínculos para el tipo de apoyos empotrados , simples y fijos. En general hay formas de idealizar las estructuras y va a depender de como la estructura o el modelo matemático se va a configurar que tipo de apoyo o vinculo necesita el sistema estructural, entonces consiste en la idealización de las conexiones y los apoyos de una estructura , según el tipo de vínculos , tendremos el número de reacciones ya sea en conexiones o en apoyos.

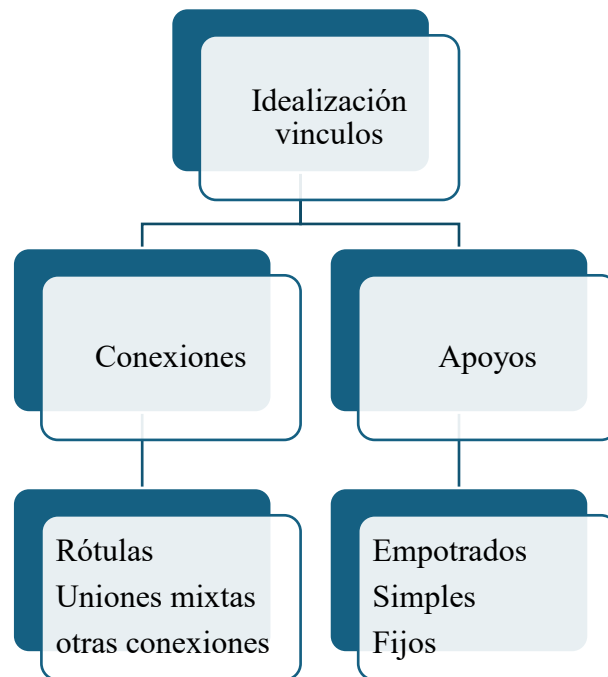


Ilustración 3. Idealización de apoyos en una estructura. Fuente: Propia

4.1.6 GRADO DE INDETERMINACIÓN DE LOS APOYOS

Para calcular el grado de indeterminación de los apoyos de una estructura lo podemos tener de la siguiente forma, con el método clásico que nos dice que el grado de indeterminación es igual al grado de indeterminación externo que va a depender del número de incógnitas externas menos el número de ecuaciones de equilibrio y de las ecuaciones externas que uno puede aplicar más el grado de indeterminación interno. McCormac, J., & Elling, R. E. (1983). Análisis de estructuras: Métodos clásico y matricial (4ª ed.).

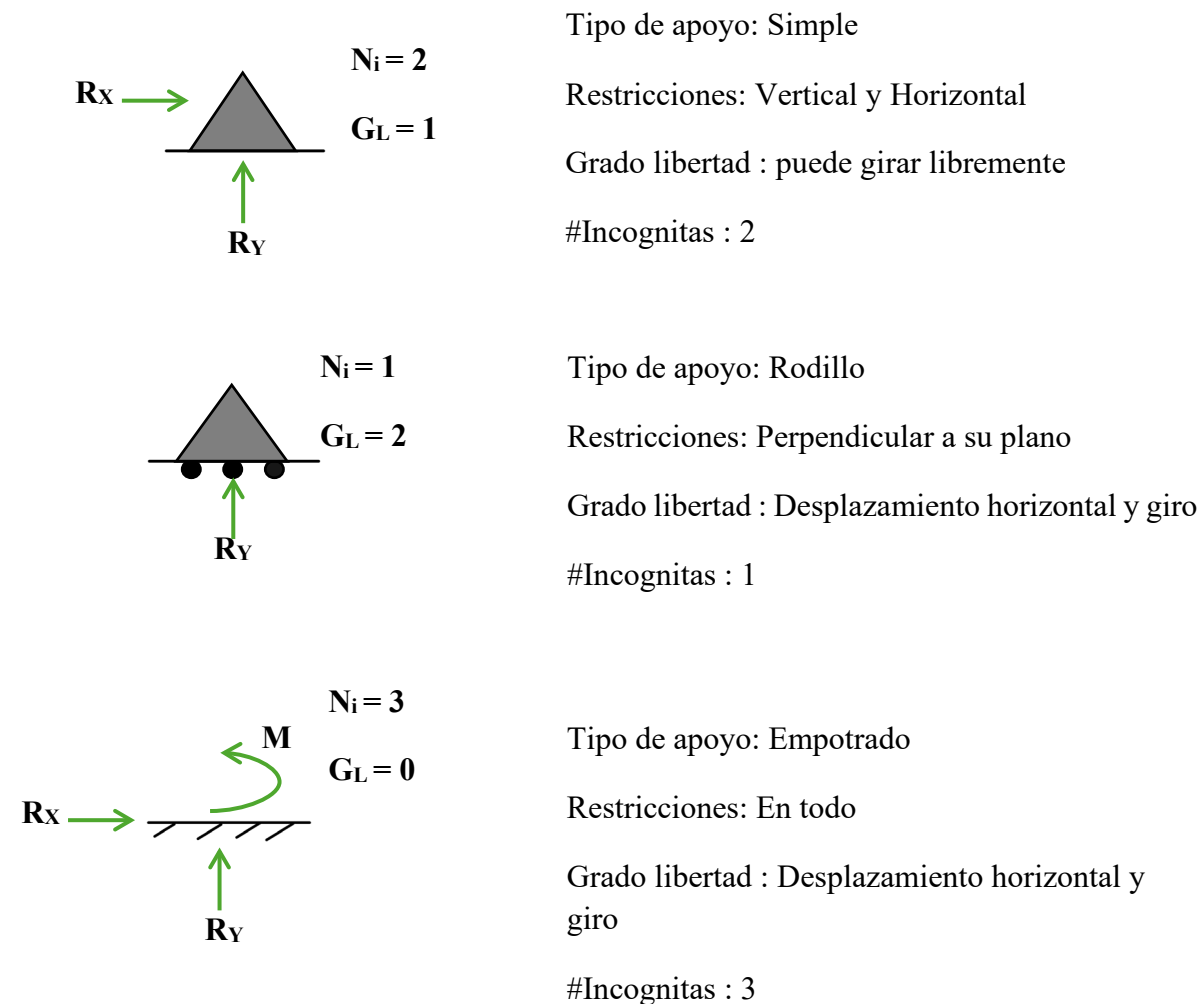


Ilustración 4. Grado de indeterminación apoyos. Fuente: Propia

4.1.7 DISEÑO DE CONCRETO

El diseño estructural es una rama de la ingeniería civil que combina los principios de la física y la matemática, además del criterio y sentido común del ingeniero, para producir estructuras seguras, funcionales, económicas. En el caso del concreto este material es muy común en las obras de construcción es un material que está constituido por cemento, agua y agregados para conseguir el diseño del concreto es necesario la mezcla de estos materiales para obtener una resistencia del concreto, este material trabaja muy bien a esfuerzos a compresión pero cuando está sometido a esfuerzos de tensión el concreto tiene una baja resistencia, por lo tanto se necesita el material del acero reforzado para la resistencia a esfuerzos de tensión, ahora bien el material del concreto es complemento del acero reforzado, combinando estos materiales tenemos el concreto reforzado para diseñar los elementos estructurales y que cada material cumpla su función en la estructura y entregue un aporte de resistencia a la compresión y a la tensión. En Colombia tenemos grados de resistencia a la compresión del concreto que su unidad de esfuerzo se mide en Mpa o kg/cm^2 los valores típicos en Colombia según la NSR-10. Tenemos concretos que se clasifican por su baja, media y alta resistencia, los concretos más utilizados presentan una resistencia que varía desde 21 Mpa hasta 50 Mpa. (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica 2010), hay que aclarar que para el desarrollo del software Pilot Structural, el programa le muestra al usuario una lista de opciones para escoger diferentes resistencias del concreto y también para escoger el material de la resistencia del acero, el programa ya tiene definido una resistencia específica para el acero, es un acero de resistencia alta que se va tomar en cuenta para cada función específica y los cálculos que el programa ejecuta respecto al valor de la variable f_y de 420 Mpa.

4.1.8 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

Los materiales como el concreto y el acero, presentan comportamientos físicos bajo las cargas, los cuales son fundamentales para su aplicación en el análisis y diseño estructural. En la gráfica de la curva de esfuerzos y deformaciones podemos observar el comportamiento de estos materiales como su resistencia, la elasticidad, y la ductilidad como se observa a continuación en la imagen.

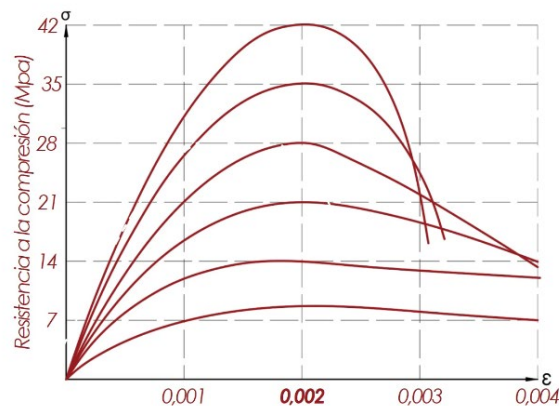


Ilustración 5. Esfuerzo vs Deformación Del Concreto. Fuente: (Botero 2019)

En esta imagen podemos observar que a mayor resistencia a la compresión del concreto es menor la deformación unitaria, ahora para concretos de resistencia baja, podemos ver que tiene un comportamiento de la curva es un poco menos pronunciada se podría decir que tiene un poco de plasticidad, pero los concretos con resistencias altas, tienen una curva más pronunciada, una zona elástica bastante bien definida, no tienen una zona plástica constante, si no que llegan al punto de máxima resistencia y colapsan por eso es que son concretos más rígidos y tienen mayor resistencia. (De Sucre 2024.)

Se entiende que el esfuerzo es igual a fuerza sobre el area y que la deformación es lo que va cediendo el material , el rango en el cual todo material no debe exceder es en el rango elástico, ya que, en ese punto de elasticidad , el material se puede deformar y volver a su forma de estado inicial. Pero cuando pasa del rango elástico al estado plástico los materiales ya tienen un comportamiento diferente , los efectos de plasticidad pueden debilitar más a las estructuras hasta llegar al colapso.

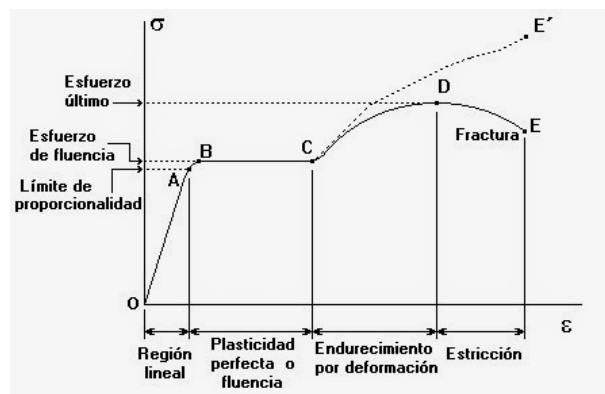


Ilustración 6. Esfuerzo vs Deformación Del Acero. Fuente: (Solaguren-Beascoa Fernández 2016)

Como el concreto es muy rígido la falla suele ser frágil a diferencia del acero que la falla es dúctil, en esta imagen del esfuerzo y la deformación del acero podemos ver cómo es su comportamiento, vamos a tener una región lineal elástica , luego una región de plasticidad constante después de pasar el punto elástico y plástico , llegamos al rango de endurecimiento hasta llegar al esfuerzo ultimo y finalmente la fractura. Ahora bien, el programa Pilot Structural dentro sus funcionalidades ya tiene incluido las resistencias de los materiales del concreto y del acero y también tiene definido las propiedades mecánicas para cada resistencia.

El material del concreto tiene un buen comportamiento cuando se adhiere con el acero, porque el acero o las barras de refuerzo a lo largo del material tiene corrugaciones y esta característica de la corrugación genera una mayor resistencia, si las barras de acero fueran absolutamente lisas esa

adherencia se vería muy entorpecida. Como parte del estudio de investigación el software Pilot Structural toma en cuenta las dimensiones nominales de las barras de refuerzo, con diámetros basados en octavos de pulgada según los requisitos de la norma NSR-10 en el capítulo C. Se entiende que el módulo de elasticidad del acero generalmente es de 200.000 Mpa , el valor de la resistencia del acero más común que utilizan en las obras es de 420 Mpa a continuación tenemos una tabla de las dimensiones nominales de las barras de refuerzo.

TABLA C.3.5.3-2
DIMENSIONES NOMINALES DE LAS BARRAS DE REFUERZO
(Diámetros basados en octavos de pulgada)

Designación de la barra (véase la nota)	Diámetro de referencia en pulgadas	DIMENSIONES NOMINALES			Masa kg/m
		Diámetro mm	Area mm²	Perímetro mm	
No. 2	1/4"	6.4	32	20.0	0.250
No. 3	3/8"	9.5	71	30.0	0.560
No. 4	1/2"	12.7	129	40.0	0.994
No. 5	5/8"	15.9	199	50.0	1.552
No. 6	3/4"	19.1	284	60.0	2.235
No. 7	7/8"	22.2	387	70.0	3.042
No. 8	1"	25.4	510	80.0	3.973
No. 9	1-1/8"	28.7	645	90.0	5.060
No. 10	1-1/4"	32.3	819	101.3	6.404
No. 11	1-3/8"	35.8	1006	112.5	7.907
No. 14	1-3/4"	43.0	1452	135.1	11.380
No. 18	2-1/4"	57.3	2581	180.1	20.240

Nota: El No. de la barra indica el número de octavos de pulgada del diámetro de referencia

Ilustración 7. Dimensiones nominales barras de refuerzo. Fuente: (Asociación Colombiana de Ingeniería 2010).

En Colombia , las barras de refuerzo generalmente se encuentran en longitudes estándar de 6 m a 9 m, según sea los requerimientos del proyecto, la selección de estas barras depende el uso de la estructura y la optimización de los empalmes para reducir desperdicios.

4.1.9 CONCRETO REFORZADO

Diseñar una estructura de concreto simple no resultaría viable si hay flexión y si en unas zonas hay tracción, por otro lado, trabajar con acero de refuerzo este material que trabaja tanto a compresión como a tracción, tiene un mayor módulo de elasticidad y resistencia entonces la idea es buscar un equilibrio en el diseño de las estructuras de concreto reforzado que sea segura, funcional y económica. Si idealizamos una viga que está sometida a efectos de tracción, esta viga va a presentar una curvatura y tenemos en la parte inferior la tensión y la compresión en la parte superior, por tal motivo hay zonas donde el concreto es débil y es en la parte inferior donde la sección va estar trabajando a tracción, entendemos que el concreto reforzado es la unión de concreto simple y del acero reforzado, se entiende que el concreto simple aporta a la resistencia a los esfuerzos de compresión y protege el acero de refuerzo ante efectos de corrosión y el acero de refuerzo se complementa con el concreto, primero va aportar resistencia a la tensión que no tiene el concreto y también aporta con más ductilidad con el confinamiento del concreto esa es la ventaja que tiene cada uno de los materiales del concreto y el acero. El diseño de secciones de concreto reforzado se fundamenta en la eficiente combinación de ambos materiales, la durabilidad que tiene el concreto para efectos corrosivos le aporta protegiendo al acero de refuerzo. Tenemos también una correcta adherencia entre ambos materiales, esa adherencia está dada por la rugosidad del concreto por las corrugaciones del acero de refuerzo.

4.2 FUNDAMENTOS CONCRETO REFORZADO

4.2.1 HIPÓTESIS FUNDAMENTALES DEL DISEÑO DE CONCRETO REFORZADO

La primera hipótesis es un fundamento visto en la rama de estructuras que trata sobre el equilibrio de las fuerzas externas, tenemos las condiciones de equilibrio que son la sumatoria de fuerzas internas es igual a la sumatoria de fuerzas externas, que haciendo un análisis del comportamiento de una viga como trabaja bajo a las cargas externas y de su propio peso, podemos ver que su sección transversal mantiene su eje neutro, que está dividido por dos zonas que trabajan a compresión y tensión, esto genera una combinación de esfuerzos, este par de fuerzas se produce un momento interno, ese momento interno tiene que ser igual a lo que la estructura solicita, cuando tenemos una viga sometida a una carga externa, entonces esa carga genera en la viga un diagrama de momentos de modo que obtenemos el momento debido a las cargas, así que como máximo se debe garantizar que el momento interno, como el momento externo deben ser iguales o lo que resiste la sección transversal que sería el momento interno generado por el par de fuerzas de compresión y tensión debe ser mayor que lo externo que es lo requiere la estructura. El segundo principio es de adherencia este principio básicamente se tiene que garantizar en las fibras donde el acero de refuerzo se une con el concreto reforzado, la adherencia en las estructuras de concreto es algo que debemos garantizar siempre, porque si perdemos adherencia no tendríamos un diseño seguro ni eficiente, la adherencia también garantiza que la deformación en el concreto a nivel del acero es igual a la deformación en el acero, así como se determina los esfuerzos de compresión y tensión por comportamiento lineal y elástico las deformaciones son proporcionales a los esfuerzos, entonces las deformaciones también son lineales con respecto al eje neutro, si se garantiza una perfecta adherencia tenemos que la deformación a nivel del acero es igual a la deformación del acero. (Jiménez González, Aceituno, and Suarez 2020)

4.2.2 COMPORTAMIENTO ELÁSTICO, SECCIÓN NO FISURADA

El comportamiento elástico va a estar garantizado por que ninguno de los materiales del concreto y acero puede superar el límite elástico , si el comportamiento de los materiales supera el rango elástico diríamos que está en el rango inelástico, en una sección transversal de una viga, la zona que está por debajo del eje neutro está sometido a tracción y el concreto que está arriba del eje neutro está sometido a compresión. La sección no fisurada o agrietada va a estar asociada en que el esfuerzo en el concreto sometido a tracción sea menor que el módulo de rotura , según los requisitos de la NSR-10 el módulo de rotura es igual a la siguiente expresión.

- **MODULO DE ROTURA:** $f_r = 0.62 \gamma \sqrt{f'_c}$

Este es el módulo de rotura con el que se va a definir si la sección transversal se ha fisurado y las condiciones que garantiza el comportamiento elástico de la sección no fisurada.

- **LIMITE ELÁSTICO DEL CONCRETO:** $f_{c_c} = 0.45 f'_c$
- **LIMITE ELÁSTICO DEL ACERO:** $f_s < f_y$
- **COMPORTAMIENTO SECCIÓN NO FISURADA:** $f_{c_t} < f_r$

Sí el comportamiento de una sección transversal es elástico , los esfuerzos y deformaciones son proporcionales en función al módulo de elasticidad por lo tanto si el diagrama de deformaciones es lineal , el diagrama de esfuerzos también es lineal a continuación se muestra la imagen como es el comportamiento elástico de los materiales en una sección transversal no fisurada. Ortega García, J. E. (2015). Diseño de estructuras de concreto armado. Tomo II. Editorial Macro.

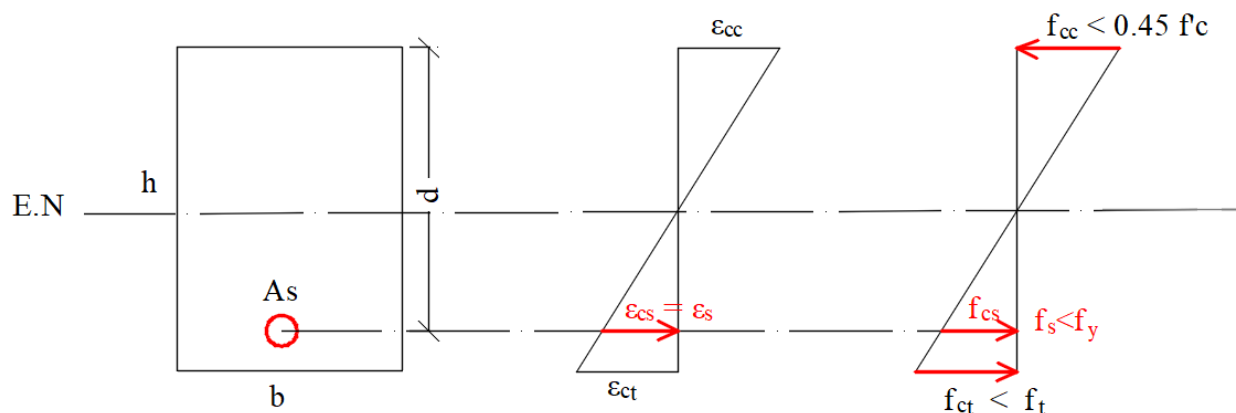


Ilustración 8. Comportamiento Elástico Sección No Fisurada. Fuente: Propia

Analizando esta sección transversal de concreto donde no hay nada de fisuras , podemos ver que el eje neutro se inclina hacia abajo del centro , pero de que dependerá que el eje neutro este arriba o abajo o muy cercano al eje neutro, dependerá de la cantidad de acero de refuerzo que se disponga en la sección transversal de concreto entre más acero tenga una sección transversal el eje neutro se ubicara más abajo , porque el eje neutro coincide con la posición del centro de masa, tenemos que las deformaciones son proporcionales al eje neutro como tenemos curvatura positiva en la parte superior vamos a tener una deformación del concreto a compresión y en la fibra inferior de la sección transversal que no está fisurado vamos a tener la deformación del concreto a tracción y a nivel del acero vamos a tener una deformación del concreto a nivel del acero y esa deformación va a ser igual por compatibilidad de deformaciones a la deformación del acero de refuerzo por principio de adherencia , ahora para el diagrama de esfuerzos se entiende que los esfuerzos y deformaciones son proporcionales en el comportamiento elástico en función al módulo de elasticidad por lo tanto si la deformación es lineal , el esfuerzo también es lineal , en la parte superior de la fibra de la sección tenemos el esfuerzo del concreto a compresión y en la parte inferior de la fibra como el concreto no está fisurado , en la fibra extrema tenemos un esfuerzo del

concreto a compresión y a nivel del acero, tenemos un esfuerzo del concreto en el acero y también un esfuerzo en el acero , dado las condiciones del comportamiento elástico de los materiales , se tendría que para el esfuerzo en el concreto a compresión sea comportamiento lineal y elástico debe ser menor que el 45% de la resistencia a la compresión y el esfuerzo en el acero debe ser menor que el módulo de fluencia , se entiende que en la fibra inferior extrema de la sección es la zona donde tenemos el esfuerzo del concreto a tracción que se va fisurar posteriormente, y para que una sección no se fisure se debe cumplir la condición de que el esfuerzo del concreto a tracción sea menor que el módulo de rotura. Beer, F. P. (2021). Mecánica de materiales. McGraw-Hill

- **NOMENCLATURA**

Eje neutro (EN) : Coincide con la posición del centro de masa

Altura efectiva útil (d): Posición del acero de refuerzo hasta la fibra extrema superior.

f_{cc} : Esfuerzo en el concreto a compresión

f_{ct} : Esfuerzo en el concreto a tracción

f_{cs} : Esfuerzo en el concreto a nivel del acero

f_s : Esfuerzo en el acero

ϵ_{cc} : Deformación unitaria en el concreto a compresión

ϵ_{ct} : Deformación unitaria en el concreto a tracción

ϵ_{cs} : Deformación unitaria en el concreto a nivel del acero

ϵ_s : Deformación unitaria del acero por principio de adherencia $\epsilon_{cs} = \epsilon_s$

4.2.3 COMPORTAMIENTO ELÁSTICO SECCIÓN FISURADA

Que nos puede garantizar el comportamiento elástico , que se cumpla la ley de Hooke a estas condiciones que el esfuerzo del concreto a compresión debe ser menor al 45% de la resistencia a la compresión del concreto y el esfuerzo en el acero debe ser menor al esfuerzo de fluencia , bajo a estas condiciones estamos con comportamiento elástico, la zona donde el concreto se puede fisurar en una sección transversal de una viga es en la parte del eje neutro hacia abajo después del acero, en una fibra inferior a esfuerzos del concreto a tracción se puede fisurar , por lo tanto el esfuerzo del concreto a tracción se va comportar mayor que el módulo de rotura y se entiende que el módulo de rotura es el 62% de la raíz de la resistencia a la compresión del concreto. En esta etapa del comportamiento elástico de la sección del concreto fisurada podemos analizar que la sección del concreto se fisura y se desplaza la altura del eje neutro más arriba y estaría trabajando la zona a compresión superior, el comportamiento de los diagramas de esfuerzos y deformaciones en este caso cuando la sección esta fisurada , las deformaciones aumentan y también los esfuerzos aumentan , como la sección se fisuro pero continua siendo elástica cumple con las condiciones del Comportamiento elástico , pero ya no se tendría deformación en el concreto a nivel del acero.

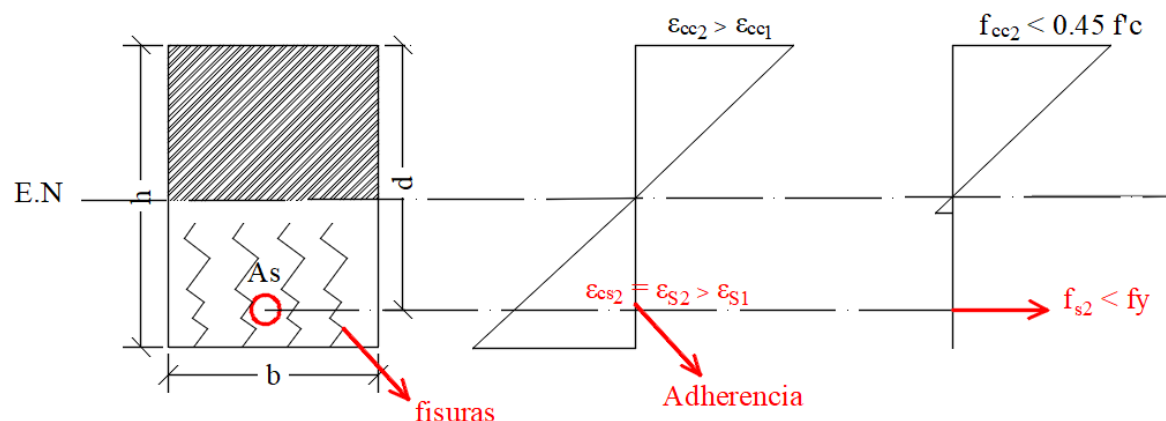


Ilustración 9. Comportamiento Elástico Sección Fisurada. Fuente: Propia

Como anteriormente se hizo el análisis del comportamiento de una sección transversal de concreto sometida a flexión se revisó los dos análisis con comportamiento elástico una con sección fisurada y la otra con sección no fisurada.

4.2.4 COMPORTAMIENTO INELÁSTICO

Se entiende por teoría que si tenemos un elemento estructural y entra al rango inelástico es porque ya el elemento estructural esta fisurada , para una sección transversal la única zona que está trabajando es la de compresión por que la de tracción ya esa zona el elemento perdió la capacidad, entonces el esfuerzo a compresión del concreto debe ser mayor que el 45% de f_c , si esto pasa el elemento estructural ya paso al rango inelástico con que uno de los dos materiales , concreto y acero supere el rango elástico , tiene un comportamiento inelástico y para el caso del acero el esfuerzo del acero f_s ,tiene que ser menor que el esfuerzo de la fluencia f_y , por lo tanto el eje neutro se desplaza hacia la fibra extrema en la zona de curvatura positiva , para esta etapa del comportamiento inelástico no se puede usar la ley de Hooke , las deformaciones y los esfuerzos no son proporcionales respecto al módulo de elasticidad, a continuación se muestra una imagen de las curvas constitutivas del comportamiento mecánico del concreto y el acero.

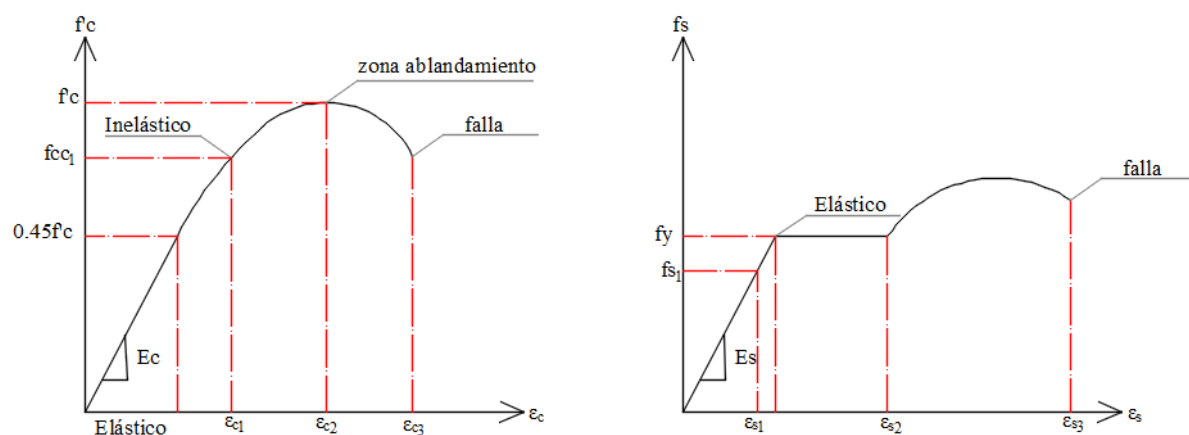


Ilustración 10. Comportamiento Inelástico de la curva de concreto y el acero. Fuente: Propia

Se puede observar en la imagen del comportamiento inelástico de los materiales del concreto y acero , que no es posible calcular esfuerzos en ambos materiales usando la ley de Hooke. Con esto entramos en la siguiente etapa de la falla o rotura de la sección. En esta etapa tenemos que empezar a ver cómo podría fallar la sección si es por el concreto o el acero. En la teoría si el concreto llega a una deformación ultima de 0.003 estamos en punto de falla , otra cosa puede ocurrir que el acero también llegue a su punto máximo de deformación de fluencia de 0.0023 puede pasar que el acero lleve a la fluencia, pero el concreto no ha fallado, entonces cuando el acero llega a la fluencia , el acero comenzó a fluir, entonces de ahí dependerá como falla la estructura, se entiende que para un análisis de una viga la zona critica ocurre el máximo momento y se pueden presentar dos tipos de fallas , la falla por tracción y la falla por compresión, en resumen la diferencia de las fallas está asociado en que material trabaja mejor con el efecto a tracción o compresión, si la falla es por tracción esta fallado el acero , pero si es falla a compresión es el concreto. Al final siempre es el material del concreto que falla primero.

4.2.5 FALLA POR TRACCIÓN

La falla por tracción inicia por la fluencia del acero , que quiere decir que la deformación del acero es mayor que la deformación de la fluencia , porque el acero comenzó a fluir entro en su fluencia, en el concreto también se va ir aumentando los esfuerzos y deformaciones, el concreto se empieza a deteriorar hasta que ocurre una falla secundaria del concreto a compresión hasta que el concreto falla y cuando falla el concreto simple tiene un valor de la deformación unitaria de 0.003 y la deformación unitaria del acero es de 0.0021, cuando el acero empieza entrar en su zona de fluencia el acero empieza estirarse , empieza a disipar la energía el acero a través de deformaciones inelásticas , entonces esta falla se puede clasificar como una falla dúctil. Se presentan grandes deformaciones en el elemento a flexión , la sección se fisura progresivamente, las fisuras se

agrandan haciéndose vas visibles, entonces se concluye que es una falla dúctil, cuando se habla de una falla dúctil es que se al visualizar como se deteriora el elemento estructural , la falla le da aviso , no es una falla sorpresiva es una falla que da aviso, cuando vemos una viga sometida a una prueba de flexión se va a ver una deformación excesiva de la viga. Las condiciones que hay para generar una falla a tracción , se considera que una sección transversal tenga una cantidad mínima de acero tal que garantice que la deformación en el acero sea mayor igual que la deformación de la fluencia y por lo tanto el esfuerzo en el acero sea igual al esfuerzo de la fluencia, el tamaño de la sección de concreto debe ser igual tal que garantice el esfuerzo de la fluencia del acero, estas son las fallas que se busca en cualquier diseño, a continuación se muestra el diagrama de esfuerzos y deformaciones de la falla a tracción.

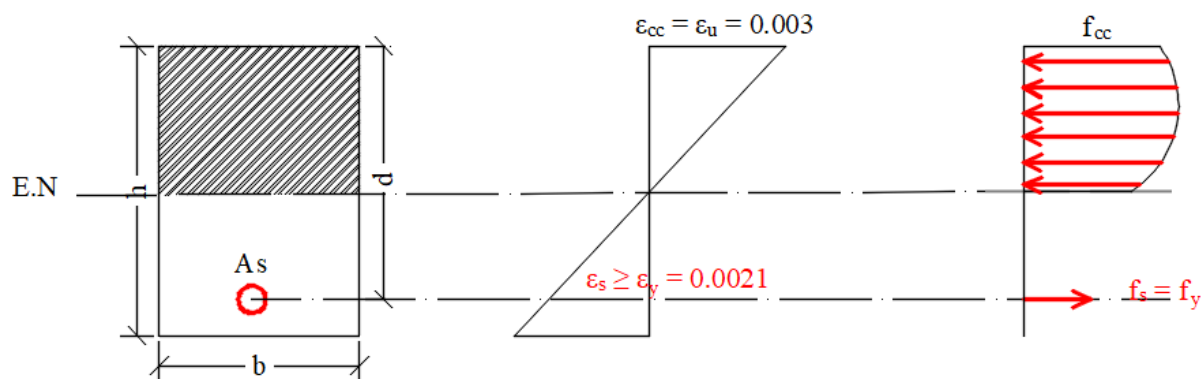


Ilustración 11. Diagrama de esfuerzos y deformaciones de la falla a tracción. Fuente: Propia

4.2.6 FALLA POR COMPRESIÓN

Para que el concreto falle , tiene que llegar a su deformación ultima de 0.003 , para el caso del acero no tiene oportunidad de fluir, las condiciones de esta falla para que falle primero el concreto es porque hay mucho acero, es tanto la cantidad de acero que no supera su esfuerzo de fluencia tal que no puede fluir, porque la deformación del acero es menor que la deformación de la fluencia y

por lo tanto el esfuerzo en el acero es menor que el esfuerzo de la fluencia al caso anterior de la falla por tracción el concreto era una falla secundaria , pero en este caso cuando es falla a compresión el concreto falla primero , tal que la deformación en el concreto es igual a la deformación ultima que tiene un valor de 0.003 a continuación se muestra en la imagen el diagrama de esfuerzos y deformaciones de la falla a compresión.

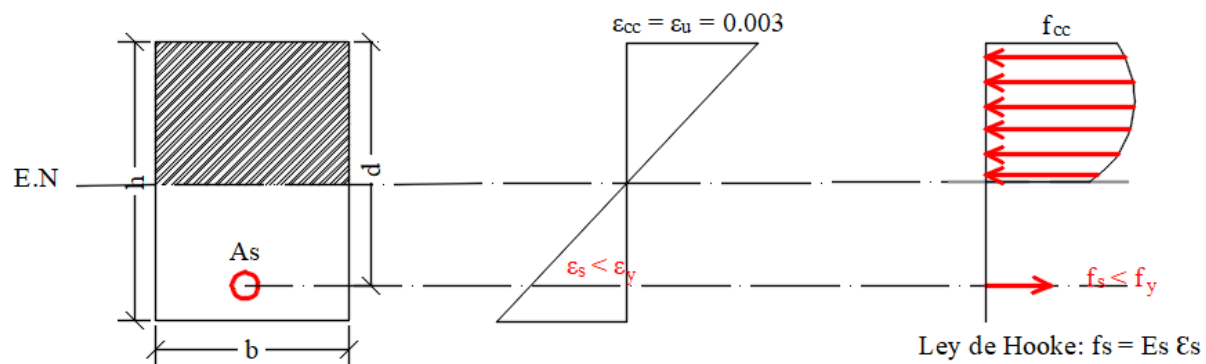


Ilustración 12. Diagrama de esfuerzos y deformaciones de la falla a compresión. Fuente: Propia

La falla a compresión se puede clasificar como una falla frágil que no da aviso , es una falla explosiva entonces en un diseño se espera que la falla sea dúctil y no por falla frágil que lleva al colapso del elemento estructural , se entiende que la deformación ultima en el material del concreto siempre va a ser de 0.003, por principio de la ley de Hooke se entiende que el esfuerzo es igual al módulo de elasticidad por la deformación unitaria , el módulo de elasticidad también recibe el nombre del módulo de Young , por Thomas Young que el realizo estudios sobre la elasticidad de los materiales , la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria es solo dada al inicio del comportamiento lineal del diagrama de esfuerzos y deformaciones y es conocida como la Ley de Hooke en honor a Robert Hook que el describe como los materiales elásticos

responden a las cargas aplicadas.(Young, H. D., & Freedman, R. A. (2014). University physics with modern physics (14ª ed.).

4.2.7 RESISTENCIA DE CONCRETO REFORZADO A FLEXIÓN

Usualmente hay diversos métodos que se usa para diseñar , entonces vamos a iniciar en cómo se va calcular la resistencia de secciones de concreto reforzado sometidas a flexión, lo que nos interesa calcular cual va ser la máxima resistencia de una sección de concreto reforzado, esa resistencia se conoce como resistencia ultima , resistencia nominal o resistencia nominal de falla sin embargo como se está analizando elementos a flexión esa resistencia ultima “ R_n ” se expresa en términos de un momento que se define como “ M_n ”, si consideramos que la falla es la última etapa del comportamiento de la sección , es evidente que estamos con comportamiento inelástico , este comportamiento implica , que no hay proporcionalidad entre esfuerzos y deformaciones, es decir que no podemos aplicar la ley de Hook , cuando la sección transversal llegue a su máxima resistencia fallara por tracción o compresión, entonces veamos como es el diagrama de esfuerzos y deformaciones en la etapa de resistencia ultima.

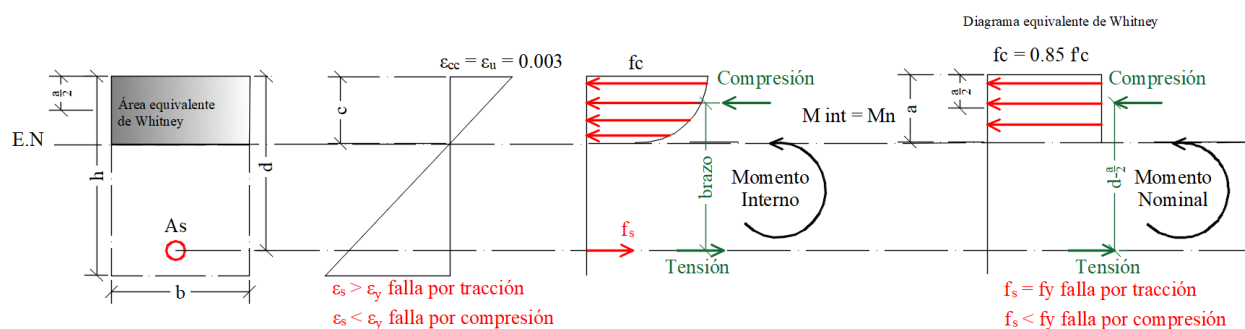


Ilustración 13. Diagrama de esfuerzos y deformaciones en la etapa de resistencia ultima. Fuente: Propia

Esta es la parte más importante para evaluar la resistencia de una sección transversal y posteriormente pasar al diseño.

4.2.8 TEORÍA DEL DIAGRAMA EQUIVALENTE DE WHITNEY

En la teoría del diagrama equivalente de Whitney se presenta que los esfuerzos en el concreto son constantes y es igual a 0.85 de la resistencia a la compresión del concreto, tenemos también una altura “a” del area equivalente a compresión es igual a un coeficiente “ $\beta_i C$ ”, el coeficiente β_i va estar en función a la calidad del concreto simple , si tenemos un concreto entre 17 Mpa a 28 Mpa estaríamos trabajando con un coeficiente de 0.85 , si ese concreto tiene una resistencia mayor a 28 Mpa , entonces este coeficiente va variar de la siguiente forma. $0.85 - 0.05 (f'_c - 28)/7$, esto debe ser mayor igual que 0.65, todas estas expresiones del diagrama equivalente de Whitney se encuentran especificadas entre numerales en la norma NSR-10.(Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica 2010)

Hay otro concepto que se conoce como la condición balanceada, que ocurre cuando el acero comienza a fluir , para que el acero entre en la zona de fluencia la deformación del acero tiene que ser mayor a la deformación del módulo de fluencia, simultáneamente cuando el concreto llega a su deformación unitaria ultima. Podemos ver este comportamiento en la siguiente imagen

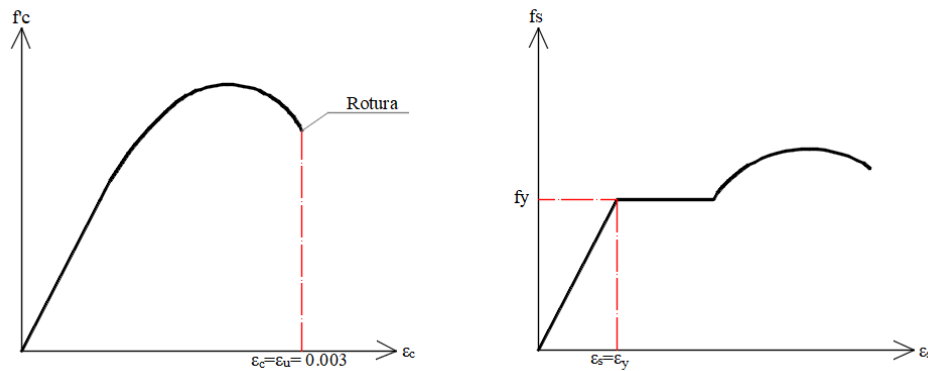


Ilustración 14. Curvas de capacidad de los materiales concreto y acero. Fuente: Propia

En la imagen estamos ante la condición balanceada, para una sección de concreto reforzado existe una única cantidad de acero que garantiza la condición balanceada a esa cantidad de acero se le denomina como área de acero balanceada y si tenemos una sección rectangular, también podemos hablar de una cuantía de acero balanceada. Conociendo la cuantía de acero balanceada se determina el tipo de falla. Si tenemos que el área de acero que se le está colocando a la sección transversal es igual a la área de acero balanceada tenemos una falla en condición balanceada, el concreto y acero fallan simultáneamente, por el contrario si tenemos una cuantía de acero menor a la cuantía de acero balanceada el tipo de falla que tiene menos acero se asocia a una falla por tracción en cambio si llenamos una sección transversal de mucho acero, se le coloca una área de acero mayor al área de acero balanceada tenemos una falla por compresión. La norma NSR-10 es un poco más estricta para definir esa condición balanceada, entonces nos presenta la condición balanceada en el capítulo C en el numeral C.3.2, en este numeral indica que en términos de deformación, si la deformación en el acero es menor igual que 0.002 tenemos una falla por compresión, pero la define como una sección controlada por compresión, si la deformación en el acero es mayor o igual a 0.005 estaríamos en una sección controlada por tracción y si la deformación es mayor a 0.002 pero la deformación en el acero, pero menor a 0.005 estamos en

una zona de transición, la norma saca estos valores de la curva constitutiva del acero de refuerzo de esfuerzos y deformaciones , en la siguiente imagen se va poder analizar como la norma presenta los valores para la condición balanceada.

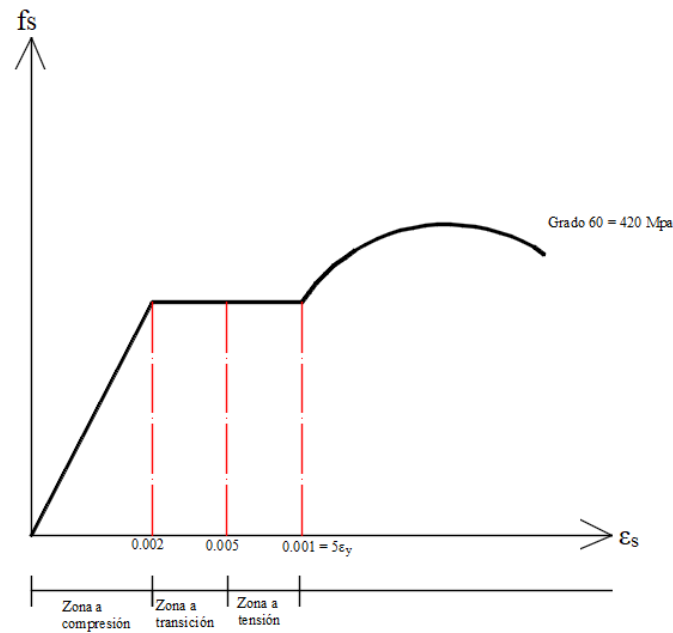


Ilustración 15. Curva constitutiva del acero condición balanceada. Fuente: Propia

La norma fija como punto de control la deformación ϵ_y para un acero de grado 60 , porque es el acero que se utiliza para secciones de concreto reforzado tenemos que la deformación ϵ_y es igual a 0.002 , la norma toma una aproximación de 0.001 equivalente a cinco veces la deformación ϵ_y , por lo tanto el límite que toma la norma NSR-10 estaría justo en la mitad en la zona de fluencia con un valor de 0.005 con esos valores de las deformaciones , la norma fija esas tres zonas , zona controlada por la compresión, zona de transición y zona controlada por tracción, entonces la norma está condicionando para que el acero tenga un amplio de acción para fluir.

Para empezar con el cálculo de resistencia de una sección de concreto reforzado , hay que considerar dos conceptos , por un lado, el momento nominal que va a ser la resistencia teórica y el momento último , que va a ser el momento factorizado , en cuanto a la resistencia para un diseño de concreto reforzado debe cumplir esta condición que el momento ultimo tiene que ser menor o igual a un factor de reducción de flexión por el momento nominal.

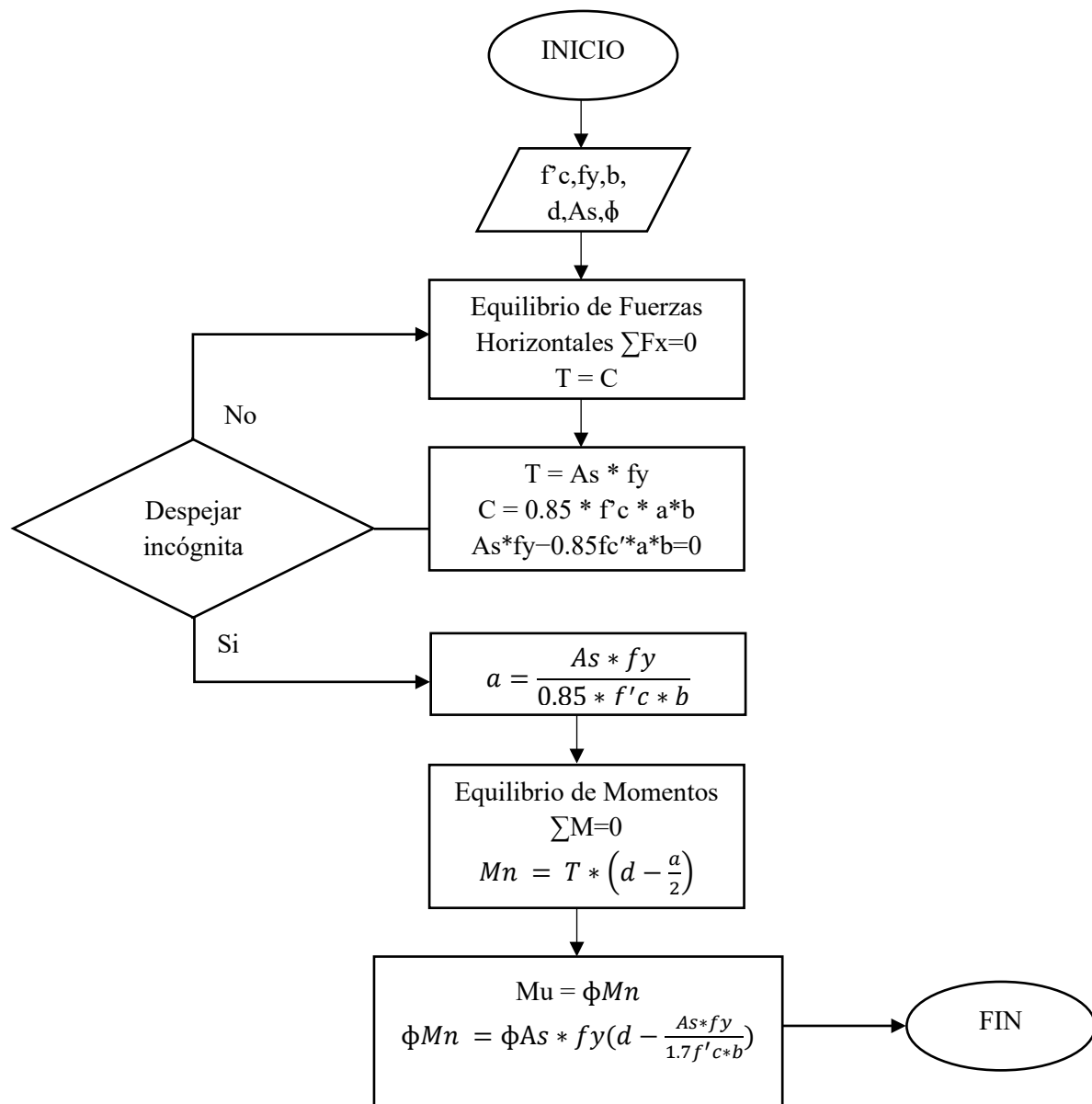


Ilustración 16. Diagrama de flujo Teoría de Whitney. Fuente: Propia

A partir del análisis del diagrama equivalente de Whitney de cómo se relaciona la resistencia última para el diseño de secciones de concreto reforzado, toda esta teoría se va ir implementando para el desarrollo del programa Pilot Structural, así que el diseño estructural va estar asociado a determinar cuál es la capacidad de la estructura, esta capacidad se la puede definir como " R_n " y está asociado a la máxima resistencia que puede tener la estructura, en el diseño estructural lo que vamos a tener en cuenta es diseñar una sección transversal de ese elemento y analizamos que propiedades de resistencia tiene, conocemos también los materiales a utilizar, como la resistencia a la compresión del concreto, la resistencia a la fluencia del acero, por otro lado en una sección transversal también va exigir que sea colocado una cuantía de acero requerida para garantizar que garantice el principio de equilibrio, que las fuerzas externas deben ser iguales a las fuerzas internas, como se necesita evaluar la resistencia máxima, vamos a estar en la falla de ruptura de la sección, es decir que el comportamiento va ser inelástico, por eso es válido usar el diagrama equivalente de Whitney nos habla de una distribución de esfuerzos constante iguales a $0.85f'_c$ en un área equivalente con una altura " a ", del lado de la zona a tensión como el concreto va estar fisurado por que el concreto no es bueno a tensión, el problema se soluciona cuando se coloca una cuantía de acero " A_s ", así que en la fila de esa cuantía de acero se desarrolla un esfuerzo en el acero " f_s ", ese esfuerzo del acero va depender del tipo de falla con esto calculamos la tensión del lado del concreto a la compresión ese par de fuerzas internas tiene un brazo de palanca, que va ser igual a la profundidad efectiva que me indica la posición del acero de refuerzo, entonces tenemos que el brazo de palanca va ser igual a la profundidad efectiva útil menos " $a/2$ ", con estos datos en el diseño estructural vamos a garantizar el cálculo del momento nominal que viene siendo el momento interno que desarrolla la sección transversal ese momento nominal tiene que ser mayor igual a la sollicitación lo que la estructura solicita que lo definimos como el momento último " M_u "

es decir que la capacidad en cualquier caso debe ser siempre mayor o igual que la estructura solicita como es en términos de momento ese momento “ M_u ”, con el análisis estructural el momento último se determina como el efecto actuante, se entiende que la etapa de falla de una sección transversal de concreto reforzado me indica la resistencia máxima de esa sección, luego se hace la respectiva igualación de las propiedades mecánicas internas de los materiales en la zona de tensión y compresión y encontramos las condiciones de equilibrio tanto para las fuerzas de tensión y compresión y de momentos para cada esfuerzo de los materiales del concreto y acero, y se quiere llegar al momento nominal que es la capacidad de cuanto soporta la sección de concreto reforzado y cuando ya se tenga la capacidad se hace la comparación con lo que solicita la estructura, que sería un momento debido a las cargas externas para que el diseño corresponda, siempre la capacidad debe ser mayor o igual a la solicitación en esta etapa de diseño estructural. Por otro lado, tenemos la ductilidad que es la capacidad de la sección para trabajar en el rango inelástico, lo podemos analizar desde la curva de capacidad del concreto, el material tiene un comportamiento que es bastante frágil por que llega a su máxima resistencia y falla, pero cuando el concreto se confina se le mejora sus propiedades entonces el concreto puede mejorar su comportamiento ampliando su capacidad de trabajo en el rango inelástico.

4.2.9 METODOS DE DISEÑO

Existe diversos métodos de diseño que son importantes en algunos casos específicos de ciertos materiales, en orden podemos evaluar primero el método de esfuerzos admisibles y el segundo método es el método de resistencia ultima, es importante identificar en que se diferencia cada método , para el método de esfuerzos admisibles se basa en un comportamiento elástico, lo que va hacer este método es limitar los esfuerzos de los materiales del concreto y acero para que trabajen en un rango elástico , para el segundo método se busca evaluar la máxima resistencia para que los materiales el concreto y acero trabajen en el rango inelástico , como no podemos calcular esfuerzos ni deformaciones en el rango inelástico , se puede analizarlo desde el diagrama equivalente de Whitney entonces esa sería la diferencia entre ambos métodos.

- **METODO DE ESFUERZOS ADMISIBLES**

Este método de esfuerzos admisibles se lo conoce como el método de cargas de servicio o métodos de esfuerzos de trabajo, entonces dentro de las características de este método se basa en el comportamiento elástico de los materiales, entonces se va mantener los materiales del concreto y acero en el rango elástico , así que se va tener en cuenta el esfuerzo admisible del concreto y de un esfuerzo admisible en el acero, el esfuerzo admisible para el concreto tiene un valor del 45 % de la resistencia a la compresión del concreto y para el esfuerzo admisible del acero vamos a tener dos condiciones , puede ser igual a 120 Mpa y 170 Mpa , para el caso de 120 Mpa será cuando el esfuerzo de fluencia es menor o igual a 240 Mpa , y 170 Mpa es cuando el esfuerzo de fluencia es mayor o igual 420 Mpa.

- $f_y \leq 240 \text{ Mpa}$
- $f_y \geq 420 \text{ Mpa}$

por último tenemos las cargas de servicio , son las cargas del funcionamiento de la estructura, por ahora estas cargas se calculan sin mayorar , aunque el concepto mayorar se entiende mejor con el segundo método de las resistencia ultima, este método lo menciona la norma NSR-10 está en el título C en el último apéndice con el nombre de procedimiento alternativo de diseño a flexión por el método de esfuerzos admisibles y las cargas de servicio están dadas en título B, en este título presenta todas las combinaciones que presenta la NSR-10 para el método de esfuerzos admisibles, el procedimiento de diseño para este método inicia con calcular efectos externos o las cargas externas debido a las cargas de servicio suponiendo que tenemos un elemento que tiene cargas muerta y viva , la norma en el título B en el numeral B.2.3 menciona los tipos de combinación de las cargas de servicio esta primera etapa simplemente es aplicar análisis estructural y calcular el momento externo que está en función a las cargas de servicio, cuando ya se tiene el momento de servicio , pasamos a la segunda etapa para calcular los esfuerzos en los materiales.

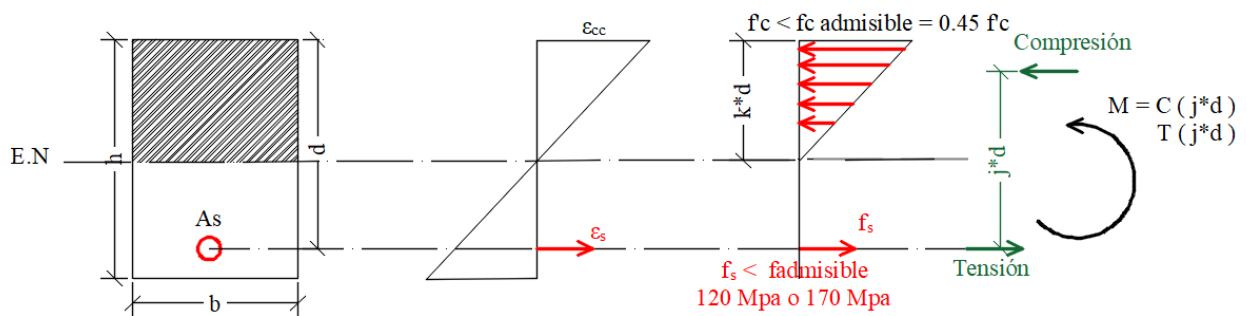


Ilustración 17. Sección Con Comportamiento Elástico Fisurada . Fuente: Propia

En esta imagen se puede presentar el comportamiento elástico fisurada de una sección , para el estudio de este método de los esfuerzos admisibles, muestra una deformación lineal para ambos materiales del concreto y el acero y para el diagrama de esfuerzos , su comportamiento también es proporcional a las deformaciones , tenemos un esfuerzo del concreto en la parte superior y a nivel del acero tenemos el esfuerzo en el acero , estos esfuerzos se pueden calcular con la teoría de la

sección con comportamiento elástico fisurada y se puede hacer analizando la sección compuesta o sección homogénea cuando se tiene esta distribución de esfuerzos entonces el método de esfuerzos admisibles, lo que va solicitar es que comparemos el esfuerzo del concreto con el esfuerzo del acero y con los esfuerzos admisibles el esfuerzo del concreto debe ser menor que el esfuerzo del concreto admisible que es igual al 45% de la resistencia a la compresión del concreto y para el caso del acero debe ser menor que el esfuerzo admisible, que es igual a 120 Mpa y 170 Mpa, que dependerá de la calidad del acero, entonces este método se vuelve un proceso más iterativo, puede pasar que el esfuerzo del concreto sea mayor que el esfuerzo admisible y ahí tendríamos que hacer aumentar el tamaño de la sección o colocar más acero y se vuelve iterativo hasta que cumpla con los esfuerzos admisibles por esta razón este es un método que sirve más para verificación y es bastante útil cuando se quiere verificar elementos que no se pueden fisurar mucho por ejemplos las losas o tanques de almacenamiento por norma esos elementos se deben controlar la fisuración así que el método de la resistencia última no es tan viable porque este método saca a los materiales del concreto y acero del rango elástico, con esto se recomienda usar el método de los esfuerzos admisibles para ese tipo de elementos estructurales para garantizar que el concreto no se fisure tanto, las losas de cubierta son elementos que están a la intemperie y se recomienda verificar con el método de los esfuerzos admisibles por la misma condición para controlar la fisuración en el elemento, verificar que no se fisure tanto y que las grietas no sean tan grandes, por equilibrio de fuerzas tenemos una resultante a compresión y a tensión y ese par de fuerzas tienen un brazo de palanca generan un momento, ese momento es igual a la compresión por el brazo o a la tensión por el brazo. Norma Colombiana de Sismorresistencia (NSR-10). (2010). Norma sismorresistente NSR-10: Título B - Requerimientos generales (Numeral B.2.3).

- **METODO DE RESISTENCIA ULTIMA**

Este método se basa en el comportamiento inelástico de los materiales de modo que la sección se diseña considerando deformaciones inelásticas para llegar a la resistencia ultima que en termino se conoce como “ R_n ”, en términos de momento se define como “ M_n ” , el momento nominal , llevando a la sección a su máxima resistencia y como este método trabaja con comportamiento inelástico , es recomendado usar el diagrama equivalente de Whitney con este diagrama tenemos los esfuerzos constante a compresión que es igual al 85% de la resistencia a la compresión del concreto en una area equivalente a compresión de “ a ” , menor a la posición del eje neutro y con esta condición podemos calcular una fuerza total a compresión y equilibrarla con una fuerza total a tensión a nivel del acero y con ese par de fuerzas de compresión y tensión que tienen un brazo de palanca y por otro lado se calcula un momento interno como estamos en una etapa de rotura, se conoce este momento interno como el momento nominal que se usa para calcular la resistencia y en términos de deformaciones los materiales están con deformaciones inelásticas tal que el concreto ha llegado a su deformación ultima inelástica que es 0.003 mientras que el acero tiene una deformación con dos condiciones “ $\epsilon_s < \epsilon_y$ ” o “ $\epsilon_s \geq \epsilon_y$ ” eso depende del tipo de falla , el momento nominal que se calcula es función de las propiedades del material y el tamaño de la sección transversal y de la cantidad de acero. En este caso el método de la resistencia ultima , usa unos factores de seguridad, entonces para la capacidad nominal no se va usar precisamente el valor calculado del momento nominal si no que se usa unos factores para reducir , el factor de reducción que se conoce en el diseño flexión es el factor ϕ de 0.90 para calcular la resistencia de diseño , esa resistencia de diseño se definirá como el factor de reducción por el momento nominal “ ϕM_n ” , entonces este factor va ser un factor menor que uno, esto implica que va reducir la capacidad, el factor de reducción va estar en función al tipo de falla, entonces vamos a definir los tipos de fallas

que define la norma NSR-10 que son tres en función a la deformación del acero, tenemos el primer limite la deformación de fluencia y otro limite que está en 0.005, estas son las limitaciones que establece la norma para saber cómo falla la sección si es por compresión o tracción o en la zona de transición, entonces tenemos que si las deformaciones son menores a la deformación “ ϵ_y ” tenemos una falla por compresión y si son deformaciones mayores a 0.005 tenemos una falla por tracción y si los valores de las deformaciones están entre el rango de 0.002 a 0.005 es la zona de transición así que dependiendo del tipo de falla se va establecer el valor de ϕ .

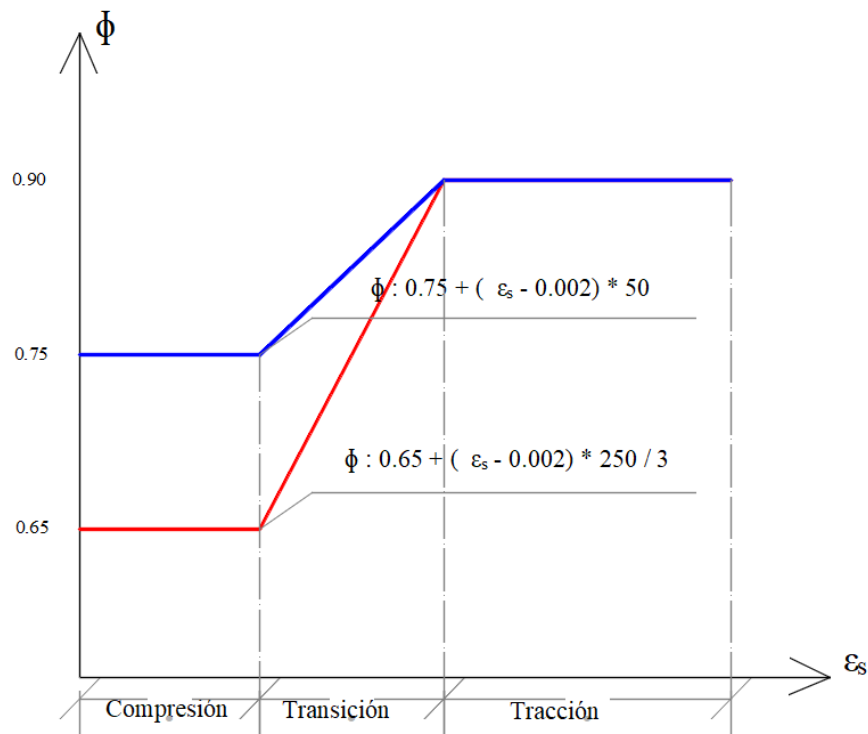


Ilustración 18. Condiciones para el valor del factor de reducción ϕ . Fuente: Propia

La primera condición cuando tenemos una sección con estribos, entonces cuando se tiene una sección confinada por estribos vamos a tener que si la falla es por compresión el valor de ϕ es constante va reducir la resistencia nominal 0.65 veces, la otra falla que es por tracción tiene un valor constante de ϕ de 0.90, la diferencia de estas dos condiciones es que la falla por tracción

es una falla dúctil que da aviso , y la falla por compresión es frágil entonces este método de diseño lo que hace es contemplar esa forma en la que va fallar la sección para establecer su factor de seguridad , si tenemos una falla dúctil , entonces la capacidad nominal de la sección se va tomar en cuenta con el valor de 0.90 , se reduce en 10%, pero si la sección falla de manera frágil por una falla de compresión ese valor va ser de 0.65 y en la zona de transición va incrementar de forma linealmente, tenemos que el valor de ϕ en la zona de transición es de la siguiente expresión

$$\phi = 0.65 + (\epsilon_s - 0.002) * \frac{250}{3}$$

en el caso de la falla a compresión el valor de ϕ también se le permite aumentarlo a 0.75 entonces se reduce menos la capacidad se va en constante a 0.75 , incrementa linealmente en la zona de transición y luego se va constante para la falla por tracción igual a 0.90 en este caso para el valor de ϕ en la zona de transición es de la siguiente expresión.

$$\phi = 0.75 + (\epsilon_s - 0.002) * 50$$

este valor del factor de reducción tiene mucho que ver en como falla la sección , ahora bien, respecto a las solicitaciones para calcular los efectos externos , debido a cargas externas se usan cargas mayoradas son las mismas cargas de servicio multiplicadas por factores de mayoración es decir vamos a amplificar las cargas, en el titulo B de la norma NSR-10 están todas las especiaciones de las combinaciones de carga mayoradas y cargas de servicio. Hay que aclarar que el Software Pilot Structural va a trabajar con cargas típicas que son la carga viva y la carga muerta.

En resumen este método de la resistencia ultima, utiliza dos factores de seguridad, por un lado amplifica las cargas , utiliza cargas mayoradas, así que cuando vamos hacer el análisis estructural para calcular los efectos externos, la carga que vamos a utilizar va ser una carga mayorada con

cualquiera de las combinaciones que especifica la NSR-10 , con esa carga mayorada determinamos en términos de flexión cual es el momento máximo de diseño , a este momento máximo con cargas mayoradas lo definimos como Momento ultimo o Momento actuante , “Mu” por ejemplo si tenemos una combinación de cargas de servicio , que sea la carga muerta y la carga viva cada carga se le multiplica un factor de mayoración , se aumenta 20% a la carga muerta y un 60% a la carga viva, en una estructura puede estar sometida a diferentes combinaciones de cargas , por esto hay que usar toda las combinaciones y de ahí sacar los efectos máximos que a eso se le denomina como envolvente de combinaciones mayoradas y se concluye cual es el momento máximo para diseñar de esta forma se diseña con la envolvente sacar los efectos máximos asociados a las distintas combinaciones no solamente diseñar con una. El concepto de los dos métodos de diseño de resistencia ultima y esfuerzos admisibles se basa finalmente en el comportamiento de la sección de concreto reforzado, por otro lado el método de la resistencia ultima se trabaja la sección de concreto en el rango inelástico , y como restringe calcular deformaciones en el rango inelástico , la alternativa es utilizar el diagrama equivalente de Whitney, para el método de la resistencia ultima se requiere cual es el tipo de falla , se determina dos factores el primero el esfuerzo en el acero si él es fuerza de acero es igual al esfuerzo de fluencia quiere decir que es una falla por tracción y si el esfuerzo del acero se calcula con la ley de Hooke es decir que está en el rango elástico , el esfuerzo en el acero es igual al módulo de elasticidad del acero por la deformación en el acero y esta sería una falla por compresión y también dependen el factor de reducción ϕ para calcular la capacidad nominal de diseño, la condición de diseño por resistencia se tiene que comparar un momento ultimo con la capacidad nominal de la sección para que el diseño cumpla, tiene que ser siempre que las solicitaciones de los efectos externos sea menor o igual que la capacidad , aclarando que las solicitaciones se calculan con las cargas de servicio mayoradas o de un cálculo

previo del análisis estructural. El concreto cuando está en un instante de falla , siempre va estar en su deformación ultima esto es lo que hace este método de resistencia ultima , lleva el concreto hasta su máxima capacidad por otro lado el acero tiene un comportamiento diferente al del concreto le falta mucho más para llegar a la falla, el acero está fluyendo en su zona de fluencia, este método de resistencia ultima sirve mejor para el comportamiento del acero porque este material es dúctil , si tenemos una sección de concreto simple no es adecuado en el método de diseño por resistencia ultima porque no es óptimo para trabajar en el rango inelástico , para el concreto simple es más recomendado por el método de esfuerzos admisibles por que la forma en que falla el concreto es frágil, cuando se usa el método de resistencia ultima es usual hablar del factor de seguridad está asociado a comparar la capacidad con las solicitaciones , si establecemos el factor de seguridad como la relación entre la capacidad que es " ϕM_n " sobre la solicitación tenemos un factor de seguridad mayor o igual uno , se tiene que el diseño cumple y si es menor que uno tendremos que la solicitación es mayor que la capacidad entonces el diseño no cumple.

4.3. DISEÑO FLEXIÓN CON EL METODO DE RESISTENCIA ULTIMA

En el diseño a flexión es importante plantear dos objetivos para su procedimiento y en el estudio del desarrollo del software Pilot Structural, empezamos a definir el tamaño y forma de la sección transversal del concreto, el programa Pilot Structural usa secciones rectangulares y cuadradas como segundo objetivo , colocar una cantidad de acero necesaria en la sección transversal para tomar las solicitaciones en términos de momento último, Entonces se analizó que este método de la resistencia ultima evalúa la sección transversal en su etapa ultima de falla así que independientemente sea la sección las deformaciones se representan como lineales, la deformación del concreto alcanza a una deformación ultima de 0.003 , del diagrama de esfuerzos como estamos en la etapa ultima por el método de resistencia entonces usamos el diagrama de

Whitney tenemos una distribución constante de los esfuerzos en una area equivalente el diagrama equivalente de Whitney siempre va ser constante en un esfuerzo de 0.85 de la resistencia a la compresión del concreto en una altura “a” que corresponde a la altura del area equivalente a compresión y a nivel del acero tenemos un esfuerzo en el acero que dependerá el tipo de falla con ese esfuerzo en el acero calculamos la fuerza a tensión y de los esfuerzos a compresión tenemos la resultante de la fuerza a compresión , la fuerza tensión y la fuerza compresión me genera un brazo de palanca que es igual a la altura efectiva útil que es la posición del acero hasta la fibra máxima superior de la sección menos la altura del area equivalente a compresión y posteriormente se va generar un momento interno que es igual a la capacidad. La falla que esperaríamos en cualquier diseño es que sea una falla dúctil controlada a tracción , entonces desde el inicio del diseño a flexión se recomienda que la sección falle por tracción ósea que el esfuerzo del acero tiene que ser igual al esfuerzo de la fluencia y la deformación del acero va ser igual a la deformación de la fluencia del acero, entonces la primera condición es que se busca que la sección transversal diseñada falle por tracción, con el análisis estructural nos vamos encargar siempre de determinar los momentos externos, como estamos con el método de resistencia ultima , la carga que le colocamos son cargas de servicio mayorada y determinamos entonces el momento máximo para diseñar , ese momento máximo va ser el momento último , lo que solicita la estructura, entonces este valor calculado “Mu” siempre va ser un valor conocido. Con esta información pasamos a establecer la condición de diseño por el método de resistencia ultima, nos dice que el momento ultimo debe ser menor o igual la capacidad de la sección reducida por el factor de diseño flexión que se conoce como “ ϕM_n ”, cuando ya hemos definido el tamaño de la sección transversal y vamos a asignar una cantidad de acero requerida ,para contrarrestar el momento ultimo y sea se cumpla la condición del momento ultimo igual al factor reducido por la capacidad nominal.

4.3.1 REQUISITOS DE LA NORMA NSR-10

Principalmente nos vamos a enfocar en las especificaciones de la norma colombiana , para el desarrollo del software Pilot Structural. Comencemos con el refuerzo mínimo ,la norma establece una cantidad mínima que se le debe colocar a cualquier sección que este sometida a tracción y lo que busca es que le coloquemos una cantidad de acero necesaria para garantizar la fisuración de la sección que el momento nominal sea mayor que el momento de agrietamiento, se busca que ese momento nominal sea a 1.7 a 2 veces el momento de agrietamiento “Mcr” esto está dado en la norma en el capítulo C , numeral C.10.5.1 entonces se define que el area de acero mínimo es igual a 0.25 por la raíz de la resistencia a la compresión del concreto sobre el esfuerzo de fluencia por el ancho de la viga y por la altura efectiva útil debe ser mayor o igual a 1.4 veces por el ancho de la viga por la altura efectiva útil sobre el esfuerzo de fluencia

$$A_{smin} = \frac{0.25\sqrt{f'_c}}{f_y} * b * d \geq 1.4 \frac{b * d}{f_y}$$

La cantidad de acero mínima la podemos pasar en términos de cuantía , entonces la cuantía lo podemos definir como el area de acero sobre el ancho de la viga y por la altura efectiva útil entonces en términos de cuantía podemos expresarla de la siguiente manera.

$$\rho_{min} = 0.25 \frac{\sqrt{f'_c}}{f_y} \geq \frac{1.4}{f_y}$$

Sí tomamos como ejemplo un material de 21 Mpa para la resistencia a la compresión del concreto y un material del acero de resistencia de 420 Mpa reemplazando en la expresión tenemos un valor de 0.0027 este valor debe ser mayor a 1.4 veces sobre el esfuerzo de fluencia que nos da un valor de 0.0033 , por lo tanto se escoge el valor mayor entonces para la cuantía mínima para estos materiales es de 0.0033 por lo tanto el area de acero mínimo es de 0.0033 por el ancho de la sección

y por la altura efectiva útil , digamos que esto es lo mínimo que debe llevar cualquier sección de concreto a la cual ya le hemos definido su tamaño o dimensiones. En el numeral C.10.5.3 establece que no es necesario colocar a una sección el área de acero mínimo, si el área de acero suministrado es al menos un tercio superior al acero requerido, si tenemos un diámetro de barra que tiene una área en cm^2 podemos tener esta expresión que el #barras es igual al área de acero requerida sobre el área de acero de la barra , siempre tenemos que calcular hacia el número entero mayor , no se permite que sea una barra porque si no le estaríamos proporcionando menos resistencia a la sección esto va pasar en vigas o elementos que tiene poca carga. (Norma Colombiana de Sismorresistencia (NSR-10). (2010). Norma sismorresistente NSR-10: Parte C - Cálculo de estructuras (Capítulo C, sección C.10.5.3).

Otro requisito que menciona la norma es el refuerzo máximo esta dado en el Capítulo C de la norma NSR-10 en el numeral C.10.3.5, este tema se relaciona mucho con el tipo de falla ,tenemos una falla por tracción y una falla por compresión , sabemos que la falla por compresión se genera cuando tenemos mucho acero que no le permite este material fluir , porque antes de que el acero fluya , el concreto se rompe, entonces para evitar la falla por compresión se habla del refuerzo máximo para controlar esa cantidad de acero que le podemos colocar a una sección de concreto reforzado y evitar fallas por compresión, entonces lo que presenta la NSR-10 para evitar la falla por compresión es limitar la cuantía máxima de forma que se genere una deformación del acero a tracción de un valor de 0.005 esto es lo que permite la norma ahora en la actualidad , anteriormente en la NSR-98 limitaba el valor de la deformación a 0.004 , pero hoy en día se puede usar el valor de 0.005 lo cual se le permite a la sección generar más ductilidad , la ductilidad es otro requisito que también se debe cumplir en el diseño y tomar un valor de ϕ de 0.90 por que estamos en el

límite de la falla por tracción con este caso determina que la cuantía máxima es igual al 63% de la cuantía balanceada, la cuantía balanceada se expresa de la siguiente forma.

$$\rho b = 0.85 \frac{f'_c}{f_y} * \beta_i \left(\frac{\epsilon_u}{\epsilon_y + \epsilon_u} \right)$$

4.3.2 PROTECCIÓN DEL ACERO

La norma NSR-10 también especifica los detalles del refuerzo como debe ir constructivamente la colocación del acero y menciona los límites de separación , que las barras de acero no se deben colocar tan juntas por que tendríamos problemas de adherencia del acero con el concreto y si no garantizamos adherencia no podemos diseñar con nada del concreto reforzado, estos límites de separación están dados en el Capítulo C numeral C.7.6, básicamente nos establece que debemos dejar una separación entre barras de acero que es mayor o igual al diámetro de la barra o a 2.50 cm , si tenemos barras de menos de 2.50 cm o una pulgada siempre tenemos que dejar una separación mínima de 2.50 cm, para barras mayores #8, el diámetro va ser la separación que controla , entre más grande la barra , más separación tenemos que dejar, lo que pasa cuando ya sea colocado las barras para que trabajen a tracción estas barras van a generar esfuerzos alrededor del diámetro de la barra porque si no se controla la separación mínima estos esfuerzos se pueden traslapar y puede haber problemas de adherencia , otra condición es si colocamos las barras muy juntas restringe el tamaño máximo del agregado en el concreto entonces al menos dejando como mínimo la separación que establece la norma y la separación de las barras se mide de cara a cara, si tenemos el caso de dos filas de acero en la sección transversal la norma específica que debe tener una separación vertical tiene que ser de 2.50 cm también de cara a cara, la otra condición que limita los detalles del acero de refuerzo , es la protección del acero, se entiende que el acero se debilita a condiciones del medio ambiente se corroe fácilmente entonces se requiere colocar una capa de

concreto o recubrimiento para garantizar que no tenga problemas de corrosión esto está dado en el capítulo 7 de la NSR-10 en el numeral C.7.7, en este capítulo nos menciona las condiciones de detalle que tiene el acero de refuerzo, que va depender de la colocación de las barras y también depende del tipo de elemento. El recubrimiento va a depender de la exposición del elemento estructural , para el caso de las cimentaciones el recubrimiento mínimo será de 7.5 cm si tenemos un concreto solo expuesto al suelo y tenemos barras de #6 a #18 el recubrimiento sube a 5 cm y si tenemos barras #5 o menores se usa un recubrimiento mínimo de 4 cm, estos recubrimientos de 4 y 5 cm la mayoría se usa para elementos vigas y columnas que conforman pórticos.(Norma Colombiana de Sismorresistencia (NSR-10). (2010). Norma sismorresistente NSR-10: Parte C - Cálculo de estructuras (Capítulo C, sección C.7.7).

Es importante definir estas consideraciones que menciona la norma para proteger las barras de refuerzo e incluyendo los estribos , en el capítulo C de la norma NSR-10 del numeral C.10.6 menciona el control de fisuración , que nos dice que el acero no se puede colocar tan separado por que el ancho de la fisura va a ser grande entonces se busca controlar la separación máxima.

4.3.3 CONTROL DE DEFLEXIONES

Este control de deflexiones se realiza con el objetivo para garantizar la rigidez de los elementos como base de los principios del diseño estructural, todo la parte del control de deflexiones está en la norma en el capítulo C , numeral C.9.5 son los requisitos de funcionalidad para hablar de deflexiones la norma nos dice dos condiciones , colocar alturas mínimas o espesores mínimos y que no es necesario calcular deflexiones la otra condición es calculando deflexiones entonces hablamos de compararlas con una deflexión admisible , la deflexión admisible se calcula con cargas de servicio , para el cálculo de alturas mínimas la norma NSR-10 nos presenta unas tablas

en los numerales C.9.5 (a) y C.R.9.5 que nos dan alturas mínimas y la diferencia está en definir si se tiene que limitar las deflexiones ya sea porque la losa o la viga tiene que soportar elementos no estructurales que se pueden dañar si tenemos grandes deflexiones. Para usar estas tablas depende de las condiciones de apoyo del elemento a la cual se le quiere calcular la altura mínima. Norma Colombiana de Sismorresistencia (NSR-10). (2010). Norma sismorresistente NSR-10: Título C - Cálculo de estructuras (Numeral C.9.5.)

4.3.4 CRITERIOS LONGITUD DESARROLLO NSR-10

La NSR-10 nos va a presentar varias condiciones para calcular la longitud de desarrollo, pero hay un principio que establece la norma y es la adherencia, cuando definimos que una barra en tracción está totalmente anclada va a ser cuando la barra desarrolle su máximo esfuerzo de fluencia en una longitud de desarrollo en los cuales esos esfuerzos de contacto garantizan la adherencia.

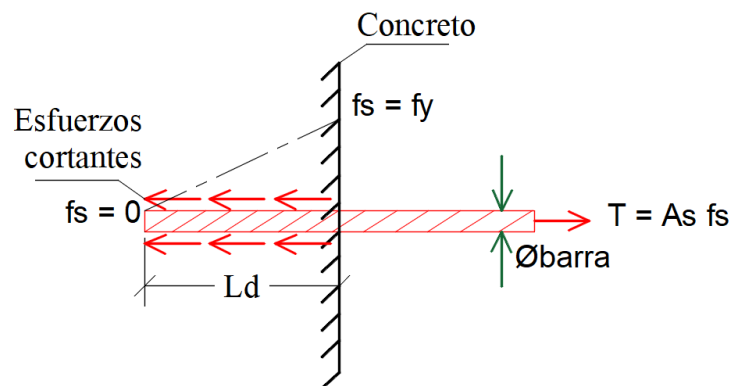


Imagen 16. Adherencia por longitud de desarrollo . Fuente: **Propia**

Como se observa en la imagen , podemos ver el anclaje de la barra con el concreto, por otro lado esta barra genera una fuerza de tensión que va ser igual al area del acero por un esfuerzo en el acero , si garantizamos que una longitud de desarrollo L_d , se basa en cuanto está el acero anclado

en el elemento de concreto y si esa longitud de desarrollo es tal que la distribución de esfuerzos en el acero aumenta de modo que tenemos un esfuerzo igual a cero y justo en la sección crítica de la cara del apoyo o donde termina la superficie del concreto ese esfuerzo del acero es igual al esfuerzo de fluencia entonces garantizamos que la barra está perfectamente anclada ese anclaje se va garantizar por unos esfuerzos cortantes que son los que van a garantizar que la barra se salga del elemento de concreto, estos esfuerzos cortantes se van a ir desarrollar en la superficie en contacto entre el concreto y acero , esto se define como el anclaje por adherencia.(Norma Colombiana de Sismorresistencia (NSR-10). (2010). Norma sismorresistente NSR-10: Capítulo C - Cálculo de estructuras (Numeral C.12.2, Desarrollo de barras corrugadas de alambres corrugados a tracción).)

La NSR-10 nos va a presentar varias condiciones para calcular la longitud de desarrollo sometidas a tracción , se va a utilizar una ecuación general y tiene la siguiente expresión.

$$l_d = \left(\frac{f_y}{1.1\gamma\sqrt{f'_c}} \frac{\psi_t \psi_e \psi_s}{\left(\frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \right)} \right) d_b$$

La norma NSR-10 tiene simplificado las fórmulas para el cálculo de la longitud de desarrollo de barras de acero en elementos de concreto reforzado, en función de la resistencia del concreto y del acero, el diámetro de la barra y el tipo de anclaje, según lo estipulado en el capítulo C.12 de la norma NSR-10, tenemos que la sección crítica es la sección de la viga en la que el acero experimenta el mayor esfuerzo debido al máximo momento. También la norma establece que , como mínimo la longitud de desarrollo debe ser igual o superior a 30 cm. No obstante, es posible reducir esta longitud de desarrollo “Ld” con esta ecuación general que se encuentra en el índice C.12.2.3 a continuación se va a mencionar los parámetros de la ecuación.

- **PARAMETROS DE CÁLCULO ECUACION LONGITUD DESARROLLO**

f'_c : Resistencia a la compresión del concreto.

f_y : Resistencia a la fluencia del acero.

λ : Factor por peso del concreto, este factor toma dos valores para el caso de un concreto aligerado su valor es de 0.75 y si es un concreto normal el valor es de 1.0

Ψ_t : Factor colocación del acero, este factor va a variar para los aceros negativos y positivos , por que dependen de la cantidad según la altura del concreto debajo de las barras a desarrollar, si la viga tiene una altura suficiente mínimo de 30 cm en este caso no se tiene problema es todo el concreto que esta debajo , si esa altura del concreto es mayor a 30 cm tenemos un valor de 1.3, pero si esa altura es menor a 30 cm , entonces tiene un valor a 1.0.

Ψ_e : Factor de recubrimiento epóxico, este factor tiene la siguiente condición cuando tenemos recubrimiento epóxico podemos tener un factor igual a 1.5 o 1.2 colocar recubrimiento epóxico no es muy común si no se usa recubrimiento epóxico es igual a 1.0

Ψ_s : Factor del diámetro del refuerzo. Este factor es función en el diámetro de la barra para barras #2 hasta #6 tiene un factor igual a 0.8 y para barras #7 y mayores tiene un factor igual a 1.0 , entre más grande el diámetro de la barra ,va a requerir más longitud de desarrollo

C_b : Distancia mínima entre barras de refuerzo o distancia de borde.

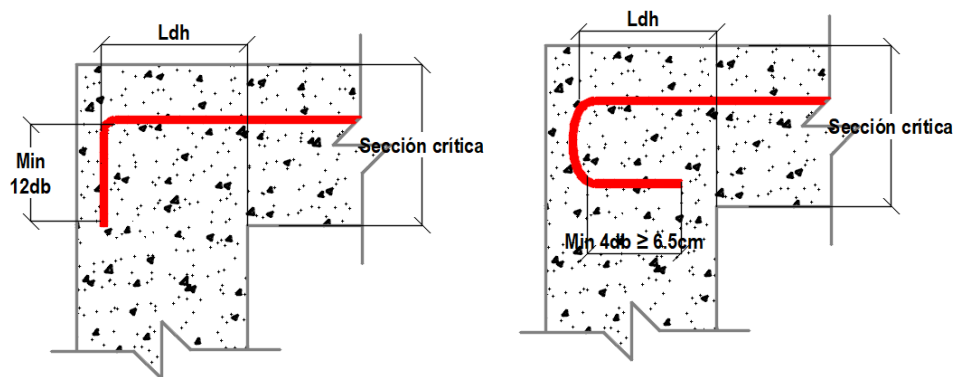
K_{tr} : La norma permite considerar un valor de 0 como una opción conservadora.

d_b : Diámetro de la barra de refuerzo.

La norma establece que, como mínimo, la longitud de desarrollo debe ser igual o superior a 30 cm. No obstante, es posible reducir esta longitud utilizando la formula general para calcular la longitud de desarrollo. Hay factores que afectan la longitud de desarrollo, primeramente, si tenemos mayor resistencia del concreto, menor será la longitud de desarrollo, también si ponemos poco recubrimiento, la viga puede fallar por adherencia, la colocación de las barras no se puede poner muy juntas, porque puede fallar por adherencia, el refuerzo en exceso, si hay mayor cantidad de refuerzo menor será la longitud de desarrollo.

4.3.5 CONDICIONES PARA GARANTIZAR ADHERENCIA

Sí la barra de acero se coloca de manera continua, se debe garantizar que la longitud mínima de desarrollo esté presente en ambos extremos, la colocación de ganchos puede ser de 90° o 180°, la norma establece que se debe garantizar una longitud mínima de desarrollo “ L_{dh} ” para los ganchos, la cual debe ser menor que la longitud de desarrollo de la barra. En el caso de la colocación de dobles ganchos de lado a lado, se debe garantizar una longitud mínima de desarrollo “ L_{dh} ” en ambos extremos de la sección crítica. Esta longitud “ L_{dh} ” debe ser siempre menor que la longitud de anclaje de la barra.



4.3.6 LONGITUD DESARROLLO PARA GANCHOS A TRACCIÓN

La norma establece los requisitos para los ganchos estándar sometidos a tracción en el índice del capítulo C, numeral C.12.5. menciona que existen dos tipos de ganchos a 90° y a 180°, para el gancho de 180°, deben cumplirse las siguientes condiciones, el diámetro de doblez debe cumplir con las condiciones mínimas especificadas en la norma, la extensión mínima, medida desde el final del diámetro de doblez hasta el extremo del gancho, debe ser al menos 4 veces el diámetro de la barra o , como mínimo, 6.5 cm. Para el gancho de 90°, se deben cumplir las siguientes condiciones, primero extensión mínima, al finalizar el doblado de la barra, la extensión mínima deberá ser 12 veces el diámetro de la barra, lo otro es la longitud de desarrollo con ganchos “Ldh”, según lo indicado en el numeral C.12.5.3 de la normal, la longitud de desarrollo con ganchos debe medirse desde el extremo del gancho y debe ser igual o mayor a 8 veces el diámetro de la barra o 15 cm, esta longitud debe ser suficiente para llegar hasta la sección crítica de la barra, la fórmula para calcular la longitud de desarrollo con ganchos.

$$(0.24 \Psi_e f_y / \gamma \sqrt{f'_c}) d b$$

El diámetro de doblado varía según el tipo de barra y se especifica de la siguiente manera para barras de #3 a #8, el diámetro de doblado será igual a 6 veces el diámetro de la barra, para barras de #9 a #11, el diámetro de doblado será igual a 8 veces el diámetro de la barra, para barras de #14 a #18, el diámetro de doblado será igual a 10 veces el diámetro de la barra.

4.3.7 DISEÑO A CORTANTE

Como anteriormente en el diseño a flexión se utilizó el método de resistencia ultima, entonces para el diseño a cortante también lo vamos a tener en cuenta, el diseño a cortante es fundamental porque la falla asociada a este efecto es considerada una falla frágil. Este tipo de falla ocurre de manera repentina y sin señales de aviso, lo cual es muy riesgoso. Por ello, en el diseño estructural de una viga, se busca evitar la falla por cortante. En una sección transversal, los esfuerzos son una combinación de esfuerzos cortantes y normales. En el eje neutro el esfuerzo cortante alcanza su valor máximo, mientras que el esfuerzo normal es cero. Esta condición permite que los esfuerzos principales se ubiquen en un plano de 45° . (McCormac and Brown 2018)

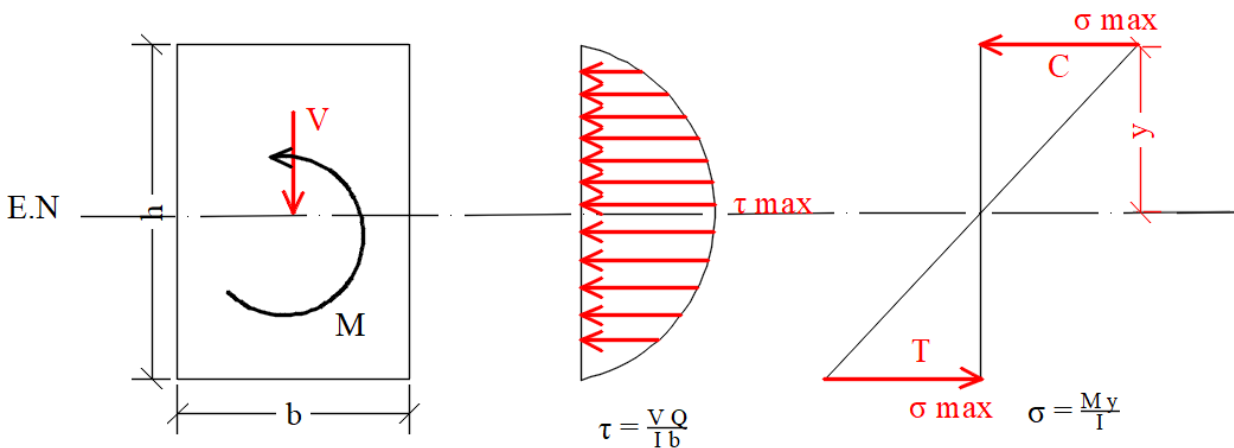


Ilustración 20. Comportamiento de esfuerzos cortantes y normales en una sección. Fuente: Propia

compresión o en la fibra inferior a tensión y ese esfuerzo se calcula como el momento que tiene la sección por “y” que es la distancia del eje neutro hasta donde el esfuerzo máximo sobre la inercia. En resistencia de materiales se analizó este comportamiento a un estado de esfuerzos que es el producto de la combinación de los esfuerzos cortantes y esfuerzos normales

4.3.8 FALLA A CORTANTE

En el diseño de vigas de concreto reforzado, se busca que la viga falle por flexión, lo que es una falla dúctil, en lugar de fallar por cortante, que es una falla frágil. Esta última se considera frágil por que genera tensiones diagonales. Este tipo de falla no es deseable en el diseño. En los apoyos de una viga tenemos los máximos esfuerzos a cortante entonces cerca a los apoyos vamos observar fisuras por cortante que van a tener una trayectoria diagonal , si recordamos el concepto de diseño de concreto reforzado es reforzar el concreto , donde el concreto es débil una alternativa es colocar los estribos inclinados pero no es practico en obra, otra solución se podría es colocar los estribos perpendiculares al eje de la viga y colocarlos tan juntos como sea necesario para disminuir el efecto de esa falla de tracción diagonal entonces se entra a controlar la separación de los estribos perpendiculares para contrarrestar la falla , estos estribos son elementos que contrarrestara la falla por cortante. Lo ideal es colocar estribos perpendiculares al eje de la viga y ubicarlos a una separación mínima necesaria para deducir el efecto de la falla por tracción diagonal. El comportamiento de las vigas de concreto reforzado depende de la carga distribuida a lo largo de toda la longitud de la viga. Los estribos tienen un area aferente que corresponde a la separación entre ellos, y la cortante que puede ser absorbida por los estribos está relacionada con su área. La cortante disminuye a lo largo de la cara de la sección, por lo que el estribo debe contar con al menos dos ramas de confinamiento para ofrecer resistencia a la cortante. Rochel Awad, R. (2007).

Capítulo 9: Diseño a tensiones cortantes. En Hormigón reforzado)

4.3.9 REQUISITOS DE LA NSR-10

En el capítulo C, numeral C.11.1 se define el diseño a cortante y torsión , usando el método de la resistencia ultima como condición de diseño es que la sollicitación que es el cortante ultimo “Vu” debe ser menor o igual que la capacidad de la sección “ ϕV_n ”, donde la capacidad de la sección va a ser igual a lo que aporta el concreto “Vc” más lo que aporta el acero de refuerzo transversal “Vs”, para el caso del diseño a cortante el valor de “ ϕ ” se toma como 0.75 tanto para cortante y torsión, ya que la norma reduce la capacidad de diseño con el objetivo de garantizar que el elemento falle primero por flexión antes que por cortante. En el numeral C.11.1.3 la norma menciona como calcular el cortante sollicitado “Vu” , tenemos la cortante máxima que es al eje del apoyo “Vmax” y “Vud” que es la cortante de diseño a una distancia “d” , de la cara del apoyo, como evidentemente el cortante de diseño es menor que la cortante máxima la norma permite diseñar la viga con el cortante último, pero debe cumplir dos condiciones que entre la cara del apoyo y la distancia “d” no debe haber una carga puntual y la carga puntual debe ubicarse más allá de dicha distancia “d” donde la variable “d” es la altura efectiva útil entonces la norma permite diseñar con el cortante ultimo que es menor al cortante al eje, la fórmula para expresar la condición general de diseño a cortante es la siguiente.

$$V_u \leq \phi V_c + \phi V_s$$

4.4. RESISTENCIA A CORTANTE DEL CONCRETO

Las condiciones de diseño están especificadas en el capítulo C , numeral C.11.2 que menciona la resistencia a cortante del concreto se define que para vigas esa resistencia se expresa de la siguiente manera.

$$V_c = 0.17 \gamma \sqrt{f'_c} * b * d$$

4.4.1 RESISTENCIA A CORTANTE DEL ACERO

Para el caso de la resistencia a cortante del acero está en el capítulo C de la norma NSR-10 en el numeral C.11.4 , tenemos primero que el esfuerzo de fluencia debe ser menor o igual a 420 Mpa , ya sea para estribos inclinados, estribos perpendiculares, estribos en espiral o en otros tipos de estribos , siempre el esfuerzo de fluencia debe ser menor o igual a 420 Mpa.

4.4.2 LIMITES DE SEPARACIÓN

Si tenemos estribos perpendiculares se establece que la separación debe ser menor o igual a la mínima de la altura efectiva útil sobre dos o 60 cm, pero si el cortante que debe resistir el acero es mayor al 33% de la resistencia a la compresión del concreto por el ancho y por la altura efectiva útil , esta separación se reduce va ser la mínima entre la altura efectiva útil sobre cuatro y 30 cm , se reduce totalmente la mitad solo si el concreto necesita una cantidad importante respecto a la capacidad del acero. Cuando es para estribos perpendiculares se calcula con la siguiente expresión

$$S \leq \left\{ \begin{array}{c} \frac{d}{2} \\ 60cm \end{array} \right\}$$

$$\text{Sí } V_s > 0.33 \sqrt{f'c} bd \therefore S \leq \left\{ \begin{array}{c} \frac{d}{4} \\ 30cm \end{array} \right\}$$

La norma establece estas dos condiciones para calcular la separación máxima en el capítulo C , numeral 11.4.5 para los límites de separación de estribos perpendiculares.

4.4.3 REFUERZO MÍNIMO

El refuerzo mínimo esta dado en el capítulo C de la NSR-10 en el numeral C.11.4.6 , y se estable tres condiciones y son las básicas para diseñar , la primera que el cortante ultimo de diseño sea mayor que la capacidad del concreto a cortante y la segunda es que el cortante ultimo sea menor que la capacidad del concreto a cortante, pero también que el cortante de diseño sea mayor que la mitad de la capacidad del concreto a cortante y la última condición es que el cortante ultimo de diseño sea menor. Las condiciones básicas para diseñar son las siguientes expresiones.

- **CONDICIONES DE DISEÑO**

- $V_u > \phi V_c$
- $\frac{\phi V_c}{2} < V_u < \phi V_c$
- $V_u < \frac{\phi V_c}{2}$

Estas son las tres condiciones que especifica la norma para realizar el diseño de una sección y definir cuando se coloca refuerzo mínimo , para iniciar se toma el cortante ultimo máximo y se compara en las tres condiciones , la primera condición nos dice que el cortante ultimo que presenta la viga es mayor que lo que resiste el concreto a cortante entonces necesita que el acero le ayude y se requiere diseñar el acero transversal, cuando hablamos de calcular el acero aportara resistencia a la cortante y es igual a lo que requiere la viga menos lo que aporta el concreto eso es lo que tiene que tomar el acero transversal y se expresa de la siguiente manera.

$$\phi V_s = V_u - \phi V_c$$

La segunda condición nos dice que el cortante de diseño es menor que ϕV_c entonces en teoría no necesita refuerzo transversal , pero es mayor el cortante ultimo que la mitad de lo que resiste el

concreto entonces si estamos en esta condición hay que colocar estribos area de acero mínimo y por último la condición que no se requiere poner estribos por que el cortante es menor que la mitad de lo que resiste el concreto en este caso no se requiere colocar estribos pero en teoría , en la práctica siempre se va requerir confinar una cantidad de estribos. Estas son las condiciones básicas de cómo debemos diseñar una sección de concreto reforzado para cortante. El refuerzo transversal se debe llevar por lo menos hasta una sección donde el cortante de diseño sea igual a la mitad de la resistencia del concreto a cortante

4.4.4 DISEÑAR ESTRIBOS

Lo que debe resistir el acero va ser igual al cortante de diseño menos lo que resiste el concreto y luego “ V_s ” lo que puede resistir el acero lo determinamos por el area de acero por el esfuerzo de fluencia sobre la separación y por la altura efectiva útil , pero esa area de acero se conoce por la area de estribo que se escoge es la suma del área del número de ramas del estribo, entonces en teoría se calcula el area de acero requerida que es igual al cortante que se requiere por la separación sobre el esfuerzo de fluencia por la altura efectiva útil pero en la práctica se busca calcular más la separación se parte de conocer que es “ A_v ” es conocido que es igual a dos veces el area del estribo y con eso la separación requerida es igual a una area de acero conocido por el esfuerzo de fluencia por la altura efectiva útil sobre la resistencia a cortante de los estribos.(Colombia. (2010). Norma Sismorresistente Colombiana 2010 (NSR-10), capítulo C. Departamento Administrativo de la Función Pública.)

4.4.5 CONTROL TAMAÑO DE LA SECCIÓN

La norma NSR-10 menciona en el capítulo C en el numeral C.11.7.9 , el control del tamaño de la sección , en esta parte la norma establece que se debe verificar unas condiciones para el control del tamaño, si la resistencia del acero es mayor que 0.66 por la raíz de la resistencia a la compresión del concreto por el ancho de la sección y por la altura efectiva útil esto nos quiere decir que la sección transversal de la viga es muy pequeña si lo que requiere el acero es menor o igual la sección es adecuada. Finalmente, estos serían los requisitos mínimos para el cálculo del diseño a cortante en vigas.Colombia. (2010). Norma Sismorresistente Colombiana 2010 (NSR-10), capítulo C, numeral C.11.4.6. Departamento Administrativo de la Función Pública.

5. MARCO METODOLOGICO

5.1. DESARROLLO DEL SOFTWARE PILOT STRUCTURAL

El software Pilot Structural , principalmente esta desarrollado en un entorno de desarrollo integrado como también se conoce un “IDE” es una herramienta que permite escribir la lógica del código en un editor, el editor de código que se utilizó para el desarrollo del software es la herramienta Visual Studio Code, esta herramienta se destaca por su flexibilidad y capacidad para trabajar con múltiples lenguajes de programación, Visual Studio Code lo convierte en una herramienta ideal para desarrolladores que buscan un entorno de trabajo versátil y eficiente, para desarrollar el software se utilizó el lenguaje de programación Python , porque es un lenguaje que tiene una sintaxis clara e intuitiva y fácil de aprender es una tecnología potente para la resolución de problemas en diversas áreas, hoy en día se ha visto como Python está implicado en la ingeniería civil debido a su gran capacidad que tiene para la aplicación en el análisis y diseño estructural esta herramienta tecnológica le permite a los ingenieros crear algoritmos para optimizar diseños ,

realizar análisis estructurales avanzados y crear soluciones eficientes para los proyectos de construcción, Python es una de las mejores opciones para el desarrollo de software , por su simple lógica que maneja es uno de los lenguajes de programación más simplificados, este lenguaje proporciona una gran variedad de librerías que son estructuras de códigos ya definidos que se empleara en el desarrollo del software , es importante conocer las librerías que se van usar dentro del software , porque eso depende como será su aplicación y por lo tanto el alcance del desarrollo del software Pilot Structural para el diseño de vigas de concreto reforzado , se utilizó varias librerías de acuerdo a las necesidades específicas del alcance, estas librerías fueron seleccionadas para cada etapa del desarrollo del software , una de las librerías principales que se conocen en Python es la librería Tkinter, lo cual fue elegida para crear el primer espacio de trabajo o Framework que ya tiene creado estructuras de códigos para hacer más fácil el desarrollo de los programas pero su principal uso es para crear interfaz gráfica de usuario es una librería sencilla sin necesidad de conocimientos avanzados de programación, estas librerías como, numpy , math , pandas, scipy , matplotlib también se incorporaron en el software y cada una cumple una función específica durante el proceso de desarrollo, desde el cálculo de expresiones matemáticas y la optimización de datos hasta generar gráficos interactivos, el uso de estas librerías depende como será su aplicación en el software, para aplicar estas librerías se requiere combinar estructuras de código para su funcionamiento , estas estructuras ayudan a organizar mejor la lógica del código y los tipos de datos que son necesarios para ejecutar las tareas específicas que el programa hace internamente, hay que aclarar que las estructuras de códigos y tipos de datos son los principios o las bases para la programación orientada a objetos, se podría decir que cada funcionalidad que ejecuta el software puede definirse como un objeto , ya que los objetos orientados en la programación determinan el comportamiento del flujo del software.

5.1.2 CREACIÓN DE INTERFAZ GRAFICA DE USUARIO

En esta etapa de desarrollo del software para el análisis estructural y diseño de vigas de concreto reforzado, se presenta la creación de la interfaz gráfica de usuario y como está estructurado todos sus elementos que lo conforma, estos elementos se conocen como widgets que se puede representar como objetos orientados a la programación, todo elemento que esta puesto en la estructura de la interfaz gráfica se comporta como un objeto orientado a la programación cada objeto cumple una funcionalidad especifica en la interfaz, podemos decir que un objeto es una estructura lógica que permite realizar múltiples acciones con sus propios métodos y propiedades. La programación orientada a objetos se involucró totalmente en el desarrollo de este software. Para crear la interfaz se utilizó la librería Tkinter que es un Framework de Python a continuación se muestra la imagen como está configurado la interfaz gráfica de usuario de Pilot Structural.

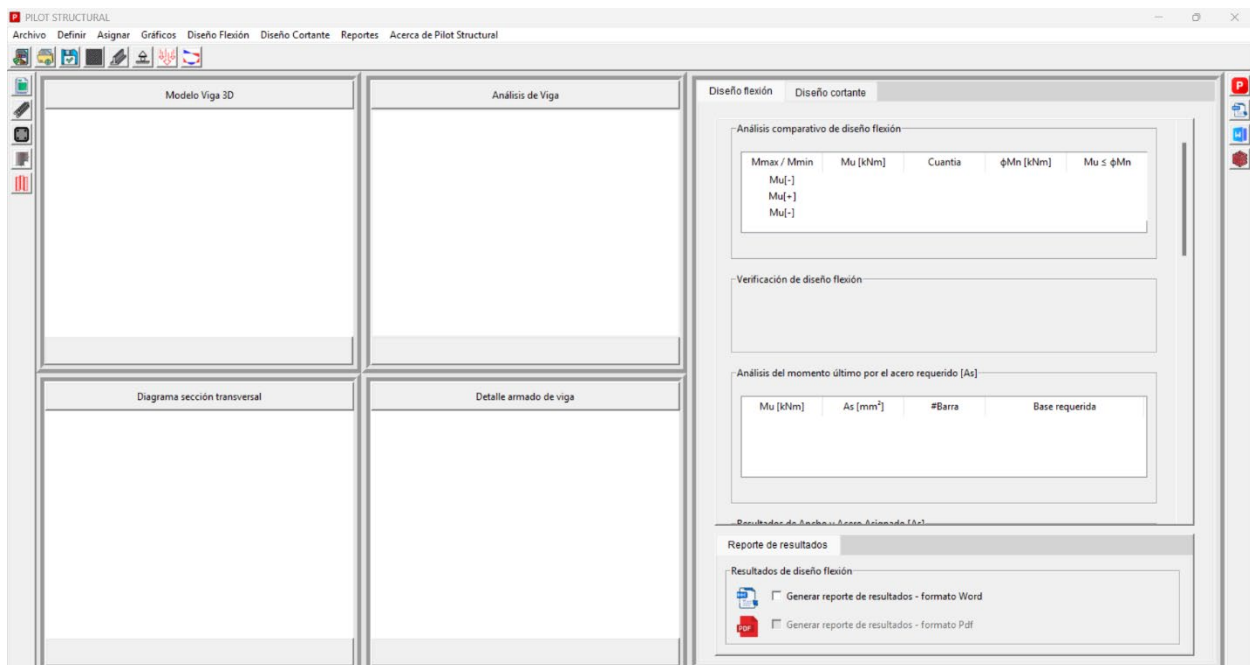


Ilustración 21. Interfaz gráfica de usuario del software Pilot Structural. Fuente: Propia

5.1.3 CONFIGURACIÓN DE LA DE INTERFAZ GRÁFICA

La interfaz gráfica de Pilot Structural principalmente tiene una estructura configurada para ofrecer al usuario un entorno intuitivo y con herramientas funcionales, facilitando la automatización de los procesos y cálculos que hace el software, en la imagen 19 se puede observar todos los objetos que se han incorporado en la interfaz, tiene diferentes “Frames” , los Frames son objetos que se definen como Widgets , la función que tienen los Frames es de organizar la interfaz gráfica en secciones y también de agrupar en un contenedor otros objetos.

- **BARRA DE MENÚ PRINCIPAL**

En la parte superior de la interfaz de Pilot Structural el usuario encontrara la barra de menú, esta barra contiene los principales módulos del software cada módulo realiza una funcionalidad específica y configuraciones. Hay que aclarar que en la barra de menú principal cada módulo permite acceder a distintas funciones del software, cada uno de los cuales despliega una lista de opciones que permite realizar configuraciones específicas en el programa, los módulos ya tienen estructurado un orden establecido para realizar los procedimientos y del funcionamiento del software y están distribuidos en categorías.

Módulo de archivo (*Configuración 1*) En este módulo gestiona las configuraciones previas, para crear un nuevo modelo ,configuración del sistema de unidades en este caso el programa ya tiene definido un sistema de unidades fijo , también permite configurar los materiales disponibles del concreto y acero.

Módulo de definir (*Configuración 2*) En este módulo gestiona las configuraciones de los materiales y sus propiedades mecánicas , también le permite configurar las dimensiones de la sección transversal.

Módulo de asignar *(Configuración 3)* En este módulo gestiona las configuraciones del tipo de apoyo para el análisis estructural y también asignar cargas , depende cual elemento analizara si es una viga apoyada o empotrada el usuario puede escoger el tipo de apoyo según el comportamiento estructural que definió en el nuevo modelo. Por otro lado, también permite realizar configuraciones para asignar cargas, el software Pilot Structural se centra en las cargas gravitacionales para vigas que tengan un comportamiento estáticamente determinado es decir son vigas de una luz , le permite al usuario ingresar datos de las dimensiones de la viga y también ingresar datos de las cargas. Se recomienda que los datos de las cargas que se ingresan para la carga viva y carga muerta se obtengan de un avalúo de cargas para que sea más preciso el procedimiento posterior al de diseño de las vigas.

Módulo de gráficos *(Configuración 4)* En este módulo gestiona las configuraciones de los gráficos permite visualizar los gráficos de las fuerza cortante y momento flector y exportar datos de los gráficos a una hoja de Excel , por otro lado, el software tiene una funcionalidad extra para configurar la visualización de los gráficos en 2D Y 3D , la opción se llama panel modelado 3D , le permite al usuario configurar los detalles del armado transversal y longitudinal de una sección transversal en la vista 2D Y en la vista 3D el modelo de la viga en tres dimensiones con la disposición de los aceros transversal y longitudinal

Módulo de diseño a flexión *(Configuración 5)* En este módulo gestiona las configuraciones del diseño a flexión para el análisis estructural de vigas que tienen un sistema estáticamente determinado, este módulo despliega una lista de opciones que son complemento para el diseño a flexión , esta lista tiene ya estructurado un orden secuencial en el cual se va a realizar los procedimientos y cálculos dependiendo el caso. En este módulo el usuario puede comenzar a configurar los cálculos preliminares para el diseño a flexión siguiendo la metodología de

enseñanza utilizada por los docentes de la rama estructural, luego de los cálculos preliminares el software le permite al usuario configurar las opciones de asignar aceros, calcular el momento de agrietamiento, calcular la longitud de desarrollo , todos estos procedimientos del cálculo de diseño a flexión se realizan de acuerdo con los requisitos de la norma NSR-10

Módulo de diseño a cortante (*Configuración 6*) En este módulo gestiona las configuraciones del diseño a cortante como primera parte está estructurado en pestañas , la primera pestaña tenemos las generalidades del diseño a cortante y los requisitos de la norma NSR-10 , para la segunda pestaña tenemos los cálculos preliminares para el diseño cortante , como visualizar la gráfica de cortante , revisar el estribo de diseño , calcular el cortante de diseño y demás factores que se requieren para el diseño, por otro lado tiene otra pestaña para configurar la optimización de los estribos , en esta parte el usuario puede revisar la separación de los estribos y verificar la resistencia a cortante por capacidad , el usuario puede ir interpretando los datos calculados por el software mediante tablas.

Módulo de reportes (*Configuración 7*) En este módulo gestiona las configuraciones de reportes se despliega una lista de dos opciones, que permite generar informes de los análisis y diseños realizados en el software Pilot Structural.

Módulo de acerca de Pilot Structural (*Configuración 8*) En este módulo gestiona la información sobre el software, y el desarrollador de Pilot Structural.

5.1.4 PANEL DE VISUALIZACIÓN VENTANA PRINCIPAL

En esta parte de cómo es la estructura de la interfaz gráfica de Pilot Structural , se diseñó unos paneles de visualización en la ventana principal , después de acceder a las herramientas de la barra de menú, los resultados y las configuraciones se visualizan en distintas secciones de la interfaz que siguen un orden establecido.

Panel Modelo Viga 3D (*Panel 1*) En este panel de modelo viga 3D tenemos la representación gráfica tridimensional de una viga que se visualiza configurando las opciones del menú en la categoría de archivo se despliega la lista de opciones y el usuario puede encontrar la opción nuevo siguiendo las configuraciones , se podría visualizar el modelo de una viga tridimensional.

Panel Análisis de viga (*Panel 2*) En este panel de análisis de viga , tenemos la representación gráfica del tipo de viga , que en este caso el software hace el análisis estructural para vigas que tienen un sistema estáticamente determinado , el usuario puede elegir dos tipos de vigas ,que son una viga simplemente apoyada o una viga doblemente empotrada , estas vigas tienen un sistema de equilibrio determinado por que el programa solo hace el análisis estructural para vigas con una única luz no para luces continuas o sistemas hiperestático, el usuario puede interpretar los datos calculados de las vigas , como la sollicitación de las cargas , la reacción de los apoyos, la reacción de los momentos de empotramiento y las características de la sección de la viga como su longitud y dimensiones para poder visualizar el análisis de la viga el usuario tiene que acceder antes a las configuraciones de la categoría asignar que se encuentra en la barra de menú principal.

Panel Diagrama sección transversal (*Panel 3*) En este panel del diagrama sección transversal tenemos la representación gráfica de un diagrama en vista en corte de la sección transversal de la viga, el software solo trabaja con secciones rectangulares o cuadradas, en este panel el usuario puede visualizar el tamaño de la sección, el material de la viga, dependiendo de cual resistencia a la compresión del concreto se elija para el diseño, para visualizar esta gráfica el usuario tendrá que ir a la barra de menú y acceder a las opciones de la categoría definir, en las opciones encontrara para configurar los materiales de la sección de la viga y sus propiedades mecánicas, también para configurar las propiedades geométricas de la sección transversal.

Panel Detalle armado de viga (*Panel 4*) En este panel del detalle armado de viga tenemos la presentación gráfica de un diagrama en vista en corte de la sección transversal de la viga, también se puede visualizar el detalle del refuerzo longitudinal y transversal de la viga, el usuario puede ir interpretando la información que presenta el panel, la cantidad de acero requerida para la sección como está la disposición de las barras, cuál sería el estribo de diseño, todas estas características pueden ser configuradas en el panel, siempre y cuando el usuario acceda previamente al menú de barra en la categoría de gráficos, al desplegar esta categoría se presenta una lista de opciones entre ellas, la opción de la visualización de los gráficos de fuerza cortante y momento flector y la opción del panel de modelado, este es el paso previo que se necesita para configurar la visualización del detalle de armado de la sección de la viga. Para una correcta configuración el usuario debe ingresar primero a la categoría de gráficos que está en la barra de menú principal y luego desplegar la lista de opciones que tiene la categoría y acceder a la opción de panel modelado y seguir con las configuraciones que el programa le entrega al usuario.

5.1.5 TOOLBARS DE HERRAMIENTAS

Los toolbars son unos Frames o contenedores que contienen botones , estos botones ejecutan directamente las configuraciones de la barra de menú principal , facilitando el acceso rápido a las funcionalidades sin necesidad de navegar por el menú.

Toolbar horizontal y lateral de herramientas Este toolbar está ubicado debajo de la barra de menú principal , su función es ofrecer al usuario accesos directos en los botones a las configuraciones dentro del software , esto está diseñado para agilizar el flujo de trabajo y evitando que el usuario tenga que acceder a las opciones del menú principal , como este toolbar contiene un grupo de botones que su función es ejecutar las configuraciones de las opciones del menú principal por otro lado también tenemos toolbar en los laterales izquierdo y derecho también están diseñados para mejorar la accesibilidad del usuario , permitiendo a los usuarios ejecutar las configuraciones. Los botones que compone el toolbar horizontal están para ejecutar el análisis estructural de vigas, le ofrece al usuario configurar el tipo de viga , definir el tipo de apoyo, asignar las cargas, también le permite configurar las dimensiones de la viga, la selección de los materiales del concreto y acero y por último la visualización de los gráficos de la fuerza cortante y momento flector. En los toolbar laterales de herramientas están diseñados para complementar las funcionalidades del toolbar horizontal se enfoca en ejecutar procedimientos del diseño a flexión y diseño cortante también incluye una función extra del software Pilot Structural para generar gráficos en 2D y 3D esta funcionalidad extra le permite al usuario visualizar la sección transversal como bidimensional y la viga en un modelo tridimensional detallado , el usuario puede configurar como será la disposición de los aceros longitudinal y transversal. El software también hace la automatización de reportes o informes de los cálculos y procedimientos realizados por el software.

5.1.6 NOTEBOOK VISUALIZACIÓN DE DATOS

Para el desarrollo del software en la interfaz gráfica de usuario se incluyeron más objetos o widgets como lo son los notebooks que son pestañas interactivas que organizan la estructura de los datos , se diseñó esto para mejorar la experiencia del usuario esto permite visualizar la información de los datos cálculos obtenidos del diseño flexión y diseño cortante.

Notebook de diseño flexión (*Pestaña 1*) En esta pestaña titulada con el nombre de diseño flexión está estructurado para visualizar los datos calculados que se obtienen de las funcionalidades del software , presenta unas tablas para ver el análisis comparativo de diseño a flexión, donde se revisan los datos calculados de los momentos últimos , la cuantía de refuerzo, la capacidad de momento nominal y la verificación de diseño si el momento último es menor o igual a la resistencia de capacidad nominal, en esta pestaña se describe también verificaciones si el diseño es óptimo y cumple con los requisitos de resistencia , también el usuario puede ir viendo otros aspectos en la pestaña como el ancho mínimo de la sección transversal , los aceros asignar para resistir los momentos de diseño , el cálculo del refuerzo mínimo o momento de agrietamiento, y finalmente el cálculo de los requisitos mínimos para la longitud de desarrollo.

Notebook de diseño cortante (*Pestaña 2*) En esta pestaña con el nombre de diseño cortante está estructurado para visualizar los datos calculados que se obtienen de los procedimientos , en esta pestaña presenta unas tablas con los valores y parámetros que se calculan en el diseño cortante , el software le muestra al usuario la verificación del análisis por resistencia a cortante, el cálculo de la separación máxima de los estribos según la NSR-10, el análisis de verificación de capacidad de resistencia a cortante, para esto se diseñó los notebook para que el usuario interprete los resultados bajo los criterios de resistencia a cortante.

5.1.7 IMPLEMENTACIÓN DE LIBRERIAS PYTHON

En el desarrollo del software Pilot Structural , su estructura de código fuente se basa en el lenguaje de programación Python se ha utilizado varias librerías en Python que permite la creación de la interfaz gráfica y las funcionalidades que son el flujo de los procesos que el software hace en su sistema de procedimientos a continuación se menciona las librerías que se implementaron en el desarrollo del software Pilot Structural.

Librerías estándar de Python (*math , os , time , datetime , threading , platform*), estas librerías son utilizadas para cálculos matemáticos, manipulación de archivos y control de sistema operativo.

Librerías framework (*tkinter , ttk , messagebox , filedialog , toplevel*), estas librerías son necesarias para la construcción de la interfaz gráfica de usuario (GUI)

Librerías visualización de datos y gráficos (*pillow , numpy , matplotlib , mpl_toolkits.mplot3d*), estas librerías son utilizadas para el procesamiento de imágenes, generar gráficos bidimensional y tridimensional y visualizar datos de procedimientos matemáticos complejos

Librerías para métodos numéricos (*scipy , scipy.interpolate , cubicspline*) estas librerías son utilizadas para métodos numéricos y permite hacer interpolación y ajustes de graficas para mejorar la precisión de los datos.

Librerías para generación de documentos (*python-docx , subprocess , docx.shared.inches*) estas librerías son utilizadas para la generación automática de documentos de reportes en formato Word.

5.1.8 LIMITACIONES DEL SOFTWARE PILOT STRUCTURAL

Durante la planificación del desarrollo del software Pilot Structural se definieron objetivos del alcance de este estudio de investigación de la construcción de un software educativo en Python para el análisis estructural y diseño de vigas de concreto reforzado a pesar de que es una programa de innovación tecnológica, presenta ciertas limitaciones que vamos a mencionar, en primer lugar el software está diseñado específicamente para el análisis estructural de vigas que tienen un comportamiento de un sistema de equilibrio determinado por ejemplo vigas de una sola luz, esto implica que el software no calcula el análisis de estructuras que tengan un comportamiento de un sistema indeterminado como vigas continuas o de más luces, en la realidad las estructuras de concreto reforzado como los sistemas de pórticos o sistemas combinados son estructuras que presentan un comportamiento indeterminado por el número de vigas continuas que está compuesta la estructura, por el análisis estructural podemos idealizar que en un sistema de pórtico tiene un comportamiento hiperestático por el grado de indeterminación que tiene la estructura, al contrario si se hace la idealización de solo una viga simplemente apoyada o doblemente empotrada de una sola luz, estas estructuras se comportan como un sistema de equilibrio determinado por la simple simetría del cálculo entonces el software solo aplica el cálculo para vigas de una única luz para este caso se cumple las condiciones estáticas que son el número de reacciones externas menos el número de ecuaciones de equilibrio, entonces depende como está configurada la estructura podemos analizar su comportamiento si es un sistema hiperestático o un sistema estáticamente determinado otra limitación del software es que solo realiza el cálculo y diseño para esfuerzos a flexión y cortante sin tener en cuenta otros efectos como el diseño a torsión, además el software no contempla el análisis de otros elementos estructurales distintos de las vigas de concreto reforzado.

5.1.9 ETAPAS DE DESARROLLO DEL SOFTWARE PILOT STRUCTURAL

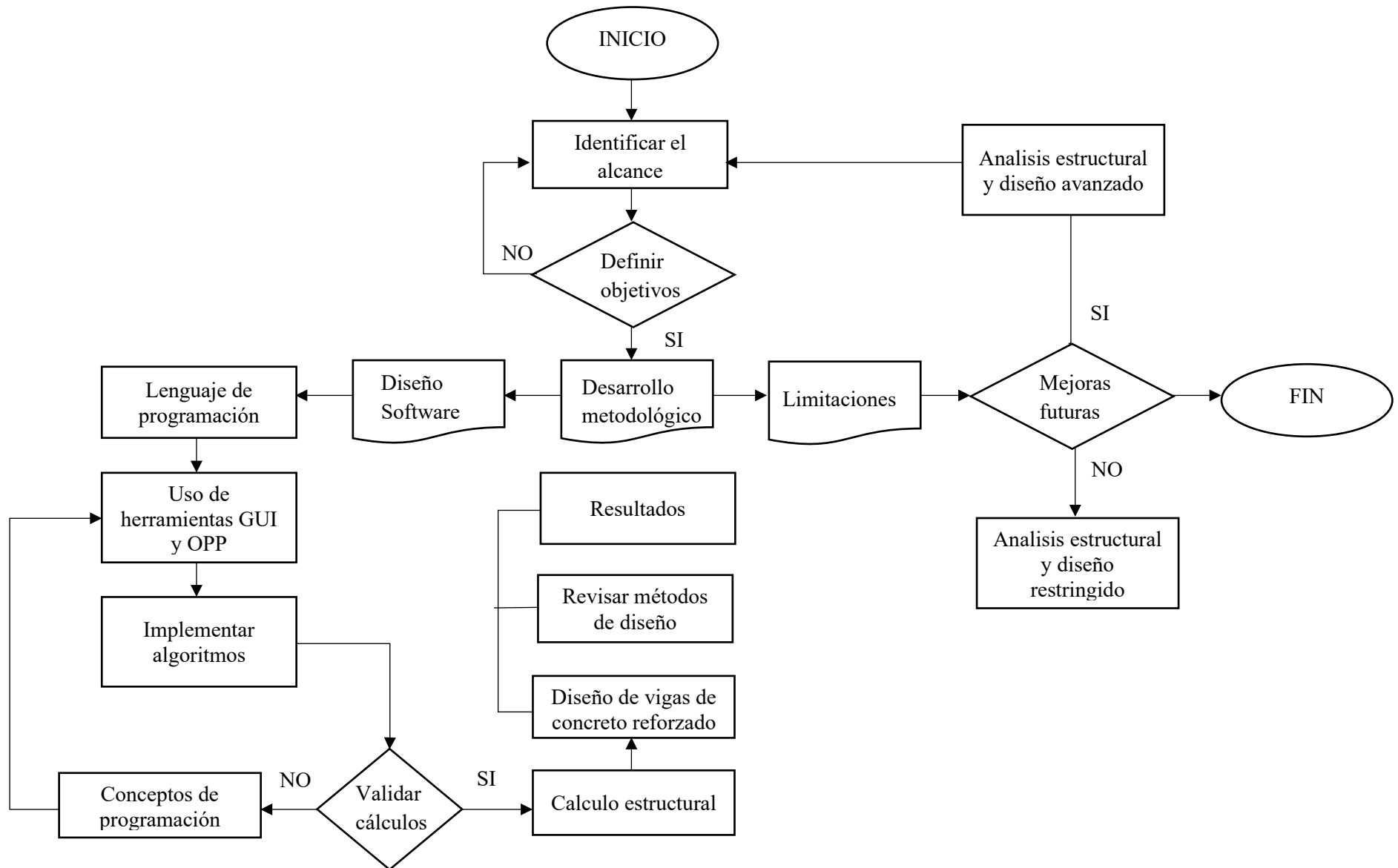


Ilustración 22. Diagrama de flujo etapas de desarrollo software Pilot Structural. Fuente: Propia

6. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA VIGA DOBLEMENTE EMPOTRADA

En este capítulo se va a presentar los métodos de cálculos que hace el software Pilot Structural para cada uno de los procedimientos que forma parte del análisis estructural y diseño de vigas de concreto reforzado. Hay que aclarar que el software ha sido desarrollado para realizar el análisis estructural de vigas que tienen un comportamiento de un sistema de equilibrio estáticamente determinado es decir que son vigas de solo una luz y no de luces continuas por este tipo de estructuras que se comportan como un sistema de equilibrio estático le permite al software usar métodos clásicos para calcular tipo de vigas que presentan condiciones de apoyos con doble empotramiento en los extremos este tipo de elemento estructural que tienen una configuración de apoyo empotrado se ha visto mucho en la realidad de las construcciones como los edificios vamos a encontrar tipos de vigas doblemente empotradas porque están apoyadas en columnas y ahí generan el empotramiento con la columna y la carga que incide en las vigas generalmente se puede idealizar como una carga de tipo distribuida generalmente se le llama como la carga ultima mayorada que son las mismas cargas de servicio multiplicadas por factores de mayoración, respecto al análisis de cargas el software calcula solamente cargas gravitacionales como la carga muerta que incluye el peso propio de la viga y elementos estructurales permanentes , también la carga viva que incluye el uso de ocupación que tiene la estructura y en cuanto a los métodos de diseño de vigas de concreto reforzado el software Pilot Structural aplica los criterios de la norma NSR-10 y los métodos de diseño a flexión y diseño a cortante.

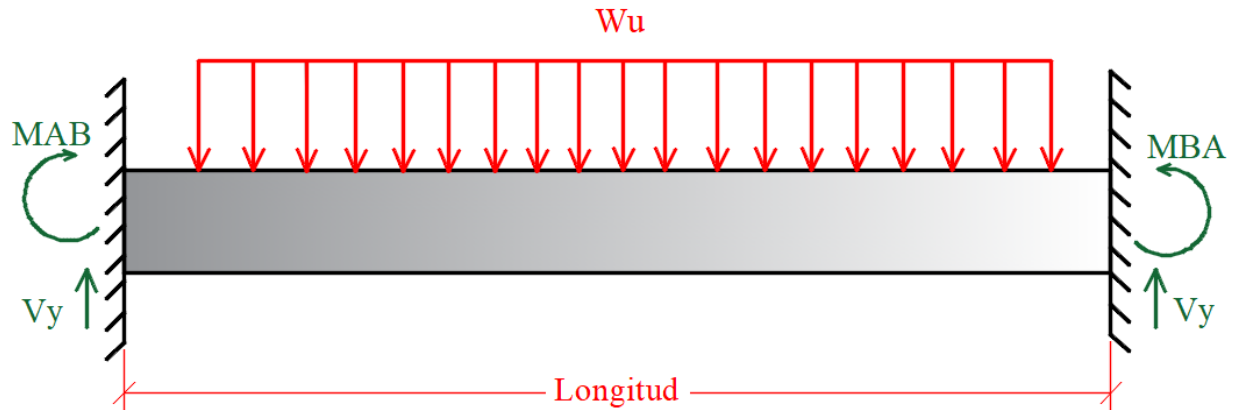


Ilustración 23. Viga doblemente empotrada con carga uniformemente distribuida. Fuente: Propia

6.1.1 ANÁLISIS CUALITATIVO

En la siguiente imagen 23, representa el esquema de una viga doblemente empotrada con carga uniformemente distribuida a lo largo de toda su longitud, esta configuración estructural del tipo de vigas con condición de apoyo empotrado, el empotramiento genera tres reacciones las cuales son una fuerza vertical “ V_y ” dado que es una viga empotrada en sus extremos por su configuración en carga y en apoyos es una estructura simétrica, por esto las reacciones en los apoyos será la misma por el simple calculo la carga uniformemente distribuida la podemos transformar en una carga puntual en el centroide de la carga rectangular, que sería el producto de la carga distribuida por la longitud de la viga y por simple simetría el cálculo de las reacciones de los apoyos es igual a la carga distribuida por la luz de la viga sobre dos, el empotramiento también me genera una fuerza en dirección horizontal por hacer el simple análisis estructural el software Pilot Structural no toma en cuenta las fuerzas horizontales y por último la condición del apoyo empotrado me genera un momento antihorario. Para este tipo de vigas, la estructura se comporta de forma simétrica lo que facilita el análisis estructural ya describimos de manera cualitativa cómo se comporta la estructura para este tipo de vigas con condición de apoyo empotrado ahora sí vamos a ver el análisis de forma cuantitativa para este comportamiento de la viga empotrada.

6.1.2 ANÁLISIS CUANTITATIVO

Para el análisis cuantitativo de la viga doblemente empotrada se empleará el método de doble integración con una configuración de una carga distribuida linealmente en el tramo de la viga lo que tenemos que calcular primero son las reacciones en los apoyos y momentos de empotramiento para iniciar el análisis estructural de la viga vamos a despreciar el area transversal de la viga por lo tanto vamos a decir que su inercia y material es constante.

Hacemos corte de la viga de izquierda a derecha. $0 \leq x \leq L$

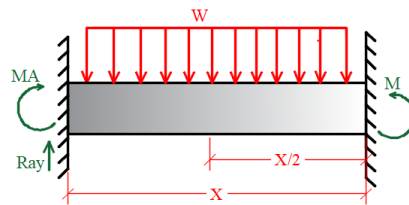


Ilustración 24. Corte de viga doblemente empotrada . Fuente: Propia

Condiciones de equilibrio

$$\sum \text{Momentos} = 0$$

$$M + Wx * \frac{x}{2} + MA - Ray * x = 0$$

$$M = -\frac{Wx^2}{2} - MA + x * Ray$$

Obtenemos la ecuación de momento aplicando las condiciones de equilibrio estático

Integramos la ecuación de Momento

$$EI\delta = -\frac{Wx^3}{6} - MA * x + \frac{x^2 * Ray}{2} + C_1$$

$$EI\Delta = -\frac{Wx^4}{24} - \frac{MA * x^2}{2} + \frac{x^3 * Ray}{6} + x * C_1 + C_2$$

Una vez integramos la ecuación de momento , integramos nuevamente para obtener la ecuación de la curva elástica.

Condiciones de frontera

para $x = 0$

para $x = L$

$$\delta_A = 0 \quad C_1 = 0 \quad \delta_B = 0 \quad C_1 = 0$$

$$\Delta_A = 0 \quad C_2 = 0 \quad \Delta_B = 0 \quad C_2 = 0$$

Se evalúa las condiciones de los apoyos de empotramiento y reemplazamos los datos en la ecuación de la pendiente por lo tanto las constantes de integración de C_1 y C_2 es igual a 0

Organizamos las ecuaciones de reacciones y momentos

$$MA = \frac{6 * (W * L^4)}{L^2 * 72} = \frac{W * L^2}{12}$$

$$Ray = \frac{W * L}{3} + \frac{2 - \left(\frac{W * L^2}{12}\right)}{L} = \frac{W * L}{3} * \frac{W * L}{6} = \frac{W * L}{2}$$

Para esta configuración de una viga doblemente empotrada con una carga linealmente en toda su longitud en los extremos de la viga ,por su configuración estructural que tiene este tipo de vigas empotradas en los extremos los momentos de empotramiento son iguales solo cambiaria el sentido que tiene el momento sea horario o antihorario y las reacciones de los apoyos también son iguales que son fuerzas en sentido vertical, se hizo esta deducción general de cómo se comporta este tipo de vigas haciendo un análisis estructural con el método de doble integración, ahora por hacer el simple cálculo de encontrar el valor de los momentos de empotramiento y reacciones de los apoyos ya hay unas tablas que simplifican el cálculo de estas reacciones y momentos dependiendo cual sea la configuración de la carga y apoyos.

6.1.3 CÁLCULOS Y EJERCICIOS DE APLICACIÓN

En este epígrafe se presenta los procedimientos que ejecuta el software Pilot Structural para el cálculo del análisis estructural de vigas que tienen una configuración de una luz y condición de apoyos empotrados y de carga linealmente distribuida en toda su longitud, para los ejercicios de aplicación se tomara como referencia el libro de “Diseño de Concreto Reforzado de Jack C. McCormac y ejercicios que se realizaron durante las clases dictadas por los docentes de la rama de estructuras, por otro lado también se quiere hacer un análisis de los resultados calculados del software Pilot Structural mediante ejercicios de aplicación desarrollados por los docentes y ejercicios que presenta el libro de Diseño de concreto reforzado de Jack. C McCormac y con esto se quiere llegar a verificar los cálculos obtenidos por el software y comparar con los ejercicios de aplicación propuestos.

6.1.4 EJERCICIOS DE APLICACIÓN

Para este ejercicio de aplicación se plantea calcular vigas que tiene una configuración estructural simétrica y con condiciones de apoyos empotrados en sus extremos, estas vigas de concreto reforzado esta sometidas a cargas gravitacionales, estos tipos de vigas con doble empotramiento que coincide con el alcance del software el cual hace el análisis estructural para este tipo de vigas y configuración de cargas linealmente distribuidas y también para los procedimientos de los métodos de diseño de vigas de concreto reforzado.

Ejercicio 1

Determinar la carga ultima de servicio con la que se debe diseñar la viga a flexión y cortante con los siguientes datos:

- a) La viga tiene una sección transversal de 40 cm de ancho y 50 cm de altura y un tramo de 6.0 metros de longitud , para los materiales escoger una resistencia a la compresión del concreto y para el acero una resistencia a la fluencia de 420 Mpa y un recubrimiento de 5 cm y revisar cual es la altura efectiva útil para la viga.
- b) Se considera que la viga está sometida a efectos externos generados por las cargas gravitacionales las cuales se pueden clasificar como carga muerta y carga viva , para la carga muerta $WD = 25 \text{ kN/m}$ y para la carga viva $WL = 18.22 \text{ kN/m}$, adicionalmente se tiene en cuenta el peso específico del concreto de 24 kN/m^3 y determinar el peso propio de la viga y la carga ultima que se calcula con los factores de mayoración de las cargas de servicio que establece la norma NSR-10 que tiene varias combinaciones de cargas para las solicitaciones de las estructuras.
- c) Una vez se obtiene la carga ultima que actúa sobre la viga, calcular el análisis estructural de la viga.
- d) Calcular los diagramas de fuerza cortante y momento flector de la viga
- e) Una vez obtenido el análisis estructural de la viga y las solicitaciones internas de la estructura como son los momentos máximos y fuerza cortante se procede aplicar el método de diseño a flexión con base a la metodología del libro de diseño de estructuras de concreto reforzado de Jack. C McCormac.
- f) Posteriormente al diseño flexión de la viga , calcular el método de diseño a cortante con base a los criterios de la norma NSR-10.

6.1.5 GEOMETRÍA DE LA VIGA

- a) Se tiene una viga con una configuración de una luz con condición de apoyo empotrado en los extremos y una carga linealmente distribuida en toda su longitud.

Parametro	Valor	Unidad
Ancho de la viga (b)	0.40	m
Altura total (h)	0.50	m
Longitud del tramo (L)	6.0	m
Recubrimiento (r)	0.05	m
Altura efectiva util (d)	0.45	m
Concreto (f'_c)	28	Mpa
Acero (f_y)	420	Mpa

Tabla 1. Propiedades Geométricas de la viga y materiales f'_c , f_y . Fuente: **Propia**

6.1.6 USO DEL SOFTWARE PILOT STRUCTURAL

Sección transversal Resumen

Dimensiones [m]

L: 6

b: 0.40

h: 0.50

r: 0.05

d: 0.45

VG 40 X 50

0.50 m

0.40 m

Viga: VG 40.0 X 50.0

f'_c : 28 Mpa

Ilustración 25. Recorte del uso del software para entradas de datos de la sección transversal. Fuente: **Propia**

Por medio del uso del software Pilot Structural, el usuario puede ingresar los datos para definir las dimensiones de la viga y el material de la resistencia a compresión del concreto, con esta

funcionalidad que entrega el software el usuario puede configurar las propiedades geométricas de las vigas y definiendo un nombre de la sección transversal como se muestra en la imagen 22.

6.1.7 ASIGNAR CARGAS GRAVITACIONALES

- b) Para este ejercicio las cargas que serán aplicadas en la viga debido a los efectos externos que estos elementos estarán sometidos vamos a tomar como datos de entrada la carga muerta , la carga viva y el peso específico del concreto reforzado.

Parametro	Valor	Unidad
Carga muerta (W D)	25	kN/m
Carga viva (W L)	18.22	kN/m
Peso especifico del concreto (γ)	24	kN/m ³
Sección transversal (V G)	40X50	cm

Tabla 2. Solicitaciones cargas de servicio y densidad del concreto reforzado.

6.1.8 CÁLCULO DEL PESO PROPIO DE LA VIGA

En este paso vamos a ver cuánto está pesando la viga por cada metro lineal con la siguiente expresión.

$$\text{Peso propio de la viga (Wpp)} = 0.40 \text{ m} * 0.50 \text{ m} * 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad (1)$$

$$W_{pp} = 0.20 \text{ m}^2 * 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad (2)$$

$$W_{pp} = 4.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (3)$$

Tenemos ya el valor calculado del peso propio de la viga de una sección transversal de 40 cm de ancho y 50 cm de altura total, el resultado calculado de su peso propio es de 4.8 kN/m.

6.1.9 CÁLCULO CARGA ULTIMA DE SERVICIO

Para este caso llegamos a una etapa inicial necesaria para el diseño a flexión vamos a encontrar la carga ultima de servicio debido a las cargas externas que solicita la estructura estos efectos de las cargas aplicadas en las vigas , producen esfuerzos de flexión y determinamos la carga actuante que va resistir en la sección transversal, si la viga está en condición de cargas de servicio la norma NSR-10 menciona en el titulo B , numeral B.2.3 las diferentes soluciones para las cargas de servicios en las estructuras que multiplican unos factores de mayoración dependiendo cual sea el caso , para este ejercicio vamos a tener en cuenta la carga de servicio muerta y viva , que su combinación de mayoración de carga según establece la norma NSR-10 es un 20% de la carga muerta más un 60% de la carga viva a continuación vamos a hacer el procedimiento del cálculo de la carga ultima.

$$W_u = 1.2(WD) + 1.6(WL) \quad (1)$$

Reemplazando en la expresión (1) la carga muerta $WD = 25 \text{ kN/m}$ y la carga viva $WL = 18.22 \text{ kN/m}$, hay que aclarar que el peso propio de la viga tiene un valor de $W_{pp} = 4.8 \text{ kN/m}$ se debe incluir en la carga muerta. Obtenemos la siguiente expresión.

$$W_u = 1.2 \left(25 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 4.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right) + 1.6 \left(18.22 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right) \quad (2)$$

$$W_u = \left(35.76 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 29.152 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right) = 64.912 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (3)$$

Tenemos ya el valor de la carga ultima debido a los efectos externos que se aplica en la viga y multiplicando los factores de mayoración según los requisitos de la norma NSR-10. Una vez ya teniendo el valor de la carga actuante vamos a hacer el análisis estructural de la viga que tiene una condición de apoyo empotrado en los extremos de la viga.

6.2 USO DEL SOFTWARE PILOT STRUCTURAL

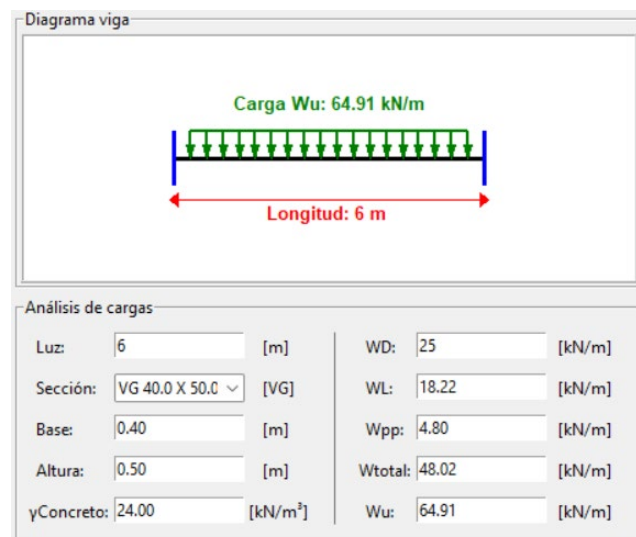


Ilustración 26. Recorte del uso del software para entradas de datos de asignar cargas. Fuente: Propia

Por medio del uso del software Pilot Structural, le permite al usuario ingresar los datos de entrada para asignar las cargas y hacer el cálculo de carga actuante mayorada por los factores que establece la norma NSR-10 para este ejercicio los datos ingresados el programa muestra esta funcionalidad y se puede visualizar los datos en la imagen 26, se comprueba que los datos calculados por el software son precisos a los cálculos que se hacen manualmente, siguiendo con los cálculos vamos a continuar con el análisis estructural de la viga usando el método de momentos de empotramiento y también usando las expresiones ya simplificadas para calcular las reacciones de los apoyos y también la reacción de los momentos de empotramiento.

6.2.1 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA VIGA DOBLEMENTE EMPOTRADA

c) Una vez teniendo ya los datos calculados del análisis de cargas seguimos con los procedimientos para calcular el análisis estructural de este tipo de vigas que tienen una configuración de apoyos empotrados en sus extremos y una carga linealmente distribuida en toda su longitud del tramo , el software Pilot Structural está restringido solo hace el cálculo para este tipo de vigas que tienen una luz y no para vigas que tienen un comportamiento de un sistema indeterminado a continuación vamos a calcular las reacciones de los apoyos y momentos de empotramiento con las expresiones ya simplificadas.

6.2.2 CÁLCULO DE REACCIONES

Para este paso del cálculo de reacciones en los apoyos vamos a hacer paso a paso los procedimientos para este tipo de vigas que tienen una configuración de apoyos empotrados y una carga linealmente distribuida.

Expresión simplificada para tipo de viga doblemente empotrada

$$R_A = R_B = \frac{W_u * L}{2} \quad (1)$$

Reemplazando los valores de la carga ultima y la longitud de la viga tenemos

$$R_A = R_B = \frac{64.912 \frac{kN}{m} * 6 m}{2} \quad (2)$$

$$R_A = R_B = 194.736 kN \quad (3)$$

Tenemos que, por este tipo de vigas de un tramo , por simetría de cálculo el valor de las reacciones es igual y también para la reacción de los momentos de empotramiento, a continuación, se va a mostrar cómo es la expresión simplificada para calcular los momentos de empotramiento.

Para el cálculo de los momentos de empotramiento en los extremos se hace de la siguiente expresión.

$$M_A = M_B = - \frac{W_u * L^2}{12} \quad (1)$$

$$M_A = M_B = - \frac{64.912 \frac{kN}{m} * (6 m)^2}{12} \quad (2)$$

$$M_A = M_B = - 194.736 kN * m \quad (3)$$

En este paso ya calculamos la reacción de los momentos de empotramiento en los extremos de los apoyos izquierdo y derecho , en el caso que esta viga está sometida a estas cargas actuantes estos efectos externos producen en la viga esfuerzos a flexión en una sección transversal podemos ver que su comportamiento es una curvatura positiva donde en los extremos de la viga tenemos secciones transversales que son zonas que se están traccionando y generan momentos negativos es decir que los momentos de los extremos que solicita la viga son iguales.

Ahora bien, ya calculamos los momentos extremos que solicita la viga , ahora vemos cual es la expresión simplificada donde se genera el momento máximo en la viga.

$$M_{max} = \frac{W_u * L^2}{24} \quad (4)$$

$$M_{max} = \frac{64.912 \frac{kN}{m} * (6 m)^2}{24} \quad (5)$$

$$M_{max} = 97.367 kN * m \quad (6)$$

A este paso calculamos el valor del momento positivo donde se presenta el momento máximo en la viga ahí la sección transversal también está sometida a efectos de tracción, se obtuvo ya las sollicitaciones internas de la viga que posteriormente vamos a tener en cuenta para los procedimientos de los métodos de diseño a flexión y diseño a cortante, una vez ya teniendo las sollicitaciones de la viga, vamos a calcular los diagramas de fuerza cortante y momento flector.

6.2.3 DIAGRAMAS DE FUERZA CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR

d) Con respecto a las solicitaciones que la viga estará sometida debido a efectos externos o cargas de servicios estos efectos generan esfuerzos en la estructura , como esfuerzos cortantes y esfuerzos de flexión , las solicitaciones lo podemos definir que son las fuerzas externas impuestas en la estructura para dar continuación al ejercicio y a los procedimientos anteriores , encontramos por el análisis estructural las solicitaciones internas de la viga que lo podemos ver en los diagramas de fuerza cortante y de momento flector a continuación vamos ver en la siguiente imagen como el software Pilot Structural muestra el cálculo de los diagramas.

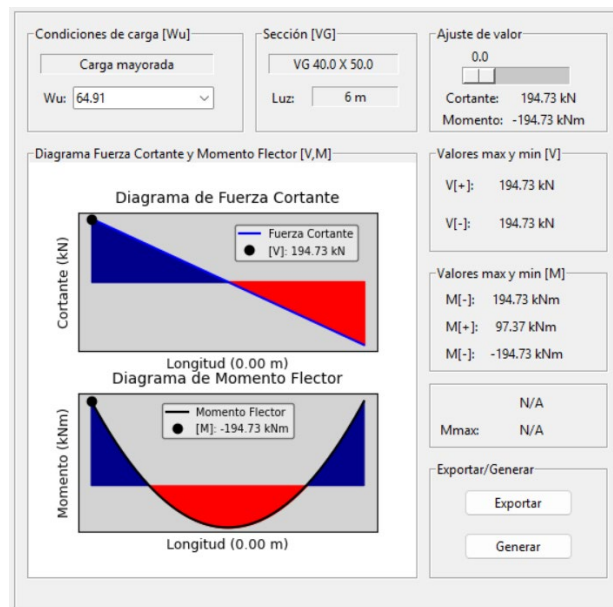


Ilustración 27. Recorte del uso del software diagramas fuerza cortante y momento flector. Fuente: Propia

Esta es la manera como el software Pilot Structural genera los gráficos de fuerza cortante y momento flector , le permite al usuario visualizar los valores máximos de cortante y momento que posteriormente estos valores lo tendremos en cuenta para el diseño a flexión y diseño a cortante a continuación vamos con los procedimientos de los métodos de diseño y la comprobación de los cálculos obtenidos por el software.

6.2.4 METODOLOGÍA DISEÑO A FLEXIÓN

e) Continuando con el desarrollo del ejercicio de aplicación ya se obtuvo los cálculos para encontrar las solicitaciones internas debido a los efectos externos que la viga estará sometida a estas cargas de servicio vamos a usar el método de diseño a flexión para los procedimientos de los cálculos se va a tomar en cuenta la metodología dada en las clases propuestas por los docentes de estructuras tomando como base el libro de diseño de concreto reforzado de Jack C. McCormac.

Parametro	Valor	Unidad
Momento negativo	194.73	kN*m
Momento positivo	97.37	kN*m
Momento negativo	194.75	kN*m
Ancho	40	cm
Altura	50	cm
Recubrimiento	5	cm
Altura efectiva util	45	cm

Tabla 3. Parámetros y Solicitaciones internas de la viga. Fuente: Propia

En esta tabla ya presenta los datos cálculos desde el análisis estructural de la viga debido a la carga actuante aplicada de estos efectos externos que actúan sobre la viga genera esfuerzos a flexión que posteriormente tenemos momentos flectores en las zonas críticas de la viga estos momentos solicitantes también lo conocemos como momentos últimos por la simple simetría de este tipos de vigas que son de un tramo de longitud y una carga linealmente distribuida y que tienen una condición de apoyos empotrados se nos presenta estos momentos solicitantes en los extremos y en el centro de la luz para los procedimientos del diseño a flexión , estos esfuerzos de flexión se

generan debido a la acción de las cargas aplicadas en las estructuras, como datos conocidos tenemos los momentos últimos y las dimensiones de la viga y los materiales por esta razón vamos usar unas expresiones de cálculo para el diseño a flexión.

6.2.5 CÁLCULO DE RESISTENCIA REQUERIDA.

Por iniciativa del diseño a flexión la metodología que usa los docentes de estructuras durante sus clases se basa en el libro de Diseño de Concreto Reforzado del autor Jack C. McCormac por esto el autor recomienda calcular una resistencia requerida “ R_n ”, vamos a presentar el paso a paso del ejercicio de aplicación propuesto, para el cálculo de la resistencia requerida tiene la siguiente expresión de cálculo.

$$R_n = \frac{Mu}{\phi * b * d^2} \quad (1)$$

El autor recomienda calcular la resistencia requerida como primer paso al método de diseño a flexión, la expresión tiene parámetros ya conocidos desde el análisis estructural que se obtienen de los diagramas que son las solicitaciones internas que demanda la estructura y las dimensiones de la viga, tenemos un factor que se usa en el método diseño a flexión y es el parámetro ϕ este factor toma un valor menor o igual que uno y tiene que ver mucho en el tipo de falla para este caso el diseño a flexión este parámetro toma un valor de 0.90. Para continuar con el ejercicio de aplicación vamos a calcular la resistencia requerida y reemplazando valores en la expresión, como se trata de una viga de un tramo y que tiene condición de apoyos en los extremos y una carga linealmente distribuida este tipos de vigas genera momentos flectores en tres zonas críticas de la viga, que se tendrá que evaluar cada momento ultimo “ M_u ” en total tenemos tres momentos últimos, dos momentos últimos que se generan en los empotramientos y un momento ultimo que

se genera en el centro de la luz de la viga. Por el simple calculo los momentos últimos que se generan en los empotramientos son los momentos negativos , estos momentos tienen el mismo valor y ya el momento ultimo que está en el centro de la luz es el momento positivo que ya tendría un valor distinto a los momentos de los extremos de la viga a continuación vamos a calcular la expresión de la resistencia requerida para cada momento ultimo.

Momentos negativos Mu (-)

$$Mu (-) = 194.73 \text{ kN} * m$$

$$R_n = \frac{194.73 \text{ kN} * m}{0.90 * 0.40 \text{ m} * 0.45 \text{ m}^2}$$

$$R_n = 2671.1934 \text{ kN/m}^2$$

Para los momentos de empotramiento se obtiene un valor de Rn igual 2671.1934 kN/m².

Momento positivo Mu (+)

$$Mu (+) = 97.37 \text{ kN} * m$$

$$R_n = \frac{97.37 \text{ kN} * m}{0.90 * 0.40 \text{ m} * 0.45 \text{ m}^2}$$

$$R_n = 1335.6653 \text{ kN/m}^2$$

Para el momento en el centro de la luz se obtiene un valor de Rn igual a 1335.6653 kN/m² ya a este punto tenemos el valor de las resistencias requeridas para cada uno de los momentos últimos estos valores se van a tomar en cuenta para calcular la cuantia requerida que más adelante vamos a ir presentando y dando observaciones a continuación se va a mostrar un resumen de los cálculos obtenidos de las resistencias requeridas en la siguiente tabla.

Parametro	Mu	Rn
Momento negativo	194.73 kN*m	2671.1934 kN/m ²
Momento positivo	97.37 kN*m	1335.6653 kN/m ²
Momento negativo	194.73 kN*m	2671.1934 kN/m ²

Tabla 4. Resultados de los cálculos de resistencia requerida para cada momento solicitante.

Fuente: Propia

Una vez ya tenemos los cálculos de la resistencia requerida para cada momento ultimo también podemos ver estos procedimientos de los resultados en el software y se verifico que dichos valores son precisos no tienen ninguna diferencia en la información de los datos. Ahora bien, vamos a continuar con los cálculos para calcular la cuantia requerida.

6.2.6 CÁLCULO DE CUANTIA REQUERIDA.

En este cálculo de la cuantia requerida con base al libro del autor Jack C. McCormac el muestra una expresión de cálculo para determinar el porcentaje de acero requerido para una viga esta expresión surge del diagrama equivalente de Whitney ,este teorema toma el esfuerzo equivalente del concreto a 0.85 de la resistencia a compresión del concreto y depende directamente de la resistencia requerida “Rn”, de la resistencia de los materiales del concreto y acero esta adecuación de la expresión que muestra el autor permite calcular la cuantia de acero requerida más directa y sencilla a continuación vamos a ver cómo se calcula esta expresión.

$$\rho = \frac{0.85 f'c}{fy} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2Rn}{0.85f'c}} \right) \quad (1)$$

Para calcular la expresión de la cuantia requerida ya debemos tener los datos conocidos como la resistencia requerida y la resistencia del concreto a la compresión de f'c igual a 28 Mpa y la

resistencia del acero igual a 420 Mpa ya teniendo calculado las resistencias requeridas vamos reemplazando los parámetros en la expresión para calcular las cuantías requeridas de la demanda de los momentos últimos que se presenta en la siguiente tabla ,los datos calculados obtenidos en el software Pilot Structural se realizó también el cálculo manualmente y los resultados fueron precisos no tienen ninguna incongruencia en los valores.

Cuantía mínima y Cuantía máxima

Para el cálculo de la cuantía mínima y máxima de la sección de concreto reforzado vamos a usar los requisitos mínimos que estable la norma NSR-10 a continuación se presenta el cálculo de estas expresiones para un material de $f'c$ igual a 28 Mpa y un acero de 420 Mpa.

$$\rho_{min} = \frac{0.25\sqrt{f'c}}{f_y} \geq \frac{1.4}{f_y} \quad (1)$$

$$\rho_{min} = \frac{0.25\sqrt{28Mpa}}{420 Mpa} \geq \frac{1.4}{420 Mpa} \quad (2)$$

$$\rho_{min} = 0.00314 \geq 0.0033 \quad (3)$$

Entonces tenemos que para un material de $f'c$ igual a 28 Mpa tiene una cuantia mínima de 0.0314 es menor que el valor mínimo que estable la norma, entonces como es menor se debe usar el mayor entre estos dos que sería de 0.0033. Ahora bien, vamos a calcular la cuantia máxima que se hace de la siguiente expresión de cálculo.

$$\rho_{max} = 0.85 * \beta_1 * \frac{f'c}{f_y} * 0.63 \quad (1)$$

Para concretos $\leq f'c = 28$ Mpa , el β_1 que le corresponde es igual a 0.85

$$\rho_{max} = 0.85 * \beta_1 * \frac{f'_c}{f_y} * 0.63 \quad (1)$$

$$\rho_{max} = 0.85 * 0.85 * \frac{28Mpa}{420Mpa} * 0.63 \quad (1)$$

$$\rho_{max} = 0.0303 \quad (3)$$

Para un material del concreto f'_c igual a 28 Mpa y un acero de f_y igual a 420 Mpa. Se obtiene ya el valor calculado de la cuantía máxima igual a 0.0303 a continuación vamos a calcular la cuantía requerida que nos va a decir cuál es el porcentaje de acero requerido que se necesita para resistir las solicitaciones de los momentos últimos.

Porcentaje de cuantía requerida para el momento negativo

$$\rho = \frac{0.85 f'_c}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2Rn}{0.85 f'_c}} \right) \quad (1)$$

$$\rho = \frac{0.85 * 28 Mpa}{420 Mpa} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 * 2.6711934 MN/m^2}{0.85 * 28 Mpa}} \right) \quad (2)$$

$$\rho = 0.00676 \quad (3)$$

Se obtiene una cuantía de acero necesaria para resistir la sollicitación de los momentos últimos negativos con un material de f'_c igual a 28 Mpa tenemos que su cuantía requerida es igual a 0.00676, anteriormente se calculó la cuantía mínima igual a 0.0033 y por otro lado la cuantía máxima igual a 0.0303.

Porcentaje de cuantía requerida para el momento positivo

$$\rho = \frac{0.85 f'c}{fy} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2Rn}{0.85 f'c}} \right) \quad (1)$$

$$\rho = \frac{0.85 * 28 \text{ Mpa}}{420 \text{ Mpa}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 * 1.3356653 \text{ MN/m}^2}{0.85 * 28 \text{ Mpa}}} \right) \quad (2)$$

$$\rho = 0.00327 \quad (3)$$

Se obtiene una cuantía de acero necesaria para resistir la sollicitación del momento último positivo con un material de $f'c$ igual a 28 Mpa tenemos que su cuantía requerida es igual a 0.00327, anteriormente se calculó la cuantía mínima igual a 0.0033 y por otro lado la cuantía máxima igual a 0.0303. Continuando con el ejercicio de aplicación vamos a presentar los datos obtenidos y los resultados que entrega el software Pilot Structural.

Parametro	Mu	Rn	preq calculado	preq software
Momento negativo	194.73 kN*m	2671.1934 kN/m ²	0.00676	0.0068
Momento positivo	97.37 kN*m	1335.6653 kN/m ²	0.00327	0.0033
Momento negativo	194.73 kN*m	2671.1934 kN/m ²	0.00676	0.0068

*Tabla 5. Cuantía requerida: Calculo manual vs Software Pilot Structural. Fuente: **Propia***

En esta tabla se muestra un resumen de los datos calculados de la cuantía requerida para cada momento ultimo que solicita la viga , este valor calculado de la cuantía requerida se debe verificar si cumple la condición $p_{min} \leq preq \leq p_{max}$ entonces si está dentro del rango permitido el valor calculado de la cuantía requerida , el diseño de la sección transversal de la viga tendrá un comportamiento seguro y dúctil tampoco se va presentar un tipo de falla frágil por compresión del

concreto el valor obtenido manualmente de la cuantía requerida podemos observar que esta más cerca en el rango de la cuantía mínima que de la cuantía máxima se está utilizando un porcentaje de cuantía requerida necesario sin sobredimensionar o usar más acero en la viga, además se observa que los datos calculados por el software Pilot Structural la diferencia que tiene del cálculo manual de la cuantía requerida es mínima se encuentra dentro de un margen mínimo debido a aproximaciones utilizados por el software, ahora teniendo la cuantía requerida vamos a calcular el área de acero requerido proporcionado que va necesitar la viga para contrarrestar los momentos.

6.2.7 CÁLCULO DE ÁREA DE ACERO REQUERIDO

Llegando a este punto ya tenemos los datos de la cuantía de acero requerida tanto los procedimientos manualmente y mediante en los cálculos obtenidos por el software Pilot Structural, se procede a calcular el área de acero requerido que se necesitara para contrarrestar las solicitaciones generadas por los momentos últimos, la expresión de cálculo empleada para el área de acero requerido se calcula de la siguiente manera.

$$A_s = \rho * b * d \quad (1)$$

En esta expresión empleada tenemos los siguientes parámetros donde el área de acero requerido que es igual a la cuantía requerida por el ancho de la viga por la altura efectiva útil, para este ejercicio de aplicación tenemos que los datos de la sección transversal es de 40 cm de ancho por 50 cm de altura y un recubrimiento de 5 cm, tomando los datos calculados anteriormente de las cuantías para cada momento último vamos a presentar en una tabla los datos calculados de acero requerido correspondiente a cada momento último.

Iniciamos reemplazando los parámetros en la expresión de cálculo del área de acero requerido para cada solicitación de la viga y datos calculados de los procedimientos realizados anteriormente.

Para el momento negativo

$$As = \rho * b * d \quad (1)$$

$$As = 0.0068 * 40 * 45 * 100 \quad (2)$$

$$As = 1224 \text{ mm}^2 \quad (3)$$

En la sección crítica de la viga se presenta en la cara de los apoyos empotrados se genera un momento negativo, por lo tanto, el área de acero que se requiere colocar para resistir la sollicitación en la viga es de 1224 mm^2

Para el momento positivo

$$As = \rho * b * d \quad (1)$$

$$As = 0.0033 * 40 * 45 * 100 \quad (2)$$

$$As = 594 \text{ mm}^2 \quad (3)$$

En la sección crítica de la viga se presenta en el centro de la luz se genera un momento positivo, por lo tanto, el área de acero que se requiere colocar para resistir la sollicitación en la viga es de 594 mm^2

A continuación, se presenta un resumen en la tabla de los valores calculados del área de acero requerido para cada una de las sollicitaciones de los momentos últimos, estos valores fueron obtenidos de datos ya conocidos como la cuantía requerida y las dimensiones de la viga estos datos también son verificados por medio del software Pilot Structural el cual usa un ajuste de aproximación mínimo para los valores numéricos de estos procedimientos.

Parametro	Mu	Rn	preq calculado	preq software	As req
Momento negativo	194.73 kN*m	2671.1934 kN/m ²	0.00676	0.0068	1224 mm ²
Momento positivo	97.37 kN*m	1335.6653 kN/m ²	0.00327	0.0033	594 mm ²
Momento negativo	194.73 kN*m	2671.1934 kN/m ²	0.00676	0.0068	1224 mm ²

Tabla 6. Area de acero requerido: Resumen datos calculados para cada momento solicitante.

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 6. Para los momentos negativos el area de acero que se requiere para contrarrestar la sollicitación es igual a 1224 mm², en el caso para el momento positivo el area de acero que se requiere para contrarrestar la sollicitación es igual a 594 mm² todos los valores del area de refuerzo requerido fueron verificados en el software Pilot Structural y se comprobó con los valores obtenidos manualmente y tiene una coincidencia precisa en los resultados

Comparación de resultados con el Software Pilot Structural

Como se muestra en la imagen, los valores del area de acero requerido y demás parámetros que calcula el software Pilot Structural coincide con los datos calculados manualmente, lo cual valida la precisión de los resultados y procedimientos que emplea el software.

Mu [kNm]	Rn [kN/m ²]	Cuantia	As [mm ²]
194.73	2671.1934	0.0068	1224.000
97.37	1335.6653	0.0033	594.000
194.73	2671.1934	0.0068	1224.000

Ilustración 28. Resultados de area de acero requerido obtenido por el software Pilot Structural. Fuente: Propia

6.2.8 CÁLCULO DE LA CAPACIDAD NOMINAL DE LA SECCIÓN

El cálculo de la capacidad nominal se refiere a una etapa del diseño a flexión que se denomina etapa de rotura cuando una sección transversal de concreto reforzado tiene un comportamiento inelástico de los materiales se diseña considerando deformaciones inelásticas para llegar a la resistencia ultima en términos de momentos se define como momento nominal , por esto se utiliza el método de resistencia ultima por que los materiales en una sección transversal de concreto reforzado se comportan de una manera inelástica por que el concreto llega a su deformación ultima inelástica mientras que el acero se deforma dependiendo el tipo de falla de esta manera calculamos la resistencia nominal y es función de las propiedades del material y el tamaño de la sección transversal y la cantidad de acero. La expresión de cálculo para determinar la capacidad de resistencia nominal a flexión se expresa de la siguiente manera.

$$\phi Mn = \phi * \rho * fy \left(1 - \frac{\rho * fy}{2 * \beta_1 * f'_c} \right) * b * d^2$$

Para que el diseño por resistencia de la capacidad nominal de la sección se cumpla se tiene que comparar un momento ultimo con la capacidad de resistencia nominal, siempre la sollicitación debe ser menor o igual que la capacidad este parámetro de la resistencia nominal se verá afectado con el factor de reducción igual a 0.90 este método está basado en la resistencia ultima entonces la condición de diseño por resistencia ultima se expresa de la siguiente manera.

$$Mu \leq \phi Mn$$

Esta condición debe cumplirse para garantizar un diseño seguro, por esto lo que solicita la viga no debe superar la capacidad de resistencia nominal esto asegurara que el diseño de la sección no fallara y sea seguro a continuación vamos a proceder con los cálculos manuales y mostrar un

resumen de los datos calculados en una tabla y verificar por medio del software Pilot Structural todos los procedimientos pertinentes.

Datos del ejercicio de aplicación

Entonces iniciamos definiendo los parámetros y los valores según como se venía realizando el ejercicio de aplicación.

Parámetros de diseño

$\phi = 0.90$	Factor de reducción a la resistencia flexión
$f_y = 420 \text{ Mpa}$	Resistencia a la fluencia del acero
$f'_c = 28 \text{ Mpa}$	Resistencia a la compresión del concreto
$\beta_1 = 0.85$	Factor calidad del material
$b = 0.40 \text{ m}$	Ancho de la viga
$d = 0.45 \text{ m}$	Altura efectiva útil
$M_u (-) = 194.73 \text{ kN} * \text{m}$	Momento último extremo izquierdo
$M_u (+) = 97.37 \text{ kN} * \text{m}$	Momento ultimo centro de la luz
$M_u (-) = 194.73 \text{ kN} * \text{m}$	Momento último extremo derecho
$\rho = 0.0068$	Cuantía de diseño para el Mu negativo
$\rho = 0.0033$	Cuantía de diseño para el Mu positivo
$\rho = 0.0068$	Cuantía de diseño para el Mu negativo

Teniendo ya los parámetros definidos que se calcularon anteriormente vamos a proceder con los procedimientos manuales para calcular la capacidad de resistencia nominal de la sección para cada momento solicitante y finalmente comparar si se cumple la condición de diseño que las solicitaciones no deben superar la capacidad nominal posteriormente se hará una verificación de los datos calculados por el software Pilot Structural.

Solicitud momentos negativos vs capacidad de resistencia nominal

Como se trata de una viga doblemente empotrada por ser una estructura simétrica el cálculo y análisis estructural es directo y simple, las solicitaciones internas generan un momento negativo en los extremos de los apoyos y un momento positivo en el centro de la luz, para este caso vamos a tomar el valor del momento ultimo negativo como son dos en cada apoyo reciben el mismo valor.

Sí $M_u (-) = 194.73 \text{ kN} \cdot \text{m}$, debe cumplir esta condición $M_u \leq \phi M_n$

Entonces usando la expresión general de la capacidad resistencia nominal de la sección vamos a reemplazar los datos de los parámetros calculados para este ejercicio de aplicación.

$$\phi M_n = \phi * \rho * f_y \left(1 - \frac{\rho * f_y}{2 * \beta_1 * f'_c} \right) * b * d^2 \quad (1)$$

Reemplazando en la expresión los datos de los parámetros calculados tenemos el siguiente procedimiento.

$$\phi M_n = 0.90 * 0.0068 * 420.000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \left(1 - \frac{0.0068 * 420 \text{ Mpa}}{2 * 0.85 * 28 \text{ Mpa}} \right) * 0.40 \text{ m} * 0.45 \text{ m}^2 \quad (1)$$

$$\phi M_n = 2570.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} (0.94) * 0.40 \text{ m} * 0.45 \text{ m}^2 \quad (2)$$

$$\phi M_n = 195.710256 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (3)$$

El valor de la capacidad de la resistencia nominal de la sección es igual 195.710256 kN*m por lo tanto es mayor que las solicitaciones del momento negativo que tiene un valor de 194.73 kN*m por esto cumple la condición de diseño de resistencia ultima.

Solicitud momento positivo vs capacidad de resistencia nominal

Anteriormente se calculó la capacidad de resistencia nominal para la demanda que solicita la viga en los momentos negativos , a continuación, vamos a calcular la capacidad de resistencia nominal teniendo en cuenta la solicitud donde se presenta el momento positivo en el centro de la luz que tiene un valor de 97.37 kN*m

Sí $M_u (+) = 97.37 \text{ kN} * \text{m}$, debe cumplir esta condición $M_u \leq \phi M_n$

Entonces usando la expresión general de la capacidad resistencia nominal de la sección vamos a reemplazar los datos de los parámetros calculados para este ejercicio de aplicación.

$$\phi M_n = \phi * \rho * f_y \left(1 - \frac{\rho * f_y}{2 * \beta_1 * f'_c} \right) * b * d^2 \quad (1)$$

Reemplazando en la expresión los datos de los parámetros calculados tenemos el siguiente procedimiento.

$$\phi M_n = 0.90 * 0.0033 * 420.000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \left(1 - \frac{0.0033 * 420 \text{ Mpa}}{2 * 0.85 * 28 \text{ Mpa}} \right) * 0.40 \text{ m} * 0.45 \text{ m}^2 \quad (1)$$

$$\phi M_n = 1247.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} (0.9708) * 0.40 \text{ m} * 0.45 \text{ m}^2 \quad (2)$$

$$\phi M_n = 98.089049 \text{ kN} * \text{m} \quad (3)$$

El valor de la capacidad de la resistencia nominal de la sección es igual 98.089049 kN*m por lo tanto es mayor que la sollicitación del momento positivo que tiene un valor de 97.37 kN*m por esto cumple la condición de diseño de resistencia ultima.

Análisis comparativo de diseño a flexión

Para este caso ya tenemos el cálculo de la capacidad de resistencia nominal de la sección con respecto a la demanda que solicita la viga que serían los momentos últimos negativos en los extremos de la viga y el momento positivo en el centro de la luz se determinó que si cumple la condición de diseño por resistencia ultima donde tenemos que las sollicitaciones no superan la capacidad de resistencia nominal de la sección siguiendo con el análisis vamos a presentar en una tabla la información de los cálculos obtenidos manualmente y los datos que se obtienen del software Pilot Structural para verificar la exactitud de los datos calculados.

Parametro	Mu	Cuantia	ϕM_n	$M_u \leq \phi M_n$
Momento negativo	194.73 kN*m	0.00676	195.710 kN*m	Sí cumple
Momento positivo	97.37 kN*m	0.00327	98.097 kN*m	Sí cumple
Momento negativo	194.73 kN*m	0.00676	195.710 kN*m	Sí cumple

Tabla 7. Analisis comparativo de sollicitaciones y capacidad de resistencia nominal. Fuente:

Propia

Podemos ver que en la tabla 7. Se nos presenta la información de los datos calculados como lo son las sollicitaciones de los momentos últimos , las respectivas cuantías y los valores de la capacidad de resistencia nominal , se observa que el diseño por resistencia ultima sí cumple con la condición de que las sollicitaciones no superan la capacidad de resistencia nominal y se verificaron los datos obtenidos por el software Pilot Structural con respecto a los datos manuales y se tiene una exactitud

de los procedimientos los valores calculados por el software son exactos no tienen ninguna variación diferente de los valores calculados.

6.2.9 CÁLCULO DE ASIGNAR BARRAS DE REFUERZO LONGITUDINAL

Para este caso ya debemos tener los datos calculados del área de acero requerido que se necesitara para contrarrestar las sollicitaciones generadas por los momentos últimos, vamos a tener en cuenta la información de las barras de refuerzo longitudinal que más se utilizan comercialmente, ahora bien una vez obtenido el área de acero requerido, el siguiente paso es seleccionar la cantidad de barras de refuerzo y su designación nominal que se van a colocar en la viga en las zonas donde se está traccionando la sección transversal para ello se toma como referencia la tabla de dimensiones nominales de las barras de refuerzo que especifica la norma NSR-10 en el título C que se muestra en la siguiente imagen.

TABLA C.3.5.3-2
DIMENSIONES NOMINALES DE LAS BARRAS DE REFUERZO
(Diámetros basados en octavos de pulgada)

Designación de la barra (véase la nota)	Diámetro de referencia en pulgadas	DIMENSIONES NOMINALES			Masa kg/m
		Diámetro mm	Área mm ²	Perímetro mm	
No. 2	1/4"	6.4	32	20.0	0.250
No. 3	3/8"	9.5	71	30.0	0.560
No. 4	1/2"	12.7	129	40.0	0.994
No. 5	5/8"	15.9	199	50.0	1.552
No. 6	3/4"	19.1	284	60.0	2.235
No. 7	7/8"	22.2	387	70.0	3.042
No. 8	1"	25.4	510	80.0	3.973
No. 9	1-1/8"	28.7	645	90.0	5.060
No. 10	1-1/4"	32.3	819	101.3	6.404
No. 11	1-3/8"	35.8	1006	112.5	7.907
No. 14	1-3/4"	43.0	1452	135.1	11.380
No. 18	2-1/4"	57.3	2581	180.1	20.240

Ilustración 29. Dimensiones nominales de las barras de refuerzo según la NSR-10. Fuente: NSR-10 (2010), Título C, Tabla C.3.5.3-2.

Para dar continuación con el ejercicio de aplicación vamos a hacer los procedimientos para el cálculo de asignar barras de refuerzo longitudinal en las zonas críticas de la sección transversal donde se está traccionando debido a las solicitaciones de los momentos últimos. Tenemos la siguiente información en la tabla.

Parametro	Mu	As req
Momento negativo	194.73 kN*m	1224 mm ²
Momento positivo	97.37 kN*m	594 mm ²
Momento negativo	194.73 kN*m	1224 mm ²

*Tabla 8. Area de aceros requeridos para resistir los momentos solicitados. Fuente: **Propia***

Una vez se tiene ya los aceros requeridos para cada solicitación de la viga , como siguiente paso tenemos que seleccionar la designación de la barra de refuerzo que se va a emplear en las zonas de tracción. Para tener un orden de cada procedimiento se hará de la siguiente manera.

Asignar designación de barras de refuerzo longitudinales

Procedemos a la selección de designación nominal de barra para este ejercicio con la información que nos presenta la tabla de las dimensiones de las barras corrugadas según la norma NSR-10.

Información de la barra: Barra No.7 , área de 387 mm² , diámetro de 22.2 mm

Para la solicitación de los momentos negativos en la viga.

$$Si \ Mu (-) = 194.73 \ kN * m$$

El acero requerido para resistir la solicitación.

$$As (-) = 1224 \ mm^2$$

Para la sollicitación del momento positivo en la viga.

$$Si \ Mu (+) = 97.37kN * m$$

El acero requerido para resistir la sollicitación.

$$As (+) = 594 \ mm^2$$

Cálculo número de barras longitudinal para los momentos negativos

Para calcular el número de barras longitudinal que van a resistir los momentos negativos que ocurren en los extremos de la viga y en las zonas críticas donde la sección transversal se está traccionando, según los resultados obtenidos para las sollicitaciones de los momentos negativos se requiere una area de acero requerido de $1224 \ mm^2$ para resistir un momento ultimo de $194.73 \ kN*m$. Utilizando una barra No.7 que tiene una área de $387 \ mm^2$, procedemos a calcular el número de barras longitudinal con la siguiente expresión.

$$\#Barras = \frac{As}{Ab} \quad (1)$$

Tenemos ya la expresión para calcular el número de barras , que sería la relación del area de refuerzo requerido para resistir la demanda de los momentos negativos sobre la area de acero de la barra, continuamos con el procedimiento del ejercicio reemplazando los valores en la expresión.

$$\#Barras = \frac{1224 \ mm^2}{387 \ mm^2} \quad (1)$$

$$\#Barras = 3.162 \quad (2)$$

Se obtiene el valor calculado para el numero de barras que se necesita para resistir la demanda de los momentos negativos como es un resultado igual 3.162 no es correcto fraccionar las barras

longitudinales , por esto se considera redondear al número entero mayor , entonces para que se pueda llevar bien una lógica y con sentido se aproxima a 4 barras No.7

Cálculo número de barras longitudinal para momento positivo

Para calcular el número de barras longitudinal que van a resistir el momento positivo que ocurre en el centro de la luz y en las zona crítica donde la sección transversal se está traccionando, según los resultados obtenidos para las solicitaciones del momento positivo se requiere una area de acero requerido de 594 mm^2 para resistir un momento ultimo de $97.37 \text{ kN}\cdot\text{m}$. Utilizando una barra No.7 que tiene una área de 387 mm^2 , procedemos a calcular el número de barras longitudinal con la siguiente expresión.

$$\#Barras = \frac{As}{Ab} \quad (1)$$

Tenemos ya la expresión para calcular el número de barras , que sería la relación del area de refuerzo requerido para resistir la demanda de los momentos negativos sobre la area de acero de la barra, continuamos con el procedimiento del ejercicio reemplazando los valores en la expresión.

$$\#Barras = \frac{594 \text{ mm}^2}{387 \text{ mm}^2} \quad (1)$$

$$\#Barras = 1.534 \quad (2)$$

Se obtiene el valor calculado para el numero de barras que se necesita para resistir la demanda del momento positivo como es un resultado igual 1.534 no es correcto fraccionar las barras longitudinales , por esto se considera redondear al número entero mayor , entonces para que se pueda llevar bien una lógica y con sentido se aproxima a 2 barras No.7

Una vez ya teniendo los valores calculados del número de barras que se requiere para resistir las sollicitaciones de la viga, vamos a presentar un resumen de los cálculos en la siguiente tabla.

Parametro	Mu	As req	#Barras
Momento negativo	194.73 kN*m	1224 mm ²	4#7
Momento positivo	97.37 kN*m	594 mm ²	2#7
Momento negativo	194.73 kN*m	1224 mm ²	4#7

Tabla 9. Resultados número de barras longitudinales. Fuente: **Propia**

En la presente tabla se muestra los valores obtenidos del número de barras necesarias para resistir los momentos últimos, estos valores fueron verificados por el software Pilot Structural el cual permitió comparar los resultados manuales con los procedimientos que opera el software.

Comprobación procedimientos software Pilot Structural

Barras de refuerzo

Seleccione la designación de la barra:

Barra No.7

Información de la barra

Barra No.7:

Diámetro: 7/8 pulgadas (22.2 mm)

Área: 387 mm²

Perímetro: 70.0 mm

Masa: 3.042 kg/m

Cálculo número de barras longitudinal:

As: 1224.000

Ab: 387

#barras: 4#7

Ilustración 30. Recorte de la interfaz del software Pilot Structural, cálculo número de barras. Fuente: **Propia**

En la presente imagen 30 podemos observar un recorte de la interfaz gráfica del software Pilot Structural, una de las herramientas que entrega el software para calcular el número de barras que se utilizó para comprobar los cálculos obtenidos manualmente y se verifico que el software hace los procedimientos de los cálculos precisos.

6.3 CÁLCULO DEL ANCHO MINIMO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

Para este caso dando continuidad con el ejercicio de aplicación, ya se obtuvieron anteriormente los valores calculados manualmente para determinar el número de barras de refuerzo longitudinal que resistirán las solicitaciones de la viga, además se verifico con exactitud todos los resultados mediante el software Pilot Structural el cual se validó cada procedimiento y se confirmó su coherencia de los valores calculados manualmente, ahora bien como parte del diseño a flexión se procede a calcular el ancho mínimo de la sección transversal con base a los requisitos de la norma ACI 318, la norma recomienda una expresión para calcular la base requerida mínima de la sección transversal y considera la siguiente expresión de esta manera.

$$b = 2(A + B + C) + (n - 1)(D + dp)$$

Con esta expresión se determina el ancho mínimo que debe tener una sección transversal en función a los parámetros que vamos a indicar para qué es cada uno.

A : Recubrimiento mínimo de las caras laterales de la sección transversal

B : Diámetro del estribo, para estribo #3 o #4

C: Radio de doblado del tipo de barra longitudinal colocada en el perímetro del estribo puede tomarse como 2db para barras No.3 a No.5 o 3db para barras No.6 a No.8

D: Espaciamiento entre barras longitudinales, el ACI recomienda como mínimo 25 mm o el diámetro de la barra del tipo de barra que sea mayor.

n: Numero de barras longitudinales de la sección transversal que se esté diseñando.

dp: Diámetro de las barras de refuerzo longitudinal.

Datos de los parámetros

Sección = 0.40 m X 0.50 m

A = 50.0 mm recubrimiento minimo de la sección transversal.

B = 9.5 mm diametro del estribo de diseño E#3.

C = Usando barras de refuerzo longitudinal #7, tenemos que $3\phi\#7 = 66.6 \text{ mm}$.

D = Se usa una separación minima entre barras de 25.0 mm.

dp = Diametro de la barra #7 igual a 22.2 mm.

Caso de momentos negativos su refuerzo requerido: 4#7

*Mu (–) = 194.73 kN * m*

n = numero de barras longitudina , se toma el valor 4 para barras #7

Reemplazando valores en la expresión.

$$b = 2(50 \text{ mm} + 9.5 \text{ mm} + 66.6 \text{ mm}) + (4 - 1)(25 \text{ mm} + 22.2 \text{ mm})$$

$$b = 2(126.1 \text{ mm}) + (4 - 1)(47.2 \text{ mm})$$

$$b = 393.8 \text{ mm} \approx 0.39 \text{ m}$$

Caso de momento positivo su refuerzo requerido: 2#7

$$Mu (+) = 97.37 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

n = numero de barras longitudina , se toma el valor 2 para barras #7

Reemplazando valores en la expresión.

$$b = 2(50 \text{ mm} + 9.5 \text{ mm} + 66.6 \text{ mm}) + (2 - 1)(25 \text{ mm} + 22.2 \text{ mm})$$

$$b = 2(126.1 \text{ mm}) + (2 - 1)(47.2 \text{ mm})$$

$$b = 299.4 \text{ mm} \approx 0.30 \text{ m}$$

Se obtuvo el valor calculado de la base necesaria para el diseño de la sección transversal y su disposición de sus aceros longitudinales usando un recubrimiento de 50 mm y una barra No.7 para colocar en las zonas críticas donde se presenta las solicitaciones de los momentos, podemos ver que en la zonas críticas de la viga ,donde se presentan los momentos negativos requiere 4#7 y en la zona donde se presenta el momento positivo requiere 2#7 por lo tanto este número de barras se requiere para resistir lo que solicita la estructura, se determinó el ancho mínimo de la sección transversal en función al número de barras para cada caso en donde tenemos la solicitaciones máximas y se encontró que los valores calculados para el ancho mínimo según los requisitos del ACI y definiendo los parámetros se puede analizar que la sección transversal de diseño de ancho 0.40 m y de altura 0.50 m es una sección adecuada porque es mayor el ancho de 0.40 m a los cálculos que se obtuvieron con los requisitos del ACI. También se verifico los valores de los cálculos manuales con el software Pilot Structural el cual podemos ver que los resultados que entrega el software tienen una mayor precisión en los cálculos y no tienen ninguna variación en

los cálculos que se realizaron manualmente. Ahora bien, ahora la siguiente pasa vamos a presentar como el software presenta la información de los datos para calcular el ancho mínimo.

Verificación ancho mínimo requerido en el software Pilot Structural

Análisis del momento último por el acero requerido [As]			
Mu [kNm]	As [mm ²]	#Barra	Base requerida
194.73	1224.000	4#7	0.39 m
97.37	594.000	2#7	0.30 m
194.73	1224.000	4#7	0.39 m

Resultados de Ancho y Acero Asignado [As]	
La base requerida es menor al del diseño 0.4 m, entonces cumple.	
Ya asignaste los aceros para cada Mu, ahora continúa con los de compresión.	

Ilustración 31. Recorte de la interfaz del software Pilot Structural, cálculo ancho mínimo. Fuente: Propia

En la imagen 31. Se nos presenta un recorte de la interfaz del software Pilot Structural donde el usuario puede visualizar los resultados obtenidos desde el análisis estructural , como las solicitaciones de los momentos últimos en función al acero que se requiere para resistir las solicitaciones máximas, el software determina la base requerida apta para el diseño de las vigas , el procedimiento de calculo que hace el software coincide totalmente con los cálculos manualmente , entonces se determina que el proceso de calculo que hace el software tiene una alta confiabilidad y precisión en los resultados. Para este ejercicio se definió una sección transversal de 0.40 m x 0.50 m , entonces comparando con los valores obtenidos , la base requerida es menor al de diseño 0.40 m , entonces cumple el diseño de la sección transversal sin afectar el recubrimiento de 5.0 cm y la colocación de las barras longitudinales de #7 en las zonas críticas de la viga donde se presenta las solicitaciones máximas.

6.3.1 CÁLCULO MOMENTO DE AGRIETAMIENTO

Para continuar el ejercicio de aplicación , a partir de este paso vamos a calcular el momento de agrietamiento o de fisuración también se conoce como el momento crack , para el cálculo de este parámetro vamos a tomar como base los criterios de diseño que menciona la norma NSR-10 en el título C , de diseño de concreto estructural. El momento crack dependerá de las propiedades de los materiales y del tamaño de la sección transversal pero principalmente el módulo de rotura nos dice cuando se fisura la sección , este módulo de rotura se expresa de esta manera.

$$f_r = 0.62 * \lambda * \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

En la presente expresión tenemos el parámetro “ f_r ” del módulo de rotura , el parámetro lambda “ λ ” que toma un valor de 1.0 para el concreto de peso normal y tenemos el parámetro “ f'_c ” que es la resistencia a la compresión del concreto, el módulo de rotura la podemos relacionar con otra expresión que es el esfuerzo a flexión y también con la inercia de la sección transversal, para llegar una expresión más simplificada del momento crack.

$$M_{cr} = \frac{0.62 * \sqrt{f'_c} * b * h^2}{6} \quad (2)$$

Esta expresión permite calcular el momento crack más directo en función a la resistencia a la compresión del concreto , a las dimensiones de la sección transversal. Continuando con el desarrollo del ejercicio de aplicación vamos a hacer el paso a paso para calcular el momento de agrietamiento con base a la metodología y enseñanza de los docentes de estructuras.

Calcular momento fisuración

Para este caso ya debemos tener como datos conocidos la resistencia a la compresión del concreto y las dimensiones geométricas de la sección transversal rectangular.

$$f'c = 28 \text{ Mpa} \quad \text{Resistencia a la compresión del concreto}$$

$$b = 0.40 \text{ m} \quad \text{Ancho de la base}$$

$$h = 0.50 \quad \text{Altura total}$$

Reemplazamos valores en la expresión

$$M_{cr} = \frac{0.62 * \sqrt{28 * 10^6 \frac{N}{m^2}} * 0.40 \text{ m} * 0.50 \text{ m}^2}{6} \quad (1)$$

$$M_{cr} = \frac{328.073}{6} = 54.68 \text{ kN} * \text{m} \quad (2)$$

Se obtuvo el valor calculado manualmente del parámetro M_{cr} igual a $54.68 \text{ kN} * \text{m}$, a continuación, vamos a seguir con el paso a paso de los procedimientos para la resistencia requerida y el porcentaje de la cuantía que requiere el refuerzo mínimo.

Calcular resistencia requerida

Para el cálculo de la resistencia requerida vamos a tener en cuenta la metodología que se basa en el libro de diseño concreto reforzado del autor Jack C. McCormac, nos dice que tenemos que calcular una resistencia requerida que se expresa de la siguiente manera.

$$R_n = \frac{M_{cr}}{\phi * b * d^2} \quad (1)$$

Reemplazamos valores en la expresión

$$Rn = \frac{54.68 \text{ kN} * m}{0.90 * 0.40 \text{ m} * 0.45 \text{ m}^2} \quad (1)$$

$$Rn = 750.07 \text{ kN/m}^2 \quad (2)$$

Una vez ya se obtiene el valor calculado de la resistencia requerida , procedemos a calcular la cuantia requerida y vamos a ver si el porcentaje de acero que se requiere cumple con las condiciones de refuerzo mínimo, que sería comparar el porcentaje de acero con respecto al valor de la cuantia mínima como estable en la norma , para refuerzo mínimo tiene un valor de 0.0033

Porcentaje de cuantia requerida para el momento crack

$$\rho = \frac{0.85 f'c}{fy} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2Rn}{0.85 f'c}} \right) \quad (1)$$

$$\rho = \frac{0.85 * 28 \text{ Mpa}}{420 \text{ Mpa}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 * 0.75007 \text{ MN/m}^2}{0.85 * 28 \text{ Mpa}}} \right) \quad (2)$$

$$\rho = 0.001815 \quad (3)$$

Tenemos que el cálculo de la cuantia requerida es igual 0.001815, por lo tanto, nos dice que es menor que la cuantia de refuerzo mínimo que establece los criterios de la norma NSR-10 , entonces para este caso se debe tomar el valor de la cuantia mínima que tiene un valor de 0.0033. Con esta cuantia de refuerzo mínimo vamos a utilizar para después seguir con los procedimientos de asignar el número de barras en la zona de compresión.

Calcular el número de barras del refuerzo mínimo a compresión

Para este ejercicio ya tenemos valores conocidos que se calcularon anteriormente , vamos a iniciar con determinar el número de barras a emplear para el refuerzo mínimo en la sección transversal , para esto vamos a seleccionar una barra longitudinal , tenemos así la siguiente expresión para calcular el area de acero necesario para determinar el número de barras en la zona a compresión.

$$As' = \rho * b * d \quad (1)$$

En esta expresión ya podemos ver que el area de acero necesario está en función al porcentaje de cuantía del refuerzo mínimo y el ancho de la viga y el parámetro de la altura efectiva útil, una vez ya obtenemos la cantidad de acero para la zona de compresión de la sección transversal, tenemos que calcular el número de barras longitudinales que se va a asignar en la viga, tenemos la siguiente expresión para calcular el número de barras del refuerzo mínimo.

$$\#Barras = \frac{As'}{Ab} \quad (2)$$

Reemplazar valores en las expresiones

$$As' = 0.0033 * 400 \text{ mm} * 450 \text{ mm} = 594 \text{ mm}^2 \quad (1)$$

Ahora bien, tenemos ya el valor calculado del area de refuerzo mínimo igual a 594 mm^2 , ahora procedemos a escoger la designación de la barra para calcular el número de barras que se necesita para colocar en la zona a compresión , se escoge una barra #5 que tiene una area de 199 mm^2 .

$$\#Barras = \frac{594 \text{ mm}^2}{199 \text{ mm}^2} = 2.98 \quad (2)$$

En el cálculo del número de barras del refuerzo mínimo , nos muestra un valor numérico decimal para asignar correctamente las barras longitudinales se debe aproximar al número entero y así se pueda cumplir la demanda del refuerzo mínimo por lo tanto es correcto decir que se necesita 3#5 en la zona de compresión de la viga.

Verificación de los valores calculados con Pilot Structural

The screenshot displays the Pilot Structural software interface for beam design. It is organized into several panels:

- Datos de la viga (Beam Data):**
 - Sección: VG 40.0 X 50.0
 - Luz: 6m
 - f'_c : 28 MPa
 - f_y : 420 Mpa
- Sección transversal (Cross-section):**
 - Tipo: Sección rectangular
 - b: 0.40 m, h: 0.50 m
 - r: 0.05 m, d: 0.45 m
 - ☒ Mantener sección constante
 - Diagrama: A rectangular cross-section with width 0.4 m and height 0.5 m.
- Momento de agrietamiento (Cracking Moment):**
 - Mcr: 54.68 kNm
 - Calcular Mcr
 - Momento de agrietamiento: 54.68 kNm
 - Indica el límite donde el concreto comienza a agrietarse.
- Resistencia Requerida y Cuantía Requerida (Required Resistance and Required Reinforcement):**
 - ☒ Considerar $\phi = 0,90$ para tracción
 - Rn: 750.07 kN/m²
 - pmin: 0.0033
 - preq: 0.001815
 - La cuantía requerida es 0.00181. Es menor que la cuantía mínima de 0.00330. Se debe usar la cuantía mínima.
- Asignar Refuerzo a Compresión (Assign Reinforcement to Compression):**
 - Seleccione la designación de la barra: Barra No.5
 - Barra No.5: Diámetro: 5/8 pulgadas (15.9 mm), Área: 199 mm², Perímetro: 50.0 mm, Masa: 1.552 kg/m
 - As': 594.00 mm²
 - Ab: 199 mm²
 - #barras: 3#5
 - ☒ As'
 - Diagrama: A rectangular cross-section with width 0.4 m and height 0.5 m, showing 3 top bars (As') and 1 bottom bar (Ab).

Ilustración 32. Recorte de la interfaz del software Pilot Structural, cálculo momento de agrietamiento. Fuente: Propia

Como se muestra en la imagen 32, se verifico el cálculo del momento de agrietamiento utilizando el software Pilot Structural , podemos ver que los resultados obtenidos por el software coinciden con los cálculos realizados manualmente, el software realiza una aproximación confiable confirmando la validez de los cálculos manuales.

6.3.2 CÁLCULO LONGITUD DE DESARROLLO

Para este caso vamos a calcular la longitud de desarrollo siguiendo con el ejercicio y con los requisitos de la norma NSR-10, la norma tiene simplificado las fórmulas para el cálculo de la longitud de desarrollo de barras de acero en elementos de concreto reforzado, la longitud de desarrollo debe ser igual o superior a 30 cm, pero es posible reducir esta longitud utilizando la formula general para calcular la longitud de desarrollo , según la siguiente expresión.

$$ld = \left[\frac{fy}{1.1 \lambda \sqrt{f'_c}} \frac{\psi_t \psi_e \psi_s}{\left[\frac{cb + Ktr}{db} \right]} \right] db \quad (1)$$

Con esta expresión vamos a utilizar para calcular la longitud de desarrollo, y vamos a ir viendo más adelante como se define cada parámetro de esta expresión. Es importante la longitud desarrollo por que con esto vamos a garantizar una buena adherencia en ambos materiales el concreto y acero permitiendo que desarrolle el acero en el concreto y no ocurra fallas en las estructuras, para que la barra se considere que está perfectamente anclada y desarrolle adherencia en la longitud de desarrollo , la barra de acero debe alcanzar la resistencia a la fluencia. La norma también establece los requisitos mínimo en el Capítulo C.12 , nos menciona que para calcular la longitud de desarrollo de las barras de refuerzo y se pueda lograr un adecuado anclaje de las barras con el concreto, dependerá de la resistencia del concreto y el acero, también del diámetro de la barra y el tipo de anclaje, también habla la norma de la colocación de los ganchos puede ser de 90° o 180° , y por criterios de resistencia también se debe garantizar una longitud mínima de desarrollo. Continuando con el desarrollo del ejercicio de aplicación vamos a presentar los datos previos para cada uno de los procedimientos del diseño de la viga.

6.3.3 CÁLCULAR LONGITUD DE DESARROLLO BARRAS A TRACCIÓN

Para dar continuación con el ejercicio de aplicación , se presenta ya los parámetros calculados que servirá como base para reemplazar los datos en la expresión general de longitud de desarrollo para barras sometidas a tracción que estable la norma NSR-10.

Parámetros de diseño.

Tenemos los siguientes datos conocidos para el diseño,

Sección transversal: VG 40 cm X 50 cm

Solicitaciones en la viga

Parametro	Mu	#Barras	Barras
Momento negativo	194.73 kN*m	4#7	22.2 mm
Momento positivo	97.37 kN*m	2#7	22.2 mm
Momento negativo	194.73 kN*m	4#7	22.2 mm

Tabla 10. Solicitaciones de la viga y refuerzo suministrado. Fuente: Propia

Resistencia de materiales

Resistencia a la compresión del concreto f'_c : 28 Mpa

Resistencia a la tensión del acero f_y : 420 Mpa

Ya este punto vamos a definir los cálculos para calcular la longitud de desarrollo para barras a tracción.

Factores longitud de desarrollo para barras a tracción.

Según la información que obtenemos del análisis estructural, en este caso las solicitaciones correspondientes a los momentos últimos que actúan en la viga, los momentos que solicita la estructura en las zonas de la sección transversal donde se esta traccionando vamos a colocar las barras de refuerzo asignadas para resistir la demanda estructural y se requiere calcular los factores de longitud de desarrollo para garantizar el anclaje de las barras con el concreto y el fluya el esfuerzo de fluencia del acero.

Factor colocación del acero

Para evaluar el factor de colocación del acero vamos a tener dos posibles condiciones, depende de la altura del concreto debajo de las barras a desarrollar, si la sección transversal tiene mas de 30 cm mínimo de altura.

$\psi_t = 1.3$ Cuando la altura del concreto es mayor a 30 cm

$\psi_t = 1.0$ Cuando la altura del concreto es menor a 30 cm

Para este caso tenemos una sección transversal de 40 cm de ancho y 50 cm de altura , en la zona donde se desarrolla el acero negativo es decir en la parte superior, todo el concreto que esta por debajo del acero superior hasta la fibra inferior del concreto , el valor del factor de colocación del acero le corresponde igual a 1.3 por que la altura del concreto es superior a los 30 cm.

Sí la altura del concreto $h_c > 30$ cm

tenemos que $h_c = 50$ cm > 30 cm

Entonces tenemos que el factor $\psi_t = 1.3$

Factor tipo de recubrimiento

Este factor depende según el tipo de recubrimiento utilizar en las barras de refuerzo longitudinal.

Vamos a tener dos posibilidades para definir este factor del tipo de recubrimiento.

Con recubrimiento epóxico

Colocar recubrimiento epóxico no es muy común en las obras de construcción, pero depende de la longitud de recubrimiento y depende de la separación libre

$\psi_e = 1.5$ Cuando se utiliza recubrimiento epoxico

$\psi_e = 1.2$ Cuando se utiliza recubrimiento epoxico

Sin recubrimiento epóxico

Sin embargo, cuando no se usa recubrimiento epóxico , tomamos un factor de coeficiente igual a uno, además es importante mencionar que el software Pilot Structural también implementa este factor de coeficiente igual a uno.

$\psi_e = 1.0$ Cuando no se utiliza recubrimiento epoxico

El recubrimiento epóxico digamos que es una ventaja por que va buscar recubrir el acero de refuerzo se usa con normalidad en acero estructural , pero sirve más para protegerlo de los ambientes y evitar la corrosión del acero, pero el recubrimiento epóxico en secciones de concreto reforzado no es convencional si se usa es por que el ambiente donde esta expuesta la estructura es muy corrosivo, y lo que esta haciendo es protegiendo el acero agregándole una capa a las barras corrugadas, por un lado esta protegiendo las barras pero por otro lado esta afectando la adherencia de las barras con el concreto, por que el acero corrugado cuando están en contacto con el concreto

favorece la adherencia y al agregar epóxico en las barras , se esta afectando la adherencia entre los materiales. Entonces para el factor de coeficiente de tipo de recubrimiento vamos a utilizar sin recubrimiento en las barras ósea que el factor de coeficiente tiene el valor igual a 1.0

Factor peso del concreto

Este factor depende del peso del concreto se define como lambda y se establece dos posibilidades para definir este factor del peso del concreto.

$$\lambda \leq 0.75 \text{ Para concreto de peso liviano}$$

$$\lambda \leq 1.0 \text{ Para concreto de peso normal}$$

Para el caso de este ejercicio se considera que se está utilizando un concreto de peso normal de lambda igual a uno, estas condiciones también lo implementan el software Pilot Structural.

Factor según el diámetro del acero

Este factor depende del diámetro del acero y establece dos posibilidades para definir este factor que depende de la barra a utilizar en el diseño.

$$\psi_s = 0.8 \text{ Para diámetros de barras \#6 y menores}$$

$$\psi_s = 1.0 \text{ Para diámetros de barras \#7 y mayores}$$

Para este caso se emplea un factor de coeficiente igual a 1.0 , ya que en las zonas donde se tracciona se requiere utilizar un diámetro de barra #7, importante tener en cuenta que, a mayor diámetro de la barra, mayor será la longitud de desarrollo, en el caso que sean barras con diámetros menores podemos reducir la longitud de desarrollo hasta un 80% ,además el software Pilot Structural implementa estos factores en sus cálculos y se aplicó correctamente el factor igual a uno.

Condiciones de adherencia

Para las condiciones de adherencia la norma NSR-10 establece unos factores necesarios para tener en cuenta en el diseño.

$K_{tr} = 0.0$ *Valor conservador*

$C_b \leq 2.5 \text{ cm}$ *dependera del recubrimiento y diametro del estribo*

En el titulo C de la norma NSR-10 , nos dice los requisitos mínimos para las condiciones de adherencia , donde el factor K_{tr} la norma permite considerar un valor de cero como una opción conservadora para no considerar el aporte del acero transversal y el factor C_b es la distancia mínima entre barras de refuerzo y la superficie más cerca del concreto , pero la norma establece que el factor C_b no puede ser mayor a 2.50 cm , pero por simplificar los cálculos se opta tomar un valor de C_b igual 2.50 cm lo cual corresponde también la separación de barras medida de centro a centro, además que el software Pilot Structural implementa el valor de C_b igual 25.4 milímetros equivalente a una pulgada lo cual cumple con los requisitos mínimos de la norma que se exige una separación mínima entre barras igual a una pulgada.

Entonces ya tenemos definido todos los factores necesarios, los cuales vamos a reemplazar en la expresión general de longitud de desarrollo.

Reemplazando valores en la expresión

$\text{Si } \left[\frac{cb + Ktr}{db} \right] = \text{No debe tomarse mayor a } 2.5 \text{ cm, requisito normativo.}$

$$ld = \left[\frac{fy}{1.1 * \lambda * \sqrt{f'c}} \frac{\psi t * \psi e * \psi s}{\left[\frac{cb + Ktr}{db} \right]} \right] db$$

$$ld = \left[\frac{420}{1.1 * 1.0 * \sqrt{28}} \frac{1.3 * 1.0 * 1.0}{2.54 \text{ cm}} \right] 2.22 \text{ cm}$$

$$ld = \left[\frac{420}{5.8207} * 0.5118 \right] 2.22 \text{ cm}$$

$$ld = 72.1562 * 0.5118 * 2.22 = 81.983 \text{ cm}$$

$$ld = 82.0 \text{ cm}$$

Según la demanda estructural para resistir los momentos solicitados en las zonas críticas donde se presentan los momentos máximos se requiere utilizar barras #7 que tienen un diámetro de 22.2 mm o 2.22 cm que se van a colocar para resistir lo que solicita la viga. Entonces para un diámetro de barra #7 requiere una longitud de desarrollo igual a 82 cm , usando el software Pilot Structural también se obtiene una longitud de desarrollo de aproximación 82 cm, esto de muestra que el calculo manual y el resultado del software son precisos, validando así la exactitud de los procedimientos.

Resumen del cálculo de longitud de desarrollo en las zonas a tracción

A continuación, se muestra una tabla de resumen de los resultados obtenidos para las distintas zonas críticas donde se va a disponer las barras de refuerzo para resistir la demanda estructural.

Parametro	#Barras	Barras	Ld
As (-)	4#7	22.2 mm	82 cm
As (+)	2#7	22.2 mm	82 cm
As (-)	4#7	22.2 mm	82 cm

Tabla 11. Análisis de longitud de desarrollo mínimo a tracción Ld. Fuente: Propia

En esta tabla podemos observar que en las zonas críticas donde se presenta la demanda estructural se debe colocar barras #7 para resistir los momentos solicitados y dependiendo del tipo de barra a utilizar, entre mas grande sea el diámetro de la barra más va a requerir longitud de desarrollo, con este ejercicio se cumple que en las zonas de tracción se necesita una longitud de desarrollo de 82 cm.

6.3.4 CÁLCULAR LONGITUD DE DESARROLLO REFUERZO COMPRESIÓN

En el caso de las barras sometidas a compresión, la norma establece que la longitud mínima de desarrollo “Ldc” debe ser mayor o igual que 20 cm. Sin embargo, se deben evaluar dos condiciones para Ldc. Dependiendo de cuál de los resultados sea más favorable, En el titulo C de la NSR-10 nos dice de una forma mas especifica la forma en que se verifica las barras sometidas a compresión y esa longitud de desarrollo a compresión se calcula de la siguiente expresión.

$$Ldc = Mayor \left\{ \begin{array}{l} \frac{0.24 * fy}{\lambda * \sqrt{f'c}} * db \\ 0.043 * fy * db \end{array} \right. \quad (1)$$

En la siguiente expresión podemos ver la forma como se puede verificar la longitud de desarrollo para barras sometidas a compresión, la expresión considera dos posibilidades para determinar “Ldc”, por lo tanto, se debe escoger el mayor entre los dos valores calculados.

Parámetros de calculo

$f_y = 420 \text{ Mpa}$ Resistencia a la tensión del acero

$f'_c = 28 \text{ Mpa}$ Resistencia a la compresión del concreto

$\lambda = 1.0$ Peso del conereo normal

$db = 15.9 \text{ mm}$ Diámetro de la barra #5

Tenemos lo que son los parámetros de calculo , son datos ya conocidos que se calcularon anteriormente pero que tenemos que reemplazar en las expresiones para calcular la longitud de desarrollo para barras que están sometidas a compresión.

Reemplazando valores en la expresión

$$L_{dc} = \text{Mayor} \begin{cases} \frac{0.24 * 420}{1.0 * \sqrt{28}} * 1.59 = 19 * 1.59 = 30 \text{ cm} \\ 0.043 * 420 * 1.59 = 18 * 1.59 = 29 \text{ cm} \end{cases}$$

Se escoge el mayor valor , por lo tanto, con un concreto de 28 Mpa se requiere una longitud mínima de desarrollo a compresión de 30 cm, ahora bien, estamos cumpliendo con los requisitos de la norma NSR-10 por que exige que el valor de Ldc sea mayor o igual que 20 cm, entonces para el refuerzo mínimo en las zonas sometidas a compresión utilizando 3 barras #5 se requiere que la longitud de desarrollo sea de 30 cm.

6.3.5 CÁLCULAR LONGITUD DE DESARROLLO CON GANCHOS ESTÁNDAR

La norma establece los requisitos para los ganchos estándar sometidos a tracción en el Título C de la NSR-10, existen dos tipos de ganchos el de 90° y 180°, estos ganchos la norma menciona ciertas condiciones que se deben cumplir, la primera condición a la que se va a referir la norma es con respecto al diámetro de doblez de la barra y la otra condición es la extensión mínima donde termina el diámetro de doblez hasta una longitud mínima de la barra. Ahora bien, vamos a ver la forma como la norma explica las expresiones para cada condición y tipo de ganchos estándar.

Gancho estándar tipo 180°

Extensión mínima = $4db \geq 6.5\text{ cm}$

Gancho estándar tipo 90°

Extensión mínima = $12db$

Diámetro de doblado

Para barras #3 a #8 = $6db$

Para barras #9 a #11 = $8db$

Para barras #14 a #18 = $10db$

Longitud de desarrollo con ganchos

La norma NSR-10 nos dice que esta longitud de desarrollo en los ganchos se define como “Ldh” que empieza desde el gancho hasta donde termina la zona crítica de la sección de concreto, el parámetro Ldh es igual a una longitud mínima por unos factores y que debe ser mayor o igual a 8

veces el diámetro de la barra o 15 cm como mínimo, la norma muestra la forma como se calcula Ldh en la siguiente expresión.

$$Ldh = \left(\frac{0.24 * \psi_e * f_y}{\lambda * \sqrt{f'_c}} \right) * db \quad (1)$$

$$Ldh \geq 8db \text{ ó } 15 \text{ cm} \quad (2)$$

Parámetros de calculo

$\psi_e = 1.0$ Factor de tipo recubrimiento ,sín recubrimiento epoxico.

$f_y = 420 \text{ Mpa}$ Resistencia a la tensión del acero.

$\lambda = 1.0$ Peso del concreto normal.

$f'_c = 28 \text{ Mpa}$ Resistencia a la compresión del concreto.

$db =$ Diámetro de la barra para tracción #7 y para compresión #5

Calcular longitud de desarrollo con gancho para barras en tracción

Primeramente, aplicamos la expresión para calcular la longitud de desarrollo mínima y reemplazando valores

Sí tenemos una barra #7 su diámetro es igual a 2.22 cm

$$Ldh = \left(\frac{0.24 * 1.0 * 420}{1.0 * \sqrt{28}} \right) * 2.22$$

$$ldh = 42.28 \approx 42.0 \text{ cm}$$

Verificando el valor de Ldh es mayor que 8 veces el diámetro de la barra, entonces si cumple.

Calcular extensión mínima para gancho a tracción y diámetro de doblez

$$Gancho = 90^\circ$$

$$Extensión\ mínima = 12\ db$$

$$Extensión\ mínima = 26.64 \approx 25\ cm$$

$$Para\ barras\ \#7 = 6db$$

$$Doble\ = 13.32 \approx 13.0\ cm$$

La extensión mínima que debe tener el gancho de 90° para la zona en tracción es igual 26.64 cm, por otro lado, en la construcción se ha visto que es práctico trabajar con múltiplos de 5, por esto se consideraría tomar un valor de la extensión mínima del gancho igual a 25 cm. En el software Pilot Structural se puede también verificar los resultados obtenidos para el cálculo de la extensión mínima de los ganchos y también usa una aproximación con los cálculos con múltiplos de 5.

Calcular longitud de desarrollo con gancho para barras en compresión

Primeramente, aplicamos la expresión para calcular la longitud de desarrollo mínima y reemplazando valores.

Sí tenemos una barra #5 su diámetro es igual a 1.59 cm

$$L_{dh} = \left(\frac{0.24 * 1.0 * 420}{1.0 * \sqrt{28}} \right) * 1.59$$

$$ldh = 30.28 \approx 30.0\ cm$$

Verificando el valor de Ldh es mayor que 8 veces el diámetro de la barra, entonces si cumple.

Calcular extensión mínima para gancho a compresión y diámetro de doblez

$$\text{Gancho} = 90^\circ$$

$$\text{Extensión mínima} = 12 \text{ db}$$

$$\text{Extensión mínima} = 19.08 \approx 20 \text{ cm}$$

$$\text{Para barras \#5} = 6 \text{ db}$$

$$\text{Doble} = 9.54 \approx 10.0 \text{ cm}$$

La extensión mínima que debe tener el gancho de 90° para la zona a compresión es igual 19.08 cm, por otro lado, en la construcción se ha visto que es práctico trabajar con múltiplos de 5, por esto se consideraría tomar un valor de la extensión mínima del gancho igual a 20 cm. En el software Pilot Structural se puede también verificar los resultados obtenidos para el cálculo de la extensión mínima de los ganchos y también usa una aproximación con los cálculos con múltiplos de 5.

Resumen del cálculo de longitud de desarrollo con ganchos estándar

Zona	#Barras	Ldh	Tipo	Gancho	Doble
Tracción	4#7	40 cm	90°	25 cm	13 cm
Compresión	3#5	30 cm	90°	20 cm	10 cm

*Tabla 12. Resultados de los ganchos estándar en tracción y compresión. Fuente: **Propia***

En esta tabla muestra un resumen de los cálculos obtenidos manualmente se puede ver la información del tipo gancho, la correspondiente zona si es a tracción o compresión y la colocación de los aceros y las longitudes mínimas del gancho que se requieren en el diseño, se verificó que cada valor calculado coincide exactamente con los valores que entrega el software Pilot Structural.

6.3.6 USO DEL SOFTWARE PILOT STRUCTURAL DESPIECE ACEROS A FLEXIÓN

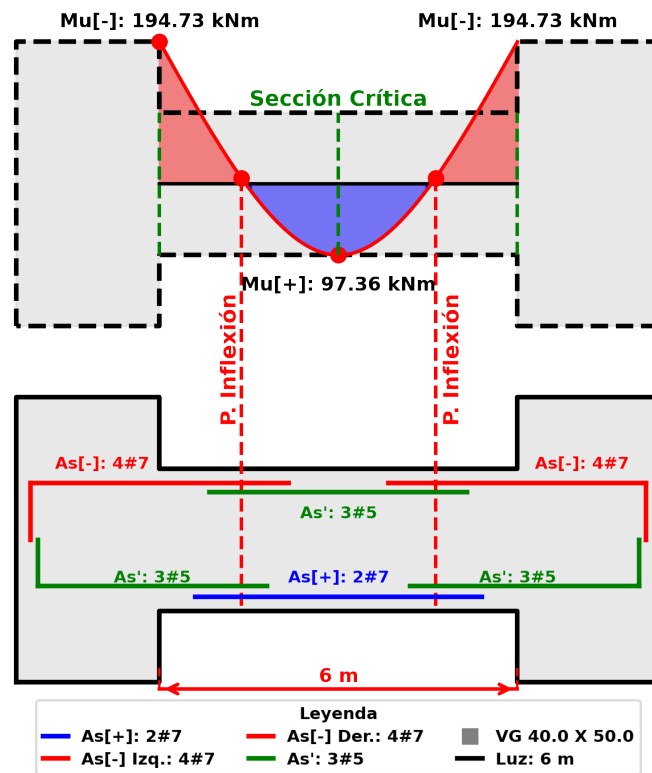


Ilustración 33. Uso del software Pilot Structural, Optimización despiece de aceros. Fuente: Propia

En la imagen presente, tenemos un esquema generado por el software Pilot Structural, donde el usuario puede ver la información correspondiente de la sección transversal de la viga, la luz, y la disposición de los aceros longitudinales en las zonas críticas donde la viga solicita los momentos máximos. El software realiza una optimización teórica del despiece de los aceros a flexión. Es importante señalar que la optimización realizada por el software tiene fines educativos y un enfoque didáctico para los estudiantes de ingeniería civil.

6.3.7 METODOLOGÍA DISEÑO A CORTANTE

f) Una vez calculado el análisis estructural y el método del diseño a flexión vamos a continuar con el desarrollo de este ejercicio de aplicación , se procede a utilizar el método de diseño a cortante de vigas de concreto reforzado, para llevar los procedimientos de este método, se seguirá la metodología propuesta en las clases impartidas por los docentes de estructuras y siguiendo con los requisitos de la norma NSR-10 para el diseño a cortante. A continuación, se muestra una tabla con valores ya conocidos que realizaron antes en el análisis estructural y diseño a flexión estos valores de entrada vamos a tener en cuenta para cada uno de los procedimientos en el diseño a cortante y la verificación de los resultados con el software Pilot Structural, es importante aclarar que el alcance del software abarca hasta el método de diseño cortante.

Parametro	Valor	Unidad
Carga ultima de servicio	64.91	kN/m
Cortante máximo	194.75	kN
Estribo diseño	#3	N/A
Área de estribo	71	mm ²
Ancho	40	cm
Altura	50	cm
Recubrimiento	5	cm
Altura efectiva util	45	cm
Concreto f'c	28	Mpa
Acero fy	420	Mpa
Factor de resistencia	0.75	N/A

Tabla 13. Parámetros y solicitaciones de la viga, método diseño cortante. Fuente: **Propia**

Ahora bien, ya que tenemos los datos conocidos para empezar con el desarrollo del ejercicio de aplicación utilizando el método de diseño a cortante es importante calcular el diseño a cortante para vigas de concreto reforzado , ya que conocemos que la resistencia a tracción del concreto es baja, además se debe tener en cuenta que la falla a cortante en el concreto es frágil porque esta falla ocasiona grietas mas pronunciadas que las grietas que ocurren por flexión, por esto se requiere usar estribos en las vigas o columnas o cualquier elemento estructural para garantizar que en el caso de la falla primero falle por flexión que sería un tipo de falla dúctil más controlado, así que siempre se busca evitar la falla por cortante y asegurar un comportamiento más dúctil en el diseño de las estructuras, a continuación vamos a desarrollar el ejercicio de aplicación siguiendo con los procedimientos de este método y los requisitos establecidos por la norma NSR-10.

6.3.8 SOLICITACIONES FUERZA CORTANTE

Una vez ya realizado el análisis estructural de la viga y calculando las reacciones en los apoyos, debido a las cargas externas que actúan sobre la viga se procede a identificar las solicitaciones máximas del diagrama de fuerza cortante, podemos ver que en las secciones críticas se presentan las solicitaciones máximas que se deben considerar en el diseño. A continuación, se mostrará el paso a paso como podemos de una manera más fácil encontrar una expresión que me permita calcular los valores de la fuerza cortante en función de la posición de la variable “ x ” a lo largo de la viga, como se trata de una viga simétrica con una condición de apoyo empotrado en los extremos y una configuración de carga linealmente distribuida, vamos ahora sí a calcular los valores de cortante y verificar como el software Pilot Structural muestra los resultados.

Parámetros de calculo

$$Wu = 64.91 \frac{kN}{m} \quad \text{Carga ultima de servicio}$$

$$Luz = 6.0 \, m \quad \text{Longitud de la viga}$$

Datos iniciales del tipo de viga configurada con doble empotramiento y carga linealmente distribuida.

Reacciones en los apoyos

$$Ray = Rby = \frac{64.91 \frac{kN}{m} * 6.0 \, m}{2} = 194.73 \, kN$$

Como el tipo de viga que analizamos es simétrica la reacción de los apoyos es igual.

Fuerza cortante en función de la posición

$$\Sigma fy = 0$$

$$Ray - Wu * (x) + V(x) = 0$$

$$V(x) = Ray - Wu * (x)$$

Encontramos ya la expresión de fuerza cortante en función de la variable “x”

Sustituyendo valores conocidos

$$V(x) = 194.73 \, kN - 64.9 \frac{kN}{m} * (x)$$

La expresión de la fuerza cortante quedaría así , ahora vamos a evaluar para cada valor de la cortante.

Evaluamos el cortante para distintos valores de posición

Ahora bien, vamos a evaluar el valor la fuerza cortante para diferentes posiciones a lo largo de la viga en la siguiente tabla.

x (m)	V(x) kN
0.0 m	$V(x) = 194.73 - 64.91 (0.0) = 194.73 \text{ kN}$
1.0 m	$V(x) = 194.73 - 64.91 (1.0) = 129.82 \text{ kN}$
2.0 m	$V(x) = 194.73 - 64.91 (2.0) = 64.91 \text{ kN}$
3.0 m	$V(x) = 194.73 - 64.91 (3.0) = 0.0 \text{ kN}$
4.0 m	$V(x) = 194.73 - 64.91 (4.0) = - 64.91 \text{ kN}$
5.0 m	$V(x) = 194.73 - 64.91 (5.0) = -129.82 \text{ kN}$
6.0 m	$V(x) = 194.73 - 64.91 (6.0) = -194.73 \text{ kN}$

*Tabla 14. Valores de la cortante para diferentes posiciones a lo largo de la viga. Fuente: **Propia***

Se puede observar en la tabla que los resultados obtenidos de la expresión de la cortante evaluando para cada posición de la longitud de la viga , tenemos que la reacción del apoyo izquierdo inicia con una fuerza cortante positiva y a medida que vamos evaluando mas puntos a lo largo de la viga la fuerza cortante va disminuyendo de manera lineal debido a la carga distribuida sobre la viga. A continuación, se presenta una imagen del grafico de la fuerza cortante para la viga que se está analizando, generada a partir de los resultados obtenidos por el software Pilot Structural.

Resultados obtenidos por el software Pilot Structural

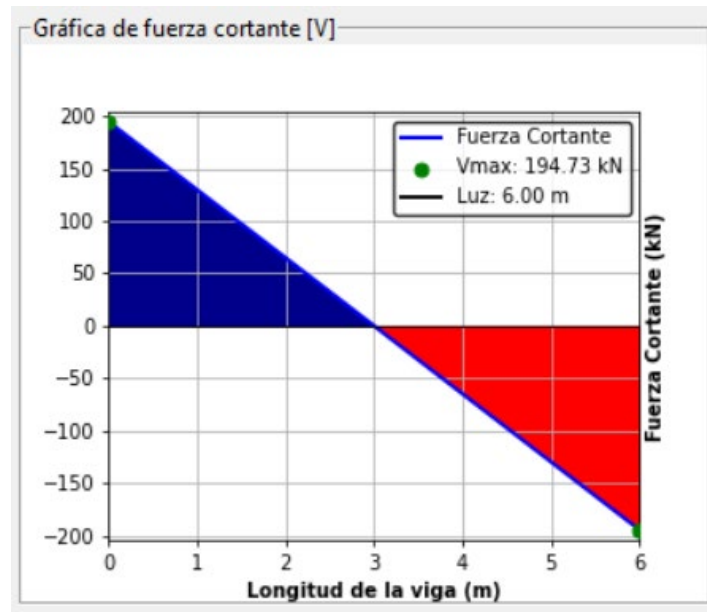


*Imagen 30. Uso del software Pilot Structural, gráfica de fuerza cortante. Fuente: **Propia***

El software Pilot Structural entrega resultados exactos en el análisis estructural, permitiendo visualizar la información de las solicitaciones máximas del diagrama de fuerza cortante y la longitud de la viga, entonces le brinda al usuario confiabilidad de los resultados precisos y otros parámetros que se tienen en cuenta en el diseño a cortante, además se verifico que los cálculos realizados por el software Pilot Structural coinciden con los cálculos manuales. Ahora bien, ya que tenemos las solicitaciones de la viga , continuamos con el desarrollo del ejercicio de aplicación utilizando el método de diseño cortante y algunas condiciones que menciona la norma NSR-10. Entonces vamos a proceder calculando el cortante de diseño ultimo teniendo en cuenta los requisitos de la norma y la metodología de los docentes impartida en las clases de estructuras.

6.3.9 CALCULAR CORTANTE DE DISEÑO

Para pasar al diseño debemos tener en cuenta los requisitos de la norma NSR-10 en el Título C numeral C.11.1 que define cual es la resistencia a cortante , entonces para el diseño cortante se utilizara el método de resistencia que consiste que la sollicitación requerida en términos de cortante debe ser menor o igual que la capacidad de resistencia a cortante de la sección y la norma para expresar esta condición de diseño lo hace de la siguiente manera.

$$Vu \leq \phi Vn \quad (1)$$

Esta es la expresión que la norma estable como condición de diseño que la sollicitación a la que está sometido un elemento estructural debe ser menor o igual a su capacidad de resistencia.

$$\phi Vn = \phi Vc + \phi Vs \quad (2)$$

En esta expresión lo que nos dice la norma es que la resistencia de la capacidad de la sección es igual a lo aporta la resistencia a cortante del concreto más lo que aporta la resistencia a cortante del refuerzo transversal, respecto al factor de resistencia que se utiliza para el diseño a cortante y torsión tiene un valor igual a $\phi = 0.75$ lo menciona la norma en el numeral C.9.3.2.3 y este factor de reducción está asociada al tipo de falla.

Para calcular el cortante solicitado o cortante de diseño “Vu”, la NSR-10 lo menciona en el numeral C.11.1.3, se establece que se puede calcular un cortante al eje o un cortante a la distancia “d” de la cara del apoyo , donde “d” es la profundidad efectiva útil de la sección transversal y ahí podemos determinar el cortante solicitado con respecto a una distancia “d” de la cara del apoyo, entonces así que la norma establece diseñar con el cortante ultimo que es menor al cortante al eje

Teniendo ya los parámetros definidos que se calcularon anteriormente vamos a proceder con los procedimientos manuales para calcular la cortante de diseño finalmente comparar si se cumple la condición de diseño que las solicitaciones no deben superar la capacidad de resistencia se hará una verificación de los datos calculados por el software Pilot Structural.

Esquema de viga empotrada y cortante solicitado

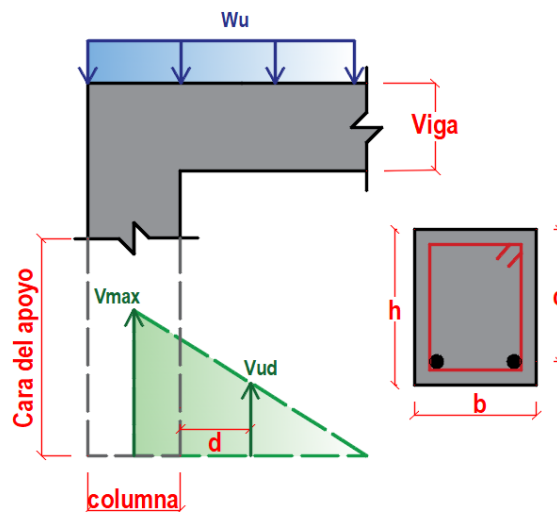


Ilustración 34. Esquema de viga empotrada y cortante solicitado. Fuente: Propia

En esta imagen podemos ver las condiciones como se puede realizar el diseño de cortante solicitado “ V_u ”, donde tenemos el cortante máximo en el eje “ V_{max} ” en el apoyo y el cortante a una distancia “ d ” que sería la altura efectiva útil de la sección transversal que va desde la fibra superior del concreto hasta la posición del acero longitudinal, con respecto al borde de la columna, la cortante que llega al eje es la misma columna que absorbe todo el cortante máximo por esto se ha visto que la falla puede ocurrir a una distancia de la cara del apoyo y para evitar esta falla a tracción es importante diseñar los estribos y controlar su separación siguiendo con los requisitos de la norma, mas adelante vamos a presentar como se calcula el cortante de diseño teniendo en cuenta los parámetros definidos para este ejercicio de aplicación.

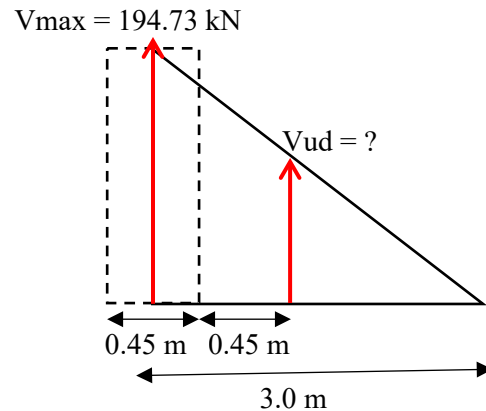
Datos del ejercicio de aplicación

Entonces iniciamos definiendo los parámetros y los valores según como se venía realizando el ejercicio de aplicación.

Parámetros de diseño

$W_u = 64.91 \text{ kN/m}$	Carga ultima de servicio
$\phi = 0.75$	Factor de reducción a la resistencia cortante
$f_y = 420 \text{ Mpa}$	Resistencia a la fluencia del acero
$f'_c = 28 \text{ Mpa}$	Resistencia a la compresión del concreto
$b = 0.40 \text{ m}$	Ancho de la viga
$h = 0.50 \text{ m}$	Altura de la viga
$r = 5.0 \text{ cm}$	Recubrimiento a una fila
$d = 0.45 \text{ m}$	Altura efectiva útil
$V (+) = 194.73 \text{ kN}$	Solicitación máxima cortante positivo
$b = 0.45 \text{ m}$	Ancho de la columna
$\emptyset \text{Estribo} = \#3$	Estribo de diseño #3
$A_s E\#3 = 71 \text{ mm}^2$	Area del estribo #3

Calcular cortante solicitado



Relación de triángulos para encontrar el valor de Vud

$$\frac{194.73 \text{ kN}}{3.0 \text{ m}} = \frac{V_{ud}}{3.0 \text{ m} - \frac{1}{2} * 0.45 \text{ m} + 0.45 \text{ m}}$$

$$\frac{194.73 \text{ kN}}{3.0 \text{ m}} = \frac{V_{ud}}{3.0 \text{ m} - 0.675 \text{ m}}$$

$$194.73 \text{ kN} (2.325 \text{ m}) = V_{ud} (3.0 \text{ m})$$

$$V_{ud} = \frac{452.74725 \text{ kN} * \text{m}}{3.0 \text{ m}}$$

$$V_{ud} = 150.915 \text{ kN}$$

Verificación valor de resistencia a cortante del concreto

Si $x = 0.675$,Entonces $V(x) = V_{max} - W_u (x) = ?$

$$V(x) = 194.73 - 64.91 (0.675) = 150.915 \text{ kN}$$

Una vez ya se identifica en el esquema del triángulo que está relacionado con el comportamiento del diagrama de fuerza cortante se procede hacer una relación de triángulos para encontrar el valor

del cortante solicitado, como resultado de este procedimiento se obtuvo un valor de cortante ultimo igual a 150.915 kN, posteriormente se verifico el resultado con el software Pilot Structural , comparando el valor calculado manualmente con el obtenido del software se evidencio una coincidencia exacta entre ambos resultados. El software Pilot Structural presenta los resultados de los cálculos con una aproximación decimal, arrojando un valor igual 150.92 kN.

6.4 CALCULAR RESISTENCIA A CORTANTE DEL CONCRETO

Para el calculo de la resistencia a cortante del concreto según la norma NSR-10 en el capítulo C numeral C.11.2 , se define que para vigas de concreto reforzado se expresa de la siguiente manera.

$$\phi V_c = \phi * 0.17 * \lambda * \sqrt{f'_c} * b * d \quad (1)$$

Este factor de la resistencia a cortante del concreto nos va a decir en que zona de la viga esta trabajando el concreto y el refuerzo transversal.

Calcular cortante que resiste el concreto

$$\phi V_c = 0.75 * 0.17 * 1.0 * \sqrt{28Mpa} * 400 \text{ mm} * 450 \text{ mm}$$

$$\phi V_c = 121439.9852 * \frac{1}{1000}$$

$$\phi V_c = 121.439 \approx 121.44 \text{ kN}$$

Una vez calculado el valor de la cortante que resiste el concreto igual 121.44 kN , procedemos hacer una relación de triángulos en el diagrama de cortante para encontrar la longitud que se encuentra este factor de resistencia con esto podemos identificar en que parte de la viga el concreto absorbe la cortante.

Relación de triángulos para encontrar la longitud que resiste el concreto

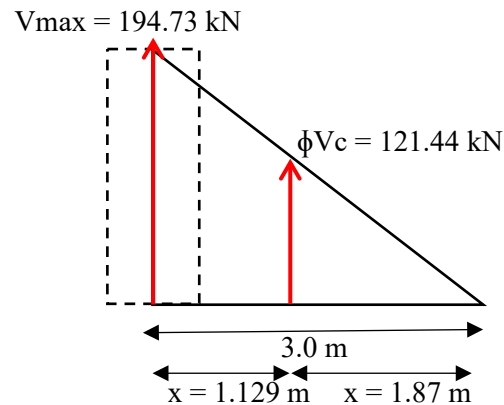
$$\frac{194.73 \text{ kN}}{3.0 \text{ m}} = \frac{121.44 \text{ kN}}{x}$$

$$194.73 (x) = 364.32$$

$$(x) = \frac{364.32}{194.73}$$

$$(x) = 1.87 \text{ m}$$

$$(x) = 3 - 1.871 \text{ m} = 1.129 \text{ m}$$



Verificación valor de resistencia a cortante del concreto

Si $x = 1.129$, Entonces $V(x) = V_{max} - W_u(x) = ?$

$$V(x) = 194.73 - 64.91 (1.129) = 121.44 \text{ kN}$$

Una vez ya realizado el cálculo del factor de resistencia a cortante del concreto y también determinar la correspondiente longitud mediante relación de triángulos, ahora se procede a calcular la capacidad mínima a cortante que resiste el concreto.

Calcular capacidad mínima a cortante que resiste el concreto

La capacidad mínima a cortante que resiste el concreto se puede definir como secciones de la viga donde la demanda estructural no tiene mayores esfuerzos a cortante, en estas zonas la fuerza cortante va disminuyendo y se recomienda disponer estribos mas separados hasta que el cortante alcance un valor de $\phi V_c/2$.

$$\frac{\phi V_c}{2} = \frac{121.44 \text{ kN}}{2} = 60.72 \text{ kN}$$

Relación de triángulos para encontrar la longitud que resiste la capacidad mínima del concreto

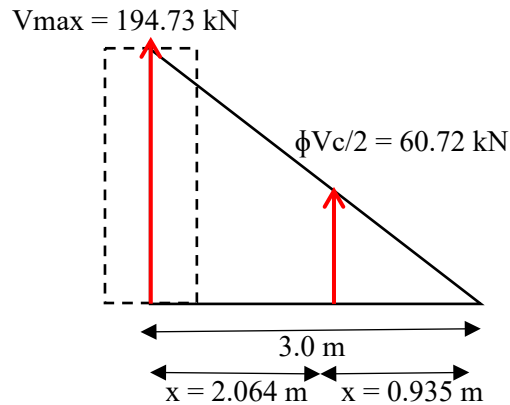
$$\frac{194.73 \text{ kN}}{3.0 \text{ m}} = \frac{60.72 \text{ kN}}{x}$$

$$194.73 (x) = 182.16$$

$$(x) = \frac{182.16}{194.73}$$

$$(x) = 0.935 \text{ m}$$

$$(x) = 3 - 0.935 \text{ m} = 2.064 \text{ m}$$



Verificación valor de resistencia a cortante del concreto

Si $x =$, Entonces $V(x) = V_{max} - W_u(x) = ?$

$$V(x) = 194.73 - 64.91 (2.064) = 60.75 \text{ kN}$$

Una vez ya se obtienen los resultados de las resistencias de la capacidad del concreto que resiste a cortante y de la capacidad mínima del concreto se procede a verificar las condiciones de diseño y comparar si se debe diseñar refuerzo transversal, colocar área de acero mínima o de lo contrario no se necesita refuerzo transversal.

Condiciones de diseño

$$\text{Si } V_u > \phi V_c$$

Como ya se calculó el cortante solicitado y la capacidad del concreto que resiste a cortante, podemos ver que la condición de diseño se cumple y se requiere diseñar refuerzo transversal.

6.4.1 CALCULAR RESISTENCIA A CORTANTE DEL ACERO

Primeramente, tenemos que la norma menciona en el capítulo C , numeral C.11.4 que la resistencia de la fluencia del acero debe ser menor o igual que 420 Mpa ya sea para estribos inclinados , estribos perpendiculares, en espiral o en otros tipos de estribos , siempre el esfuerzo de fluencia del acero debe ser menor o igual a una resistencia de 420 Mpa a continuación vamos a ir viendo más adelante las expresiones que se tienen en cuenta para el diseño y los requisitos de la norma NSR-10. La norma menciona unas expresiones

$$Vu = \phi Vn \quad (1) \quad \text{principio de resistencia solicitada y capacidad de la sección}$$

$$Vu = \phi (Vc + Vs) \quad (2) \quad \text{Factor de resistencia del diseño a cortante}$$

$$Vu = (\phi Vc + \phi Vs) \quad (3) \quad \text{Aporte de resistencia a cortante del concreto y acero}$$

$$Vs = \frac{Vu}{\phi} - \frac{Vc}{\phi} \quad (4) \quad \text{Resistencia a cortante del acero transversal}$$

De esta manera podemos organizar las expresiones para calcular la resistencia a cortante del acero transversal como lo especifica en los requisitos de la norma NSR-10.

Reemplazamos valores en la expresión

$$Vs = \frac{Vu}{\phi} - Vc \quad (4)$$

$$Vs = \frac{150.915 \text{ kN}}{0.75} - \frac{121.44 \text{ kN}}{0.75} = 39.31 \text{ kN}$$

Lo que debe resistir el acero transversal a cortante es igual a 39.31 kN , ahora vamos a verificar si la sección transversal diseñada es adecuada, con la siguiente expresión de la norma NSR-10.

Verificar control de tamaño de la sección

Sí lo que requiere la resistencia a cortante del acero aportar es menor o igual que la condiciones que especifica la norma en el título C, numeral C.11.7.9 la siguiente condición se expresa de la siguiente manera.

$$V_s \leq 0.66\sqrt{f'_c} * b * d \quad (1)$$

Sí lo que requiere la resistencia del acero es menor o igual que la expresión, la sección transversal de diseño es adecuada si es lo contrario la resistencia del acero es mayor se debe aumentar el tamaño de la sección.

Reemplazamos valores en la expresión

$$V_s \leq 0.66\sqrt{f'_c} * b * d \quad (1)$$

$$39.31 \text{ kN} \leq 0.66\sqrt{28 \text{ Mpa}} * 400 \text{ mm} * 450 \text{ mm} * \frac{1}{1000}$$

$$39.31 \text{ kN} \leq 628.630 \text{ kN}$$

Con esto se concluye que el 66% de la resistencia de la sección de concreto cumple con la condición de que la sección transversal diseñada es adecuada y se cumple la condición de que la resistencia a cortante del acero es menor o igual que la resistencia de la sección de concreto. Se recomienda hacer esta verificación siempre que se tenga que diseñar el refuerzo transversal, por que si la sección no es adecuada se tendrá que aumentar las dimensiones antes de calcular cualquier resistencia, ahora bien, también se verifico los cálculos manuales y los resultados obtenidos por el software Pilot Structural y se evidencia una coincidencia exacta de los procedimientos.

6.4.2 REQUISITO NSR-10 RESISTENCIA A CORTANTE DEL ACERO

Uno de los requisitos mínimos de la norma NSR-10 que menciona para calcular el 33% de la resistencia del concreto y se expresa de la siguiente manera.

$$V_s < 0.33\sqrt{f'_c} * b * d \quad (1)$$

Sí comparamos lo que debe resistir a cortante el acero transversal y la condición de diseño que menciona la norma, tenemos que la separación máxima tiene dos posibles maneras de calcular.

$$\text{Sí } V_s < 0.33\sqrt{f'_c} * b * d \quad (1)$$

$$S_{max} \leq \begin{cases} \frac{d}{2} \\ 60 \text{ cm} \end{cases}$$

$$\text{Sí } V_s > 0.33\sqrt{f'_c} * b * d \quad (2)$$

$$S_{max} \leq \begin{cases} \frac{d}{4} \\ 30 \text{ cm} \end{cases}$$

Reemplazamos valores en la expresión

$$39.31 \text{ kN} < 314.315 \text{ kN}$$

Comparamos lo que debe resistir el cortante del acero con la condición de diseño establecida en la norma NSR-10 y vemos que se cumple por lo tanto su separación máxima se calcula de la siguiente expresión.

$$S_{max} \leq \left\{ \frac{45}{2} = 22 \approx 20 \text{ cm} \right.$$

Por lo tanto, obedeciendo los requisitos de la norma NSR-10 , la separación máxima es de 22 cm , además podemos optimizar la separación de los estribos hasta ese valor sin embargo se recomienda utilizar separaciones que sean múltiplos de 5 para este caso se elige una separación máxima de 20 cm, ahora bien, continuando con el ejercicio de aplicación vamos a calcular el area de acero mínima.

6.4.3 CALCULAR ÁREA DE ACERO MÍNIMO

Para calcular el área de acero mínimo que esta dado en el capítulo C de la NSR-10 en el numeral C.11.4.36 ese acero mínimo de esta definido de la siguiente expresión.

$$A_v = 0.062 * \sqrt{f'_c} * \frac{b * s}{f_y} \leq \frac{0.35 * b * s}{f_y} \quad (1)$$

En esta expresión muestra dos posibles valores para calcular el área de acero mínimo para ambas expresiones y se escoge el valor mayor entre los dos.

Reemplazamos valores en la expresión

$$A_{v1} = 0.062 * \sqrt{28 \text{ Mpa}} * \frac{400 \text{ mm} * 200 \text{ mm}}{420 \text{ Mpa}}$$

$$A_{v1} = 62.490 \text{ mm}^2$$

$$A_{v2} = \frac{0.35 * 400 \text{ mm} * 200 \text{ mm}}{420 \frac{N}{\text{mm}^2}}$$

$$A_{v2} = 66.67 \text{ mm}^2$$

De acuerdo con la NSR-10 se debe escoger el valor mayor entre los dos para garantizar un área de acero mínimo en el refuerzo transversal por lo tanto se escoge un área de acero mínimo de 66.67 mm² , ahora bien, más adelante vamos a ir calculando para este ejercicio de aplicación el numero de ramas que se requieren para el estribo y escoger el estribo para el diseño del refuerzo transversal.

6.4.4 CALCULAR NUMERO DE RAMAS DEL ESTRIBO

Una vez ya calculado el área de acero mínimo que es un valor que está asociada directamente al número de ramas de los estribos, entonces primeramente se define cual estribo vamos a utilizar , si son estribos #2 , #3 o #4 por lo tanto el perímetro de un estribo se conforma de dos ramas.

$$\# Ramas = \frac{Av \min}{As \#estribo} \quad (1)$$

Asumimos que tenemos un estribo de diseño #3 , su area es igual a 71 mm^2 , por lo tanto, la fuerza cortante que absorbe los estribos lo conforma dos ramas , cada rama del estribo le corresponde un área de acero para resistir las solicitaciones máximas.

$$Av = 2 * As \# estribo \quad (2)$$

Esta expresión nos dice que para un estribo #3 el area de acero mínimo es igual a dos veces por el area de acero del estribo, ahora bien, vamos a continuar el cálculo de las expresiones.

Reemplazamos valores en la expresión

$$\# Ramas = \frac{66.67 \text{ mm}^2}{71 \text{ mm}^2} = 0.939 \approx 2 \text{ ramas}$$

$$Av = 2 * 71 \text{ mm}^2 = 142 \text{ mm}^2$$

Para un estribo #3 , el número de ramas calculado es de 0.939 , por lo tanto, se requiere un diseño con dos ramas, ahora bien, continuando con el desarrollo del ejercicio vamos a calcular la resistencia de los estribos #3 en función de la separación máxima que ya se obtuvo de los cálculos anteriores , el valor correspondiente a la separación máxima de los estribos es igual a 20 cm.

6.4.5 CALCULAR RESISTENCIA DE ESTRIBOS

Una vez ya calculado la resistencia a cortante que deben proporcionar los estribos #3 y la separación máxima se procede a calcular la siguiente expresión.

$$V_s = \frac{A_v * f_y}{s} * d \quad (1)$$

Parámetros de cálculo

$A_v = 142 \text{ mm}^2$ *Area de acero que proporciona estribo#3*

$f_y = 420 \text{ Mpa}$ *Resistencia a la tensión del acero*

$s = 200 \text{ mm}$ *Separación máxima de estribos*

$d = 450 \text{ mm}$ *Altura efectiva util*

Reemplazamos valores en la expresión

$$V_s = \frac{142 * 420}{200} * 450 * \frac{1}{1000}$$

$$V_s = 134.190 \text{ kN}$$

El valor calculado de la resistencia de los estribos #3 es de 134.190 kN colocados cada 20.0 cm, ahora bien, vamos a calcular la capacidad de resistencia nominal de la sección que seria el aporte de resistencia de los estribos más el aporte de resistencia de la capacidad del concreto para ver si cumple con la condición de que el cortante de diseño solicitado es menor o igual que la capacidad resistencia a cortante que aporta el refuerzo transversal y el concreto.

6.4.6 CALCULAR CAPACIDAD DE RESISTENCIA A CORTANTE

Retomando el concepto de diseño donde tenemos que garantizar el aporte de resistencia del concreto y la resistencia del acero de refuerzo transversal , se debe cumplir la condición de diseño que se expresa de la siguiente manera.

$$V_u \leq \phi V_n \quad (1)$$

Esta expresión esta especificado en la NSR-10 en el capitulo C , en el numeral C.11.1 , la norma menciona el método de resistencia ultima para aplicar el diseño por resistencia a cortante, donde la resistencia ultima debe ser menor o igual a la capacidad reducida por un factor de resistencia igual a 0.75 , en términos de cortante , tenemos que el cortante de diseño solicitado debe ser menor o igual que la capacidad nominal a cortante de la sección.

Parámetros de cálculo

$$V_u = 150.915 \text{ kN} \quad \text{Cortante ultimo de diseño}$$

$$V_s = 134.190 \text{ kN} \quad \text{Resistencia a la cortante de los estribos}$$

$$V_c = 121.44 \text{ kN} \quad \text{Resistencia a cortante del concreto}$$

$$\phi = 0.75 \quad \text{Factor de reducción}$$

Reemplazamos valores en la expresión

$$V_u = 150.915 \text{ kN} \leq \phi V_n = 121.44 \text{ kN} + 0.75 (134.190 \text{ kN})$$

$$V_u = 150.915 \text{ kN} \leq \phi V_n = 222.0825 \text{ kN}$$

El valor calculado de ϕV_n es de 222.0825 kN, lo que representa la capacidad de la sección de concreto cuando se colocan estribos cada 20.0 cm.

Hasta este punto ya llegamos a la parte final del desarrollo del ejercicio de aplicación finalizando con los cálculos de diseño a cortante que se venía realizando desde el diseño a flexión.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para este análisis de resultados, se quiere comprobar la optimización y validación de los cálculos obtenidos por el software Pilot Structural cabe resaltar que el alcance de este estudio de investigación es el desarrollo de un software educativo en Python para el análisis estructural y diseño de vigas de concreto reforzado, una herramienta educativa y didáctica para los estudiantes de ingeniería civil, este software será como una herramienta de apoyo a los estudiantes para facilitar la comprensión de los conceptos de diseño estructuras de concreto reforzado y siguiendo los requisitos mínimos de la norma NSR-10 , los estudiantes pueden ir verificando los cálculos manuales mediante el software y así mismo comprobar los resultados obtenidos de forma más eficiente para validar los cálculos realizados en clase. El software no solamente tiene como objetivo de automatizar y simplificar los cálculos para los métodos de diseño a flexión y cortante, es una herramienta de innovación tecnológica que ayuda a consolidar el aprendizaje de los estudiantes y también les ayuda a tener retroalimentación de los resultados para cada procedimiento del cálculo que se vaya realizando. Pilot Structural cuenta con una configuración de interfaz gráfica simple e intuitiva , que le permite al usuario usar las herramientas del software con mas facilidad, desde el ingreso de datos para definir las propiedades mecánicas de los materiales y la geometría de la viga que son los procesos principales para iniciar en la etapa de

diseño de las vigas , se evidencia que los datos ingresados en el software muestran una estructura organizada y simple para guiar al usuario en todo los procesos.

En el caso de definir la sección transversal de una viga , el software tiene restringido el tipo de viga para el análisis estructural , se centra en tipos de vigas que tienen un comportamiento de equilibrio estático determinado , el tipo de viga que usa el software para hacer el análisis estructural son vigas de un tramo de solo una luz con configuración de apoyos empotrados y una configuración de carga linealmente distribuida, se identifico que el software entrega de forma precisa y confiable los resultados de los cálculos de la reacciones en los apoyos , el ingreso de datos se muestra en orden y clara para guiar al usuario en los procesos de los cálculos.

La confiabilidad y precisión con la que el software Pilot Structural muestra los resultados de cada calculo, le permite al usuario comprobar de manera mas efectiva los procedimientos desarrollados manualmente, esto le ayuda al estudiante minimizar los errores en los procedimientos, además el software usa un sistema de aproximación numérica que asegura la exactitud de los cálculos realizados sin generar variaciones en los resultados obtenidos manualmente

En la parte del análisis estructural para visualizar los diagramas de fuerza cortante y momento flector , principalmente el software genera estos diagramas para el tipo de viga con condición de apoyos doblemente empotrada y con carga linealmente distribuida, se puede ver la precisión de los valores y detalle de la información que entrega el software de manera clara las solicitaciones máximas de la viga , como los momentos y cortantes máximos en las zonas críticas.

En los métodos de diseño de concreto reforzado el software Pilot Structural , emplea en su sistema dos métodos principales, el diseño a flexión y diseño a cortante, a partir de los métodos el usuario puede asignar el acero de refuerzo a flexión necesario para resistir las solicitaciones máximas y

también para asignar la distribución de estribos del refuerzo transversal así mismo cumpliendo con los requisitos mínimos de la norma NSR-10.

En los procedimientos que se venía calculando manualmente , el software Pilot Structural implementa estos métodos de diseño flexión y cortante y se pudo observar que los resultados obtenidos por el software coinciden los valores de forma precisa con respecto a los procedimientos que se calculan a mano, estos procedimientos que ejecuta el software entrega resultados con diferencias mínimas por aproximaciones decimales, esto confirma que los cálculos realizados por el software ofrecen una confiabilidad y validación en cada uno de los procedimientos del diseño de vigas de concreto reforzado.

Durante las etapas del diseño de vigas de concreto reforzado, las herramientas que incluye en el software Pilot Structural abarcan desde la definición de propiedades mecánicas de los materiales, la configuración de las dimensiones de la viga , entre los procedimientos de calculo que entrega el software incluye el cálculo de las cuantías mínimas y máximas, la verificación de la capacidad de momento nominal , asignación del acero a flexión , también el cálculo del refuerzo mínimo como es el momento de agrietamiento y cálculo de longitud de desarrollo del mismo modo para el método de diseño a cortante el software calcula el cortante solicitado de diseño y todos los parámetros que evalúan en este método , todos estos procedimientos el software los realiza conforme a los requisitos de la norma NSR-10. Al comparar los resultados obtenidos por el software con los procedimientos desarrollados manualmente, se comprobó una total coherencia con los resultados generados de forma automática por el software y con los resultados de los cálculos manuales. Esto confirma la validación de los procesamientos que hace el software en su sistema y demuestra la funcionalidad de optimización de cálculos para cada una de las herramientas que viene integrado en el software de Pilot Structural.

8. CONCLUSIONES

- 1) El software Pilot Structural demostró ser una herramienta de innovación tecnológica por la gran variedad de herramientas que ofrece. Es una herramienta confiable y precisa para el análisis estructural y diseño de vigas de concreto reforzado. Los resultados obtenidos por el software coincidieron de forma precisa con los cálculos realizados a mano.
- 2) El desarrollo del software se implementó el lenguaje de programación Python, el cual es un lenguaje muy simplificado para aprender, Python ofrece una variedad de librerías especializadas que son muy útiles para construir algoritmos aplicados en la ingeniería estructural.
- 3) Se logró integrar algoritmos en la estructura de codificación del software usando herramientas como la programación orientada a objetos que nos será de utilidad para el alcance de estudio de investigación del trabajo de grado.
- 4) El software en su sistema de procesamiento de cálculo integra los métodos de diseño de vigas de concreto reforzado como es el diseño a flexión y diseño a cortante, estos métodos se basan en la teoría de la resistencia última donde se evalúa el diseño de vigas en su etapa última de falla. Todos los procedimientos de cálculo que opera el software para los métodos de diseño se implementaron conforme a los requisitos mínimos de diseño de la norma del reglamento colombiano de construcción sismorresistente de la NSR-10 asegurando la validación y confiabilidad de los resultados para cada etapa de diseño.
- 5) Desde el punto educativo el software Pilot Structural se considera como una herramienta didáctica que refuerza el aprendizaje de los estudiantes de ingeniería civil, ya que les permite validar y verificar los cálculos realizados a mano, además su interfaz gráfica es intuitiva, le facilita al estudiante el ingreso de datos y presenta gráficos dinámicos que le

permite al estudiante interpretar con mayor claridad la información generada por el software, para la experiencia del usuario en el uso del software se incluyen mensajes de alerta o ayudas para orientar al estudiante en las etapas de cada proceso.

9. RECOMENDACIONES

El software Pilot Structural es un software educativo de innovación tecnológica ,diseñado para el análisis estructural y diseño de vigas de concreto reforzado se recomienda su uso en contextos académicos debido a las bondades que ofrece el software , entre las que destacan su interfaz didáctica e intuitiva , la visualización de gráficos interactivos y su alineación con los métodos de diseño de la norma de construcción sismo resistente de Colombia la NSR-10. Este software también sigue la metodología de enseñanza impartida por los docentes en los cursos de estructuras, por lo cual se recomienda tener los conceptos teóricos de resistencia de materiales, análisis estructural y diseño de concreto reforzado para poder tener una claridad de interpretación de la información que entrega el software.

9.1 REQUISITOS DEL SISTEMA PARA EJECUTAR PILOT STRUCTURAL

- 1) Sistema operativo, Windows 10 de 64 bits o superior.
- 2) Espacio de disco , 95 MB disponibles el software es liviano no requiere grandes exigencias de almacenamiento.
- 3) Resolución de pantalla, 1920 x 1080 píxeles o superior, para una visualización óptima de la interfaz gráfica de usuario.
- 4) El ejecutable del software se compartirá mediante un enlace de Google Drive para facilitar la descarga del mismo.

10. BIBLIOGRAFÍA

- “Ebooks7-24.” Retrieved March 20, 2025 (<https://www-ebooks7-24-com.unipiloto.basesdedatosezproxy.com/stage.aspx?il=3801&pg=&ed=>).
- “Hormigón Reforzado | Editorial EAFIT.” Retrieved March 25, 2025 (<https://editorial.eafit.edu.co/index.php/editorial/catalog/book/533>).
- “NSR10 - Título B - Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Viceministerio de - Studocu.” Retrieved March 24, 2025 (<https://www.studocu.com/co/document/universidad-eafit/geometria-en-contexto/nsr10-titulo-b/4182161>).
- PDF) Software Para Diseño de Vigas de Hormigón Armado En Pórticos Especiales Resistentes a Momentos.” Retrieved December 3, 2024 (https://www.researchgate.net/publication/355980748_Software_para_diseno_de_vigas_de_hormigon_armado_en_porticos_especiales_resistentes_a_momentos).
- “Young, H. D., & Freedman, R. A. (2014). University Physics with Modern Physics (14^a Ed.).” Retrieved March 21, 2025 (https://www.andrew.cmu.edu/user/bbji/Desktop/University%20Physics%20with%20Modern%20Physics%2015th%20Edition%20By%20Hugh%20D.%20Young_compressed.pdf).
- Asociación Colombiana de Ingeniería. 2010. “Título A: Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente.” *Nsr 10*.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. 2010. “NSR-10, Norma Sismo-Resistente Colombiana - Titulo H.” *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente: NSR 10*.
- Bustos Ruiz, Erika Yorley, and Danna Michel Velásquez Blanco. 2019. “Software Para El Análisis y Diseño de Escaleras En Concreto Reforzado En Forma de I,L y U, Utilizando El Lenguaje de Programación Java.”
- Cervera-Ruiz, M., and E. Blanco-Díaz. 2001. “Mecánica de Estructuras Libro 1 Resistencia de Materiales.” 328.
- Flor, Tytyvyllus. n.d. “Análisis de Estructuras, Método Clásico y Matricial - Jack C. McCormac.”
- González, José Luis Hernández, Néstor Manuel Rezza Díaz, Miguel Ángel Daza Merino, Enrique Acoltzi Bautista, and Israel Jorge Sánchez Sánchez. 2024. “Programación En Phytion Para Regresión Lineal

y Ajuste de Funciones En Las Carreras de Ingeniería, Un Nuevo Enfoque.” *South Florida Journal of Development* 5(9):e4399. doi: 10.46932/sfjdv5n9-034.

González Rodríguez, José de Jesús, and Joel Javier López Barraza. 2018. “Desarrollo de Software Para El Diseño de Vigas, Columnas, Uniones Viga-Columna, Muros de Cortes y Vigas de Acople de Concreto Reforzado En Base al ACI 318-14.”

Gutiérrez Aldana, Willy David, Dannyris Arizeth Moreno Guevara, and Carlos Andrés Sevilla Rugama. 2019. “Software Para Diseño de Vigas Aparentadas de Concreto Reforzado Aplicando El Modelo Puntal-Tensor Según, ACI 318-14.”

Jiménez González, José Ignacio, Javier F. Aceituno, and Fernando Suarez. 2020. “Fundamentos de Elasticidad y Resistencia de Materiales.” (April).

De La Comisión, Secretaría. n.d.-a. “Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial Dirección Del Sistema Habitacional República de Colombia COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES (Creada Por La Ley 400 de 1997).”

De La Comisión, Secretaría. n.d.-b. “Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial Dirección Del Sistema Habitacional República de Colombia COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES (Creada Por La Ley 400 de 1997).”

De La Comisión, Secretaría. n.d.-c. “Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial Dirección Del Sistema Habitacional República de Colombia COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES (Creada Por La Ley 400 de 1997).”

López Salgado, Humberto. 2000. “Software Educativo Para El Análisis y Diseño de Elementos de Concreto Reforzado-Edición Única.” *Exploraciones, Intercambios y Relaciones Entre El Diseño y La Tecnología* 57–79. doi: 10.16/CSS/JQUERY.DATATABLES.MIN.CSS.

McCormac, Jack, and Russel Brown. 2018. “Diseño de Concreto Reforzado McCormac Ed. 10.” *Diseño de Concreto Reforzado*.

- Monroy Ardila, Kelly Vanesa, and Adrián Camilo Beltrán Bonilla. 2019. “Kai-Sad Software Educativo Para El Análisis y Asignación de Aceros a Compresión, Tensión y Cortante En Vigas Rectangulares de Concreto Reforzado.”
- Possos Pedroza, Guillermo Andrés, and Carlos Jesús Alba Mendoza. 2014. *Software Educativo Para El Diseño de Vigas Isostaticas de Concreto Presforzado, Usando Programación En Visual Basic®*.
- Real Perez, Isidro, Alma Brenda Leyva Carreras, and Maria Calendaria Gonzalez Gonzalez. 2018. “Impacto de Las Tecnologías de La Información y La Comunicación (TIC) En El Aprendizaje de Los Alumnos.” *Revista de Investigación Académica Sin Frontera: División de Ciencias Económicas y Sociales* 21.
- Ruales, Samara, Alejandro Puenayan, and Fernando Maya. 2023. “Desarrollo de Un Aplicativo Web Didáctico Sobre El Diseño de Pórticos de Concreto Según El Reglamento NSR-10.”
- Shipman, John W. 2013. “Tkinter 8.5 Reference: A GUI for Python.” *Computer*.
- De Sucre, Universidad. n.d. “CONCRETO REFORZADO FUNDAMENTOS Y DISEÑO NSR-10 1era Edición EMEL MULET.”
- Velasteguí López, L. E., E. Rodríguez Revelo, E. J. Henríquez Antepara, M. R. Campoverde Méndez, and W. Ortiz Aguilar. 2021. “Softwares Matemáticos En Las Carreras de Ingeniería: Una Estrategia Para Su Implementación.” *Revista Universidad y Sociedad* 13(4).

10.1 ANEXOS

- 1) Ejecutable Pilot Structural
- 2) Manual del usuario Pilot Structural
- 3) Codificación del Software