

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL Y
COSTOS ENTRE UN EDIFICIO CONSTRUIDO CON SISTEMA DE PÓRTICOS
DE CONCRETO REFORZADO CONVENCIONAL Y UN EDIFICIO CON
MIEMBROS DE CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO Y SECCIONES MIXTAS

KEVIN FABIÁN MARTÍNEZ SANDOVAL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2018

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL Y
COSTOS ENTRE UN EDIFICIO CONSTRUIDO CON SISTEMA DE PÓRTICOS
DE CONCRETO REFORZADO CONVENCIONAL Y UN EDIFICIO CON
MIEMBROS DE CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO Y SECCIONES MIXTAS

KEVIN FABIÁN MARTÍNEZ SANDOVAL

TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ÁLVARO REY SOTO

ESPECIALISTA EN GERENCIA DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2018

DEDICATORIA

A mi madre, por enseñarme las bondades de hacer las cosas con amor y por ser mi constante apoyo.

A mi padre, por enseñarme los beneficios de trabajar con disciplina y responsabilidad.

A mi hermano, por ser mi leal compañero.

A todas aquellas personas que han aportado algo de sí para ayudarme a ser una mejor persona.

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Álvaro Rey Soto por confiarme el desarrollo de este proyecto de investigación y por su coordinación, al ingeniero Álvaro Hernando Rey Romero por su invaluable aporte al desarrollo de esta tesis y a los ingenieros Miguel Peralta y Fabián Díaz por el recurso teórico y bibliográfico ofrecido.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS.....	19
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. METODOLOGÍA.....	20
3. CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO	23
4. DISEÑO ESTRUCTURAL.....	28
4.1. CARGAS	28
4.2. NIVEL DE AMENAZA SÍSMICA.	29
4.3. MOVIMIENTO SÍSMICO DE DISEÑO.....	29
4.4. COEFICIENTE DE IMPORTANCIA.....	29
4.5. ESPECTRO DE DISEÑO.	29
4.6. GRADO DE IRREGULARIDAD DE LA ESTRUCTURA.	30
4.7. FUERZAS SÍSMICAS: MÉTODO DE FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE.	30
4.8. ANÁLISIS SÍSMICO DE LA ESTRUCTURA.....	31
4.9. VERIFICACIÓN DE DERIVAS.....	31
5. ESTRUCTURA EN CONCRETO REFORZADO.....	33
5.1. ESTRUCTURACIÓN Y MATERIALES USADOS.	33
5.2. GRADO DE IRREGULARIDAD DE LA ESTRUCTURA.	34
5.3. FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE.	34
5.3.1. Periodo fundamental T_a	34
5.4. ANÁLISIS DINÁMICO.....	34

5.4.1	Periodo fundamental T.....	35
5.4.2	Cortante basal V_{tj}	35
5.5.	VERIFICACIÓN DE DERIVAS.....	35
5.6.	DISEÑO SÍSMICO.....	37
5.7.	CUBICACIÓN Y ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS.	39
6.	ESTRUCTURA EN SECCIONES MIXTAS.	41
6.1.	ESTRUCTURACIÓN Y MATERIALES USADOS.	42
6.1.1.	Sistema de entepiso.....	42
6.1.2.	Columnas mixtas.....	50
6.1.3.	Conexiones.	52
6.2.	FUERZAS SÍSMICAS: MÉTODO DE FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE.	56
6.2.1.	Periodo fundamental T_a	56
6.2.2.	Cortante basal V_s	57
6.3.	ANÁLISIS DINÁMICO.....	57
6.3.1.	Periodo fundamental T.....	57
6.3.2.	Cortante basal V_{tj}	58
6.4.	VERIFICACIÓN DE DERIVAS.....	58
6.5.	DISEÑO SÍSMICO.....	60
6.6.	CUBICACIÓN Y ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS.	60
7.	ANALISIS COMPARATIVO	62
7.1.	ENFOQUE ESTRUCTURAL	62
7.2.	PESO TOTAL DE LA ESTRUCTURA	63
7.3.	PESO SISTEMA ENTREPISO.	64
7.4.	COMPARACIÓN DE COSTOS.....	64
8.	CONCLUSIONES	66
	BIBLIOGRAFÍA.....	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Relación agua/cemento y valores de $f'c$	27
Tabla 2. Cargas muertas superimpuesta.	28
Tabla 3. Cargas vivas por tipo de uso.....	28
Tabla 4. Periodo fundamental modal de la estructura en concreto reforzado, Etabs.	35
Tabla 5. Cortante basal estructura en concreto convencional, dirección X y Y.	35
Tabla 6. Cantidad y costo total concreto $f'c$ 28MPa.	40
Tabla 7. Cantidad y costo total del acero de refuerzo estructura en concreto convencional.	40
Tabla 8. Costo total estructura en concreto reforzado convencional y costo por metro cuadrado.	40
Tabla 9. Propiedades lámina metaldeck.	44
Tabla 10. Especificaciones técnicas conector espigo.	49
Tabla 11. Periodo T_a estructura en secciones mixtas, en dirección X y Y obtenidos por A.4.2.2.	57
Tabla 12. Cortante basal V_s estructura mixta.	57
Tabla 13. Periodo fundamental modal de la estructura en secciones mixtas, Etabs.	58
Tabla 14. Cortante basal estructura en secciones mixtas, dirección X y Y.....	58
Tabla 15. Cantidad y costo total concreto alto desempeño.	61
Tabla 16. Cantidad y costo total acero de perfil.	61
Tabla 17. Cantidad y costo total acero corrugado de muros y malla electro soldada en losa, estructura en secciones mixtas.	61
Tabla 18. Cantidad y costos espigos de cortante para steeldeck.	61
Tabla 19. Costo total estructura mixta y costo por metro cuadrado construido.....	61
Tabla 20. Porcentaje de reducción sección transversal elementos estructurales (área en planta).....	62

Tabla 21. Ganancia superficie útil.....	62
Tabla 22. Porcentaje de reducción sección transversal elementos estructurales (área en planta).....	63
Tabla 23. Ganancia superficie útil.....	63
Tabla 24. Peso total de cada estructura, coeficiente de reducción de peso y diferencia total.....	64
Tabla 25. Peso de cada sistema de entepiso de las estructuras y comparación..	64
Tabla 26. Costo total en materiales superestructura.....	65
Tabla 27. Costo materiales superestructura por metro cuadrado construido.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Confiabilidad método LRFD.....	20
Figura 2. Curva típica esfuerzo - deformación del concreto f'_c 49 MPa.....	24
Figura 3. Espectro de diseño Bucaramanga.....	30
Figura 4. Derivas admisibles NSR-10.....	32
Figura 5. Modelo estructura en concreto reforzado CSI Etabs 2016®.....	33
Figura 6. Derivas acción principal sismo X.....	36
Figura 7. Derivas acción principal Y.....	36
Figura 8. Columna 500 mm x 800 mm en concreto reforzado.....	37
Figura 9. Columna cuadrada 400 mm en concreto reforzado.....	38
Figura 10. Sección muro en concreto reforzado.....	38
Figura 11. Viga 500 mm x 450 mm en concreto reforzado.....	39
Figura 12. Sección recta placa de entre piso.....	39
Figura 13. Modelo estructura en secciones mixtas CSI Etabs 2016®.....	41
Figura 14. Sistema de losa con lámina colaborante.....	43
Figura 15. Curva esfuerzo – deformación para el acero del steeldeck.....	44
Figura 16. Viga sección mixta.....	45
Figura 17. Comportamiento flexional del perfil basado al tipo de sección (efecto pandeo local).....	46
Figura 18. Conectores de cortante tipo espigo.....	47
Figura 19. Geometría espigo de cortante.....	48
Figura 20. Instalación espigos con pistola auto perforante.....	49
Figura 21. Columna mixta PTE relleno con concreto.....	50
Figura 22. Relación porcentaje de carbono – ductilidad.....	51
Figura 23. Efecto contenido de carbono versus ductilidad.....	52
Figura 24. Conexión precalificada viga rígida I – columna tubular rellena de concreto DES.....	53
Figura 25. Conexión simple a cortante vigueta – viga principal.....	54
Figura 26. Conexión simple a cortante vigueta – muro de concreto reforzado.....	55

Figura 27. Conexión a momento viga mixta – muro en concreto reforzado.....	56
Figura 28. Derivas estructura en sección mixta para acción principal sismo en dirección X.....	59
Figura 29. Derivas estructura en sección mixta para acción principal sismo en dirección Y.....	59

LISTA DE ANEXOS

Los anexos están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Anexo A. Memorias de cálculo.

Anexo B. Planos estructurales.

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL Y COSTOS ENTRE UN EDIFICIO CONSTRUIDO CON SISTEMA DE PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO CONVENCIONAL Y UN EDIFICIO CON MIEMBROS DE CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO Y SECCIONES MIXTAS *

AUTOR: KEVIN FABIÁN MARTÍNEZ SANDOVAL **

PALABRAS CLAVES: CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO, SECCIONES MIXTAS, CONCRETO REFORZADO CONVENCIONAL.

DESCRIPCIÓN:

El presente documento expone un análisis comparativo entre dos sistemas constructivos con un enfoque estructural y económico limitado al mercado regional.

El primer sistema es una estructura construida en concreto reforzado convencional cuyas vigas y columnas soportan en su totalidad cargas verticales, además presenta muros de concreto reforzado que ayudan resistir fuerzas horizontales, configurándose un sistema estructural combinado. Para el segundo sistema se diseña una estructura en secciones mixtas, constituida por vigas metálicas en sección compuesta con placa de concreto reforzado y lámina colaborante steeldeck, columnas con perfiles tubulares rellenas en concreto y muros de concreto reforzado, todos estos elementos estructurales haciendo uso de concreto de alto desempeño, configurándose un sistema estructural dual.

Se comparan los dos sistemas estructurales y se analizan las posibles ventajas que puede presentar cada sistema respecto al otro, estructurales, ganancia de superficie útil, peso de cada sistema de entrepiso y el peso total de cada edificación, finalmente se realiza una comparación de costos directos de materiales requeridos para cada sistema estructural. Realizado el análisis comparativo entre las dos estructuras se procede a concluir cuales son las principales ventajas de usar un sistema estructural respecto al otro y se realizan las recomendaciones y sugerencias de posibles estudios futuros.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Álvaro Rey Soto. Especialista en gerencia de proyectos de construcción.

ABSTRACT

TITLE: COMPARATIVE ANALYSIS OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR AND COST BETWEEN A BUILDING BUILT WITH PORTICO SYSTEM OF CONVENTIONAL REINFORCED CONCRETE AND A BUILDING WITH COMPOSITE FRAMES AND HIGH PERFORMANCE CONCRETE. *

AUTHOR: KEVIN FABIÁN MARTÍNEZ SÁNDOVAL. **

KEYWORDS: HIGH PERFORMANCE CONCRETE, COMPOSITE SECTIONS, REINFORCED CONCRETE.

DESCRIPTION:

This document exposes an analytical comparison between two structural systems, which present a structural and economical focus, limited to the regional commerce.

The first system is a structure built of conventional reinforced concrete, constituted of beams and columns that support full vertical forces, and use shear walls to support part of the horizontal forces, constituting a combined structural system. The second system is a structure design with composite sections: composite beams, and concrete slab reinforced with steel deck, filled composite columns and concrete shear walls, every structural element is designed with high performance concrete, constituting a dual structural system.

Both structural systems were compared, and analyzes the possible advantages between each system, the structural advantages, gain of useful surface, beams and slab floor system weight, and total weight of each building, finally the research develops an economical comparison of the materials cost required for each structural system, the economical comparison uses prices offered for the regional companies. After complete the comparative analysis between each structure, the document exposes conclusions about the main advantages of using a structural system with respect to the other, develops suggestions about the optimal use for each structural system, conclusions about the regional industry of materials for construction, and proposes possible future research.

*

Bachelor

Thesis.

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Álvaro Rey Soto. Especialista en gerencia de proyectos de construcción

INTRODUCCIÓN

Las edificaciones en concreto reforzado es uno de los sistemas constructivos más usados en Colombia, entre las principales causas están:

- El recurso bibliográfico y reglamentación existente para su diseño.
- La experiencia constructiva que posee.
- Disponibilidad de materiales de construcción en la región.

La norma sismo resistente del 2010 (NSR-10) es la reglamentación sísmica que rige el diseño estructural en Colombia y brinda una amplia base teórica para el diseño de concreto reforzado, más sin embargo se hace necesario el estudio de nuevos materiales y sistemas estructurales que puedan representar una optimización del sistema constructivo, aumentando la superficie útil de las edificaciones, disminuyendo los tiempos de construcción, la cantidad y tipo de material requerido, lo cual tiene un impacto directo en el medio ambiente, pues la producción de materiales para la construcción es una de las industrias que más lo afectan¹.

El desarrollo de investigaciones acerca de nuevos materiales y tecnologías constructivas es una base para cumplir los objetivos de desarrollo sostenible trazados por las naciones para el siglo XXI.

Son conocidas las ventajas de las estructuras en secciones mixtas, entre las que sobresalen la disminución del área transversal de sus elementos estructurales, lo

¹ AGUDELO, H., HERNÁNDEZ, A. CARDONA, D. (2018). Sostenibilidad: actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia. [en línea] Revistas.unal.edu.co. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/30825/39307> [Citado 2 de mayo 2018].

que representa un ahorro en la cantidad de material y mayor velocidad en el proceso constructivo, pues se suele armar la estructura metálica y fundir el concreto de forma progresiva durante el levantamiento de la edificación, lo que se traduce en un ahorro del tiempo constructivo.

A pesar de ser un sistema estructural altamente usado en países como Estados Unidos desde mediados del siglo pasado, la región no cuenta con una extensa experiencia constructiva de este, lo cual representa una prevención para muchos diseñadores, pues es de gran valor la estadística constructiva del concreto reforzado, que genera mayor confianza en los diseñadores de la región.

Otras posibles causas del escaso uso de este sistema estructural en la región pueden ser la disponibilidad de mano de obra calificada para su construcción y la información y reglamentación local para su diseño, siendo usualmente necesario recurrir a literatura, códigos de diseño y tesis de investigación de otros países.

Los concretos de alto desempeño son concretos que poseen características que lo diferencian del concreto convencional, propiedades físico-químicas y mecánicas como su plasticidad, altas resistencias tempranas, poca segregación y mejor fluidez por nombrar algunas, propiedades que le permiten tener un mejor desempeño acorde a la necesidad constructiva. Estos concretos han sido altamente usados e investigados en países europeos como Holanda y Alemania, en América Estados Unidos y Chile entre otros, siendo su principal uso en súper estructuras como puentes, represas, y edificaciones de gran altura que suelen superar los 50 pisos.

Conociendo las características y propiedades de estos materiales y sistemas constructivos se realiza la presente investigación que pretende analizar su comportamiento en conjunto, es decir, la utilización de secciones mixtas con

concreto de alto desempeño en una edificación de uso residencial, estudio que presenta un enfoque estructural y económico limitado al entorno regional, para posteriormente ser comparado con una estructura en concreto reforzado que cumple con los mismos requerimientos de diseño y así poder concluir la viabilidad de utilización de este sistema estructural.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Comparar el comportamiento estructural y costos entre un edificio construido en la ciudad de Bucaramanga con sistema de pórticos de concreto reforzado convencional y un edificio con miembros de concreto de alto desempeño y secciones mixtas.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar los principales elementos estructurales de una edificación en secciones mixtas, los cuales pueden ser: placa maciza en concreto reforzado con lámina colaborante, vigas y columnas con perfil de acero embebido en concreto de alto desempeño y/o viga compuesta de perfil de acero con aporte de concreto de alto desempeño y/o columnas de perfil tubular de acero con relleno de concreto de alto desempeño.
- Analizar la viabilidad de construir una estructura residencial (grupo de uso I y subgrupo de ocupación R-2 según NSR – 10) de máximo siete niveles en secciones mixtas con concreto de alto desempeño en términos de costo directo de materiales para el sistema aporticado.

2. METODOLOGÍA

Los diseños ejecutados para el análisis comparativo de esta investigación fueron realizados mediante el método de factores de carga y resistencia (LRFD), el cual es aceptado por la NSR-10 como un método de diseño confiable. En la Figura 1 se muestra gráficamente la confiabilidad del método, donde la parte sombreada representa la probabilidad de falla, β es el índice de confiabilidad, R la resistencia de la estructura y Q la carga máxima esperada durante su vida útil.

Figura 1. Confiabilidad método LRFD



Fuente: PINEDA, Miguel. Diseño de elementos estructurales de sección compuesta con LRFD. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). México D.F.: Instituto Politécnico Nacional., 2005. 32 p.

El método LRFD presenta ventajas frente a otros métodos de diseño como el ASD, pues este último utiliza un factor de mayoración de carga igual para cargas vivas y muertas, que en estructuras pequeñas y medianas como la de la presente

investigación, que posee siete pisos o niveles, suele dar como resultado de diseño estructuras más pesadas².

Para la estructura construida en concreto reforzado se realiza un chequeo de análisis estructural y del diseño sísmico de sus elementos estructurales, posteriormente se realizan los cálculos de cubicación y análisis de precios unitarios APU de materiales requerido para el sistema estructural.

El diseño estructural en secciones mixtas está guiado por la metodología establecida en el literal A.3 de la NSR-10:

- Definición de las cargas sobreimpuestas a resistir por el sistema estructural establecidas en el literal B (NSR-10).
- Determinación del espectro de diseño para la ciudad de Bucaramanga como es objetivo de la investigación.
- Análisis de la geometría de la estructura y sus irregularidades en planta, altura y ausencia de redundancia.
- Análisis sísmico de la estructura.
- Verificación de derivas.
- Diseño sísmico.

² CORONEL, Claudio. Diseño de una edificación usando secciones mixtas. Monografía (Especialista en análisis y diseño de estructuras de acero y de hormigón armado). Cuenca.: Universidad de Cuenca. 2016. 21 p.

Una vez obtenidos los diseños de la estructura en secciones mixtas se procede a realizar los cálculos de cubicación de cantidades y APU de los materiales requeridos en el sistema estructural.

Obtenidos los resultados de los APU se procede con el análisis comparativo entre las dos estructuras para dos enfoques principales:

- Estructural: superficie útil, peso de la estructura, peso sistema de entrepiso.
- Económico: costo total de materiales del sistema estructural de cada edificación y costo por metro cuadrado construido.

Concluido el análisis comparativo entre las dos estructuras, se procede a la obtención de conclusiones y recomendaciones producto de la investigación.

3. CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO

Los concretos de alto desempeño se definen como concretos que poseen varias características además de su alta resistencia³ entre las cuales se pueden destacar:

- Facilidad de colocación y acabado sin segregación.
- Propiedades mecánicas a largo plazo.
- Desarrollo de resistencia a edades tempranas.
- Ductilidad.
- Estabilidad volumétrica.
- Larga vida de servicio en condiciones severas.

La propiedad mecánica de mayor relevancia para esta investigación es su módulo de elasticidad, el cual está directamente relacionado con la rigidez que la estructura posee, el control de derivas y deflexiones que a su vez determina la vulnerabilidad del concreto a sufrir fisuras.

El módulo de elasticidad establece la relación existente entre el esfuerzo que soporta el concreto y su respectiva deformación unitaria, en la Figura 2 se presenta gráficamente esta relación para el concreto de alto desempeño con resistencia a la compresión $f'c$ 49 MPa usado en el diseño de la estructura mixta, el módulo de elasticidad está representado por la pendiente de la curva esfuerzo vs deformación unitaria.

La NSR-10 ofrece una ecuación en su literal F.2.9.2.1.2 que permite calcular el módulo elástico del concreto usado en secciones mixtas. Para efectos de diseño, se sigue y cumple los requerimientos de diseño nacionales establecidos en la NSR-10, así pues el módulo elástico del concreto se calcula según la ecuación (3-1), que presenta límites de aplicación para $f'c$ máximo de 70 MPa y mínimo de 21 MPa.

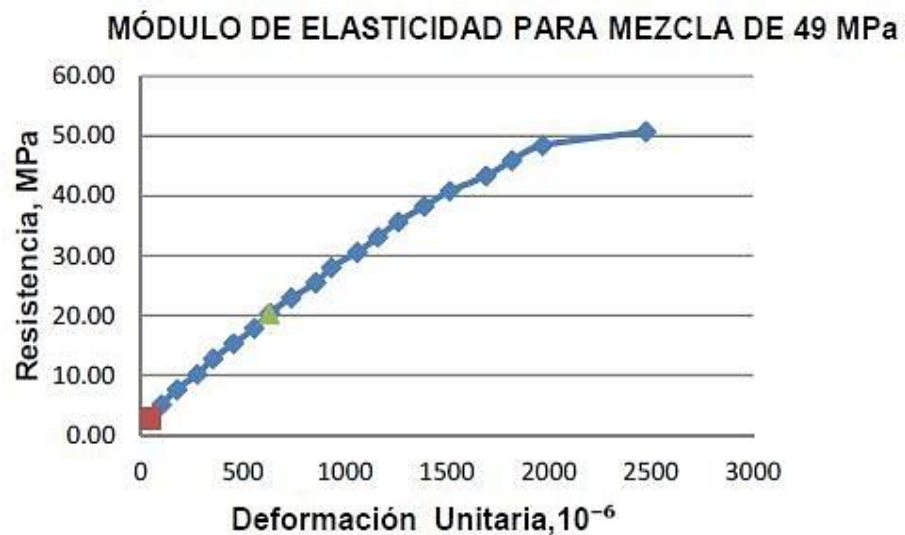
³ BENAVIDES, Ricardo. Concreto de alto desempeño. Tesis de grado (Magister en Ingeniería Civil). Bogotá.: Escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito.2014. 18 p.

$$E_c = 0.043W_c^{1.5}\sqrt{f'_c} \quad (3-1)$$

W_c es el peso del concreto por unidad de volumen, este debe estar en los límites $(1500 \leq W_c \leq 2500)$ kg/m³.

El valor del módulo de elasticidad para el concreto de alto desempeño usado en el diseño de las secciones mixtas es entonces $E=35\ 390$ MPa.

Figura 2. Curva típica esfuerzo - deformación del concreto f'_c 49 MPa.



Fuente: BENAVIDES, Ricardo. Concreto de alto desempeño. Tesis de grado (Magister en Ingeniería Civil). Bogotá.: Escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito.2014. 84 p.

Dentro de las propiedades físicas del concreto de alto desempeño utilizado en el diseño de la estructura mixta se tiene su alta fluidez, lo cual facilita su proceso de colocación, que sumado con un montaje previo de la estructura metálica se

configura un proceso constructivo secuencial y progresivo, que se suele traducir en una reducción de los tiempos de construcción.

En el mercado local se ofrecen concretos fluidos de diferentes resistencias que oscilan entre 10 MPa y 56 MPa, además de presentar diferentes valores máximos de tamaño nominal de agregado y asentamiento. Otras características que lo suelen diferenciar del concreto convencional son su color y desarrollo de resistencias aceleradas a 3 y 7 días, lo que se traduce en un menor tiempo de encoframiento, aunque la construcción en secciones mixtas representa una reducción del uso de formaletas, algunos ejemplos son las columnas tubulares rellenas de concreto y el sistema de entrepiso con losa colaborante steeldeck, pues la perfilera además de ser el acero estructural del sistema, realiza a su vez la función de encofrado en el proceso constructivo.

Es importante aclarar que el concreto de alta resistencia no es necesariamente un concreto de alto desempeño, pues existen algunas propiedades que se pueden mejorar independientemente de los valores de resistencia⁴, es decir, un concreto con resistencia a la compresión f'_c de 31 MPa podría ser catalogado de alto desempeño siempre y cuando presente mejoras en:

- Perfeccionamiento del proceso constructivo de colocación.
- Desarrollo de propiedades no mecánicas como durabilidad.
- Incremento de las propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad.

Sin embargo, las concreteras de la región ofrecen como concretos de alto desempeño a aquellos que poseen resistencia a la compresión f'_c igual y superior a los 42 MPa, debido al enfoque económico que presenta esta investigación se utilizarán dichos valores de f'_c para el diseño de la estructura mixta, específicamente

⁴ Ibíd., p. 19.

$f'c$ 49 MPa para todo el sistema, columnas rellenas, muros de cortante y sistema de entrepiso.

Otra propiedad de los concretos de alto desempeño es su relación agua/material cementante⁵. Dicha propiedad determina características del concreto como:

- Resistencia mecánica.
- Durabilidad.
- Retracción y fluencia de su estructura interna.
- Manejabilidad.
- Porosidad y compacidad.
- Asentamientos.

Es recomendable el uso de relaciones agua/cemento menores a 0,4 pues existe un mejor control de la estructura interna del concreto y por ende de su susceptibilidad a agentes externos.

La Tabla 1 muestra valores de resistencia a la compresión $f'c$ para diferentes relaciones agua/material cementante obtenidos de los ensayos del proyecto de investigación de concreto de alto desempeño⁶.

⁵ *Ibíd.*, p. 20.

⁶ *Ibíd.*, p. 21.

Tabla 1. Relación agua/cemento y valores de f'_c .

a/mc	MPa	PSI
0,67	21	3000
0,43	42	6000
0,38	49	7000
0,33	56	8000

Fuete: BENAVIDES, Ricardo. Concreto de alto desempeño. Trabajo de grado (Magister en Ingeniería Civil). Bogotá D.C.: Escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito. 2014. 21 p.

El concreto seleccionado para el diseño de los elementos en sección mixta de la presente investigación satisface la recomendación de presentar una relación agua/material cementante inferior a 0.4, pudiendo ser catalogado también bajo este criterio como concreto de alto desempeño.

4. DISEÑO ESTRUCTURAL

El diseño estructural se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo A.3 de la NSR-10, tanto de revisión para la estructura construida en concreto reforzado convencional como para el diseño de la estructura en secciones mixtas con concreto de alto desempeño.

4.1. CARGAS

Las cargas sobreimpuestas que debe soportar la edificación están basadas a las especificadas en el título B de la NSR-10, los valores se muestran en la Tablas 2 y 3.

Tabla 2. Cargas muertas superimpuesta.

Carga muerta superimpuesta [kN/m ²]	
Acabados	1,35
Fachada y mampostería	2,50

Tabla 3. Cargas vivas por tipo de uso.

Carga viva por tipo de uso [kN/m ²]	
Residencial	1,8
Escaleras	5,0
Balcones	5,0
Parqueadero	2,5
Cubierta	5,0

4.2. NIVEL DE AMENAZA SÍSMICA.

Las estructuras son diseñadas para la ciudad de Bucaramanga la cual presenta un nivel de amenaza sísmica alta según la tabla A.2.3-2 de la NSR-10. El valor de los coeficientes A_a y A_v son 0,25 para ambos casos.

4.3. MOVIMIENTO SÍSMICO DE DISEÑO.

Los coeficientes F_a y F_v son determinados por las características de estratificación del suelo donde se ubicará la estructura. El estudio de suelos realizado para la construcción de la edificación arroja un perfil de suelo tipo C, según las figuras A.2.4-1 y A.2.4-2 de la NSR-10 los valores de F_a y F_v son 1,2 y 1,55 respectivamente.

4.4. COEFICIENTE DE IMPORTANCIA.

Hace referencia a la importancia de la edificación para la recuperación de la comunidad en caso de ocurrencia de un sismo. La edificación en estudio posee uso de tipo residencial y según la tabla A.2.5-1 de la NSR-10 su coeficiente de importancia es uno (I).

4.5. ESPECTRO DE DISEÑO.

Los espectros de diseño presentan dos características principales: consideran la peligrosidad sísmica de una zona o región y son curvas suavizadas, es decir, no presentan las variaciones bruscas propias de los espectros de respuesta⁷.

La fuerza sísmica es introducida en la estructura en forma de espectro como una porción de la aceleración de la gravedad. Según el procedimiento definido en el

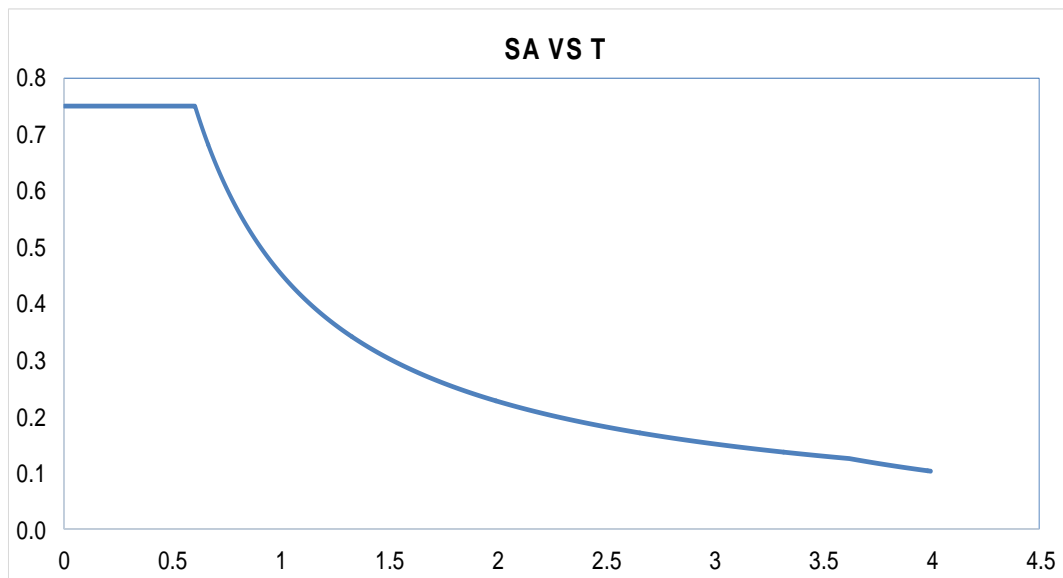
⁷ GARCÍA, Luis. Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico. Universidad de los Andes. Bogotá D.C. 1998. p. 5-48.

numeral A.2.6 de la NSR-10 el espectro de diseño para la ciudad de Bucaramanga es el mostrado en la Figura 3.

4.6. GRADO DE IRREGULARIDAD DE LA ESTRUCTURA.

El coeficiente de capacidad de disipación de energía R_o debe ser modificado en caso de presentarse irregularidades en planta, altura o ausencia de redundancia de la estructura según A.3.3 de la NSR-10. Según las tablas A.3-6 y A.3-7 de la NSR-10 la estructura presenta irregularidad en altura de tipo geométrica, entonces el factor de reducción Φ_a es igual a 0,9.

Figura 3. Espectro de diseño Bucaramanga.



4.7. FUZZAS SÍSMICAS: MÉTODO DE FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE.

El método de fuerza horizontal equivalente (FHE) es un procedimiento aproximado que permite determinar unas fuerzas sísmicas horizontales F_s sin necesidad de realizar un análisis dinámico de la estructura, con las cuales se hace el chequeo de

derivadas y posteriormente siendo reducidas por el coeficiente de disipación de energía R de la estructura se obtienen las fuerzas sísmicas de diseño E , usadas en las diferentes combinaciones de carga descritas en el título B de la NSR-10 para el diseño de los elementos estructurales.

Los cálculos del método FHE se realizan siguiendo la metodología del literal A.4 de la NSR-10.

Este método presenta algunas restricciones de aplicación descritas en A.3.4.2.1 y por eso restringe su uso para esta estructura, más sin embargo se debe realizar un ajuste al análisis dinámico como se describe en A.5.4.5.

4.8. ANÁLISIS SÍSMICO DE LA ESTRUCTURA.

El análisis dinámico de la estructura se realiza mediante el método de análisis modal espectral haciendo uso del software CSI Etabs®, el cual es un método de análisis dinámico que satisface los requerimientos del literal A.5.4 de la NSR-10.

4.9. VERIFICACIÓN DE DERIVAS.

La reglamentación nacional permite una deriva máxima de piso igual al 1% de la altura del entrepiso, esto con el fin de prevenir deformaciones inelásticas en los elementos estructurales, garantizar la estabilidad global de la estructura y prevenir el daño en los elementos estructurales que no forman parte del sistema de resistencia sísmica, además de la sensación de alarma y pánico entre las personas que ocupan la edificación en caso de ocurrencia de un temblor⁸.

⁸ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente. NSR-10, Segunda actualización, Bogotá, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS, 2010.

Figura 4. Derivas admisibles NSR-10.

Tabla A.6.4-1
Derivas máximas como porcentaje de h_{pi}

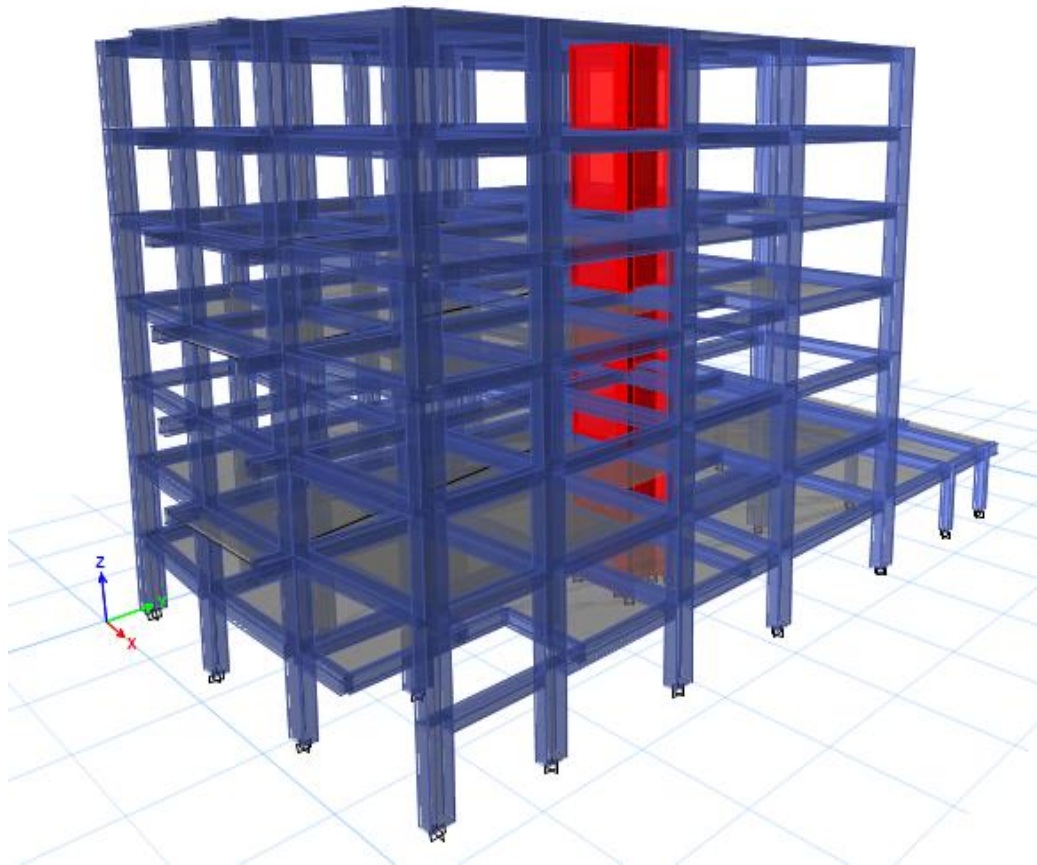
Estructuras de:	Deriva máxima
concreto reforzado, metálicas, de madera, y de mampostería que cumplen los requisitos de A.6.4.2.2	1.0% $\left(\Delta_{\max}^i \leq 0.010 h_{pi} \right)$
de mampostería que cumplen los requisitos de A.6.4.2.3	0.5% $\left(\Delta_{\max}^i \leq 0.005 h_{pi} \right)$

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente. NSR-10, Segunda actualización, Bogotá, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS, 2010.

El chequeo de derivas se realiza para todas las combinaciones posibles de acción del sismo teniendo en cuenta el 100% para la dirección principal de estudio, 30% en dirección perpendicular y dos terceras partes (2/3) para la componente vertical, además de considerar los efectos de torsión de piso tal como lo exige la NSR-10.

5. ESTRUCTURA EN CONCRETO REFORZADO

Figura 5. Modelo estructura en concreto reforzado CSI Etabs 2016®.



5.1. ESTRUCTURACIÓN Y MATERIALES USADOS.

La estructura en concreto convencional consta de un pórtico resistente a momento en concreto reforzado con capacidad de disipación de energía especial (DES) que soporta en su totalidad cargas verticales y hace uso de muros en concreto reforzado DES para resistir fuerzas horizontales (sísmicas) configurando un sistema estructural combinado.

La edificación posee columnas rectangulares de 50 cm x 80 cm y columnas cuadradas de 40 cm, un núcleo de muros de cortante de espesor de 25 cm y 35 cm, y sistema de entrepiso con vigas y losa aligerada, todos estos elementos en concreto reforzado, ver Figura 5.

Los materiales utilizados en el sistema estructural son concreto de resistencia a la compresión $f'c$ 28 MPa y acero de refuerzo tipo barra corrugada, con un esfuerzo mínimo de fluencia f_y de 420 MPa según certificación técnica de la NTC 2289.

5.2. GRADO DE IRREGULARIDAD DE LA ESTRUCTURA.

El valor R_o depende del sistema estructural y está establecido en la tabla A.3-3 de la NSR-10, para pórticos resistente a momentos en concreto reforzado es igual a siete 7 y para los muros es igual a 5. Debido a que hay una combinación de sistemas estructurales en planta según A.3.2.5 de la NSR-10, el máximo valor de R_o es 6,25; así pues el valor de R es igual a 5,625.

5.3. FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE.

5.3.1. Periodo fundamental T_a . El periodo fundamental T_a se calcula mediante el procedimiento descrito en A.4.2.2.

$$T_a = 0.695 [s]$$

5.4. ANÁLISIS DINÁMICO.

A continuación se muestran los resultados obtenidos del análisis modal espectral de la estructura en concreto reforzado haciendo uso del software CSI Etabs 2016®.

5.4.1 Periodo fundamental T.

Tabla 4. Periodo fundamental modal de la estructura en concreto reforzado, Etabs.

Periodo modal	
Tx [s]	0,807
Ty [s]	0,827

5.4.2 Cortante basal Vtj.

Tabla 5. Cortante basal estructura en concreto convencional, dirección X y Y.

Cortante basal Vtj	
Vtj x [kN]	10814,16
Vtj y [kN]	12236,53

El ajuste del análisis dinámico al de FHE se realiza según se describe en A.5.4.5 (NSR-10).

5.5. VERIFICACIÓN DE DERIVAS.

Las Figuras 6 y 7 muestran el chequeo de derivas en el análisis sísmico de la estructura, la gráfica en color azul representa las derivas en dirección X y la roja en dirección Y, se puede observar que es menor al 1% para ambos casos.

Figura 6. Derivas acción principal sismo X.

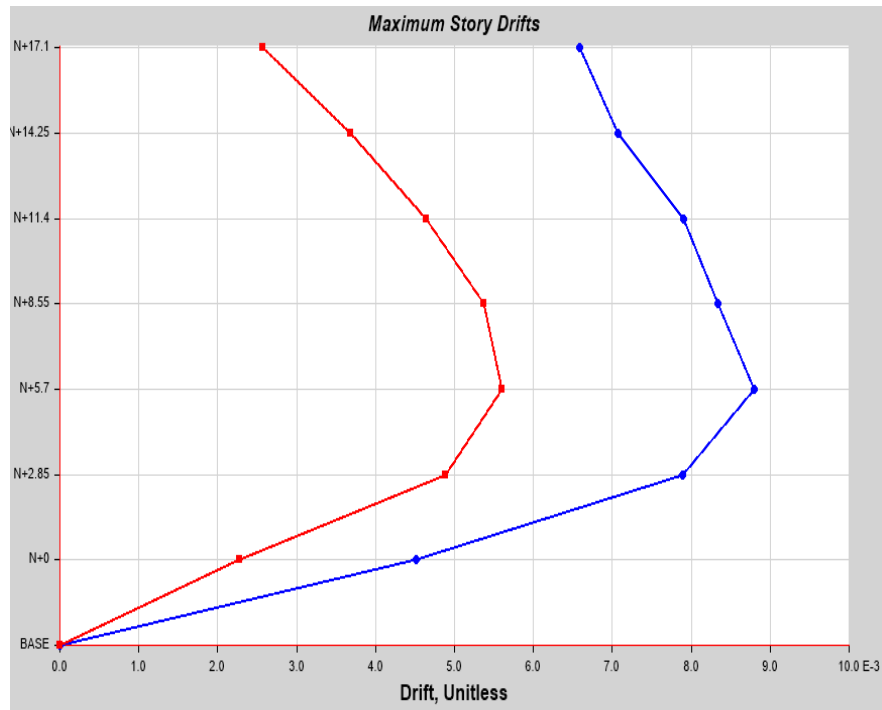
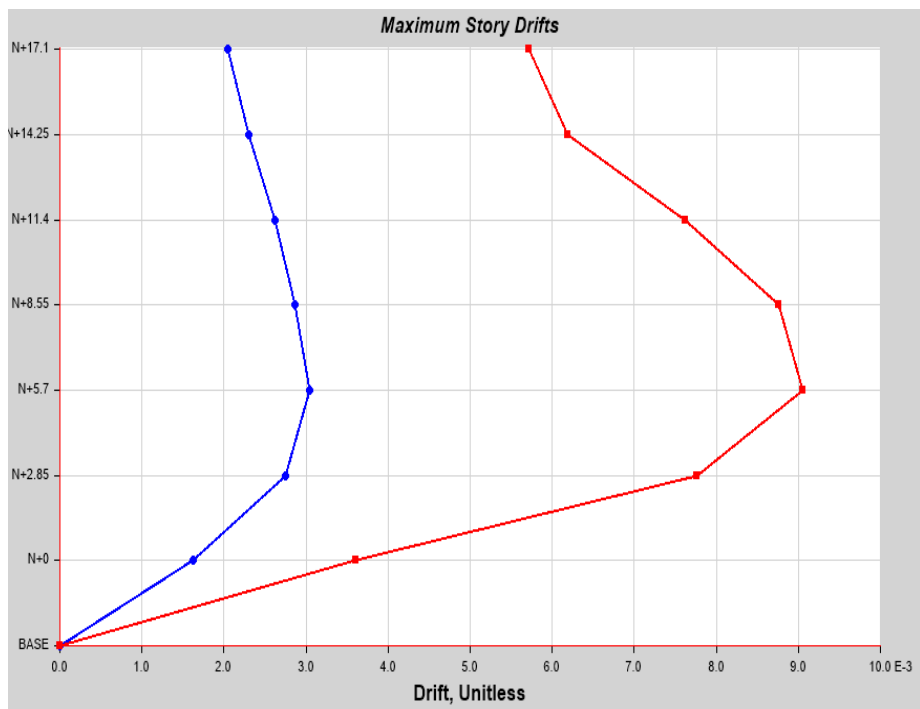


Figura 7. Derivas acción principal Y.



5.6. DISEÑO SÍSMICO.

El chequeo de análisis estructural de la edificación se realiza con la ayuda del software CSI Etabs®.

El diseño de los elementos en concreto reforzado cumple los requerimientos establecidos en el título C de la NSR-10, además de los requisitos exigidos para una estructura de clasificación DES. Las combinaciones de carga para diseño son las descritas en el literal B.2.4 de la misma norma. Algunos de los elementos del sistema estructural son:

Figura 8. Columna 500 mm x 800 mm en concreto reforzado.

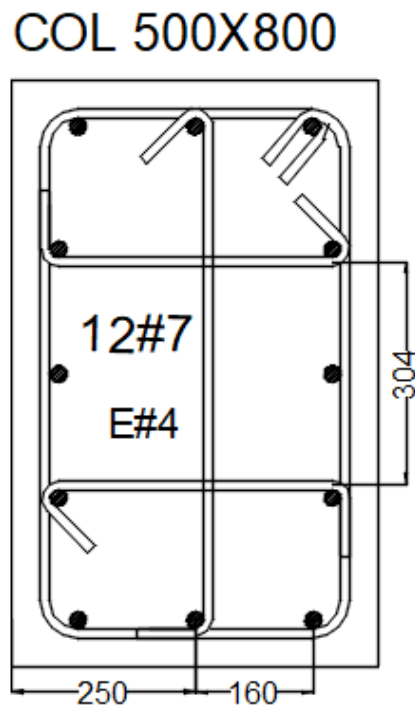


Figura 9. Columna cuadrada 400 mm en concreto reforzado.

COL 400X400

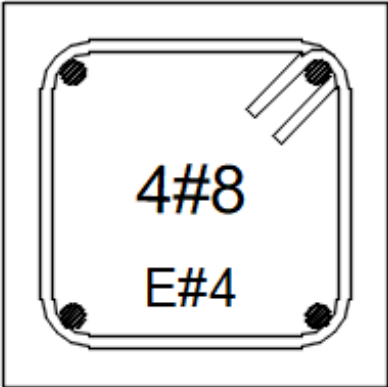


Figura 10. Sección muro en concreto reforzado.

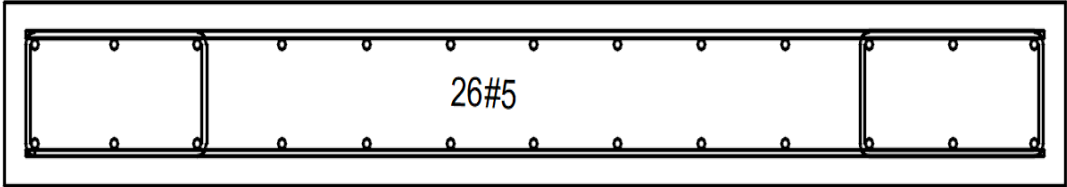


Figura 11. Viga 500 mm x 450 mm en concreto reforzado.

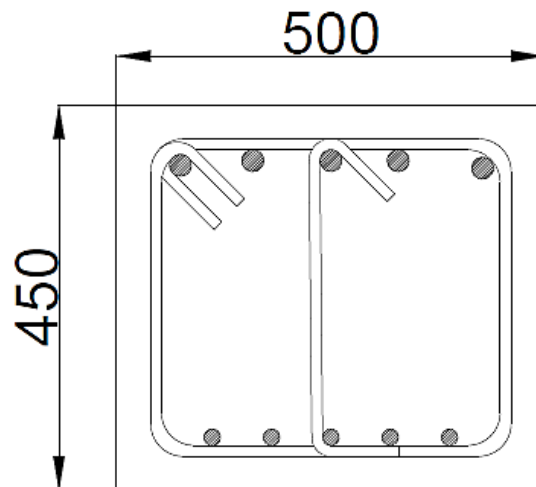
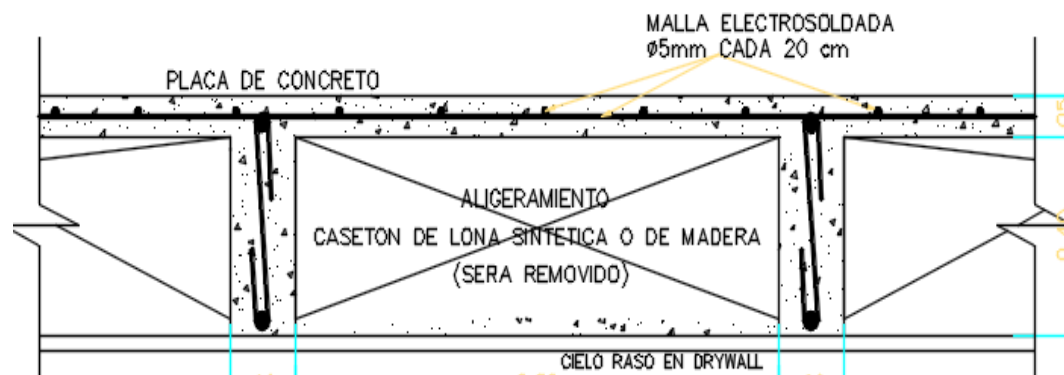


Figura 12. Sección recta placa de entre piso.



5.7. CUBICACIÓN Y ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS.

En la presente sección se muestran los resultados del cálculo de cantidades de material y el análisis de precio unitario para el concreto y el acero de barra corrugada en la estructura de concreto reforzado.

Los precios del concreto son los ofertados en la región por CEMEX COLOMBIA® para concreto fluido con resistencia $f'c$ 28 MPa, el precio incluye el costo del bombeo por metro cúbico.

Tabla 6. Cantidad y costo total concreto $f'c$ 28MPa.

Concreto 28 MPa	
V [m3]	723.55
Costo [COP / m3]	\$ 378,800.00
Costo total (COP)	\$ 274'080,740.00

Tabla 7. Cantidad y costo total del acero de refuerzo estructura en concreto convencional.

Acero barra corrugada	
M [Ton]	40.11
Costo (COP)	\$ 221'563,087.30

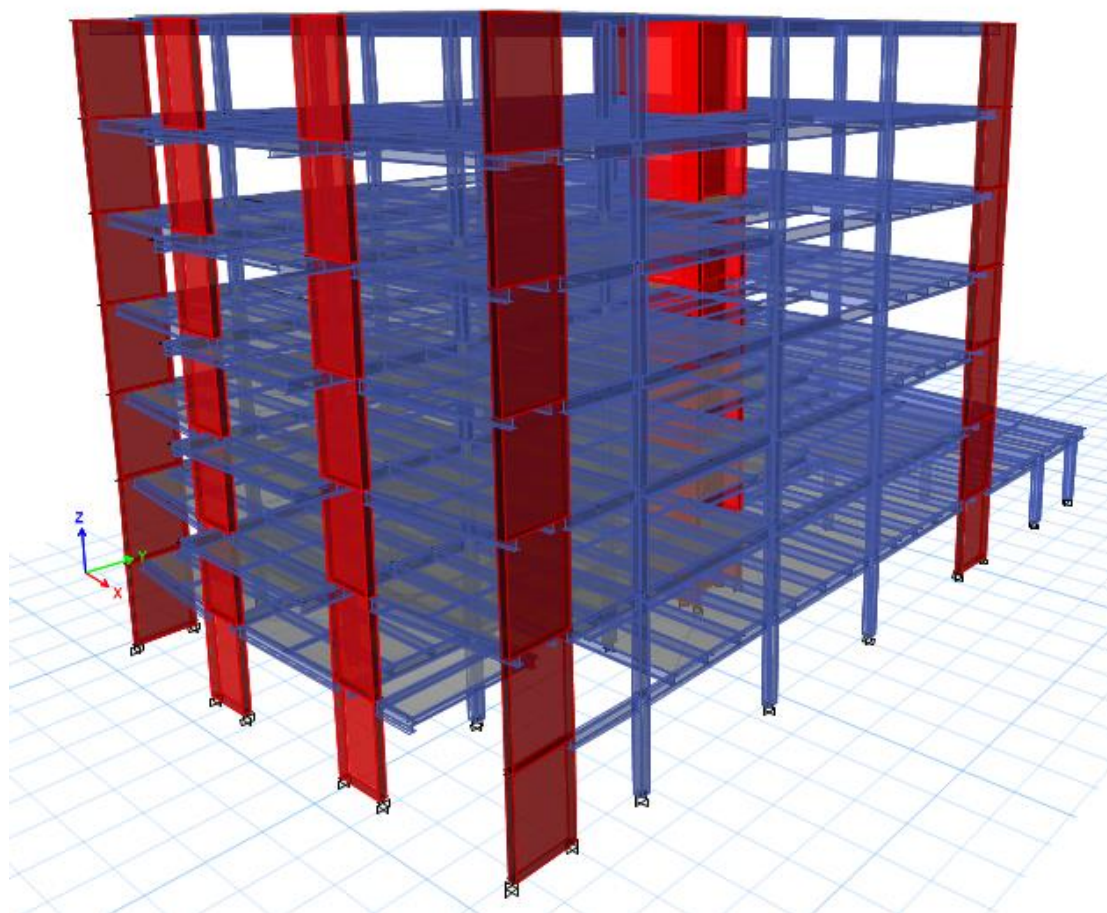
Finalmente el costo total del sistema estructural en concreto reforzado es:

Tabla 8. Costo total estructura en concreto reforzado convencional y costo por metro cuadrado.

Costo total (COP)	\$ 495'643,828.00
Costo [COP / m2]	\$ 173,612.61

6. ESTRUCTURA EN SECCIONES MIXTAS.

Figura 13. Modelo estructura en secciones mixtas CSI Etabs 2016®.



Las secciones mixtas se caracterizan por ser elementos estructurales de concreto que poseen altas cuantías de acero o perfiles de acero con aportes de concreto. Según la reglamentación nacional una columna en concreto reforzado convencional puede tener cuantías de acero de refuerzo que oscilan entre el 1% y 4% del área de sección bruta, a diferencia de una columna en sección mixta que puede tener cuantías de acero estructural alrededor del 20% del área bruta de la sección. Esto

trae como consecuencia un aumento en la rigidez y reducción del dimensionamiento transversal del elemento.

6.1. ESTRUCTURACIÓN Y MATERIALES USADOS.

Para el sistema de resistencia sísmica de la edificación de siete niveles analizada en este documento se diseña un pórtico resistente a momentos compuesto con capacidad de energía especial (PRMC-DES) según se define en el literal F.3.7.3 de la NSR-10, con conexiones simples a cortante y a momento totalmente restringidas, además de hacer uso de muros de concreto DES según C.21.9 de la NSR-10 para resistir fuerzas horizontales, configurándose un sistema dual definido en el literal A.3.2.1.4 de la NSR-10, ver Figura 13.

6.1.1. Sistema de entrepiso.

6.1.1.1. Losa compuesta con steeldeck. Para el sistema de entrepiso se hace uso de losa colaborante reforzada con lámina steeldeck, ver Figura 14. El diseño está guiado por las especificaciones del AISC 360-16 y el manual técnico de Acesco para metaldeck grado 40, satisfaciendo los requerimientos de diseño del literal F.2.9 de la NSR-10.

Figura 14. Sistema de losa con lámina colaborante.



Fuente: CRISAFULLI, Javier. Diseño sismorresistente de construcciones en acero. 4ta Edición. Santiago de Chile. Asociación latinoamericana del Acero, ALACERO, 2014. 18 p.

En la Tabla 9 se puede observar un resumen de las características de la lámina deck galvanizada.

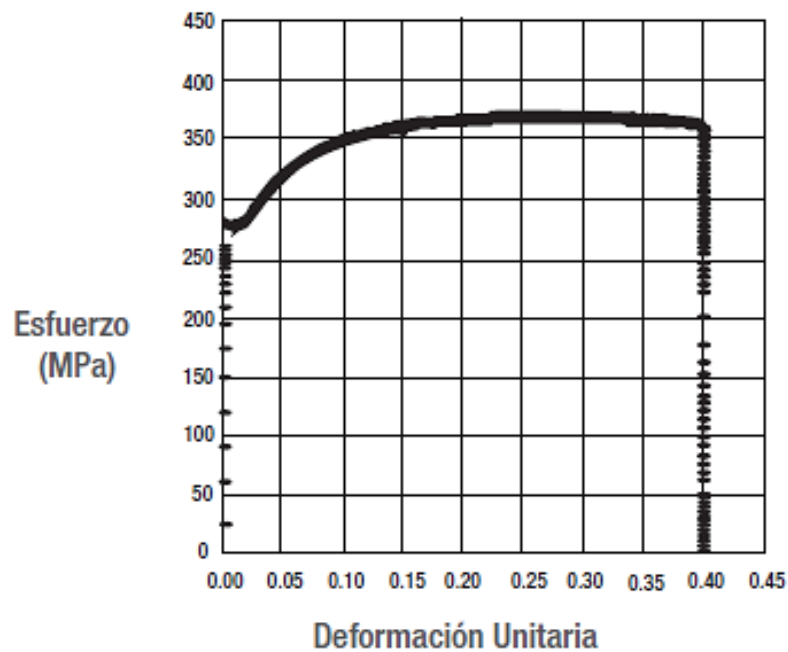
Los espesores de losa pueden tener valores entre 100 mm y 150 mm, para este diseño se elige un espesor de 110 mm, con separaciones entre viguetas máximas de 1.5 m, pues para dicho espesor de losa separaciones mayores entre viguetas están asociados problemas de vibración, lo cual repercute negativamente en el confort de los usuarios de la edificación.

Tabla 9. Propiedades lámina metaldeck.

Propiedades de lámina METALDECK	
Punto de fluencia mínimo	40 ksi (272 MPa)
Resistencia última	55 ksi (380 MPa)
Elongación en 50 mm	16%

Fuente: ACESCO. Metaldeck grado 40 Manual técnico. Colombia. Nical Impresores Ltda, 2013. 15 p.

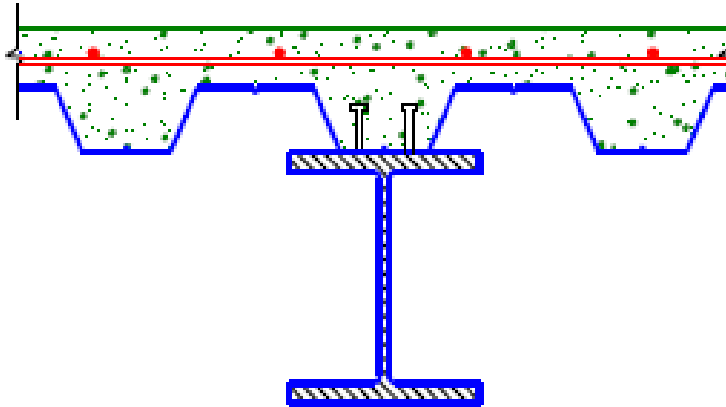
Figura 15. Curva esfuerzo – deformación para el acero del steeldeck.



Fuente: ACESCO. Metaldeck grado 40 Manual técnico. Colombia. Nical Impresores Ltda, 2013. 15 p.

6.1.1.2. Viga mixta. La viga mixta se conforma con un perfil de acero tipo W conectado en su parte superior a la losa a través de espigos de cortante.

Figura 16. Viga sección mixta.



Fuente: CRISAFULLI, Javier. Diseño sismorresistente de construcciones en acero. 4ta Edición. Santiago de Chile. Asociación latinoamericana del Acero, ALACERO, 2014. 18 p.

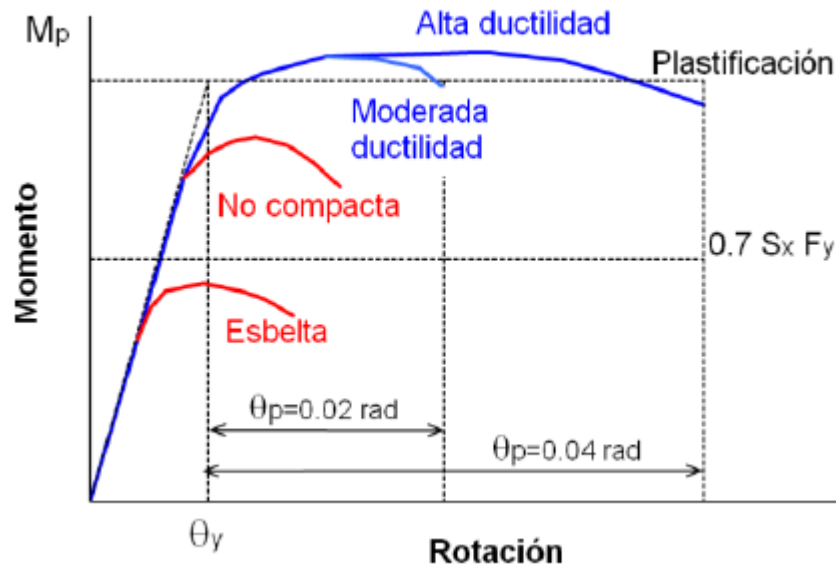
Para el diseño de las vigas mixtas del sistema de entrepiso de la edificación se utilizaron perfiles IPE y W, con especificaciones técnicas de acero ASTM-A572 grado C, los ofrecidos en el mercado regional certificados con la NTC 1985 garantizan un esfuerzo de fluencia mínimo f_y igual a 345 MPa y una resistencia a la tracción F_u de 450 MPa.

Un perfil puede ser clasificado como compacto, no compacto o esbelto según su relación ancho – espesor, los perfiles compactos previenen efectos de pandeo local además de presentar una mayor ductilidad ante las sollicitaciones demandadas como muestra la Figura 17.

Para el diseño del sistema de entrepiso se utilizaron perfiles de sección compacta según la tabla F.2.2.4-1b (NSR-10). Las viguetas se conectan a través de conexión simple tipo cortante y no forman parte del sistema de resistencia sísmica. Las vigas cargueras son conectadas mediante conexión a momento totalmente restringida y

forman parte del sistema de resistencia sísmica bajo los requerimientos de elemento estructural DES establecidos en la tabla F.3.4-1 de la NSR-10, los cuales presentan una mayor ductilidad y capacidad de formar rótulas plásticas ante acciones sísmicas previniendo posibles fallas frágiles.

Figura 17. Comportamiento flexional del perfil basado al tipo de sección (efecto pandeo local).



Fuente: CRISAFULLI, Javier. Diseño sismorresistente de construcciones en acero. 4ta Edición. Santiago de Chile. Asociación latinoamericana del Acero, ALACERO, 2014. 10 p.

6.1.1.3. Arriostramiento en vigas. Para el arriostramiento lateral y torsional de las vigas metálicas se utiliza un perfil tubular PTE 120 mm x 60 mm x 3 mm, que son conectados mediante cordón de soldadura a la parte superior de compresión del

perfil metálico. Por resultado de diseño todas las viguetas en sección mixta presentan arriostramiento lateral a la mitad de su luz.

6.1.1.4. Conectores de corte. Los conectores de cortante pueden ser espigos o perfiles C que se ubican en el valle de la nervadura del steeldeck y son conectados a la viga en su parte superior (ver figura 18). Estos conectores garantizan una fuerza de transferencia entre la losa de concreto y la viga metálica tal que permite trabajar a los dos elementos como sección única mixta.

Figura 18. Conectores de cortante tipo espigo.



Fuente: ACESCO. Ficha técnica Metaldeck. 2da Edición. Malambo. 2017. 4 p.

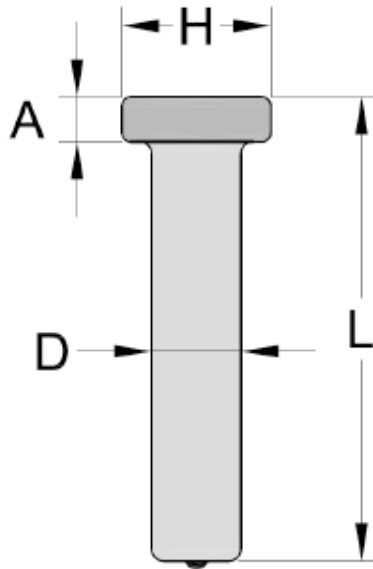
La ecuación F.2.9.8-1 de la NSR-10 determina la resistencia nominal de un espigo con cabeza a esfuerzo cortante. La fuerza total de transferencia $V'r$ que puede ser resistida por la interface perfil metálico-losa en concreto determina la capacidad de

la sección a trabajar como sección mixta. El cálculo de $V'r$ depende de la orientación del tablero respecto a la viga y el número de espigos por valle en el steeldeck.

Para todos los diseños de viga mixta de la presente investigación se hizo uso de un solo espigo por valle en el tablero.

Los espigos con cabeza comercializados en la región presentan diferentes alturas, diámetros nominales y valores de resistencia. Para efectos de este diseño se usan conectores S3L 3/4 x 3-7/8 MS MD2 ofrecidos por ACESCO®, los cuales presentan dimensiones $D = 19.05$ mm, $L = 98.43$ mm, $H = 31.75$ mm y $A = 9.53$ mm, ver Figura 19. Las especificaciones técnicas de estos conectores se resumen en la Tabla 10 y satisfacen los requerimientos de la NSR-10.

Figura 19. Geometría espigo de cortante.



Fuente: ACESCO. Ficha técnica Metaldeck. 2da Edición. Malambo. 2017. 4 p.

Tabla 10. Especificaciones técnicas conector espigo.

Especificaciones conector	
Fu [MPa]	450
Fy [MPa]	350
% elongación	20%
% reducción de área	50%

Fuente: ACESCO. Ficha técnica Metaldeck. 2da Edición. Malambo. 2017. 4 p.

Es importante resaltar que el método de instalación más adecuado de los espigos es por medio de pistola auto perforante, pues a pesar que la soldadura está permitida como proceso de instalación, no suele realizarse correctamente, generando daños en el tablero de lámina galvanizada y comprometiendo así su integridad estructural, además de anular la acción conjunta de la sección mixta.

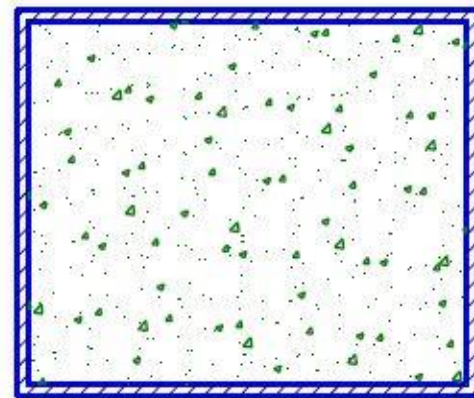
Figura 20. Instalación espigos con pistola auto perforante.



Fuente: CRISAFULLI, Javier. Diseño sismorresistente de construcciones en acero. 4ta Edición. Santiago de Chile. Asociación latinoamericana del Acero, ALACERO, 2014. 16 p.

6.1.2. Columnas mixtas. Para las columnas se hace uso de secciones tubulares (PTE) de acero de especificación ASTM - A500 C, rellenos de concreto de alto desempeño con resistencia a la compresión f'_c de 49 MPa, ver Figura 21. Los aceros ofrecidos en la región certificados a través de la NTC 4526 garantizan un esfuerzo de fluencia mínimo f_y igual a 345 MPa y un esfuerzo último mínimo de 430 MPa.

Figura 21. Columna mixta PTE relleno con concreto.



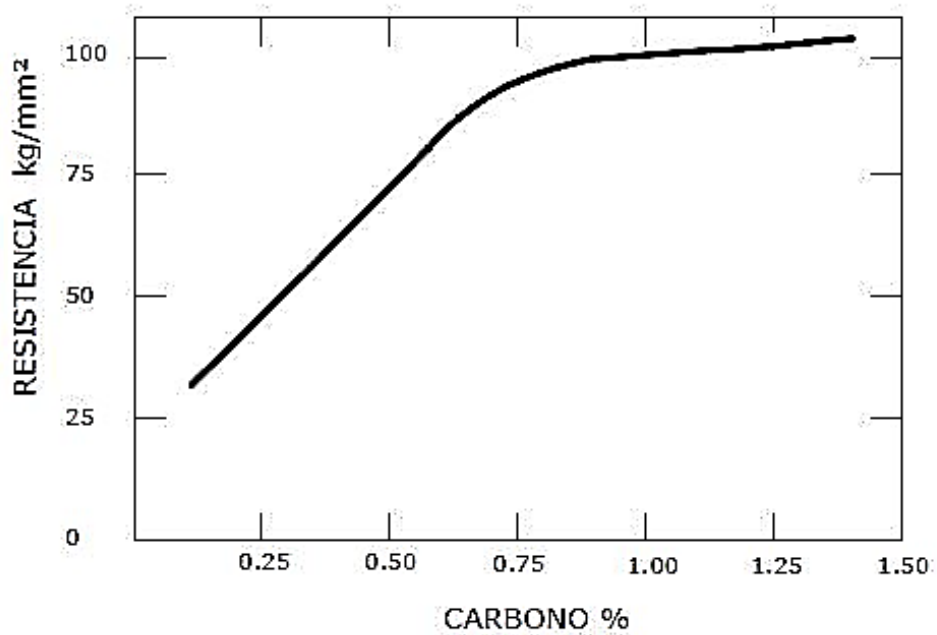
Fuente: CRISAFULLI, Javier. Diseño sismorresistente de construcciones en acero. 4ta Edición. Santiago de Chile. Asociación latinoamericana del Acero, ALACERO, 2014. 17 p.

El acero estructural debe contar con la resistencia mecánica apropiadas para soportar las sollicitaciones a las cuales será sometido sin que se vea comprometida su ductilidad, la cual determina su capacidad de deformación. Estos perfiles metálicos presentan contenidos máximos de carbono del 0,27%, manganeso 1,40%, fósforo 0,045%, azufre 0,045%⁹. En la Figura 22 se puede apreciar la relación existente entre el contenido de carbono y la resistencia del acero estructural.

⁹ PINEDA. Op. Cit, p. 14.

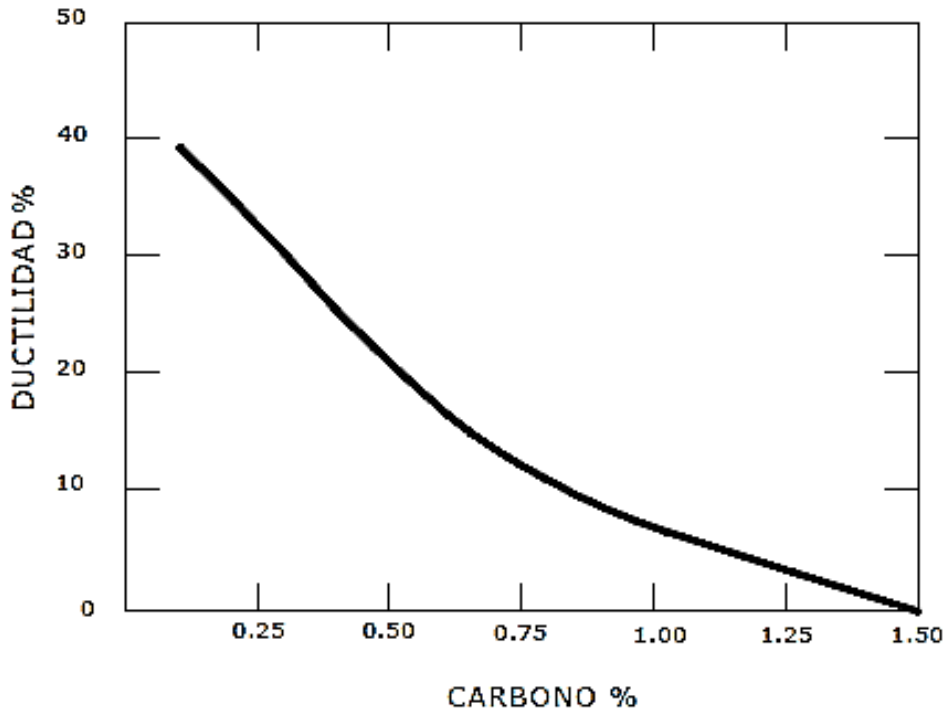
De igual forma se puede apreciar en la Figura 23 como aumentos en la cantidad de carbono en el acero disminuyen su ductilidad, característica de gran relevancia en el diseño de la columna compuesta ya que pertenece al sistema de resistencia sísmica.

Figura 22. Relación porcentaje de carbono – ductilidad.



Fuente: PINEDA, Miguel. Diseño de elementos estructurales de sección compuesta con LRFD. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). México D.F.: Instituto Politécnico Nacional. 2005, 12 p.

Figura 23. Efecto contenido de carbono versus ductilidad.



Fuente: PINEDA, Miguel. Diseño de elementos estructurales de sección compuesta con LRFD. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). México D.F.: Instituto Politécnico Nacional. 2005, 13 p.

Para el diseño de las columnas en sección mixta se utilizaron perfiles PTE cuadrados de 300 mm con espesor de pared de 10 mm.

6.1.3. Conexiones. Los elementos estructurales que forman parte del sistema de resistencia sísmica, tales como vigas principales, columnas compuestas y muros estructurales son conectados por medio de conexiones a momento totalmente restringidas tal como lo exige la NSR-10 en su literal F.2.10 y F.3.4.2. Las demás uniones entre elementos que no forman parte del sistema de resistencia sísmica se realiza por medio de conexiones simples a cortante, como por ejemplo las juntas vigueta – viga y vigueta – muro.

6.1.3.1. Conexión viga – columna compuesta. El diseño de la conexión viga – columna compuesta está guiada por la metodología planteada en el trabajo de grado de conexiones precalificadas en Colombia¹⁰ para estructuras en secciones mixtas DES.

Figura 24. Conexión precalificada viga rígida I – columna tubular rellena de concreto DES.

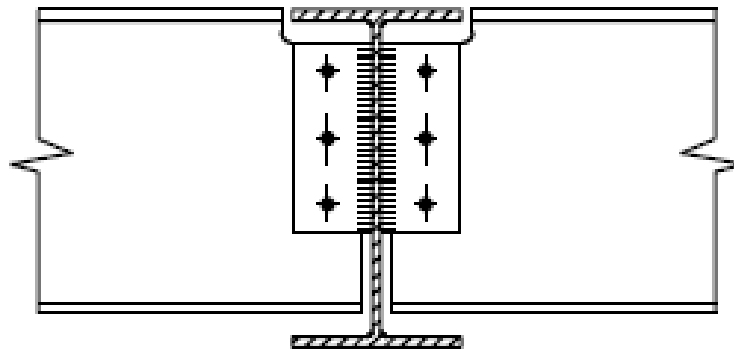


Fuente: DELGADO, Carlos. Conexiones precalificadas en Colombia. Trabajo de grado (Magister en Ingeniería Estructural). Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. 2017, 121 p

¹⁰ DELGADO, Carlos. Conexiones precalificadas en Colombia. Bucaramanga, 2017, 382 p. Trabajo de grado (Magister en Ingeniería Estructural). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil.

6.1.3.2. Conexión vigueta – viga. La conexión entre las viguetas y las vigas principales del sistema de entrepiso es simple a cortante, su diseño está basado en la metodología del capítulo 10 del manual para construcciones en acero del AISC – 14. La vigueta presenta un desalete en su ala superior para garantizar el mismo nivel de entrepiso y facilitar el proceso constructivo.

Figura 25. Conexión simple a cortante vigueta – viga principal.



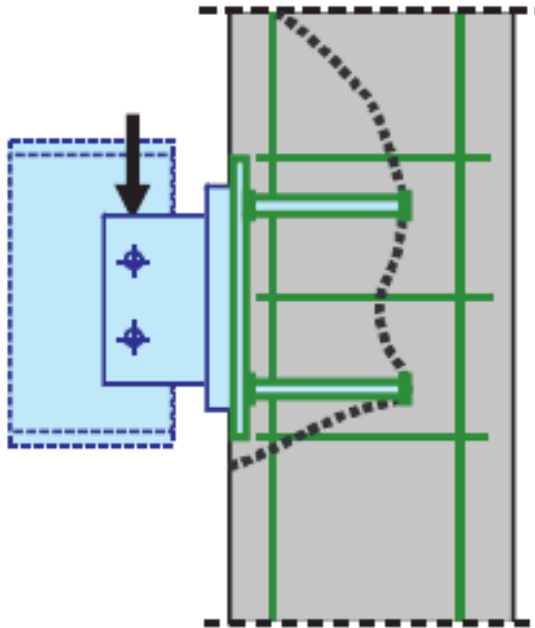
Fuente: AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. AISC. Steel Construction Manual. Ed 14th. Chicago. Illinois: AISC. 2011. ISBN 1-56424-060-6.

6.1.3.3. Conexión vigueta – muro. La unión vigueta – muro es de tipo conexión simple a cortante, el diseño está basado en el manual de diseño de nodos de acero – concreto¹¹, con criterio de diseño el análisis de transferencia de esfuerzos entre el perfil y el muro en concreto reforzado, garantizando la estabilidad del nodo y la integridad del muro. Este tipo de conexión está permitida por la reglamentación

¹¹ KULHMAN, Ulrike. WALD, Frantisek. HOFMANN, Jan et al. Design of steel – to – Concrete Joints: Designs Manual II. Coal and Steel of European Community, Brussels. 2014. p. 145.

nacional para uniones de elementos que no forman parte del sistema de resistencia sísmica.

Figura 26. Conexión simple a cortante vigueta – muro de concreto reforzado.



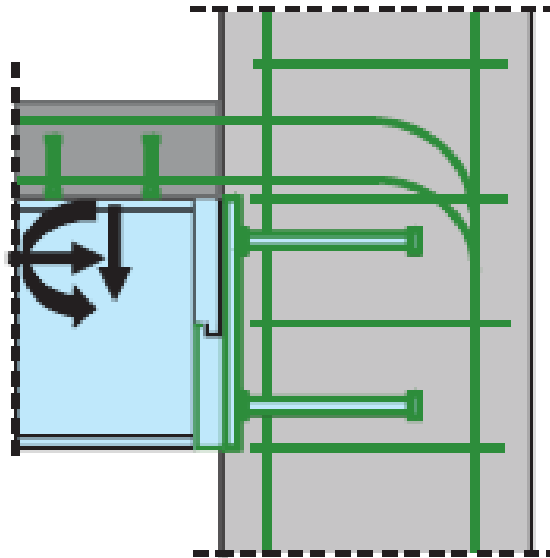
Fuente: KULHMAN, Ulrike. WALD, Frantisek. HOFMANN, Jan et al. Design of steel – to – Concrete Joints: Designs Manual II. Coal and Steel of European Community. Brussels. 2014. p. 1.

6.1.3.4. Conexión viga mixta – muro. Como los dos elementos forman parte del sistema de resistencia sísmica la conexión debe ser a momento totalmente restringida, su diseño se realiza siguiendo la metodología del manual de diseño de nodos acero – concreto¹², el cual desarrolló una conexión exclusiva de vigas en sección mixta a muros en concreto reforzado, el diseño se rige por la filosofía de

¹² Ibíd., p. 155.

muro fuerte – viga débil y rotaciones admisibles tal como lo exige la reglamentación nacional para este tipo de unión.

Figura 27. Conexión a momento viga mixta – muro en concreto reforzado.



Fuente: KULHMAN, Ulrike. WALD, Frantisek. HOFMANN, Jan et al. Design of steel – to – Concrete Joints: Designs Manual II. Coal and Steel of European Community, Brussels. 2014. p. 1.

6.2. FUERZAS SÍSMICAS: MÉTODO DE FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE.

6.2.1. Periodo fundamental T_a

En el literal A.4.2.2 de la NSR-10 no se brinda una ecuación exclusiva para el cálculo del periodo T_a de una estructura en secciones mixtas, pero debido a que la estructura posee muros de concreto reforzado en su sistema de resistencia sísmica,

la norma permite el uso de la ecuación alternativa A.4.2-4, ecuación en función de la cantidad, área en planta y altura de los muros estructurales, el periodo T_a obtenido se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Periodo T_a estructura en secciones mixtas, en dirección X y Y obtenidos por A.4.2.2.

Periodo T_a dirección X, Y	
T_{ax} [s]	1.357
T_{ay} [s]	1.676

6.2.2. Cortante basal V_s . En la Tabla 12 se muestra los valores obtenidos siguiendo el procedimiento descrito en A.4.3 (NSR-10) para la estructura en secciones mixtas.

Tabla 12. Cortante basal V_s estructura mixta.

Dirección	V_s [kN]
X	6,925.18
Y	5,606.10

6.3. ANÁLISIS DINÁMICO.

6.3.1. Periodo fundamental T.

Tabla 13. Periodo fundamental modal de la estructura en secciones mixtas, Etabs.

Periodo modal	
Tx [s]	0.784
Ty [s]	0.828

6.3.2. Cortante basal Vtj.

Tabla 14. Cortante basal estructura en secciones mixtas, dirección X y Y.

Cortante basal Vtj	
Vtj x [kN]	8,206.5
Vtj y [kN]	7,885.61

El análisis no exige ajuste al método FHE.

6.4. VERIFICACIÓN DE DERIVAS.

Las Figuras 28 y 29 muestran el chequeo de derivas del análisis sísmico de la estructura usando el software Etabs CSI®, la gráfica de color azul representa las derivas en dirección X y la roja en dirección Y, se puede observar que es menor al 1% para ambos casos.

Figura 28. Derivas estructura en sección mixta para acción principal sismo en dirección X.

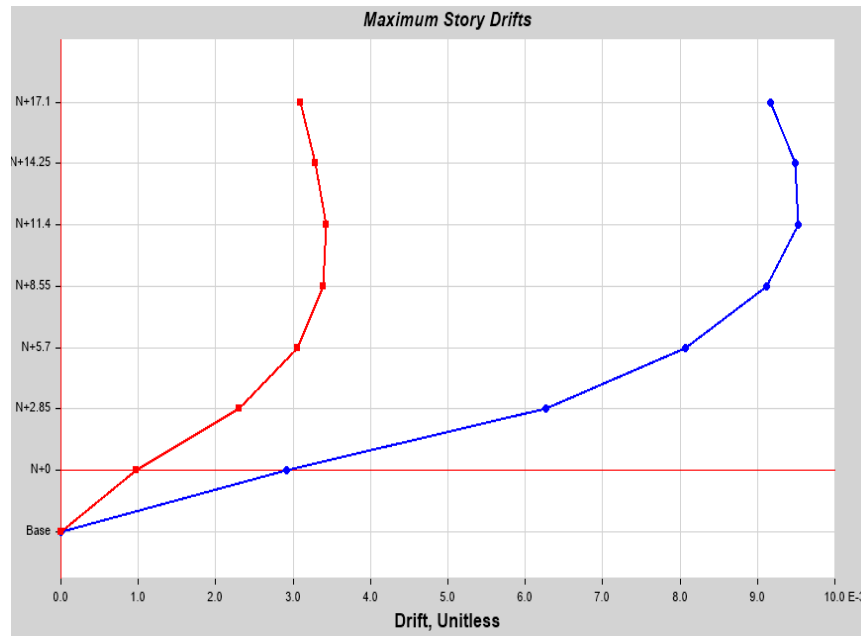
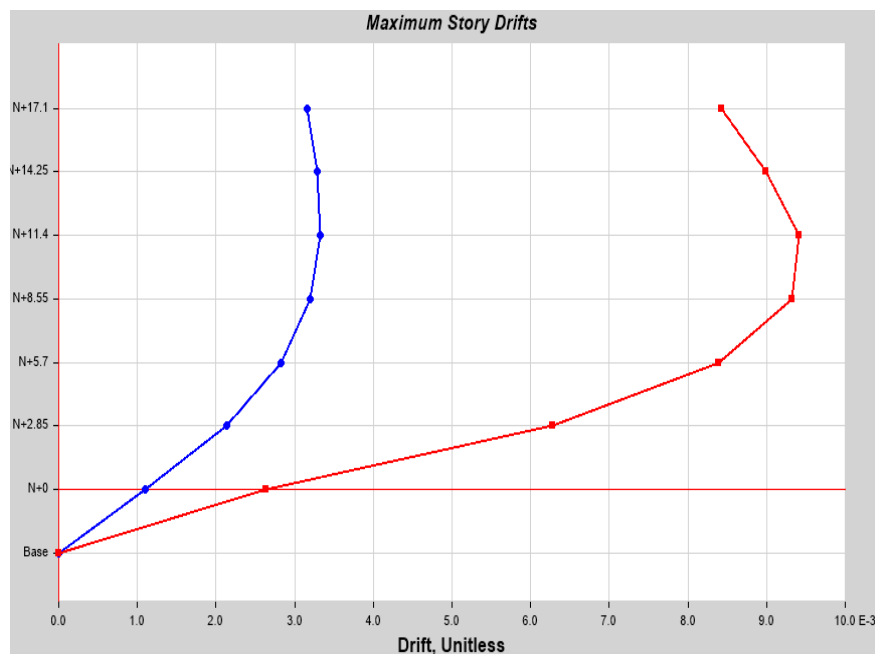


Figura 29. Derivas estructura en sección mixta para acción principal sismo en dirección Y.



6.5. DISEÑO SÍSMICO.

El análisis estructural se realiza haciendo uso del software Etabs CSI®.

Para el diseño sísmico de los elementos estructurales se utilizan las diferentes combinaciones de carga establecidas en el literal B.2.4 de la NSR-10.

El diseño de las secciones mixtas está guiado por el capítulo I del AISC 360-16 y el literal F.2.9 de la NSR-10, los muros estructurales siguen la metodología de diseño del ACI 318-11 y el título C de la NSR-10.

Los elementos estructurales en sección mixta que forman parte del sistema de resistencia sísmica, además de cumplir los requerimientos de diseño por resistencia, satisfacen las provisiones sísmicas establecidas en el literal F.3 de la NSR-10, del mismo modo los muros de cortante en concreto de alto desempeño satisfacen los requisitos del C.21 de la misma norma.

6.6. CUBICACIÓN Y ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS.

En la presente sección se muestra los resultados de cálculo de cantidades de obra y el análisis de precios unitarios para los diferentes materiales utilizados en el sistema estructural en secciones mixtas.

Los precios del concreto de alto desempeño están basados a los ofrecidos por Cementos Argos® e incluyen costo de bombeo por metro cúbico. Los costos de perfilera PTE, lámina steeldeck y sus respectivos conectores son los ofertados por Acesco S.A.S. y los perfiles siderúrgicos usados para el sistema de entrepiso se basa en la oferta comercial de Colmena S.A.S. para la región.

Tabla 15. Cantidad y costo total concreto alto desempeño.

Concreto 49 MPa	
V [m3]	352.32
Costo [COP / m3]	\$ 436,820.00
Costo (COP)	\$ 153'898,740.2

Tabla 16. Cantidad y costo total acero de perfil.

Acero perfilería	
M [Ton]	154.702
Costo (COP)	\$ 443'358,533.25

Tabla 17. Cantidad y costo total acero corrugado de muros y malla electro soldada en losa, estructura en secciones mixtas.

Acero corrugado	
M [Ton]	8.86
Costo / kg	\$ 2,500.00
Costo (COP)	\$ 22'145,966.13

Tabla 18. Cantidad y costos espigos de cortante para steeldeck.

N° espigos	3891
Costo / und	\$ 3,150.00
Costo espigos (COP)	\$ 12'256,650.00

Tabla 19. Costo total estructura mixta y costo por metro cuadrado construido.

Costo total (COP)	\$ 631'659,889.64
Costo / m2	\$ 221,255.42

7. ANALISIS COMPARATIVO

7.1. ENFOQUE ESTRUCTURAL

El área transversal de los elementos estructurales es un factor que genera limitantes en la distribución de los espacios arquitectónicos de la edificación. Una reducción en su dimensionamiento puede representar ganancias de superficie útil en los pisos, lo cual trae ventajas como aumentar la eficiencia en el uso de los espacios y permitir una mejor maniobrabilidad para el estacionamiento de los automóviles dentro de los sótanos de la edificación, factores de gran relevancia arquitectónica.

Las tablas 20 a 23 muestran los porcentajes de reducción del área transversal de los elementos estructurales en planta, y la cantidad de ganancia de superficie útil en metros cuadrados.

Para el sótano de estacionamientos y primer entrepiso:

Tabla 20. Porcentaje de reducción sección transversal elementos estructurales (área en planta).

Estructura	At [m ²]	% M/C	% Reducción
Concreto	11.48	58.72%	41.28%
Mixtas	6.74		

Tabla 21. Ganancia superficie útil.

Estructura	Área útil [m ²]	Ganancia [m ²]
Concreto	554.40	4.74
Mixtas	559.14	

Entrepisos dos al siete:

Tabla 22. Porcentaje de reducción sección transversal elementos estructurales (área en planta).

Estructura	At [m2]	% M/C	% Reducción
Concreto	10.2	59.02%	40.98%
Mixtas	6.02		

Tabla 23. Ganancia superficie útil.

Estructura	Área útil [m2]	Ganancia [m2]
Concreto	371.30	4.18
Mixtas	375.48	

Para los seis entrepisos y el sótano de estacionamiento el total de ganancia de superficie útil es de **34, 56 [m²]**, dato que representa una optimización en el uso del espacio, además de representar mayores utilidades en la venta del proyecto.

7.2. PESO TOTAL DE LA ESTRUCTURA

El peso de la superestructura está directamente relacionado al tipo de sistema de cimentación a diseñar y su dimensionamiento. Como se hace la suposición de que las dos estructuras estarán bajo las mismas condiciones de estratificación y capacidad portante del suelo, una reducción en el peso total del sistema estructural puede representar una disminución en los costos de cimentación.

La Tabla 24 muestra el peso total de cada estructura (incluyendo cargas muertas sobreimpuestas) y su coeficiente de reducción de peso estructura en secciones mixtas/concreto convencional y la diferencia total de peso entre las dos estructuras.

Tabla 24. Peso total de cada estructura, coeficiente de reducción de peso y diferencia total.

Estructura	M [Ton]	% Reducción	Δ M [Ton]
Concreto	2,945.75	31.04%	914.44
Mixtas	2,031.31		

7.3. PESO SISTEMA ENTREPISO.

Otro factor de relevancia estructural es el peso del sistema de entrepiso. En términos de costo, el sistema Steel deck es el sistema de entrepiso más económicos de los usados en Colombia¹³. La Tabla 25 muestra los valores de peso promedio del sistema de entrepiso por metro cuadrado para cada sistema y su respectiva comparación.

Tabla 25. Peso de cada sistema de entrepiso de las estructuras y comparación.

Estructura	m [Kg/m ²]	% Reducción	Δ m [Kg/m ²]
Concreto	962.41	30.88%	297.18
Mixtas	665.23		

7.4. COMPARACIÓN DE COSTOS.

A pesar de la considerable reducción en la cantidad de materiales usados en la estructura en sección mixta, la estructura en concreto reforzado presenta costos totales de material inferior. Esto puede ser debido a la trayectoria comercial del concreto reforzado en la región en comparación a los concretos de alto desempeño,

¹³ ÁVILA BELTRAN, Jorge Eliecer. Análisis de costos de los sistemas de entrepiso más utilizados en Colombia. Cartagena de Indias, 2016, 113 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Cartagena. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil.

además de ser considerablemente superior el costo del kilogramo de acero de perfil siderúrgico al acero de barra corrugada. Sin embargo el alcance de la presente investigación está limitado a los costos de material de la superestructura, sin ser considerados los costos del sistema de cimentación y costos del proceso constructivo, lo cual podría generar costos globales de proyecto más competitivos entre los dos sistemas estructurales.

La Tabla 26 muestra la relación de costos totales de material para la superestructura de los dos sistemas y la Tabla 27 lo muestra por metro cuadrado de construcción.

Tabla 26. Costo total en materiales superestructura.

Estructura	Costo COP	M/C	Δ Precio
Concreto	\$ 495'643,828.00	1.27	\$ 136'016,061.64
Mixtas	\$ 631'659,889.64		

Tabla 27. Costo materiales superestructura por metro cuadrado construido.

Estructura	Costo / m2 (COP)	% M/C	Δ Precio (COP)
Concreto	\$ 173,612.61	1.27	\$ 47,642.81
Mixtas	\$ 221,255.42		

8. CONCLUSIONES

Para la estructura en secciones mixtas se diseñaron tres sistemas, un pórtico resistente a momentos para resistir la totalidad de fuerzas verticales y horizontales, otro con el núcleo de muros en concreto de alto desempeño ubicados espacialmente del mismo modo que la estructura en concreto reforzado convencional y el mostrado en el presente artículo con otros muros de cortante perimetrales en concreto de alto desempeño que ayudan a resistir fuerzas horizontales. Es de gran relevancia destacar el gran aporte que hace el concreto de alto desempeño para el control de deflexiones y derivas, pues el sistema apórticado sin los muros de corte presentaba mayores dimensionamientos en sus elementos estructurales y por ende capacidades de resistencia mecánica a cargas gravitacionales sobrediseñadas. Una vez introducidas las pantallas en concreto reforzado de alto desempeño se pudo reducir el dimensionamiento de las columnas en sección mixta y ajustar de forma más eficiente los valores de resistencia nominal.

La filosofía de desarrollo sostenible toma cada vez más relevancia en los países en vía de desarrollo como Colombia. La presente investigación demuestra una reducción significativa en la cantidad de materiales de construcción utilizados en la estructura en secciones mixtas, lo cual es de gran importancia medioambiental, pues la industria de la construcción es uno de los principales actores de modificación y contaminación del planeta¹⁴, y una optimización en las cantidades de obra podría aportar al cumplimiento de los objetivos del desarrollo sostenible. El proceso de fraguado del concreto necesita el uso de agua, que en la mayoría de los casos se toma del sistema de acueducto de agua potable, una disminución en la cantidad de concreto utilizado en la estructura representa una reducción proporcional del uso de este recurso natural, que en el presente siglo presenta grandes retos respecto a su

¹⁴ AGUDELO. Op. Cit., p. 1.

distribución y administración en la población. Cabe resaltar que producto del diseño de la estructura en secciones mixtas con concreto de alto desempeño se redujo la cantidad de concreto requerida en un 51% respecto a la estructura en concreto reforzado convencional. Otro factor importante relativo al peso de la estructura es su sistema de cimentación, pues entre más liviana sea la edificación, menos exigente serán los requerimientos de la subestructura en cuanto al tipo y dimensionamiento de sus elementos, que a su vez, influye nuevamente en las cantidades de material requerido.

Una secuencia progresiva en el montaje de la perfilería metálica seguida de la fundición del concreto de alto desempeño con resistencia acelerada puede resultar en una significativa reducción de los tiempos de construcción, y por ende repercute positivamente en los costos globales del proyecto, gracias a la disminución en tiempos de uso de maquinaria y mano de obra.

Un fortalecimiento de la industria siderúrgica en la región podría incentivar un mayor uso de las estructuras metálicas en los proyectos de construcción, pues en el desarrollo del análisis económico de la presente investigación se pudo constatar que dicha industria presenta algunas limitantes en cuanto a una amplia disponibilidad de perfiles siderúrgicos para su comercialización, lo que limita el proceso de optimización de los diseños.

Una de las principales ventajas de los elementos estructurales en sección mixta es su alta resistencia mecánica ante los esfuerzos a los que serán sometidos a pesar de presentar dimensionamientos relativamente pequeños, pues para la estructura de siete niveles estudiada en la presente investigación el diseño estuvo regido por el control de derivas y el cumplimiento de provisiones sísmicas del sistema estructural, quedando la resistencia nominal de las secciones mixtas ante cargas

gravitacionales considerablemente por encima de la requerida, por este motivo su utilización es recomendable para estructuras de elevación media – alta que utilicen sistemas de resistencia sísmica combinados o duales, ya que el dimensionamiento de los elementos estructurales de la estructura en secciones mixtas pertenecientes al sistema de resistencia sísmica estuvo regido por las provisiones sísmicas de ductilidad y conexión tipo DES.

BIBLIOGRAFÍA

ACESCO. Ficha técnica Metaldeck. 2da Edición. Malambo. Nical Impresores Ltda, 2017.

ACESCO. Metaldeck grado 40 Manual técnico. Colombia. Nical Impresores Ltda, 2013.

AGUDELO, H., HERNÁNDEZ, A. CARDONA, D. (2018). Sostenibilidad: actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia. [en línea] Revistas.unal.edu.co. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/30825/39307> [Citado 2 de mayo 2018].

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. AISC. Specification for Structural Steel Buildings. Ed 2016. Chicago. Illinois: AISC. 2016.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. AISC. Steel Construction Manual. Ed 14. Chicago. Illinois: AISC. 2011.

ÁVILA BELTRAN, Jorge. Análisis de costos de los sistemas de entrepiso más utilizados en Colombia. Cartagena de Indias, 2016. Tesis (Ingeniero Civil). Universidad de Cartagena. Facultad de Ingeniería.

BENAVIDES, Ricardo. Concreto de alto desempeño. Bogotá D.C., 2014. Tesis (Magister en Ingeniería Civil). Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito. Posgrado en Ingeniería Civil.

CORONEL, Claudio. Diseño de una edificación usando secciones mixtas. Cuenca, 2016. Monografía (Especialista en análisis y diseño de estructuras de acero y hormigón armado). Universidad de Cuenca. Facultad de Ingeniería.

CRISAFULLI, Javier. Diseño sismorresistente de construcciones en acero. Asociación latinoamericana del Acero. 4ta edición. Mendoza Argentina. 2014.

DELGADO, Carlos. Conexiones precalificadas en Colombia. Bucaramanga, 2017. Trabajo de grado (Magister en Ingeniería Estructural). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil.

GARCÍA, Luis. Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico. Universidad de los Andes. Bogotá D.C. 1998.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Aceros de calidad estructural de alta resistencia baja aleación al Niobio (Columbio) - Vanadio. 8va ed. Bogotá: ICONTEC, 2017. 22 p: il. (NTC 1985).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Barras corrugadas y lisas de acero de baja aleación, para refuerzo de concreto. 8va ed. Bogotá: ICONTEC, 2007. 27 p: il. (NTC 2289).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Tubería estructural de acero al carbono formada en frío, con y sin costura, redonda y de otras formas. Bogotá: ICONTEC, 2016. 12 p: il. (NTC 4526).

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE. NSR-10. Segunda actualización. Bogotá D.C. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS, 2010.

KULHMAN, Ulrike. WALD, Frantisek. HOFMANN, Jan et al. Design of steel – to – Concrete Joints: Designs Manual II. Coal and Steel of European Community. Brussels. 2014.

PINEDA, Miguel. Diseño de elementos estructurales de sección compuesta con LRFD. México D.F, 2005. Tesis (Ingeniero Civil). Instituto politécnico nacional. Escuela superior de Ingeniería y Arquitectura.