

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
EVALUACIÓN DE SECCIONES COMPUESTAS POR PERFILES DE
LÁMINA DELGADA Y CONCRETO SIMPLE ANTE CARGAS DE FLEXIÓN**



Por:

German Daniel Herrera Laverde



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
VILLAVICENCIO
2019**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
EVALUACIÓN DE SECCIONES COMPUESTAS POR PERFILES DE
LÁMINA DELGADA Y CONCRETO SIMPLE ANTE CARGAS DE FLEXIÓN**

Por:

German Daniel Herrera Laverde

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional
de ingeniero civil

Aprobado por:

Ing. Jhon Jairo Gil Peláez, Ph.D.
Director

Ing. Emiro Andrés Lozano Pérez, Esp.
Codirector



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
VILLAVICENCIO
2019**

Nota de aceptación

Jhon Jairo Gil Peláez
Decano Facultad Ingeniería Civil

Jhon Jairo Gil Peláez
Director Trabajo de Grado

Carlos Andrés Orozco Donneys
Jurado

Villavicencio, 27/05/2019

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación se lo dedico primeramente a Dios, por haberme dado salud y haberme permitido llegar hasta este punto.

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a su apoyo incondicional es que hoy puedo culminar esta etapa.

A todas aquellas personas que se dedican al estudio de las estructuras, espero que el documento pueda ser una guía útil para entender un poco más el comportamiento de secciones compuestas y contribuya más adelante como base para un proyecto investigativo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Santo Tomás, por haberme acogido en sus instalaciones en estos años y brindarme todos los conocimientos necesarios, por permitirme usar tanto las bases de datos para efectuar un buen estado del arte como los laboratorios para realizar los ensayos.

Agradezco de manera especial al Ingeniero, decano de la facultad de Ingeniería Civil y director del proyecto Jhon Jairo Gil Peláez por su motivación, rectitud, consejos, explicaciones y sobre todo por su dedicación en el desarrollo del proyecto.

Al Ingeniero Emiro Andrés Lozano Pérez quien ha guiado con paciencia y rectitud como docente y codirector del proyecto.

Al Ingeniero Oscar Chitiva por haber brindado sus ideas y conocimiento.

A mis compañeros y colegas Juan Valdés, Camilo Pérez, Nicolás Gaitán y Andrés paz por haber colaborado de uno u otra forma a lo largo del proyecto, brindando compañía, ideas y tiempo al desarrollo de las actividades tanto prácticas como teóricas.

A mi novia Lorena Montero por su paciencia, dedicación, motivación y disposición al desarrollo del proyecto.

RESUMEN

Los diseños de miembros para edificaciones sometidos a flexión sean estos de concreto reforzado o de acero estructural actualmente no suele ser la mejor solución debido al poco aprovechamiento del material, altos costos y grandes pesos. Un estudio de este calibre que garantice la eficiencia de un método constructivo alternativo con mejores condiciones mejoraría significativamente los costos de materiales, maquinaria y de mano de obra.

El presente documento se enfoca en el comportamiento de miembros compuestos de diferentes configuraciones sometidos a flexión, es estudiado por medio de los parámetros establecidos en las normas ANSI/AISC, NSR-10, ACI-18 y Ensayos de laboratorio como la prueba de flexión de cuatro puntos.

A través de los estudios teóricos se evaluó la rigidez, resistencia y esfuerzos de las secciones para poder categorizarlas y compararlas entre sí y con vigas de concreto reforzado y de acero. Por medio de los ensayos de laboratorio se comprobó la eficacia del cálculo teórico y el comportamiento real de los materiales. Los resultados de las pruebas mostraron una validación teórica acertada y un comportamiento de flexión muy dúctil y favorable debido al aislamiento de las partes comprimidas y las partes tensionadas.

Entre los principales hallazgos se pudo evidenciar un mejor aprovechamiento resistente de las vigas compuestas con respecto a vigas de concreto reforzado y acero, estas tuvieron un aumento considerable en la inercia, rigidez y una disminución de las dimensiones geométricas y de los esfuerzos. Las aplicaciones de este tipo de miembros fueron destinadas a vigas de cubierta con pocas solicitaciones debido a la baja relación de esbeltez de los elementos estructurales de acero y a viguetas para la conformación de entrepisos.

Palabras Clave: Adherencia entre el acero-concreto, Cortante, Miembros compuestos, Resistencia máxima, vigas rellenas de concreto.

ABSTRACT

The design of members for buildings subjected to bending are these reinforced concrete or structural steel is currently not usually the best solution due to the poor use of material, high costs and heavy weights. A study of this caliber that guarantees the efficiency of an alternative constructive method with better conditions would significantly improve the costs of materials, machinery and labor.

This document focuses on the behavior of composite members of different configurations subjected to bending, is studied by means of the parameters established in the ANSI / AISC, NSR-10, ACI-18 and Laboratory tests such as the bending test of four points.

Through the theoretical studies, the stiffness, resistance and efforts of the sections were evaluated in order to categorize them and compare them with each other and with reinforced concrete and steel beams. The effectiveness of the theoretical calculation and the actual behavior of the materials were checked through laboratory tests. The results of the tests showed a very good theoretical validation and a very ductile and favorable bending behavior due to the isolation of the compressed parts and the stressed parts.

Among the main findings it was possible to see a better resistant use of the composite beams with respect to reinforced concrete and steel beams, these had a considerable increase in inertia, rigidity and a decrease in geometric dimensions and stresses. The applications of this type of members were intended for roof beams with little stress due to the low ratio of slenderness of steel structural elements and joists for the formation of mezzanines.

Key Word: Adherence between steel-concrete, Cutting, Composite members, Maximum strength, concrete-filled beams.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	16
2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
2.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	17
2.2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
3.	JUSTIFICACIÓN	19
4.	OBJETIVOS	20
4.1.	OBJETIVO GENERAL	20
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
5.	ALCANCE	21
6.	MARCO DE REFERENCIA	22
6.1.	MARCO TEÓRICO	22
6.2.	MARCO CONCEPTUAL	22
6.2.1	Estructuras mixtas	23
6.2.2	Construcción compuesta	25
6.2.3	Ventajas de la sección compuesta	26
6.2.4	Desventajas de la sección compuesta	26
6.3.	MARCO NORMATIVO	27
6.4.	ESTADO DEL ARTE	27
7.	EQUIPO DE INVESTIGACIÓN Y TRAYECTORIA	30
8.	METODOLOGÍA	31
8.1.	DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS	31
8.2.	POBLACIÓN, MUESTRAS, VARIABLES E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	31
8.2.1	Población	31
8.2.2	Sujetos	32
8.2.3	Instrumentos	32
9.	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL	32
9.1.	DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS	33
10.	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE UNA VIGA EN CONCRETO REFORZADO.	34
11.	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE UNA VIGA DE ACERO	45
12.	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE UNA VIGA COMPUESTA	51
12.1.	LIMITACIONES	51
12.2.	PRE-DIMENSIONAMIENTO SECCIÓN N°1	53
12.3.	PRE-DIMENSIONAMIENTO SECCIÓN N°2 O SECCIÓN PRINCIPAL	60
12.4.	PRE-DIMENSIONAMIENTO SECCIÓN N°3	67
12.5.	PRE-DIMENSIONAMIENTO SECCIÓN N°4	73
12.6.	PRE-DIMENSIONAMIENTO SECCIÓN N°5	78
12.7.	PRE-DIMENSIONAMIENTO SECCIÓN N°6	83
12.8.	PRE-DIMENSIONAMIENTO SECCIÓN N°7	89

12.9.	PRE-DIMENSIONAMIENTO SECCIÓN N°8	94
13.	COMPROBACIÓN DE ESFUERZO RASANTE	101
14.	ENSAYOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES	104
14.1.	ARMADO DEL PERFIL COMPUESTO	104
14.2.	ARMADO DE MUESTRAS Y TUBOS PARA ENSAYO DE ADHERENCIA.	106
14.3.	PRUEBA DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO.....	106
14.4.	PRUEBA DE FLEXIÓN EN VIGAS COMPUESTAS	107
14.5.	PRUEBA DE ADHERENCIA DIRECTA.....	109
15.	MODELACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS	112
16.	PROYECCIONES DE CARGA RESISTENTE DE LA SECCIÓN COMPUESTA PRINCIPAL.....	120
17.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	121
17.1.	VERACIDAD DE LOS RESULTADOS TEÓRICOS, EXPERIMENTALES Y COMPUTACIONALES	121
17.2.	COMPROBACIÓN DEL ESFUERZO RASANTE DE LA SECCIÓN.....	123
17.3.	COMPARACIÓN DE LAS VIGAS COMPUESTAS.....	126
17.3.1	MOMENTO ÚLTIMOS.....	126
17.3.2	COSTOS	126
17.4.	COMPARACIÓN DE LAS VIGAS DE SECCIÓN COMPUESTA, DE CONCRETO REFORZADO Y DE ACERO ESTRUCTURAL	124
17.4.1	MOMENTO ÚLTIMOS	124
17.4.2	COSTOS	124
18.	DESCRIPCIÓN DE LOS PRODUCTOS FINALES.....	128
19.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	130
19.1.	CONCLUSIONES.....	130
19.2.	TRABAJOS FUTUROS	131
20.	BIBLIOGRAFÍA	132
21.	ANEXOS	134

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Marco Normativo	27
Tabla 2. Calculo del módulo de elasticidad del concreto.	32
Tabla 3. Análisis estructural.	33
Tabla 4. Altura mínima de vigas o losas.	34
Tabla 5. Propiedades de los materiales de la viga de concreto reforzado.	35
Tabla 6. Características del concreto agrietado.....	36
Tabla 7. Propiedades geométricas de la viga de concreto reforzado.	36
Tabla 8. Cuantías mínimas de refuerzo de la viga de concreto reforzado.	37
Tabla 9. Combinaciones de varillas de la viga de concreto reforzado.	37
Tabla 10. Chequeo de la viga de concreto reforzado.	37
Tabla 11. Acero a compresión.	37
Tabla 12. Condición balanceada de la viga de concreto reforzado.....	38
Tabla 13. Momento resistente del acero a compresión.	38
Tabla 14. Momento resistente de la viga.	38
Tabla 15. Precio de la viga en concreto reforzado.....	39
Tabla 16. Fibra neutra plástica y los esfuerzos en la viga de concreto reforzado..	39
Tabla 17. Chequeo de momentos.....	41
Tabla 18. Momento último de la sección.....	41
Tabla 19. Calculo de los momentos de la sección.	42
Tabla 20. Deflexión de la viga en concreto reforzado.	42
Tabla 21. Deflexiones máximas permitidas.	43
Tabla 22. Chequeo de la deflexión máxima permitida de la viga.	43
Tabla 23. Propiedades de la viga de acero.....	46
Tabla 24. Precio de la viga en concreto reforzado.....	46
Tabla 25. Propiedades de la sección (H120x60x2,25).....	48
Tabla 26. Chequeo de esbeltez de los elementos de la sección en acero.	48
Tabla 27. Momento último resistente de la sección de acero.	48
Tabla 28. Esfuerzos de la viga de acero.....	49
Tabla 29. Chequeo de deflexiones de la viga de acero.	50
Tabla 30. Propiedades de los materiales de la viga de concreto reforzado.	53
Tabla 31. Propiedades geométricas sección N°1.	54
Tabla 32. Propiedades geométricas equivalentes de la sección N°1.	54
Tabla 33. Calculo de esfuerzos de la sección N°1.....	55
Tabla 34. Chequeo de momentos sección N°1.....	55
Tabla 35. Chequeo de esbeltez de los elementos Sección N°1.	56
Tabla 36. Fibra neutra plástica y momento nominal de la Sección N1.	58
Tabla 37. Propiedades finales de la sección.....	58
Tabla 38. Chequeo de deflexiones de la viga de acero.	58
Tabla 39. Restricciones de la sección N°2.....	61
Tabla 40. Propiedades geométricas sección N°2.	61
Tabla 41. Propiedades geométricas equivalentes de la sección N°2.	61
Tabla 42. Calculo de esfuerzos de la sección N°2.....	62
Tabla 43. Chequeo de momentos de la Sección N°2.	62

Tabla 44. Chequeo de esbeltez de los elementos Sección N°2.	63
Tabla 45. Fibra neutra plástica y momento nominal de la Sección N2.	64
Tabla 46. Propiedades finales de la sección N°2.....	65
Tabla 47. Chequeo de deflexiones de la viga de acero.	65
Tabla 48. Restricciones de la sección N°3.....	67
Tabla 49. Propiedades geométricas sección N°3.	68
Tabla 50. Propiedades geométricas equivalentes de la sección N°3.	68
Tabla 51. Calculo de esfuerzos de la sección N°3.....	68
Tabla 52. Chequeo de momentos de la Sección N°3.	69
Tabla 53. Chequeo de esbeltez de los elementos Sección N°3.	69
Tabla 54. Fibra neutra plástica y momento nominal de la Sección N°3.....	71
Tabla 55. Propiedades finales de la sección N°3.....	71
Tabla 56. Chequeo de deflexiones de la viga de acero.	72
Tabla 57. Restricciones de la sección N°4.....	73
. Tabla 58. Propiedades geométricas sección N°4.	73
Tabla 59. Propiedades geométricas equivalentes de la sección N°4.	73
Tabla 60. Calculo de esfuerzos de la sección N°3.....	74
Tabla 61. Chequeo de momentos de la Sección N°4.	74
Tabla 62. Chequeo de esbeltez de los elementos Sección N°4.	74
Tabla 63. Fibra neutra plástica y momento nominal de la Sección N°4.....	76
Tabla 64. Propiedades finales de la sección N°4.....	77
Tabla 65. Chequeo de deflexiones de la viga de acero.	77
Tabla 66. Restricciones de la sección N°5.....	79
Tabla 67. Propiedades geométricas sección N°5.	79
Tabla 68. Propiedades geométricas equivalentes de la sección N°5.	79
Tabla 69. Calculo de esfuerzos de la sección N°5.....	80
Tabla 70. Chequeo de momentos de la Sección N°5.	80
Tabla 71. Chequeo de esbeltez de los elementos Sección N°5.	80
Tabla 72. Fibra neutra plástica y momento nominal de la Sección N°5.....	82
Tabla 73. Propiedades finales de la sección N°5.....	82
Tabla 74. Chequeo de deflexiones de la viga de acero.	83
Tabla 75. Restricciones de la sección N°6.....	84
Tabla 76. Propiedades geométricas sección N°6.	84
Tabla 77. Propiedades geométricas equivalentes de la sección N°6.	84
Tabla 78. Calculo de esfuerzos de la sección N°6.....	85
Tabla 79. Chequeo de momentos de la Sección N°6.	85
Tabla 80. Chequeo de esbeltez de los elementos Sección N°6.	86
Tabla 81. Fibra neutra plástica y momento nominal de la Sección N°6.....	87
Tabla 82. Propiedades finales de la sección N°6.....	88
Tabla 83. Chequeo de deflexiones de la viga de sección 6.	88
Tabla 84. Restricciones de la sección N°7.....	89
Tabla 85. Propiedades geométricas sección N°7.	90
Tabla 86. Propiedades geométricas equivalentes de la sección N°7.	90
Tabla 87. Calculo de esfuerzos de la sección N°7.....	90
Tabla 88. Chequeo de momentos de la Sección N°7.	91

Tabla 89. Chequeo de esbeltez de los elementos Sección N°7.	91
Tabla 90. Fibra neutra plástica y momento nominal de la Sección N°7.	92
Tabla 91. Propiedades finales de la sección N°7.	93
Tabla 92. Chequeo de deflexiones de la viga de sección 7.	93
Tabla 93. Restricciones de la sección N°8.	94
Tabla 94. Propiedades geométricas sección N°8.	95
Tabla 95. Propiedades geométricas equivalentes de la sección N°8.	95
Tabla 96. Calculo de esfuerzos de la sección N°8.	96
Tabla 97. Chequeo de momentos de la Sección N°8.	96
Tabla 98. Chequeo de esbeltez de los elementos Sección N°8.	96
Tabla 99. Fibra neutra plástica y momento nominal de la Sección N°8.	98
Tabla 100. Propiedades finales de la sección N°8.	99
Tabla 101. Chequeo de deflexiones de la viga de sección 8.	99
Tabla 102. Equilibrio de fuerzas en “y”.	102
Tabla 103. Primero momento de inercia.	103
Tabla 104. Esfuerzo rasante de la sección.	103
Tabla 105. Resultados del diseño de mezclas.	107
Tabla 106. Resultados del ensayo de flexión.	108
Tabla 107. Propiedades de los materiales de la viga de concreto reforzado.	109
Tabla 108. Esfuerzos de la sección fallada en laboratorio.	109
Tabla 109. Momento último de la sección fallada en laboratorio.	109
Tabla 110. Resultados del ensayo de rasante.	111
Tabla 111. Esfuerzo rasante de la sección.	111
Tabla 112. Esfuerzos de la sección compuesta.	118
Tabla 113. Desplazamientos de la sección compuesta.	119
Tabla 114. Momentos resistentes de la sección compuesta.	119
Tabla 115. Resultados	128
Tabla 116. Impactos esperados.	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos De Vigas Compuestas	24
Figura 2. Comparación de propiedades de vigas compuestas	24
Figura 3. Comparación de propiedades de columnas compuestas	25
Figura 4. Viga compuesta	28
Figura 5. Viga con acero a cuadros	28
Figura 6. Secciones C incrustadas para la conformación de miembros compuestos.	29
Figura 7. Sección definitiva en concreto reforzado.	39
Figura 8. Sección homogeneizada en concreto.	40
Figura 9. Distribución de tensiones de la viga en concreto reforzado.	41
Figura 10. Deflexión máxima de la viga en concreto reforzado.	42
Figura 11. Catálogo de tubos estructurales.	47
Figura 12. Valores límites de esbeltez para miembros de acero sometidos a flexión.	48
Figura 13. Distribución de tensiones plásticas de la viga de acero.	49
Figura 14. Tipos de adherencia mecánica en losas mixtas.	52
Figura 15. Combinación de las características de las vigas de Concreto R y Acero.	53
Figura 16. Viga compuesta rellena, sección N°1.	53
Figura 17. Sección N°1 homogeneizada en concreto.	55
Figura 18. Valores límites de relación de esbeltez para perfiles de acero.	55
Figura 19. Valores límite de relación de esbeltez para perfiles compuestos rellenos.	56
Figura 20. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°1 en el rango plástico.	56
Figura 21. Momento máximo de la Sección N°1.	57
Figura 22. Comportamiento a flexión de la Sección N°1.	58
Figura 23. Ancho efectivo de la viga N°1.	59
Figura 24. Viga compuesta rellena, Sección N°2 o principal.	60
Figura 25. Viga compuesta rellena, Sección N°2 o principal.	60
Figura 26. Sección N°2 homogeneizada en concreto.	62
Figura 27. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°2 en el rango elástico.	63
Figura 28. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°2 en el rango plástico.	63
Figura 29. Momento máximo de la Sección N°2.	64
Figura 30. Comportamiento a flexión de la Sección N°2.	65
Figura 31. Ancho efectivo de la viga N°2.	66
Figura 32. Sección compuesta utilizada en cubiertas.	66
Figura 33. Viga compuesta rellena, Sección N°3.	67
Figura 34. Viga compuesta rellena, Sección N°3.	67
Figura 35. Sección N°3 homogeneizada en concreto.	68
Figura 36. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°3 en el rango elástico.	70

Figura 37. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°3 en el rango plástico.	70
Figura 38. Momento máximo de la Sección N°3.	71
Figura 39. Comportamiento a flexión de la Sección N°3.	71
Figura 40. Ancho efectivo de la viga N°3.	72
Figura 41. Viga compuesta rellena, Sección N°4.	73
Figura 42. Sección N°4 homogeneizada en concreto.	74
Figura 43. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°4 en el rango elástico.	75
Figura 44. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°4 en el rango plástico.	76
Figura 45. Momento máximo de la Sección N°4.	76
Figura 46. Comportamiento a flexión de la Sección N°4.	77
Figura 47. Ancho efectivo de la viga N°4.	78
Figura 48. Viga compuesta rellena, Sección N°5.	79
Figura 49. Sección N°5 homogeneizada en concreto.	80
Figura 50. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°5 en el rango elástico.	81
Figura 51. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°5 en el rango plástico.	81
Figura 52. Momento máximo de la Sección N°5.	82
Figura 53. Comportamiento a flexión de la Sección N°5.	82
Figura 54. Ancho efectivo de la viga N°5.	83
Figura 55. Viga compuesta rellena, Sección N°6.	84
Figura 56. Sección N°6 homogeneizada en concreto.	85
Figura 57. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°6 en el rango elástico.	86
Figura 58. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°6 en el rango plástico.	86
Figura 59. Momento máximo de la Sección N°6.	87
Figura 60. Comportamiento a flexión de la Sección N°6.	88
Figura 61. Ancho efectivo de la viga N°6.	89
Figura 62. Viga compuesta rellena, Sección N°7.	89
Figura 63. Sección N°7 homogeneizada en concreto.	90
Figura 64. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°7 en el rango elástico.	91
Figura 65. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°7 en el rango plástico.	92
Figura 66. Momento máximo de la Sección N°7.	92
Figura 67. Comportamiento a flexión de la Sección N°7.	93
Figura 68. Ancho efectivo de la viga N°7.	94
Figura 69. Viga compuesta rellena, Sección N°8.	94
Figura 70. Sección N°8 homogeneizada en concreto.	95
Figura 71. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°7 en el rango elástico.	97

Figura 72. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°8 en el rango plástico.	97
Figura 73. Momento máximo de la Sección N°8.	98
Figura 74. Comportamiento a flexión de la Sección N°8.	98
Figura 75. Ancho efectivo de la viga N°8.	99
Figura 76. Configuraciones geométricas propuestas no analizadas.	100
Figura 77. Viga compuesta con deslizamiento relativo entre la interfaz de concreto y el perlin superior.	101
Figura 78. Viga compuesta sin deslizamiento relativo entre la interfaz de concreto y el perlin superior.	101
Figura 79. Fuerza cortante interna en la viga.	102
Figura 80. Fuerza cortante interna en la viga.	102
Figura 81. Fuerza cortante interna en la viga.	103
Figura 82. Dimensiones de la viga fallada en laboratorio.	104
Figura 83. Tubos de muestra para ensayo de rasante.	110
Figura 84. Características de los materiales en Ansys.	112
Figura 85. Dibujo del perlin inferior en Ansys.	112
Figura 86. Dibujo del perlin superior en Ansys.	113
Figura 87. Dibujo del bloque de concreto en Ansys.	113
Figura 88. Dibujo de la sección en Ansys.	113
Figura 89. Contacto entre el perlin superior e inferior en Ansys.	114
Figura 90. Contacto entre el perlin superior y el bloque de concreto en Ansys.	114
Figura 91. Sección compuesta en Ansys.	114
Figura 92. Enmallado de la sección compuesta en Ansys.	115
Figura 93. Superficie de soporte en Ansys.	115
Figura 94. Superficie de desplazamiento en Ansys.	115
Figura 95. Aplicación de la carga en Ansys.	116
Figura 96. Desplazamientos de la viga en Ansys.	116
Figura 97. Desplazamientos de la viga en Ansys.	116
Figura 98. Esfuerzos de la viga en Ansys, (momento en que empieza el pandeo del alma).	117
Figura 99. Esfuerzos de la viga en Ansys (falla).	117
Figura 100. Grafica de esfuerzos de la viga (falla).	117
Figura 101. Grafica de esfuerzos de la viga (falla).	118
Figura 102. Grafica de momento de la viga (falla).	119
Figura 103. Momentos resistentes calculados.	121
Figura 104. Deformación de la viga de sección compuesta N°2.	122
Figura 105. Esfuerzo rasante.	123
Figura 106. Precios de las secciones compuestas.	127
Figura 107. Precios de las de las vigas de sección compuesta, en acero y en concreto reforzado.	124
Figura 108. Precios de las de las vigas de sección compuesta, en acero y en concreto reforzado.	125
Figura 109. Comparación de la constante de torsión.	134
Figura 110. Longitud no arriostrada máxima debido al pandeo lateral.	134

1. INTRODUCCIÓN

Los miembros estructurales compuestos de concreto poseen alta resistencia a fuerzas axiales de compresión, durabilidad y resistencia al fuego. Por otro lado los miembros de acero de espesores de alma y aleta bajos (miembros esbeltos) son poco resistentes a fuerzas de compresión pero de gran resistencia a fuerzas de tensión, por esta razón es de gran Importancia buscar una sinergia entre los dos materiales a través del uso de secciones compuestas.

Este tipo de estudios en el cual se analice el comportamiento de nuevos elementos estructurales de sección compuesta, es relevante para cualquier tipo de edificación que constituya un sistema de gran altura o grandes luces entre apoyos debido a que podría permitir mayores longitudes, disminución de la sección transversal o disminución de la cantidad de materiales y por ende los costos constructivos disminuirían respecto a la cantidad de materiales necesarios normalmente.

También trae consigo beneficios económicos como, reducción de mano de obra y materiales en construcciones de gran y mediana altura, construcciones más rápidas que en una estructura de concreto reforzado (evita el uso de encofrados, disminución y descongestión de la cantidad de refuerzos).

En este trabajo se pretende realizar una evaluación comparativa entre una sección de acero de lámina delgada, una sección de concreto reforzado y una sección de acero rellena de concreto sometidas a cargas de flexión, empleando una metodología experimental cuantitativa (ensayos de laboratorio para el fallo de la viga compuesta) y una comparación teórica mediante los criterios establecidos en las normas NSR-10, ACI-18, y ANSI/AISC 360-10.

Calculando los esfuerzos máximos resistentes de los materiales por medio de la sección transformada equivalente, y considerando que la tensión rasante producida por los materiales cumpla con el esfuerzo cortante actuante en el miembro para que así se pueda garantizar el trabajo conjunto de los materiales, o en tal caso considerar el uso de conectores de cortante, muescas o resaltes tal y como lo consideran en el diseño de losas de METALDECK.

El documento se divide en cuatro capítulos. En el primero de ellos se encuentra la importancia del problema en estudio, los objetivos propuestos y el alcance al cual está delimitado el proyecto. En el segundo capítulo se evidencian las teorías actuales para el diseño y análisis de miembros compuestos según la normatividad ANSI/AISC 360-10, los conceptos necesarios para entender la importancia del problema, el estado del arte y la normatividad vigente a tener en cuenta. En el tercer capítulo se desarrolla la metodología propuesta para el proyecto y se evidencian los resultados y en el cuarto capítulo se muestran los análisis de resultados, conclusiones y posibles aplicaciones a futuros trabajos.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La obtención del acero laminado en frío, especialmente en la parte del moldeo de la viga o columna, se realiza, a partir de chapas planas o flejes, mediante un conformado mecánico en frío, ya sea por rolado (conjunto de rodillos) o por plegado (golpe por prensa). Sin embargo, éste método de laminación se limita a espesores de la chapa base entre 0,4 mm y 6,4 mm, según la forma seccional que se quiera obtener. Tal limitación es una de las principales causas de los distintos tipos de pandeo en una estructura de acero, debido a la baja relación altura - espesor.

El fenómeno del pandeo ocurre cuando se aplican cargas de compresión al elemento estructural, lo cual conlleva a que se presente una curvatura o flexión, este fenómeno afecta el funcionamiento y la estabilidad de la estructura produciendo fallas y conllevando a más trabajo, tiempo, dinero, luces con muchos apoyos, secciones grandes, entre otros.

Al igual que en el acero, el concreto posee unas propiedades mecánicas y resistentes propias del material que lo hacen muy eficaz a trabajar con cargas de compresión. Cuando una viga de concreto reforzado es sometida a cargas de flexión solo la parte superior con respecto al eje neutro está trabajando y la otra una vez supera el momento de agrietamiento se convierte en un peso adicional en la sección sin colaborar a la resistencia, debido a esto se puede deducir que no se hace un máximo aprovechamiento del material.

Con base en lo dicho anteriormente al momento de dimensionar una viga de concreto reforzado o acero estructural se observa que estas requieren de un canto significativo para resistir las solicitaciones y esto podría conllevar al aumento de los costos de material.

Actualmente se han estudiado las denominadas vigas compuestas, así como lo menciona el estado del arte del documento; este tipo de vigas han demostrado tener un aumento no solo en la resistencia y rigidez de la sección, sino una disminución de las características geométricas que generan consigo disminución en los costos por compra de materiales.

2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La evolución tecnológica, arquitectónica y constructiva que satisfaga y/o mejore las necesidades de las estructuras ha traído consigo el aumento de las restricciones y solicitaciones a las que se somete una estructura o edificación, incrementando de manera significativa las cargas producidas por el peso propio y los efectos de las cargas variables accidentales, así mismo las condiciones mínimas de rigidez, resistencia, ductilidad y estabilidad que deben tener los miembros estructurales.

Estos incrementos en el peso estructural conllevan a un incremento en el costo de la estructura.

Para satisfacer estos problemas se han realizado estudios para el uso combinado del acero y el concreto, no solo como miembros de concreto reforzados con varillas de acero, flejes y otros elementos, si no como losas de concreto soportadas por vigas de acero, miembros de acero embebidos en columnas de concreto, miembros de acero rellenos de concreto o como mejor se les conoce como tubos rellenos de concreto ya sean estos de sección cuadrada, rectangular o circular.

Para estas últimas 3 secciones el pandeo local producido en el acero es eliminado por el concreto, y la resistencia del concreto aumenta debido al confinamiento permanente del tubo de acero, además de tener un incremento de la inercia en la sección transversal del miembro que aumenta considerablemente la rigidez, resistencia y disminuye la esbeltez.

A partir de lo enunciado anteriormente es válido afirmar que los dos materiales unidos contribuyen a mejorar la resistencia de un miembro solicitado a fuerzas, es decir, que teóricamente es más eficiente un elemento compuesto entre perfiles de lámina delgada y concreto simple que cada uno por independiente, sin embargo, son necesarios los estudios que garanticen dicha afirmación.

A partir de lo anterior surge la siguiente pregunta: ¿Es más funcional y económica una viga compuesta de perfil de acero de lámina delgada rellena de concreto, sometida a cargas de flexión, con respecto a una viga de hormigón armado y una viga de acero estructural?

3. JUSTIFICACIÓN

Considerando los tiempos de construcción, los costos de materiales y mano de obra, desde la década de los 60's se han venido realizando pruebas para la optimización de materiales y mejoramiento de los procesos constructivos, llegando a nuevas configuraciones denominadas secciones compuestas (perfiles de acero embebidos en concreto, tubos rellenos de concreto y losas de concreto soportadas por perfiles de acero).

Dichas secciones conformadas por concreto y acero han demostrado lograr estructuras más ligeras, más resistentes, con mayor luz entre apoyos, mayor resistencia a la corrosión y al fuego debido al mejor aprovechamiento de los materiales (así como se evidencia en el anexo "estado del arte de miembros compuestos").

Además de presentar buenos efectos resistentes por la combinación de los materiales, este tipo de secciones han demostrado también facilitar los procesos constructivos debido a su bajo o nulo uso de refuerzos longitudinales (varillas de acero) y materiales para el encofrado o conformación de los elementos estructurales.

Este proyecto de grado representará una base bibliográfica para comprender el comportamiento y diseño de secciones compuestas de diferentes configuraciones solicitadas a cargas de flexión, así mismo servirá como punto de comparación para futuras investigaciones acerca del comportamiento no solo de miembros compuestos solicitados a flexión, si no en general de los esfuerzos resistentes de dichos miembros.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la resistencia y el comportamiento de vigas compuestas de perfiles de acero de lámina delgada rellenas de concreto, sometidas a cargas de flexión, mediante los análisis establecidos en las normas NSR-10, ACI-18, ANSI/AISC 360-10 y ensayos experimentales de laboratorio.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar vigas equivalentes de concreto reforzado, de acero y de sección compuesta, sometidas a flexión y calcular los esfuerzos resistentes.
- Calcular la tensión rasante efectuada en la sección compuesta y verificar el cortante para garantizar la acción compuesta del miembro.
- Determinar los esfuerzos críticos de diseño en la sección transversal de una viga compuesta a partir de ensayos de laboratorio (método de fuerza controlada, prueba de flexión de 4 puntos, falla de cilindros de concreto).

5. ALCANCE

En este proyecto se realizó una evaluación comparativa entre una viga de acero de lámina delgada, una viga de concreto reforzado y una viga de acero rellena de concreto, sometidas a cargas de flexión. Teniendo en cuenta que las longitudes de las vigas serán máximas de 1,2m, la carga crítica de pandeo, la relación de esbeltez b/t , la interacción entre los materiales, la resistencia y la deflexión máxima, se consideró una metodología experimental cuantitativa para fallar la viga compuesta por medio de ensayos de laboratorio (método de fuerza controlada, prueba de flexión de 4 puntos) y un análisis según lo establecido en la NSR-10, ACI-18, ANSI/AISC 360-10 para hacer las comparaciones.

Para el logro de una evaluación comparativa verídica y confiable se caracterizó los materiales mediante la obtención de fichas técnicas pertinentes y ensayos de laboratorio (falla de cilindros en la prensa hidráulica). Datos que serán registrados en el presente documento.

El desarrollo del proyecto es de carácter institucional y sus interesados directos son el personal estudiantil, docente y directivo que sean responsables de generar dicho proyecto, sin embargo, al ser un proyecto en el que garantice la eficiencia de un sistema constructivo no convencional, puede generar interesados afines al sector de obras civiles.

Se proveerán documentos informativos por medio de pruebas de laboratorio y análisis metódico que evidencien los esfuerzos máximos resistentes de una sección compuesta en comparación con secciones convencionales utilizadas en la construcción.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. MARCO TEÓRICO

La resistencia nominal de secciones compuestas deberá ser determinada de acuerdo a los siguientes métodos establecidos por la norma ANSI/AISC 360-10 en su capítulo correspondiente a miembros compuestos:

- **Método De Distribución De Las Tensiones Plásticas:** Para este método la resistencia debe ser calculada suponiendo que los componentes de acero han alcanzado la cedencia en la totalidad de sus fibras en tracción o compresión, y que los componentes de concreto alcancen la tensión de $0.85 f'_c$ debidas a fuerzas axiales y/o de flexión. Para el caso de secciones tubulares la norma permite utilizar una tensión máxima de $0.95 f'_c$ debido al confinamiento permanente del tubo de acero en el bloque de concreto.
- **Método De Compatibilidad De Las Deformaciones:** En este caso se supone una distribución lineal de las deformaciones en la sección, asumiendo una deformación unitaria máxima del bloque de concreto en compresión de 0.003 mm/mm . Teniendo en cuenta que las relaciones de tensión-deformación del acero y del concreto deben ser obtenidas de ensayos o de resultados publicados para materiales similares.
- **Método De Distribución De Tensiones Elásticas:** La resistencia nominal debe ser calculada superponiendo las tensiones elásticas para el estado límite de aplastamiento del concreto.
- **Método Tensión-Deformación Efectiva:** La resistencia nominal debe ser calculada suponiendo compatibilidad de deformaciones, y relaciones tensión-deformación efectivas para los componentes de concreto y acero, considerando los efectos de pandeo local, fluencia, interacción y confinamiento del concreto.

6.2. MARCO CONCEPTUAL

Para que una estructura efectúe un correcto trabajo de transmisión de cargas hacia la cimentación y posteriormente al suelo es necesario comprender los siguientes conceptos.

- **Resistencia:** Es la mayor capacidad de una estructura antes de fallar por rotura, esta debe garantizar la resistencia mínima establecida en las normas vigentes.
- **Rigidez:** es la mayor o menor capacidad de la estructura para oponerse a las deformaciones, controla las vibraciones y contribuye a la estabilidad de la estructura.

- Estabilidad: define la capacidad de una estructura para mantener su condición original de equilibrio
- Ductilidad: define la capacidad de un material o miembro compuesto para incursionar en el rango elástico (grandes deformaciones) sin pérdida apreciable de su resistencia.

Estos factores inciden en el diseño de una estructura y varían de acuerdo a la altura propuesta según sea el caso, para un edificio de 10 pisos o menos las cargas gravitatorias verticales producidas serán las que manden directamente en el diseño (resistencia), en cambio para una edificación de más de 10 pisos el factor predominante en el diseño será la rigidez, debido a que con el aumento en altura de la edificación, aumentan consigo los efectos producidos por las cargas horizontales debido al sismo o al viento.

Por lo tanto, las estructuras de los edificios de gran altura dejan de concebirse como un bloque de compresión gobernado por resistencia y pasan a ser considerados como un voladizo empotrado al suelo, solicitado axialmente por cargas verticales (gravitatorias) y transversalmente por las acciones horizontales (sismo o viento).

Algunas estrategias estructurales utilizadas para hacer frente a estructuras diseñadas por rigidez son:

- Pórtico dúctil: este básicamente hace referencia a miembros aporticados resistentes que pueden deformarse sin llegar a romperse.
- Pórtico rígido: en este las deformaciones horizontales son bastante pequeñas.
- Pantalla: se concibe como un elemento muy rígido que ha evolucionado desde el concreto reforzado, acero estructural, hasta las estructuras postensadas.
- Estructuras mixtas
- Núcleo
- Tubo

De aquí en adelante se hablará más acerca de las estructuras compuestas o también denominadas estructuras mixtas, debido a que es el tema en estudio del proyecto.

6.2.1 Estructuras mixtas

Una viga o columna mixta es aquel miembro formado por una sección transversal metálica y una parte de concreto armado o simple, unidas entre sí por conectores de cortante o estribos metálicos, las más conocidas se ilustran en la siguiente figura.

- a) Viga mixta embebida
- b) Viga mixta con losa maciza

- c) Viga mixta con forjado colaborante
- d) Columna mixta embebida
- e) Viga mixta rellena de concreto simple o columna mixta rellena

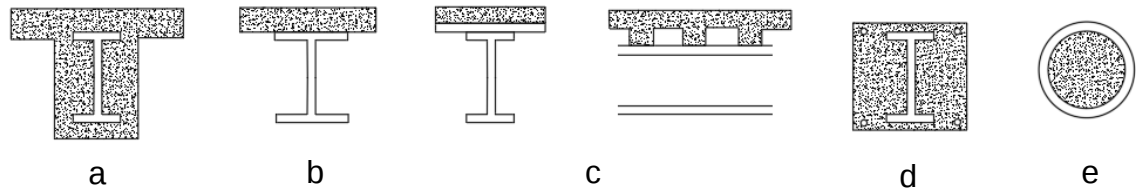


Figura 1. Tipos De Vigas Compuestas
Fuente. Autor.

- La correcta interacción entre los dos materiales por medio de conectores o adherencia directa concede una mayor resistencia y rigidez del elemento metálico ya que este tiene un aumento significativo de su inercia.

Un ejemplo sustancial ilustrado a continuación es la diferencia de propiedades y geometría de una viga metálica y una mixta que soportan la misma carga.

	Viga Mixta	Viga de acero sin conexión de rasante	
Sección de acero	IPE 400	IPE 550	HE 360 B
Altura constructiva (mm)	560	710	520
Capacidad de carga	100%	100%	100%
Peso de acero	100%	159%	214%
Altura relativa	100%	127%	93%
Rigidez	100%	72%	46%

Figura 2. Comparación de propiedades de vigas compuestas
Fuente. Zigurat, 2018

Se puede evidenciar la disminución de la sección transversal de la viga mixta a comparación de los perfiles de acero simplemente soportados con la losa de concreto, también se puede evidenciar que aunque es un poco más grande que la segunda sección ilustrada en la figura, sus propiedades de rigidez calculadas por medio de la formula $(E \cdot I)/L$, altura relativa y peso del acero son mejor aprovechadas en el forjado con viga mixta.

Otro ejemplo que se puede evidenciar a continuación es el de una columna mixta con perfil embebido en concreto al de una sección equivalente de concreto

reforzado. Se puede observar la disminución de la sección transversal de la columna mixta embebida a comparación con la de concreto reforzado, siendo estas sometidas a el mismo soporte de cargas, aunque la resistencia de la columna de concreto reforzado pueda aumentar utilizando concretos de alta resistencia, esto podría aumentar significativamente los costos y tiempos de obra.

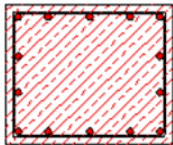
	Mixta	Hormigón armado
Pilar		
Dimensiones [cm]	70 / 70	80 / 120

Figura 3. Comparación de propiedades de columnas compuestas
Fuente. Zigurat, 2018

La interacción entre el concreto y la lámina de acero o perfil metálico debe resistir el esfuerzo rasante producido por cargas sobrepuestas o de peso propio, esta suele satisfacerse por medio de conectores de cortante o en algunos casos por medio del aumento de la sección transversal del perfil metálico hasta que garantice la adecuada interacción por adherencia directa entre los materiales, evitando un deslizamiento relativo que pueda afectar y producir falla en los miembros distinta al de la resistencia última (pandeo local, pandeo global, pandeo torsional, agrietamiento prematuro del concreto, entre otros).

6.2.2 Construcción compuesta

Si bien los miembros estructurales de acero resisten grandes tensiones en compresión, los miembros muy esbeltos no son eficientes; por el contrario, los miembros de concreto resisten compresiones altas, con un costo moderado del miembro, mientras que la resistencia a la tensión es muy baja. Por estas razones, la combinación de elementos de acero y concreto, en la que cada material pueda desarrollar de un modo más eficiente sus propiedades, suele conducir a buenos y rentables diseños, [1].

Sobre las vigas de acero se vacían a menudo losas de concreto para conformar el piso, tanto en los edificios como en los puentes, entre el concreto de una placa y la viga de acero, se desarrollan fricción y adherencia; no obstante, estos efectos no suelen ser suficientes para garantizar una acción conjunta de los dos materiales, salvo que la pieza de acero esté embebida en el concreto, por lo que es conveniente suministrar unos elementos que puedan transmitir fuerzas cortantes de uno a otro material, elementos que por esta razón se conocen como conectores de cortante. Estos conectores se sueldan, o en ocasiones se atornillan, a las vigas de acero y al fundir la placa quedan embebidos en esta, [1].

6.2.3 Ventajas de la sección compuesta

La unión correcta entre los dos materiales mejora las capacidades resistentes de un miembro sometido a flexión, entre las principales características se pueden encontrar:

- El efecto del pandeo local es retrasado por el confinamiento interno del bloque de concreto.
- El concreto posee un aumento en su resistencia debido al confinamiento permanente del perfil de acero.
- El perfil de acero evita el uso de encofrado para el relleno de concreto.
- Se reducen los tiempos debido a la fácil colocación de los miembros estructurales.
- El elemento estructural posee un aumento en la rigidez debido al relleno de concreto.
- Es posible avanzar con el montaje de la estructura de acero sin necesidad de esperar el fraguado del concreto.
- El concreto actúa como protección contra el fuego y/o como disipador de calor.
- El concreto constituye una resistencia adicional a la corrosión en las caras internas del perfil de acero.

6.2.4 Desventajas de la sección compuesta

La unión entre estos materiales trae consigo unas desventajas para la correcta utilización, entre las que se pueden mencionar:

- Es difícil garantizar una correcta adherencia o interacción entre los materiales.
- La resistencia despreciable del concreto a tensión agrega un grado de complejidad al momento de determinar la rigidez de los elementos estructurales.
- Durante la construcción es necesario combinar dos especialidades (construcción en concreto reforzado y construcción en acero) trabajando al mismo tiempo, lo que implica cambios en la programación y ejecución de obra.

6.3. MARCO NORMATIVO

Para efectuar un correcto análisis de los miembros propuestos sometidos a flexión, es necesario cumplir con la normatividad vigente en el diseño con este tipo de materiales, las normas de referencia se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1. Marco Normativo

TÍTULOS	ENTIDAD	DESCRIPCIÓN
AISC	American Institute of Steel Construction	Normatividad aplicable para el diseño de miembros de acero
ACI - 318	American Concrete Institute	Normativa aplicable para el diseño de miembros en concreto reforzado
STEEL DECKINSTITUTE	Instituto Americano De Entrepiso	Organismo regulador de chapas nervadas
NSR-10 TITULO F	Norma Sismo Resistente de Colombia	Titulo aplicable al diseño de estructuras por elementos de acero o de aluminio, soldados, atornillados o remachados
ASTM A 6/A 6M	Asociación Americana de Ensayos de Materiales	Especificación estándar para acero estructural de alta resistencia y baja aleación
AISC 360-10	Especificación para estructuras de acero	Especificaciones para edificaciones de acero estructural

Fuente. Autor.

6.4. ESTADO DEL ARTE

Las vigas compuestas de acero y concreto referidas en este documento consisten en perfiles de acero de configuración tubular o cajón rellenos de concreto trabajando conjuntamente a la solicitación de cargas.

Investigaciones en el campo de estudio de miembros compuestos se han centrado en conocer el comportamiento de estos sometidos a carga axiales, tal es el caso de Gardner y Jacobson [2] que evaluaron la carga final en Tubos rellenos de concreto CFT cortos y la carga de pandeo de los CFT largos, Furlong [3] para representar la carga axial, resistencia a flexión y rigidez de columnas CFT, Piotr Lacki, Anna Derlatka y Przemystaw Kasza [4] en 2017 para estudiar las tensiones en elementos de acero y concreto por medio de una simulación por elementos finitos, además de un sin número de investigadores más como los ecuatorianos Daniel Carapaz y Elvis Escudero en 2015 [5] comparando columnas tubulares huecas y rellenas, Han y Li

[6] para conocer el efecto sísmico en tubos de acero rellenos de concreto, entre otros.

Los miembros compuestos también han sido estudiados sometidos a cargas de flexión, entre los estudios más importantes y pertinentes a la investigación propuesta en el presente documento se encuentra el de Laghui Guo, Young Liu y Bing Qu [7] en 2018, en el cual analizaron el comportamiento de estructuras compuestas de acero y concreto en conjunto con miembros compuestos (vigas y losas) por medio de pruebas experimentales y modelos computacionales, utilizando diferentes medios como perfiles angulares para asegurar la acción conjunta entre la losa y la viga así como lo muestra la siguiente figura, se encontró finalmente que los modelos analizados tuvieron una adecuada relación y que el ángulo conector propuesto aumento la interacción entre la losa y el perfil metálico.

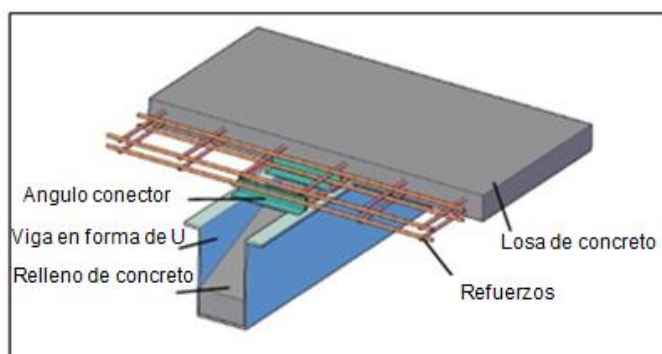


Figura 4. Viga compuesta

Fuente. Laghui Guo, Young Liu y Bing Qu [7], 2018

El estudio realizado por Li-hua chen, Shu-ting li, Hong-yang Zhang y Xiao-feng Wu [8] en 2017, en el cual propusieron un nuevo tipo de viga compuesta de concreto revestida de acero a cuadros por medio de una placa de acero steeldeck y una lámina de acero a cuadros para producir la viga de acero, esto con el fin de aumentar el efecto de adherencia entre los materiales, así como se muestra en la siguiente figura.

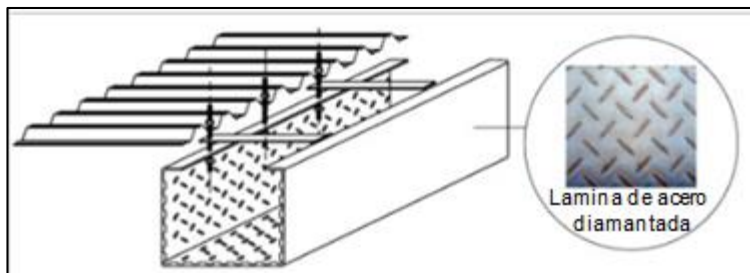


Figura 5. Viga con acero a cuadros

Fuente. Li-hua chen, Shu-ting li, Hong-yang Zhang y Xiao-feng Wu [8], 2017

Otros estudios realizados en miembros sometidos a flexión como el de R. MarkLawson y HogrTaufiq [9] utilizando secciones C incrustadas al concreto, figura 6, el del ecuatoriano Xavier flores [10] en vigas rellenas sujetas a flexión, el de Liang Huang, Chen Zhang , Libo Yan y Bohumil Kasal [11] utilizando Tubos GFRP en la zona de compresión en el tramo medio de la viga para confinar el concreto y mejorar la interacción de los materiales afirman la importancia y el auge de este tipo de miembros.

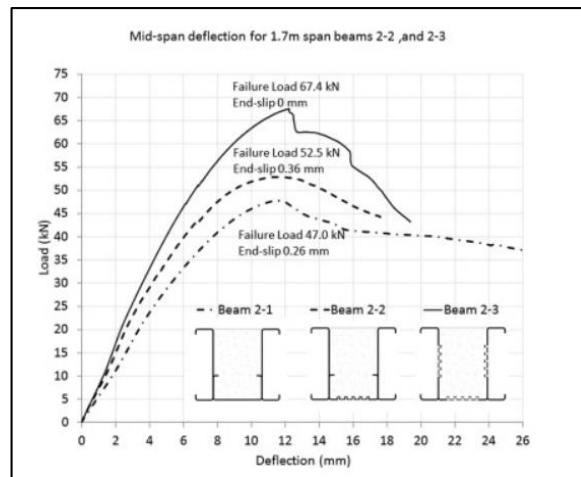


Figura 6. Secciones C incrustadas para la conformación de miembros compuestos.
Fuente. R. MarkLawson y HogrTaufiq [9] , 2018

Por último, pero no menos importante vale la pena resaltar que se debe verificar la acción completa y conjunta de los materiales en este tipo de miembros, así como lo indicaba Cederwall, Engstrom y Graves [12] en su estudio realizado en 1990, en este se concluyó que cuando los materiales estaban despegados, el núcleo de concreto no contribuía al comportamiento de la columna y esta se comportaba como un tubo de acero hueco, si la carga estaba directamente aplicada en el perfil de acero, el concreto producía un agrietamiento prematuro y el tubo de acero sufría un pandeo local en las almas.

EL estudio cronológico mencionado se adjuntará como anexo en el presente documento, en este se evidencian alrededor de 80 artículos de investigación sobre el comportamiento de miembros compuestos estudiados alrededor del mundo.

7. EQUIPO DE INVESTIGACIÓN Y TRAYECTORIA

El equipo de investigación está compuesto por German Daniel Herrera Laverde, estudiante de la facultad de ingeniería civil de la universidad Santo Tomás, se ha caracterizado durante el desarrollo de su carrera como alguien responsable, dedicado y con gran capacidad para resolver de manera oportuna y eficiente los problemas que se le presenten.

En 2015-I comenzó su trayectoria en el semillero de investigación de estructuras “cross” de la mano del Ingeniero Diego Edgardo Fuentes Herrera, proponiendo en este una “Evaluación numérica del desempeño de perfiles de acero laminado en frío tipo z, c y marcos, al pandeo producido por cargas”, en 2016-II participó en las convocatorias de Colciencias de la mano de su compañero de semillero Camilo Andrés Pérez Soler, el proyecto fue expuesto en una ponencia organizada por la universidad Santo Tomás en Bucaramanga.

En 2018 participó y realizó un curso impartido por Instituto Metrópolis para ampliar el conocimiento del diseño de miembros estructurales de acero, y de la mano la revisión de otros documentos subidos a la red por empresas en el ámbito estructural como Zigurat, Inesa Adiestramiento, Ccip, Cersa, entre otras.

También está compuesto por Jhon Jairo Gil Peláez, director del proyecto y Decano de la facultad de ingeniería civil de la universidad Santo Tomás de Villavicencio, se ha caracterizado durante su labor como un profesional íntegro y excepcional en sus labores realizadas, graduado como ingeniero mecánico, realizó sus estudios de maestría y doctorado en el recinto universitario de Mayagüez en Puerto Rico con énfasis en estructuras.

A nivel investigativo ha participado en la universidad Santo Tomás de Villavicencio en el proyecto “Optimización de forma y tamaño de estructuras metálicas tipo cercha mediante algoritmo genético”, con el estudiante Andrés Felipe Paz Possú y el mencionado en el presente documento.

El Ingeniero Emiro Andrés Lozano Pérez, codirector del proyecto, graduado de ingeniero civil y especialista en estructuras, a nivel investigativo en la universidad Santo Tomás de Villavicencio se ha caracterizado por ser partícipe de proyectos como “Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico” y “cuantificación del módulo de elasticidad del concreto de 3000 psi e influencia del curado y características de los agregados en las resistencias finales”, entre otros.

8. METODOLOGÍA

Al trabajar el estudio de las características del acero de lámina delgada es conveniente utilizar el método de investigación experimental debido a que este tipo de diseño se realiza en un perfil de acero para la conformación de vigas o columnas, y en este afectan variables características del mismo, como lo son la resistencia para evitar el pandeo local, relación de esbeltez, longitud no arriostrada, entre otros. Por esta razón se requieren hacer comparaciones y ensayos de laboratorio donde se sometan a cargas para evaluar la eficiencia, resistencia y comportamiento ante las sollicitaciones.

8.1. DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS

Las etapas propuestas para la realización del proyecto investigativo son:

- **Primera etapa:** Desarrollar el modelo matemático para analizar los momentos flectores en una viga compuesta sometida a carga en la sección transversal.
- **Segunda etapa:** Dimensionar la viga compuesta para unas condiciones de carga dadas.
- **Tercera etapa:** Cálculo de la viga de equivalente de concreto reforzado y la viga equivalente en estructura metálica.
- **Cuarta etapa:** Evaluar experimentalmente la viga sometida a cargas para poder comprobar los resultados.
- **Quinta etapa:** Análisis de los resultados de resistencia obtenidos por los métodos propuestos y relación de datos para la presentación de resultados por medio de cuadros comparativos, tablas, figuras, gráficas, entre otros.

8.2. POBLACIÓN, MUESTRAS, VARIABLES E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

8.2.1 Población

Los resultados obtenidos en el presente proyecto de investigación están dirigidos a empresas encargadas de la fabricación, mantenimiento y mejoramiento de estructuras hechas con miembros de sección compuesta, también a todas aquellas personas interesadas en el desarrollo y eficacia de construcciones hechas con estructuras metálicas.

8.2.2 Sujetos

Los sujetos sometidos a ensayos experimentales son un perfil de acero en forma de U y una mezcla de concreto que rellena el interior del perfil, y los sujetos evaluados en el análisis teórico son una viga en concreto reforzado, una viga de acero y una viga de sección compuesta.

8.2.3 Instrumentos

Los instrumentos que se utilizarán para la realización del proyecto son programas de cálculo de elementos finitos (Ansys), plantillas de cálculo de acuerdo a las normas vigentes en el ámbito de estudio como la NSRO-10, AISC 360-10, ACI 18 y ensayos experimentales (método de la fuerza controlada, flexión de 4 puntos).

8.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Para realizar una eficaz comparación y evaluación de vigas compuestas con equivalentes de concreto reforzado y de acero, se debería trabajar con vigas a una escala real de 4, 5 o 6 m, pero para efectos de la validación experimental se procederá a trabajar con una viga de menor tamaño que permita una adecuada manipulación en el laboratorio y posteriormente con ayuda del modelo matemático escalarlas a mayores longitudes. De acuerdo a lo dicho anteriormente se determinó una viga con longitud de 1,2 m y con dimensiones tal que cumplan con las sollicitaciones.

En primera instancia se determinaron las propiedades de los materiales como la resistencia máxima a compresión del concreto (f'_c), Módulo de elasticidad del concreto (E_c), Resistencia máxima a tracción del concreto (f_r), Módulo de elasticidad del acero (E_s) y Esfuerzo de fluencia del acero (F_y). Estas propiedades variaron en efecto comparativo en la viga compuesta con respecto a la viga de concreto reforzado y la viga de acero, y se indicaron en su respectiva etapa.

Los módulos de elasticidad del concreto y del acero que se usan para el calculo de la sección transformada, determinan la rigidez del elemento. Considerando este parámetro y apartir de la formula establecida tanto en la NSR-10, como en el ACI-18 se hace el cálculo de el módulo de elasticidad del concreto, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2. Calculo del módulo de elasticidad del concreto.

Sistema SI esfuerzos en Mpa	Sistema mks esfuerzos en kgf/cm ²	Sistema Ingles esfuerzos en Lb/in ² (Psi)
$E_c = Wc^{1,5} \cdot 0,043 \cdot \text{raiz}(f'_c)$	$E_c = Wc^{1,5} \cdot 0,14 \cdot \text{raiz}(f'_c)$	$E_c = Wc^{1,5} \cdot 33 \cdot \text{raiz}(f'_c)$
$E_c = 4700 \cdot \text{raiz}(f'_c)$	$E_c = 15100 \cdot \text{raiz}(f'_c)$	$E_c = 57000 \cdot \text{raiz}(f'_c)$

Fuente. Autor.

Donde:

- E_c es el módulo de elasticidad del concreto.
- f'_c es la resistencia del concreto.

8.4. DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS

Por medio de un análisis estructural se determinaron las cargas vivas y cargas muertas a soportar, para posteriormente calcular el momento. Estos resultados del análisis se evidencian en la tabla 3.

Tabla 3. Análisis estructural.

Luz libre	Cv	Cm	Wu	R	Mu
1,2 m	1,05 tonf	1,40 tonf	3,54 tonf/m	2,18 tonf	6552000,00 N*mm

Fuente. Autor.

Donde:

- Cv es la carga viva.
- Cm es la carga muerta.
- R es la reacción en los apoyos.
- Mu es el momento actuante calculado.

Nota: El valor numérico de las cargas no tiene una lógica constructiva, estas fueron determinadas de acuerdo a la resistencia de la sección a fallar en el laboratorio, vale la pena mencionar que las dimensiones de la sección principal fueron determinadas de la mano de las limitaciones propuestas por el sitio donde se laminó el perfil.

En las siguientes etapas se mostrará el diseño de una viga en concreto reforzado y una viga equivalente en acero estructural, para luego por medio de un híbrido realizar una sinergia entre las dos, proponiendo un diseño de una viga de sección compuesta con diferentes configuraciones que tome y aproveche de la mejor manera las bondades del acero y del concreto.

9. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE UNA VIGA EN CONCRETO REFORZADO.

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

- Las secciones transversales de la viga, perpendicular al plano de flexión permanecen planas durante la flexión.
- Los esfuerzos en el concreto y en el acero, se calcularon por medio de la sección transformada y la formula $\sigma = Mc/I$ teniendo en cuenta que la distribución lineal de esfuerzos, deja de ser válida para vigas muy peraltadas.
- Se supuso que el concreto no resiste esfuerzos de tensión, ya que la resistencia a tensión $f_r = 0.7*(f'_c)^{0.5}$ para concretos de peso normal, es muy baja comparada con la del acero, por lo tanto el aporte a tracción del concreto fue despreciado.
- Para conocer la falla final del concreto en su estado plástico se asumió la deformación unitaria máxima del mismo en la fibra externa a compresión como $\epsilon_{cu} = 0.003$.
- La relación esfuerzo – deformación para el concreto fue asumida según la teoría del bloque de Whitney como un rectángulo para facilidad en los cálculos.

Donde:

- M es el momento actuante.
- c es la distancia a la fibra en estudio.
- I es la inercia de la sección.

En primera instancia con la longitud de la viga se procedió a calcular la altura y base mínima de acuerdo a lo enunciado en la tabla 4.

Tabla 4. Altura mínima de vigas o losas.

ELEMENTOS	ALTURA O ESPESOR MÍNIMO h			
	Simplemente apoyados	Con un extremo continuo	Ambos extremos continuos	En voladizo
	Elementos que no soporten o estén vinculados a tabiques divisorios u otro tipo de elementos susceptibles de sufrir daños por grandes flechas			
Losas macizas armadas en una dirección	L/20	L/24	L/28	L/10
Vigas o losas nervadas en una dirección	L/16	L/18,5	L/21	L/8

Fuente. NSR-10.

- La altura mínima calculada por la formula $L/16$ es de 7,5 cm, pero por efectos resistentes está tuvo que ser aumentada hasta los 15,42 cm para poder llegar al momento actuante de 6552000,00 N*mm.
- La base se tomó como un 64% de la altura (efectos resistentes).

Las propiedades resistentes de los materiales utilizados para el diseño de la viga en concreto reforzado fueron extraídas de las usadas convencionalmente, así como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 5. Propiedades de los materiales de la viga de concreto reforzado.

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

Fuente. Autor.

Se hizo un chequeo de la resistencia del concreto a tracción para comprobar si este se había agrietado. Se tomó un λ de 1 debido a que es concreto de peso normal y se calculó el módulo de ruptura con la fórmula:

$$f_r = 0,7\lambda\sqrt{f'_c} \quad (1)$$

Donde:

- f'_c es la resistencia del concreto.
- λ es un coeficiente que depende del peso del concreto.
- f_r es el módulo de ruptura del concreto.

Luego se calculó el esfuerzo con referencia a la sección agrietada “f” y se calculó el momento de agrietamiento “Magr” para comprobar si este ya había sido superado.

$$f = My/I_g \quad (2)$$

Donde:

- f es el esfuerzo de la sección traccionada.
- M es el momento actuante.
- y es la distancia entre la fibra neutra hacia la fibra externa a tracción.
- I_g es la inercia gruesa de la sección.

$$Magr = (f_r * I_g) / y \quad (3)$$

Donde:

- $Magr$ es el momento de agrietamiento del concreto.
- f_r es el módulo de ruptura del concreto.

Los resultados del cálculo del estado de agrietamiento del concreto a tracción se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6. Características del concreto agrietado.

Λ	Fr (N/mm ²)	I _g (mm ⁴)	f (N/mm ²)	Chequeo	Magr (N*mm)
1	3,17	30562759,38	16,53	Concreto A Tensión Agrietado	1258689,71

Fuente. Autor.

Con la altura y base calculadas anteriormente se determinaron las propiedades de peralte efectivo, recubrimiento y factor de resistencia por flexión y se ilustraron en la siguiente tabla.

Tabla 7. Propiedades geométricas de la viga de concreto reforzado.

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

Fuente. Autor.

Se hizo el cálculo de las cuantías mínimas y máximas para refuerzo en tracción, primeramente, se calculó la cuantía balanceada, la cuantía máxima, la cuantía mínima, la cuantía requerida y la cuantía escogida para posteriormente calcular el área de acero e ilustrarlo en la tabla 8.

La fórmula para calcular la cuantía balanceada viene dada por la siguiente expresión:

$$p_b = \frac{600}{600 + F_y} * \frac{0,85.f'_c.B}{F_y} \quad (4)$$

La fórmula para calcular la cuantía máxima viene dada por la siguiente expresión:

$$p_{\max} = 0,65p_b \quad (5)$$

La fórmula para calcular la cuantía mínima viene dada por la siguiente expresión:

$$p_{\min} = 14/F_y \quad (6)$$

La fórmula para calcular la cuantía requerida viene dada por la siguiente expresión:

$$p_{req} = \frac{f'_c}{2.0,59.F_y} - \text{raiz} \left(\left(\frac{f'_c}{2.0,59.F_y} \right)^2 - \left(\frac{M_u.f'_c}{b.d^2\Phi.0,59.F_y^2} \right) \right) \quad (7)$$

Donde:

- pb es la cuantía balanceada.
- pmáx es la cuantía máxima.
- pmín es la cuantía mínima.
- preq es la cuantía requerida.
- Mu es el momento actuante.
- b es la base de la sección.
- d es el peralte efectivo.

Tabla 8. Cuantías mínimas de refuerzo de la viga de concreto reforzado.

Pb	p máx	p mín	p req	p Elegida	As (cm ²)
0,02143	0,01393	0,00333	0,01695	0,01393	1,59

Fuente. Autor.

Las combinaciones de varillas propuestas fueron las siguientes.

Tabla 9. Combinaciones de varillas de la viga de concreto reforzado.

No Varilla	Cantidad	Área (cm ²)
2.5	4	1,96

Fuente. Autor.

Luego se hizo el chequeo para revisar si la viga cumplía como simplemente armada, calculando el momento nominal resistente y verificándolo con el momento actuante.

$$\Phi M_n = \Phi * 0,85 f'_c a \cdot b \cdot (d - \frac{a}{2}) \quad (8)$$

Donde:

- Mn es el momento nominal resistente.
- a es el bloque de compresión.
- b es el ancho de la sección.
- d es el peralte efectivo.
- f'_c es la resistencia del concreto.

Tabla 10. Chequeo de la viga de concreto reforzado.

a (cm)	ΦMn (KN*m)	Mu (KN*m)	Chequeo
4,61	6,61	6,55	Cumple como simplemente armada

Fuente. Autor.

A pesar de que la sección cumplió como simplemente armada se propuso un acero a compresión mínimo necesario para el amarre de los flejes.

Tabla 11. Acero a compresión.

Pmín	A's (cm ²)
------	------------------------

0,00333	0,98
---------	------

Fuente. Autor.

Se evaluó la condición balanceada y se calculó la profundidad del bloque de esfuerzos de Whitney, así como lo muestra la tabla 12.

$$C_{bal} = 0,6d \quad (9)$$

$$a_{bal} = C_{bal}.B1 \quad (10)$$

$$a_{m\acute{a}x} = 0,625.a_{bal} \quad (11)$$

Donde:

- C_{bal} es la condición balanceada.
- a_{bal} es la profundidad del bloque de esfuerzos.
- $a_{m\acute{a}x}$ es la profundidad máxima del bloque de esfuerzos.

Tabla 12. Condición balanceada de la viga de concreto reforzado.

c bal (cm)	B1	a bal (cm)	a-máx (cm)	$\epsilon's$	f's (N/mm ²)
6,85	0,85	5,82	3,64	0,00124	275,18

Fuente. Autor.

Se calculó el momento resistente del acero a compresión.

$$\Phi M_{nA} = \Phi . A's . f's . (d-d') \quad (12)$$

Donde:

- M_{nA} es el momento resistente a compresión.

Tabla 13. Momento resistente del acero a compresión.

$\epsilon's$	M_{nA} (N*mm)
0,00124	753983,769

Fuente. Autor.

Debido a que se colocó acero a compresión fue necesario colocar un acero adicional a tensión para que permanezca el equilibrio de tensiones:

$$A_{s2} = \frac{\Phi M_{n2}}{\Phi F_y . (d-d')} \quad (13)$$

Donde:

- A_{s2} es el acero adicional a tensión.

Tabla 14. Momento resistente de la viga.

A_{s2} (cm ²)	A_{st} (cm ²)
-----------------------------	-----------------------------

0,21	2,17
Fuente. Autor.	

En la siguiente figura se colocaron los resultados obtenidos del cálculo de la viga en concreto reforzado.

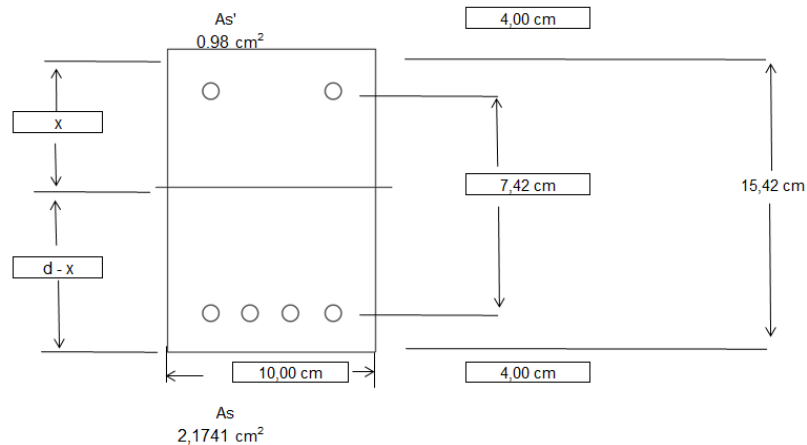


Figura 7. Sección definitiva en concreto reforzado.
Fuente. Autor.

Luego se calculó el precio estimado de la viga y se expresó en la siguiente tabla.

Tabla 15. Precio de la viga en concreto reforzado.

Acero	Concreto
3,154 cm ²	154,21 cm ³
2,97 kg	44,41 kg
9408,38 \$	3701,143 \$
Fuente. Autor.	

Luego se hizo el cálculo la fibra neutra plástica y de la inercia de la sección no agrietada, para posteriormente hacer el cálculo respectivo de los esfuerzos de compresión y tensión de la viga, así como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 16. Fibra neutra plástica y los esfuerzos en la viga de concreto reforzado.
Igualación de tensiones (T=C)

$b \cdot x \cdot (x/2) + 2(n-1) \cdot A_s' \cdot (x-r) = n \cdot A_s \cdot (d-x)$		
n	9,60	
X ²	x	c
5	38,69	-309,62
1	7,73	-61,92
X	4,90 cm	Elegido

	-12,64 cm	4,90 cm	
I	1293,96 cm ⁴		
f_c	24,81 N/mm ²	253,01 kgf/cm ²	Concreto Aplastado
f_{ct}	0,000 N/mm ²	0,000 kgf/cm ²	Concreto A Tensión Agrietado
f_s	33,02 N/mm ²	336,73 kgf/cm ²	El Acero No Ha Fluido
f_s	316,90 N/mm ²	3231.65 kgf/cm ²	

Fuente. Autor.

Para dar una idea de cuál es el efecto resistente de un material con respecto al otro, en la siguiente figura se da una representación gráfica de cómo quedaría la equivalente de esta sección solo en concreto.

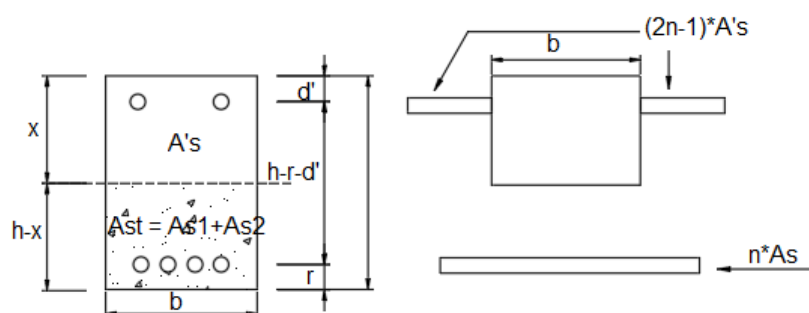


Figura 8. Sección homogeneizada en concreto.

Fuente. Autor.

Nota: Si se refuerza el lado de compresión de una viga, los esfuerzos a largo plazo en ese refuerzo serán afectados considerablemente por la cedencia en el concreto. Conforme pasa el tiempo, el concreto de compresión se compacta más firmemente, ocasionando que las varillas de refuerzo tomen cada vez más carga, [13].

Como consecuencia de esta cedencia en el concreto, se supuso que los esfuerzos en las varillas de compresión calculados con el método del área transformada se duplican con el paso del tiempo, por esta razón se supone que el esfuerzo del acero a compresión es igual a 2n veces su área, [13].

A modo de visualización en la siguiente figura se expresa la distribución de tensiones de la viga en concreto reforzado.

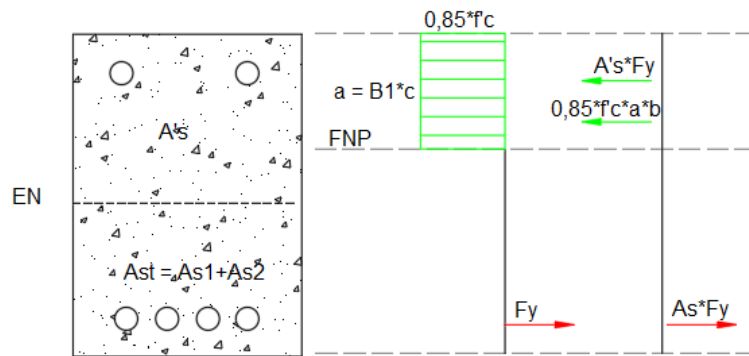


Figura 9. Distribución de tensiones de la viga en concreto reforzado.
Fuente. Autor.

Se hizo el chequeo de los momentos de la sección para saber si la sección tenía una falla dúctil, frágil o balanceada.

Chequeo de la sección:

$$M_c = \frac{1}{2} \cdot f'c \cdot k \cdot j \cdot d^2 \quad (14)$$

$$M_s = A_s \cdot f' \cdot s \cdot j \cdot d \quad (15)$$

$$J = 1 - k/3 \quad (16)$$

$$k = n/(n+r) \quad (17)$$

$$r = f_y/f'c \quad (18)$$

Donde:

- M_c es el momento resistente a compresión.
- M_s es el momento resistente a tensión.

Tabla 17. Chequeo de momentos.

r	K	J	M_c (KN*m)	M_s (KN.m)	Chequeo
20	0,324	0,892	46,8	7,01	Falla dúctil

Fuente. Autor.

Se calculó el momento último resistente de la sección en su rango elástico igualando tensiones ($T=C$).

Tabla 18. Momento último de la sección.

a (cm)	c (cm)	M_u (N*mm)
4,61	5,43	7353771,43

Fuente. Autor.

Una vez evaluados los esfuerzos de la sección, se procedió a realizar el cálculo de la deflexión final de la viga y se verificó si cumplía con la máxima permisible.

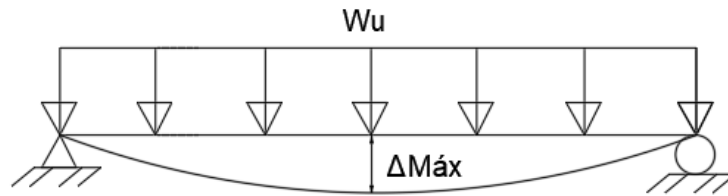


Figura 10. Deflexión máxima de la viga en concreto reforzado.

Fuente. Autor.

Se calculó el momento por carga muerta, el momento por carga viva, la inercia antes del agrietamiento de la sección y el momento de agrietamiento, así como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 19. Cálculo de los momentos de la sección.

Mcp (kg*m)	Mcv (kg*m)	Inercia (cm ⁴)	f _r (kgf/cm ²)	Mcr (kgf*cm)	u (cm ²)	w (cm ²)	x (cm)
252	189	3056	28,98	11487,81	18,81	18,81	4,93

Fuente. Autor.

Cuando un elemento de concreto reforzado es sometido a cargas de flexión este va a sufrir cambios característicos en su comportamiento, pasando por un agrietamiento en su parte traccionada y posteriormente unos esfuerzos en su rango elástico, por esta razón la mejor manera de expresar el comportamiento inercial de una viga de estas cualidades, es por medio de la inercia efectiva de la sección, relacionando los efectos resistentes del momento de agrietamiento y del momento actuante ($M_{cr}/(M_{cp}+M_{cv})$).

$$\Delta M_{\text{Máx}} = \frac{5.w.L^4}{384.E.I} \quad (19)$$

Donde:

- $\Delta M_{\text{Máx}}$ es la deflexión de la viga de concreto.
- w es la carga mayorada.
- L es la longitud de la viga.
- EI es la rigidez de la viga.

Tabla 20. Deflexión de la viga en concreto reforzado.

Mcp + Mcv = Ma (kg*m)	I _{cr} (cm ⁴)	M _{cr} /Ma	I _e cp + cv (cm ⁴)	δ cp + cv = Δ máx (cm)
441	1192,02	0,26	1224,97	0,247

Fuente. Autor.

De acuerdo a la tabla 21 se verifico si la deflexión de la viga producida por las cargas cumplía con la establecida en la norma, se tomó como un piso que no soporta elementos no estructurales (L/360).

$$\Delta \text{ permitida} = L/360 \quad (20)$$

Donde:

- Δ permitida es la deflexión permitida para la viga.
- L es la longitud de la viga.

Tabla 21. Deflexiones máximas permitidas.

TIPO DE MIEMBRO	DEFLEXIÓN QUE SE HA DE CONSIDERAR	LÍMITE DE LA DEFLEXIÓN
1. Techos llanos que no soportan ni están ligados a elementos no estructurales que puedan ser dañados por deflexiones excesivas	Deflexión inmediata debido a carga viva	$L_n/180$
2. Pisos que no soportan carga, o fijos a elementos no estructurales que es posible que sean dañados por grandes deflexiones	Deflexión inmediata debido a carga viva	$L_n/360$
3. Techos o pisos que soportan o están ligados a elementos no estructurales que puedan ser dañados por deflexiones excesivas	Parte de la flecha total que ocurre después de la colocación de los elementos no estructurales	$L_n/480$
4. Techos o pisos que soportan o están ligados a elementos no estructurales que no se dañan con deflexiones excesivas		$L_n/240$

Fuente. ACI – Tabla 9.5 B

Tabla 22. Chequeo de la deflexión máxima permitida de la viga.

Δ permitida (cm)	Chequeo
0,333	Si Cumple

Fuente. Autor.

Para realizar una comparación más adelante con las vigas compuestas se calculó la longitud máxima de la viga en concreto reforzado cumpliendo con la deflexión máxima permisible.

$$L \text{ Máx} = \left(\frac{384EI\Delta \text{ permitida}}{5w} \right)^{1/4} \quad (21)$$

Donde:

- L Máx es la longitud máxima de la viga de concreto

$$L \text{ Máx} = 129,17 \text{ cm} = 1,29 \text{ m}$$

Con la longitud máxima se calculó el ancho efectivo de la sección transversal de acuerdo a la siguiente formula:

$$b_{\text{eff}} = 2b_i' \quad (22)$$

Donde:

- b_i' es el ancho efectivo de la mitad de la viga.

El b_i' se calculó de la siguiente manera:

$$b_i' = L/8 \quad (23)$$

Donde:

- L es la luz de la viga medida de centro a centro de los apoyos.

$$b_{\text{eff}} = 32,42 \text{ cm} = 0,32 \text{ m}$$

El ancho efectivo y la longitud máxima son criterios de gran peso a la hora de la elección de los materiales para la fabricación de vigas, por eso la importancia de calcularlo.

10. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE UNA VIGA DE ACERO

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

- El material es homogéneo y obedece a la ley de Hooke.
- El módulo elástico (E) es igual a tracción que a compresión.
- El miembro es inicialmente recto y de sección constante.
- Las secciones transversales del miembro, originalmente planas y perpendiculares al eje longitudinal antes de la carga, permanecen planas y perpendiculares después de que ha comenzado la flexión.
- No hay cargas axiales actuando sobre el miembro.
- Los esfuerzos a compresión y a tensión se calculan con la formula $\sigma = Mc/I$, teniendo en cuenta que se trabaja con una sección simétrica.
- El diagrama tensión – deformación para el acero es idealizado por dos líneas rectas. En cuanto a la tensión cedente, F_y , el material es linealmente elástico. Después de que se alcanza la tensión cedente, la deformación se incrementa, en gran medida sin mayor aumento en la tensión.

En primera instancia se calculó el módulo de sección necesario para resistir el momento actuante por medio de la siguiente ecuación.

$$S = \frac{M}{\sigma} \quad (24)$$

Donde:

- S es el módulo de sección elástico de la viga de acero.
- M es el momento actuante.
- σ es el esfuerzo elástico máximo del acero.

Nota: como se sabía el esfuerzo máximo del acero a trabajar $F_y = 3515 \text{ N/mm}^2$ y se conocía el momento actuante de 6,55 KN.m, se procedió a hacer el cálculo del módulo de sección elástico.

$$S \quad 186,40 \text{ cm}^3 \quad 73,38 \text{ in}^3$$

Se tomaron las propiedades y dimensiones del material suministradas por el catálogo de productos UNICON para tubos estructurales de acero, dichas propiedades se pueden apreciar en la siguiente figura.

Tabla 23. Propiedades de la viga de acero.

	F_y		F_u		E
	psi	kg/cm ²	psi	kg/cm ²	kg/cm ²
	50000,00	3515,00	62000,00	4358,60	2040000

Fuente. Industrias UNICON C.A.

Se hizo el cálculo del precio estimado de la viga y se expresó en la siguiente tabla.

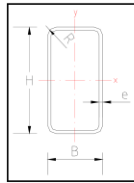
Tabla 24. Precio de la viga en concreto reforzado.

Acero	Concreto
8,54 cm ²	0 cm ³
6,70 kg	0 kg
22183,33 \$	0 \$

Fuente. Autor.

Con el módulo de sección elástico calculado se procedió a elegir del catálogo un perfil que tuviera un módulo igual o mayor con respecto al eje fuerte del tubo, (S_x).

Tubos Estructurales



ASTM A 500-03a
Sección Rectangular (Sistema Métrico)

Designación Comercial H x B DN (°)	Espesor e mm	Radio R mm	Sección A cm²	Peso P Kg./m	Propiedades Estáticas								Grados	
					Ix cm⁴	Sx cm³	Zx cm³	rx cm	Iy cm⁴	Sy cm³	Zy cm³	ry cm	Serie Tubos Estructurales Conduven ECO (°)	Serie Tubos Estructurales Estándar (*)
80 x 40	2,25	6,75	5,02	3,94	40,61	10,15	12,72	2,84	13,84	6,92	7,87	1,66	C	A y B
100 x 40	2,25	6,75	5,92	4,65	71,37	14,27	18,19	3,47	17,05	8,53	9,57	1,70	C	A y B
120 x 60	2,50	7,50	8,54	6,70	159,29	26,55	32,88	4,32	54,67	18,22	20,39	2,53	C	A y B
140 x 60	3,00	9,00	11,33	8,89	274,27	39,18	49,44	4,92	73,46	24,49	27,40	2,55	C	A y B
160 x 65	3,40	10,20	14,44	11,34	449,65	56,21	71,35	5,58	110,41	33,97	38,00	2,77	C	A y B
180 x 65	4,00	12,00	18,41	14,45	697,99	77,55	100,01	6,16	140,88	43,35	48,66	2,77	C	A y B
200 x 70	4,30	12,90	21,85	17,15	1.016,19	101,62	131,35	6,82	194,94	55,70	62,42	2,99	C	A y B
220 x 90	4,50	13,50	26,39	20,72	1.561,83	141,98	179,84	7,69	388,34	86,30	96,32	3,84	C	A y B
260 x 90	5,50	16,50	36,25	28,46	2.844,82	218,83	283,05	8,86	536,10	119,13	133,39	3,85	C	A y B
300 x 100	5,50	16,50	41,75	32,77	4.366,42	291,09	376,15	10,23	777,00	155,40	172,58	4,31	C	A y B
300 x 100	7,00	21,00	52,36	41,10	5.360,46	357,36	466,29	10,12	943,61	188,72	212,92	4,25	C	A y B
320 x 120	7,00	21,00	57,96	45,50	7.032,23	439,51	563,87	11,02	1.512,24	252,04	282,49	5,11	C	A y B
320 x 120	9,00	27,00	73,18	57,45	8.654,16	540,89	702,10	10,87	1.841,31	306,88	350,11	5,02	C	A y B
350 x 170	9,00	27,00	87,58	68,75	13.546,10	774,06	969,37	12,44	4.418,30	519,80	587,78	7,10	C	A y B
350 x 170	11,00	33,00	105,41	82,74	15.966,43	912,37	1.153,49	12,31	5.179,04	609,30	697,86	7,01	C	A y B

Norma ASTM A 500 Grado del Acero	Propiedades Mecánicas (mínimas)			Norma ASTM A 500 Grado del Acero	Propiedades Química (% máximo)			
	Límite de Fluencia (psi)	Resistencia a la Tracción (psi)	% Elong		C Carbono	Mn Manganeso	P Fósforo	S Azufre
Grado A	39,000	45,000	25	Grado A	0.23	1.35	0.035	0.035
Grado B	46,000	58,000	23	Grado B	0.26	1.35	0.035	0.035
Grado C	50,000	62,000	21	Grado C	0.26	1.35	0.035	0.035

Figura 11. Catálogo de tubos estructurales.
Fuente. Industrias UNICON C.A.

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

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

H (mm)	B (mm)	t (mm)	R (mm)	A (cm ²)	S _x (cm ³)	Z _x (cm ³)	I _x (cm ⁴)
120	60	2,5	7,5	8,54	26,55	32,88	159,29
r (mm)	h (mm)	b (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	a (mm)	T _w = C _w (kgf)	T _f = C _f (kgf)
8,75	108,75	48,75	54,38	126,25	56,88	9556,41	6216,38

Fuente. Industrias UNICON C.A.

Luego se realizó el chequeo de esbeltez de la sección de acuerdo a la figura 12 para conocer su momento último resistente y se ilustra en la tabla 26.

Caso	Descripción del Elemento	Relación Ancho a Espesor	Valores límite de la relación ancho/espesor		Ejemplos
Elementos Atiesados	17 Aletas de perfiles tubulares estructurales (PTE) y perfiles en cajón, de sección rectangular y espesor uniforme	b/t	$1.12\sqrt{E/F_y}$	$1.40\sqrt{E/F_y}$	
	18 Cubreplacas de aleta y platinas de diafragma entre líneas de conectores o soldaduras	b/t	$1.12\sqrt{E/F_y}$	$1.40\sqrt{E/F_y}$	
	19 Almas de perfiles tubulares estructurales (PTE) y perfiles en cajón, de sección rectangular	b/t	$2.42\sqrt{E/F_y}$	$5.70\sqrt{E/F_y}$	
	20 Perfiles tubulares estructurales (PTE) de sección circular	D/t	$0.07 E/F_y$	$0.31 E/F_y$	

Figura 12. Valores límites de esbeltez para miembros de acero sometidos a flexión.

Fuente. AISC 360-10.

Tabla 26. Chequeo de esbeltez de los elementos de la sección en acero.

Miembros rigidizados (alas)		Miembros rigidizados (alma)	
λ_f	19,50	λ_w	43,50
λ_{Pf}	26,98	λ_{Pw}	58,30
λ_{rf}	33,727	λ_{rw}	137,318
Chequeo	Compacta	Chequeo	Compacta

Fuente. Autor.

Debido a que todos los elementos de la sección son compactos el momento nominal último va a ser igual al momento plástico de la sección.

Tabla 27. Momento último resistente de la sección de acero.

I _x (cm ⁴)	S _x (cm ³)	M _y (KN*m)	Z _x (cm ³)	M _p (KN*m)
-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------	-----------------------------------	-----------------------

159,29	26,55	9,15	283,05	11,24
--------	-------	------	--------	-------

Fuente. Autor.

A manera de ilustración en la siguiente figura se expresa la distribución de tensiones en la viga de acero.

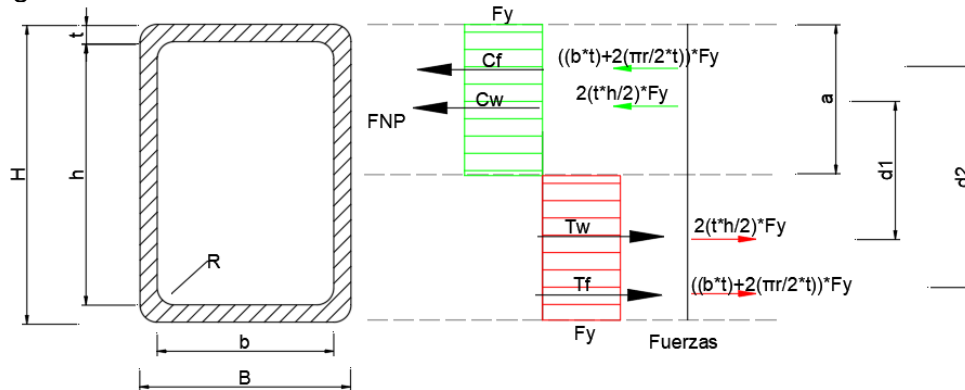


Figura 13. Distribución de tensiones plásticas de la viga de acero.
Fuente. Autor.

Nota: en perfiles de acero de sección tubular la capacidad a flexión bajo condición plástica puede verse disminuida por el pandeo local del ala o el pandeo local del alma, aspectos que tienen que evaluarse por medio de los límites de esbeltez, el pandeo lateral-torsional según la ANSI/AISC 360-10 solo es tenido en cuenta en perfiles muy largos flectados hacia su eje mayor.

Se hizo nuevamente el calculo de esfuerzos de la sección utilizada sometida al momento propuesto, así como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 28. Esfuerzos de la viga de acero.

b ₁ (cm)	h ₁ (cm)	b ₂ (cm)	h ₂ (cm)	b ₃ (cm)	h ₃ (cm)	b ₄ (cm)
4,87	0,25	0,25	10,87	0,25	10,87	4,87
h ₄ (cm)	Área acero (cm ²)	Área Concreto (cm ²)	c1 (cm)	σ sup (N/mm ²)	c2 (cm)	σ Inf (N/mm ²)
0,25	8,54	0	5,43	223,55	-5,43	223,55

Fuente. Autor.

Se puede apreciar que el esfuerzo a compresión es menor a los esperados según el módulo elastico de sección calculado anteriormente, esto es basicamente debido a que la altura útil del alma "H" al igual que el ancho efectivo del ala "B" se vieron disminuidos por un radio de curvatura "r" en las esquinas.

Luego se verificó si la deflexión de la viga producida por las cargas cumplía con la establecida en la norma, se tomó como un piso que no soporta elementos no estructurales (L/360). Los resultados se indicaron en la siguiente tabla.

$$\Delta \text{ permitida} = L/360 \quad (25)$$

Donde:

- Δ permitida es la deflexión permitida para la viga de acero.
- L es la longitud de la viga.

Tabla 29. Chequeo de deflexiones de la viga de acero.

I_x (cm⁴)	$\delta_{cp + cv}$ (cm)	Δ permitida (cm)	Chequeo
159,29	0,204	0,33	Si Cumple

Fuente. Autor.

Por último se calculó la longitud máxima resistente

$$L_{\text{Máx}} = 135,74 \text{ cm} = 1,35 \text{ m}$$

Con la longitud máxima se calculó el ancho efectivo de la sección transversal de acuerdo a la siguiente formula:

$$b_{\text{eff}} = 33,93 \text{ cm} = 0,33 \text{ m}$$

11. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE UNA VIGA COMPUESTA

Teniendo en cuenta el método de Distribución De Tensiones Plásticas y el análisis de miembros compuestos por medio de la sección transformada se desarrolló el modelo matemático para conocer los esfuerzos a compresión y a tracción de una viga compuesta de sección dada y posteriormente apartir de la posición de la fibra neutra plástica (FNP) de la sección conocer el momento último resistente.

Al igual que la unión de perfiles vigacero y bloquelones o aligerantes en arcilla utilizados en el sistema de placa fácil, la unión entre el perfil metálico propuesto y el relleno de concreto mejoran significativamente las características de la sección compuesta, entre las principales ventajas se pueden observar:

- La sección presenta un mejor comportamiento sísmico debido a la adherencia entre el concreto y el perfil metálico.
- Presenta mayor resistencia en la zona de compresión debido al confinamiento permanente del concreto, que según la NSR-10 para estos casos se puede tomar como $0,95 f'_c$.
- Permite una mayor separación entre los apuntalamientos temporales durante la etapa constructiva.
- No requiere el uso de formaletas.
- Montaje rápido y sencillo.
- Menor esfuerzo en remates y aseo por la limpieza del sistema.
- Economía en el arriendo de equipos y mano de obra.

11.1. LIMITACIONES

La norma ANSI/AISC 360-10 indica que para el diseño de secciones compuestas (concreto – acero) debe regirse por el capítulo I “Diseño de miembros de sección compuesta”, dentro del cual se distinguen las siguientes limitaciones:

- El concreto relleno a utilizar debe cumplir con:

$$200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} > f'_c > 700 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad (26)$$

Donde:

f'_c es la resistencia para el concreto de peso normal.

- La cedencia mínima del acero no será menor que

$$F_y = 5280 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad (27)$$

Donde:

- F_y es la resistencia mínima para acero estructural y acero de refuerzo en miembros compuestos.

- El área de la sección del núcleo de acero debe ser por lo menos el 1% del área de la sección compuesta.

Nota: En la construcción de miembros compuestos, el concreto, el acero de refuerzo y el acero estructural deben sujetarse a las limitaciones mencionadas anteriormente, a menos que se justifiquen otras por pruebas o análisis.

También es necesario para tener como punto de referencia hablar de las características del sistema mixto losacero o como mejor se le conoce Metaldeck, el cual tiene como ventajas:

- El uso de un perfil laminado para aumentar la resistencia de adherencia mecánica con el concreto para formar la losa.
- Disminución en los tiempos de construcción que generan ahorros en la mano de obra y alquiler de equipos.
- Suministra una plataforma de trabajo estable y segura durante la construcción.
- Elimina el apuntalamiento.
- Ocupa poco espacio en la obra.

Para garantizar una interacción completa entre los materiales se debe efectuar una resistencia a corte mayor que la actuante, para ello la losacero utiliza grecas o embuticiones que mejoran significativamente la adherencia o resistencia a corte directa, además de utilizar conectores de cortante para la unión a las vigas, Así como lo muestra la siguiente figura.

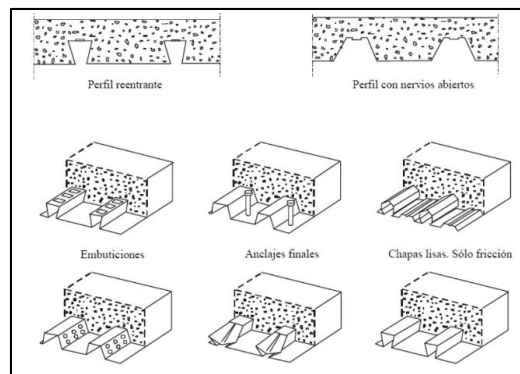


Figura 14. Tipos de adherencia mecánica en losas mixtas.

Fuente. Dokumen.tips.

A partir del análisis realizado anteriormente en la viga de concreto reforzado y la viga de acero, se plantearon ocho muestras para el análisis de sección compuesta, teniendo como principales características el centro de gravedad y el comportamiento resistente de los materiales para satisfacer las solicitaciones.

Nota: vale la pena recordar que el análisis no solo de las vigas compuestas, si no de las vigas de concreto reforzado y acero estructural, fueron limitados por un

Momento actuante base suministrado por la sección principal o sección 2 “sección ensayada en el laboratorio”.

11.2. PRE-DIMENSIONAMIENTO SECCIÓN N°1

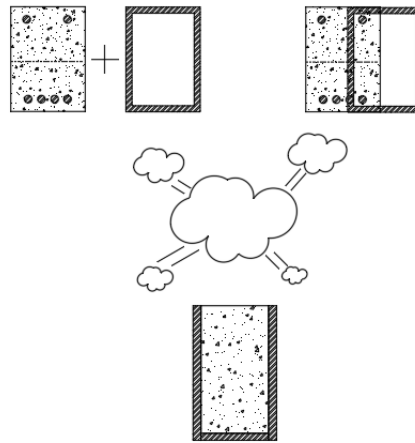


Figura 15. Combinación de las características de las vigas de Concreto R y Acero.
Fuente. Autor.

La primera sección propuesta fue dimensionada geométricamente a partir de las ya existentes vigas compuestas rellenas de concreto (CFT), con la diferencia de que el ala superior no existía para facilitar, observar y garantizar el vaciado del concreto homogéneamente, así como lo muestra la figura 16.

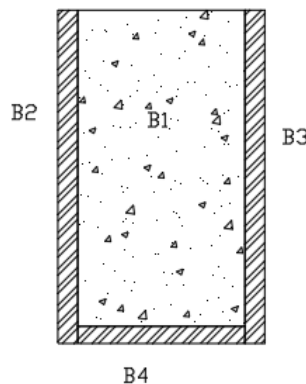


Figura 16. Viga compuesta rellena, sección N°1.
Fuente. Autor.

Las propiedades del material fueron suministradas por el lugar en donde se hizo el laminado del perfil y la resistencia del concreto a utilizar fue de 3000 psi, dichas propiedades se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 30. Propiedades de los materiales de la viga de concreto reforzado.

f'_c (kgf/cm ²)	E_c (kgf/cm ²)	F_r (kgf/cm ²)	E_s (kgf/cm ²)	F_y (kgf/cm ²)
210	218819,79	28,98	2100000	2750

Fuente. Autor.

Nota: como se observa las propiedades resistentes del acero no cumplen con la mínima establecida por la norma de 5250 kg/cm², pero, así como también esta lo indica, pueden utilizarse otras si estas son justificadas. La justificación del porque se usa un acero de menos resistencia es básicamente por facilidad en la etapa experimental en el presente proyecto.

Para realizar el análisis se varió el ancho, alto y calibre de la sección hasta llegar al momento actuante base calculado en la muestra principal. Los resultados obtenidos fueron los siguientes.

Tabla 31. Propiedades geométricas sección N°1.

t (cm)	b₁ (cm)	h₁ (cm)	b₂ (cm)	h₂ (cm)	b₃ (cm)	h₃ (cm)	b₄ (cm)	h₄ (cm)
0,11	9,00	14,89	0,11	15,00	0,11	15,00	9,00	0,11

Fuente. Autor.

De acuerdo a las siguientes ecuaciones se calculó la razón modular “n” para hacer una homogeneización de la sección toda en concreto y conocer los anchos equivalentes, el eje neutro y la inercia total de la sección tal y como se muestra a continuación.

$$n = E_s/E_c \quad (28)$$

$$b_{equ} = b \cdot n \quad (29)$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot y^2 \quad (30)$$

Donde:

- n es la razón modular.
- b equ es la base equivalente.
- I es la inercia calculada por teorema de ejes paralelos.

Tabla 32. Propiedades geométricas equivalentes de la sección N°1.

n	b₂ equ (cm)	b₃ equ (cm)	b₄ equ (cm)	y (cm)
9,60	1,10	1,10	86,37	7,12
I₁ (cm⁴)	I₂ (cm⁴)	I₃ (cm⁴)	I₄ (cm⁴)	I Total (cm⁴)
1464,63	312,72	312,72	496,27	2586,34

Fuente. Autor.

Graficamente la sección homogeneizada toda en concreto tendría una relación como la que se muestra a continuación.

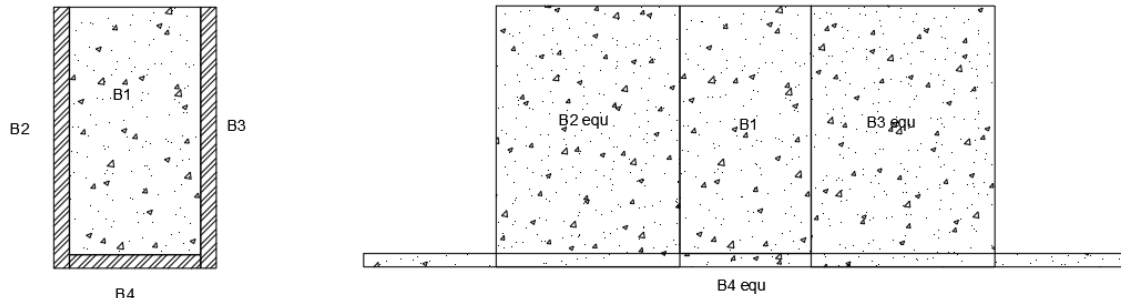


Figura 17. Sección N°1 homogeneizada en concreto.
Fuente. Autor.

Una vez calculados los anchos equivalentes se procedió a realizar el cálculo de los esfuerzos a compresión y tensión de la sección y a hacer el chequeo para saber si la sección estaba presentando un comportamiento dúctil, frágil o balanceado.

Tabla 33. Cálculo de esfuerzos de la sección N°1.

c1 (cm)	σ Concreto (N/mm ²)	c2 (cm)	σ Acero (N/mm ²)
7,87	19,94	-7,12	173,24

Fuente. Autor.

Chequeo de la sección:

Tabla 34. Chequeo de momentos sección N°1.

r	K	J	Centroide inf (cm)	d (cm)	Mc (KN.m)	Ms (KN.m)	Chequeo
13,09	0,42	0,85	5,89	9,10	30,01	6,07	Falla dúctil

Fuente. Autor.

Después se calculó el momento último resistente de la sección dependiendo de la relación de esbeltez de sus miembros de acero, en este perfil habían 3 elementos de acero, 2 almas que no estaban rigidizadas y un ala rigidizada, la norma ANSI/AISC, proporciona unas tablas de referencia para miembros compuestos rellenos y para perfiles de acero sometidos a flexión.

Caso	Descripción del Elemento	Relación Ancho a Espesor	Valores límite de la relación ancho/espesor		Ejemplos
Elementos Alasados	17 Aletas de perfiles tubulares estructurales (PTE) y perfiles en cajón, de sección rectangular y espesor uniforme	b/t	$1.12\sqrt{E/F_y}$	$1.40\sqrt{E/F_y}$	
	18 Cubreplacas de aleta y platinas de diafragma entre líneas de conectores o soldaduras	b/t	$1.12\sqrt{E/F_y}$	$1.40\sqrt{E/F_y}$	
	19 Almas de perfiles tubulares estructurales (PTE) y perfiles en cajón, de sección rectangular	b/t	$2.42\sqrt{E/F_y}$	$5.70\sqrt{E/F_y}$	
	20 Perfiles tubulares estructurales (PTE) de sección circular	D/t	$0.07E/F_y$	$0.31E/F_y$	

Figura 18. Valores límites de relación de esbeltez para perfiles de acero.
Fuente. ANSI/AISC.

Descripción del Elemento	Relación Ancho a Espesor	Valores límite		
		λ_p (Compacto/No Compacto)	λ_r (No Compacto/Esbelto)	Máximo Permitido
Aletas de perfiles tubulares estructurales (PTE) y perfiles en cajón, de sección rectangular y espesor uniforme	b/t	$2.26\sqrt{E/F_y}$	$3.0\sqrt{E/F_y}$	$5.0\sqrt{E/F_y}$
Almas de perfiles tubulares estructurales (PTE) y perfiles en cajón, de sección rectangular y espesor uniforme	h/t	$3.0\sqrt{E/F_y}$	$5.70\sqrt{E/F_y}$	$5.70\sqrt{E/F_y}$
Secciones circulares rellenas	D/t	$0.09E/F_y$	$0.31E/F_y$	$0.31E/F_y$

Figura 19. Valores límite de relación de esbeltez para perfiles compuestos rellenos.

Fuente. ANSI/AISC.

Para este caso las tablas a utilizar son las que hacen referencia a miembros compuestos rellenos de concreto, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 35. Chequeo de esbeltez de los elementos Sección N°1.

Miembros No rigidizados (almas)		Miembros rigidizados (ala)	
λ_f	129,43	λ_w	78,26
λ_{Pf}	82,90	λ_{Pw}	62,45
λ_{rf}	157,52	λ_{rw}	82,10
Máx	157,52	Máx	138,17
Chequeo	No compacta	Chequeo	No compacta

Fuente. Autor.

En La siguiente figura se ilustra el comportamiento a flexión de la viga de sección N°1, en esta se hizo un equilibrio de tensiones y fuerzas a cedencia máxima con base en las relaciones de esbeltez mencionadas anteriormente.

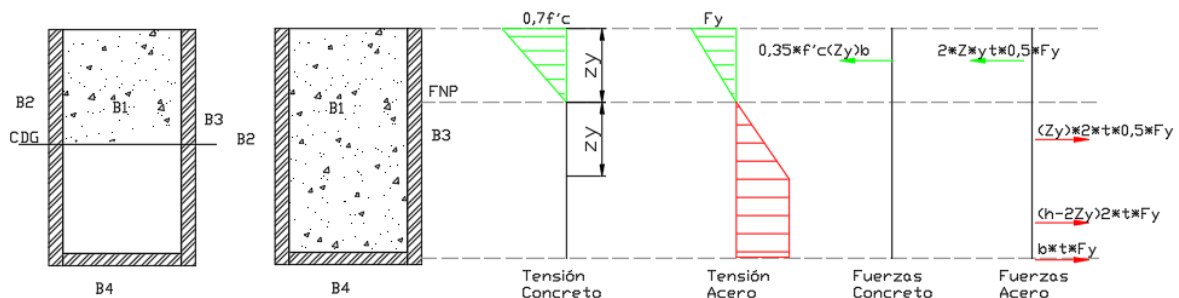


Figura 20. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°1 en el rango plástico.

Fuente. Autor.

Por medio de la distribución de tensiones se hizo el cálculo de la fibra neutra plástica con la siguiente ecuación.

$$Z_y = \frac{2h \cdot t \cdot f_y + b \cdot t \cdot f_y}{0,35 \cdot f_c b + 4 \cdot t \cdot f_y} \quad (31)$$

Donde:

- Z_y es la fibra neutra plástica de la sección 1.

De acuerdo a lo establecido en el título F.2.9.3.4 de la NSR-10 para secciones no compactas el esfuerzo nominal resistente se obtendrá como la plastificación del miembro a tracción hasta la fibra neutra plástica y el comienzo de cedencia en la parte superior a compresión.

Se realizó el cálculo del momento cedente de la sección “My” y el momento plástico “Mp”. Dicho procedimiento se muestra en la siguiente figura.

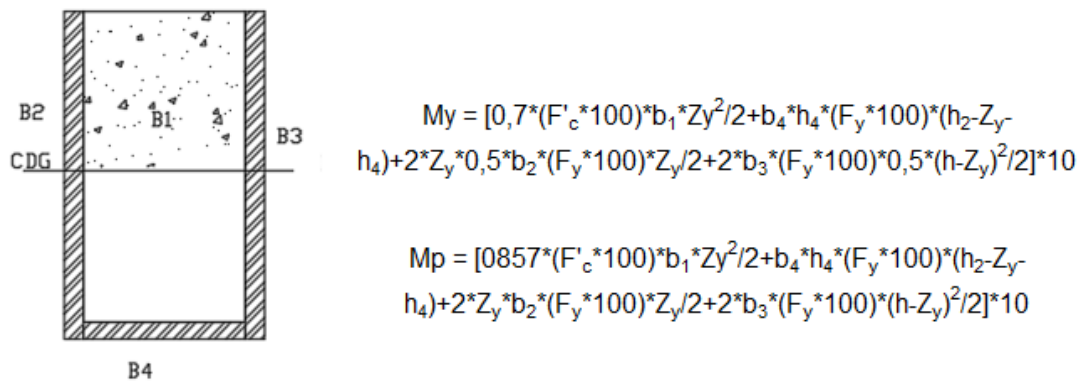


Figura 21. Momento máximo de la Sección N°1.

Fuente. Autor.

Luego se calculó el momento nominal de la sección, la NSR-10 indica que para secciones No compactas de sección compuesta, el momento nominal resistente de la sección está dado por la fórmula:

$$M_n = M_p - \frac{(M_p - M_y)}{\Lambda_r - \Lambda_p} (\Lambda_f - \Lambda_p) \quad (32)$$

Donde:

- Λ_f , Λ_r y Λ_p son las relaciones de esbeltez obtenidas de la figura 19.
- M_y es el momento de fluencia, correspondiente a la fluencia de la aleta en tensión, limitando los esfuerzos de compresión a $0,7f'_c$ y el máximo esfuerzo de fluencia en el acero.
- M_p momento correspondiente a la distribución plástica de esfuerzos sobre la sección transversal compuesta.

Los resultados del cálculo de los momentos de la sección N1 se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 36. Fibra neutra plástica y momento nominal de la Sección N1.

Zy (cm)	S (cm ³)	My (N*mm)	Mp (N*mm)	Mn (N*mm)	ΦMn (N*mm)
6,4	328,46	6745715,7	9066819,79	7619223,76	6857301,39

Fuente. Autor.

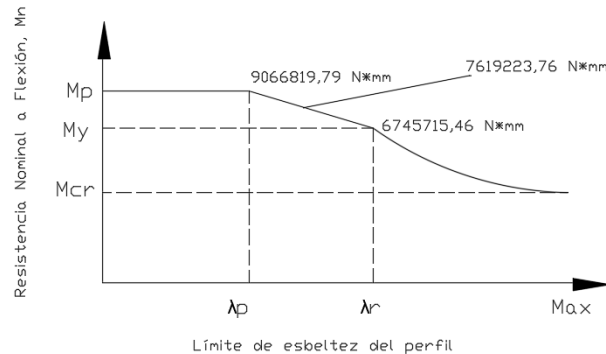


Figura 22. Comportamiento a flexión de la Sección N°1.

Fuente. Autor.

Se calculó el área de acero y el área de concreto en la sección para luego calcular el peso y el precio del miembro compuesto, así como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 37. Propiedades finales de la sección.

Acero	Concreto
4,48 cm ²	133,96 cm ³
4,22 kg	38,58 kg
13363,84 \$	3215,16 \$

Fuente. Autor.

Se verificó si la deflexión de la viga producida por las cargas cumplía con la establecida en la norma, se tomó como un piso que no soporta elementos no estructurales (L/360).

$$\Delta \text{ permitida} = L/360 \quad (33)$$

Donde:

- Δ permitida es la deflexión permitida para la viga compuesta.
- L es la longitud de la viga.

Tabla 38. Chequeo de deflexiones de la viga de acero.

Ix (cm ⁴)	δ cp + cv (cm)	Δ permitida (cm)	Chequeo
2586,34	0,012	0,33	Si Cumple

Fuente. Autor.

Se calculó la longitud máxima resistente

$$L \text{ Máx} = 274,46 \text{ cm} = 2,74 \text{ m}$$

Por último, con la longitud máxima se calculó el ancho efectivo máximo de la sección.

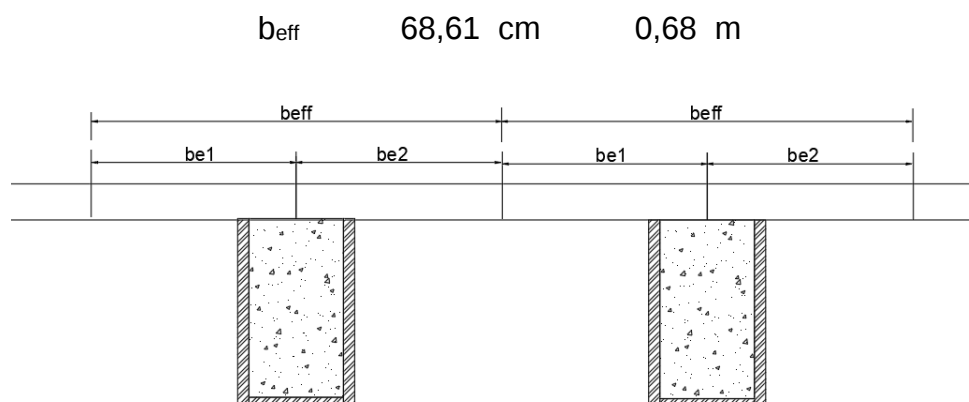


Figura 23. Ancho efectivo de la viga N°1.
Fuente. Autor.

11.3. PRE-DIMENSIONAMIENTO SECCIÓN N°2 O SECCIÓN PRINCIPAL

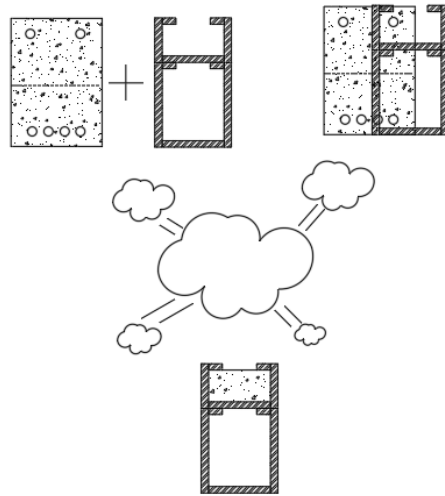


Figura 24. Viga compuesta rellena, Sección N°2 o principal.
Fuente. Autor.

Inicialmente esta sección fue planteada a partir de un diseño de viga equivalente en concreto reforzado, pero por limitaciones en el laminado se convirtió en la sección principal. El diseño de la geometría de no solo esta sección sino de las que prosiguen a calcular tienen unos factores añadidos que recaen en el comportamiento del concreto a cargas de tensión; como lo indica la teoría, el concreto una vez a superado su fuerza a tracción máxima o su momento de rotura deja de dar un aporte relevante a los esfuerzos inferiores al eje neutro de una viga a flexión y se convierte en un peso muerto.

Con base en este parámetro se realizaron diferentes configuraciones de modo tal que se pudiera eliminar el peso o volumen de concreto que trabaja a tensión sin aumentar apreciablemente el costo del miembro estructural. La primera sección propuesta a partir de lo enunciado anteriormente se ilustró en la siguiente figura.

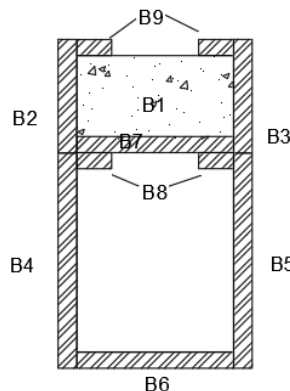


Figura 25. Viga compuesta rellena, Sección N°2 o principal.
Fuente. Autor.

Se introdujeron variables como: la relación de $\gamma = b/h$ y $R =$ Ancho de las alas (b_8 y b_9), así como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 39. Restricciones de la sección N°2.

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

Fuente. Autor.

Para el pre-dimensionamiento de la sección transversal se estableció un calibre de 0.07mm (Calibre 22) y se indicaron las siguientes dimensiones geométricas.

Tabla 40. Propiedades geométricas sección N°2.

t (cm)	b ₁ (cm)	h ₁ (cm)	b ₂ (cm)	h ₂ (cm)	b ₃ (cm)
0,07	7,00	3,86	0,07	4,00	0,07
h ₃ (cm)	b ₄ (cm)	h ₄ (cm)	b ₅ (cm)	h ₅ (cm)	b ₆ (cm)
4,00	0,07	9,00	0,07	9,00	7,00
h ₆ (cm)	b ₇ (cm)	h ₇ (cm)	b ₈ (cm)	h ₈ (cm)	b ₉ (cm)
0,07	7,00	6,00	1,00	0,07	1,00
h ₉ (cm)	-	-	-	-	-
0,09	-	-	-	-	-

Fuente. Autor.

Seguido de esto se calcularon los anchos equivalentes todo en concreto de la misma manera que en la sección explicada anteriormente. Los resultados de dichas equivalencias fueron los siguientes.

Tabla 41. Propiedades geométricas equivalentes de la sección N°2.

y (cm)	b ₂ equ (cm)	b ₃ equ (cm)	b ₄ equ (cm)	b ₅ equ (cm)
8,534	0,672	0,672	0,672	0,672
b ₆ equ (cm)	b ₇ equ (cm)	b ₈ equ (cm)	b ₉ equ (cm)	-
67,179	67,179	9,597	9,597	-
I ₁ (cm ⁴)	I ₂ (cm ⁴)	I ₃ (cm ⁴)	I ₄ (cm ⁴)	I ₅ (cm ⁴)
197,79	19,91	19,91	163,24	163,24
I ₆ (cm ⁴)	I ₇ (cm ⁴)	I ₈ (cm ⁴)	I ₉ (cm ⁴)	I Total (cm ⁴)
377,94	1,18	53,99	10,56	1007,84

Fuente. Autor.

Nota: para el diseño de está y demás secciones se tendrá mucho cuidado en el dimensionamiento de los elementos del perfil, con el objetivo de garantizar que el eje neutro de la sección corresponda con la parte inferior del bloque de concreto para que este trabaje netamente a compresión y se cumpla con lo planteado anteriormente. También hay que recordar que el diseño de estos miembros es planteado para el rango o estado elástico de la sección, el momento plástico o momento nominal último es calculado como referente nada más.

En la siguiente figura se muestra una representación gráfica de cómo quedaría la equivalente de esta sección solo en concreto.

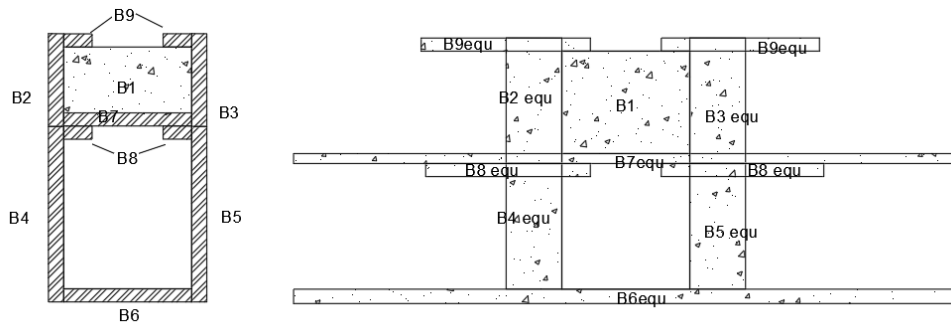


Figura 26. Sección N°2 homogeneizada en concreto.
Fuente. Autor.

El cálculo de los esfuerzos respectivos a la sección propuesta se muestra a continuación.

Tabla 42. Calculo de esfuerzos de la sección N°2.

c1 (cm)	σ Concreto (N/mm ²)	c2 (cm)	σ Acero (N/mm ²)
4,47	29,03	-8,53	532,48

Fuente. Autor.

Se hizo el chequeo de la sección:

Tabla 43. Chequeo de momentos de la Sección N°2.

r	K	J	Centroide inf (cm)	d (cm)	Mc (KN.m)	Ms (KN.m)	Chequeo
13,09	0,42	0,85	5,69	7,30	28,42	10,39	Falla dúctil

Fuente. Autor.

Para este caso se utilizaron las dos tablas mencionadas anteriormente, debido a que la parte superior esta rellena de concreto y la inferior no.

Tabla 44. Chequeo de esbeltez de los elementos Sección N°2.

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

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

Fuente. Autor.

Al igual que en la sección anterior, se realizó un equilibrio de tensiones y se ilustró en las siguientes figuras.

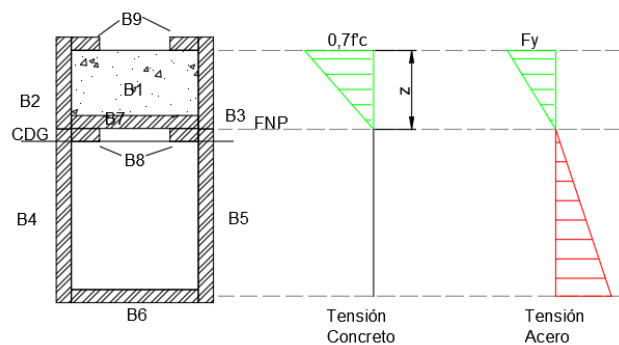


Figura 27. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°2 en el rango elástico.
Fuente. Autor.

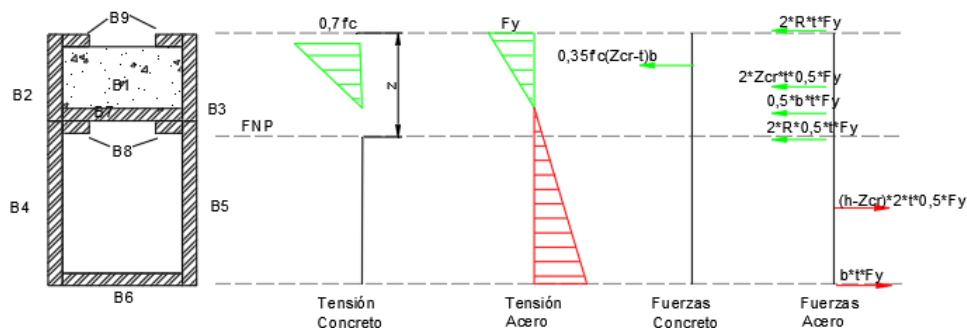


Figura 28. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°2 en el rango plástico.
Fuente. Autor.

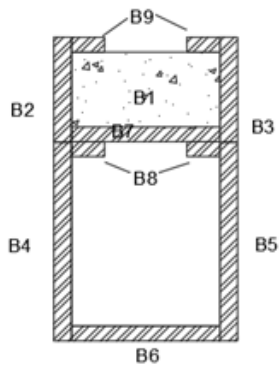
Se calculó el momento cedente " M_y ", la fibra neutra plástica " Z_{cr} " y el momento último resistente de la Sección N°2 " M_n ".

$$Z_{cr} = \frac{0,35f'_c \cdot t \cdot b_1 - 2 \cdot R \cdot t \cdot F_y - 0,5 \cdot b \cdot t \cdot F_y + h \cdot t \cdot F_y + b \cdot t \cdot F_y}{0,35f'_c \cdot b + 2 \cdot t \cdot F_y} \quad (34)$$

Donde:

- Z_{cr} es la fibra neutra plástica de la sección 2.
- R es el ancho de las aletas corta del perfil.

En la siguiente figura se muestra el procedimiento del cálculo del momento cedente y momento plástico de la sección 2.



$$M_y = [0,7 \cdot (F'_c \cdot 100) \cdot b_1 \cdot h_1 \cdot (Z_y - h_1/2 - h_9) + 2 \cdot b_2 \cdot h_2 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (Z_y - h_2/2) \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 2 \cdot b_4 \cdot (Z_y - h_2) \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (Z_y - h_2)/2 + 2 \cdot 0,5 \cdot b_4 \cdot (h - Z_y)^2/2 \cdot (F_y \cdot 100) + b_8 \cdot h_8 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (h_4 + h_2 - Z_y - h_8) + 0,5 \cdot h_7 \cdot b_7 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (Z_y - h_2 + h_7/2) + 2 \cdot 0,5 \cdot h_8 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (Z_y - h_2 - h_8/2) + b_9 \cdot h_9 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (Z_y - h_9)] \cdot 10$$

$$M_p = [0,85 \cdot (F'_c \cdot 100) \cdot b_1 \cdot h_1 \cdot (Z_y - h_1/2 - h_9) + 2 \cdot b_2 \cdot h_2 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (Z_y - h_2/2) + 2 \cdot b_4 \cdot (Z_y - h_2) \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (Z_y - h_2)/2 + 2 \cdot b_4 \cdot (h - Z_y)^2/2 \cdot (F_y \cdot 100) + b_8 \cdot h_8 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (h_4 + h_2 - Z_y - h_8) + h_7 \cdot b_7 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (Z_y - h_2 + h_7/2) + 2 \cdot h_8 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (Z_y - h_2 - h_8/2) + b_9 \cdot h_9 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (Z_y - h_9)] \cdot 10$$

Figura 29. Momento máximo de la Sección N°2.

Fuente. Autor.

Los resultados del momento último resistente de la sección se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 45. Fibra neutra plástica y momento nominal de la Sección N2.

Z_{cr} (cm)	S (cm ³)	$M_y = M_n$ (N*mm)	M_p (N*mm)	ΦM_n (N*mm)
3,35	223,63	6619528,96	9142023,91	5956168,90

Fuente. Autor.

En la siguiente figura se hizo la representación gráfica del comportamiento de los momentos resistentes de la sección.

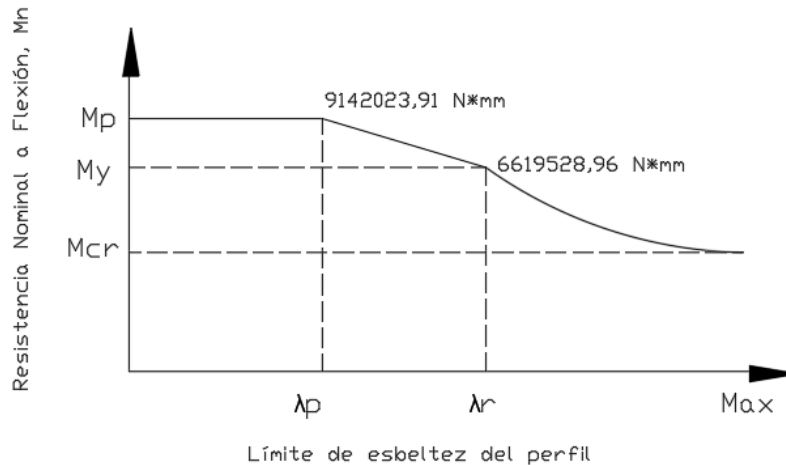


Figura 30. Comportamiento a flexión de la Sección N°2.
Fuente. Autor.

Se calculó el área de acero y el área de concreto en la sección para luego calcular el peso y el precio del miembro, así como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 46. Propiedades finales de la sección N°2.

Acero	Concreto
3,08 cm ²	27,02 cm ³
2,90 kg	7,78 kg
9187,64 \$	540,40 \$

Fuente. Autor.

Se verificó si la deflexión de la viga producida por las cargas cumplía con la establecida en la norma, se tomó como un piso que no soporta elementos no estructurales ($L/360$).

$$\Delta \text{ permitida} = L/360 \quad (35)$$

Donde:

- Δ permitida es la deflexión permitida para la viga compuesta.
- L es la longitud de la viga.

Tabla 47. Chequeo de deflexiones de la viga de acero.

I_x (cm ⁴)	$\delta_{cp + cv}$ (cm)	Δ permitida (cm)	Chequeo
1007,84	0,19	0,33	Si Cumple

Fuente. Autor.

Se calculó la longitud máxima resistente.

$$L \text{ Máx} \quad 216,35 \text{ cm} \quad 2,16 \text{ m}$$

Por último, con la longitud máxima se calculó el ancho efectivo de la sección.

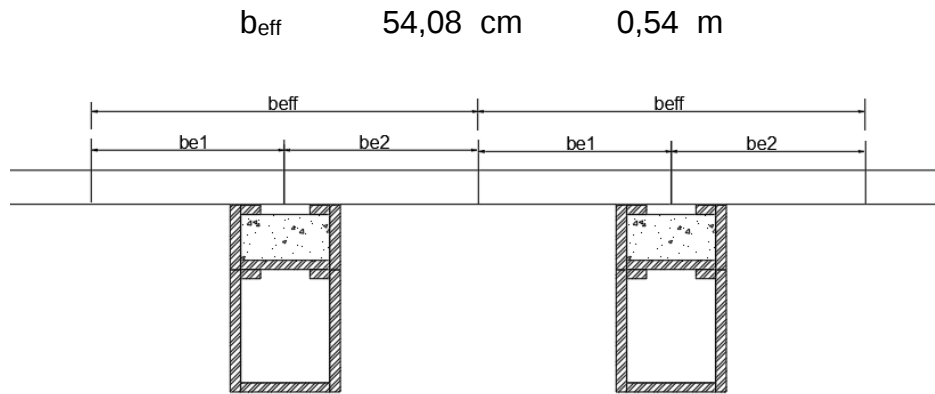


Figura 31. Ancho efectivo de la viga N°2.
Fuente. Autor.

A manera de ejemplo, en la siguiente figura se muestra el uso que tendría el perfil compuesto propuesto en una cubierta.

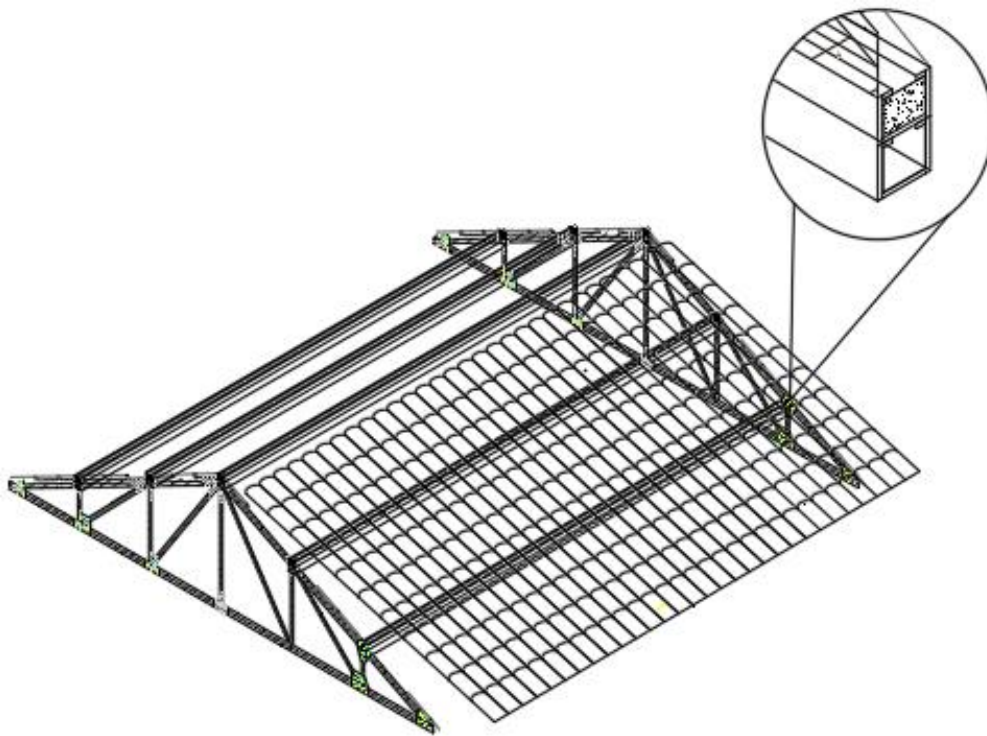


Figura 32. Sección compuesta utilizada en cubiertas.
Fuente. Autor.

11.4. PRE-DIMENSIONAMIENTO SECCIÓN N°3

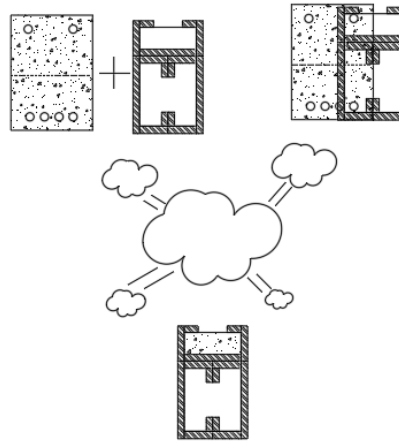


Figura 33. Viga compuesta rellena, Sección N°3.
Fuente. Autor.

Una nueva configuración propuesta para el análisis fue la unión de 2 perfiles perlin o como mejor se les conoce como perfiles C en la parte inferior a tensión y 1 en la parte superior de la misma manera que la sección anterior. En la figura 34 se ilustra dicha descripción.

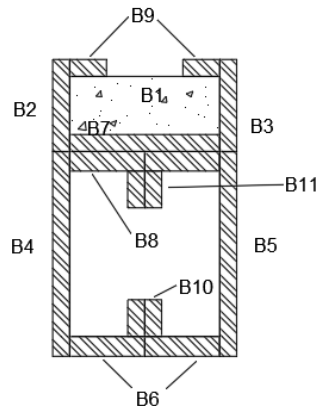


Figura 34. Viga compuesta rellena, Sección N°3.
Fuente. Autor.

En la tabla siguiente al igual que en la sección anterior, se establecieron unas restricciones.

Tabla 48. Restricciones de la sección N°3.

r (cm)	R (cm)	h (cm)	b (cm)
0,60	2,00	10,00	6,00

Fuente. Autor.

Lo siguiente a realizar fue variar las dimensiones geométricas de los elementos racionalmente hasta llegar al momento actuante calculado en la sección principal

para hacer posteriormente el análisis comparativo, los resultados de dichas dimensiones se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 49. Propiedades geométricas sección N°3.

t (cm)	b ₁ (cm)	h ₁ (cm)	b ₂ (cm)	h ₂ (cm)	b ₃ (cm)
0,20	5,60	2,10	0,20	2,50	0,20
h ₃ (cm)	b ₄ (cm)	h ₄ (cm)	b ₅ (cm)	h ₅ (cm)	b ₆ (cm)
2,50	0,20	7,50	0,20	7,50	5,60
h ₆ (cm)	b ₇ (cm)	h ₇ (cm)	b ₈ (cm)	h ₈ (cm)	b ₉ (cm)
0,20	5,60	0,20	5,60	0,20	2,00
h ₉ (cm)	b ₁₀ (cm)	h ₁₀ (cm)	b ₁₁ (cm)	h ₁₁ (cm)	-
0,20	0,20	1,00	0,20	1,00	-

Fuente. Autor.

Seguidamente se hizo el cálculo de los anchos equivalentes en concreto.

Tabla 50. Propiedades geométricas equivalentes de la sección N°3.

y (cm)	b ₂ equ (cm)	b ₃ equ (cm)	b ₄ equ (cm)	b ₅ equ (cm)	b ₆ equ (cm)
4,61	1,92	1,92	1,92	1,92	53,74
b ₇ equ (cm)	b ₈ equ (cm)	b ₉ equ (cm)	b ₁₀ equ (cm)	b ₁₁ equ (cm)	-
53,74	53,74	19,19	1,92	1,92	-
I ₁ (cm ⁴)	I ₂ (cm ⁴)	I ₃ (cm ⁴)	I ₄ (cm ⁴)	I ₅ (cm ⁴)	I ₆ (cm ⁴)
205,65	84,65	84,65	78,18	78,18	218,89
I ₇ (cm ⁴)	I ₈ (cm ⁴)	I ₉ (cm ⁴)	I ₁₀ (cm ⁴)	I ₁₁ (cm ⁴)	I Total (cm ⁴)
95,98	83,56	214,68	92,95	22,20	1259,59

Fuente. Autor.

Al igual que en las secciones anteriores en la siguiente figura se muestra una representación gráfica de cómo quedaría la equivalente de esta sección solo en concreto.

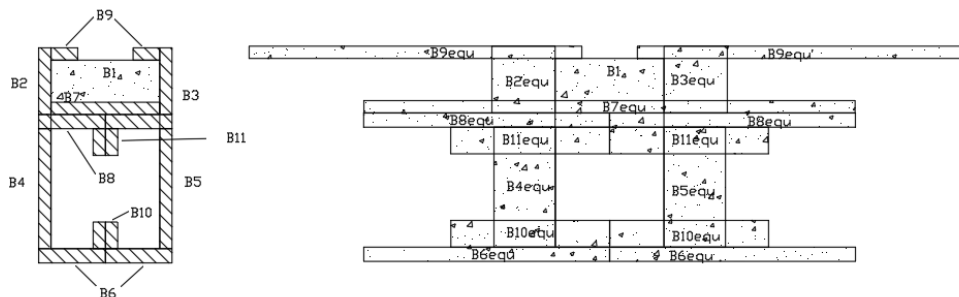


Figura 35. Sección N°3 homogeneizada en concreto.

Fuente. Autor.

Los esfuerzos a los que está sometida la sección calculada anteriormente se muestran a continuación.

Tabla 51. Calculo de esfuerzos de la sección N°3.

c1 (cm)	6 Concreto (N/mm ²)	c2 (cm)	6 Acero (N/mm ²)
5,39	28,02	-4,61	230,25

Fuente. Autor.

Chequeo de la sección:

Tabla 52. Chequeo de momentos de la Sección N°3.

r	K	J	Centroide inf (cm)	d (cm)	Mc (KN.m)	Ms (KN.m)	Chequeo
13,09	0,42	0,85	1,32	8,68	38,39	15,39	Falla dúctil

Fuente. Autor.

Al igual que en el caso anterior se utilizan las dos tablas mencionadas para la evaluación de esbeltez, debido a que la parte superior esta rellena de concreto y la inferior no.

Tabla 53. Chequeo de esbeltez de los elementos Sección N°3.

Miembros no rigidizados (almas sup)				Miembros rigidizados (almas inf)			
Λ_f	12,50			λ_w	37,50		
λ_{Pf}	82,90			λ_{Pw}	66,32		
Λ_{rf}	157,51			λ_{rw}	157,51		
Máx	157,51			Máx	157,51		
Chequeo	Compacta			Chequeo	Compacta		
Miembros rigidizados (alas sup)				Miembros rigidizados (alas inf)			
Λ_f	28,00			λ_w	14,00		
λ_{Pf}	62,32			λ_{Pw}	30,95		
Λ_{rf}	89,902			λ_{rw}	38,68		
Máx	89,902			Máx	38,68		
Chequeo	Compacta			Chequeo	Compacta		

Fuente. Autor.

Se ilustró el equilibrio de tensiones en la siguiente figura.

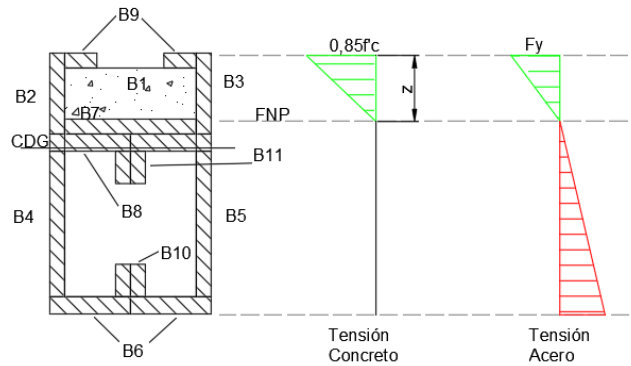


Figura 36. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°3 en el rango elástico.
Fuente. Autor.

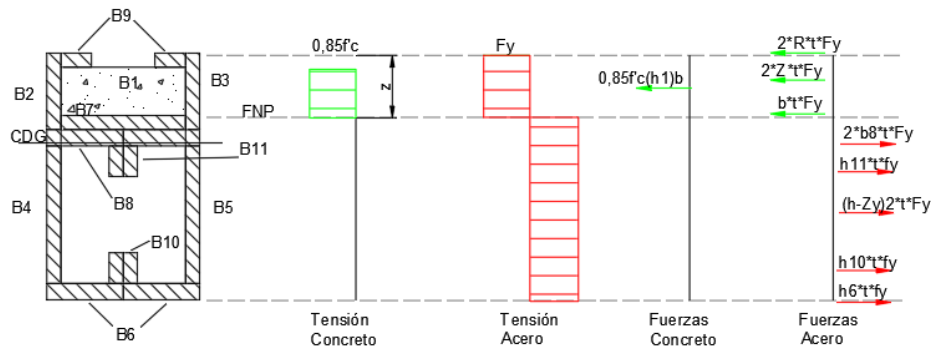


Figura 37. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°3 en el rango plástico.
Fuente. Autor.

Se calculó el momento cedente “My”, la fibra neutra plástica “Zy” y el momento último resistente de la Sección N°3 “Mn”.

$$Z = \frac{-0,85f'_c \cdot b_1 \cdot h_1 - 2R \cdot t \cdot F_y - h_{11} \cdot t \cdot F_y + 2h \cdot t \cdot F_y + h_{10} \cdot t \cdot F_y + h_6 \cdot t \cdot F_y - b \cdot t \cdot F_y}{4 \cdot t \cdot F_y} \quad (36)$$

Donde:

- Z es la fibra neutra plástica de la sección 3.
- R es el ancho de las aletas corta del perfil.

En la siguiente figura se muestra el procedimiento del cálculo del momento cedente y momento plástico de la sección 3.

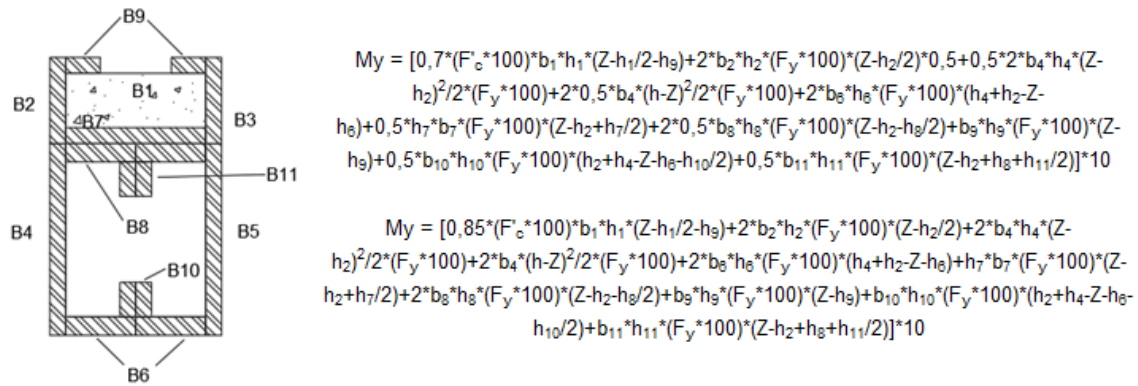


Figura 38. Momento máximo de la Sección N°3.

Fuente. Autor.

Los cálculos de los esfuerzos de la aleta en compresión y la aleta en tensión se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 54. Fibra neutra plástica y momento nominal de la Sección N°3.

Z (cm)	S (cm ³)	My (N*mm)	Mp = Mn (N*mm)	ΦMn (N*mm)
3,56	223,1	6998672,7	8760815,6	7884734,02

Fuente. Autor.

Al igual que en la sección anterior en la siguiente figura se hizo la representación gráfica del comportamiento de los momentos resistentes.

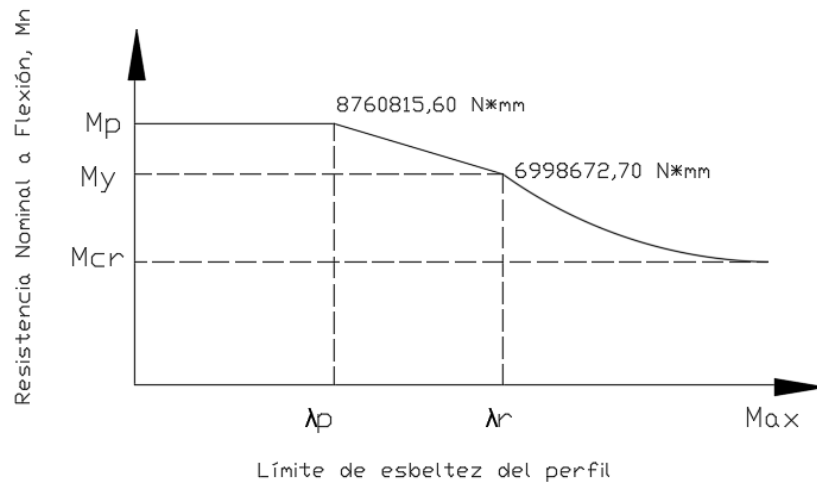


Figura 39. Comportamiento a flexión de la Sección N°3.

Fuente. Autor.

Se calculó el área de acero y el área de concreto en la sección para luego calcular el peso y el precio del miembro, así como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 55. Propiedades finales de la sección N°3.

Acero	Concreto
8,16 cm ²	11,76 cm ³
7,68 kg	3,38 kg
24341,28 \$	329,28 \$

Fuente. Autor.

Se verificó si la deflexión de la viga producida por las cargas cumplía con la establecida en la norma, se tomó como un piso que no soporta elementos no estructurales (L/360).

$$\Delta \text{ permitida} = L/360 \quad (37)$$

Donde:

- Δ permitida es la deflexión permitida para la viga compuesta.
- L es la longitud de la viga.

Tabla 56. Chequeo de deflexiones de la viga de acero.

I_x (cm ⁴)	$\delta_{cp + cv}$ (cm)	Δ permitida (cm)	Chequeo
1259,59	0,03	0,33	Si Cumple

Fuente. Autor.

Se calculó la longitud máxima resistente.

$$L \text{ Máx} \quad 236,58 \text{ cm} \quad 2,36 \text{ m}$$

Por último, con la longitud máxima se calculó el ancho efectivo de la sección.

$$b_{eff} \quad 59,14 \text{ cm} \quad 0,59 \text{ m}$$

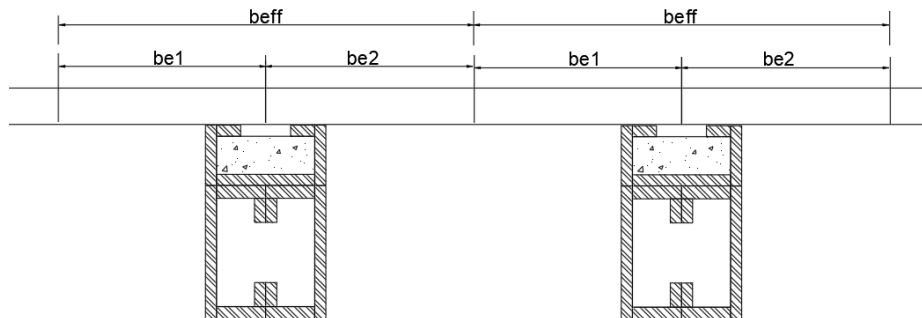


Figura 40. Ancho efectivo de la viga N°3.

Fuente. Autor.

11.5. PRE-DIMENSIONAMIENTO SECCIÓN N°4

Observando el comportamiento de las secciones anteriores y concluyendo que las fibras más lejanas son las que más aportan inercia con respecto al eje x, se propuso una nueva configuración para comprobar si satisface dichas conclusiones.

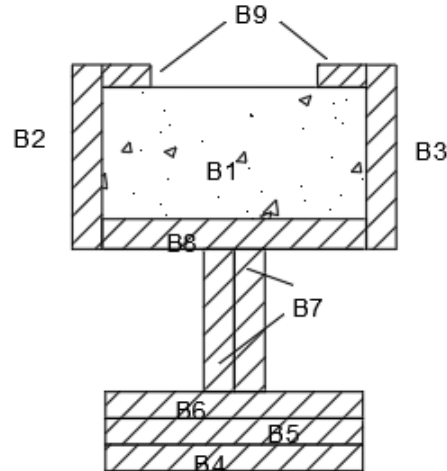


Figura 41. Viga compuesta rellena, Sección N°4.
Fuente. Autor.

Se siguen manteniendo las mismas restricciones que para las secciones anteriores.

Tabla 57. Restricciones de la sección N°4.

r (cm)	R (cm)	h (cm)	b (cm)
0,50	5,00	36,00	18,00

Fuente. Autor.

En la siguiente figura se ilustraron las dimensiones obtenidas para esta sección.

. Tabla 58. Propiedades geométricas sección N°4.

t (cm)	b ₁ (cm)	h ₁ (cm)	b ₂ (cm)	h ₂ (cm)	b ₃ (cm)
0,14	17,71	6,50	0,14	6,17	0,14
h ₃ (cm)	b ₄ (cm)	h ₄ (cm)	b ₅ (cm)	h ₅ (cm)	b ₆ (cm)
6,17	17,71	0,14	17,71	0,14	17,71
h ₆ (cm)	b ₇ (cm)	h ₇ (cm)	b ₈ (cm)	h ₈ (cm)	b ₉ (cm)
0,14	0,14	28,77	17,71	0,14	5,00
h ₉ (cm)	-	-	-	-	-
0,14	-	-	-	-	-

Fuente. Autor.

Seguidamente se hizo el cálculo de los anchos equivalentes todo en concreto.

Tabla 59. Propiedades geométricas equivalentes de la sección N°4.

y (cm)	b ₂ equ (cm)	b ₃ equ (cm)	b ₄ equ (cm)	b ₅ equ (cm)
--------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------

29,48	1,39	1,39	169,96	169,96
b₆ equ (cm)	b₇ equ (cm)	b₈ equ (cm)	b₉ equ (cm)	-
169,96	1,39	169,96	47,98	-
I₁ (cm⁴)	I₂ (cm⁴)	I₃ (cm⁴)	I₄ (cm⁴)	I₅ (cm⁴)
1524,57	119,83	119,83	21322,48	21112,78
I₆ (cm⁴)	I₇ (cm⁴)	I₈ (cm⁴)	I₉ (cm⁴)	I Total (cm⁴)
20904,11	14136,53	1,07	577,28	79818,46

Fuente. Autor.

La representación gráfica de cómo quedaría la equivalente de esta sección solo en concreto se muestra en la siguiente figura.

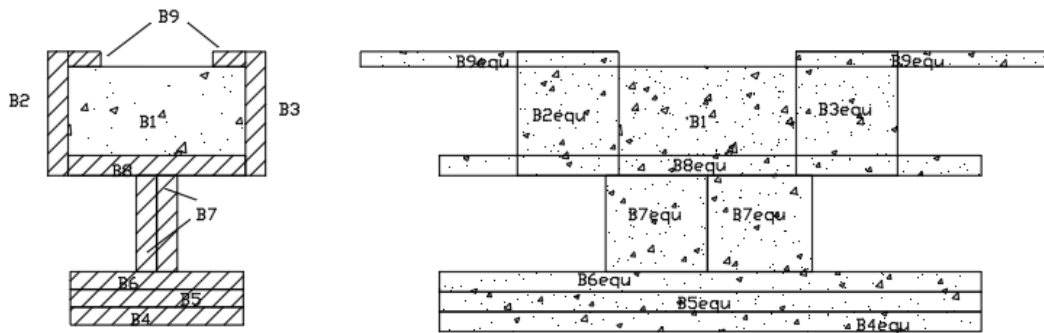


Figura 42. Sección N°4 homogeneizada en concreto.

Fuente. Autor.

Los esfuerzos a los que están sometidas las geometrías calculadas anteriormente se muestran a continuación.

Tabla 60. Calculo de esfuerzos de la sección N°3.

c1 (cm)	σ Concreto (N/mm²)	c2 (cm)	σ Acero (N/mm²)
6,51	0,53	-29,49	23,22

Fuente. Autor.

Se hizo el chequeo de la sección.

Tabla 61. Chequeo de momentos de la Sección N°4.

r	K	J	Centroide inf (cm)	d (cm)	Mc (KN.m)	Ms (KN.m)	Chequeo
13,09	0,42	0,85	1,64	34,36	11,46	15,10	Falla Frágil

Fuente. Autor.

Al igual que en el caso anterior se utilizaron las dos tablas mencionadas para la evaluación de esbeltez, debido a que la parte superior esta rellena de concreto y la inferior no.

Tabla 62. Chequeo de esbeltez de los elementos Sección N°4.

Miembros no rigidizados (almas sup)	Miembros no rigidizados (almas inf)
--	--

Λ_f	46,82	λ_w	198,44
Λ_{Pf}	82,90	Λ_{Pw}	66,32
Λ_{rf}	157,51	λ_{rw}	157,51
Máx	157,51	Máx	157,51
Chequeo	Compacta	Chequeo	Esbelta

Miembros rigidizados (ala sup)		Miembros rigidizados (alas inf)	
Λ_f	122,13	λ_w	122,13
Λ_{Pf}	62,32	Λ_{Pw}	62,32
Λ_{rf}	82,90	λ_{rw}	38,68
Máx	82,90	Máx	38,68
Chequeo	Esbelta	Chequeo	Esbelta

Fuente. Autor.

En las siguientes figuras se ilustró el equilibrio de tensiones de la sección, en estas se evidencia que el momento máximo resistente será limitado por el esfuerzo de fluencia de la aleta en tensión y al esfuerzo de pandeo local F_{cr} en la aleta en compresión.

$$F_{cr} = \frac{9Es}{\frac{b^2}{t}} \quad (38)$$

Donde:

- F_{cr} es el esfuerzo resistente de la aleta más lejana a compresión.
- E_s es el módulo de elasticidad del acero.
- b/t es la relación de esbeltez de la aleta.

$$F_{cr} = 1558,69 \text{ N/mm}^2$$

Se ilustró el equilibrio de tensiones en la siguiente figura.

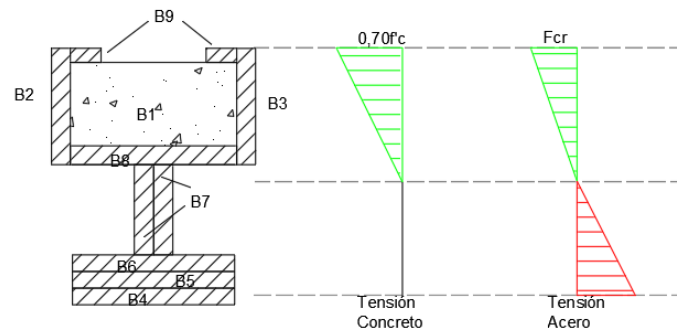


Figura 43. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°4 en el rango elástico.
Fuente. Autor.

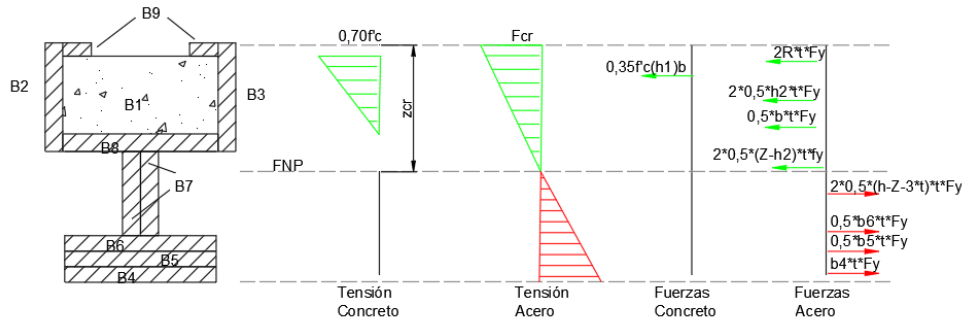


Figura 44. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°4 en el rango plástico.

Fuente. Autor.

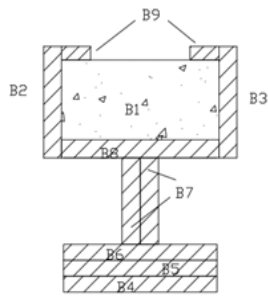
Se calculó el momento cedente “My” y la fibra neutra plástica “Zcr”.

$$Z_{cr} = \frac{-0,35f'_c \cdot b_1 \cdot h_1 - 2R \cdot t \cdot F_y - 0,5 \cdot b \cdot t \cdot F_y + 2 \cdot 0,5 \cdot b_5 \cdot t \cdot F_y + b_5 \cdot t \cdot F_y + 2 \cdot 0,5 \cdot h \cdot t \cdot F_y - 6 \cdot 0,5 \cdot t^2 \cdot F_y}{4 \cdot 0,5 \cdot t \cdot F_y} \quad (39)$$

Donde:

- Zcr es la fibra neutra plástica de la sección 4.
- R es el ancho de las aletas corta del perfil.

En la siguiente figura se muestra el procedimiento del cálculo del momento cedente y momento plástico de la sección 4.



$$My = [0,7 \cdot (F'_c \cdot 100) \cdot b_1 \cdot h_1 \cdot (Z - h_1/2 - h_9) + 2 \cdot b_2 \cdot h_2 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (Z - h_2/2) + 0,5 \cdot b_4 \cdot h_4 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (h - Z - h_4/2) + 0,5 \cdot b_5 \cdot h_5 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (h - Z - h_4 - h_5/2) + b_6 \cdot h_6 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (h - Z - h_4 - h_5 - h_6/2) + b_7 \cdot h_7 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (Z - h_2)/2 + 2 \cdot 0,5 \cdot b_7 \cdot h_7 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (h - Z - h_4 - h_5 - h_6)/2 + b_8 \cdot h_8 \cdot 0,5 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (Z - h_2 + h_8/2) + b_9 \cdot h_9 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (Z - h_9/2)] \cdot 10$$

$$Mp = [0,85 \cdot (F'_c \cdot 100) \cdot b_1 \cdot h_1 \cdot (Z - h_1/2 - h_9) + 2 \cdot b_2 \cdot h_2 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (Z - h_2/2) + b_4 \cdot h_4 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (h - Z - h_4/2) + b_5 \cdot h_5 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (h - Z - h_4 - h_5/2) + b_6 \cdot h_6 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (h - Z - h_4 - h_5 - h_6/2) + b_7 \cdot h_7 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (Z - h_2)/2 + 2 \cdot b_7 \cdot h_7 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (h - Z - h_4 - h_5 - h_6)/2 + b_8 \cdot h_8 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (Z - h_2 + h_8/2) + b_9 \cdot h_9 \cdot (F_y \cdot 100) \cdot (Z - h_9/2)] \cdot 10$$

Figura 45. Momento máximo de la Sección N°4.

Fuente. Autor.

Los resultados del cálculo del momento máximo resistente de la aleta en tensión se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 63. Fibra neutra plástica y momento nominal de la Sección N°4.

Zcr (cm)	S (cm³)	My=Mn (N*mm)	Mp (N*mm)	ΦMn (N*mm)
15,45	12254,91	6654619,10	8405707,20	5899157,10

Fuente. Autor.

Al igual que en la sección anterior en la siguiente figura se hizo la representación gráfica del comportamiento de los momentos resistentes.

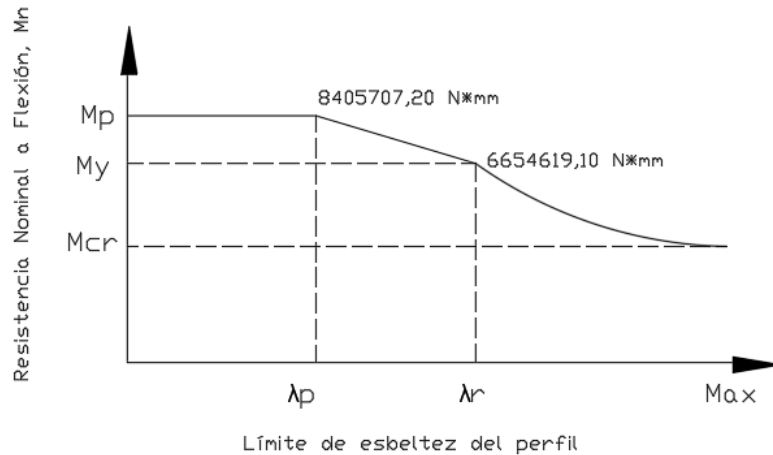


Figura 46. Comportamiento a flexión de la Sección N°4.
Fuente. Autor.

Se calculó el área de acero y el área de concreto en la sección para luego calcular el peso y el precio del miembro, así como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 64. Propiedades finales de la sección N°4.

Acero	Concreto
22,03 cm ²	115,14 cm ³
20,75 kg	33,15 kg
65715,49 \$	3223,22 \$

Fuente. Autor.

Se verificó si la deflexión de la viga producida por las cargas cumplía con la establecida en la norma, se tomó como un piso que no soporta elementos no estructurales ($L/360$).

$$\Delta \text{ permitida} = L/360 \quad (40)$$

Donde:

- Δ permitida es la deflexión permitida para la viga compuesta.
- L es la longitud de la viga.

Tabla 65. Chequeo de deflexiones de la viga de acero.

I_x (cm ⁴)	$\delta_{cp} + cv$ (cm)	Δ permitida (cm)	Chequeo
79818,46	0,0004	0,33	Si Cumple

Fuente. Autor.

Se calculó la longitud máxima resistente.

L Máx 646,33 cm 6,46 m

Por último, con la longitud máxima se calculó el ancho efectivo de la sección.

b_{eff} 161,58 cm 1,61 m

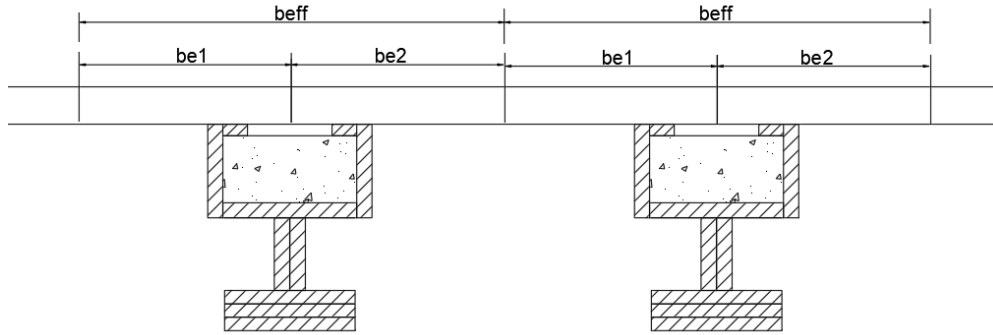


Figura 47. Ancho efectivo de la viga N°4.
Fuente. Autor.

11.6. PRE-DIMENSIONAMIENTO SECCIÓN N°5

Un punto de partida utilizado en el presente proyecto para el planteamiento de los perfiles estudiados es el ya existente perfil vigacero, el cual es conocido por su amplio recorrido en el mercado para el diseño de cubiertas o de placas aligeradas. Por esta razón se extrapolo la geometría del mismo para tomarlo como comparación en el proyecto, hay que tener en cuenta que los perfiles del vigacero tienen unas medidas estándar y especificaciones resumen en función de su longitud libre entre apoyos que no serán tomadas en cuenta, solo se tendrá en cuenta la forma del perfil y se variaran sus dimensiones para llegar a los esfuerzos propuestos en el presente documento.

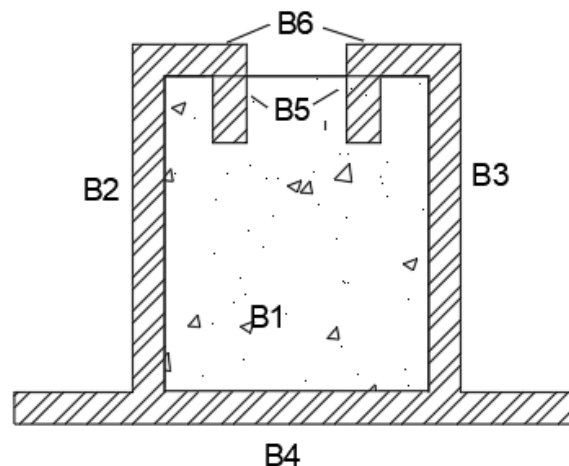


Figura 48. Viga compuesta rellena, Sección N°5.
Fuente. Dibujo propio, pero referenciado del perfil vigacero.

En la tabla siguiente al igual que en la sección anterior, se establecieron unas restricciones.

Tabla 66. Restricciones de la sección N°5.

r (cm)	R (cm)	h (cm)	b (cm)
0,60	4,00	31,00	18,60

Fuente. Autor.

Lo siguiente a realizar fue variar las dimensiones geométricas de los elementos racionalmente hasta llegar al momento actuante calculado en la sección principal para hacer posteriormente el análisis comparativo, los resultados de dichas dimensiones se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 67. Propiedades geométricas sección N°5.

t (cm)	b ₁ (cm)	h ₁ (cm)	b ₂ (cm)	h ₂ (cm)
0,20	18,20	30,60	0,20	31,00
b ₃ (cm)	h ₃ (cm)	b ₄ (cm)	h ₄ (cm)	b ₅ (cm)
0,20	31,00	27,30	0,20	0,2
h ₅ (cm)	b ₆ (cm)	h ₆ (cm)	-	-
4,00	4,00	0,20	-	-

Fuente. Autor.

Seguidamente se hizo el cálculo de los anchos equivalentes en concreto.

Tabla 68. Propiedades geométricas equivalentes de la sección N°5.

y (cm)	b ₂ equ (cm)	b ₃ equ (cm)	b ₄ equ (cm)
15,24	1,92	1,92	262,00
b ₅ equ (cm)	b ₆ equ (cm)	-	-
1,92	38,39	-	-
I ₁ (cm ⁴)	I ₂ (cm ⁴)	I ₃ (cm ⁴)	I ₄ (cm ⁴)
22729,27	4776,13	4776,13	12056,75
I ₅ (cm ⁴)	I ₆ (cm ⁴)	I Total (cm ⁴)	-
2832,24	3752,03	50922,54	-

Fuente. Autor.

Al igual que en las secciones anteriores en la siguiente figura se muestra una representación gráfica de cómo quedaría la equivalente de esta sección solo en concreto.

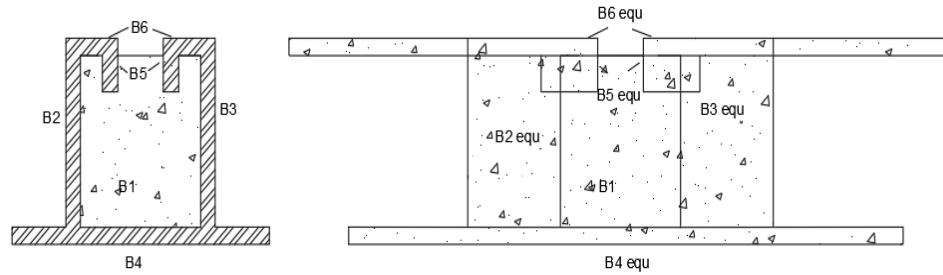


Figura 49. Sección N°5 homogeneizada en concreto.
Fuente. Autor.

Los esfuerzos a los que está sometida la sección calculada anteriormente se muestran a continuación.

Tabla 69. Calculo de esfuerzos de la sección N°5.

c1 (cm)	σ Concreto (N/mm ²)	c2 (cm)	σ Acero (N/mm ²)
15,73	2,02	-15,25	18,85

Fuente. Autor.

Se hizo el chequeo de la sección.

Tabla 70. Chequeo de momentos de la Sección N°5.

r	K	J	Centroide inf (cm)	d (cm)	Mc (KN.m)	Ms (KN.m)	Chequeo
13,09	0,42	0,85	4,05	26,95	26,69	9,19	Falla dúctil

Fuente. Autor.

Al igual que en el caso anterior se utilizan las dos tablas mencionadas para la evaluación de esbeltez, debido a que la parte superior esta rellena de concreto y la inferior no.

Tabla 71. Chequeo de esbeltez de los elementos Sección N°5.

Miembros no rigidizados (almas)		Miembros no rigidizados (almas pestaña)	
λ_f	155,00	λ_w	20,00
λ_{Pf}	82,90	λ_{Pw}	66,32
λ_{rf}	157,51	λ_{rw}	157,51
Máx	157,51	Máx	157,51
Chequeo	No Compacta	Chequeo	Compacta
Miembros rigidizados (alas pestaña)		Miembros rigidizados (ala)	
λ_f	15,00	λ_w	136,50
λ_{Pf}	62,45	λ_{Pw}	62,45
λ_{rf}	82,90	λ_{rw}	82,90
Máx	138,17	Máx	138,17
Chequeo	Compacta	Chequeo	No Compacta

Fuente. Autor.

Se ilustra el equilibrio de tensiones.

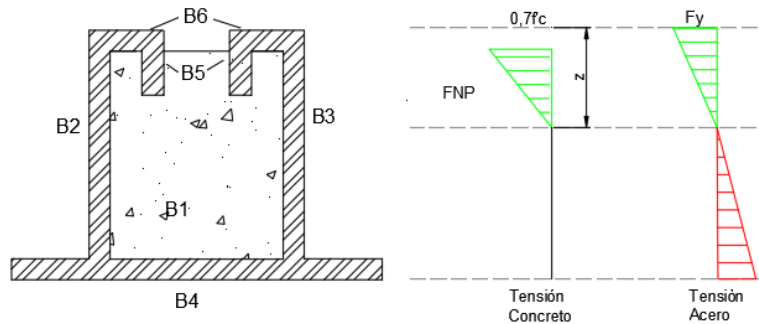


Figura 50. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°5 en el rango elástico.
Fuente. Autor.

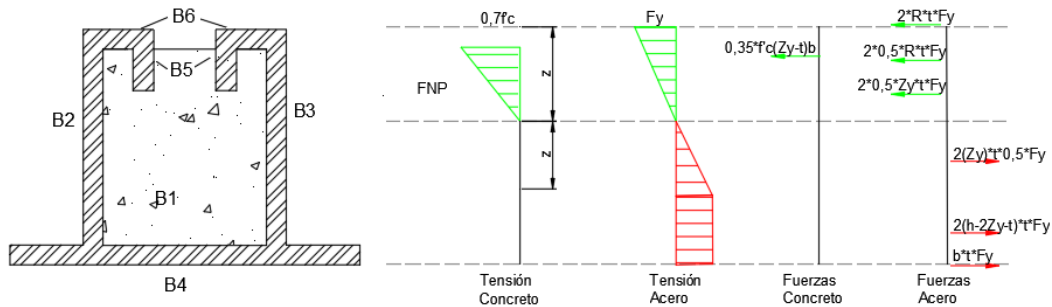


Figura 51. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°5 en el rango plástico.
Fuente. Autor.

Se calculó el momento cedente “My”, la fibra neutra plástica “Zy” y el momento último resistente de la Sección N°5 “Mn”.

$$Z_y = \frac{-0,35f'_c \cdot b \cdot t \cdot 3R \cdot t \cdot F_y + 2h \cdot t \cdot F_y - 2 \cdot t^2 \cdot F_y + b \cdot t \cdot F_y}{0,35f'_c \cdot b + 4 \cdot t \cdot F_y} \quad (41)$$

Donde:

- Zy es la fibra neutra plástica de la sección 5.
- R es el ancho de las aletas corta del perfil.

En la siguiente figura se muestra el procedimiento del cálculo del momento cedente y momento plástico de la sección 5.

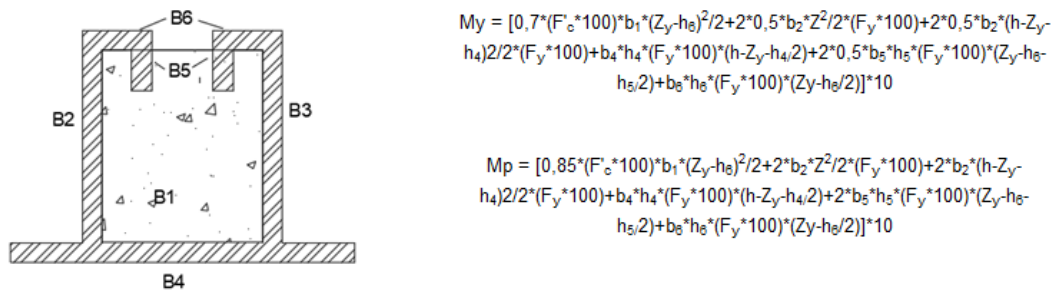


Figura 52. Momento máximo de la Sección N°5.
Fuente. Autor.

Los cálculos de los esfuerzos de la aleta en compresión y la aleta en tensión se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 72. Fibra neutra plástica y momento nominal de la Sección N°5.

Zy (cm)	S (cm ³)	My (N*mm)	Mp (N*mm)	Mn (N*mm)	ΦMn (N*mm)
10,52	3236,96	6652203,02	8980492,50	6730642,10	6057577,85

Fuente. Autor.

Al igual que en la sección anterior en la siguiente figura se hizo la representación gráfica del comportamiento de los momentos resistentes.

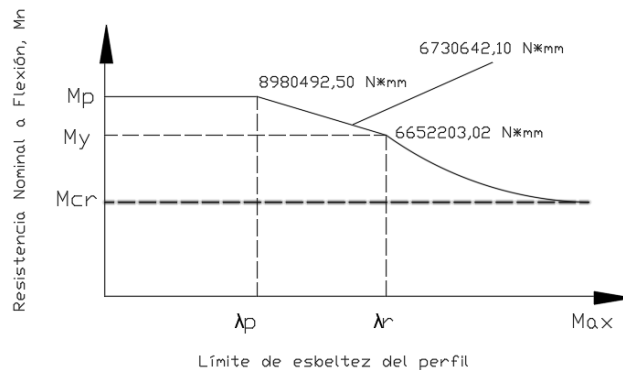


Figura 53. Comportamiento a flexión de la Sección N°5.
Fuente. Autor.

Se calculó el área de acero y el área de concreto en la sección para luego calcular el peso y el precio del miembro, así como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 73. Propiedades finales de la sección N°5.

Acero	Concreto
21,06 cm ²	556,92 cm ³
19,83 kg	187,12 kg
62821,98 \$	15593,76 \$

Fuente. Autor.

Se verificó si la deflexión de la viga producida por las cargas cumplía con la establecida en la norma, se tomó como un piso que no soporta elementos no estructurales ($L/360$).

$$\Delta \text{ permitida} = L/360 \quad (42)$$

Donde:

- Δ permitida es la deflexión permitida para la viga compuesta.
- L es la longitud de la viga.

Tabla 74. Chequeo de deflexiones de la viga de acero.

$I_x \text{ (cm}^4\text{)}$	$\delta_{cp} + cv \text{ (cm)}$	$\Delta \text{ permitida (cm)}$	Chequeo
20922,53	0,0006	0,33	Si Cumple

Fuente. Autor.

Se calculó la longitud máxima resistente.

$$L \text{ Máx} \quad 578,16 \text{ cm} \quad 5,78 \text{ m}$$

Por último, con la longitud máxima se calculó el ancho efectivo de la sección.

$$b_{\text{eff}} \quad 144,54 \text{ cm} \quad 1,44 \text{ m}$$

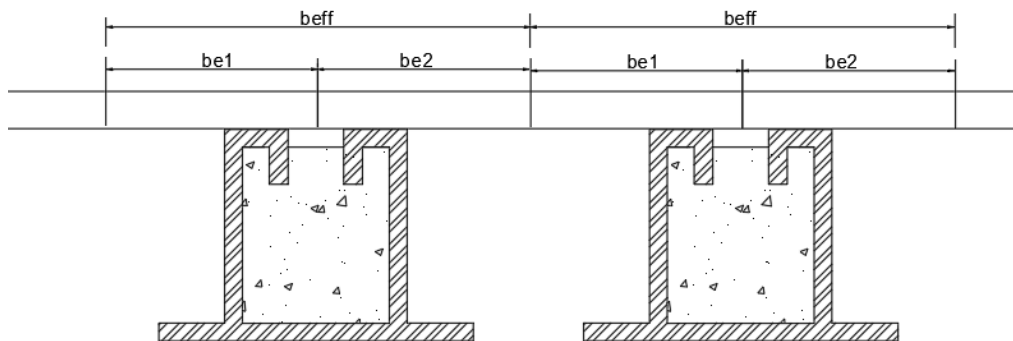


Figura 54. Ancho efectivo de la viga N°5.

Fuente. Autor.

11.7. PRE-DIMENSIONAMIENTO SECCIÓN N°6

Para dar más facilidad al armado de los perfiles y teniendo en cuenta el excelente trabajo de los perfiles tubulares a flexión, se planteó una nueva configuración que supliera dichas solicitudes.

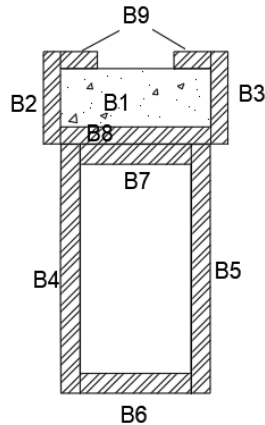


Figura 55. Viga compuesta rellena, Sección N°6.
Fuente. Autor.

En la tabla siguiente al igual que en la sección anterior, se establecieron unas restricciones.

Tabla 75. Restricciones de la sección N°6.

r (cm)	R (cm)	h (cm)	b (cm)
0,60	1,00	15,00	9,00

Fuente. Autor.

Lo siguiente a realizar fue variar las dimensiones geométricas de los elementos racionalmente hasta llegar al momento actuante calculado en la sección principal para hacer posteriormente el análisis comparativo, los resultados de dichas dimensiones se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 76. Propiedades geométricas sección N°6.

t (cm)	b ₁ (cm)	h ₁ (cm)	b ₂ (cm)	h ₂ (cm)
0,09	9,00	2,00	0,09	2,18
b ₃ (cm)	h ₃ (cm)	b ₄ (cm)	h ₄ (cm)	b ₅ (cm)
0,09	2,18	0,09	12,82	0,09
h ₅ (cm)	b ₆ (cm)	h ₆ (cm)	b ₇ (cm)	h ₇ (cm)
12,82	8,82	0,09	8,82	0,09
b ₈ (cm)	h ₈ (cm)	b ₉ (cm)	h ₉ (cm)	-
9,00	0,09	1,00	0,09	-

Fuente. Autor.

Seguidamente se hizo el cálculo de los anchos equivalentes en concreto.

Tabla 77. Propiedades geométricas equivalentes de la sección N°6.

y (cm)	b ₂ equ (cm)	b ₃ equ (cm)	b ₄ equ (cm)	b ₅ equ (cm)
12,62	0,86	0,86	0,86	0,85
b ₆ equ (cm)	b ₇ equ (cm)	b ₈ equ (cm)	b ₉ equ (cm)	-

86,64	86,64	86,37	9,60	-
I₁ (cm⁴)	I₂ (cm⁴)	I₃ (cm⁴)	I₄ (cm⁴)	I₅ (cm⁴)
13,41	3,85	3,85	579,55	579,55
I₆ (cm⁴)	I₇ (cm⁴)	I₈ (cm⁴)	I₉ (cm⁴)	I Total (cm⁴)
1205,87	0,17	0,45	4,68	2391,38

Fuente. Autor.

Al igual que en las secciones anteriores en la siguiente figura se muestra una representación gráfica de cómo quedaría la equivalente de esta sección solo en concreto.

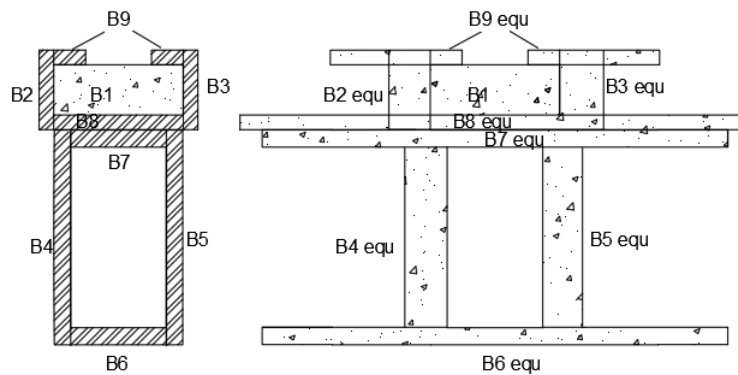


Figura 56. Sección N°6 homogeneizada en concreto.

Fuente. Autor.

Los esfuerzos a los que está sometida la sección calculada anteriormente se muestran a continuación.

Tabla 78. Calculo de esfuerzos de la sección N°6.

c1 (cm)	σ Concreto (N/mm²)	c2 (cm)	σ Acero (N/mm²)
2,37	6,50	-12,63	331,99

Fuente. Autor.

Chequeo de la sección:

Tabla 79. Chequeo de momentos de la Sección N°6.

r	K	J	Centroide inf (cm)	d (cm)	Mc (KN.m)	Ms (KN.m)	Chequeo
13,09	0,42	0,85	4,69	10,31	12,55	15,51	Falla Frágil

Fuente. Autor.

Al igual que en el caso anterior se utilizan las dos tablas mencionadas para la evaluación de esbeltez, debido a que la parte superior esta rellena de concreto y la inferior no.

Tabla 80. Chequeo de esbeltez de los elementos Sección N°6.

Miembros no rigidizados (almas)		Miembros no rigidizados (almas pestaña)	
λ_f	24,22	λ_w	142,44
λ_{Pf}	82,90	λ_{Pw}	66,32
λ_{rf}	157,51	λ_{rw}	157,51
Máx	157,51	Máx	157,51
Chequeo	Compacta	Chequeo	No Compacta

Miembros rigidizados (alas pestaña)		Miembros rigidizados (ala)	
λ_f	100,00	λ_w	98,00
λ_{Pf}	62,45	λ_{Pw}	30,95
λ_{rf}	82,90	λ_{rw}	38,68
Máx	138,17	Máx	138,17
Chequeo	Esbelta	Chequeo	Esbelta

Fuente. Autor.

Se ilustra el equilibrio de tensiones.

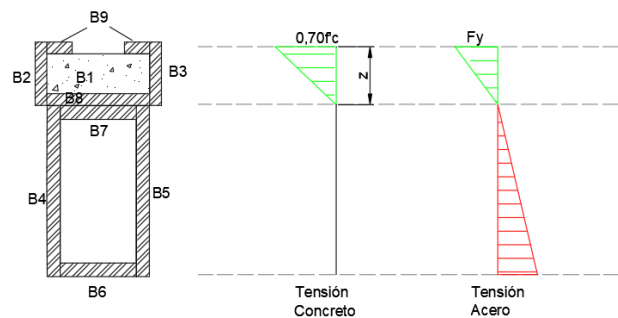


Figura 57. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°6 en el rango elástico.
Fuente. Autor.

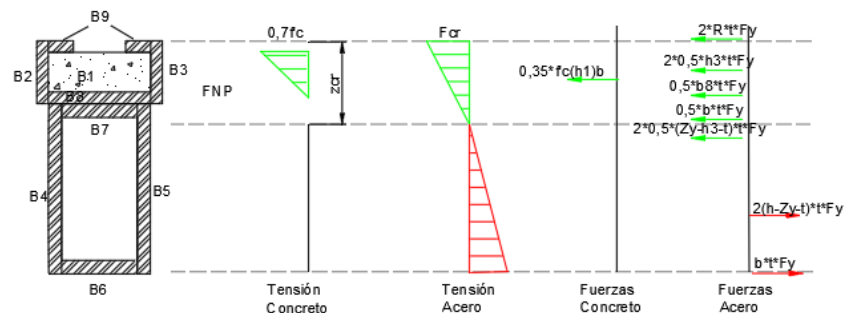


Figura 58. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°6 en el rango plástico.
Fuente. Autor.

Se calculó el momento cedente “My”, la fibra neutra plástica “Zcr” y el momento último resistente de la Sección N°6 “Mn”.

$$Z_{cr} = \frac{-0,35f'_c \cdot b_1 \cdot h_1 - 2 \cdot R \cdot t \cdot F_y - h_3 \cdot t \cdot F_y - b_8 \cdot t \cdot F_y \cdot 0,5 - b_7 \cdot t \cdot F_y \cdot 0,5 + h_3 \cdot t \cdot F_y + 2h \cdot t \cdot F_y - t^2 \cdot F_y + b_6 \cdot t \cdot F_y}{5 \cdot t \cdot F_y} \quad (43)$$

Donde:

- Zcr es la fibra neutra plástica de la sección 6.
- R es el ancho de las aletas corta del perfil.

En la siguiente figura se muestra el procedimiento del cálculo del momento cedente y momento plástico de la sección 6.

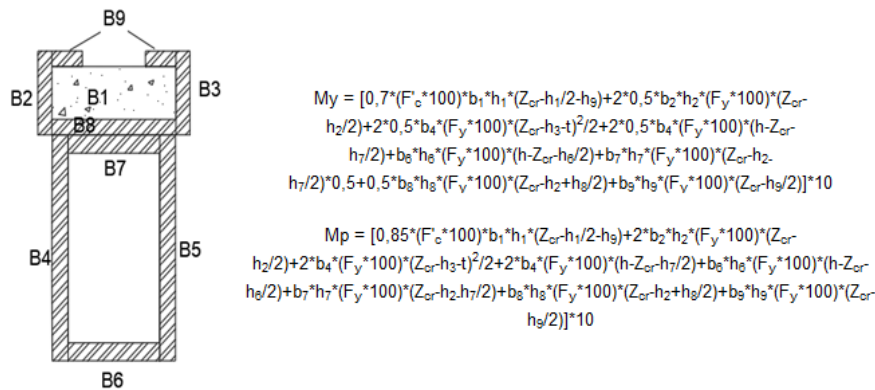


Figura 59. Momento máximo de la Sección N°6.

Fuente. Autor.

Los cálculos de los esfuerzos de la aleta en compresión y la aleta en tensión se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 81. Fibra neutra plástica y momento nominal de la Sección N°6.

Zcr (cm)	S (cm³)	My=Mn (N*mm)	Mp (N*mm)	ΦMn (N*mm)
4,49	1007,47	6604275,89	7534516,35	5943848,30

Fuente. Autor.

Al igual que en la sección anterior en la siguiente figura se hizo la representación gráfica del comportamiento de los momentos resistentes.

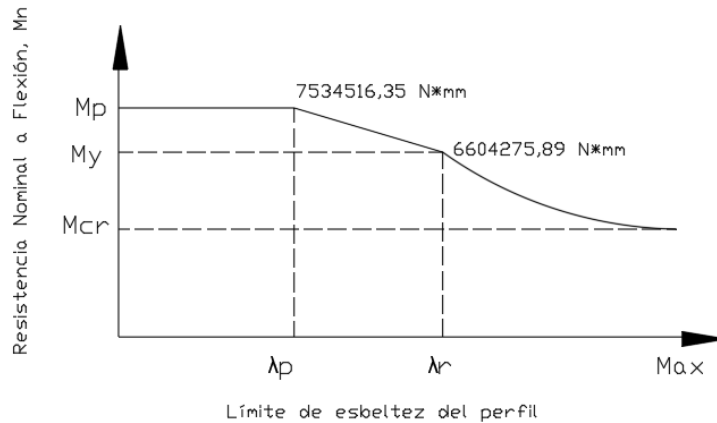


Figura 60. Comportamiento a flexión de la Sección N°6.
Fuente. Autor.

Se calculó el área de acero y el área de concreto en la sección para luego calcular el peso y el precio del miembro, así como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 82. Propiedades finales de la sección N°6.

Acero	Concreto
5,27 cm ²	18,00 cm ³
4,97 kg	5,18 kg
15720,41 \$	504,00 \$

Fuente. Autor.

Se verificó si la deflexión de la viga producida por las cargas cumplía con la establecida en la norma, se tomó como un piso que no soporta elementos no estructurales (L/360).

$$\Delta \text{ permitida} = L/360 \quad (44)$$

Donde:

- Δ permitida es la deflexión permitida para la viga compuesta.
- L es la longitud de la viga.

Tabla 83. Chequeo de deflexiones de la viga de sección 6.

I_x (cm ⁴)	$\delta_{cp} + \delta_{cv}$ (cm)	Δ permitida (cm)	Chequeo
2391,37	0,013	0,33	Si Cumple

Fuente. Autor.

Se calculó la longitud máxima resistente.

$$L_{\text{Máx}} = 269,14 \text{ cm} = 2,69 \text{ m}$$

Por último, con la longitud máxima se calculó el ancho efectivo de la sección.

$$b_{\text{eff}} = 67,28 \text{ cm} = 0,67 \text{ m}$$

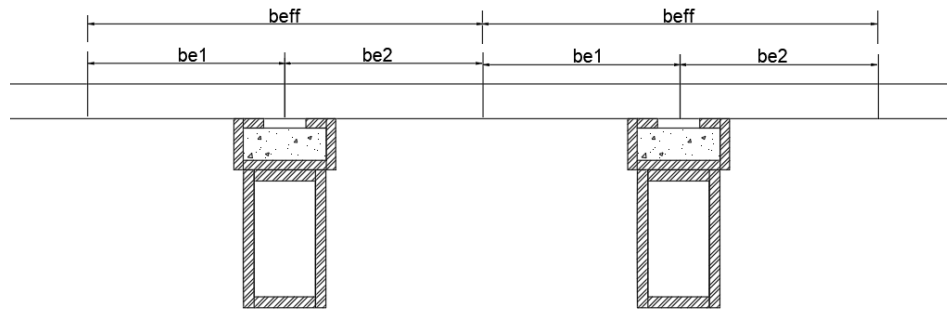


Figura 61. Ancho efectivo de la viga N°6.
Fuente. Autor.

11.8. PRE-DIMENSIONAMIENTO SECCIÓN N°7

Una configuración nueva a analizar fue un perfil en U hueco en su interior como el que se muestra en la siguiente figura, este es un derivado de los perfiles tubulares de acero que actualmente se trabaja en la construcción.

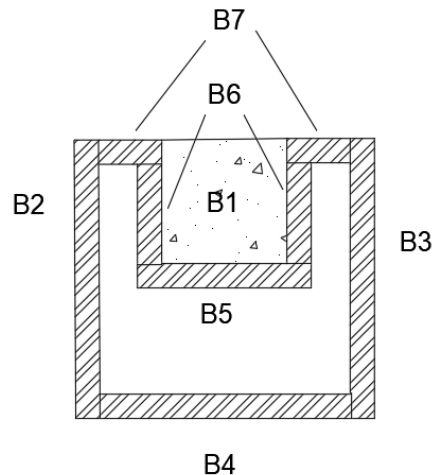


Figura 62. Viga compuesta rellena, Sección N°7.
Fuente. Autor.

En la tabla siguiente al igual que en la sección anterior, se establecieron unas restricciones.

Tabla 84. Restricciones de la sección N°7.

r (cm)	R (cm)	h (cm)	b (cm)
0,60	2,00	15,00	9,00

Fuente. Autor.

Lo siguiente a realizar fue variar las dimensiones geométricas de los elementos racionalmente hasta llegar al momento actuante calculado en la sección principal

para hacer posteriormente el análisis comparativo, los resultados de dichas dimensiones se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 85. Propiedades geométricas sección N°7.

t (cm)	b₁ (cm)	h₁ (cm)	b₂ (cm)	h₂ (cm)
0,11	5,00	2,50	0,11	15,00
b₃ (cm)	h₃ (cm)	b₄ (cm)	h₄ (cm)	b₅ (cm)
0,11	15,00	8,77	0,11	5,23
h₅ (cm)	b₆ (cm)	h₆ (cm)	b₇ (cm)	h₇ (cm)
0,11	0,11	2,38	2,00	0,11

Fuente. Autor.

Seguidamente se hizo el cálculo de los anchos equivalentes en concreto.

Tabla 86. Propiedades geométricas equivalentes de la sección N°7.

y (cm)	b₂ equ (cm)	b₃ equ (cm)	b₄ equ (cm)
11,83	1,10	1,10	84,17
b₅ equ (cm)	b₆ equ (cm)	b₇ equ (cm)	-
50,19	1,10	19,19	-
I₁ (cm⁴)	I₂ (cm⁴)	I₃ (cm⁴)	I₄ (cm⁴)
52,56	620,86	620,86	1341,56
I₅ (cm⁴)	I₆ (cm⁴)	I₇ (cm⁴)	I Total (cm⁴)
3,64	20,75	42,76	2702,99

Fuente. Autor.

Al igual que en las secciones anteriores en la siguiente figura se muestra una representación gráfica de cómo quedaría la equivalente de esta sección solo en concreto.

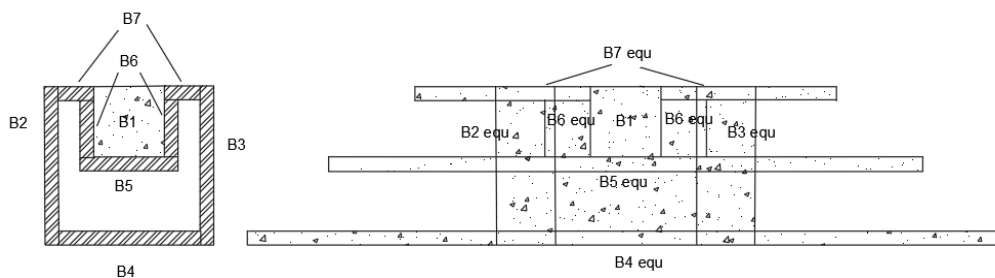


Figura 63. Sección N°7 homogeneizada en concreto.

Fuente. Autor.

Los esfuerzos a los que está sometida la sección calculada anteriormente se muestran a continuación.

Tabla 87. Calculo de esfuerzos de la sección N°7.

c1 (cm)	σ Concreto (N/mm²)	c2 (cm)	σ Acero (N/mm²)
3,17	7,68	-11,83	275,21

Fuente. Autor.

Chequeo de la sección:

Tabla 88. Chequeo de momentos de la Sección N°7.

r	K	J	Centroide inf (cm)	d (cm)	Mc (KN.m)	Ms (KN.m)	Chequeo
13,09	0,42	0,85	3,62	11,38	18,06	16,32	Falla dúctil

Fuente. Autor.

Al igual que en el caso anterior se utilizan las dos tablas mencionadas para la evaluación de esbeltez, debido a que la parte superior esta rellena de concreto y la inferior no.

Tabla 89. Chequeo de esbeltez de los elementos Sección N°7.

Miembros no rigidizados (almas ext)		Miembros no rigidizados (alma int)	
Λ_f	130,43	λ_w	20,73
Λ_{Pf}	82,90	Λ_{Pw}	66,32
Λ_{rf}	157,51	λ_{rw}	157,51
Máx	157,51	Máx	157,51
Chequeo	No Compacta	Chequeo	Compacta

Miembros rigidizados (alas inf)		Miembros rigidizados (ala sup)	
Λ_f	76,26	λ_w	45,47
Λ_{Pf}	62,45	Λ_{Pw}	62,45
Λ_{rf}	82,90	λ_{rw}	82,90
Máx	157,51	Máx	157,51
Chequeo	Esbelta	Chequeo	Compacta

Fuente. Autor.

Se ilustra el equilibrio de tensiones.

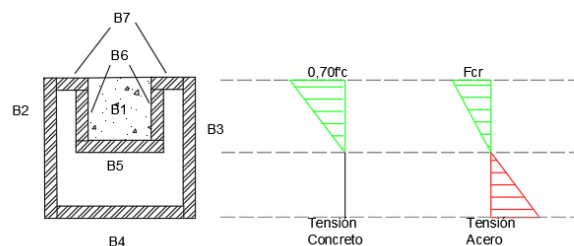


Figura 64. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°7 en el rango elástico.

Fuente. Autor.

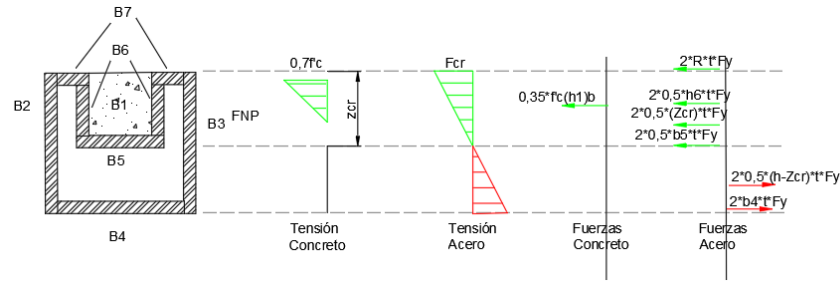


Figura 65. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°7 en el rango plástico.
Fuente. Autor.

Se calculó el momento cedente “My”, la fibra neutra plástica “Zcr” y el momento último resistente de la Sección N°7 “Mn”.

$$Z_{cr} = \frac{-0,35f'_c \cdot b_1 \cdot h_1 - 2R \cdot t \cdot F_y - h_6 \cdot t \cdot F_y - b_5 \cdot t \cdot F_y + h \cdot t \cdot F_y + 2b_4 \cdot t \cdot F_y}{2 \cdot t \cdot F_y} \quad (45)$$

Donde:

- Zcr es la fibra neutra plástica de la sección 7.
- R es el ancho de las aletas corta del perfil.

En la siguiente figura se muestra el procedimiento del cálculo del momento cedente y momento plástico de la sección 7.

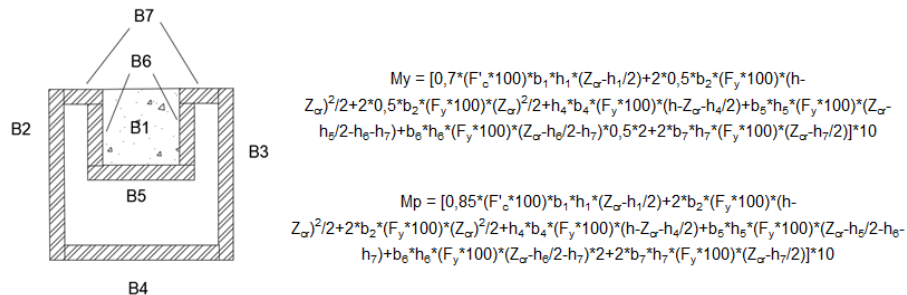


Figura 66. Momento máximo de la Sección N°7.
Fuente. Autor.

Los cálculos de los esfuerzos de la aleta en compresión y la aleta en tensión se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 90. Fibra neutra plástica y momento nominal de la Sección N°7.				
Zcr (cm)	S (cm³)	My=Mn (N*mm)	Mp (N*mm)	ΦMn (N*mm)
9,00	852,83	6984046,67	9098841,85	6285642,00

Fuente. Autor.

Al igual que en la sección anterior en la siguiente figura se hizo la representación gráfica del comportamiento de los momentos resistentes.

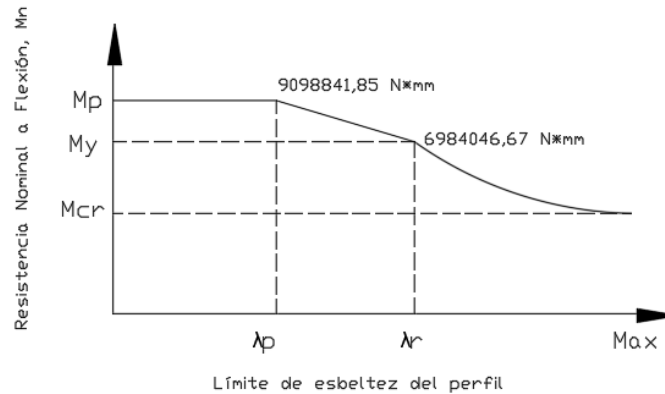


Figura 67. Comportamiento a flexión de la Sección N°7.
Fuente. Autor.

Se calculó el área de acero y el área de concreto en la sección para luego calcular el peso y el precio del miembro, así como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 91. Propiedades finales de la sección N°7.

Acero	Concreto
6,06 cm ²	12,50 cm ³
5,71 kg	4,20 kg
18076,98 \$	350,00 \$

Fuente. Autor.

Se verificó si la deflexión de la viga producida por las cargas cumplía con la establecida en la norma, se tomó como un piso que no soporta elementos no estructurales ($L/360$).

$$\Delta \text{ permitida} = L/360 \quad (46)$$

Donde:

- Δ permitida es la deflexión permitida para la viga compuesta.
- L es la longitud de la viga.

Tabla 92. Chequeo de deflexiones de la viga de sección 7.

I_x (cm ⁴)	$\delta_{cp} + \delta_{cv}$ (cm)	Δ permitida (cm)	Chequeo
2702,99	0,011	0,33	Si Cumple

Fuente. Autor.

Se calculó la longitud máxima resistente.

$$L \text{ Máx} \quad 277,51 \text{ cm} \quad 2,77 \text{ m}$$

Por último, con la longitud máxima se calculó el ancho efectivo de la sección.

$$b_{eff} \quad 69,37 \text{ cm} \quad 0,69 \text{ m}$$

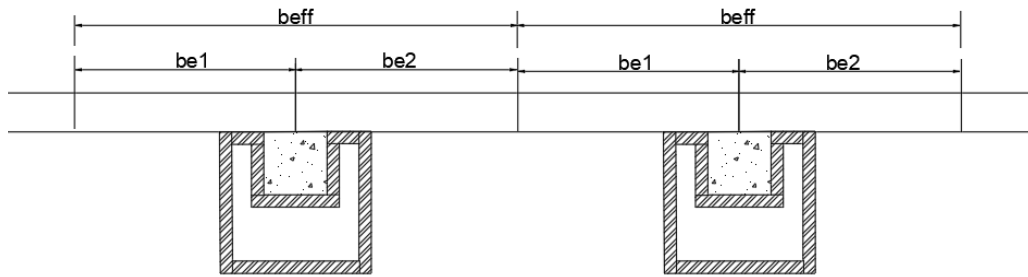


Figura 68. Ancho efectivo de la viga N°7.
Fuente. Autor.

11.9. PRE-DIMENSIONAMIENTO SECCIÓN N°8

La última configuración analizada es muy parecida a la sección 3 pero con la diferencia de que los perfiles inferiores soldados están en sentido opuesto.

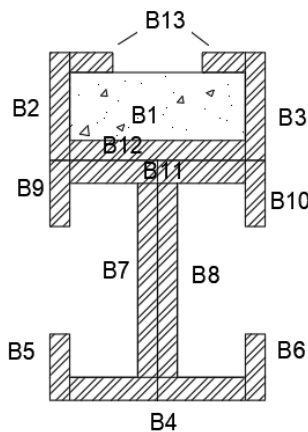


Figura 69. Viga compuesta rellena, Sección N°8.
Fuente. Autor.

En la tabla siguiente al igual que en la sección anterior, se establecieron unas restricciones.

Tabla 93. Restricciones de la sección N°8.

r (cm)	R (cm)	h (cm)	b (cm)
0,61	2,00	16,00	9,76

Fuente. Autor.

Lo siguiente a realizar fue variar las dimensiones geométricas de los elementos racionalmente hasta llegar al momento actuante calculado en la sección principal para hacer posteriormente el análisis comparativo, los resultados de dichas dimensiones se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 94. Propiedades geométricas sección N°8.

t (cm)	b ₁ (cm)	h ₁ (cm)	b ₂ (cm)	h ₂ (cm)	b ₃ (cm)	h ₃ (cm)
0,09	9,58	2,50	0,09	2,68	0,09	2,68
b ₄ (cm)	h ₄ (cm)	b ₅ (cm)	h ₅ (cm)	b ₆ (cm)	h ₆ (cm)	b ₇ (cm)
9,58	0,09	0,09	2,00	0,09	2,00	0,09
h ₇ (cm)	b ₈ (cm)	h ₈ (cm)	b ₉ (cm)	h ₉ (cm)	b ₁₀ (cm)	h ₁₀ (cm)
13,14	0,09	13,14	0,09	2,00	0,09	2,00
b ₁₁ (cm)	h ₁₁ (cm)	b ₁₂ (cm)	h ₁₂ (cm)	b ₁₃ (cm)	h ₁₃ (cm)	-
9,58	2,00	9,58	2,00	2,00	0,09	-

Fuente. Autor.

Seguidamente se hizo el cálculo de los anchos equivalentes en concreto.

Tabla 95. Propiedades geométricas equivalentes de la sección N°8.

y (cm)	b ₂ equ (cm)	b ₃ equ (cm)	b ₄ equ (cm)	b ₅ equ (cm)
13,21	0,86	0,86	91,94	0,86
b ₆ equ (cm)	b ₇ equ (cm)	b ₈ equ (cm)	b ₉ equ (cm)	b ₁₀ equ (cm)
0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
b ₁₁ equ (cm)	b ₁₂ equ (cm)	b ₁₃ equ (cm)	-	-
91,94	91,94	19,19	-	-
I ₁ (cm ⁴)	I ₂ (cm ⁴)	I ₃ (cm ⁴)	I ₄ (cm ⁴)	I ₅ (cm ⁴)
62,44	6,22	6,22	1435,32	258,34
I ₆ (cm ⁴)	I ₇ (cm ⁴)	I ₈ (cm ⁴)	I ₉ (cm ⁴)	I ₁₀ (cm ⁴)
258,34	678,19	678,19	1,96	1,96
I ₁₁ (cm ⁴)	I ₁₂ (cm ⁴)	I ₁₃ (cm ⁴)	I Total (cm ⁴)	-
101,40	0,19	21,17	3385,23	-

Fuente. Autor.

Al igual que en las secciones anteriores en la siguiente figura se muestra una representación gráfica de cómo quedaría la equivalente de esta sección solo en concreto.

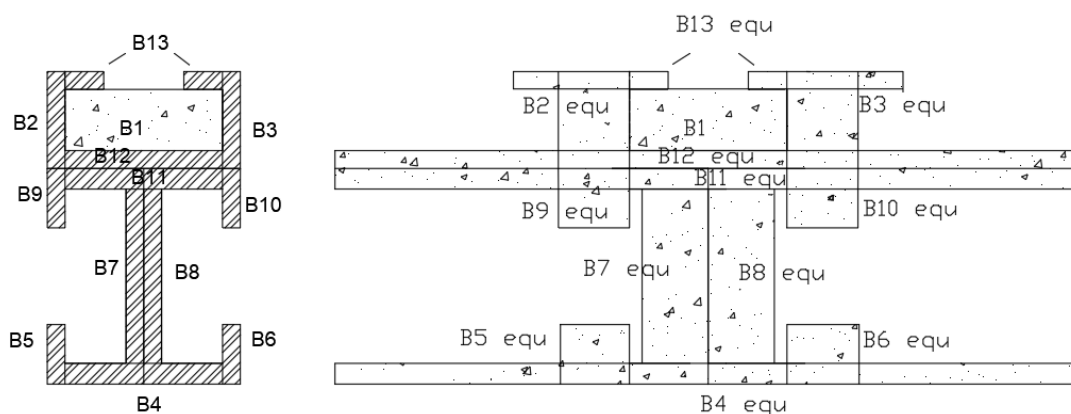


Figura 70. Sección N°8 homogeneizada en concreto.

Fuente. Autor.

Los esfuerzos a los que está sometida la sección calculada anteriormente se muestran a continuación.

Tabla 96. Calculo de esfuerzos de la sección N°8.

c1 (cm)	6 Concreto (N/mm ²)	c2 (cm)	6 Acero (N/mm ²)
2,78	5,38	-13,22	245,47

Fuente. Autor.

Chequeo de la sección:

Tabla 97. Chequeo de momentos de la Sección N°8.

r	K	J	Centroide inf (cm)	d (cm)	Mc (KN.m)	Ms (KN.m)	Chequeo
13,09	0,42	0,85	4,40	11,50	12,94	15,35	Falla Frágil

Fuente. Autor.

Al igual que en el caso anterior se utilizan las dos tablas mencionadas para la evaluación de esbeltez, debido a que la parte superior esta rellena de concreto y la inferior no.

Tabla 98. Chequeo de esbeltez de los elementos Sección N°8.

Miembros no rigidizados (almas ext)		Miembros no rigidizados (alma int)	
Λ_f	29,77	λ_w	146,00
λ_{Pf}	82,90	λ_{Pw}	66,32
Λ_{rf}	157,51	λ_{rw}	157,51
Máx	157,51	Máx	157,51
Chequeo	Compacta	Chequeo	No Compacta
Miembros rigidizados (almas int)		Miembros rigidizados (ala inf)	
Λ_f	22,22	λ_w	53,22
λ_{Pf}	62,45	λ_{Pw}	30,95
Λ_{rf}	82,90	λ_{rw}	82,90
Máx	157,51	Máx	138,17
Chequeo	Compacta	Chequeo	Esbelta
Miembros rigidizados (alas sup)			
Λ_f	76,26		
λ_{Pf}	62,45		
Λ_{rf}	82,90		
Máx	157,51		
Chequeo	Esbelta		

Fuente. Autor.

Se ilustra el equilibrio de tensiones.

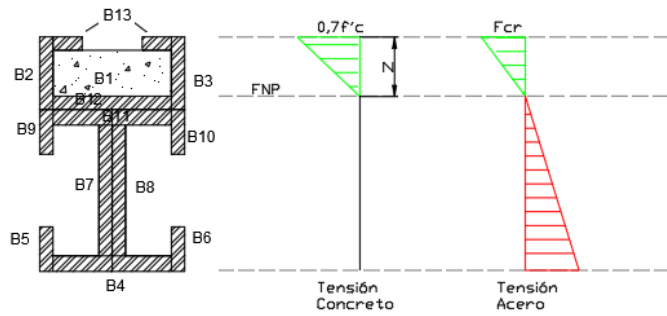


Figura 71. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°7 en el rango elástico.

Fuente. Autor.

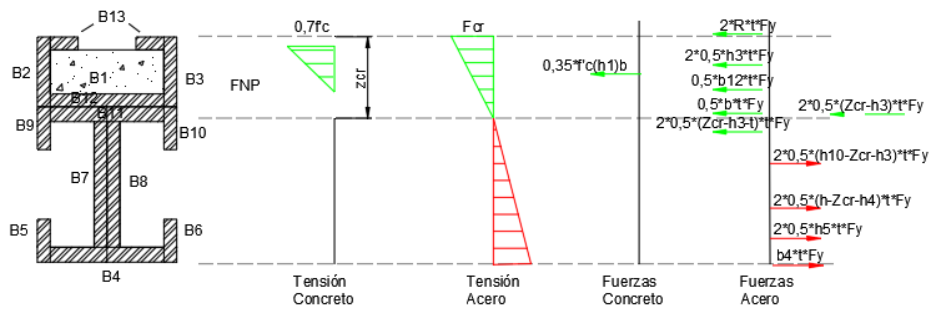


Figura 72. Distribución de tensiones y fuerzas en la Sección N°8 en el rango plástico.

Fuente. Autor.

Se calculó el momento cedente “My”, la fibra neutra plástica “Zcr” y el momento último resistente de la Sección N°8 “Mn”.

$$Z_{cr} = \frac{-0,35f'_c \cdot b_1 \cdot h_1 - 2 \cdot R \cdot t \cdot F_y - h_3 \cdot t \cdot F_y - b_{12} \cdot t \cdot F_y - 0,5 \cdot b \cdot t \cdot F_y - 0,5 \cdot t^2 \cdot t \cdot F_y + h_3 \cdot t \cdot F_y + h_{10} \cdot t \cdot F_y + h \cdot t \cdot F_y + h_5 \cdot t \cdot F_y + b_4 \cdot t \cdot F_y}{4 \cdot t \cdot F_y} \quad (47)$$

Donde:

- Zcr es la fibra neutra plástica de la sección 8.
- R es el ancho de las aletas corta del perfil.

En la siguiente figura se muestra el procedimiento del cálculo del momento cedente y momento plástico de la sección 8.

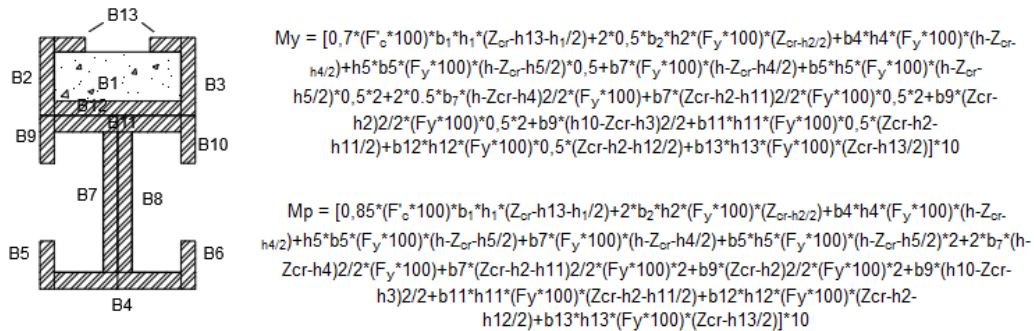


Figura 73. Momento máximo de la Sección N°8.

Fuente. Autor.

Los cálculos de los esfuerzos de la aleta en compresión y la aleta en tensión se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 99. Fibra neutra plástica y momento nominal de la Sección N°8.

Zcr (cm)	S (cm³)	My=Mn (N*mm)	Mp (N*mm)	ΦMn (N*mm)
2,26	1215,76	6562126,44	9461948,40	5905913,80

Fuente. Autor.

Al igual que en la sección anterior en la siguiente figura se hizo la representación gráfica del comportamiento de los momentos resistentes.

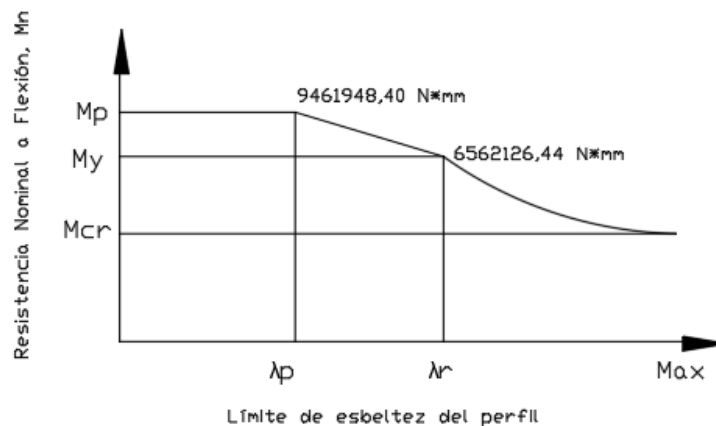


Figura 74. Comportamiento a flexión de la Sección N°8.

Fuente. Autor.

Se calculó el área de acero y el área de concreto en la sección para luego calcular el peso y el precio del miembro, así como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 100. Propiedades finales de la sección N°8.

Acero	Concreto
6,33 cm ²	23,95 cm ³
5,96 kg	6,89 kg
18882,39 \$	4311,00 \$

Fuente. Autor.

Se verificó si la deflexión de la viga producida por las cargas cumplía con la establecida en la norma, se tomó como un piso que no soporta elementos no estructurales (L/360).

$$\Delta \text{ permitida} = L/360 \quad (48)$$

Donde:

- Δ permitida es la deflexión permitida para la viga compuesta.
- L es la longitud de la viga.
-

Tabla 101. Chequeo de deflexiones de la viga de sección 8.

Ix (cm ⁴)	$\delta_{cp} + cv$ (cm)	Δ permitida (cm)	Chequeo
3385,22	0,0093	0,33	Si Cumple

Fuente. Autor.

Se calculó la longitud máxima resistente.

$$L \text{ Máx} \quad 293,57 \text{ cm} \quad 2,93 \text{ m}$$

Por último, con la longitud máxima se calculó el ancho efectivo de la sección.

$$b_{eff} \quad 73,39 \text{ cm} \quad 0,73 \text{ m}$$

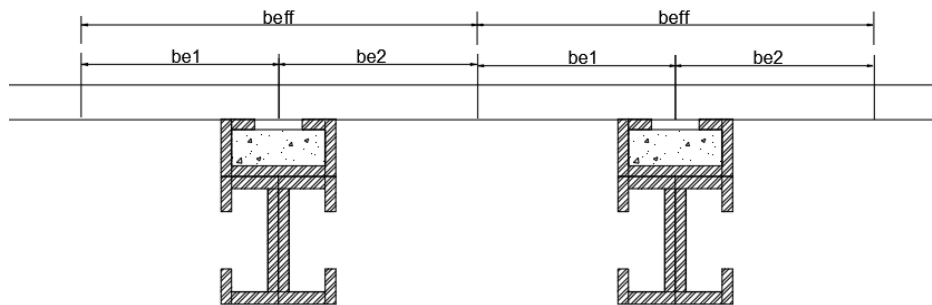


Figura 75. Ancho efectivo de la viga N°8.

Fuente. Autor.

Además de las secciones estudiadas en los puntos anteriores se propusieron otros tipos de secciones a partir de la unión de perfiles de acero ya existentes para la formación de vigas compuestas, esos perfiles no fueron estudiados al igual que los anteriores para no extender demasiado el presente documento, la configuración geométrica de dichos perfiles se muestra en la siguiente figura.

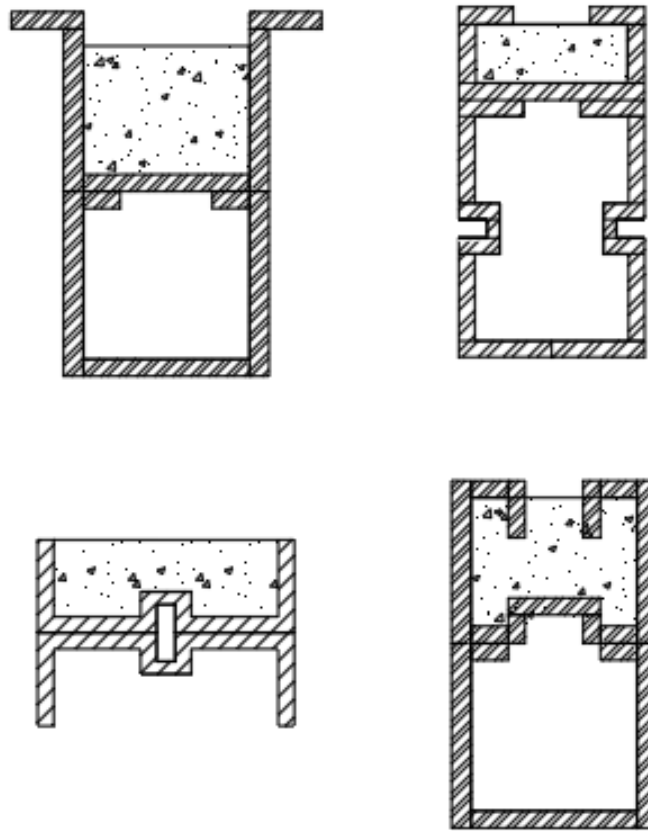


Figura 76. Configuraciones geométricas propuestas no analizadas.
Fuente. Autor.

12. COMPROBACIÓN DE ESFUERZO RASANTE

Si una viga se conforma a partir de dos materiales, la forma en que trabajará el elemento compuesto, dependerá de la correcta adherencia entre las partes que la conforman, ya que, si no se unen correctamente, se producirá un deslizamiento relativo en la interfaz de contacto, los esfuerzos internos no se transmitirán de una sección a otra, generando una curvatura como la que se indica en la figura 77. Por otro lado, si se garantiza una correcta adherencia entre los materiales, los esfuerzos internos se desarrollarían como si la viga fuera monolítica y la curvatura presentaría un comportamiento como el de la figura 78, [14].

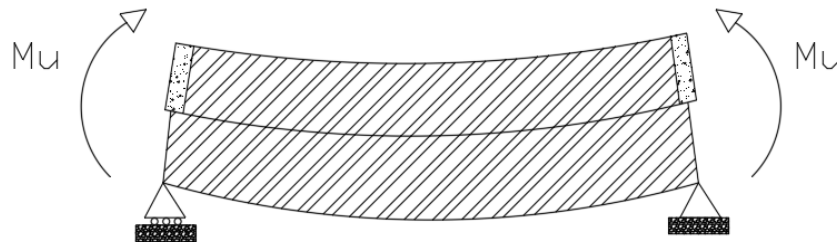


Figura 77. Viga compuesta con deslizamiento relativo entre la interfaz de concreto y el perlin superior.
Fuente. Autor.

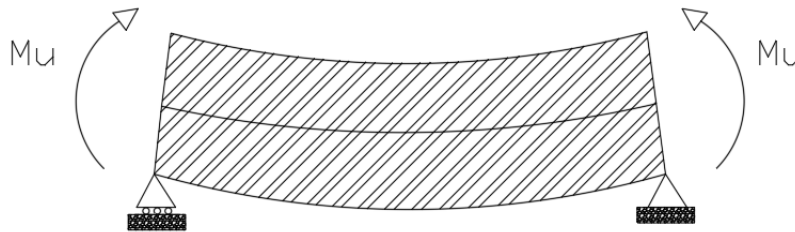


Figura 78. Viga compuesta sin deslizamiento relativo entre la interfaz de concreto y el perlin superior.
Fuente. Autor.

Aunque en la sección se produce un deslizamiento relativo entre la interfaz de los materiales, ni la norma ANSI/AISC, ni la NSR-10 (F.2.9.6) proponen o indican algún método para la comprobación del esfuerzo rasante en vigas compuestas rellenas de concreto sometidas a flexión, y en cambio declara que la falta de adherencia entre los materiales no limita necesariamente la resistencia a flexión de la sección compuesta, independientemente de si esta es compacta, no compacta o esbelta.

A pesar de que el deslizamiento entre los materiales no afecta apreciablemente la resistencia de la sección compuesta, se realizó un análisis por corte para conocer los efectos resistentes por adherencia directa entre los materiales y se efectuó un ensayo experimental por corte que se explicará más adelante.

Inicialmente se calculó la carga de aplicación para conocer la reacción en los apoyos por medio de la siguiente formula:

$$P = \frac{4Mu}{L} \quad (49)$$

El equilibrio de fuerzas con la carga aplicada se ilustra en la siguiente figura.

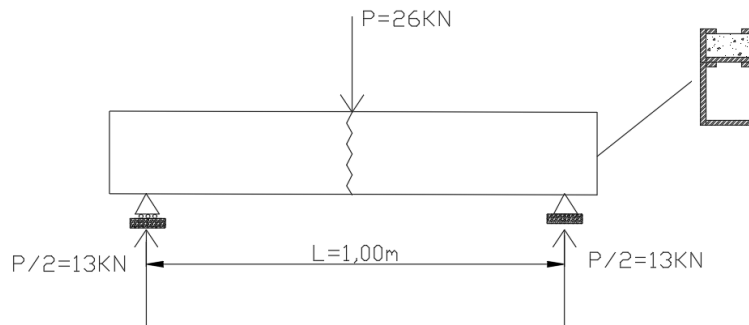


Figura 79. Fuerza cortante interna en la viga.
Fuente. Autor.

Luego se efectuó el cálculo de las fuerzas cortantes internas en el material por medio de un equilibrio de fuerzas en “y”, así como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 102. Equilibrio de fuerzas en “y”.

Ry (kN)	$\Sigma Fy = - V + Ry$ (kN)	V = Ry (kN)
13	V = Ry	13

Fuente. Autor.

El cálculo de la fuerza cortante se ilustra en la siguiente figura.

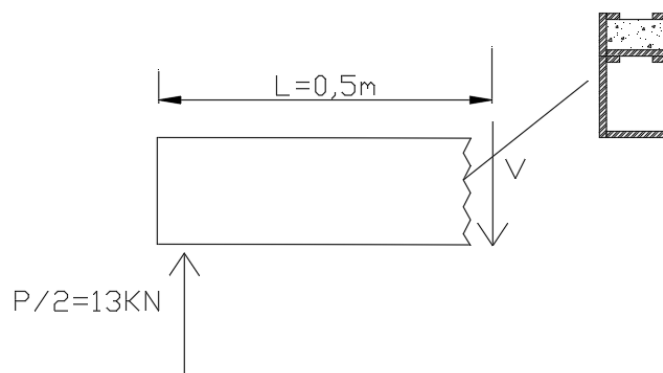


Figura 80. Fuerza cortante interna en la viga.
Fuente. Autor.

Por geometría se sabe que el cortante máximo de una sección transversal se encuentra en el centroide, pero para este caso el cortante de interés es que el que

se efectúa justo sobre la interfaz de contacto entre el concreto y el ala superior del perfil.

A partir de lo dicho anteriormente se calculó el primer momento de área con respecto a la fibra de interés, así como se indica en la siguiente figura.

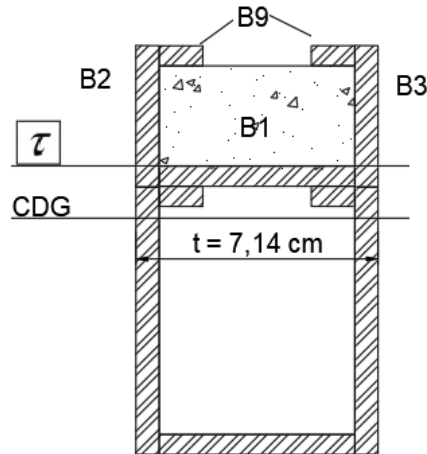


Figura 81. Fuerza cortante interna en la viga.
Fuente. Autor.

Tabla 103. Primero momento de inercia.

Q1 (mm ³)	Q2 (mm ³)	Q3 (mm ³)	Q9 (mm ³)	Q Total (mm ³)
521,49	5,40	5,40	2,73	535,02

Fuente. Autor.

Por último, se calculó el esfuerzo cortante con la siguiente formula:

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot t} \quad (50)$$

Donde:

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

Tabla 104. Esfuerzo rasante de la sección.

τ (N/mm ²)
0,0097

Fuente. Autor.

Nota: el cálculo de esfuerzo cortante solo se hizo para la sección fallada en el laboratorio para posteriormente hacer el comparativo.

13. ENSAYOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

13.1. ARMADO DEL PERFIL COMPUESTO

Para la conformación del perfil compuesto se soldaron dos perfiles tipo perlin de dimensiones especificadas en la figura 82 con el fin de rellenar la parte superior de concreto que trabajará a compresión, así como se muestra en las siguientes fotos.



Fotos 1 y 2. Armado de los perlines de acero.
Fuente. Autor.

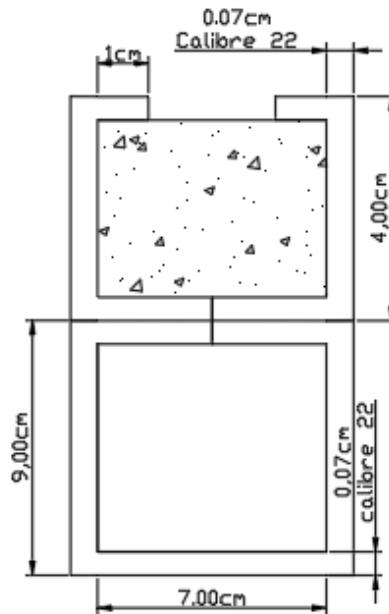


Figura 82. Dimensiones de la viga fallada en laboratorio.
Fuente. Autor.

Luego se procedió a lavar el interior del perlin superior para quitar la grasa y posteriormente aplicar 3 capas de anticorrosivo en las almas laterales y en el ala inferior, así como se muestra en la siguiente foto.



Foto 3. Lavado del perlin superior.
Fuente. Autor.

Como siguiente paso se realizó la mezcla de concreto de acuerdo a las cantidades determinadas en el apartado 12.1.1.7, para posteriormente rellenar los perlines superiores de la sección armada, así como se muestra en las siguientes fotos.



Foto 4. Rellenado del perlin superior.
Fuente. Autor.

Para el adecuado fraguado del concreto, se introdujo la sección compuesta en la piscina dispuesta en los laboratorios, tal y como se muestra a continuación.



Foto 5. Fraguado de la sección compuesta.
Fuente. Autor.

13.2. ARMADO DE MUESTRAS Y TUBOS PARA ENSAYO DE ADHERENCIA.

Con la misma mezcla se realizó el rellenado de los cilindros testigos para el posterior cálculo de la resistencia f'_c , y de la mano se rellenaron 3 tubos de prueba para luego efectuar el ensayo por adherencia directa mencionado en el apartado 12.1.1.5, así como se muestra en las siguientes fotos.



Fotos 6 y 7. Cilindros de concreto y tubos para prueba de corte.
Fuente. Autor.

13.3. PRUEBA DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO

Para el cálculo de la resistencia de las muestras de concreto, se colocaron en la máquina universal uno por uno los 8 cilindros de 15x30cm elaborados y se sometieron a carga hasta la falla, así como se muestra en las siguientes fotos.



Fotos 8 y 9. Cilindros de concreto y tubos para prueba de corte.
Fuente. Autor

Los resultados de la prueba fueron los siguientes:

Tabla 105. Resultados del diseño de mezclas.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Esfuerzo (N/mm²)	20,00	15,56	16,18	20,54
Carga (KN)	362,00	275,00	296,00	363,00
	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8
Esfuerzo (N/mm²)	19,49	21,56	17,42	19,86
Carga (KN)	344,00	381,00	308,00	351,00

Fuente. Autor

13.4. PRUEBA DE FLEXIÓN EN VIGAS COMPUESTAS

Se armaron los apoyos necesarios para realizar el ensayo a flexión de la viga compuesta simplemente apoyada recibiendo la carga de dos fuerzas puntuales, así como se muestra en las siguientes fotos.

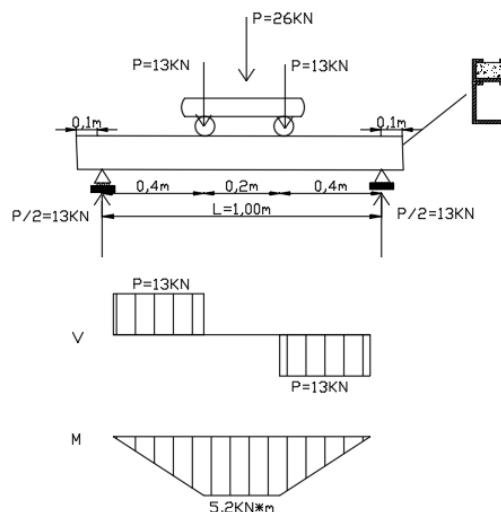


Foto 10. Cilindros de concreto y tubos para prueba de corte.
Fuente. Autor



Foto 11. Cilindros de concreto y tubos para prueba de corte.
Fuente. Autor

Los resultados de la prueba fueron los siguientes:

Tabla 106. Resultados del ensayo de flexión.

	Muestra 1	Muestra 2
Carga (KN)	22,27	19,50

Fuente. Autor

El momento registrado anteriormente fue dado por el instante en que ocurre pandeo local exterior en las almas rellenas de concreto, así como se muestra en la siguiente imagen.



Foto 12. Falla de la sección compuesta.
Fuente. Autor

Es importante resaltar el beneficio de haber “creado” dos regiones, una de acero rellena y la otra no, esto permitió que el pandeo se generara en el perfil inferior. Mientras que en la parte superior no se presentó, lo cual favoreció la adherencia, entre el concreto y el acero y con esto el funcionamiento esperado.

Debido a que la resistencia del concreto no fue de 21 MPa y la sección utilizada fue de 1 m, se realizó nuevamente el cálculo del momento último resistente de la misma manera que en el apartado 12.1.1.4.3.

Según lo dicho anteriormente la resistencia de los materiales a utilizar fue la siguiente:

Tabla 107. Propiedades de los materiales de la viga de concreto reforzado.

f'_c (kgf/cm ²)	E_c (kgf/cm ²)	F_r (kgf/cm ²)	E_s (kgf/cm ²)	F_y (kgf/cm ²)
191,91	209187,17	27,71	2100000	2750

Fuente. Autor

Los esfuerzos y el momento nominal último fueron los siguientes:

Tabla 108. Esfuerzos de la sección fallada en laboratorio.

c1 (cm)	$\bar{\epsilon}$ Concreto (N/mm ²)	c2 (cm)	$\bar{\epsilon}$ Acero (N/mm ²)
4,52	19,50	-8,48	367,56

Fuente. Autor

Tabla 109. Momento último de la sección fallada en laboratorio.

Zcr (cm)	S (cm ³)	$M_y=M_n$ (N*mm)	M_p (N*mm)	ΦM_n (N*mm)
3,35	223,63	65670050,55	9076080,62	591045,50

Fuente. Autor.

13.5. PRUEBA DE ADHERENCIA DIRECTA

Para evaluar la resistencia por rasante en la sección, se rellenaron 3 tubos de concreto con las siguientes especificaciones:

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

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

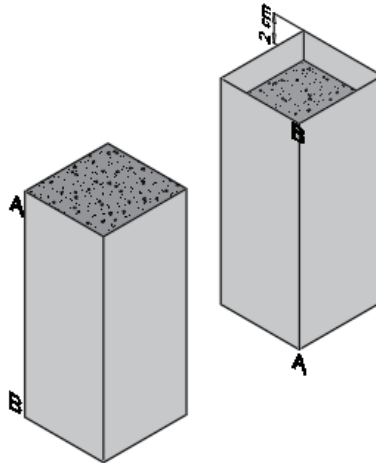
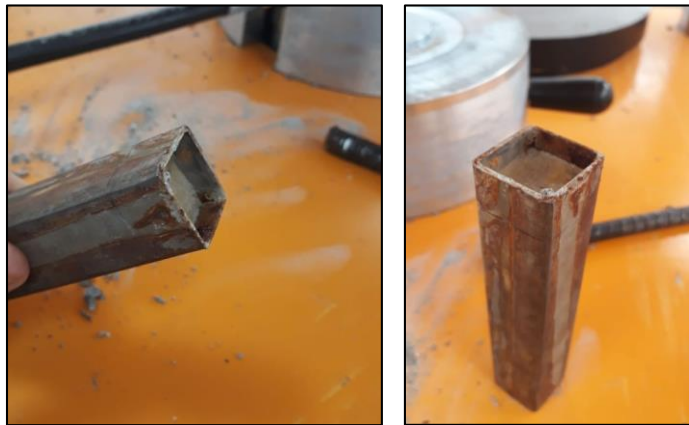


Figura 83. Tubos de muestra para ensayo de rasante.
Fuente. Autor

Nota: el espacio que se dejó en una de las caras del tubo fue para visualizar el deslizamiento que se produciría al aplicarle fuerzas, así como se muestra en la siguiente figura.



Fotos 13 y 14. Tubos de muestra para ensayo de rasante.
Fuente. Autor

Luego de los 28 días cumplidos de endurecimiento del concreto se sometieron los tubos a la prueba de rasante, aplicando una fuerza transmitida por una varilla en la cara “A” hasta que se produjera un deslizamiento en el tubo, así como se muestra en las siguientes fotos.



Fotos 15 y 16. Resistencia por adherencia directa.
Fuente. Autor

La carga resistente última antes del deslizamiento del bloque de concreto fue de:

Tabla 110. Resultados del ensayo de rasante.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Carga deslizamiento (KN)	4,27	4,0	4,50
Carga última (KN)	6,7	6,50	7,9

Fuente. Autor

De acuerdo a la carga calculada, el esfuerzo por deslizamiento sería:

Tabla 111. Esfuerzo rasante de la sección.

τ (N/mm²)
1,33

Fuente. Autor.

El resultado final del deslizamiento producido en los tubos, se muestra en la siguiente foto.



Foto 17. Resistencia por adherencia directa.
Fuente. Autor.

14. MODELACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

Para tomar como un punto más de comparación y dar una visualización representativa por computadora, se realizó una simulación en el software Ansys mechanical – Worbeanch (módulo static structural).

En primera instancia se introdujeron las características de los materiales.

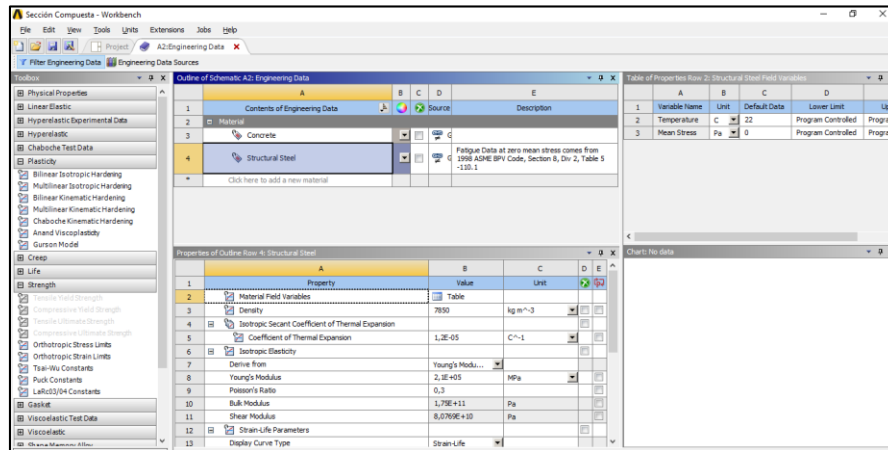


Figura 84. Características de los materiales en Ansys.
Fuente. Ansys mechanical.

Luego se realizó el dibujo de los perlines superior, inferior y el relleno de concreto para la conformación de la sección compuesta, así como se muestra en las siguientes figuras.

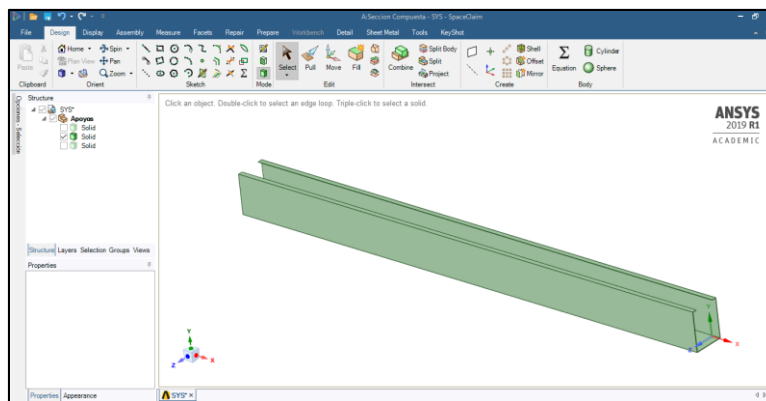


Figura 85. Dibujo del perlin inferior en Ansys.
Fuente. Ansys mechanical.

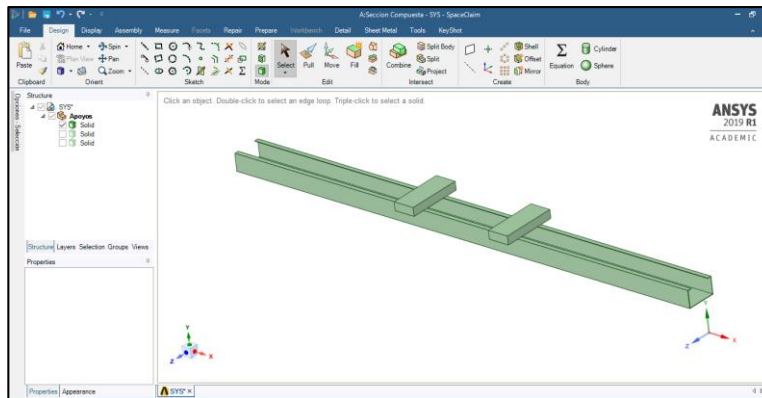


Figura 86. Dibujo del perlin superior en Ansys.
Fuente. Ansys mechanical.

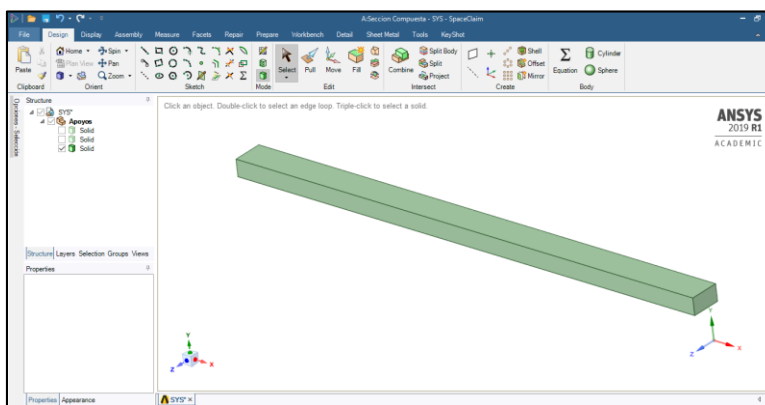


Figura 87. Dibujo del bloque de concreto en Ansys.
Fuente. Ansys mechanical.

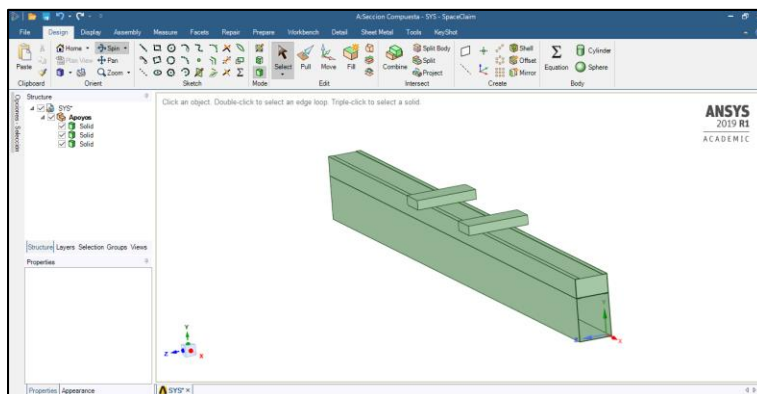


Figura 88. Dibujo de la sección en Ansys.
Fuente. Ansys mechanical.

Luego se evaluó el modelo, indicándole al software los contactos entre los materiales, así como se muestra en las siguientes figuras.

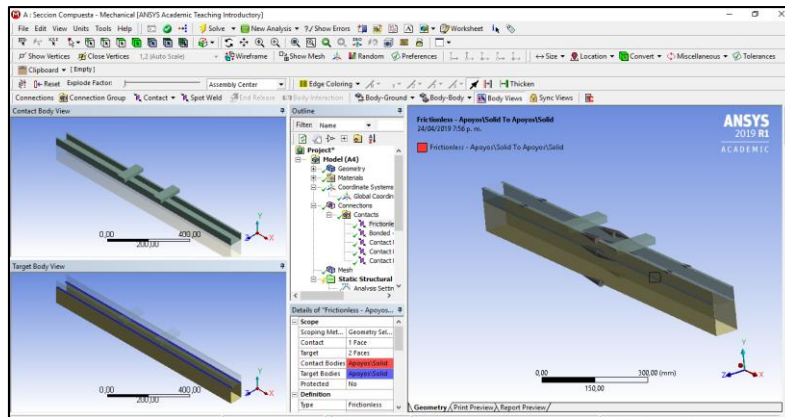


Figura 89. Contacto entre el perlin superior e inferior en Ansys.
Fuente. Ansys mechanical.

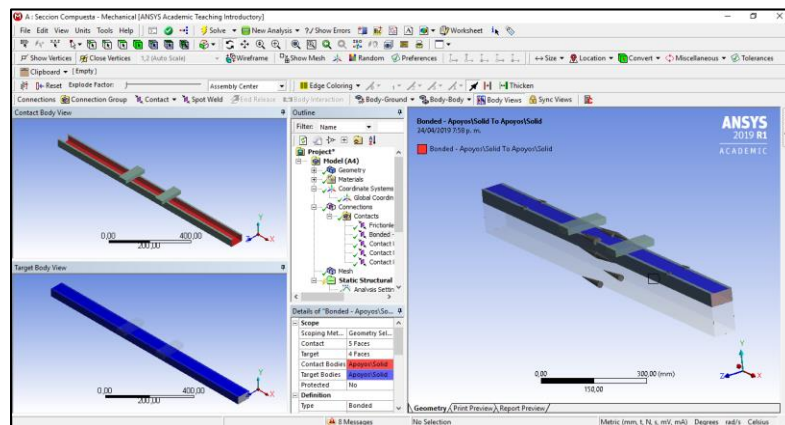


Figura 90. Contacto entre el perlin superior y el bloque de concreto en Ansys.
Fuente. Ansys mechanical.

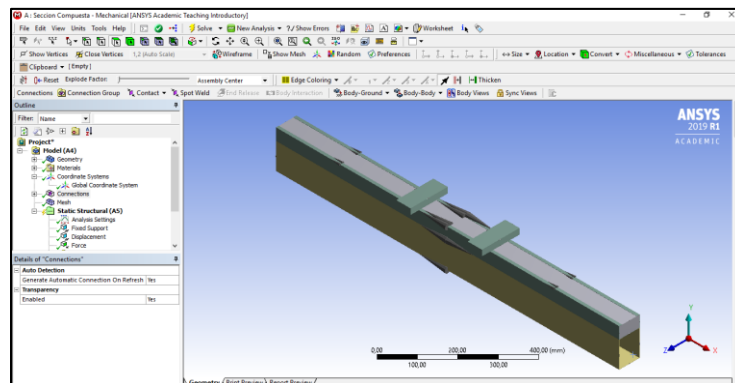


Figura 91. Sección compuesta en Ansys.
Fuente. Ansys mechanical.

Se realizó el enmallado mecánico lineal y cuadrado de 60mm en la sección.

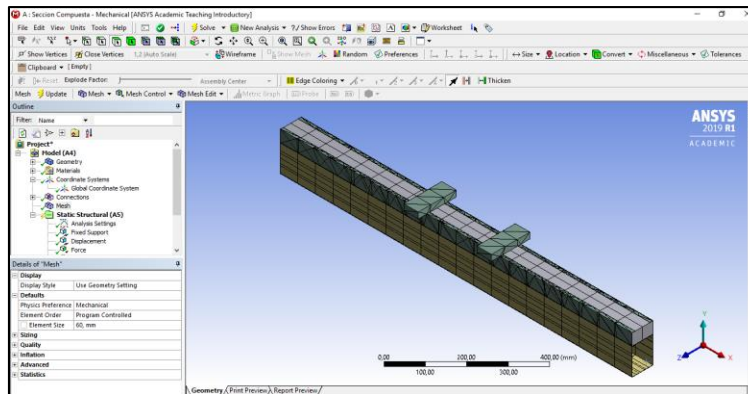


Figura 92. Enmallado de la sección compuesta en Ansys. Fuente. Ansys mechanical.

Se indicó cual era la superficie de soporte de la viga a fallar.

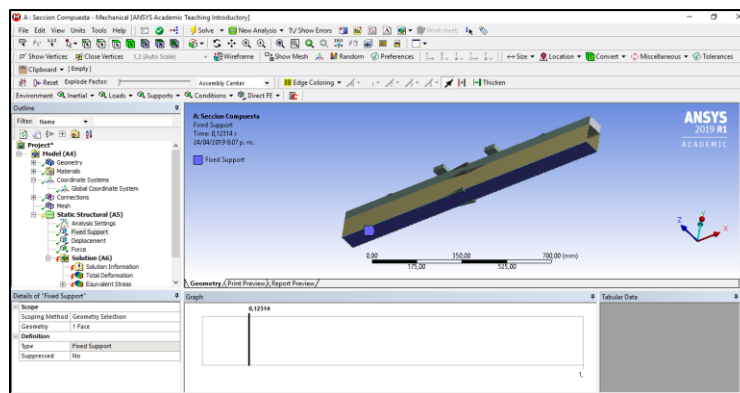


Figura 93. Superficie de soporte en Ansys. Fuente. Ansys mechanical.

Se indicó cual era la superficie de desplazamiento de la viga a fallar.

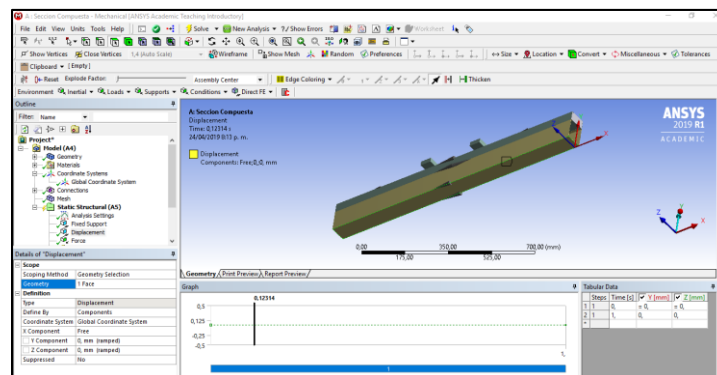


Figura 94. Superficie de desplazamiento en Ansys. Fuente. Ansys mechanical.

Luego se indicó la superficie donde se aplicaría la carga creciente.

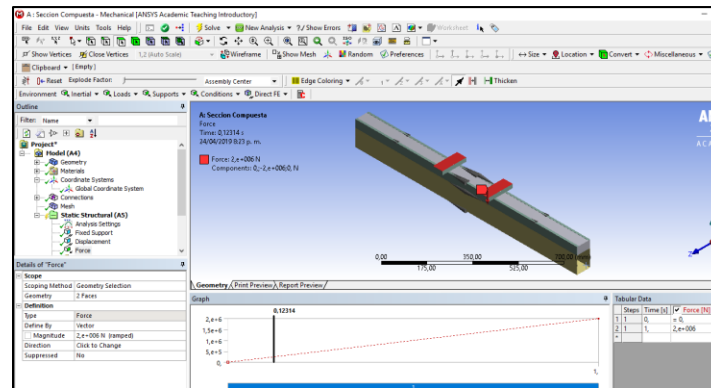


Figura 95. Aplicación de la carga en Ansys.
Fuente. Ansys mechanical.

Los resultados de los desplazamientos se muestran a continuación.

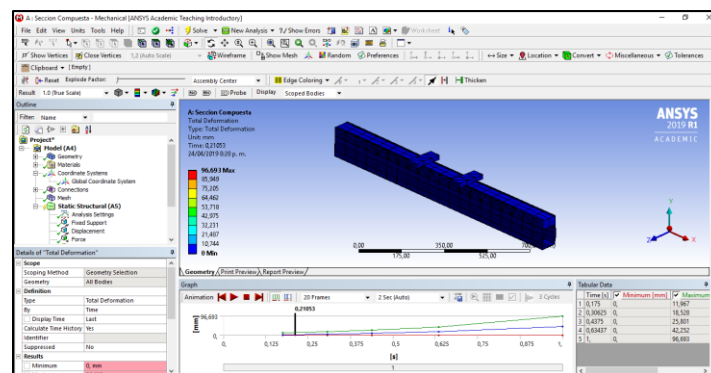


Figura 96. Desplazamientos de la viga en Ansys.
Fuente. Ansys mechanical.

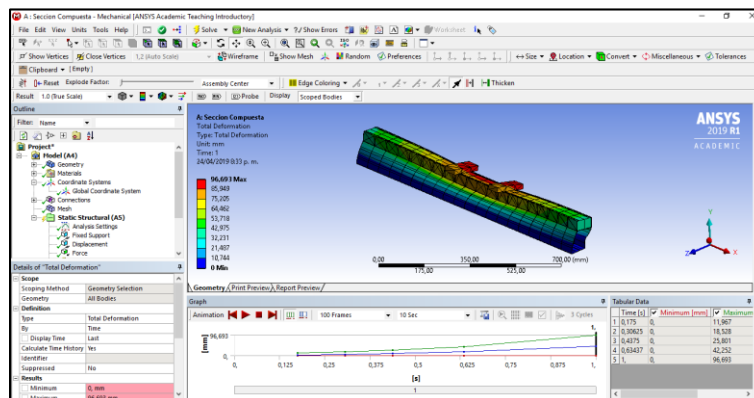


Figura 97. Desplazamientos de la viga en Ansys.
Fuente. Ansys mechanical.

Los resultados de los esfuerzos se muestran a continuación.

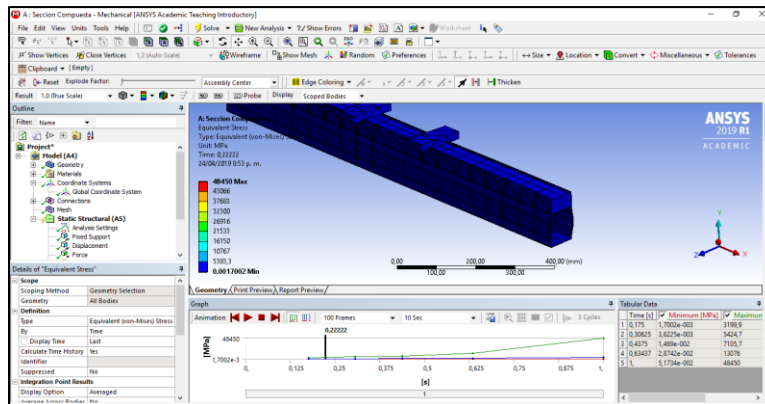


Figura 98. Esfuerzos de la viga en Ansys, (momento en que empieza el pandeo del alma).
Fuente. Ansys mechanical.

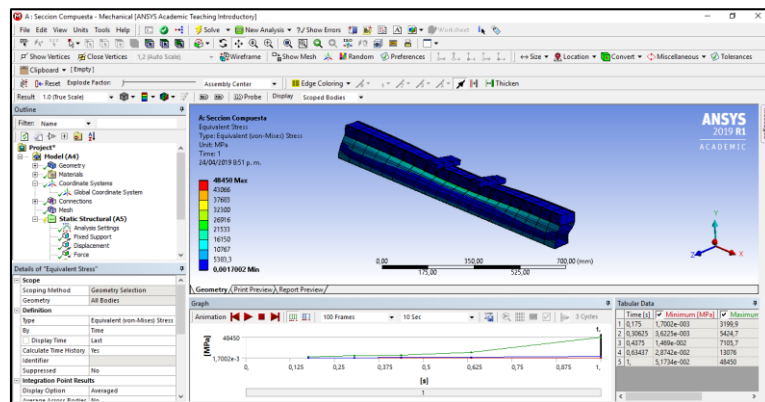


Figura 99. Esfuerzos de la viga en Ansys (falla).
Fuente. Ansys mechanical.

Los esfuerzos, desplazamientos y momento resistentes respectivos a la sección compuesta en un transcurso de tiempo dado se muestran en las siguientes gráficas y tablas.

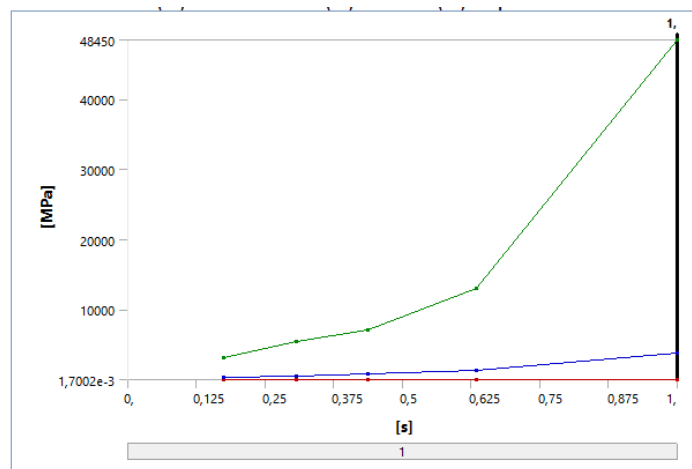


Figura 100. Grafica de esfuerzos de la viga (falla).

Fuente. Ansys mechanical.

Tabla 112. Esfuerzos de la sección compuesta.

Tiempo (s)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)	Promedio (MPa)
0,17	1,70 e-003	3199,9	275,82
0,30	3,62 e-003	5424,7	512,05
0,43	1,46 e-002	7105,1	792,05
0,63	2,87 e-002	13076	1375,8
1,00	5,17 e-002	48450	3808,3

Fuente. Ansys mechanical.

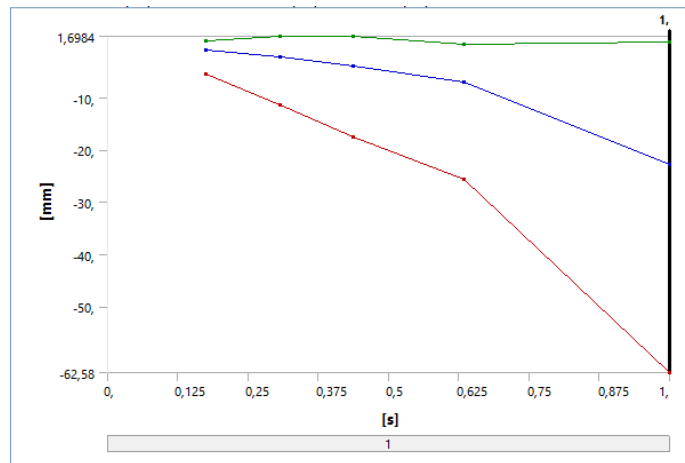


Figura 101. Grafica de desplazamientos de la viga (falla).

Fuente. Ansys mechanical.

Tabla 113. Desplazamientos de la sección compuesta.

Tiempo (s)	Mínimo (mm)	Máximo (mm)	Promedio (mm)
0,17	-5,46	0,81	-0,99
0,30	-11,51	1,61	-2,31
0,43	-17,64	1,69	-3,90
0,63	-25,56	0,19	-6,95
1,00	-62,58	0,60	-22,79

Fuente. Ansys mechanical.

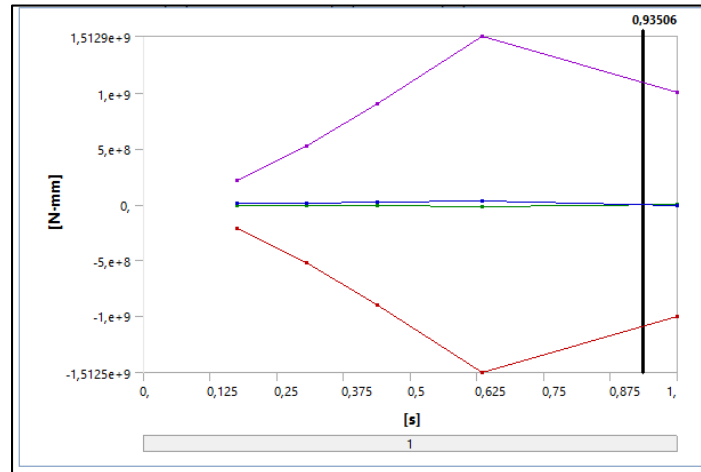


Figura 102. Grafica de momento de la viga (falla).

Fuente. Ansys mechanical.

Tabla 114. Momentos resistentes de la sección compuesta.

Tiempo (s)	Momento X (N.mm)	Momento Y (N.mm)	Momento Z (N.mm)	Momento (N.mm)
0,17	-2,13 e+008	-1,11 e+007	1,44 e+007	-1,11 e+007
0,30	-5,25 e+008	-9,38 e+006	1,52 e+007	-9,38 e+006
0,43	-9,08 e+008	-1,15 e+007	2,08 e+007	-1,15 e+007
0,63	-1,51 e+008	-1,86 e+007	3,30 e+007	-1,86 e+007
1,00	-1,01 e+008	1,16 e+006	-1,23 e+007	1,16 e+006

Fuente. Ansys mechanical.

15. PROYECCIONES DE CARGA RESISTENTE DE LA SECCIÓN COMPUESTA PRINCIPAL

Con ayuda del modelo matemático se escaló a mayores longitudes la geometría de la viga compuesta principal para dar un valor teórico de referencia, así como se muestra en el cuadro 1.

La sobrecarga permitida mostrada en el cuadro 1 tiene como base unas condiciones de apoyo simple y deflexiones máximas de $L/360$. Está ya considera el peso propio de la sección de acero y el relleno de concreto.

Cuadro 1. Momentos últimos resistentes de las secciones compuestas.

SOBRECARGA ADMISIBLE (ton/m)		
CALIBRE	Separación entre apoyos	Sobrecarga
	m	ton/m
22	1,5	22,36
	2,0	9,40
	2,5	4,79
	3,0	2,75
	4,0	1,13
	5,0	0,56
	6,0	0,33
20	1,5	25,13
	2,0	10,64
	2,5	5,44
	3,0	3,16
	4,0	1,35
	5,0	0,71
	6,0	0,50
18	1,5	36,38
	2,0	15,31
	2,5	7,79
	3,0	4,48
	4,0	1,85
	5,0	0,92
	6,0	0,55

Fuente. Autor.

Nota: para este caso se decidió al igual que en el sistema vigacero variar el espesor y no las dimensiones de la sección transversal.

16. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se hizo no solo una comparación entre las geometrías propuestas para la conformación de secciones compuestas, sino también de los resultados experimentales y computacionales suministrados por las pruebas.

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

16.1. VERACIDAD DE LOS RESULTADOS TEÓRICOS, EXPERIMENTALES Y COMPUTACIONALES

En el diagrama de barras que se muestra a continuación se puede apreciar los resultados obtenidos de las distintas pruebas a las que se sometió la viga principal.

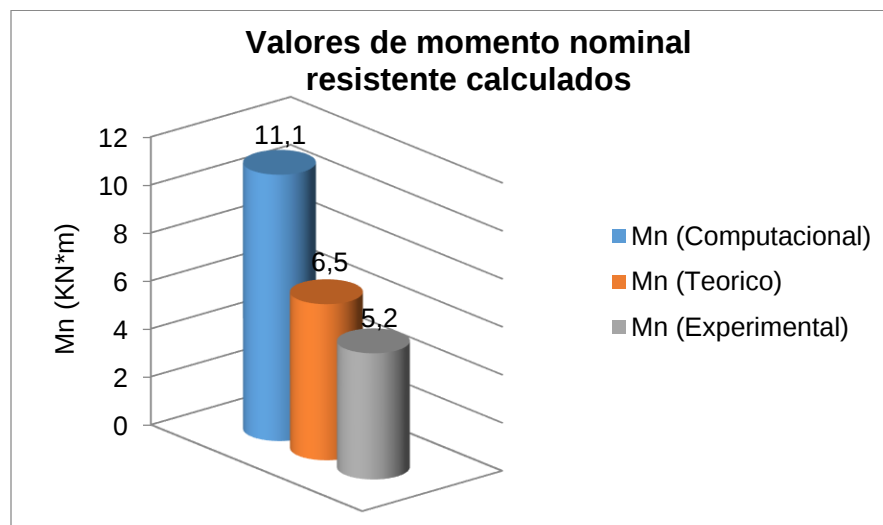


Figura 103. Momentos resistentes calculados.
Fuente. Autor.

Como se puede observar los resultados teóricos y experimentales mostraron un muy cercano resultado del momento resistente de la viga, por otro lado la simulación realizada por elementos finitos en Ansys obtuvo un momento nominal de 11,10 KN.m para unos esfuerzos calculados con respecto a toda la sección superiores al momento de fluencia del acero (275 kg/cm^2), esto quiere decir que el programa considera una plastificación promedio del miembro y no una plastificación solamente de las fibras exteriores tal y como se indicó en el apartado 12.1.1.4.3, a partir de esto se podría calcular por medio de una relación un momento nominal para una sección que llega a un 50% de su fluencia en las fibras no exteriores por considerarse esbelta y daría un momento calculado de 5,55 KN*m, momento que tendría más coincidencia y cercanía con los otros.

Nota: El momento nominal mencionado anteriormente es dado por el instante en que el alma en tensión empieza a pandearse y a producir un comportamiento no lineal en el miembro, vale la pena decir que la viga después de este momento comenzó a producir unos esfuerzos grandes y deformaciones considerables sin producir una rotura del elemento.

Se observa en la siguiente figura que no solo hubo una muy cercana resistencia entre el ensayo experimental, teórico y computacional, sino que además tuvo un comportamiento de deformación similar, fallando primero el alma inferior a pandeo local y luego al mismo tiempo la falla de las almas superiores y el bloque de concreto.

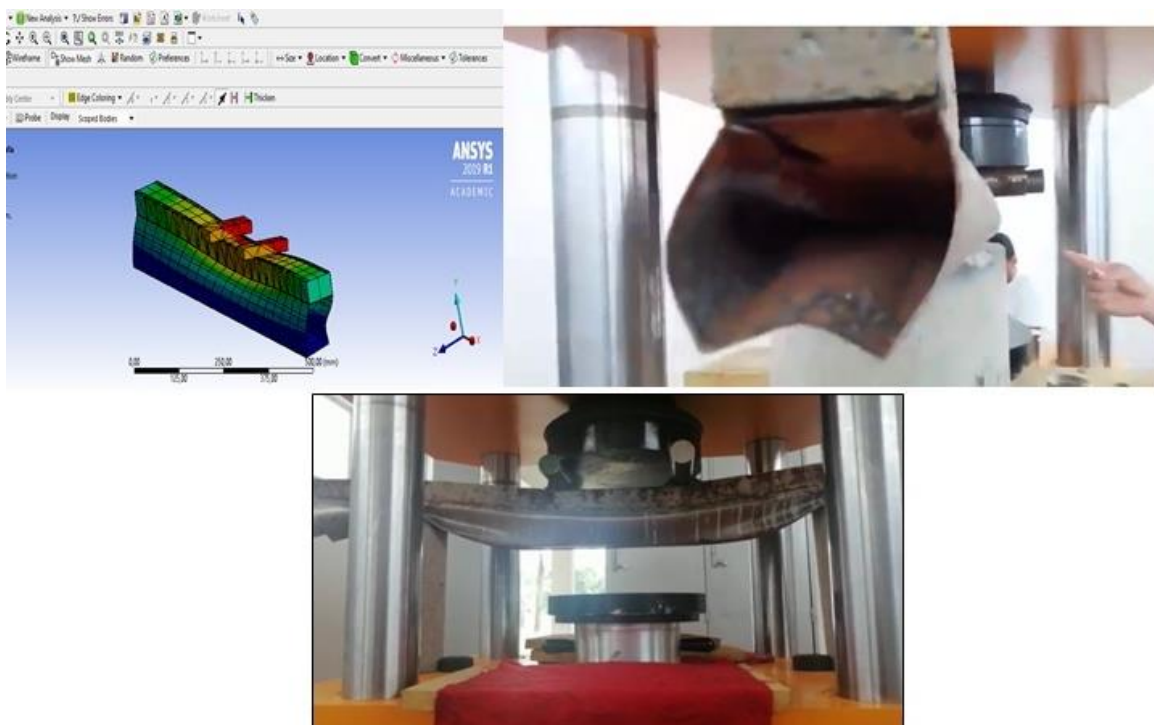


Figura 104. Deformación de la viga de sección compuesta N°2.
Fuente. Autor.

Nota: hay que tener en cuenta que en una viga bastante corta los principales esfuerzos son los cortantes, razón por la cual se produjo también un aplastamiento en los apoyos, en cambio en una viga larga los principales esfuerzos son los normales.

16.2. COMPROBACIÓN DEL ESFUERZO RASANTE DE LA SECCIÓN

En el siguiente diagrama de barras se puede apreciar los resultados obtenidos del cálculo del esfuerzo rasante actuante teórico del apartado 12.1.1.5 y del esfuerzo rasante resistente obtenido en el ensayo experimental del apartado 12.1.1.7.5.

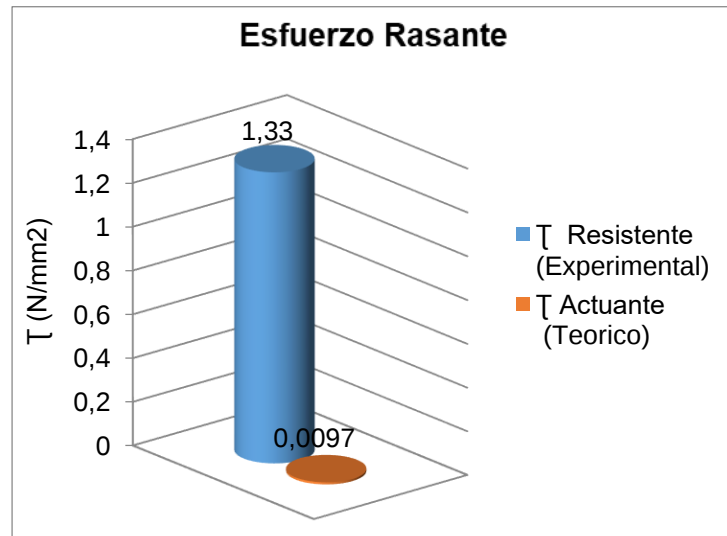


Figura 105. Esfuerzo rasante.

Fuente. Autor.

Es necesario precisar que el valor experimental no corresponde con el teórico, lo que se hizo fue calcular un valor de referencia razonable del esfuerzo rasante experimental, para luego verificar la adherencia entre los materiales, este puede ser tomado como valor de referencia si el esfuerzo cortante en la viga es superior. Dado que en este caso el esfuerzo cortante dio muy por debajo del experimental se garantiza la adherencia completa.

Nota: vale la pena decir que a medida que se incremente la carga por encima de la resistente en un estado lineal elástico de la viga, el esfuerzo actuante incrementará hasta producir un deslizamiento relativo entre los materiales, así como se evidencia al final del ensayo experimental, en ese momento la viga ya estará incursionando en un estado plástico y ya se habrá hecho el máximo aprovechamiento de la misma.

16.3. COMPARACIÓN DE LAS VIGAS DE SECCIÓN COMPUESTA, DE CONCRETO REFORZADO Y DE ACERO ESTRUCTURAL

16.3.1 MOMENTO ÚLTIMOS

En el siguiente cuadro se muestran los resultados obtenidos de acuerdo al análisis realizado en el tercer capítulo del diseño de la viga en concreto reforzado, en acero estructural y en sección compuesta (sección 2).

Cuadro 3. Momento último resistente de las vigas de sección compuesta, en acero y en concreto reforzado.

Tipo	Mue
	(KN.m)
Concreto Reforzado	7,35
Compuesta	6,61
Acero Estructural	9,15

Fuente. Autor.

En el cuadro anterior se observa el momento último elástico de las vigas de diferentes sistemas estructurales sometidas a la misma carga, se evidencia que todas cumplen con la resistencia requerida a diferentes dimensiones de sección transversal.

16.3.2 COSTOS

En el siguiente diagrama se muestra los costos totales de la comparación entre las vigas propuesta de diferentes sistemas.

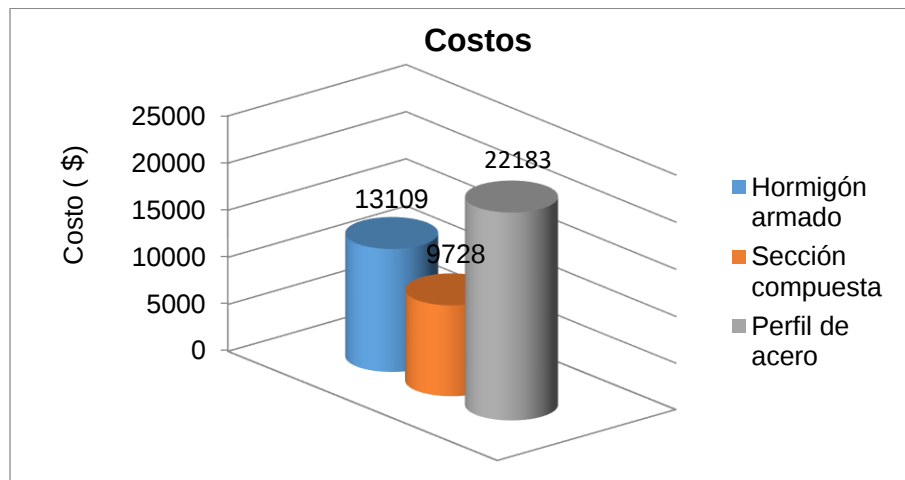


Figura 106. Precios de las de las vigas de sección compuesta, en acero y en concreto reforzado.

Fuente. Autor.

El mayor impacto que tiene el presente proyecto es que la viga de sección compuesta cumple a nivel de resistencia igual que una viga equivalente en concreto reforzado y acero estructural, pero con menores dimensiones geométricas en su sección transversal, aumento de la rigidez, disminución del costo (Figura 107) y disminución del peso de los elementos estructurales (Figura 108).

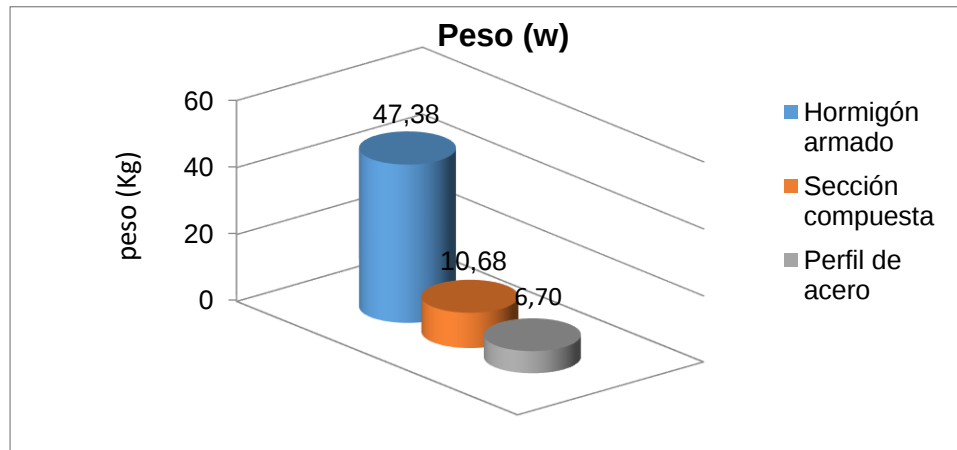


Figura 107. Pesos de las de las vigas de sección compuesta, en acero y en concreto reforzado.
Fuente. Autor.

A manera de resumen en la siguiente figura se muestra un comparativo entre las propiedades y características de las vigas analizadas.

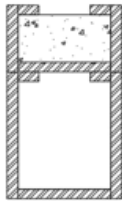
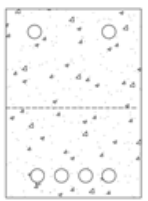
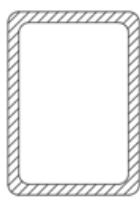
			
Inercia (cm ⁴)	1007,84	1293,96	159,29
Peso (Kg)	10,68	47,38	6,70
Costo (\$)	9728,00	13109,00	22183,00
Mue (KN*m)	6,61	7,35	9,15
b _{eff} (cm)	54,08	32,42	33,93
L máx (cm)	216,35	129,17	135,74
Acero (cm ²)	3,08	3,15	8,54
Concreto (cm ³)	27,02	154,21	0,00

Figura 108. Comparativo de las vigas analizadas.
Fuente. Autor.

16.4. COMPARACIÓN DE LAS VIGAS COMPUESTAS

16.4.1 MOMENTO ÚLTIMOS

En el siguiente cuadro se muestran los resultados obtenidos de acuerdo al análisis realizado en el tercer capítulo.

Cuadro 2. Momentos últimos resistentes de las secciones compuestas.

N°	Mue	Mup	W
	(KN.m)	(KN.m)	(Kg)
Sección 1	6,74	9,06	42,8
Sección 2	6,61	9,14	10,68
Sección 3	6,99	8,76	11,06
Sección 4	6,65	8,40	53,9
Sección 5	6,65	8,98	206,95
Sección 6	6,60	7,53	10,15
Sección 7	6,98	9,09	9,91
Sección 8	6,56	9,46	12,85

Fuente. Autor.

Todas las secciones compuestas estudiadas teóricamente cumplen con las cargas aplicadas, pero los momentos últimos elásticos y plásticos no son los mismos, estos variaron directamente con la geometría del miembro y la cantidad de elementos del mismo.

Nota: Los perfiles rellenos de concreto no requirieron un análisis teórico por longitud no arriostrada debido a posible fallo por pandeo lateral torsional, esto fue básicamente porque que el tubo de acero reduce drásticamente la posibilidad de la inestabilidad lateral por tener dos almas (constante de torsión), así como se evidencia en el anexo A.

16.4.2 COSTOS

En el siguiente diagrama se muestra los precios totales de las diferentes secciones compuestas estudiadas, estos variaron directamente con el aumento o disminución de la sección transversal y el área de material utilizado (acero o concreto).

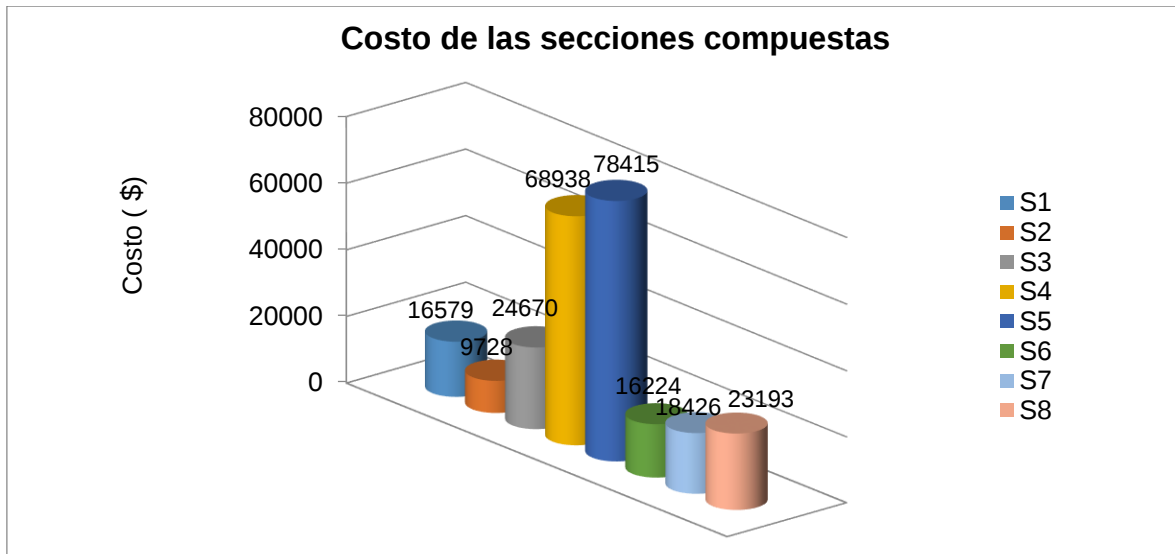


Figura 109. Precios de las secciones compuestas.
Fuente. Autor.

Entre las secciones estudiadas se observa que la sección número 2 o sección principal resultó ser en términos económicos la más factible debido a su menor cantidad de material utilizado con respecto a las demás, razón por la cual fue la elegida para fallar en el laboratorio.

17. DESCRIPCIÓN DE LOS PRODUCTOS FINALES

Los resultados obtenidos de los análisis previamente explicados y analizados responden a los objetivos planteados para el presente proyecto, la relación que existen entre estos se indica en la siguiente tabla.

Tabla 115. Resultados		
Resultado	Indicador	Objetivo Relacionado
Caracterización de la resistencia a flexión de la viga de sección compuesta	Cálculo en el desarrollo de la metodología	Objetivo específico 1
Caracterización de la resistencia a flexión de la viga de concreto reforzado	Cálculo en el desarrollo de la metodología	Objetivo específico 1
Caracterización de la resistencia a flexión de la viga de acero	Cálculo en el desarrollo de la metodología	Objetivo específico 1
Resistencia por adherencia directa de la sección compuesta	Cálculo en el desarrollo de la metodología	Objetivo específico 2
Resistencia experimental a flexión de la sección compuesta	Prueba de flexión de cuatro puntos	Objetivo específico 3
Resistencia a compresión de los cilindros de concreto	Prueba de compresión en cilindros de concreto	Objetivo específico 3

Fuente: Autor

En la realización del presente trabajo se espera que se produzcan impactos de carácter social, económico, técnico o científico que ratificarán la importancia del sistema estructural compuesto frente a otros sistemas convencionales, la tabla que indica los impactos mencionados se puede apreciar a continuación.

Tabla 116. Impactos esperados

Aspecto	Impacto	Supuesto	Plazo
Económico	Disminución en los costos de construcción y mantenimiento.	Aplicación de los resultados en el mejoramiento de la resistencia de los perfiles a pandearse y aumento de longitud no arriostrada.	Largo plazo
Técnico	Mejoramiento de las características de las secciones compuestas por medio de diferentes geometrías.	Implementación de los resultados por medio de empresas calificadas o para futuras investigaciones.	Largo plazo
Científico	Mayor conocimiento acerca de las fallas y puntos críticos en los perfiles laminados en frío.	Desarrollo de ensayos de resistencia de los perfiles con correlaciones de datos validas que se ajusten al comportamiento de la vida real.	Mediano plazo
Económico	Aumento en la demanda de construcciones de acero laminado en frío	Mayor viabilidad y resistencia en estas construcciones.	Largo plazo

Fuente: Autor

18. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

18.1. CONCLUSIONES

- De acuerdo a los resultados obtenidos es conveniente utilizar secciones compuestas debido a la eficacia que tienen para resistir cargas de la misma magnitud con disminución de la sección transversal, peso, costos y aumento de la rigidez de los elementos estructurales (vigas) con respecto a secciones de concreto reforzado o acero estructural.
- En el ensayo experimental se apreció la muy buena ductilidad de la viga compuesta N°2. A pesar de que el perlin inferior comenzó a pandearse por su relación de esbeltez, la viga continuó deformándose sin producir una falla frágil, lo cual es un valor agregado a este tipo de proyectos que garantizan y permiten conocer de muy buena manera los esfuerzos y el estado en el que se encuentra el miembro estructural.
- En el ensayo experimental se pudo observar la relación modular de la sección que trabajaba a compresión con respecto a la sección que trabajaba a tensión, esta mostró un comportamiento de deformación dúctil de la sección inferior y un comportamiento muy resistente de la sección a compresión debido al confinamiento permanente que le generaba el perlin superior al concreto y al aumento de la resistencia por pandeo local en las almas producida por el núcleo de concreto.
- En el ensayo experimental se evidencio que el pandeo local producido normalmente en las almas de los perfiles rellenos ocurre cuando los materiales han superado su límite elástico e incursionan en rango plástico, esto se debe a que la unión de las zonas comprimidas y las zonas traccionadas fue hecha por soldadura y las almas no eran continuas.
- Una característica que se presentó en las vigas compuestas analizadas fue la optimización de la resistencia y rigidez del acero debido a su ubicación en la periferia de la sección transversal, lo cual permitió disminuir las dimensiones geométricas del miembro debido a que el núcleo de concreto actuaba como un reforzamiento en el alma retrasando el pandeo local interior del perfil.
- En los resultados obtenidos del análisis teórico de las secciones compuestas se pudo evidenciar que la rigidez para estas no es directamente proporcional a la resistencia, obteniendo secciones muy rígidas, pero poco resistentes en donde se tenía un aumento de área en las fibras exteriores. Lo cual conlleva al aumento considerable del canto de la sección y al mal aprovechamiento de los materiales.
- Un gran aporte de las secciones compuestas que se evidencio en los resultados fue la disminución del peso del miembro debido a la sustitución

del volumen de concreto que normalmente se colocaba en la parte traccionada por un poco más de acero para dejar hueca dicha parte.

18.2. TRABAJOS FUTUROS

La mejora que tuvo el estudio realizado fue comprobar que los usos de secciones compuestas de diferentes geometrías resultaron ser mejor que secciones tradicionales de concreto reforzado y acero estructural, proporcionando un aumento de la rigidez de los miembros estructurales y una disminución del peso y costos de los mismos, de la misma manera que lo corroboran las diferentes investigaciones mencionadas en el anexo “Estado del arte”.

A partir de este trabajo se podrían generar nuevas investigaciones que apliquen la combinación de estos perfiles a sistemas de entrepiso, sean estos de placa maciza, aligerada u otros sistemas y de la mano poder realizar una comparación en términos de costos así como la que se realizó en el sistema vigacero explicado por el video corporativo subido a YouTube por Arcotecho Perú S.A.S, [15] .

19. BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. V. Clement, Diseño Basico De Estructuras De Acero, Bogotá: Escuela Colombiana De Ingenieria, 2011.
- [2] J. Gardner, «Investigaciones sobre miembros compuestos,» [En línea]. Available: https://web.northeastern.edu/compositesystems/wiki/Gardner_and_Jacobson_1967. [Último acceso: 22 12 2018].
- [3] Furlong, «Investigaciones sobre miembros compuestos,» 1968. [En línea]. Available: https://web.northeastern.edu/compositesystems/wiki/Furlong_1968. [Último acceso: 01 01 2019].
- [4] A. D. y. P. K. Piotr Lacki, «Investigaciones sobre miembros compuestos,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com.bdatos.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S0263822317331951>. [Último acceso: 24 12 2018].
- [5] E. E. Daniel Carapaz, «Investigaciones sobre miembros compuestos,» 2015. [En línea]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10370>. [Último acceso: 11 10 2018].
- [6] L. Han, «Investigaciones sobre miembros compuestos,» 2010. [En línea]. Available: https://web.northeastern.edu/compositesystems/wiki/Han_and_Li_2010. [Último acceso: 15 12 2018].
- [7] Y. L. B. Q. Lanhui Guo, «Investigaciones sobre miembros compuestos,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com.bdatos.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S0141029618313725>. [Último acceso: 12 12 2018].
- [8] S.-t. L. H.-y. Z. X.-f. W. Li-hua Chen, «Investigaciones sobre miembros compuestos,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com.bdatos.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S0143974X16305041#bb0030>. [Último acceso: 05 12 2018].
- [9] H. R. MarkLawson, «Investigaciones sobre miembros compuestos,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com.bdatos.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S0143974X18306783>. [Último acceso: 15 12 2018].
- [10] X. E. F. SANCHEZ, «ESCUELA POLITECNICA NACIONAL,» 12 2014. [En línea]. Available: <https://studylib.es/doc/1277797/cd-5929.pdf>. [Último acceso: 05 09 2018].
- [11] C. Z. , L. Y. B. K. Liang Huang, «Investigaciones sobre miembros compuestos,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S0263822317320986#f0015>. [Último acceso: 02 12 2018].

- [12] E. G. Cederwall, «Investigaciones sobre miembros compuestos,» 1990. [En línea]. Available: https://web.northeastern.edu/compositesystems/wiki/Cederwall,_Engstrom,_and_Grauvers_1990. [Último acceso: 15 12 2018].
- [13] R. H. B. JACK C. McCORMAC, «Diseño de Concreto Reforzado,» de *Diseño de Concreto Reforzado*, 2008, p. 724.
- [14] O. E. P. Vargas, «Investigaciones sobre miembros compuestos,» Universidad Nacional De Colombia, 2011. [En línea]. Available: <file:///C:/Users/daniel%20herrera/Downloads/oscarduardopinzonvargas.2011.preliminaresymarcoteorico.pdf>. [Último acceso: 22 02 2019].
- [15] Arcotecho, «Diseño de entepiso con placa facil,» arcotecho, 2015. [En línea]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=jUZok5d_qwU. [Último acceso: 22 02 2019].
- [16] E. P. Wigner, «Theory of traveling wave optical laser,» *Phys. Rev.*, vol. 134, pp. A635-A646, 2005.
- [17] A. C. Sole, Instrumentación Industrial, Mexico: Alfaomega, 2006.
- [18] L. L. a. H. Miao, «A specification based approach to testing polymorphic attributes,» de *Formal Methods and Software Engineering: Proceedings of the 6th International Conference on Formal Engineering Methods, ICFEM 2004*, Seattle, WA, USA,, November 8-12.
- [19] A. Rezi and M. Allam,, «Techniques in array processing by means of transformations,» de *Control and Dynamic Systems Vol. 69*, San Diego, Academic Press, 1995, pp. 133-180.
- [20] Colmena, «Catalogo de perfiles de acero,» Colmena, 2014. [En línea]. Available: <http://tuboscolmena.com/colmena/wp-content/uploads/2015/02/Manual-PlacaFacil.pdf>. [Último acceso: 20 02 2019].
- [21] S. Gálvez, «Investigaciones sobre miembros compuestos,» [En línea]. Available: https://www.academia.edu/33213374/CALCULAR_MODULO_DE_SECCI%C3%93N_DE_UN_PERFIL_I_Sx_y_Zx. [Último acceso: 15 12 2018].
- [22] J. Ricaldoni, «Diseño de miembros compuestos,» Instituto de estructuras y transporte, [En línea]. Available: <https://www.slideshare.net/FabianRuiz5/secciones-compuestas>. [Último acceso: 12 04 2018].
- [23] Seproinca, «Diseño de miembros en concreto reforzado,» [En línea]. Available: http://www.seproinca.com/site_o/. [Último acceso: 15 04 2018].
- [24] Tridilosa, «Investigaciones sobre miembros compuestos,» [En línea]. Available: <https://dokumen.tips/documents/clase-3p-23nov-losacero-y-tridilosa-568947ce145db.html>. [Último acceso: 03 03 2019].

20. ANEXOS

ANEXO A

CONSTANTE TORSIONAL PARA LA ESTABILIDAD DE MIEMBROS ESTRUCTURALES.

SECCIÓN		ÁREA (cm2)	INERCIA EN X (cm4)	MÓDULO PLÁSTICO	CONSTANTE DE TORSIÓN
	UPN 200	32,20	19,11	233,50	11,20
	IPN 200	33,40	2772,00	285,00	9,00
	HEB 120	34,00	864,40	165,00	13,80
	HSS 140x140x6	30,80	903,00	153,00	1450,00
	HSS 168,3x6	30,20	995,00	156,00	1990,00

Figura 110. Comparación de la constante de torsión.
Fuente. Inesa Adiestramiento.

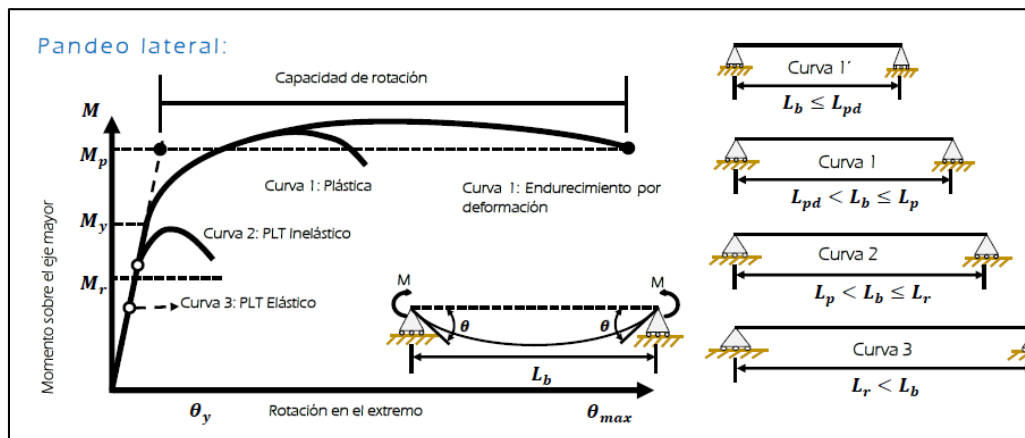


Figura 111. Longitud no arriostrada máxima debido al pandeo lateral.
Fuente. Ingeniero Sergio Valle.

ANEXO B

ESTADO DEL ARTE DE MIEMBROS COMPUESTOS

ANEXO C

COMPORTAMIENTO DE LA VIGA DE SECCIÓN COMPUESTA EN ANSYS MECHANICAL, VIDEO <https://www.youtube.com/watch?v=4hghX6IsC9w>.

GLOSARIO

- **Momento de fluencia (M_y):** correspondiente a la fluencia del ala en tensión y al inicio de la fluencia en su ala a compresión. La capacidad al inicio de la fluencia se calculará suponiendo una distribución lineal y elástica de los esfuerzos, limitando el máximo esfuerzo de compresión en el concreto a $0,7f'_c$ y el máximo esfuerzo en el acero a F_y .
- **Momento plástico (M_p):** momento correspondiente a la distribución plástica de esfuerzos sobre la sección transversal compuesta.
- **Región elástica:** Es el rango de esfuerzos donde el material al ser sometido a fuerzas externas, es capaz de retomar su geometría inicial una vez retirada la carga.
- **Límite elástico:** Es la tensión máxima que un material puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes.
- **Región plástica:** Es el rango de esfuerzos que inicia luego de que el material a fluido y finaliza con el esfuerzo último resistente a la rotura.
- **Límite plástico:** Es la tensión resistente última del material antes de sufrir la rotura.
- **Esfuerzo Rasante:** Es el producto de las tensiones tangenciales por el ancho de interés "t" de la sección en la superficie de deslizamiento.
- **Resistencia:** es la mayor o menor capacidad de la estructura para evitar la rotura. Hay que garantizar la seguridad mínima requerida frente a las posibilidades de colapso de la construcción.
- **Rigidez:** representa la mayor o menor capacidad de la estructura para oponerse a la deformación. Hay que evitar deformaciones excesivas, controlar las vibraciones y contribuir a la estabilidad del edificio.
- **Estabilidad:** define la capacidad de ésta para mantener su condición original de equilibrio.
- **Ductilidad:** la estructura debe ser capaz de sufrir suficientes deformaciones plásticas antes de alcanzar alguna forma de colapso.
- **Pandeo:** Se refiere a la curva o flexión que se produce generalmente en la mitad de una viga o columna debido a cargas de compresión o flexión.