

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del catálogo en línea, página web y Repositorio Institucional del CRAI-USTA, así como en las redes sociales y demás sitios web de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor, nunca para usos comerciales.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

**Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-USTA
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

Análisis comparativo de una propuesta estructural con columnas compuestas tipo cajón relleno y un sistema de columnas de concreto reforzado en el diseño de una edificación de uso educacional en la ciudad de Bucaramanga.

Pedro Javier Argüello Pérez

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Civil

Director:

Homer Armando Buelvas Moya

Ingeniero Civil, Mg, Mg(C)

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Civil

2020

Agradecimientos

Mi más profundo agradecimiento a mi director de proyecto, el Ingeniero Homer Armando Buelvas, por su conocimiento, acompañamiento constante y su paciencia innegable conmigo y con el proyecto, porque sin él, este último no habría podido desarrollarse; al grupo de docentes de la facultad, quienes a través de estos años han sido una guía en mi formación humana y profesional; a mis familiares, especialmente a mis padres, por siempre ser ese motor de motivación para lograr mis objetivos; a mis compañeros y amigos, con quienes vivimos y compartimos este gran desafío; y a todos aquellos que de alguna u otra manera contribuyeron para que llegase este momento, a todos ellos, simplemente, gracias.

Contenido

	Pág.
Glosario.....	8
Resumen.....	9
Abstract.....	10
Introducción	11
1. Objetivos.....	12
1.1 Objetivo general.....	12
1.2 Objetivos específicos	13
2. Justificación	13
3. Estado del arte.....	15
3.1 Propuesta arquitectónica del Jardín Infantil – Bloque de intervención Tipo.....	15
3.1.1 Descripción de la propuesta arquitectónica del Edificio	15
3.1.2 Localización	16
3.1.3 Supuestos.....	17
3.2 El Sistema Estructural	18
3.2.1 El Sistema de Columnas Compuestas	19
3.3 Diseño de la estructura – normativa.....	20
3.3.1 El análisis estructural.....	20
3.3.2 El diseño de elementos estructurales	21

4. Metodología y resultados para el análisis comparativo	23
4.1 Propuesta estructural inicial	24
4.2 Propuesta alternativa con columnas compuestas (sin reconfiguración estructural)	26
4.2.1 Predimensionamiento de las columnas compuestas	26
4.2.2 Análisis estructural	27
4.2.3 Diseño de las columnas compuestas.....	28
4.3 Propuesta alternativa con columnas compuestas (con reconfiguración estructural)	30
4.3.1 Predimensionamiento de la reconfiguración estructural	31
4.3.2 Análisis sísmico de la reconfiguración estructural	31
4.3.3 Diseño de los elementos estructurales	32
4.4 Funcionamiento estructural comparativo	35
4.5 Cálculo de cantidades y estimación de costos.....	38
5. Análisis de resultados	41
5.1 Análisis P1 vs P2.....	41
5.1.1 Análisis de cantidades y costos P1 vs P2	43
5.2 Análisis P1 vs P3.....	44
5.2.1 Análisis de cantidades y costos P1 vs P3	45
6. Conclusiones	46
Referencias Bibliográficas	49
Apéndices.....	51

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Resumen de derivas - propuesta inicial P1</i>	25
Tabla 2. <i>Derivas por F.H.E y análisis dinámico del bloque A con columnas compuestas (sin reconfiguración estructural)</i>	28
Tabla 3. <i>Derivas por F.H.E y Análisis modal del bloque A con columnas compuestas (con reconfiguración estructural)</i>	32
Tabla 4. <i>Cuadro de zapatas definitivo de la nueva propuesta estructural</i>	35
Tabla 5. <i>Cuadro de derivas finales para las tres propuestas</i>	36
Tabla 6. <i>Cuadro de resistencias finales para las columnas de las tres propuestas</i>	37
Tabla 7. <i>Cuadro de participación modal para las tres propuestas</i>	37
Tabla 8. <i>Cantidades de obra estimadas para las tres propuestas estructurales</i>	38
Tabla 9. <i>Valores totales de cantidades de obra de las tres propuestas</i>	39
Tabla 10. <i>Estimación de costos estructurales para las tres propuestas</i>	40
Tabla 11. <i>Disminución en valores de derivas entre P1 y P2</i>	41
Tabla 12. <i>Aumento de resistencias máximas de las nuevas columnas</i>	42
Tabla 13. <i>Análisis de costos P1 vs. P2</i>	43
Tabla 14. <i>Disminución en valores de derivas entre P1 y P3</i>	44
Tabla 15. <i>Porcentajes de disminución de cantidades entre P1 y P3</i>	45
Tabla 16. <i>Análisis de costos P1 vs P3</i>	46

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Distribución de espacios en el nivel terraza (N+3.00m) del Bloque A.	15
<i>Figura 2.</i> Propuesta estructural inicial del Bloque A, de acuerdo con la distribución arquitectónica original, en un modelamiento de <i>software</i>	16
<i>Figura 3.</i> Imagen satelital del terreno donde se proyectó el proyecto arquitectónico del Jardín Infantil Provekids.....	17
<i>Figura 4.</i> Tipo de columna compuesta, apoyo con núcleo en concreto y recubrimiento de perfil metálico.....	20
<i>Figura 5.</i> Sección transversal tipo para las columnas en concreto reforzado de la propuesta estructural inicial.....	25
<i>Figura 6.</i> Sección transversal tipo para las columnas compuestas – cajón relleno del bloque A, el detalle de todos los cálculos se encuentra en el Apéndice E	29
<i>Figura 7.</i> Tipologías de secciones transversales para vigas del bloque A, el detalle de todos los cálculos se encuentra en el Apéndice H.....	33
<i>Figura 8.</i> Sección transversal tipo para placa aligerada en cubierta del bloque A, el detalle de los cálculos se encuentra en el Apéndice L	34

Lista de apéndices

(Se debe ver la carpeta Apéndices del Libro – Argüello, adjunto digitalmente a este documento)

Apéndice A. Plano arquitectónico inicial del bloque.

Apéndice B. Predimensionamiento de columnas.

Apéndice C. Estimación de cargas.

Apéndice D. Fuerza horizontal equivalente I (F.H.E).

Apéndice E. Diseño de columnas compuestas.

Apéndice F. Predimensionamiento para P3.

Apéndice G. Fuerza horizontal equivalente II (F.H.E).

Apéndice H. Diseño de vigas.

Apéndice I. Planos estructurales de la nueva propuesta.

Apéndice J. Resultados de columnas compuestas en P3.

Apéndice K. Diseño de zapatas.

Apéndice L. Diseño de la placa aligerada.

Apéndice M. Estimación de cantidades estructurales.

Apéndice N. Estimación de costos estructurales.

Glosario

Acero estructural: Elementos de acero esenciales en la estructura para resistir las cargas y esfuerzos de diseño [1].

Análisis modal: Procedimiento de análisis dinámico del comportamiento estructural, en el cual, los resultados se obtienen por la superposición de los diferentes modos o formas de vibración [2].

Columna compuesta tipo perfil relleno: Columna con sección compuesta consistente en un perfil de sección tubular relleno de concreto estructural [1].

Columna compuesta: sección de acero embebida o rellena de concreto, que es usada como columna [1].

Derivas: Desplazamiento horizontal relativo entre dos puntos colocados en la misma línea vertical, en dos pisos o niveles consecutivos de la edificación [2].

Método plástico de distribución de esfuerzos: Método donde la resistencia nominal del elemento se calcula suponiendo que los componentes de acero han alcanzado un esfuerzo igual a F_y y los de concreto un esfuerzo igual a $0.85f'_c$ [1].

Resistencia requerida: Resistencia que la columna compuesta, y en general cualquier elemento estructural, debe tener para soportar las cargas, momentos y fuerzas internas correspondientes al sistema [3].

Sistema de pórtico: Sistema estructural compuesto por pórticos (vigas y columnas), resistente a momentos, cargas verticales y fuerzas horizontales [2].

Sistema estructural: Ensamble de componentes portantes conectados entre sí de manera que actúan de manera interdependiente [1].

Resumen

Este documento presenta la comparación de un sistema estructural con columnas en concreto reforzado tradicionales y una alternativa con columnas compuestas, en el diseño de una edificación educativa esencial, que consta de un bloque de un piso con terraza multipropósito. La revisión y selección de la mejor solución se determina a partir de los resultados de funcionalidad mediante valores de derivas, cantidades de obra y costos económicos asociados. Los resultados indican que la simple sustitución de las columnas desfavorece los costos globales; lo que destaca la importancia de realizar una reconfiguración estructural en función de las nuevas columnas compuestas, las cuales consisten en un cajón metálico que confina el núcleo en concreto; permitiendo el mejor funcionamiento, las menores cantidades estructurales y el ahorro de costos directos de ejecución.

Palabras clave: Columnas compuestas, sistema estructural, funcionamiento estructural, costos económicos.

Abstract

This document presents the comparison of a structural system with traditional reinforced concrete columns and an alternative with composite columns, in the design of an essential educational building, consisting of a one-story block with a multipurpose terrace. The review and selection of the best solution is determined by the results of functionality through values of drift, quantities of materials and associated economic costs. The results indicate that the simple substitution of the columns detracts the overall costs; which highlights the importance of carrying out a structural reconfiguration based on the new composite columns, which consist of a metal box that confines the concrete core; allowing the best performance, the smallest structural quantities and savings in terms of costs.

Keywords: Composite columns, structural system, structural performance, economic costs.

Introducción

La implementación de un sistema estructural tipo se puede realizar según su idoneidad al momento de cumplir con los requerimientos particulares de cada proyecto. Si nos enfocamos en el desarrollo de estructuras tipo pórtico, veremos que esta clase de sistema es uno de los aspectos clave a la hora de materializar cualquier propuesta arquitectónica [4]. Este sistema se basa en un conjunto de elementos estructurales “conformado por vigas y columnas de hormigón armado” [5], que tradicionalmente están conformadas por un cuerpo de concreto y reforzadas con barras de acero estructural. Sin embargo, existen variaciones como las columnas compuestas, caracterizadas porque, además de incorporar el concreto armado, también incluyen un perfil de acero estructural que complementa su comportamiento. Según [6], este segundo tipo de elementos “ofrecen alta rigidez, alta resistencia, alta ductilidad y grandes capacidades de absorción de energía de deformación” en comparación a las columnas de concreto reforzado tradicionales.

Ahora bien, las edificaciones de uso educacional, que surgen como solución a una necesidad de la comunidad, deben satisfacer unos requisitos arquitectónicos y estructurales importantes, destacando de los últimos el grupo de uso en el que se encuentran que, por normativa se clasifica como una estructura de ocupación especial[2]. Lo anterior indica que los factores sísmicos que afectan a las estructuras educacionales se aumentan en un 10% con respecto a las edificaciones residenciales, para el caso colombiano [2]. Tal cual se expone en [7], el funcionamiento de las Edificaciones Esenciales es crítico y vital, en condiciones de emergencia debidas a un evento sísmico, al intentar preservar la salud, seguridad y atención a la población.

Teniendo en cuenta esto, y de acuerdo con [2] se deben proponer soluciones estructurales basadas en pórticos de columnas en concreto reforzado tradicional o muros pantalla. Sin embargo, estas soluciones podrían estar lejos de ser consideradas óptimas, pues, en muchos casos, al ser

construidas con las solicitaciones especiales, ocasionan la presencia de mayores cantidades de material y, posiblemente unos mayores costos en el valor de su construcción.

Este desarrollo profesional busca reemplazar el uso de columnas tradicionales (concreto reforzado) como principal eje de referencia en el diseño estructural de una edificación “Esencial” (catalogada así por su uso educacional), por columnas compuestas tipo cajón relleno, ejemplificando una nueva propuesta estructural aplicada a un modelo arquitectónico base, de un piso, denominado el bloque A del Jardín Infantil Provekids.

Con esto se busca determinar que, efectivamente, la implementación de esta propuesta estructural es la solución más adecuada para el bloque intervenido. El uso de columnas compuestas le aporta un funcionamiento estructural optimizado [6], [8] a la edificación-objeto de estudio, alejándola de los valores límite de diseño (derivadas y comportamiento modal), mientras que a su vez, le reducen sus cantidades finales de obra y los costos económicos asociados específicamente con el diseño de su estructura; lo que, en paralelo, beneficia el desarrollo de proyectos de construcción de cualquier tipo que adoptan esta metodología.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Analizar una alternativa de diseño en columnas compuestas tipo cajón relleno para una edificación de uso Educativo con base a parámetros de funcionamiento estructural y costos de construcción de los elementos estructurales.

1.2 Objetivos específicos

1. Diseñar la propuesta estructural de la edificación con uso educacional, implementando las columnas compuestas tipo cajón relleno, de acuerdo con el Título F de la Norma Sismo Resistente 2010.
2. Comparar los valores límites de funcionamiento estructural de la nueva propuesta con columnas tipo cajón relleno y de una en concreto reforzado para la edificación con uso Educativo.
3. Comparar cantidades de material y una propuesta estimada de costos de construcción de la estructura de la edificación Educativa, entre una solución con columnas tipo cajón relleno y una en concreto reforzado.

2. Justificación

El sistema estructural es un factor determinante en la configuración de una edificación [4], en su comportamiento, su análisis y diseño. Este representa un porcentaje considerable en la composición final del edificio, medido en cantidades de material y costos económicos asociados. La inversión monetaria para la construcción de la estructura en un proyecto representa desde el 8% a casi un 20% de los costos totales del desarrollo constructivo, dependiendo del uso final de la edificación [9].

Por eso, es pertinente hablar de la necesidad de una optimización en la solución estructural planteada para un edificio, cuando se requiera tener una alternativa de costos de construcción. Los procesos adecuados de construcción y el uso de menores cantidades de obra sin afectar la

resistencia de las estructuras son un ejemplo de procesos de optimización eficientes [10] que valen la pena revisar en procesos de investigación y aplicación.

Una opción comparativa aplicable para la evaluación de estos procesos de optimización en un proyecto constructivo, es la implementación de columnas compuestas tipo cajón relleno a una edificación de uso Educativo, como lo es un jardín infantil: el objeto propuesto de estudio categorizado como una estructura de nivel ocupacional esencial. Esta aplicación le traería mejoras técnicas (funcionamiento, cantidades y costos), manejando la necesidad de mantener un sistema estructural aporticado, respetando la distribución arquitectónica de espacios. Además, le permitiría convertirse en un caso de estudio referente debido a la baja implementación del sistema de columnas compuestas en el contexto local [11].

El uso del “acero estructural y hormigón es una forma popular de sinergizar los méritos de los materiales individuales para lograr mejoras generales en el rendimiento estructural” [8]; lo que indica que la implementación de este sistema de columnas compuestas que mantienen esta relación, reduce las cantidades de material y sus costos directamente relacionados, pues “debido a su mayor resistencia, rigidez y durabilidad” [12], la estructura podría necesitar menor número de apoyos, con menores dimensiones; lo cual conllevaría a una reducción en los valores de cantidades y costos asociados a la propuesta estructural.

Además, esto permitiría realizar un análisis más profundo de la conveniencia de aplicar una solución estructural basada en columnas compuestas a una edificación enmarcada en el contexto colombiano para uso educativo, ejemplificando un caso de estudio como el bloque A del jardín de niños, del cual se ha documentado muy poco [11]; y a su vez, convirtiendo este trabajo en un caso referente de los beneficios que le representan las columnas compuestas a una edificación.

3. Estado del arte

3.1 Propuesta arquitectónica del Jardín Infantil – Bloque de intervención Tipo

Se genera la propuesta de un proyecto arquitectónico tipo que tenga las características del uso educativo con nivel de ocupación esencial, con el fin de ejemplificar un caso de estudio relevante al uso de columnas compuestas. El proyecto arquitectónico del jardín infantil Provekids (Figura 1) no se encuentra construido, pero si cuenta con una propuesta estructural inicial para el bloque A del complejo, que tomaremos como base del trabajo de grado. Este proyecto se desarrolla con el objetivo principal de contribuir a la solución de una problemática común en la sociedad bumanguesa, basado en la necesidad de contar con una infraestructura educativa apta para niños menores de seis años en las zonas menos favorecidas económicamente de la ciudad; y en donde predomina el uso de estructuras de un nivel.

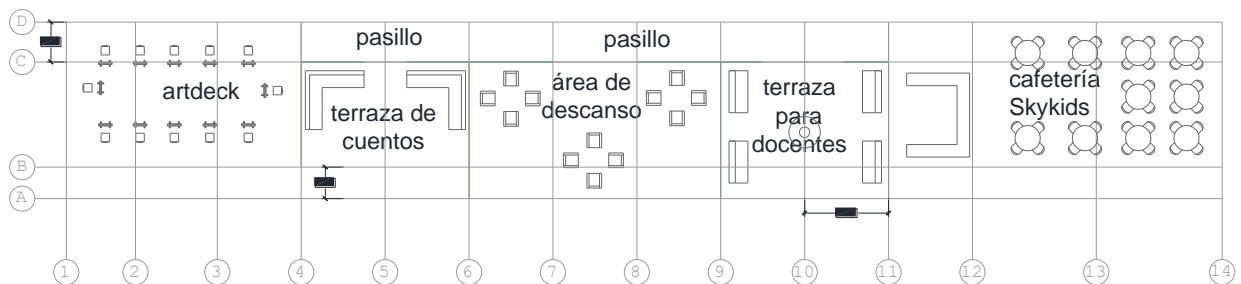


Figura 1. Distribución de espacios en el nivel terraza (N+3.00m) del Bloque A.

3.1.1 Descripción de la propuesta arquitectónica del Edificio. El proyecto del Jardín Infantil Provekids está compuesto por tres edificaciones que integran los diferentes espacios, denominados en los bloques A, B y C. El Bloque A, el cual será el objeto de intervención del presente trabajo de grado; se compone de solo un entrespacio/terrazza: El primer piso (N+0.00) incluye espacios como

Playroom, baños, biblioteca, salón de párvulos y sala de lectura. Mientras que el segundo nivel (N+3.00) contempla una terraza multiusos en su cubierta. Esta terraza se encuentra distribuida en zonas como la cafetería, terraza *artdeck*, zona de descanso para docentes y estudiantes, y el salón de lectura al aire libre. Desde el punto de vista estructural (Figura 2) este espacio de cubierta se designa como el área de mayor carga viva con el fin de revisar la alta incidencia en la estructural. Como característica común entre los edificios de este tipo de proyectos, se cuenta con pasillos largos, que cruzan todo el bloque y que tienen como finalidad garantizar el acceso a todos los espacios, aprovechando al máximo la distribución de área de la edificación.

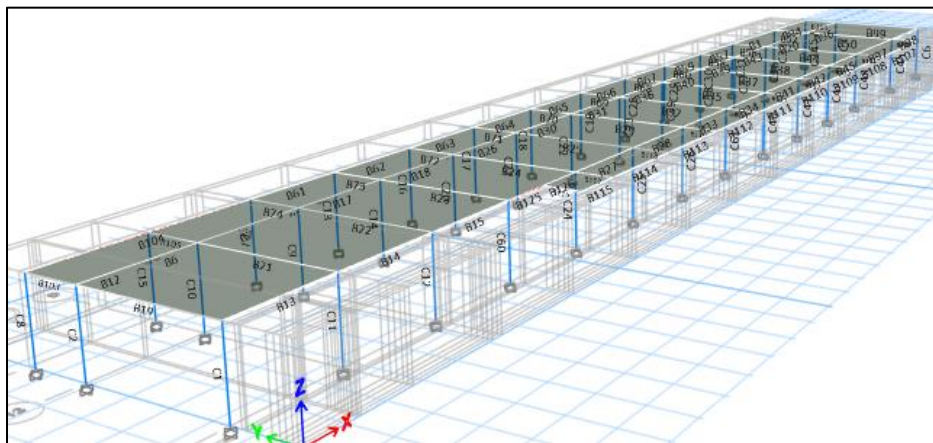


Figura 2. Propuesta estructural inicial del Bloque A, de acuerdo con la distribución arquitectónica original, en un modelamiento de *software*.

3.1.2 Localización. El proyecto tiene como propuesta de ubicación la comuna diez de Bucaramanga, en la carrera 25, con calle 101, número 35, barrio Provenza, con el fin de idealizar una estructura que supla las necesidades de escolaridad del sector.

La información con respecto al terreno, el tipo de suelo y su uso, es muy limitada, casi nula. La zona donde se encuentra localizado (Figura 3), aunque directamente no se puede catalogar como

“menos favorecida”; su ubicación le permite estar cerca de varios barrios que realmente son la población objetivo, y que gracias a esa centralidad entre estos, lo vuelven el lugar indicado para desarrollar el proyecto arquitectónico.



Figura 3. Imagen satelital del terreno donde se proyectó el proyecto arquitectónico del Jardín Infantil Provekids.

3.1.3 Supuestos. La propuesta del proyecto arquitectónico cuenta con los siguientes supuestos:

1. Dimensiones, distribución y configuración de los materiales del proyecto arquitectónico. Con esta propuesta se pretende realizar una revisión de una edificación con irregularidad en planta y diferencias de rigidez, sin intentar sustituir un posible diseño arquitectónico, el cual, debería ser realizado por el profesional correspondiente.
2. Se realizan las suposiciones con respecto a los parámetros geotécnicos del suelo: con profundidad de cimentación de 1.4m, esfuerzo límite de 150kN/m^2 , densidad de terreno de 18 kN/m^3 y dimensiones mínimas de $0.6 \times 0.6\text{m}$. Estos valores supuestos con

- base a datos otorgados por un profesional del área de suelos de la Facultad de Ingeniería Civil.
3. Los análisis de funcionamiento, cantidades de obra y costos asociados, van estrictamente relacionados con el sistema estructural, pues se desconocen los parámetros propios de otras clases de diseños. Igualmente, se realiza el supuesto de los valores máximos promedio para las estimaciones de cargas para acabados puntuales como pisos o muros.

3.2 El Sistema Estructural

Un sistema estructural se define como el conjunto de elementos de soporte que reciben, distribuyen y conducen las cargas a las cuales se ve sometido un edificio, garantizando su estabilidad y la seguridad de las personas que lo habitan. Tal cual como se menciona en [4], esa seguridad hace referencia a la capacidad de la estructura de soportar las cargas que la puedan afectar, siendo las cargas sísmicas, el tipo de carga que más resistencia le exige al sistema [4] y en la mayoría de los casos, las que determinan las dimensiones de los elementos que lo componen en zonas como Bucaramanga y Colombia.

De acuerdo con [13], desde el punto de vista del cálculo numérico, la respuesta sísmica de una estructura es el resultado de filtrar la señal sísmica a través de la misma estructura. La obtención de dicha respuesta, es decir, un análisis sísmico, requiere la definición previa tanto del movimiento del terreno como de las características estructurales.

Ahora bien, las cargas sísmicas no son las únicas que afectan a la estructura, según [14], en la mayoría de los edificios, dos o más sistemas estructurales básicos (por ejemplo, vigas, columnas, losas y armaduras, etc.), se ensamblan entre sí para formar sistemas estructurales que transmiten

las cargas aplicadas en él, al suelo. Tales sistemas estructurales son conocidos como sistemas de pórticos estructurales, y sus componentes reciben el nombre de elementos estructurales [14].

Ahora bien, es importante aclarar que dependiendo del elemento estructural, cada uno va a cumplir una función en particular dentro del sistema, y su comportamiento variará según la solicitud de carga a la cual éste se vea sometido, por ejemplo, las vigas funcionan a esfuerzo de flexión, principalmente, mientras que las columnas, trabajan a compresión (intenta acortar la longitud del elemento) y su principal función es la transmisión de las cargas desde las vigas hasta la cimentación [14].

3.2.1 El Sistema de Columnas Compuestas. Los elementos estructurales con secciones compuestas de acero y hormigón, como vigas compuestas, columnas de acero rellenas de hormigón, arcos de acero rellenos de hormigón, vigas compuestas curvadas en planta o en el espacio a menudo se utilizan en edificios y puentes [15] por su alta resistencia y rigidez [16]. Durante la construcción de un edificio compuesto de gran altura, los tubos de acero huecos se someten a cargas derivadas de las cargas de construcción y cargas permanentes de los pisos superiores antes de rellenar el concreto húmedo [16].

Además, otras características de las columnas compuestas o *Concrete-Filled Steel Tube* (CFST), son que estos elementos ofrecen alta rigidez, alta resistencia, alta ductilidad y grandes capacidades de absorción de energía de deformación [6]. Se utilizan cada vez más en sistemas de resistencia de carga lateral para edificios compuestos de gran altura. En una columna CFST, el tubo de acero recubre completamente el núcleo de hormigón (Figura 4), es decir, lo que sería normalmente un apoyo tradicional; y esto aumenta notablemente la ductilidad del núcleo de hormigón. Por otro lado, el núcleo de hormigón previene eficazmente el pandeo interno hacia

adentro del tubo de acero y, como resultado, su resistencia al pandeo local es mucho mayor que la del tubo hueco, en caso de que se construyera un sistema estructural metálico [6]. Además del aumento en la resistencia de estos elementos, que pueden llegar a ser de 3 a 4 veces mayor [11], los sistemas compuestos pueden representar una mayor efectividad en el proyecto [11], reflejada en las cantidades de material y sus costos relacionados.

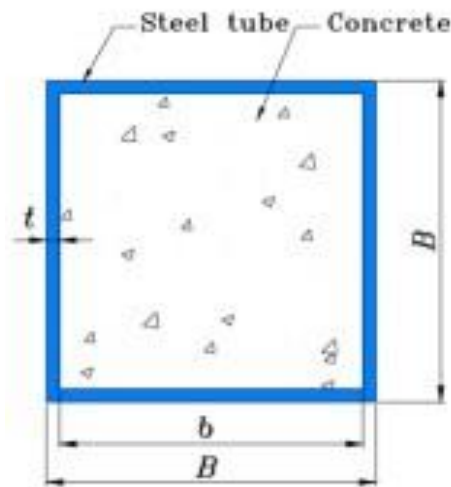


Figura 4. Tipo de columna compuesta, apoyo con núcleo en concreto y recubrimiento de perfil metálico. Adaptado de [6].

3.3 Diseño de la estructura – normativa

3.3.1 El análisis estructural. El análisis de una estructura tipo edificación consiste en determinar, por cálculos matemáticos, la distribución de esfuerzos dentro de la estructura de la obra. En otras palabras, es conocer, en base a un modelo del sistema estructural de la edificación, los esfuerzos a los que se van a someter los elementos estructurales. Estos esfuerzos son la resultante de la aplicación de cargas que soporta un edificio, es decir “aplicar fuerzas sobre una estructura” [2].

Para poder iniciar con el análisis estructural es importante definir unos valores de cargas, según el proyecto y como lo establece la normativa constructiva de Colombia, NSR-10. Esta misma, define dos clases de cargas: a) las cargas muertas y b) cargas vivas [17]. Las primeras hacen referencia a todas aquellas fuerzas ejercidas sobre el edificio por los “elementos permanentes de construcción incluyendo su estructura, los muros, pisos, cubiertas, cielorrasos, escaleras, equipos fijos y todas aquellas cargas que no son causadas por la ocupación y uso de la edificación”[17].

Mientras que las cargas vivas se refieren a “aquellas cargas producidas por el uso y ocupación de la edificación” [17] y las cargas ambientales se refieren, esencialmente, al viento, granizo, lluvia y sismo [17]. Si todas las cargas se aplicaran a un modelo estructural para su cálculo a mano, sería una tarea muy dispendiosa y nada eficiente. Por eso, en la actualidad existen *softwares* que le permiten al ingeniero realizar el análisis estructural de un proyecto de manera más práctica y rápida. Además, estos también le permiten al diseñador, conocer los valores de las derivadas (desplazamiento del edificio) en relación con las solicitudes sísmicas propias de una zona y así poder desarrollar estructuras más seguras a través del tiempo.

Una vez se conocen los valores, los requerimientos y las solicitudes propias del proyecto, se puede empezar con el proceso de diseño estructural del edificio, iniciando con la fase de pre-dimensionamiento de los elementos de soporte. En el siguiente título, se presentan, de manera general, las etapas propias de un diseño estructural para una edificación en general.

3.3.2 El diseño de elementos estructurales. El proceso de diseño para los elementos estructurales responde a los requerimientos y metodologías exigidos por la normativa colombiana actual vigente, la Norma Sismo Resistente 2010 (NSR10). Debido a la necesidad particular de este trabajo de grado, el apartado de la norma a implementar para el sistema de pórticos con columnas

compuestas es el título F – Estructuras metálicas [1]. Tomando como base las etapas, solicitudes, requerimientos y demás características exigidas en la Norma, el proceso de diseño estructural para edificaciones se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Se debe seleccionar el sistema estructural que mejor se adapte al proyecto constructivo, para este caso es un sistema aporticado según sus condiciones de distribución y que garantice a mayor medida los espacios arquitectónicos iniciales. Una vez realizado esto, se calculan las cargas iniciales a las que se va a someter la construcción, en base a las tablas de cargas que aporta la NSR-10 a lo largo del título B [17].
2. Se evalúa el funcionamiento estructural en un modelo numérico que contiene información de materiales, elementos y cargas. En la fase de pre-dimensionamiento, siguiendo lo exigido por el título C [3], se calculan unas dimensiones iniciales de las secciones transversales de viguetas, placas, vigas y columnas; y estas se introducen en el modelo previamente constatado.
3. De igual manera, se calculan los requerimientos necesarios para convertir el modelo de soporte de cargas gravitacionales a un modelo que soporte cargas sísmicas. Según el título A [2], se seleccionan los valores, factores, y zonas de riesgo sísmico para poder realizar el cálculo de las derivas del proyecto. Al modelo de este último, se le introducen datos de masa y peso a cada uno de los pisos del edificio, para calcular sus desplazamientos, todo con el fin de asegurar la resistencia sísmica del mismo en caso de un evento catastrófico.
4. Una vez que se obtienen todos los valores de esfuerzos y derivas, estos se comparan y se valúan con las determinaciones de la configuración estructural inicial. Se revisa

el comportamiento sísmico, con base a esas derivas (que deben ser menores al 1%) y se analiza el desempeño modal en busca de alguna irregularidad.

5. Una vez se verifica ese buen comportamiento, se evalúa la viabilidad de implementar las secciones estructurales de la propuesta, con base a la resistencia propia de cada elemento, aplicando metodologías específicas para determinar la capacidad de soporte propia de estos.
6. Para completar el diseño estructural de la edificación es importante definir las características de cimentación propias del proyecto. Estas se calculan aplicando una metodología particular (para este trabajo se deben utilizar zapatas céntricas aisladas) y considerando los requerimientos del terreno que se obtuvieron como resultados de algún estudio geotécnico. Una vez se tiene diseñada la totalidad de la estructura, se pasa a la fase de creación de planos y memorias finales con el fin de ultimar todo proceso y completar la propuesta ingenieril del sistema estructural.

Este es el proceso general para desarrollar un diseño estructural, y será considerado en los pasos de la metodología donde se requieran. La normativa propia del diseño de las columnas compuestas está registrada detalladamente en el título Metodología y resultados para el análisis comparativo.

4. Metodología y resultados para el análisis comparativo

A continuación, se presentan las etapas metodológicas implementadas para desarrollar el proyecto de grado. Se pueden encontrar cinco grandes secciones: a) propuesta estructural inicial con columnas de concreto reforzado, b) propuesta alternativa con columnas compuestas (sin

reconfiguración estructural), c) propuesta alternativa con columnas compuestas (con reconfiguración estructural), d) funcionamiento estructural comparativo y e) cantidades y costos. En las secciones b) y c) se presentan los resultados para las nuevas propuestas estructurales, con relación a sus valores de derivas, sin embargo, es en la sección c) donde se ejecuta el nuevo diseño estructural objetivo de este proyecto.

4.1 Propuesta estructural inicial

Como se ha mencionado a lo largo del informe, el bloque de intervención por parte de este proyecto ya cuenta con una propuesta estructural inicial (que denominaremos P1); la cual es de vital importancia para poder realizar la comparación de los valores de comportamiento estructural, cantidades de obra y sus costos estructurales estimados con respecto a la nueva propuesta de columnas compuestas. De acuerdo con esto, la primera etapa para el desarrollo del trabajo de grado debe ser recopilar y registrar las características propias de dicha solución estructural, antes de empezar con el diseño de las nuevas soluciones estructurales. En la Tabla 1 se denotan los parámetros de análisis sísmico, coeficiente de sitio e importancia y el cortante basal final, acompañado del periodo máximo de la estructura. El diseño estructural inicial está compuesto por un sistema de pórticos tradicional en concreto reforzado, distribuidos a lo largo de los ejes transversales al edificio rectangular en su propuesta arquitectónica inicial. El análisis del comportamiento sísmico de la estructura se llevó a cabo por el método de la Fuerza Horizontal Equivalente (F.H.E) y por el método dinámico espectral del modelo numérico. Este análisis se basó, principalmente en los valores de derivas para la estructura intervenida (Tabla 1), donde se evidencia que el edificio no llega a sus condiciones máximas de desplazamiento (límite) debido al

gran número de apoyos que dan soporte a la estructura. Sin embargo, en el subtítulo 4.4 también se resumen otros parámetros funcionales críticos para la comparación (participación modal).

Tabla 1. *Resumen de derivas - propuesta inicial P1*

Derivas propuesta inicial						
	% Derivas - F.H.E			% Derivas – Dinámico espectral		
Sentido "X"	0,46	%	Cumple	0,471	%	Cumple
Sentido "Y"	0,63	%	Cumple	0,688	%	Cumple
Coeficientes análisis sísmico por F.H.E						
Aa	Av	Fa	Fv	I	Vs [kN]	T [s]
0,25	0,25	1,15	1,55	1,25	3699,01	0,192

Lo relacionado con la información geotécnica y sísmica de esta propuesta son los mismos valores y características utilizados en la nueva propuesta; con el fin de considerar “igualdad de condiciones” en la comparación. Ahora bien, en cuanto al punto diferenciador de ambas propuestas, para el diseño estructural inicial se contemplaba el uso de columnas en concreto reforzado con la configuración representada en la Figura 5.

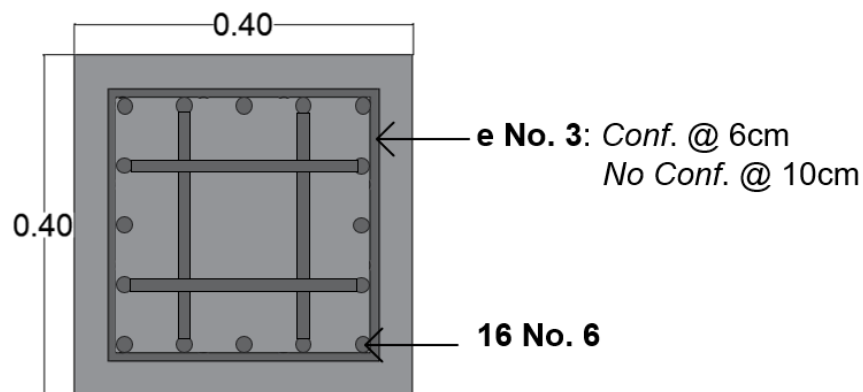


Figura 5. Sección transversal tipo para las columnas en concreto reforzado de la propuesta estructural inicial.

Más adelante, nuevamente en el subtítulo 4.3 Funcionamiento estructural comparativo de la metodología, se encuentran registrados los valores a detalle de resistencias a esfuerzos de la sección transversal tipo para las columnas de la propuesta estructural inicial. Para mayor detalle de valores de dimensiones, materiales y demás información relacionada con la propuesta inicial de la edificación revise el Apéndice A: “Plano arquitectónico inicial del Bloque A Provekids” propiedad intelectual de Pedro Argüello, autor de este trabajo.

4.2 Propuesta alternativa con columnas compuestas (sin reconfiguración estructural)

El diseño de la nueva propuesta estructural (denominada P2), que integra el uso de columnas compuestas tipo cajón relleno, parte y sigue los pasos de un diseño estructural para pórticos de concreto reforzado. Sin embargo, difiere de la teoría y de la normativa para aquellas partes donde se considere el nuevo tipo de columnas implementadas.

Entendiendo que este nuevo diseño únicamente cambia la clase de elementos a flexo-compresión (columnas en concreto reforzado por columnas compuestas tipo cajón relleno), y que lo restante de la propuesta estructural inicial no varía hasta este punto, a continuación se presentan los resultados del predimensionamiento, análisis y diseño estructural, para la nueva propuesta con columnas compuestas, sin realizar una reconfiguración estructural global.

4.2.1 Predimensionamiento de las columnas compuestas. El predimensionamiento de los elementos tipo columna compuesta - cajón relleno difiere en su procedimiento en comparación con sus iguales en concreto reforzado. Para las columnas compuestas se debe considerar lo estipulado en el Título F de la norma NSR-10; teniendo en cuenta esto, y con la intención de

mantener como medida mínima los mismos 30 centímetros de base que tiene la sección de las vigas, los elementos tipo columna compuesta de cajón relleno tienen dimensiones cuadradas de lado 0,3 x 0,3 m. Ahora bien, contemplando la necesidad de determinar un espesor mínimo para la pared que conforma el cajón metálico de la columna, se utilizó la fórmula C.10.13.6.1 que permite la NSR-10 para encontrar dicho valor [3]. Como resultado se obtuvo un espesor de pared mínimo de 7,19 mm.

Estos valores se encuentran desglosados en el “Apéndice B”. Considerando estas dimensiones, y utilizando los perfiles tipo cajón estructural que ofrece el mercado, se adoptó para el predimensionamiento el perfil de acero cuadrado grado C de Acesco como el elemento a utilizar en el diseño. Este cajón tiene dimensiones externas de 0,3 x 0,3 m, con espesor de pared de 10 mm y módulo de fluencia (F_y)= 345 MPa.

Paralelamente, se realizó la clasificación de esta sección estructural para las columnas compuestas de acuerdo con lo exigido en el Título F de la NSR-10, tablas F.2.9.1-1a y F.2.9.1-1b, las cuales categorizan a esta sección como “columna compuesta compacta” para ambos casos, clasificación necesaria para la parte de diseño de estos elementos, pues de acuerdo con ella, se debe seguir uno u otro procedimiento. De igual manera, los cálculos que exigen esos apartados se registran en el mismo “Apéndice B”.

4.2.2 Análisis estructural. La estimación de cargas viva y muerta; y las combinaciones de carga que se utilizaron en el análisis del proyecto se encuentran detalladas en el “Apéndice C” de este documento. Al igual que con P1, la metodología implementada para llevar a cabo el análisis sísmico fue por F.H.E (Apéndice D). De acuerdo con esto, y contemplando los valores para

construir el espectro elástico del proyecto respecto a su clasificación como “esencial”, se obtuvieron los resultados para el análisis de derivas del edificio. También, se realizó un análisis de derivas por método dinámico espectral de la estructura. Para ambos casos, su porcentaje de ellas es menor al 1% para ambos sentidos de análisis ortogonal (X y Y) y sus valores están reflejados en la Tabla 2. En ella, se ven valores menores a este límite y los coeficientes para el espectro sísmico, otorgados por la norma, denotando una clara disminución de los desplazamientos límites con respecto a la propuesta inicial P1.

Tabla 2. *Derivas por F.H.E y análisis dinámico del bloque A con columnas compuestas (sin reconfiguración estructural)*

Derivas de la nueva propuesta con columnas compuestas (Sin reconfiguración estructural)						
	% Derivas - F.H.E			% Derivas – Dinámico espectral		
Sentido "X"	0,181	%	Cumple	0,181	%	Cumple
Sentido "Y"	0,251	%	Cumple	0,270	%	Cumple
Coeficientes análisis sísmico por F.H.E						
Aa	Av	Fa	Fv	I	Vs [kN]	T [s]
0,25	0,25	1,15	1,55	1,25	3807,68	0,195

Nota: Las anteriores son las derivas finales del análisis estructural, para la nueva propuesta con columnas compuestas (P2), después de considerar las afectaciones por el análisis modal – torsional.

4.2.3 Diseño de las columnas compuestas. El diseño de los elementos tipo columna compuesta – cajón relleno se da de acuerdo con el Título F de la NSR-10, considerando la resistencia a los esfuerzos de compresión, de momentos flectores y los esfuerzos cortantes, y contemplando su clasificación como “columna compuesta compacta” según los apartados F.2.9.1-1a y F.2.9.1-1b. El proceso de diseño de las columnas se rige por los apartados normativos y los pasos expuestos

en el subtítulo 4.3, pues es en él donde se realiza el rediseño de la estructura con base a estos elementos, y por ende, es donde se expone detalladamente la metodología utilizada. Sin embargo, y entendiendo la independencia de la propuesta P2, se realizaron las comprobaciones de resistencia pertinentes de las columnas compuestas (Apéndice E).

La sección transversal tipo para las nuevas columnas (Figura 6) cumple con los requerimientos de resistencia para los tres esfuerzos mencionados previamente, cumpliendo con lo exigido por la normativa colombiana vigente. Esta consiste en un cajón estructural de 30x30cm, con espesor de pared de 1cm y un núcleo de concreto reforzado de 28 MPa, con 4 barras longitudinales No. 5. Igualmente, se implementó el uso de platinas soldadas en los extremos de la sección metálica por motivos constructivos y se descartó el uso de conectores de transferencia a cortante por el análisis y los motivos expuestos en el Apéndice E, y regulados por el apartado F.2.9.6.3.

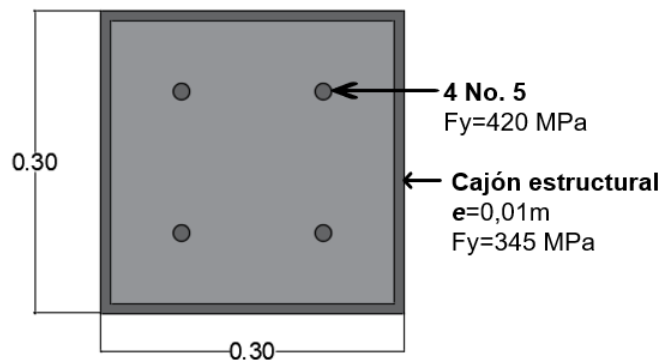


Figura 6. Sección transversal tipo para las columnas compuestas – cajón relleno del bloque A, el detalle de todos los cálculos se encuentra en el Apéndice E.

Los valores de resistencias a esfuerzos de la nueva sección de columna pueden ser consultados en la Tabla 6, en el subtítulo Funcionamiento estructural comparativo. En ese mismo subtítulo se

encuentran resumidos los valores de derivas y la participación modal de la propuesta. En la Tabla 8 se registran las cantidades de obra de esta propuesta P2 y de sus columnas compuestas.

4.3 Propuesta alternativa con columnas compuestas (con reconfiguración estructural)

Después de realizar un primer análisis de los resultados obtenidos hasta este punto, las bajas derivas y las bajas solicitaciones existentes en el modelo P2 motivan a tomar la decisión de plantear una tercera alternativa estructural para el bloque A. Esta nueva solución contempla una reconfiguración de los elementos estructurales que componen al sistema junto a la implementación de columnas compuestas (y la denominamos P3). Teniendo en cuenta que, aunque hasta acá ya se evidencia una mejora en los valores de derivas, resistencias (Tabla 6) y cantidades de obra (Tabla 8), los costos asociados a estas últimas podrían no representar una optimización de la nueva propuesta con respecto a la inicial; pues, aún no es la opción indicada según se detalla en el análisis de resultados.

De acuerdo con lo anterior se pasa de tener una propuesta con 42 apoyos, a solo 22. Entendiendo que esto implica un nuevo proceso de diseño para la estructura, analizando y verificando los demás elementos estructurales principales de la propuesta: a) vigas, b) zapatas y c) placa de entrepiso. Igualmente, también se implementan las columnas compuestas ya diseñadas para la anterior solución (Figura 6), revisando su aplicabilidad y cumplimiento para la tercera propuesta. Esta solución P3, actúa directamente como la solución estructural optimizada, que está planteada en el primer objetivo específico.

4.3.1 Predimensionamiento de la reconfiguración estructural. Al igual que con la propuesta estructural inicial, el nuevo diseño comienza con el predimensionamiento de los elementos tipo viga de acuerdo con la tabla C.R.9.5 de la Norma Sismo Resistente 2010 (NSR-10). De igual manera, y teniendo en cuenta los posibles casos que ocurren en el proyecto arquitectónico, implementando la tabla C.9.5.(b) de la misma norma, se calculan las deflexiones máximas permitidas para la propuesta. De acuerdo con lo anterior, el tipo de sección transversal para vigas (y altura de losa aligerada) es de 0,3 x 0,5 m (b x h). Los detalles de los cálculos para esta parte se registran en el “Apéndice F” de este documento.

Realizando el predimensionamiento de las columnas, se ejecutó el mismo proceso expuesto previamente en el subtítulo 4.2.1 Predimensionamiento de las columnas compuestas; revisando que la sección sea apta para este nuevo planteamiento.

Como parte final del predimensionamiento, se seleccionó para el nuevo diseño la implementación de la misma clase de losa de entrepiso/cubierta con la que contaba la propuesta inicial del bloque: placa aligerada sin torta inferior, con viguetas de 0,1 x 0,45 m (bxh) y torta superior con espesor (e)= 5 cm.

4.3.2 Análisis sísmico de la reconfiguración estructural. Se utiliza la misma configuración de carga gravitacional, replanteando los valores propios de un nuevo análisis por Fuerza Horizontal Equivalente, expuestos en el Apéndice G. Nuevamente, se obtienen las derivas, que arrojan como resultado unos valores de porcentaje, menores al 1% y sus datos están reflejados en la Tabla 3. En esta última, se analizan los dos sentidos ortogonales de la estructura (X y Y), se comprueban los

resultados menores al porcentaje límite, similares a la estructura P1; y donde, por norma, se busca alejar el comportamiento estructural de ese valor restrictivo.

Tabla 3. *Derivas por F.H.E y Análisis modal del bloque A con columnas compuestas (con reconfiguración estructural)*

Derivas de la nueva propuesta con columnas compuestas (con reconfiguración estructural)						
% Derivas - F.H.E			% Derivas - Sismo Dinámico/modal			
Sentido "X"	0,4045	%	Cumple	0,3777	%	Cumple
Sentido "Y"	0,6148	%	Cumple	0,5189	%	Cumple
Coeficientes análisis sísmico por F.H.E						
Aa	Av	Fa	Fv	I	Vs [kN]	T [s]
0,25	0,25	1,15	1,55	1,25	3598,62	0,214

Nota: Las anteriores son las derivas finales del análisis estructural, para la nueva propuesta con columnas compuestas y reconfiguración de los elementos estructurales, después de considerar las afectaciones por el análisis modal – torsional.

4.3.3 Diseño de los elementos estructurales. En la etapa de diseño, al igual que en la propuesta inicial, se realizó el cálculo estructural de los elementos tipo viga (Apéndice H) por falla dúctil para la solución con columnas compuestas; contemplando los efectos de los momentos flectores, esfuerzos cortantes, esfuerzos torsionales y la combinación de estos dos últimos. La sección transversal resultante para esta parte se encuentra reflejada en la Figura 7, donde se evidencian los dos tipos de vigas, ambas con dimensiones de 0,3x0,5m y con diferentes combinaciones de acero de refuerzo (véase figura 7). Las secciones tipo 1 y tipo 2 se distribuyen en los ejes longitudinales y transversales, respectivamente (Apéndice I). Igualmente, en el Apéndice H se encuentra detallada la separación de estribos para las diferentes zonas de las vigas.

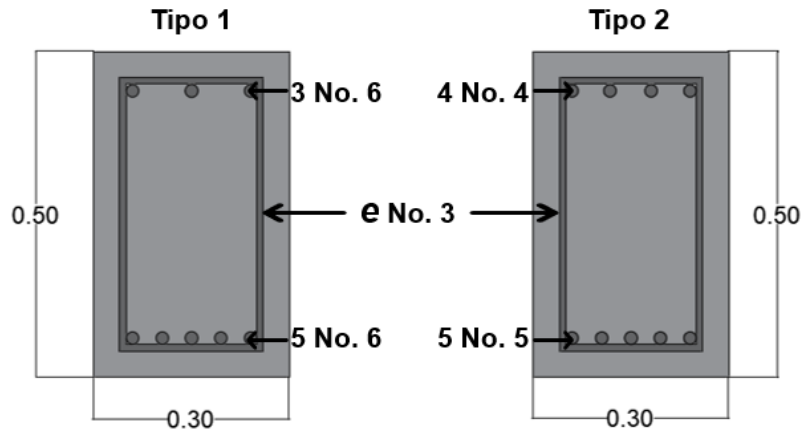


Figura 7. Tipologías de secciones transversales para vigas del bloque A, el detalle de todos los cálculos se encuentra en el Apéndice H.

El diseño de los elementos tipo columna compuesta se realizó al igual que en la propuesta anterior P2: basándose en el Título F de la NSR-10 [1]. De acuerdo con el subtítulo F.2.9.2.2.2 de la norma, el diseño a compresión de la sección de la columna se rige a los apartados F.2.9.2-9a y F.2.9.2-9b; los cuales indican una resistencia uniforme de la sección transversal, gracias al elemento metálico tipo cajón. Igualmente, en el subtítulo F.2.9.3.4, se indica el procedimiento de diseño para la resistencia al momento flector de la columna: distribución plástica de esfuerzos según F.2.9.3-3a.

Finalmente, las consideraciones para diseñar la resistencia al esfuerzo cortante se encuentran reguladas por el subtítulo F.2.9.4. Con base en eso, y siguiendo lo estipulado en dicha sección, se realiza el supuesto de que el cajón metálico es el encargado de soportar las acciones cortantes del elemento, tal cual lo permite el apartado F.2.9.4.1(a); entendiendo que la resistencia real del elemento es aún mayor gracias a la acción del núcleo de concreto. Nuevamente se implementó el uso de platinas soldadas en los extremos de la sección metálica (vea detalle en Apéndice I); y se descartó el uso de conectores de transferencia a cortante por el análisis y los motivos expuestos en

el Apéndice J. La sección transversal tipo de las columnas compuestas para P3, es la misma descrita anteriormente en la figura 6. Se verificó el cumplimiento de los requisitos estructurales (Apéndice J) y se seleccionó como la tipología adecuada, pues gracias a sus buenas cualidades de comportamiento estructural ante solicitaciones sísmicas y de resistencia a esfuerzo, la convierten en la opción indicada.

Ahora bien, la determinación de la placa aligerada para la cubierta/terraza considera una combinación de viguetas de $0,1 \times 0,45\text{m}$ (bxh) en concreto reforzado con separación de 1m entre ejes, unidas por una riostra ubicada aproximadamente en la mitad de sus ejes longitudinales (Apéndice I) de iguales dimensiones y refuerzo interno; todo lo anterior soportando una loseta superior de espesor $=5\text{cm}$ en concreto, reforzado con malla. El diseño final de placa es la misma a la de la propuesta estructural inicial. La sección tipo de placa aligerada (Figura 8) es constante para toda la cubierta del bloque A. El detalle en los cálculos está disponible en el Apéndice L.

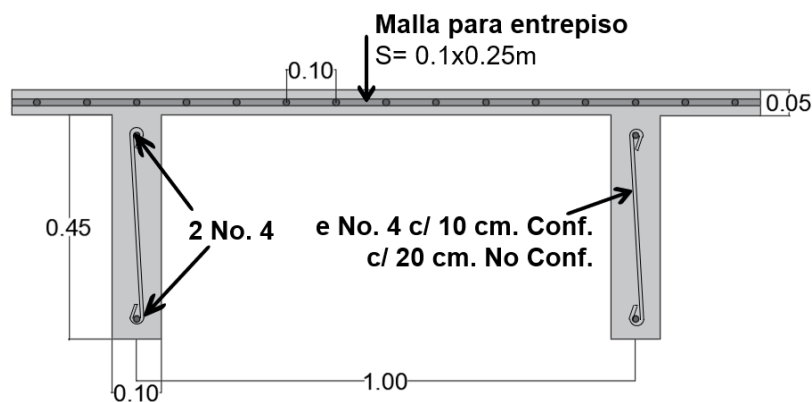


Figura 8. Sección transversal tipo para placa aligerada en cubierta del bloque A, el detalle de los cálculos se encuentra en el Apéndice L.

La cimentación escogida para la nueva propuesta estructural implementa zapatas aisladas centradas en la totalidad de los apoyos compuestos. De acuerdo con los resultados obtenidos para

el diseño de estos elementos, finalmente se determinaron 3 tipologías de zapatas diferentes en las que varían únicamente sus dimensiones, pues según las memorias de cálculo para esta parte (Apéndice K), la separación de las barras de refuerzo No. 4 es igual para las tres clasificaciones gracias a su determinación por “As” mínimo. La Tabla 4 resume las características del cuadro de zapatas finales.

Tabla 4. *Cuadro de zapatas definitivo de la nueva propuesta estructural*

Cuadro de zapatas						
Tipo	Base [m]	Ancho [m]	Alto [m]	S barras [m]	Profundidad cimentación [m]	Cantidad
Tipo 1	1,8	1,8	0,4	0,2	1,4	7
Tipo 2	1,5	1,5	0,4	0,2	1,4	9
Tipo 3	1,2	1,2	0,4	0,2	1,4	6

Nota: El Apéndice K contiene el detalle de las memorias de cálculo y la asignación de cada tipología para cada columna.

En el planteamiento de esta propuesta no se consideraron aquellos elementos estructurales que son comunes para ambas soluciones (inicial y nueva) y por ende no son referentes en la comparación de los diseños finales, como por ejemplo lo es la estructura metálica independiente para el ascensor.

4.4 Funcionamiento estructural comparativo

En esta sección se presenta un comparativo entre los valores relacionados con las derivas, periodos de vibración fundamentales (por F.H.E y por análisis dinámico – modal), los valores de resistencia última a esfuerzos de compresión, esfuerzos de flexión y esfuerzos cortantes para las columnas de ambas propuestas estructurales.

En la Tabla 5 se resumen los valores de comportamiento sísmico de los tres diseños (propuesta estructural inicial, propuesta alternativa con columnas compuestas sin reconfiguración estructural y propuesta alternativa con columnas compuestas con reconfiguración estructural), puntualmente los valores de periodos de vibración y derivas obtenidas del análisis por Fuerza Horizontal Equivalente y por análisis sísmico – modal. Se puede denotar la disminución de las derivas en las propuestas P2 (en un 60%) y P3 (en un 19%), en comparación a P1, lo que es indicador del buen comportamiento de las columnas compuestas (se aleja del 1% límite). Revise el análisis de resultados para detallar estos porcentajes.

Tabla 5. Cuadro de derivas finales para las tres propuestas

Derivas finales					
Propuesta	% Derivas - F.H.E		% Derivas - Sísmico/modal		Periodo
	Sentido "X"	Sentido "Y"	Sentido "X"	Sentido "Y"	T [s]
*P1	0,46	0,63	0,471	0,688	0,192
*P2	0,181	0,251	0,181	0,270	0,195
*P3	0,4045	0,6148	0,3777	0,5189	0,214

Nota: *P1,*P2 y *P3 hacen referencia a la propuesta inicial, a la propuesta con columnas compuestas sin reconfiguración y a la propuesta con columnas compuestas reconfigurada, respectivamente.

En lo relacionado a la resistencia de los diferentes esfuerzos a los que se ve comúnmente sometida la columna (compresión, flexión y cortante), la Tabla 6 recopila dichos valores de soporte. Aunque para las columnas convencionales se pueden considerar otros efectos, para este caso solo se contemplaron las resistencias a los esfuerzos previamente mencionados, pues son los mismos que también, por norma, se contemplan para los elementos compuestos tipo cajón relleno.

Tal cual como allí se observa, se dan mayores valores de resistencia para la sección de columna compuesta (P2 y P3), en comparación a la sección en concreto reforzado tradicional (P1).

Tabla 6. Cuadro de resistencias finales para las columnas de las tres propuestas

Valores máximos de resistencia nominal de sección tipo de columnas						
Resistencia a	Esfuerzo a compresión		Momento flector		Esfuerzo a cortante	
Propuesta	Pn [máx]	[kN]	Mn [máx]	[kN*m]	Vn [máx]	[kN]
P1	4476,65	kN	370,47	kN*m	628,19	kN
P2 y P3	6050,54	kN	403,72	kN*m	1117,8	kN

Nota: Los valores acá presentados hacen referencia a la resistencia última de los elementos, es decir, no están afectados por ningún coeficiente extra o similar. Para P2 y P3, los valores de resistencia son iguales, gracias a la comprobación de las fórmulas exigidas en la NSR-10.

Finalmente, la Tabla 7 contiene los resultados del análisis modal de ambas estructuras para los tres principales modos de oscilación: a) sentido “X”, b) sentido “Y” y sus valores acumulados. Allí se puede evidenciar los aumentos de la participación de cada uno de estos modos de vibración (desplazamiento en X y desplazamiento en Y), especialmente en la propuesta 3, que logra la adecuada vibración en los modos correspondientes.

Tabla 7. Cuadro de participación modal para las tres propuestas

Participación modal												
Modo	Propuesta inicial P1				Nueva propuesta P2				Nueva propuesta P3			
	UX	UY	UX Acum	UY Acum	UX	UY	UX Acum	UY Acum	UX	UY	UX Acum	UY Acum
1	0,118	0,667	0,118	0,667	0,082	0,708	0,082	0,708	0,002	0,935	0,002	0,935

Tabla 7. (Continuación)

Modo	UX	UY	UX Acum	UY Acum	UX	UY	UX Acum	UY Acum	UX	UY	UX Acum	UY Acum
2	0,79	0,196	0,908	0,863	0,807	0,161	0,889	0,869	0,921	0,016	0,923	0,951
3	0,092	0,138	1,0	1,0	0,111	0,133	1,0	1,0	0,112	0,085	1,0	1,0

Nota: Los valores UX, UY y Acum. hacen referencia al desplazamiento en el sentido “X”, sentido “Y” y el acumulado de la participación modal, respectivamente.

4.5 Cálculo de cantidades y estimación de costos

Como paso final se realiza la estimación de cantidades y costos económicos asociados al diseño estructural inicial, al de la nueva propuesta con columnas compuestas sin la reconfiguración estructural y al de la tercera propuesta con columnas compuestas y reconfiguración estructural; pues estos dos parámetros son necesarios para realizar el análisis comparativo. En la Tabla 8 se presenta el resumen de las cantidades totales de obra estimadas para desarrollar las propuestas del bloque A desde el punto de vista del sistema estructural. El Apéndice M contiene los cálculos de estos valores para cada uno de los elementos que componen el diseño inicial y las propuestas con apoyos compuestos, y que son de interés para la comparación. Esta tabla es útil para realizar este análisis directamente relacionado con las cantidades allí presentadas, que a su vez, evidencian una notable reducción, especialmente comparando los valores de la propuesta inicial (P1) vs la nueva propuesta (P3).

Tabla 8. *Cantidades de obra estimadas para las tres propuestas estructurales*

Cantidades de obra										
	Propuesta inicial (P1)			Nueva propuesta (P2)			Nueva propuesta (P3)			
ITEM	Material	Cant.	Und	Material	Cant.	Und	Material	Cant.	Und	
Vigas	Concreto	38,6	m ³	Concreto	38,6	m ³	Concreto	34,53	m ³	
	Acero	7938,66	kg	Acero	7938,7	Kg	Acero	6448,4	kg	

Tabla 8. (Continuación)

	Propuesta inicial (P1)			Nueva propuesta (P2)			Nueva propuesta (P3)		
Columna	Concreto	19,86	m ³	Concreto	9,78	m ³	Concreto	5,12	m ³
	Acero	8593,15	kg	Acero*	1265,08	Kg	Acero*	661,97	kg
	Cajón estructural	-	Und	Cajón estructural	21	Und	Cajón estructural	11	Und
Zapatatas	Excavación	108,39	m ³	Excavación	108,39	m ³	Excavación	72,2	m ³
	Concreto	30,97	m ³	Concreto	30,97	m ³	Concreto	20,63	m ³
	Ciclópeo	38,71	m ³	Ciclópeo	38,71	m ³	Ciclópeo	25,79	m ³
	Acero	1053,64	kg	Acero	1053,6	Kg	Acero	675,12	kg
Placa aligerada	Concreto	35,36	m ³	Concreto	35,36	m ³	Concreto	36,9	m ³
	Acero	930,58	kg	Acero	930,58	Kg	Acero	994,89	kg
	Malla de refuerzo	38	Und	Malla de refuerzo	38	Und	Malla de refuerzo	38	Und

Nota: Acero* hace referencia a la cantidad de acero, incluyendo el acero de las platinas. Las cantidades de obra acá presentadas se extrajeron de las memorias de cálculos y planos de las dos propuestas estructurales para el bloque A. El Apéndice M detalla estos valores.

La Tabla 9 resume los valores totales de las cantidades de obra para las tres propuestas, con relación al concreto, acero, terreno excavado, perfiles metálicos, entre otros.

Tabla 9. Valores totales de cantidades de obra de las tres propuestas

	Propuesta inicial (P1)			Nueva propuesta (P2)			Nueva propuesta (P3)		
Valores globales	Concreto	124,79	m ³	Concreto	114,71	m ³	Concreto	97,17	m ³
	Acero	18516,03	kg	Acero*	11187,98	Kg	Acero*	8780,4	kg
	Terreno excavado	108,39	m ³	Terreno excavado	108,39	m ³	Terreno excavado	72,2	m ³
	Ciclópeo	38,71	m ³	Ciclópeo	38,71	m ³	Ciclópeo	25,79	m ³
	Cajón estructural	-	Und	Cajón estructural	21	Und	Cajón estructural	11	Und
	Malla de refuerzo	38	Und	Malla de refuerzo	38	Und	Malla de refuerzo	38	Und

Nota: Acero* hace referencia a la cantidad de acero, incluyendo el acero de las platinas. Las cantidades de obra acá presentadas se extrajeron de las memorias de cálculos y planos de las dos propuestas estructurales para el bloque A. El Apéndice M detalla estos valores.

Ahora bien, la estimación de costos para las nuevas propuestas estructurales se determina de acuerdo con las cantidades de obra estimadas, presentadas anteriormente. De acuerdo con esto, la Tabla 10 presenta los resultados de dicha estimación. En esta se ven los valores globales para las cantidades totales y el costo de las tres soluciones estructurales.

El Apéndice N recopila esta estimación, basada en cantidades de suministro de material, a partir de precios consultados por un proceso de cotización. Estos valores responden a precios de empresas del mercado real, como lo son Acesco Colombia S.A.S por medio de la distribuidora MULTIALAMBRES Ltda., la tienda digital Ironmart Colombia, Concretart S.A.S. y Homecenter®.

Tabla 10. *Estimación de costos estructurales para las tres propuestas*

Resumen de la estimación de costos						
	Propuesta inicial (P1)		Nueva propuesta (P2)		Nueva propuesta (P3)	
Material	Cantidad	Costo global [COP]	Cantidad	Costo global [COP]	Cantida d	Costo global [COP]
Concreto	124,79	\$39'681.475,21	114,71	\$36'475.372,47	97,17	\$30'901.161,74
Acero*	18516,03	\$51'752.315,05	11187,98	\$31'414.987,39	8780,35	\$24'616.924,16
Terreno excavado	108,39	\$440.705,608	108,39	\$440.705,608	72,2	\$293.557,068
Ciclópeo	38,71	\$11'712.291,15	38,71	\$11'712.291,15	25,79	\$7'801.638,525
Cajón estructural	0	0	21	\$52'273.207,35	11	\$27'381.203,85
Malla de refuerzo	2696,48	\$8'760.863,52	2696,48	\$8'760.863,52	2696,48	\$8'760.863,52
	Propuesta inicial (P1)		Nueva propuesta (P2)		Nueva propuesta (P3)	
Valor TOTAL [COP]	\$112'347.650,5		\$141'077.427,5		\$99'755.348,86	

Nota: Acero* incluye cantidades y precios del acero para platinas. La estimación detallada de costos puede ser consultada en el Apéndice N.

5. Análisis de resultados

El análisis de los valores finales del funcionamiento estructural, cantidades y costos se divide en dos grandes momentos, separados por la aparición del tercer modelo estructural (P3). Vamos por partes.

5.1 Análisis P1 vs P2

Inicialmente se contemplaba la comparación de la solución estructural inicial (P1) con una alternativa de diseño que integraba columnas compuestas (P2). En esta última únicamente modifica la clase de apoyos (columnas en concreto reforzado tradicional) con las que cuenta P1 inicialmente, es decir, no se intervino ningún otro elemento estructural que no se viera altamente relacionado por la alteración en la tipología de columnas. La implementación de las columnas compuestas permitió que se incrementaran las prestaciones y se mejorara el funcionamiento estructural del bloque intervenido.

De acuerdo con los resultados de P2 en la Tabla 5, los porcentajes de derivas se alejaron más del valor límite del 1%, en comparación a los mismos de P1. Estos valores se presentan en la Tabla 11, donde se enuncia el porcentaje de disminución en las derivas de la propuesta P2 en comparación con la propuesta P1, lo que muestra una mejora de comportamiento, gracias a su distanciamiento con el valor máximo permitido.

Tabla 11. *Disminución en valores de derivas entre P1 y P2*

Sentido de análisis	% disminución* (F.H.E)	% disminución* (sísmico dinámico)
Sentido X	60,7%	61,6%
Sentido Y	60,2%	60,8%

Nota: *Porcentaje de disminución del valor de derivas para P2, con respecto al valor de derivas inicial de P1.

Ahora bien, según la Tabla 6, las secciones de columnas para la propuesta P2 (y P3) aumentaron sus resistencias a esfuerzos en comparación a la propuesta inicial. La diferencia en ese aumento en valores de kN y kN*m, su respectivo valor porcentual y su comparación, se exponen en la Tabla 12, a continuación.

Tabla 12. *Aumento de resistencias máximas de las nuevas columnas*

Incremento de valores de resistencia						
Incremento a	Esfuerzo a compresión		Momento flector		Esfuerzo a cortante	
Propuesta	Pn [kN]	[%]	Mn [kN*m]	[%]	Vn [kN]	[%]
P2 (y P3)	1573,89	35,16	33,25	8,98	489,61	77,94

Nota: Los datos acá presentados corresponden al cuánto aumentaron los valores de resistencia en cifra y porcentaje, en comparación a P1. P2 y P3 tienen los mismos valores gracias al uso de la misma sección, cuyos valores de resistencia nominal límite permanecen constantes entre estas dos.

Sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos; P2 disminuyó su desempeño relacionado al análisis modal del edificio, en comparación a P1 (Tabla 7). Mientras que la propuesta inicial alcanzaban una participación del 90% en sus sentidos “X” y “Y” en los modos de vibración 2 y 3 respectivamente (lo que tampoco es ideal); la propuesta alternativa sin reconfiguración estructural lograba ese 90% de participación en el modo 3 para ambos sentidos, lo que la aleja aún más del caso idóneo de alcanzar dicho porcentaje en los modos 1 (para la vibración en sentido “Y”) y 2 (para la vibración en sentido “X”). Lo anterior, siendo resultado de la irregularidad del bloque y del aumento en la masa del edificio gracias a la incorporación de los cajones metálicos de las nuevas columnas compuestas.

5.1.1 Análisis de cantidades y costos P1 vs P2. Ahora bien, relacionando las cantidades de obra obtenidas por la nueva propuesta (P2), se analiza lo siguiente. Este diseño alternativo mantiene las cantidades originales de la propuesta inicial, a excepción de las cantidades relacionadas con las nuevas columnas compuestas. Esto último respondiendo a las alteraciones que se hicieron en comparación con la propuesta P1. De acuerdo con la Tabla 8, se redujeron de P1 a P2 las cantidades de concreto y acero en las columnas en un 50,8% y un 85,3% respectivamente, lo que equivale a la disminución de un 8,1% del concreto y 39,6% del acero en las cantidades globales. Sin embargo apareció un tercer ítem relacionado con los cajones estructurales para las columnas, con un total de 21 unidades.

El último ítem actúa negativamente sobre los costos asociados a la nueva propuesta P2. Según los resultados de la Tabla 10, la estimación de costos arrojó que es más costosa esta segunda propuesta en comparación a la solución inicial (Tabla 13). Si bien, los costos relacionados con el concreto y acero disminuyeron para las columnas, los altos precios de los perfiles metálicos elevaron los valores totales de las columnas y de la propuesta en general, cerca de un 25,6%. Esto último siendo la principal motivación para el surgimiento de la propuesta P3.

Tabla 13. *Análisis de costos P1 vs. P2*

Análisis de costos P1 vs. P2				
Costos [COP]	Propuesta P1		Propuesta P2	
Concreto	\$	6.315.711	\$	3.109.608
Acero*	\$	24.017.853	\$	3.680.525
Perfiles	\$	-	\$	52.273.207
Total Columnas	\$	30.333.564	\$	59.063.340,97
Total Propuesta	\$	112.347.650,4	\$	141.077.427,5

Nota: Costos asociados al diseño estructural inicial (P1) y a la nueva propuesta sin reconfiguración estructural (P2). Acero* incluye costos de platinas. Estimación detallada en el Apéndice N.

5.2 Análisis P1 vs P3

La propuesta alternativa con columnas compuestas (sin reconfiguración estructural) presenta buenos resultados; sin embargo, aunque las cualidades funcionales y las cantidades de obra entre las dos propuestas hayan mejorado considerablemente, el factor económico le disminuye la eficiencia a las columnas compuestas a la hora de desarrollar el proyecto con la solución P2. Es por eso que, con el fin de encontrar los verdaderos ahorros económicos que, según la bibliografía, esta clase de apoyos promete; se realizó el planteamiento de la tercera propuesta (P3).

Esta segunda solución compuesta contempla la reconfiguración del sistema estructural en su globalidad, es decir, no solo modifica el tipo de columnas, sino que las relaciona con la alteración de los demás elementos estructurales. La propuesta P3 optimiza la solución estructural, reduciendo la cantidad de columnas, de 42 a 22, aprovechando los buenos resultados que ya se habían obtenido anteriormente. De acuerdo con esto, analicemos la nueva propuesta P3.

Empezando con el funcionamiento de la nueva estructura, que presenta la reducción en el número de columnas, se puede observar que se aprovecharon los resultados de las columnas compuestas, manteniéndose incluso una mejora mínima del porcentaje de derivas entre P1 y P3 (Tabla 5); mostrando reducciones en sus valores de acuerdo con la Tabla 14, lo que se traduce en un leve alejamiento del valor límite del 1% para las derivas.

Tabla 14. *Disminución en valores de derivas entre P1 y P3*

Sentido de análisis	% disminución* (F.H.E)	% disminución* (sísmico dinámico)
Sentido X	12,1%	19,8%
Sentido Y	2,4%	24,6%

Nota: *Porcentaje de disminución del valor de derivas para P3, con respecto al valor de derivas inicial de P1.

Como se mantuvieron las mismas secciones de columnas compuestas para P3, la resistencia de la sección sigue conservando los mejores valores presentados anteriormente, en la Tabla 12. Sin embargo, considerando los resultados anteriores, la nueva configuración estructural solucionó el problema con respecto a los modos de vibración de la estructura que afectaban a las propuestas P1 y P2; pues en este tercer caso, el 90% de participación en el análisis modal se da de acuerdo con el caso idóneo: la solución estructural logró el 93,5% del factor en el sentido “Y” en el modo 1, y el 92,3% del sentido “X” en el modo 2, como debería ser.

5.2.1 Análisis de cantidades y costos P1 vs P3. El tercer diseño estructural (P3) disminuyó aún más las cantidades de material debido al uso optimizado de las columnas compuestas. Se redujeron de P1 a P3 las cantidades de concreto y acero en las columnas en un 74,2% y un 92,3% respectivamente; mientras que pasó de tener 21 cajones metálicos, a solo 11 unidades. Con respecto a los valores globales, en la Tabla 15 se ven los porcentajes de reducción entre las cantidades de la propuesta inicial y la propuesta alternativa con reconfiguración estructural, mostrando un claro ahorro por parte de P3.

Tabla 15. *Porcentajes de disminución de cantidades entre P1 y P3*

Cantidades Globales	Disminución de cantidades P1 vs P3			
	Propuesta inicial (P1)		Nueva propuesta (P3)	[%] de disminución
Concreto	124,79	m ³	97,17	m ³ 22,1
Acero	18516,03	kg	8780,4	Kg 52,6
Terreno excavado	108,39	m ³	72,2	m ³ 33,4
Ciclópeo	38,71	m ³	25,79	m ³ 33,4
Cajón estructural	0	Und.	11	Und. 0,0
Malla de refuerzo	38	Und.	38	Und. 0,0

Nota: Comparación de cantidades estructurales entre P1 y P3, con su respectivo % de reducción.

Finalmente, los costos asociados a las cantidades de obra estructurales, la principal causa por la cual se desarrolló esta última propuesta estructural P3. Nuevamente considerando a la Tabla 10, el nuevo diseño con columnas compuestas y reconfiguración estructural seguía presentando valores económicos ligeramente más altos para las columnas, en comparación con la propuesta inicial (Tabla 16). Sin embargo, la reconfiguración estructural permitió una disminución sustancial en las cantidades de obra globales, lo que influyó directamente en el costo global de la propuesta, generando un ahorro económico del 11,21% en comparación a la propuesta P1.

Tabla 16. *Análisis de costos P1 vs P3*

Análisis de costos P1 vs. P3				
Costos [COP]	Propuesta P1		Propuesta P3	
Concreto	\$	6.315.711	\$	1.628.842,36
Acero*	\$	24.017.853	\$	1.925.961,5
Perfiles	\$	-	\$	27.381.203,85
Total Columnas	\$	30.333.564	\$	30.936.007,71
Total Propuesta	\$	112.347.651	\$	99.755.348,86

Nota: Costos asociados al diseño estructural inicial (P1) y a la nueva propuesta con reconfiguración estructural (P3). En el total de la propuesta se incluyen los valores de los demás elementos estructurales (Tabla 10). Estimación detallada de costos en el Apéndice N.

6. Conclusiones

El desarrollo de este trabajo de grado se realizó satisfactoriamente al generar un análisis comparativo entre una propuesta estructural aporticada con columnas convencionales (P1) y dos alternativas de diseño con columnas compuestas tipo cajón relleno (P2 y P3), para el diseño de una edificación con uso educativo.

Se diseñó la nueva propuesta estructural que implementa el uso de columnas compuestas para la edificación objeto de estudio. Se obtuvo dos diseños que involucraban esta clase de elementos,

considerando un replanteamiento estructural para uno de ellos. De estas nuevas soluciones se consideraron valores de funcionamiento estructural (porcentajes de derivas, resistencia de las columnas a esfuerzos, participación modal), valores de cantidades de obra estructurales y costos económicos relacionados a estas últimas para obtener exitosamente una propuesta P3 (con columnas compuestas y reconfiguración) de estructura, apta para la construcción.

Se compararon los valores límites de funcionamiento estructural de las nuevas propuestas con columnas compuestas (P2 y P3) y de la propuesta inicial con columnas en concreto reforzado tradicional (P1). La mejor solución de diseño para el bloque intervenido es la que contempla la nueva tipología de columnas y la reconfiguración estructural (P3). Esto último analizando la importancia de reducir el número de columnas, principalmente por los resultados obtenidos en el desarrollo, donde el exceso de masa de las columnas compuestas de la propuesta P2 afectó negativamente la participación modal de la edificación, específicamente en los modos de vibración 1 y 2, lo que generaba irregularidad estructural.

Se compararon las cantidades de material y las estimaciones de costos asociados al sistema estructural de las nuevas propuestas de diseño con columnas compuestas y de la solución inicial con columnas en concreto reforzado. La propuesta estructural con columnas compuestas tipo cajón relleno y con reconfiguración (P3) mostró menores cantidades de obra y un ahorro global del 11,21% en comparación a la propuesta inicial convencional P1; lo que convierte a la solución P3 en la mejor opción estructural para la edificación intervenida. Esto último, considerando únicamente el suministro del material, por lo que deberán hacerse más estudios sobre la incidencia del transporte o del proceso constructivo del encamisado del cajón de acero.

La implementación de columnas compuestas tipo cajón relleno sí representa beneficios al momento de desarrollar el sistema estructural de una edificación esencial, con uso educacional;

siempre y cuando su aplicación vaya acompañada con un replanteo en el diseño de los demás elementos que componen a este sistema. Lo anterior, con la intención de conseguir las mejores cualidades estructurales, con menores cantidades de obra y costos asociados; entendiendo el uso de esta clase de apoyos en el contexto general, y no individual, del sistema estructural. Todo esto, otorgando una solución óptima y permitiendo materializar una construcción de esta clase; permitiendo el uso de mayores luces entre apoyos, mayores cargas y aprovechar las cualidades propias del diseño arquitectónico inicial.

Referencias Bibliográficas

- [1] *Título F – Estructuras metálicas*, Reglamento colombiano de construcción sismo resistente - Norma NSR-10, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS, Colombia, 2010.
- [2] *Título A – Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente*, Reglamento colombiano de construcción sismo resistente - Norma NSR-10, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS, Colombia, 2010.
- [3] *Título C – Concreto estructural*, Reglamento colombiano de construcción sismo resistente - Norma NSR-10, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS, Colombia, 2010.
- [4] R. Rochel, “*Análisis y diseño sísmico de edificios*”, 2ª Ed., Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT, 2012.
- [5] L. Barros y M. Peñafiel, “Análisis comparativo económico – estructural entre un sistema aporticado, un sistema aporticado con muros estructurales y un sistema de paredes portantes, en un edificio de 10 pisos”, Tesis de grado, EPN, Quito, Ecuador, 2015.
Disponible: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10314?mode=full>
- [6] Q. Liang, “Performance-based analysis of concrete-filled steel tubular beam-columns, Part I: Theory and algorithms”, *Journal of Structural Engineering*, vol. 65, pp. 363 – 372, feb. 2009.
- [7] P. Barreto y R. Medina, “Estimación del comportamiento dinámico del edificio del cuerpo de bomberos de la ciudad de Trujillo”, Tesis de grado, ULA, Mérida, Venezuela, 2008.

- [8] M. Khan, M. Rana, Y. Zhang, y C. Lee, “Compressive behaviour of engineered cementitious composites and concrete encased steel composite columns”, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 167, pp. 1 – 18, abr. 2020.
- [9] D. Perrone y A. Filiatrault, “Automated seismic design of non-structural elements with building information modelling”, *Automation in Construction*, vol. 84, pp. 166 – 175, dic. 2017.
- [10] J. La Torre, “Optimización del diseño estructural, enfocado en el costo de edificaciones educativas de concreto armado”, Tesis de maestría, PUCP, Lima, Perú, 2018.
- [11] L. Garza, “Seminario de estructuras compuestas”, conferencia virtual por la Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia, 2020.
- [12] M. Khan, M. Rana, Y. Zhang, y C. Lee, “Engineered cementitious composites (ECC) encased concrete-steel composite stub columns under concentric compression”, *Structures*, vol. 24, pp. 386 – 399, abr. 2020.
- [13] L. Bozzo y A. Barbat, “*Diseño Sismorresistente de edificios*”, 1ª Ed., Barcelona: Editorial Reverté, 2000.
- [14] A. Kassimali, “*Análisis Estructural*”, 5ª Ed., Ciudad de México: Cengage Learning Editorial, 2015.
- [15] Y. Pi, M. Bradford, y B. Uy, “Second Order Nonlinear Inelastic Analysis of Composite Steel – Concrete Members. I: Theory.”, *Journal of Structural Engineering*, vol. 132, no. 5, pp. 751 – 761, may. 2006.

- [16] V. Ishvarbhai, Q. Liang, y M. Hadi, “Behavior of biaxially-loaded rectangular concrete-filled steel tubular slender beam-columns with preload effects”, *Thin-Walled Structures*, no. 79, pp. 166 – 177, jun. 2014.
- [17] *Título B – Cargas*, Reglamento colombiano de construcción sismo resistente - Norma NSR-10, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS, Colombia, 2010.

Apéndices

Los apéndices relacionados a lo largo del presente informe se encuentran en formato PDF, en la carpeta digital llamada “Apéndices del libro – Argüello”, adjunta a la misma entrega de este documento final de proyecto de grado. El listado completo de estos anexos está al inicio de este reporte de trabajo, bajo el título de “Lista de apéndices”; donde también se relaciona a la carpeta previamente enunciada. Para consultar cualquiera de ellos, debe dirigirse al archivo digital ya mencionado.