

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES DE
ENTREPISOS EN DOS DIRECCIONES, LOSAS MACIZAS Y LOSAS NERVADAS**



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827

MATEO BRAVO GUERRERO

VANESSA PAOLA CERVANTES CAMPO

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

CARTAGENA D.T. Y C.

2022



ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES DE ENTREPISOS EN DOS DIRECCIONES, LOSAS MACIZAS Y LOSAS NERVADAS

Autores:

**MATEO BRAVO GUERRERO
VANESSA PAOLA CERVANTES CAMPO**

**Trabajo de grado para optar por el título de:
INGENIERO CIVIL**

Director

**WALBERTO RIVERA MARTINEZ
Ingeniero Civil.**

Grupo de investigación

ESCONPAT

Línea de investigación

Modelación numérica en la ingeniería civil

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA D.T. Y C.

2022



NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del director
WALBERTO RIVERA MARTINEZ

Firma del jurado
MANUEL SABA

Firma del jurado
ROCIO PADILLA PRESTON



TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	3
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	9
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	13
MARCO REFERENCIAL	15
2.1. Antecedentes	15
2.1.1. Internacionales	15
2.1.2. Nacionales	18
2.2. Marco Teórico	19
2.2.1. Tipos de losas	19
2.2.2. Aligeramiento de losas de entrepiso	22
2.3. Marco normativo	27
2.3.1. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10	27
2.4. Costos	28
2.4.1. Costos indirectos	28
2.4.2. Costos directos	28
2.5. Software estructural	29
2.5.1. ETABS	29
2.5.2. Engsolutions RCB	31
OBJETIVOS	33
3.1. Objetivo general	33
3.2. Objetivos específicos	33



ALCANCE	34
4.1. Delimitación espacial.....	34
4.2. Delimitación temporal	34
4.3. Delimitación conceptual	34
4.4. Resultados esperados	35
4.5. Producto final a entregar	35
4.6. Productos complementarios.....	36
4.7. Excepciones y/o limitaciones.....	36
METODOLOGÍA.....	37
5.1. Fase inicial	37
5.1.1. Antecedentes referentes a los estudios de sistemas de entrepisos de losa maciza y losa nervada en una y dos direcciones.	37
5.1.2. Antecedentes referentes al uso de software estructural para la modelación numérica de sistemas de entrepiso.	38
5.1.3. Caracterización de la edificación objeto de estudio	38
5.2. Fase de análisis y diseño estructural	38
5.2.1. Sistema estructural, materiales y pre dimensionamiento.....	39
5.2.2. Avalúo de cargas	39
5.2.3. Análisis de viento	39
5.2.4. Análisis sísmico y espectro de respuesta de diseño.....	39
5.2.5. Análisis de irregularidades	40
5.2.6. Verificación del periodo fundamental de la estructura.....	40
5.2.7. Chequeo de derivas.....	40
5.2.8. Combinaciones de cargas	40
5.3. Fase de modelación numérica.....	41



ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES DE ENTREPISOS EN DOS DIRECCIONES,
LOSAS MACIZAS Y LOSAS NERVADAS

5.4.	Fase de análisis de sistemas constructivos.....	41
5.5.	Fase de análisis de costos.....	41
5.6.	Fase final.....	41
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		42
6.1.	Elaboración del modelo conceptual.....	42
6.1.1.	Caracterización de la edificación objeto de estudio.....	42
6.1.2.	Sistema estructural, materiales y pre dimensionamiento.....	42
6.1.3.	Avalúo de cargas.....	47
6.1.4.	Análisis sísmico y espectro de respuesta de la estructura.....	49
6.1.5.	Análisis de irregularidades.....	54
6.1.6.	Combinaciones de cargas.....	59
6.2.	Modelación numérica.....	61
6.2.1.	Análisis y diseño de la edificación con losa maciza sobre vigas principales y vigas secundarias en una dirección.....	61
6.3.	Comparativo de sistemas de losa de entrepiso y software de diseño, ETABS y RCB Engnsolutions.....	72
6.3.1.	Filosofía de diseño.....	72
6.3.2.	Derivas.....	72
6.3.3.	Pesos de la estructura.....	73
6.3.4.	Irregularidades.....	74
6.3.5.	Análisis sísmico.....	74
6.3.6.	Losas.....	75
6.3.7.	Periodos.....	75
6.3.8.	Rigidez de la estructura.....	76
6.3.9.	Consumos concreto.....	76



*ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES DE ENTREPISOS EN DOS DIRECCIONES,
LOSAS MACIZAS Y LOSAS NERVADAS*

6.3.10.	Consumos acero	77
6.4.	Análisis de costos.....	79
6.4.1.	APU de Edificación con losa maciza sobre vigas y vigas secundarias en una dirección, modelo de RCB.	79
6.4.2.	APU de Edificación con losa maciza sobre vigas y vigas secundarias en una dirección, modelo de ETABS.	81
6.4.3.	Comparativa de costos.....	83
CONCLUSIONES.....		84
RECOMENDACIONES		86
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		87



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Losa nervada en una dirección.....	19
<i>Figura 2. Losa plana con ábacos y capiteles.....</i>	20
Figura 3. Losa maciza sobre vigas, armada en una dirección	20
Figura 4. Losa maciza sobre vigas, armada en dos direcciones	21
Figura 5. Losa nervada apoyada sobre vigas, armada en dos direcciones	21
<i>Figura 6. Casetones de madera</i>	22
<i>Figura 7. Casetón de icopor (polietileno expandido).....</i>	23
Figura 8. Casetón de fibra de vidrio	24
Figura 9. Casetón de acero	25
Figura 10. Casetón en plástico (Sistema ATEX).....	26
Figura 11. Modelación numérica del proyecto en el software ETABS.....	30
<i>Figura 12. Modelación numérica del proyecto en el software RCB Engolutions.....</i>	31
Figura 13. Ubicación del proyecto	34
Figura 14. Mapa de valores de Aa.....	49
Figura 15. Mapa de valores de Av.....	50
Figura 16. Espectro de respuesta	52
Figura 17. Distribución de vigas principales y secundarias en una dirección en planta zona parqueaderos.....	61
Figura 18. Distribución de vigas principales y secundarias en una dirección en planta zona apartamentos.....	62
Figura 19. Sección de columna 75X75 cm losa maciza 1D-RCB.....	64
Figura 20. Sección de columna 85X85 cm losa maciza 1D-RCB.....	64
Figura 21. Sección de vigas 50X55 cm losa maciza 1D-RCB	65
Figura 22. Sección de vigas 25X55 cm losa maciza 1D-RCB	66
<i>Figura 23. Sección de vigas 40X55 cm losa maciza 1D-RCB</i>	66
Figura 24. Sección de columna 75X75 cm losa maciza 1D-ETABS	71
Figura 25. Grafica representativa del porcentaje de derivas de la estructura	73
Figura 26. Grafica representativa de los pesos de la estructura	74
Figura 27. Grafica representativa de los periodos de la estructura.....	75
<i>Figura 28. Gráfica representativa de volúmenes de concreto.....</i>	77



Figura 29. Gráfica representativa del consumo de acero 78

Figura 30. Gráfica representativa de costos y materiales según el tipo de losa analizada .. 83



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Sistema estructural de pórtico resistente a momentos.....	42
Tabla 2. Materiales	43
Tabla 3. Alturas o espesores mínimos de vigas no pre-esforzadas o losas reforzadas en una dirección a menos que se calculen las deflexiones.....	44
Tabla 4. Alturas o espesores mínimos recomendados para vigas no pre-esforzadas o losas reforzadas que soporten muros divisorios y particiones frágiles susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes, a menos que se calculen las deflexiones	44
Tabla 5. Alturas o espesores mínimos de vigas no pre-esforzadas o losas reforzadas en una dirección a menos que se calculen las deflexiones.....	46
Tabla 6. Alturas o espesores mínimos recomendados para vigas no pre-esforzadas o losas reforzadas que soporten muros divisorios y particiones frágiles susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes, a menos que se calculen las deflexiones	46
Tabla 7. Resumen de dimensiones de elementos estructurales	46
Tabla 8. Carga muerta - sobrepuesta por pisos.....	47
Tabla 9. Carga muerta - peso propio por piso	48
Tabla 10. Carga viva por piso	48
Tabla 11. Espectro de respuesta	52
Tabla 12. Valor de los parámetros C_t y a para el cálculo del periodo aproximado T_a	53
Tabla 13. Irregularidades en planta	54
Tabla 14. Irregularidades en altura.....	56
Tabla 15. Irregularidad por ausencia de redundancia	57
Tabla 16. Resumen de coeficientes	58
Tabla 17. Fuerzas sísmicas reducidas por el factor R_0	59
Tabla 18. Dimensiones de columnas para losa maciza 1D	63
Tabla 20. Consumos para columnas losa maciza 1D-RCB	65
Tabla 21. dimensiones de vigas para losa maciza 1D-RCB	65
Tabla 22. Consumos para vigas losa maciza 1D-RCB	67
Tabla 23. Consumos para losa maciza en 1D -RCB.....	67
Tabla 24. Consumo para columnas losa maciza 1D-ETABS.....	71
Tabla 25. Consumo para vigas losa maciza 1D-ETABS.....	71



Tabla 26. Consumo para losa maciza 1D-ETABS	72
Tabla 27. Tabla comparativa de las derivas máximas de la estructura según el sistema de entrepiso analizado y software utilizado.	73
Tabla 28. Tabla comparativa de los pesos de la estructura según el sistema de losa de entrepiso analizado y software utilizado.	74
Tabla 29. Tabla comparativa del periodo de la estructura según el sistema de losa de entrepiso analizado y software utilizado.	75
Tabla 30. Volúmenes de concreto de la estructura según el sistema de losa de entrepiso analizado	76
Tabla 31. Consumo de acero de la estructura según el sistema de losa de entrepiso analizado	77
Tabla 32. APU de edificación con losa maciza 1D-RCB.	79
Tabla 33. APU de edificación con losa maciza 1D-ETABS.....	81
Tabla 34. Comparativa de costos de formaleta + materiales.....	83



RESUMEN

En este trabajo se presenta una investigación de tipo documental, en la cual se realiza la comparación de diseños estructurales entre los sistemas de entrepisos nervados y macizos, en una y dos direcciones, mediante la utilización de dos programas de diseño, ETABS y RCB con el fin de elegir la mejor alternativa en el contexto colombiano.

Para ello primero se hizo una investigación detallada, recopilando información en las bases de datos Science Direct y Scielo, la Universidad de Cartagena y universidades a nivel mundial, como Perú y Salvador. Una vez recolectada la información pertinente, se escogió un edificio modelo con 15 pisos de altura, partiendo del suministro de los planos arquitectónicos de un edificio con características similares, con fin de hacer la distribución en planta de los 4 modelos en los dos programas correspondientes, losa maciza en una y dos dirección y losa nervada en una y dos direcciones. Luego se determinaron los parámetros iniciales con el fin de tener un punto de comparación de los resultados arrojados por el software y a su vez los volúmenes de concreto y cuantía de acero. Además de los diseños se realizó un análisis comparativo de costos con dos métodos constructivos como lo son Poliestireno expandido (icopor) y casetones plásticos ATEX, dando una visión para que el proyecto sea económicamente viable y constructivamente posible, siendo esto otro punto de comparación.

De acuerdo al pre dimensionamiento que se realizó a los elementos estructurales a los resultados obtenidos para una edificación con un área total construida de 9.238,5 m² la mejor distribución fue una losa nervada en una dirección con una carga muerta de 1,18 Ton/m², con sumos de concreto de 0.198 m³/m² y acero, incluyendo (longitudinal, estribos y malla electro soldada) 22.49 Kg/m², quedando de segundo lugar la losa nervada en dos direcciones con una carga muerta de 1,22 Ton/m² y con una diferencia de consumo alrededor de 10% por encima. En tercer lugar, la losa maciza en dos direcciones con 17% de mayor consumo y por último la losa maciza en una dirección con un 30% en consumo de concreto y acero.



ABSTRACT

In this work, a documentary research is presented, in which the comparison of structural designs between ribbed and solid floor systems is carried out, in one and two directions, through the use of two design programs, ETABS and RCB with the in order to choose the best alternative in the Colombian context.

For this purpose, a detailed research was first carried out, collecting information in the Science Direct and Scielo databases, the University of Cartagena and universities worldwide, such as Peru and Salvador. Once the pertinent information was collected, we chose a model building with 15 stories high, starting from the supply of the architectural plans of a building with similar characteristics, in order to make the floor plan distribution of the 4 models in the two corresponding programs, solid slab in one and two directions and ribbed slab in one and two directions. Then the initial parameters were determined in order to have a point of comparison of the results obtained by the software and the volumes of concrete and amount of steel. In addition to the designs, a comparative cost analysis was made with two construction methods such as expanded polystyrene (icopor) and ATEX plastic cassettes, giving a vision for the project to be economically viable and constructively possible, this being another point of comparison.

According to the pre-dimensioning of the structural elements and the results obtained for a building with a total constructed area of $9,238.5 \text{ m}^2$, the best distribution was a ribbed slab in one direction with a dead load of 1.18 Ton/m^2 , with concrete sums of $0.198 \text{ m}^3/\text{m}^2$ and steel, including steel, with a dead load of 1.18 Ton/m^2 . $198 \text{ m}^3/\text{m}^2$ and steel including (longitudinal, stirrups and electro welded mesh) 22.49 Kg/m^2 . In second place was the ribbed slab in two directions with a dead load of 1.22 Ton/m^2 and with a difference in consumption of about 10% above, in third place, solid in two directions with 17% higher consumption and finally the solid in one direction with 30% in consumption of concrete and steel.



INTRODUCCIÓN

Una estructura puede definirse como un grupo de componentes que se unen de manera ordenada con el fin de cumplir una función específica de forma segura. Para el caso de las edificaciones, se debe cumplir la función de alojar diversas actividades como vivienda, comercio, entretenimiento, entre otras. Bajo requisitos de diseño que garanticen la seguridad de quienes harán uso de la estructura. Pero, además de estos objetivos se deben satisfacer a su vez, requisitos de costos cuyos valores deben mantenerse dentro de los límites del presupuesto asignado al diseño y construcción de la obra, (Avila, 2017).

En la industria de la construcción, el análisis de costos posee gran importancia ya que permite prever la información financiera de un proyecto, lo cual sirve de apoyo para tomar decisiones convenientes y oportunas. La escogencia del sistema de entrepiso a utilizar en una obra es un ejemplo claro de este tipo de decisiones, ya que la losa de entrepiso hace parte de los elementos que impactan de manera significativa en los costos de una edificación, debido a los volúmenes de concreto y acero que genera este elemento por el espesor y el número de veces que se utiliza en una edificación.

Actualmente, existen múltiples opciones de sistemas de entrepiso que se pueden implementar en proyectos de edificaciones, estos sistemas varían de costos entre ellos y dependen directamente de los materiales que utilizan y el sistema constructivo inherente a él. Otro factor importante que influye en el costo de un proyecto, es el software con el cual se realiza la modelación numérica del mismo, ya que los softwares presentan diferencias de cálculo y de precisión de los resultados en el análisis de edificaciones y estas diferencias pueden generar mayores o menores costos para el proyecto. por lo tanto, es preciso identificar ¿cuál sistema de entrepiso resulta óptimo utilizar, teniendo en cuenta parámetros estructurales, sistema constructivo para colocación en obra y los costos de la totalidad del proyecto? y establecer ¿cuáles son las principales diferencias entre los resultados obtenidos por los softwares de diseño estructural para el análisis de la presente investigación que influyen directamente en los costos del proyecto? estos interrogantes se deben solucionar bajo el cumplimiento del normativa colombiana sismorresistente, NSR-10.



*ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES DE ENTREPISOS EN DOS DIRECCIONES,
LOSAS MACIZAS Y LOSAS NERVADAS*

En consecuencia, para la siguiente investigación aplicada, se modelará, analizará y diseñará, a modo de ejemplo, una edificación de 15 pisos y se analizará el análisis de costos del sistema de entrepiso implementado. Para esta edificación se tiene en cuenta un sistema estructural de pórticos de concreto con capacidad mínima de disipación de energía (DMI), ubicado en Cartagena, Bolívar ciudad que se encuentra en una zona de amenaza sísmica baja de acuerdo con lo estipulado en la normativa NSR-10.

La organización de la presente investigación documental se establece como se muestra a continuación, Inicialmente, se presenta un marco referencial sobre los temas fundamentales de la investigación, estos son los sistemas de entrepiso comúnmente utilizados en Colombia, los sistemas constructivos comúnmente utilizados para la colocación en obra de los sistemas de entrepiso, los softwares de modelación numérica, análisis y diseño estructural, RCB Eng solution y ETABS y los costos directos e indirectos. Segundo, se plantea la aplicación de las herramientas informáticas RCB Eng solution y ETABS para la modelación de la edificación de ejemplo. Tercero, se presentan los resultados correspondientes al análisis estructural comparativo, los cuales corresponden a los parámetros geométricos de pre dimensionamiento de los elementos estructurales, materiales utilizados y la definición de las cargas presentes según el tipo de edificación, las principales diferencias en la modelación numérica, análisis y diseño realizado por cada software que influyen directamente en los costos del proyecto y finalmente, el diseño de los elementos de la estructura, las cantidades y los costos según el sistema de entrepiso y el sistema constructivo utilizar.



MARCO REFERENCIAL

2.1. Antecedentes

A continuación, se presenta un resumen de publicaciones que argumentan esta investigación, con una característica en común que es realizar un análisis técnico y económico identificando cuáles son los sistemas constructivos existentes y determinar cuáles son las ventajas tanto a nivel nacional como internacional. Cabe resaltar que en Colombia no hay muchas investigaciones sobre el tema, por tanto, la mayoría de las publicaciones de referencia son internacionales:

2.1.1. Internacionales

- **Casco, J. & Majano, D., (2019). Tesis. Análisis comparativo de los diferentes sistemas de entepiso en edificios basado en aspectos de seguridad y costo, Universidad del salvador (RIUES).**

La investigación en mención describe la gran importancia que tiene en una construcción las losas de entepiso, para lograr que la relación costo/beneficio sea muy favorable, es decir, combinando la seguridad a la estructura y optimizando los costos. El objetivo de este trabajo es escoger cuál de todos los sistemas de entepiso más utilizados en el Salvador, es el mejor teniendo en cuenta alguna de las variables como: costo, tiempo de ejecución, uso de materiales, mano de obra, proceso constructivo, dependiendo de cada proyecto. Los sistemas que ellos comparan son Sistema de losa maciza de concreto reforzado, sistema de losa prefabricada (Vigueta - Bovedilla) y Losa con Steel deck. Determinaron en sus conclusiones que cuanto mayor sea el peso del sistema utilizado en la losa, mayores aceros de refuerzo tendrán todos los demás elementos estructurales y también las dimensiones serán mucho mayores. También se resalta que es evidente que una obra puede aumentar su valor cuando se deben realizar procesos constructivos con mano de obra calificada, ya que se necesita mayor precisión a las especificaciones técnicas. Se considera realizar una investigación más detallada, adicionando al estudio un sistema constructivo con otro tipo de aligerante (polipropileno) que permita trabajar las losas nervadas sin incrementar los costos de formaletería sin mano de obra calificada.



- **Ramos, M. (2002). Tesis. Análisis técnico y económico de losas de entrepiso, Universidad de Piura, Piura, Perú.**

Los autores con la necesidad de encontrar sistemas constructivos más eficientes y económicos, se colocaron como objetivo determinar diferencias entre las losas compuestas con las láminas colaborantes (Steel deck), losas nervadas en una y bidireccional, losas compuestas con nervios pretensados determinando la luz que se pueden abarcar con estos sistemas bajo ciertas condiciones de servicio. Resaltaron que las losas nervadas se usan con la finalidad de conseguir estructuras más ligeras y económicas. Una de las recomendaciones de los autores es que si el proyecto tiene luces menores a cuatro metros se recomienda losas in situ y losas compuestas con láminas colaborantes. Como conclusión a todo el estudio realizado que el poliestireno como material aligerante puede lograr una disminución en un 40 % en el peso propio de la losa con respecto a los ladrillos de arcilla, También destacan la productividad de la lámina colaborante ya que permite abarcar una gran área para techar y permite luces libres hasta 4m con una lámina de 2” para trabajar con cargas sobrepuestas de 400 Kg/m². Se evita el uso de la tarea de encofrado y desencofrado, a pesar de que las losas nervadas o macizas generan más concreto, con la lámina de Steel-deck no se necesitaría colocar cielo raso, por eso se recomienda dejar una torta inferior de 2cm o 3cm para obtener un mejor acabado. La investigación realizada en Perú, se limita a comparar dos materiales aligerantes, Steel deck y poliestireno, sin embargo, existen otros materiales como lo es el plástico, que permiten realizar una losa nervada con excelente acabado, mantener grandes luces y es recuperable. Por esta razón, se nos hace necesario realizar una investigación complementaria adicionando este sistema, para determinar nuevos resultados analizando sistemas novedosos.

- **Briones, P. Alvarez, J. (2018). Tesis. Comparación del Modelamiento, Análisis y Diseño Estructural en Concreto Armado utilizando los Software ETABS y ROBOT Structural. Analysis, para un Edificio de cinco niveles. Universidad Peruana Unión, Juliaca, Perú.**

El proyecto “comparación del modelamiento, análisis y diseño estructural en concreto armado utilizando los softwares ETABS y ROBOT Structural Analysis Professional, en un



edificio de cinco niveles (cuatro pisos y un semisótano)”, es una investigación descriptiva y comparativa ya que describe aspectos relacionados con dos variables de estudio, ROBOT y ETABS S.A.P., permitiendo entender sus diferencias y a su vez, compara dos variables, ROBOT y ETABS S.A.P., para saber cuál de los dos softwares es más eficiente.

En esta investigación, los autores proponen como objetivo comparar la eficiencia en el modelamiento, diseño sismorresistente y diseño en concreto armado de los softwares ETABS y ROBOT Structural Analysis Professional, aplicado en un edificio de cinco niveles (cuatro pisos y un semisótano), para determinar cuál de los dos softwares es el óptimo.

La edificación estudiada se encuentra ubicada en la universidad peruana unión distrito de Juliaca en la provincia de san Román en la ciudad de Puno, con una altitud de 3825 m.s.n.m. entre los 8284416.32 m latitud norte y 373276.07 m latitud este y su clima es frio seco.

La metodología utilizada por los autores para el desarrollo de la investigación tiene en cuenta los lineamientos establecidos el reglamento nacional de edificaciones 2016 (r.n.e. 2016) y el código del instituto americano del concreto 2014 por sus siglas en ingles ACI 318-14, además, para ambos software se realizó el proyecto estructural de la superestructura de un edificio de cinco pisos (4 pisos y un semisótano) siguiendo este orden: predimensionamiento, modelación de la estructura, metrado de cargas, diseño sismorresistente, diseño en concreto armado; también se realizaron los presupuestos para la elaboración del proyecto estructural y de la ejecución de la misma especialidad para ambos softwares. finalmente se compararon todos los resultados, obteniendo las respectivas conclusiones y recomendaciones.

En las conclusiones se plantea que la elaboración de un proyecto estructural de una edificación de cinco pisos (4 pisos y un semisótano) en ETABS y ROBOT S.A.P. arroja resultados muy similares pero que presenta diferencias pequeñas entre el diseño sismorresistente, el principal causante de las variaciones está en el metrado de cargas, hay diferencias en los resultados obtenidos por el análisis estático como lo son el cortante estático en la base, el cortante estático por pisos y la rigidez de diafragmas hallada por el cortante estático. las diferencias del cortante estático se mantienen para el cortante dinámico, ya que el cortante dinámico depende del cortante estático teniendo que ser por lo menos el 80 % de este, para ambos softwares se utilizaron factores de escalamiento. también hay diferencias en



los resultados obtenidos del análisis dinámico como lo son el cortante dinámico en la base, cortante dinámico por pisos, desplazamientos y derivas máximos. en cuanto al tiempo, realizar el diseño sismo resistente toma el mismo tiempo en ambos softwares. estas diferencias se dan a pesar de que las modelaciones se realizaron de manera muy semejante y ambos programas trabajan con el método de elementos finitos. sin embargo, al tener diferencias pequeñas, estas casi no inciden en el diseño en concreto armado, por lo tanto, los elementos estructurales diseñados son similares entre ambos softwares. pero se evidencia que elaborar un proyecto estructural en el software ROBOT S.A.P. es mucho más rápido que realizarlo con ETABS, debido a que ROBOT S.A.P. ofrece más herramientas tanto en la modelación, diseño en concreto armado, dibujo de planos y metrados, los cuales permiten concluir el trabajo en un tiempo más corto, ocasionando un menor costo en la elaboración de un proyecto estructural.

2.1.2. Nacionales

- **Avila, J. (2016). Trabajo de grado. Análisis de costos de los sistemas de entepiso más utilizados en Colombia, Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias, Colombia.**

El autor se propuso como objetivo hacer un análisis de los costos de los diferentes tipos de entepiso más utilizados en Colombia, el cual es el más eficiente y económico en una altura máxima de 15 metros. Entre los sistemas de entepiso analizados se encuentran el sistema de Losa nervada en una y dos direcciones, Losa maciza con vigas descolgadas en una y dos direcciones, Losa Steel Deck. de los cuales con el caso de estudio en especial arrojaron que en economía de materiales (acero y concreto) la mejor alternativa es la losa nervada en una dirección y la segunda era Losa Steel deck, sin embargo, al incluir el proceso constructivo en las conclusiones, se determinó que la mejor alternativa para este caso en especial es la losa Steel deck ya que representa un menor costo en procesos constructivos, eso hace que el proyecto sea mucho más económico, a pesar de utilizar mayores cantidades de acero y concreto. Debido a las conclusiones realizadas por Avila, solo tuvo en cuenta resultados de un solo programa (ETABS 2015) y de allí nos surgió la curiosidad de evaluar los resultados de los mismos diseños estructurales, en dos programas diferentes (ETABS y Engsolution



RCB) y verificar cuan distinto podría los resultados finales y como esto puede afectar la edificación.

2.2.Marco Teórico

2.2.1. Tipos de losas

Las losas se pueden clasificar según la forma en que se apoyan y características de cada sistema en dos grupos y estos a su vez en dos subgrupos como se muestra a continuación;

2.2.1.1.Losa nervada armada en una dirección

Las losas nervadas armadas en una sola dirección son una serie de viguetas distribuidas en cada panel que cortan la luz del vano, logrando integrar con una losa delgada. Los nervios son agradables desde el punto de vista arquitectónico, (Hanna, 2013).

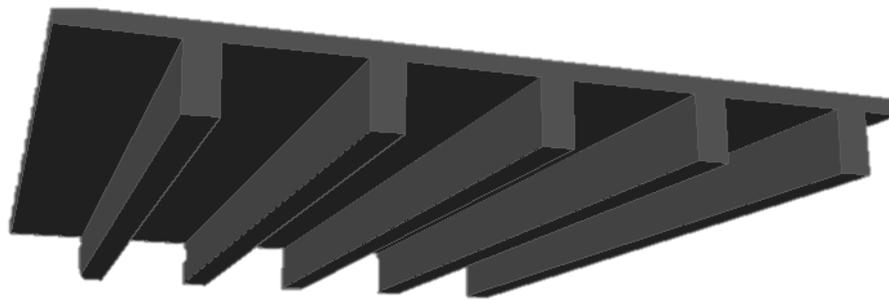


Figura 1. Losa nervada en una dirección

Fuente: Peso propio de losas nervadas o alivianadas. Marcelo pardo ingeniería.

2.2.1.2.Losa nervada soportada sobre Columnas, capiteles y ábacos (Reticular celular) armada en dos direcciones

Una losa reticular consiste en tener nervios en ambos sentidos con ángulos rectos. Un sistema de entrepiso con losa plana es una placa de hormigón armado con un mismo espesor para toda la losa sin vigas, adicionalmente una masa de concreto ubicada en las columnas llamado capitel. Hace algunos años a los capiteles se les adicionan unos ábacos, pero debido al mayor costo de formaleta, los capiteles de columna son desfavorables para el proceso constructivo. Las losas reticuladas son comúnmente utilizadas para soportar altas cargas y vanos más largos, donde la geometría del proyecto deberán ser paneles cuadrados o casi cuadrados y se utilizan para obtener un acabado más estético, (Segura, 2011).

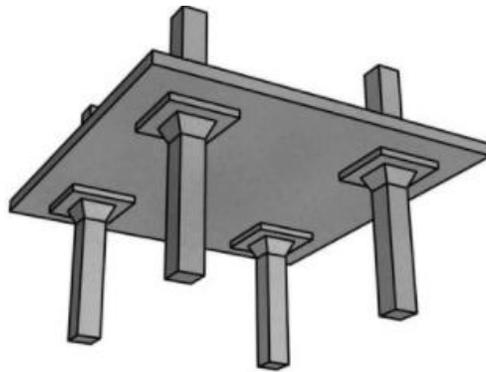


Figura 2. Losa plana con ábacos y capiteles

Fuente: Losa plana. Arkiplus

2.2.1.3. Losa maciza armada en una dirección apoyada sobre vigas

Este sistema consiste en una losa sólida que se apoya en las vigas de concreto, a su vez, se apoyan en las viguetas formando ángulos rectos a la viga transfiriendo las cargas a las columnas. Este sistema proporciona generalmente la oportunidad de cubrir luces más largas que el sistema de dos sentidos diseñando vigas y viguetas más peraltadas, (Hanna, 2013).

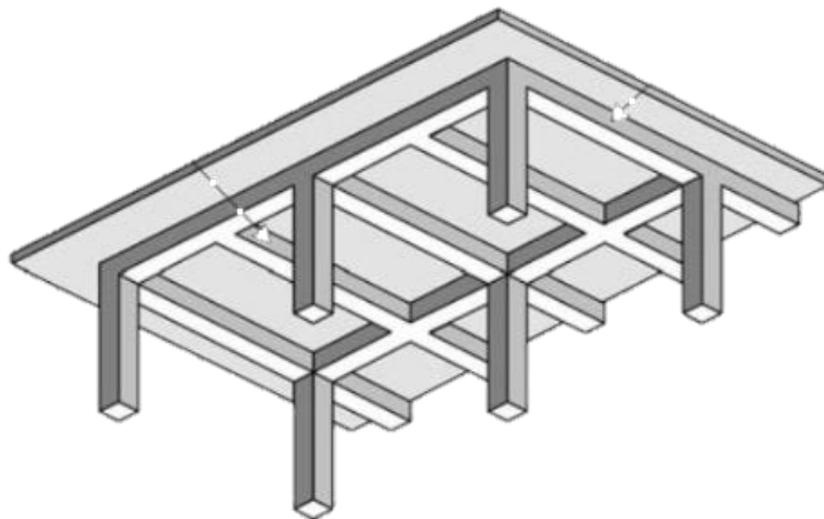


Figura 3. Losa maciza sobre vigas, armada en una dirección

Fuente: Losa Macizas de hormigón armado en una dirección. Researchgate

2.2.1.4. Losa maciza armada en dos direcciones soportadas sobre vigas en 4 lados

Es una losa maciza apoyada vigas en sus 4 bordes y vigas secundarias, es sencillamente una losa de espesores superiores a 8 cm de altura, apoyado en vigas secundarias en ambos sentidos, usadas para disminuir luces y lograr un espesor menor de loseta, logrando distribuir



la carga a las vigas principales o cargueras. Una de las principales ventajas es el ahorro de acero y concreto de las secciones, sin embargo, el armado del encofrado en dos direcciones es muy tedioso y generalmente es mucho más costoso que la economía que brindan del ahorro de materiales en la construcción, (Hanna, 2013).

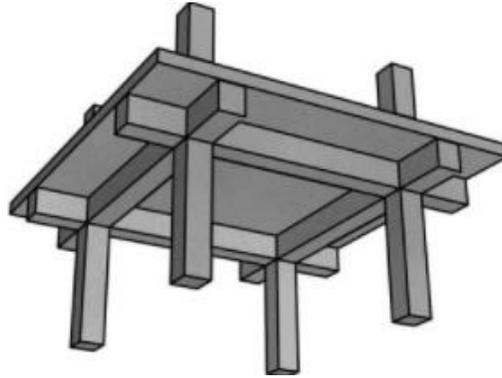


Figura 4. Losa maciza sobre vigas, armada en dos direcciones

Fuente: Losas. Sandra Godoy Casado.

2.2.1.5. Losa nervada armada en dos direcciones apoyadas sobre vigas en sus 4 lados

Al cargar una losa cuadrada en sus 4 vigas, esta carga será distribuida en sus cuatro vigas, produciéndose momentos flectores, torsionales y esfuerzos de cortante. Este sistema de entrepiso es considerado una estructura liviana, ya que logra espesores de loseta inferiores a los 8 cm, ya que cuenta con nervios muy juntos, acortando el vano entre una columna y otra, permitiendo disminuir uniformemente los momentos de las vigas principales, por ende, tendrá un mejor comportamiento ante los sismos. Lo anterior está argumentado con la norma NSR10. Una de las dificultades de este tipo de losa, son los altos costos de mano de obra y armado de formaleta, (Segura, 2011).

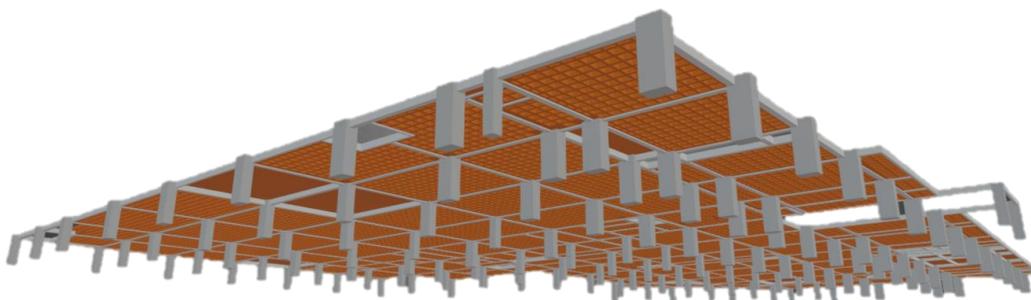


Figura 5. Losa nervada apoyada sobre vigas, armada en dos direcciones



Fuente: Estudio atex – ed. Presfuerzo. Atex Brasil

2.2.2. Aligeramiento de losas de entepiso

Las losas nervadas son aquellas que en su interior tiene un vacío con el fin de reducir peso a la estructura y acero de refuerzo, sin embargo, estos espacios son llenados parcialmente con nervios para evitar la deflexión de la losa y entre cada nervio se utiliza un material como puede ser bloques, ladrillos, casetones de madera o metálicos (cajones) o Poliestireno expandido, para poder fundir monolíticamente. Estas losas son más eficientes que las losas macizas ya que permiten tener espesores mayores sin aumentar el volumen de concreto con respecto a una losa maciza. Podríamos decir que, ante una carga normal de vivienda o edificios pequeños, las losas macizas son eficientes para luces pequeñas, las losas nervadas en unidireccionales representan una economía en luces intermedias, de 3 a 6 metros, y bidireccional son más económicas para luces muy largas. Lo beneficioso de trabajar con losas nervadas se ahorra tanto en concreto y acero, usando un material mucho más económico, con diseños previamente establecidos, reduciendo el peso muerto de la estructura y por consiguiente logrando también ahorros desde la cimentación. Implícitamente, al mencionar estas ventajas se puede inferir la posibilidad de que existan un menor número de columnas por planta, con lo cual se logran mayores superficies útiles y más libertad arquitectónica.

2.2.2.1. Casetón de madera

El casetón de madera es utilizado para construcciones, debe ser una madera rígida que soporta el peso del concreto, sin embargo, este casetón es poco utilizado ya que requiere mayor mano de obra para realizar los cajones de acuerdo con las medidas establecidas por el proyecto y a su vez cuando se realiza el desmontaje logra quebrar toda la formaleta, ya que se adhiere al concreto, generando desperdicios y reprocesos para el siguiente módulo.



Figura 6. Casetones de madera

Fuente: Casetón de Guadua. Fábrica de casetón



2.2.2.2. Casetón polietileno expandido

El casetón de polietileno expandido o icopor como se conoce en Colombia, es un producto que viene en presentación de cubos de diferentes medidas que son cortados in situ dependiendo de las dimensiones del área que se va a aligerar. Se puede fabricar en densidades desde 10 a 30 kg/m³ proporcionalmente aumentando su costo por m³, teniendo un periodo de uso desde 12 hasta 20 reutilizaciones. Debe ser forrado por una capa plástica para evitar que se adhiera al concreto. Es utilizado principalmente como elemento aligerante en losas de entepiso y cubierta ya sean reticulares o nervadas en una dirección, de igual forma se utiliza en rellenos de subsuelo o cimentaciones o como casetón envolvente.



Figura 7. Casetón de icopor (polietileno expandido)

Fuente: Casetón en poliestireno expandible o icopor. Aconstructoras

Ventajas del sistema:

- Adherencia: La aplicación de yeso, pastas o Tirol es permitida por casetón sin tener que emplear pegamentos y/o adhesivos para la aplicación de estos acabados.
- Ligereza: Al ser un producto con un peso menor a 12 kg/m² disminuye considerablemente el peso de la losa y por consiguiente se obtiene un ahorro en la estructura y cimentación.
- Aislamiento térmico: En zonas de climas extremos se vuelve un producto indispensable por su baja conductividad térmica lo cual provee confort y ahorro de energía en la oficina, comercio u hogar.



- Aislamiento acústico: La losa con casetón puede absorber de 25 a 30 decibeles, dependiendo de su espesor y densidad.

2.2.2.3. Casetón fibra de vidrio

El casetón de fibra de vidrio tiene como característica principal ser usado como encofrado de entrepiso para aligerar losas reticulares y postensadas, fabricada con resina de poliéster y reforzada con madera embebida en fibra de vidrio y resina para uso comercial, industrial, estacionamientos, vivienda.

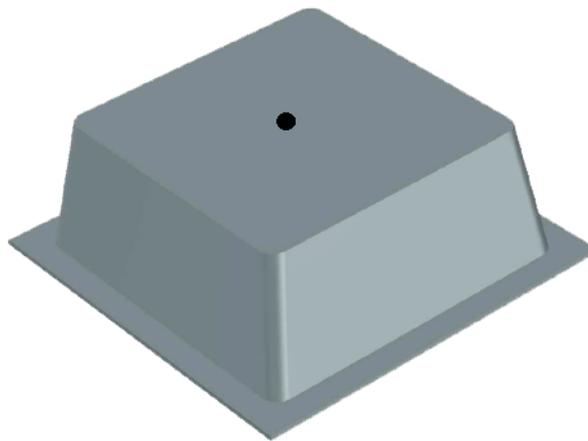


Figura 8. Casetón de fibra de vidrio

Fuente: Casetón de fibra de vidrio. Tecnoedifica

Ventajas del sistema:

- Recuperable y reutilizable.
- Acabado aparente y ligero.
- Fabricación a medida.
- Medidas estándares en renta.
- Se cubren los claros más largos.
- Garantía mínima de 35 usos (en condiciones normales).
- No requiere de equipo especial para su colocación.
- Fácil manejo y ahorro en ejecución de obra.



2.2.2.4. Casetón de acero

Los casetones de acero son implementados en el sector de construcción atreves de países con disponibilidad de acero y con alto volumen de construcción, estos son comercializados tanto en venta y alquiler a un precio promedio en comparación a los otros casetones implementados en la construcción. En el mercado colombiano no se conocen, porque su uso tendría un precio elevado por la importación y son bastante pesados la movilización del trabajo obrero.

Se fabrican con lámina de acero de 2.5 mm de espesor o mayor, con diversas formas, ya que pueden ser troquelados o simplemente constituidos por planos unidos a base de soldadura. El modo de aplicación y desmontaje es muy similar a los casetones presentados anteriormente. Se pueden utilizar para aligerar las losas en una o dos direcciones. Es normal instalarlos sobre un entablado parcial, pues su contextura permite a los operarios caminar libremente sobre ellos sin romperse, (Botero, 2006).

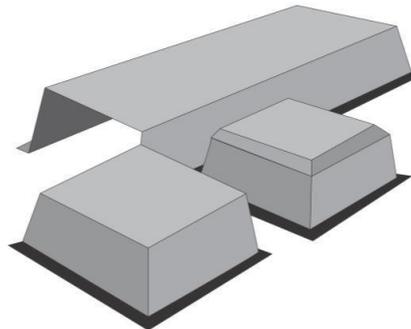


Figura 9. Casetón de acero

Fuente: Encofrados, Román Botero R., 2006

2.2.2.5. Casetones plásticos (Sistema ATEX)

Los casetones plásticos son un sistema de encofrado recuperable que permite la realización de armados reticulares en una o en dos direcciones, muy utilizados en parqueaderos y equipamientos comerciales, escolares, deportivos, y en edificios de gran altura. El sistema cuenta con más de 150 reutilizaciones, permite realizar armados con retículas estándares desde 60x60 cm hasta 90x90 cm, con alturas desde 15 cm hasta 42,5 cm, logrando optimizar las obras con múltiples soluciones. El casetón permite generar un ahorro máximo de concreto y acero.



Ventajas del sistema:

- Mayor seguridad en el apoyo de la cubeta.
- El casetón incorpora unas reglas metálicas para mantener los nervios rectos y evitar movimientos en la fundida
- Mayor calidad en el acabado del concreto.
- Armado y desencofrado fácil y rápido
- Se puede recuperar el 100% de los elementos del Sistema atex al tercer día después de fundir la losa y el 80% del sistema de apuntalamiento.
- Evita la deformación lenta, ya que se apuntala desde el primer momento
- Casetones livianos
- Fácil de bodegar y ahorro en transporte
- Genera confort para los habitantes, ya que se reducen las vibraciones de entrepiso y zona de parqueadero.



Figura 10. Casetón en plástico (Sistema ATEX)

Fuente: Losa nervada. Atex Brasil



2.3.Marco normativo

2.3.1. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10

2.3.1.1.Capítulo A 2: Zonas de amenaza sísmica.

Los diseños en las estructuras son hechos de tal manera que puedan resistir las fuerzas sísmicas, por lo tanto, deben cumplir requisitos mínimos dependiendo la zona de amenaza, ya sea baja, intermedia o alta, además se simulan movimientos sísmicos que pueden expresarse por medio del espectro elástico de diseño a través de acelerogramas cumpliendo con algunos requisitos solicitados.

Es importante conocer el tipo de suelo donde se va a diseñar, ya que este tiene gran influencia en el comportamiento estructural, donde luego se tomarán algunos factores como F_a y F_v para definir la cortante basal.

También se debe tener en cuenta un factor de coeficiente de importancia de la estructura (I), estos indican cual va a ser el uso adecuado de la estructura y dependiendo de eso, tendrá un valor distinto en el espectro y fuerzas de diseño.

2.3.1.2.Capítulo A 3-2: Sistemas estructurales

Existen 4 tipos de sistemas estructurales para resistencia sísmica, cada uno de ellos subdividido dependiendo los tipos de elementos estructurales verticales para resistir los sismos y el grado de capacidad de disipación de energía del material estructural. Dentro de ellos tenemos los siguientes:

Sistema de muros de carga

Sistema que no tiene un pórtico completo, pero está diseñado para resistir las cargas verticales y horizontales por los muros estructurales o pórticos con diagonales.

Sistema combinado

Es un sistema que puede funcionar de dos maneras:

- a) Las cargas verticales son resistidas por un pórtico que no resiste momentos y las fuerzas horizontales son resistidas por los muros estructurales o pórticos en diagonal.



- b) Los pórticos resistentes a momentos resisten las cargas horizontales y verticales combinado con muros estructurales o pórticos en diagonal.

Sistema de pórtico

Compuesto por un pórtico que resiste momentos cargas horizontales y verticales, sin diagonales.

Sistema dual

Este sistema puede ser la combinación de todos los anteriormente descritos, sin embargo, se deben cumplir ciertos requisitos:

- a) Las cargas verticales deben ser soportadas por el pórtico resistente a momentos, sin diagonales.
- b) Las fuerzas horizontales son resistidas por la combinación de muros estructurales y pórticos con diagonales y resistente a momentos, donde el pórtico debe tener capacidad de disipación de energía (DES).
- c) El diseño debe resistir la totalidad del cortante basal unificando los dos sistemas, pero de ninguna manera responsables de los muros estructurales, o de los pórticos con diagonales, puede ser menor del 75% del cortante basal.

2.4. Costos

2.4.1. Costos indirectos

Se define como costo indirecto a todo lo necesario para realizar un proceso constructivo que tiene como objetivo emitir un producto final un producto, pero no se tiene en cuenta la mano de obra, maquinaria ni materiales. Generalmente está representado por la administración, vigilancia, fletes, acarreo y prestaciones sociales a todo el personal técnico, directivo y administrativo.

2.4.2. Costos directos

Es la suma de los materiales, mano de obra y equipo necesario para la realización de un proceso constructivo. Su elaboración depende exclusivamente de los planos arquitectónicos y estructurales donde se requieren detalles como, fachadas, instalaciones, cortes, isométricos,



determinando así un APU (análisis de precios unitarios) de acuerdo con las cantidades de obra y finalmente un presupuesto. La cimbra es uno de los costos directos que evaluaremos en esta investigación, por lo tanto, se deben tener en cuenta al momento de evaluar los siguientes ítem:

- Costo inicial o costo de fabricación: incluye el costo de transporte, materiales, ensamble
- Reúso potencial. lo que disminuye el costo total final por pie cuadrado (o por metro cuadrado) del área de contacto. La economía máxima puede lograrse maximizando el número de reúsos.
- Costo de descimbrado: que también incluye el costo de limpieza y reparación. Esta partida tiende a permanecer constante para cada reúso hasta cierto punto, en el cual el costo total de reparación y limpieza comienza a incrementar rápidamente Al decidir utilizar un sistema específico de cimbrado. el costo inicial debe evaluarse versus el capital disponible asignado al costo de cimbra. Algunos sistemas de cimbra tienden a tener un alto costo inicial, pero a través del reúso repetido. resultan económicos. Por ejemplo, las cimbras voladoras tienen un alto costo inicial, pero el reúso promedio potencial (generalmente de más de 100), reduce el costo final por pie cuadrado (o por metro cuadrado) de área de contacto de esta alternativa. En el caso de sistemas de cimbra rentados, el período de tiempo en el que la cimbra está en uso tiene un gran efecto en el costo de la cimbra, (Hanna, 2013).

2.5. Software estructural

2.5.1. ETABS

Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems (Análisis Tridimensional Extendido de Edificaciones). Por sus siglas en inglés, ETABS. Es un software de modelación estructural desarrollado específicamente para sistemas de edificaciones y naves industriales. ETABS, este programa cuenta con una interface gráfica que incluye procedimientos de modelación y diseño, integrados por medio de una base común de datos. ETABS posee opciones extras que permiten simplificar el diseño de modelos de edificaciones desde las más



simples hasta las más grandes y complejas, incluyendo a su vez, un rango de análisis a estructuras con comportamiento no lineal.

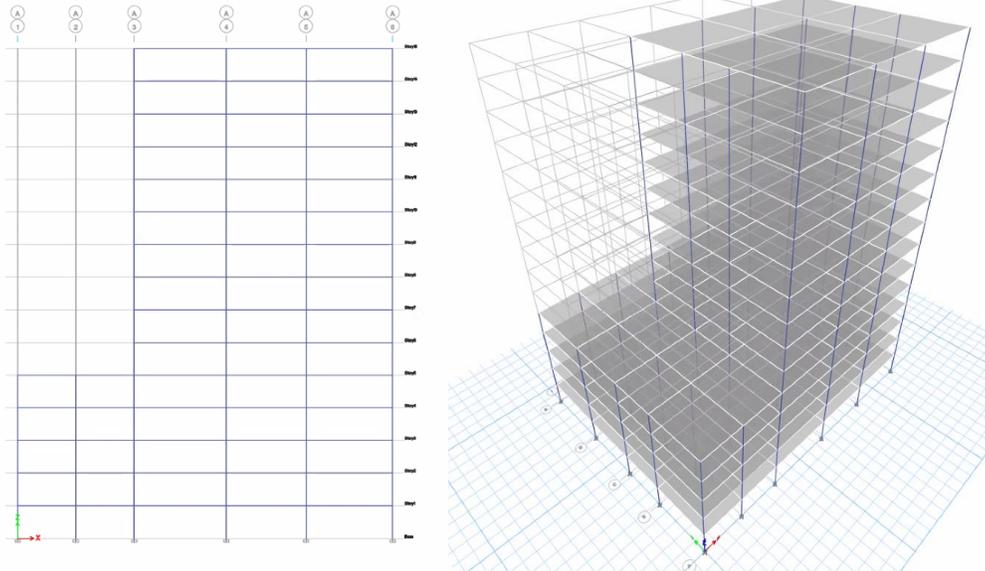


Figura 11. Modelación numérica del proyecto en el software ETABS

Fuente: Autores

A continuación, se representa algunos de los tipos de sistemas y análisis que el software estructural ETABS abarca con facilidad.

- Cálculo automático de las coordenadas del centro de masa de la edificación, coordenadas del centro de rigidez de la edificación, peso propio de la edificación según las combinaciones de carga a analizar.
- Análisis de casos de carga teniendo en cuenta el espectro de aceleración de diseño o de respuesta, con curvas predeterminadas.
- Auto-Mesh, división automática de elementos que se cruzan, mediante un análisis interno del programa, o seleccionar el comando de división de los elementos en el mismo modelo.
- Plantillas de sistemas de entrepiso predefinidas para facilidad de trabajo. (losas macizas, reticulares o nervadas en una y dos direcciones, cubiertas, etc.).



- Análisis de grandes desplazamientos.
- Reducción automática de carga viva vertical.

2.5.2. Engolutions RCB

Engolutions RCB es un programa de ingeniería estructural para modelación, análisis tridimensional y diseño sísmico de edificaciones de concreto armado. La creación de la estructura, la asignación de propiedades de los elementos, la definición de los soportes y la aplicación de las cargas, son todas realizadas a través de su interfaz gráfica interactiva. Por lo tanto, no requiere de un archivo de entrada. La generación de cargas es totalmente automatizada, liberando al ingeniero de cálculos manuales largos. La fuerza del viento y fuerzas sísmicas se pueden generar automáticamente de acuerdo con los códigos de construcción de varios países, entre estos, La normativa de construcción sismorresistente, NSR-10.

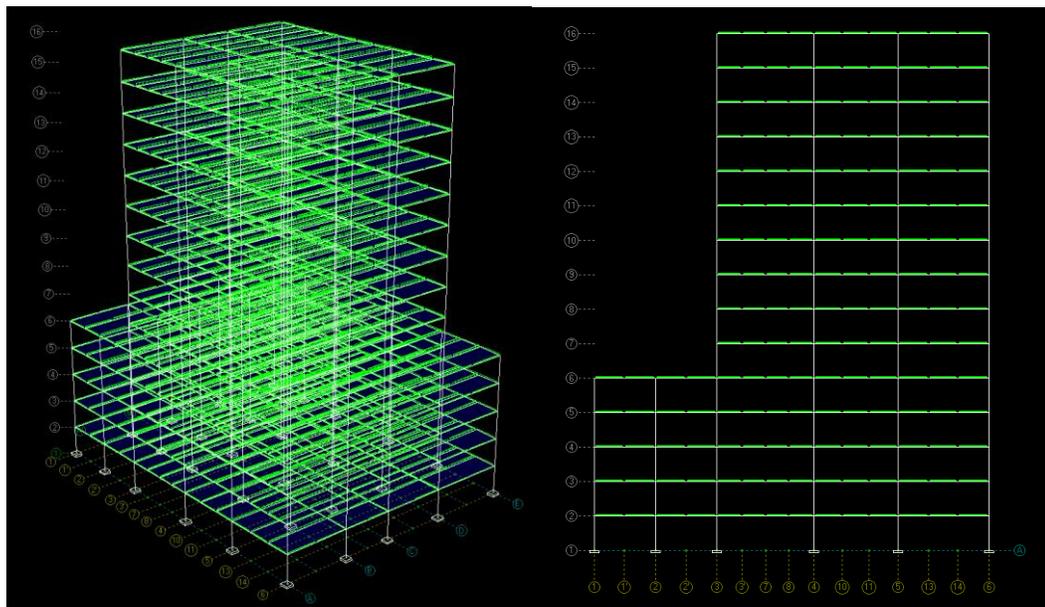


Figura 12. Modelación numérica del proyecto en el software RCB Engolutions

Fuente: Autores.

Una vez que la estructura ha sido creada, esta permanece dibujada con todos los comandos del programa disponibles. El ingeniero puede hacer cambios en la estructura en cualquier



momento, tal como cambiar coordenadas, adicionar o remover elementos, modificar propiedades de elementos, cambiar las condiciones de apoyo, variar las cargas, etc., y ver la influencia de estos cambios en el análisis y diseño. Las principales características de Engolutions RCB son las siguientes.

- Método interactivo para definir la geometría de la estructura a partir de plantas tipo, con un mínimo ingreso de información. En cada piso tipo se puede adicionar y/o remover vigas, columnas, muros, apoyos, placas, nudos, etc. Cualquier número de pisos superiores se puede crear como una copia de cualquiera de los pisos ya creados.
- Flexibles comandos de edición. Una vez creada la estructura es posible adicionar y remover pisos, insertar y remover pórticos (ejes), remover y adicionar nudos, etc. Además, es posible modificar las coordenadas X, Y, Z de nudos individuales permitiendo modelar niveles de cimentación variable y vigas inclinadas.
- Distribución automática de cargas de piso a vigas y muros. Se puede considerar varios sistemas de entrepiso incluyendo losas macizas en una y dos direcciones, sistemas aligerados en una y dos direcciones.
- Presentación gráfica e impresa de desplazamientos laterales relativos (derivadas), que permite verificar en forma instantánea si se cumple o no con los requerimientos de códigos sismorresistente.
- Nuevas formulaciones de elementos finitos para modelamiento preciso de estructuras con muros de rigidez.
- Diseño sísmico de vigas y columnas para varias capacidades de disipación de energía de acuerdo con varios reglamentos incluyendo: Colombia NSR-10.
- Factores de modificación de inercias para análisis con secciones agrietadas.
- Generación automática de combinaciones de carga de diseño de acuerdo con diversos reglamentos internacionales.
- Revisión de diseño de elementos de acero estructural de acuerdo con el método de Load and Resistance Factor Design (LRFD) del AISC y del RCDF.



OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Comparar la incidencia del diseño estructural de los sistemas de entrepisos en una y dos direcciones, soportado sobre vigas y viguetas, en el comportamiento sismorresistente de una edificación de 15 pisos, a través de una modelación estructural mediante dos softwares de análisis y diseño estructural de elementos finitos, para elegir la mejor alternativa en el contexto colombiano.

3.2. Objetivos específicos

- Identificar los criterios técnicos que intervienen en el análisis de sistemas de entrepisos en una y dos direcciones, a través de la normativa colombiana de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, para realizar el diseño y modelación estructural.
- Modelar cada alternativa mediante el software ETABS y Engsolution RCB para establecer una relación costo-beneficio según la losa de entrepiso y sistema constructivo.
- Indicar de los sistemas de entrepisos estudiados, el más eficiente estructuralmente y económico, generando tablas comparativas de cada alternativa y así, escoger el diseño óptimo para una edificación de 15 pisos en el contexto colombiano.
- Especificar criterios para la elección de software de acuerdo con los resultados obtenidos de las modelaciones, con el fin de optimizar errores en procesos de diseño.



ALCANCE

4.1. Delimitación espacial

Para esta investigación se propone como modelo de estudio una edificación ubicada en la ciudad Cartagena de indias D.T. y C, Bolívar, perteneciente a la región caribe del norte de colombiano.

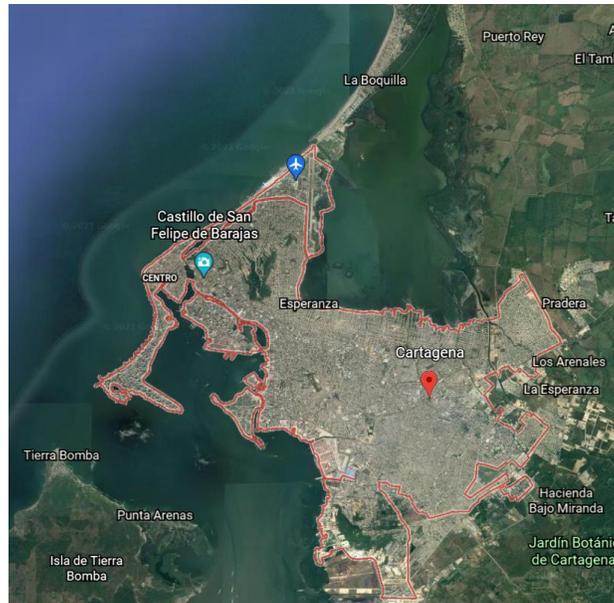


Figura 13. Ubicación del proyecto

Fuente: Tomado de Google Earth.

4.2. Delimitación temporal

Esta investigación se desarrollará el primer semestre académico del año 2021, comprendido entre los meses de Julio y octubre, con una duración total de 4 meses, en los cuales se hará la modelación estructural contemplando el análisis y diseño de las diferentes alternativas de la edificación de 15 pisos, el análisis conceptual de las estructuras y costos según los resultados obtenidos y la elaboración del trabajo de grado.

4.3. Delimitación conceptual

Esta investigación aplicada se delimita a la realización de diseños estructurales y modelaciones a través de los softwares ETABS y Engsolution RCB para obtener resultados que permitan ser analizados y comparados contemplando factores como el comportamiento sismorresistente de los sistemas de entrepisos bidireccionales (losas macizas y losas



nervadas) utilizados en una edificación de 15 pisos que cumplan con lo establecido en la norma Colombiana de Construcción sismorresistente, NSR-10. Adicionalmente, se analizarán los costos de cada sistema de entrepiso teniendo en cuenta el sistema constructivo considerando los materiales, Poliestireno Expandido (EPS, del inglés expanded polystyrene) y casetones reutilizables de Polipropileno (PP) (sistema ATEX) con el propósito de establecer cuál de las alternativas es más eficiente, generando ahorros significativos de costos y tiempo, logrando aumentar la productividad en el contexto colombiano.

4.4.Resultados esperados

Con los resultados obtenidos en la presente investigación se busca dar a conocer cuál de las alternativas analizadas es más eficiente en términos tiempo y costos, argumentando cómo el diseño estructural es funcional al cumplir con lo establecido en la NSR-10 como el sistema constructivo implementado es capaz de brindar un aumento de la productividad en tiempos de ejecución, por consiguiente, una reducción de costos. Estos resultados servirán de aporte conceptual a la bibliografía actual sobre sistemas de entrepiso y sus costos en edificaciones de 15 pisos. Permitiendo así, una mayor confiabilidad en su utilización en proyectos de edificaciones en Colombia donde se requiera el uso de sistemas de entrepiso. Adicionalmente, se busca dar conclusiones y/o recomendaciones acerca del tipo de programa modelación estructural a utilizar en proyectos de edificaciones considerando que resultados son más cercanos a las condiciones reales del proyecto analizado y diseñado.

4.5.Producto final a entregar

El producto final a entregar sobre la presente investigación espera establecer las ventajas y desventajas de cada uno de los sistemas de entrepisos analizados y a su vez, analizar los costos de cada uno teniendo en cuenta el sistema constructivo, para justificar su utilidad en edificaciones de 15 pisos en el contexto colombiano. Además, con la modelación que se llevará a cabo en los softwares de diseño ETABS y Engsolution RCB, se espera aportar de manera conceptual a la elección óptima del programa de modelación estructural a utilizar en proyectos de edificaciones, considerando factores como las solicitaciones de carga, dimensionamiento de los elementos estructurales y cantidades de concreto armado.



4.6.Productos complementarios

Con el análisis de los resultados obtenidos en la presente investigación, se planea generar un aporte conceptual para futuras investigaciones y/o estudios sobre los sistemas de entrepiso, los costos según el sistema constructivo y la mejor elección del programa de análisis y diseño estructural a utilizar en proyectos de edificaciones de 15 pisos en el contexto colombiano.

4.7.Excepciones y/o limitaciones

La presente investigación se limita a realizar el estudio de la cimentación de ninguna de las alternativas de la edificación a analizar. Sin embargo, con los resultados obtenidos se espera hacer conclusiones de tipo estructural y económico en relación con lo mencionado anteriormente. El sistema estructural que se trabajará será de tipo aporticado para mayor facilidad. Finalmente, debido a que la incidencia en los sistemas de entrepiso no afecta la altura, se decide estudiar una edificación hasta el piso 15 como una muestra representativa.



METODOLOGÍA

El presente estudio de trabajo de grado consistió en una investigación de tipo aplicado y de enfoque mixto, ya que para su desarrollo se utilizaron datos específicos extraídos de la revisión de la bibliografía recopilada. Estos datos ayudaron significativamente a la construcción de los diseños a analizar mediante la modelación numérica.

Este estudio se realizó durante el primer y segundo semestre académico del año 2021 debido a las condiciones de salud pública. Por lo tanto, se llevó a cabalidad en el mes de noviembre del mismo año. La metodología utilizada en el presente estudio se muestra a continuación:

5.1.Fase inicial

La fase inicial sugiere el comienzo de la investigación mediante la selección y revisión de la información pertinente para llevar a cabo el análisis y diseño de la edificación.

En esta fase se recopiló la información necesaria para el estudio, en dos etapas. La primera etapa consistió en reunir la información de las características de la edificación tales como planos arquitectónicos y características estructurales. Esta información fue proporcionada por los ingenieros participantes del proyecto.

La segunda etapa consistió en reunir la información bibliográfica sobre el tema de estudio en artículos científicos de revistas indexadas procedentes de bases de datos autorizadas por la universidad de Cartagena, trabajos de grados y libros de estructuras de concreto armado. Para la recopilación de esta información nos aseguramos de que toda la información se encontrara de acuerdo con lo establecido en la normativa de construcción colombiana sismorresistente, NSR-10 vigente.

5.1.1. Antecedentes referentes a los estudios de sistemas de entrepisos de losa maciza y losa nervada en una y dos direcciones.

La recopilación de la información bibliográfica referente al estudio de sistemas de entrepisos de losa maciza y losa nervada en una y dos direcciones, estuvo enfocada en el estudio de sistemas de entrepisos y el análisis de los costos teniendo en cuenta características como los materiales empleados, el proceso constructivo y las consideraciones de diseño de los diferentes sistemas.



La información se obtuvo a partir de libros de estructuras de concreto armado, trabajos de grado y artículos científicos contenidos en la base de datos de la Universidad de Cartagena, en revistas indexadas procedentes de bases de datos autorizadas por la Universidad y se utilizaron plataformas ... como, Science Direct y Scielo.

5.1.2. Antecedentes referentes al uso de software estructural para la modelación numérica de sistemas de entrepiso.

La recopilación de la información bibliográfica referente al uso de software estructural para la modelación numérica de sistemas de entrepisos estuvo enfocada en estudios comparativos realizados al software estructural ETABS con otro tipo de software de análisis y diseño estructural, tales como, ROBOT y STAAD Pro. Sobre estudios de comparación del software Engsoft RCB, no se encontró información suficiente.

La información se obtuvo a partir de artículos científicos encontrados en revistas indexadas procedentes de bases de datos de universidades internacionales autorizadas por la Universidad de Cartagena y se utilizaron plataformas ... como, Elsevier, Science Direct, Scielo y Google Academic.

5.1.3. Caracterización de la edificación objeto de estudio

La elaboración del modelo conceptual de la edificación objeto del presente estudio, se realizó con base a la revisión de la información obtenida durante la primera etapa de la fase inicial del proyecto. Gracias a dicha revisión fue posible establecer los diferentes parámetros y criterios técnicos de análisis, para el diseño de la edificación y posterior modelación numérica.

5.2. Fase de análisis y diseño estructural

Para esta fase se planteó la arquitectura de la edificación y se analizó haciendo énfasis en los ejes y posiciones de las columnas y vigas que conforman las plantas de la edificación. Además, se estableció el uso de esta, el cual fue de tipo residencial. Para el diseño estructural se tuvo en cuenta parámetros técnicos como las luces entre ejes de columnas y estudios previos, como de geotecnia y topográficos.



5.2.1. Sistema estructural, materiales y pre dimensionamiento

De acuerdo con los planos arquitectónicos planteados, se estableció el tipo de sistema estructural con el que se diseñó la edificación, para este caso fue el sistema de tipo pórticos de concreto resistente a momentos para el grado de disipación de energía mínimo (DMI). Lo que permitió definir de manera rápida el material a utilizar en el diseño de la edificación y calcular mediante el pre dimensionamiento las dimensiones de los elementos estructurales sismorresistentes que componen el sistema de pórticos, vigas y columnas.

5.2.2. Avalúo de cargas

Una vez definido el material y las dimensiones de los elementos estructurales, se calculó la carga muerta sobreimpuesta de la estructura, la cual está conformada por elementos no estructurales tales como, acabados, fachadas, tuberías, etc. Para el cálculo la carga viva, primero se estableció el tipo de uso de la edificación, luego se identificaron las cargas establecida en norma, NSR-10. y, por último, se hizo la sumatoria de estas cargas de acuerdo con el piso al cual pertenecían. La carga muerta del edificio conocida como peso propio fue analizada de manera automática por cada uno de los softwares utilizados.

5.2.3. Análisis de viento

Por facilidad y eficiencia en los resultados de los cálculos de las presiones de diseño de viento de la estructura, se realizó el análisis de viento en cada uno de los softwares de diseños. Para el software RCB Engsolution, la normativa utilizada fue la NSR-10 mientras que para el software ETABS. El análisis de viento se realizó aplicando la norma ASCE 7. Que es la norma bajo la cual se rige el reglamento colombiano para el análisis de viento.

5.2.4. Análisis sísmico y espectro de respuesta de diseño

En este apartado se realizó el cálculo pertinente para determinar la zona amenaza sísmica del lugar donde se diseñó la edificación, Esto se realizó teniendo en cuenta los mapas de zonificación sísmica para los cuales se identificó la ciudad donde se ubicó la edificación y el perfil de suelo. Como resultado se obtuvieron los parámetros técnicos que permitieron establecer el espectro elástico de aceleración de diseño para la ciudad, esto con el fin de garantizar una estructura segura y confiable. El análisis sísmico de la estructura se realizó



bajo las consideraciones y requisitos establecidos en el capítulo A de la norma sismoresistente, NSR-10.

5.2.5. Análisis de irregularidades

Teniendo en cuenta las características de la edificación planteadas con anterioridad, se realizó el análisis de irregularidad de la estructura para poder definir de manera definitiva el valor del coeficiente de disipación de energía R, indispensable para establecer las cargas de sismo y combinaciones de cargas con las que se analizó diseño la edificación.

5.2.6. Verificación del periodo fundamental de la estructura.

Una vez ejecutada la modelación de la estructura en cada uno de los software, se obtiene la cortante basal de la edificación aplicando la fórmula que se utiliza en el método de la FHE; $V_s: S_a \times M \times g$; este cálculo se realizó con el fin de determinar las fuerzas en los sentidos X y Y, teniendo en cuenta la restricción para estructuras irregulares, la cual hace referencia a que las fuerzas horizontales determinadas por el método dinámico deben ser por lo menos el 90% de la cortante basal determinada por el método de la FHE. En el caso de que esta condición no se cumpla, debe hacer uso de los factores de ajustes las veces que sean requeridas hasta cumplir con esta restricción. Una vez cumplida la condición, se comparó el periodo de mayor magnitud arrojado por el análisis dinámico con el periodo fundamental de la estructura calculado en el análisis del espectro de respuesta sísmica de la misma, en esta condición se debe cumplir que el periodo del análisis dinámico debe ser menor o igual al periodo fundamental de la estructura o por lo menos, estar dentro de un margen de error del 10%.

5.2.7. Chequeo de derivas

Ejecutado el análisis dinámico, se comprobó que las derivas no excedieran los límites establecidos por la norma, 0,01h. Si esta condición no se cumple, se hace necesario aportar más rigidez a la estructura, recalculando todo el análisis sísmico de la estructura, desplazamientos horizontales y chequear nuevamente las derivas.

5.2.8. Combinaciones de cargas

Teniendo en cuenta el sistema estructural de la edificación, se establecieron las diferentes combinaciones de carga necesarias para el diseño de los elementos que componen la



edificación. Siendo así, se establecieron solicitaciones de carga para el diseño de flexión compresión de los elementos.

5.3.Fase de modelación numérica

Una vez aplicados los criterios de análisis y diseño estructural planteados con anterioridad, se realizaron diferentes modelaciones numéricas mediante el uso del software estructural ETABS y Engsolution RCB. Teniendo en cuenta el sistema de entrepiso a analizar.

5.4.Fase de análisis de sistemas constructivos

Terminada la fase de modelación numérica se plantearon alternativas de sistemas constructivos para el armado en obra de la losa a implementar en cada una de las edificaciones analizadas, para esta investigación los sistemas constructivos son el de aligeramiento con poliestireno expandido (icopor) y el sistema de aligeramiento con casetones de polipropileno o sistema ATEX.

5.5.Fase de análisis de costos

En la fase de análisis de costos, se hizo la evaluación mediante el uso de la metodología de análisis de precios unitarios, APU y se obtuvieron los costos generados por cada uno de los sistemas de entrepiso en conjunto con el sistema de construcción apto para cada sistema.

5.6.Fase final

Finalmente, al terminar cada uno de los diseños estructurales, las modelaciones numéricas mediante los softwares estructurales y el análisis de costos, se realizó la comparación e interpretación de los resultados obtenidos. Con base en estos datos, se plantearon las diferentes conclusiones y recomendaciones del presente estudio.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Elaboración del modelo conceptual

6.1.1. Caracterización de la edificación objeto de estudio

El proyecto objeto de estudio de la presente investigación consta de 15 niveles distribuidos en 5 pisos para parqueaderos, 10 pisos tipo y una cubierta para zona social. Cada uno de los pisos posee una altura de entrepiso de 3 m. el sistema estructural de resistencia sísmica es el de pórticos resistente a cargas gravitacionales y momentos. El tipo de losa a utilizar en la edificación varía según el sistema a analizar, siendo así, se obtienen análisis para losas macizas y nervadas en una y dos direcciones apoyadas sobre vigas.

6.1.2. Sistema estructural, materiales y pre dimensionamiento

El sistema estructural de la edificación objeto de estudio se define estableciendo el sistema principal de resistencia sísmica de la estructura. Para esta investigación, el sistema principal de resistencia sísmica está compuesto por las vigas y columnas que componen la estructura, este tipo de sistema se define como pórtico de concreto resistente a momento. Y sus parámetros estructurales se presentan en la siguiente tabla,

Tabla 1. Sistema estructural de pórtico resistente a momentos

SISTEMA DE PORTICOS RESISTENTES A MOMENTOS		VALOR R0	VALOR O0	ZONAS DE AMENAZA SISMICA	
SISTEMA DE RESISTENCIA SISMICA (FUERZAS HORIZONTALES)	SISTEMA DE RESISTENCIA PARA CARGAS VERTICALES			BAJA	
				USO PERMITIDO	ALTURA MAXIMA
Pórticos resistentes a momentos con capacidad mínima de disipación de energía (DMI)					
De concreto (DMI)	El mismo	2.5	3.0	SI	Sin limite

Fuente: Tabla A.3-3, NSR-10. Editado por autores.



Los materiales propuestos para el análisis estructural del proyecto se categorizan como se muestra a continuación:

Tabla 2. Materiales

CONCRET O (MPa)	ELEMENTOS	RESISTENCIA; F'c	MODULO DE ELASTICIDAD; E
	Columnas	42	30460
	Vigas	28	248701
	Losa de entrepiso	28	
ACERO (MPa)	USO	RESISTENCIA; Fy	
	Acero de refuerzo diámetro > 3/8"	420	
	Acero de refuerzo diámetro < 3/8"	280	
	Mallas de retracción	259	

Fuente: Autores

Para el desarrollo de la metodología del presente proyecto se tomó como ejemplo el análisis y diseño estructural de la edificación, considerando el sistema de entrepiso de losa maciza en una dirección apoyada sobre vigas. La metodología aplicada para este análisis es igual para cada tipo de sistema de entrepiso estudiado.

6.1.2.1. Predimensionamiento de vigas principales.

Vigas de carga

Para el predimensionamiento de las vigas principales se determina mediante observación la luz crítica de la edificación y se identifican los apoyos que soportaran a la viga que se encuentra en la luz crítica, luego se emplea la formula establecía en la tabla C.9.5(a) y C.9.5. del título C de la NSR-10, según sea el caso.

Siendo así, el predimensionamiento de las vigas principales se establece como se muestra a continuación:

Luz critica: 7,95 m

Tipo de apoyo: Un extremo continuo.



ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES DE ENTREPISOS EN DOS DIRECCIONES,
LOSAS MACIZAS Y LOSAS NERVADAS

Tabla 3. Alturas o espesores mínimos de vigas no pre-esforzadas o losas reforzadas en una dirección a menos que se calculen las deflexiones

ESPELOR MÍNIMO, h.	
UN EXTREMO CONTINUO	
ELEMENTOS	Elementos que no soporten o estén ligados a divisiones u otro tipo de elementos susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes
VIGAS O LOSAS NERVADAS EN UNA DIRECCIÓN	L/18.5

Fuente: Tabla C.9.5 (a), NSR-10. Editado por autores.

Tabla 4. Alturas o espesores mínimos recomendados para vigas no pre-esforzadas o losas reforzadas que soporten muros divisorios y particiones frágiles susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes, a menos que se calculen las deflexiones

ESPELOR MÍNIMO, h.	
UN EXTREMO CONTINUO	
ELEMENTOS	Elementos que soporten o estén ligados a divisiones u otro tipo de elementos susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes
VIGAS O LOSAS NERVADAS EN UNA DIRECCIÓN	L/12

Fuente: Tabla C.9.5, NSR-10. Editado por autores.

$$\text{Altura mínima requerida, } h = \frac{L}{18,5} = \frac{7,95 \text{ m}}{18,5} = 0,43 \text{ m.}$$

$$\text{Recomendación, } h = \frac{L}{12} = \frac{7,95 \text{ m}}{12} = 0,63 \text{ m.}$$

$$\text{Promedio, } h = \frac{0,43 \text{ m} + 0,63 \text{ m}}{2} = 0,53 \text{ m.}$$

Teniendo en cuenta los datos anteriores, se redondea al número mayor y se establece una altura de la viga principal de 55 cm para mayor facilidad constructiva.

Para determinar la dimensión de la base de la viga, se tiene que:

$$\text{Base, } b = (50\% - 60\%)h$$

$$\text{Base, } b = 0,6 \times 0,55 \text{ m} = 0,33 \text{ m}$$



Se redondea el valor obtenido al número mayor y se tiene que la base será de 35 cm. Por lo tanto, las dimensiones para las vigas principales serán de 35x55 cm.

Nota: Tras el análisis estructural realizado en los programas de modelación numérica, se realizó el cambio de las dimensiones finales de la viga quedando estas con unas dimensiones de 50x55 cm.

Vigas de rigidez

Para el predimensionamiento de las vigas de rigidez se establecen dimensiones de 40x55 cm.

6.1.2.2. Predimensionamiento de vigas secundarias

Para el predimensionamiento de las vigas secundarias se establecen dimensiones de 25x55 cm.

6.1.2.3. Predimensionamiento de riostras

Para el predimensionamiento de las riostras se establecen dimensiones de 10x55 cm. Separadas cada 4 m.

6.1.2.4. Predimensionamiento de losa maciza

Para el predimensionamiento de la losa maciza en una dirección apoyada sobre vigas, se determina el espesor, utilizando la metodología empleada para las vigas principales. En este caso la luz crítica corresponde a la separación máxima entre vigas secundarias.

Luz crítica: 2,70 m

Apoyos: Simplemente apoyado



ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES DE ENTREPISOS EN DOS DIRECCIONES,
LOSAS MACIZAS Y LOSAS NERVADAS

Tabla 5. Alturas o espesores mínimos de vigas no pre-esforzadas o losas reforzadas en una dirección a menos que se calculen las deflexiones

ELEMENTOS	ESPELOR MÍNIMO, h.
	SIMPLEMENTE APOYADO
	Elementos que no soporten o estén ligados a divisiones u otro tipo de elementos susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes
LOSA MACIZA EN UNA DIRECCION	$L/20$

Fuente: Tabla C.9.5 (a), NSR-10. Editado por autores.

Tabla 6. Alturas o espesores mínimos recomendados para vigas no pre-esforzadas o losas reforzadas que soporten muros divisorios y particiones frágiles susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes, a menos que se calculen las deflexiones

ELEMENTOS	ESPELOR MÍNIMO, h.
	SIMPLEMENTE APOYADO
	Elementos que soporten o estén ligados a divisiones u otro tipo de elementos susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes
VIGAS O LOSAS NERVADAS EN UNA DIRECCIÓN	$L/14$

Fuente: Tabla C.9.5., NSR-10. Editado por autores.

$$\text{Espesor mínimo requerido, } t = \frac{L}{20} = \frac{2,70 \text{ m}}{20} = 0,135 \text{ m.} \approx 0.14 \text{ m.}$$

$$\text{Recomendación, } h = \frac{L}{14} = \frac{2,70 \text{ m}}{14} = 0,193 \text{ m.}$$

Para el caso de la losa maciza en una dirección apoyada sobre vigas, se establece un espesor de 14 cm con el fin de reducir el peso propio de la estructura.

Tabla 7. Resumen de dimensiones de elementos estructurales

ELEMENTO	BASE (cm)	ALTURA (ESPELOR) (cm)
Vigas de carga	50	55
Vigas de rigidez	40	55
Vigas secundarias	25	55
Riostras	10	55
Losa maciza en una dirección	-	14

Fuente: Autores.



6.1.3. Avalúo de cargas

El análisis de cargas se hace teniendo en cuenta el título B de la normativa colombiana sismorresistente, NSR-10. Para lo cual se tiene:

6.1.3.1. Carga muerta sobreimpuesta

Tabla 8. Carga muerta - sobreimpuesta por pisos

PARQUEADEROS (Ton/m ²)	
CARGAS	VALOR
Impermeabilización	0.020
Acabados	0.100
Piso en concreto	0.080
Instalaciones	0.020
Garajes para vehículos con capacidad de hasta 2000 kg	0.120
TOTAL/PISO	0.340
PISO TIPO (Ton/m ²)	
CARGAS	VALOR
Impermeabilización	0.020
Acabados	0.100
Baldosa cerámica (20 mm) sobre 12 mm Mortero	0.080
Instalaciones	0.020
Fachada y particiones de mampostería	0.300
TOTAL	0.520
CUBIERTA (Ton/m ²)	
CARGAS	VALOR
Impermeabilización	0.020
Acabados	0.100
Instalaciones	0.020
Placa de cubierta (sobrecarga muerta)	0.100
Edificaciones con un salón de reunión para menos de 100 personas y sin escenarios	0.280
TOTAL	0.520

Fuente: Autores.



6.1.3.2.Carga muerta

Tabla 9. Carga muerta - peso propio por piso

PESO PROPIO - PARQUEADEROS (Ton/m ²)	
CARGAS	VALOR
Vigas secundarias	0.086
Riostras	0.019
TOTAL/PISO	0.106
PESO PROPIO - PISO TIPO (Ton/m ²)	
CARGAS	VALOR
Vigas secundarias	0.097
Riostras	0.021
TOTAL	0.118

Fuente: Autores.

Nota: El análisis de las cargas de los elementos como columnas, vigas principales, y losa maciza, es hecho de manera automática por el programa de diseño.

6.1.3.3.Carga viva

Tabla 10. Carga viva por piso

CARGA VIVA - PARQUEADEROS (Ton/m ²)	
CARGAS	VALOR
Garaje para automóviles de pasajeros	0.25
TOTAL	0.25
CARGA VIVA - PISO TIPO (Ton/m ²)	
CARGAS	VALOR
Cuartos privados y sus corredores	0.18
Balcones	0.5
Escaleras	0.3
TOTAL	0.98
CARGA VIVA TOTAL POR PISO	0.20
CARGA VIVA - CUBIERTA (Ton/m ²)	
CARGAS	VALOR
Placa de cubierta sin restricción de acceso y con fines recreativos	0.5
TOTAL	0.5

Fuente: Autores.



6.1.4. Análisis sísmico y espectro de respuesta de la estructura

6.1.4.1. Amenaza sísmica

La zona de amenaza sísmica se define mediante los valores de A_a y A_v , aceleración pico efectiva y velocidad pico efectiva respectivamente. Estos valores se encuentran en las ilustraciones 13 y 14 y dependen de la ubicación donde será construida la estructura.

Para Cartagena Colombia se tiene que la ciudad pertenece a la región N°2 con zona de amenaza sísmica baja. Los coeficientes A_a y A_v , se muestran a continuación.

Aceleración Pico Efectiva; A_a 0.1

Velocidad Pico Efectiva; A_v 0.1

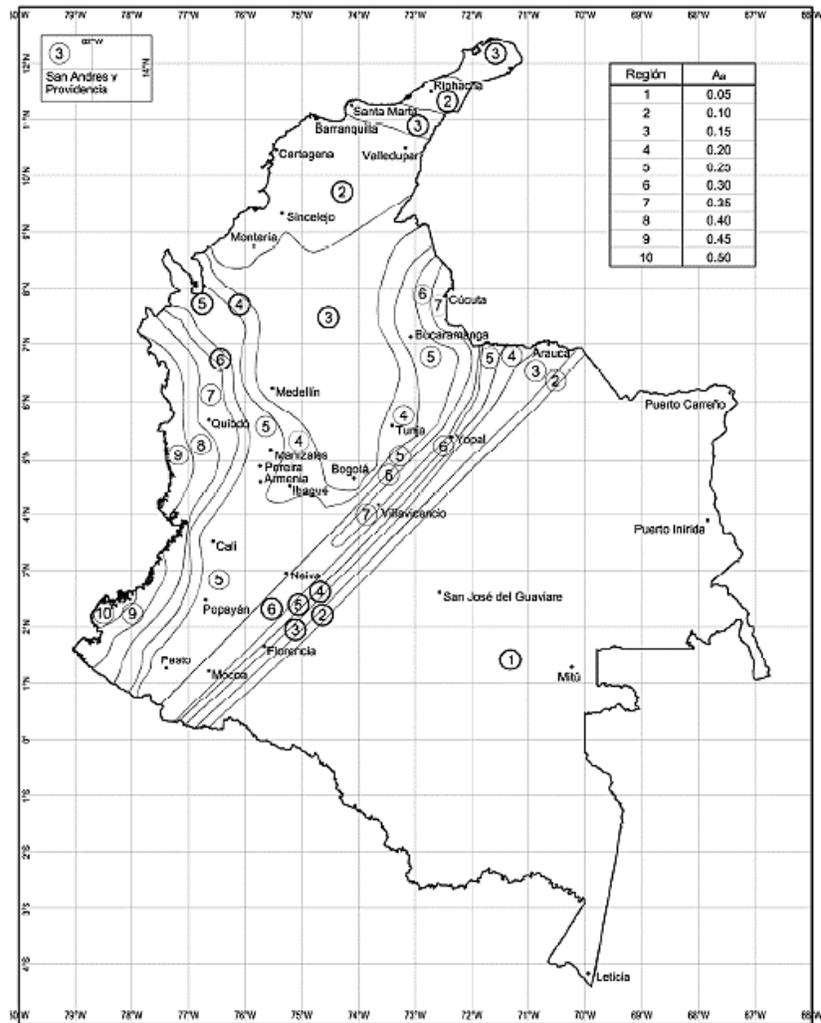


Figura 14. Mapa de valores de A_a



Fuente: NSR-10.

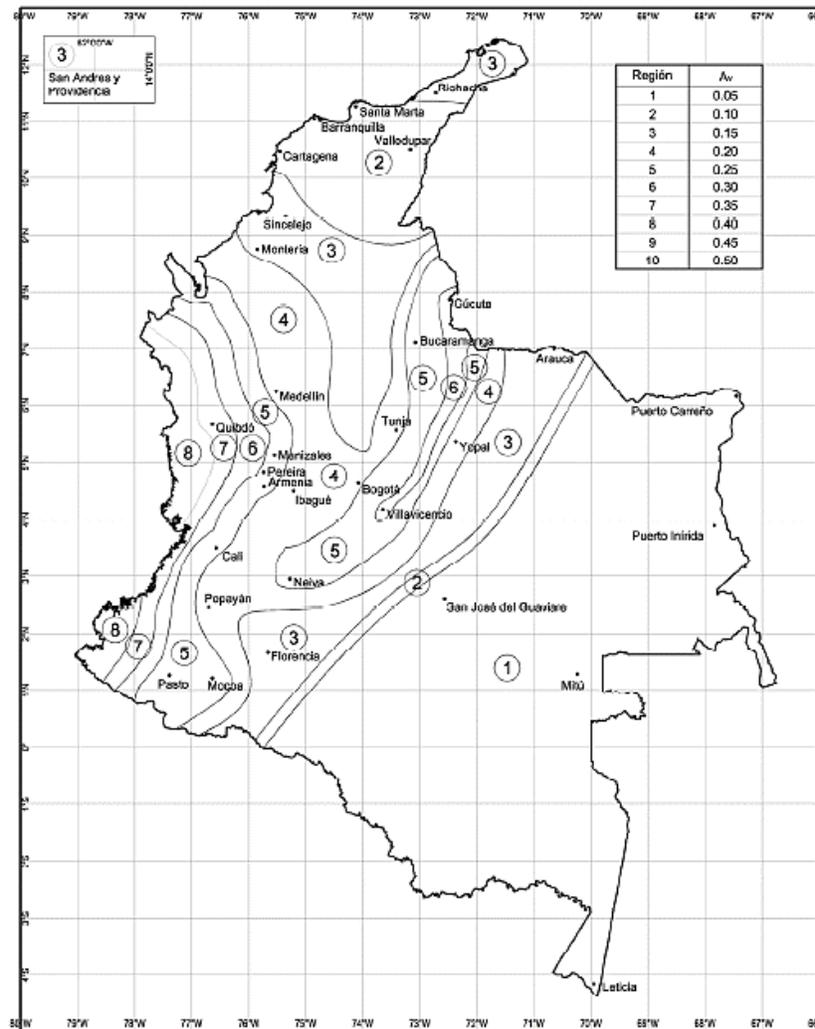


Figura 15. Mapa de valores de A_v

Fuente: NSR-10.

6.1.4.2. Efectos locales

Teniendo en cuenta el tipo de perfil de suelo determinado por el ingeniero de geotecnista en estudio de suelo, se definen los coeficientes de sitio. Por lo tanto, para un perfil de suelo tipo D, se tiene:

Coefficiente de Amplificación para la aceleración para periodos Cortos; F_a 1.6

Coefficiente de Amplificación para la aceleración para periodos Intermedios; F_v 2.4



6.1.4.3. Coeficiente de importancia

El coeficiente de importancia de la estructura depende del tipo de grupo de uso de la estructura. Para este proyecto se tiene:

Grupo de uso Edificación de Uso Normal , sin condiciones de ocupación especial.

$$I = 1$$

6.1.4.4. Espectro de respuesta de aceleración

Para un coeficiente de 5% de amortiguamiento se tiene que:

- Para periodo de vibración menores de T_C , el valor de S_a se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$T_C = 0.48 \frac{A_v F_v}{A_a F_a} \rightarrow S_a = 2.5 A_a F_a I$$

Periodo Corto (T_c) 0.72 s

- Para periodo de vibración entre T_C y T_L , el valor de S_a se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$S_a = \frac{1.2 A_v F_v I}{T}$$

Para $T=2.113$ s. y su correspondiente pseudoaceleración,

$$S_a = \frac{1.2 \times 0.1 \times 2.4 \times 1}{2.113 \text{ s}} = 0.136 \text{ s}$$

- Para periodo de vibración mayores T_L , el valor de S_a se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$T_C = 2.4 F_v \rightarrow S_a = \frac{1.2 A_v F_v T_L I}{T^2}$$

Periodos Largos (T_L) 5.76 s



ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES DE ENTREPISOS EN DOS DIRECCIONES, LOSAS MACIZAS Y LOSAS NERVADAS

Tabla 11. Espectro de respuesta

T	Sa
0.000	0.400
0.360	0.400
0.720	0.400
1.224	0.235
1.728	0.167
2.232	0.129
2.736	0.105
3.240	0.089
3.744	0.077
4.248	0.068
4.752	0.061
5.256	0.055
5.760	0.050
5.860	0.048
5.960	0.047
6.060	0.045
6.160	0.044

Fuente: Autores.

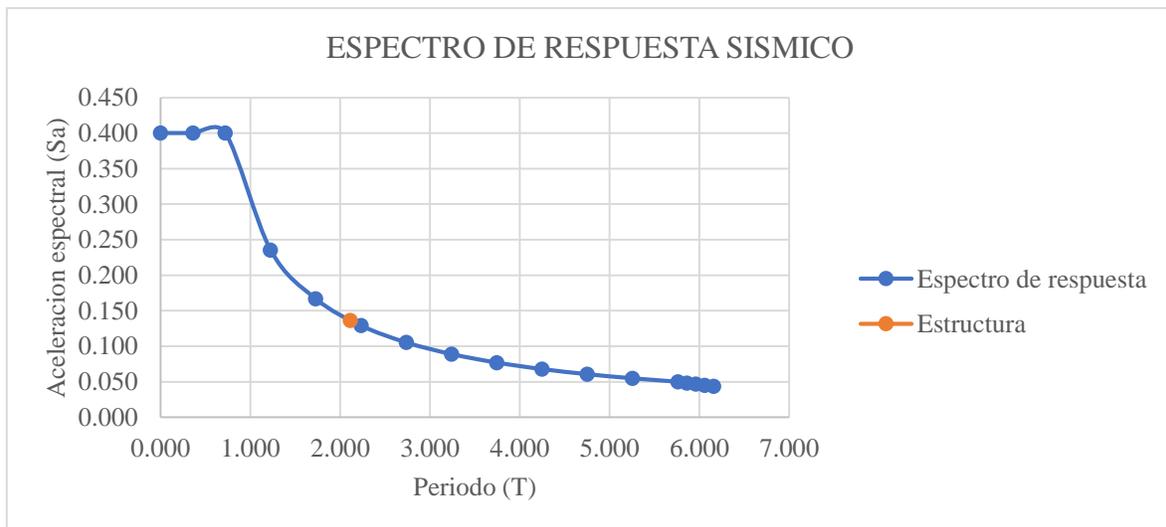


Figura 16. Espectro de respuesta

Fuente: Autores.



Para obtener el valor del periodo fundamental de la estructura se deben definir parámetros de acuerdo con el sistema de resistencia sísmica de la misma y cumplir la restricción de que este valor T , no sea mayor al cálculo de los parámetros $C_u T_a$. Cuyos valores se obtienen como se muestra a continuación:

$$C_u = 1.75 - 1.2A_v F_v > 1.2$$

$$C_u = 1.75 - 1.2 \times 0.1 \times 2.4 = 1.462 > 1.2$$

y,

$$T_a = C_t h^a$$

Los valores de C_t y a se obtienen mediante la tabla 12.

Tabla 12. Valor de los parámetros C_t y a para el cálculo del periodo aproximado T_a

SISTEMA DE RESISTENCIA SÍSMICA	C_t	a
Pórticos resistentes a momentos de concreto reforzado que resisten la totalidad de las fuerzas sísmicas y que no están limitados o adheridos a componente más rígidos, estructurales o no estructurales, que limiten los desplazamiento horizontales al verse sometidos a las fuerzas sísmicas.	0.047	0.9

Fuente: Tabla A.4.2-1., NSR-10. Editado por autores.

Para una altura total de la estructura, $h = 45$ m se tiene un periodo aproximado, T_a de:

$$T_a = 0.047 \times 45 m^{0.9} = 1.445 \text{ s.}$$

Determinados los valores de $C_u T_a$ se tiene que:

$$C_u T_a = 1.462 \times 1.445 = 2.113 \text{ s.}$$

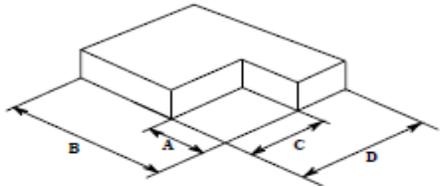
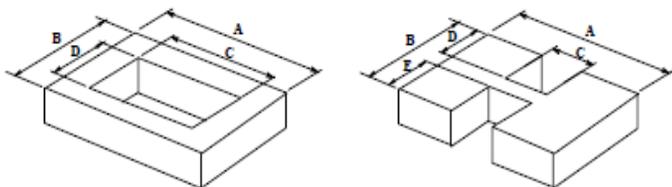
Teniendo en cuenta la restricción $T \leq C_u T_a$, se puede establecer el periodo fundamental de la estructura, $T=2.113$ s.



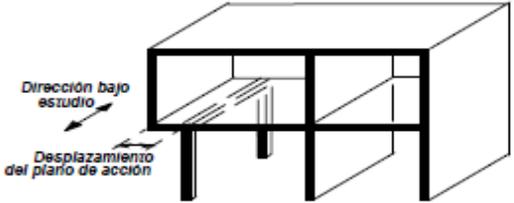
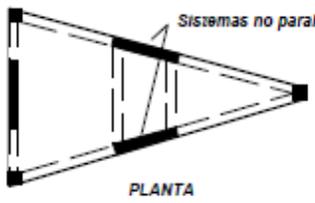
6.1.5. Análisis de irregularidades

6.1.5.1. Irregularidad en planta

Tabla 13. Irregularidades en planta

IRREGULARIDAD	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES	PRESENTA	ϕ_p
Torsional	<p>Tipo 1aP — Irregularidad torsional</p> <p>$\phi_p = 0.9$</p> $1.4 \left(\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} \right) \geq \Delta_1 > 1.2 \left(\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} \right)$	<p>Teniendo en cuenta los resultados de la revisión de derivas y la información arrojada por los softwares de diseño se establece una irregularidad torsional en la estructura</p>	SI	0.9
Torsional extrema	<p>Tipo 1bP — Irregularidad torsional extrema</p> <p>$\phi_p = 0.8$</p> $\Delta_1 > 1.4 \left(\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} \right)$		NO	1
Retrocesos excesivos en las esquinas	<p>Tipo 2P — Retrocesos en las esquinas — $\phi_p = 0.9$</p> <p>$A > 0.15B$ y $C > 0.15D$</p> 	<p>La edificación posee la forma De un rectángulo que se Desarrolla desde el piso 1 al 5 en la zona de parqueadero y desde el piso 6 hasta la cubierta sin retrocesos en esquinas.</p>	NO	1
Discontinuidades en el diafragma	<p>Tipo 3P — Irregularidad del diafragma — $\phi_p = 0.9$</p> <p>1) $C \times D > 0.5A \times B$ 2) $(C \times D + C \times E) > 0.5A \times B$</p> 	<p>No existen vacíos de gran tamaño ni retrocesos dentro del diafragma de la edificación. Por lo tanto, no presenta este tipo de irregularidad.</p>	NO	1



Desplazamientos en el plano de acción	<p>Tipo 4P — Desplazamiento de los planos de Acción — $\phi_p = 0.8$</p> 	La estructura objeto de estudio no presenta desplazamientos de las columnas. Por ende, no es necesario realizar el análisis de desplazamiento de los planos de acción.	NO	1
Sistemas no paralelos	<p>Tipo 5P — Sistemas no paralelos — $\phi_p = 0.9$</p> 	La edificación es de geometría regular, por ende, los pórticos serán paralelos entre ellos.	NO	1

Fuente: Tomado y editado por Autores. NSR-10.



6.1.5.2. Irregularidad en altura

Tabla 14. Irregularidades en altura

TIPO	IRREGULARIDAD	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES	PRESENTA	ΦA
1aA	En rigidez (piso flexible)		<p>En la edificación objeto de estudio, no existen diferencias entre las alturas de entepiso. por ende, no hace falta realizar un análisis de rigideces.</p>	NO	1
1bA	Extrema en rigidez (piso flexible)			NO	1
2A	En la distribución de masa		<p>Para la edificación objeto de estudio todos los pisos que la conforman tienen como fin, uso de tipo residencial, por lo cual es no hace falta hacer un análisis de distribución de masas</p>	NO	1
3A	Geométrica		<p>$a > 1.3b$ $34,4m > 1.3 (27.16 m)$ $34.4m > 30.81 m$</p>	SI	0.9



4A	Desplazamientos dentro de los planos de acción		<p>La estructura objeto de estudio no presenta desplazamientos de las columnas. Por ende, no es necesario realizar un análisis del desplazamiento de los planos de acción.</p>	NO	1
5aA	Discontinuidad en la resistencia (Piso débil)		<p>Para la edificación de estudio no existen cambios de sección de las columnas dentro del mismo plano de acción por lo tanto no hace falta realizar esta verificación.</p>	NO	1
5bA	Discontinuidad extrema en la resistencia (Piso débil)			NO	1

Fuente: Tomado y editado por Autores. NSR-10.

6.1.5.3. Irregularidad por ausencia de redundancia

Tabla 15. Irregularidad por ausencia de redundancia

IRREGULARIDAD	CALCULO	ϕ_r
Por ausencia de redundancia	DMI	1

Fuente: Autores.

**Tabla 16.** Resumen de coeficientes

COEFICIENTE	VALOR
ϕ_p	0.9
ϕ_a	0.9
ϕ_r	1

Fuente: Autores.

Determinadas las irregularidades que presenta la estructura se hace la modificación del coeficiente de disipación de energía, R_0 el cual será fundamental para analizar el comportamiento de la edificación ante el sismo de diseño.

$$R = \phi_p \phi_a \phi_r \times R_0$$

$$R = 0.9 \times 0.9 \times 1 \times 2.5$$

$$R = 2.025$$



6.1.6. Combinaciones de cargas

Tabla 17. Fuerzas sísmicas reducidas por el factor R0.

DISEÑO A FLEXION Y COMPRESIÓN	Ex	Carga por sismo dirección x	0.494	0.142	30% 1/R
	Ey	Carga por sismo dirección y	0.494	0.142	

Fuente: Autores.

6.1.6.1. Diseño a flexión y compresión

- 1 1.4D0+1.4DL
- 2 1.2D0+1.2DL+1.6LL
- 3 1.2D0+1.2DL+LL+WLX
- 4 1.2D0+1.2DL+LL-WLX
- 5 1.2D0+1.2DL+LL+WLY
- 6 1.2D0+1.2DL+LL-WLY
- 7 1.2D0+1.2DL+LL+0.75WLX+0.75WLY
- 8 1.2D0+1.2DL+LL-0.75WLX-0.75WLY
- 9 1.2D0+1.2DL+0.5WLX
- 10 1.2D0+1.2DL-0.5WLX
- 11 1.2D0+1.2DL+0.5WLY
- 12 1.2D0+1.2DL-0.5WLY
- 13 1.2D0+1.2DL+0.375WLX+0.375WLY
- 14 1.2D0+1.2DL-0.375WLX-0.375WLY
- 15 0.9D0+0.9DL+WLX
- 16 0.9D0+0.9DL-WLX
- 17 0.9D0+0.9DL+WLY
- 18 0.9D0+0.9DL-WLY
- 19 1.2D0+1.2DL+LL+0.494EQX-0.142EQY
- 20 1.2D0+1.2DL+LL-0.494EQX+0.142EQY
- 21 1.2D0+1.2DL+LL-0.494EQX-0.142EQY
- 22 1.2D0+1.2DL+LL+0.494EQX+0.142EQY
- 23 1.2D0+1.2DL+LL+0.142EQX-0.494EQY
- 24 1.2D0+1.2DL+LL-0.142EQX+0.494EQY



*ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES DE ENTREPISOS EN DOS DIRECCIONES,
LOSAS MACIZAS Y LOSAS NERVADAS*

- 25 $1.2D0+1.2DL+LL-0.142EQX-0.494EQY$
- 26 $1.2D0+1.2DL+LL+0.142EQX+0.494EQY$
- 27 $0.9D0+0.9DL+0.494EQX-0.142EQY$
- 28 $0.9D0+0.9DL-0.494EQX+0.142EQY$
- 29 $0.9D0+0.9DL-0.494EQX-0.142EQY$
- 30 $0.9D0+0.9DL+0.494EQX+0.142EQY$
- 31 $0.9D0+0.9DL+0.142EQX+0.44EQY$
- 32 $0.9D0+0.9DL+0.142EQX+0.44EQY$
- 33 $0.9D0+0.9DL+0.142EQX+0.44EQY$
- 34 $0.9D0+0.9DL+0.142EQX+0.494EQY$



6.2. Modelación numérica

A continuación, se muestran los resultados obtenidos tras la modelación numérica de las edificaciones adoptando los diferentes sistemas de entrepiso, en los programas de diseño estructural RCB Building y ETABS.

6.2.1. Análisis y diseño de la edificación con losa maciza sobre vigas principales y vigas secundarias en una dirección.

Para el diseño de la edificación considerando el sistema de entrepiso tipo losa maciza apoyada sobre vigas en una dirección, se realiza la distribución de los elementos, como figura en las ilustraciones 17 y 18, para la zona de parqueadero y la zona de parqueaderos y cubierta respectivamente.

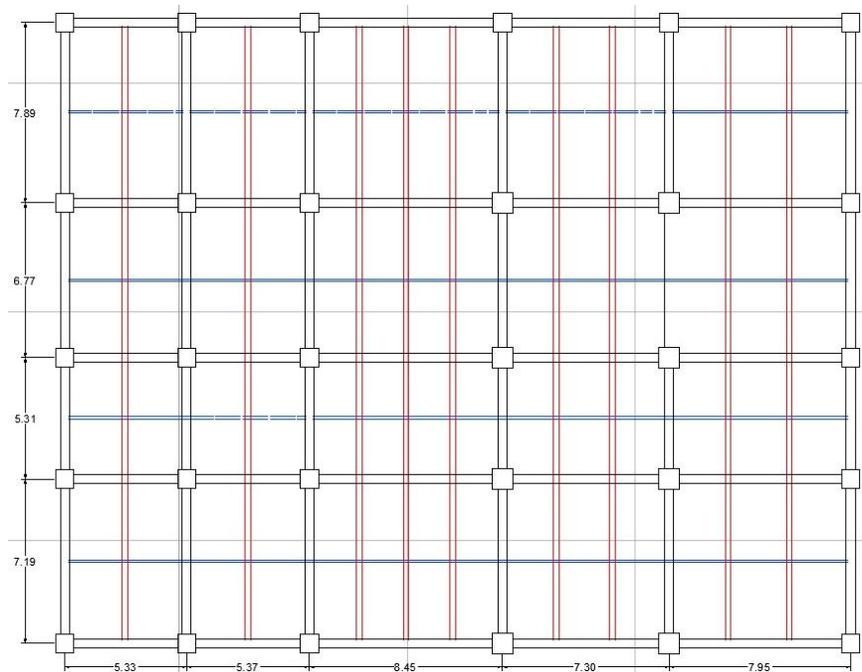


Figura 17. Distribución de vigas principales y secundarias en una dirección en planta zona parqueaderos

Fuente: Autores

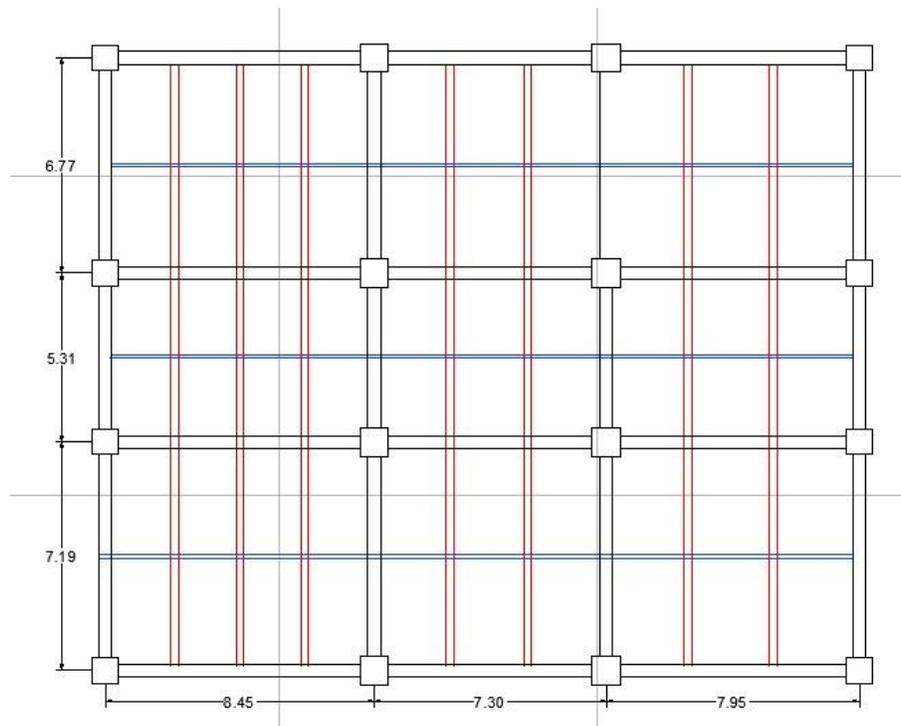


Figura 18. Distribución de vigas principales y secundarias en una dirección en planta zona apartamentos

Fuente: Autores

6.2.1.1.RCB Engsolution

Diseño de los elementos estructurales

En esta sección se muestran los resultados arrojados por el software de diseño RCB Engolutions, para los elementos estructurales de columnas, vigas principales y vigas secundarias, como lo son: dimensiones, secciones y consumos.

Columnas

Para el presente proyecto se diseñaron dos tipos de columnas como se muestra en la tabla 19, secciones de 75x75 cm y secciones de 85x85 cm. Estas secciones de columnas se escogieron teniendo en cuenta que cumpliera con las verificaciones de derivas al momento de analizar y diseñar los diferentes sistemas de losa en cada uno de los softwares de diseño.



Tabla 18. Dimensiones de columnas para losa maciza 1D

COLUMNAS	DIMENSIONES (CM)
A-1	75X75
A-2	75X75
A-3	75X75
A-4	75X75
A-5	75X75
A-6	75X75
B-1	75X75
B-2	75X75
B-3	75X75
B-4	85X85
B-5	85X85
B-6	75X75
C-1	75X75
C-2	75X75
C-3	75X75
C-4	85X85
C-5	85X85
C-6	75X75
D-1	75X75
D-2	75X75
D-3	75X75
D-4	85X85
D-5	85X85
D-6	75X75
E-1	75X75
E-2	75X75
E-3	75X75
E-4	75X75
E-5	75X75
E-6	75X75

Fuente: Autores

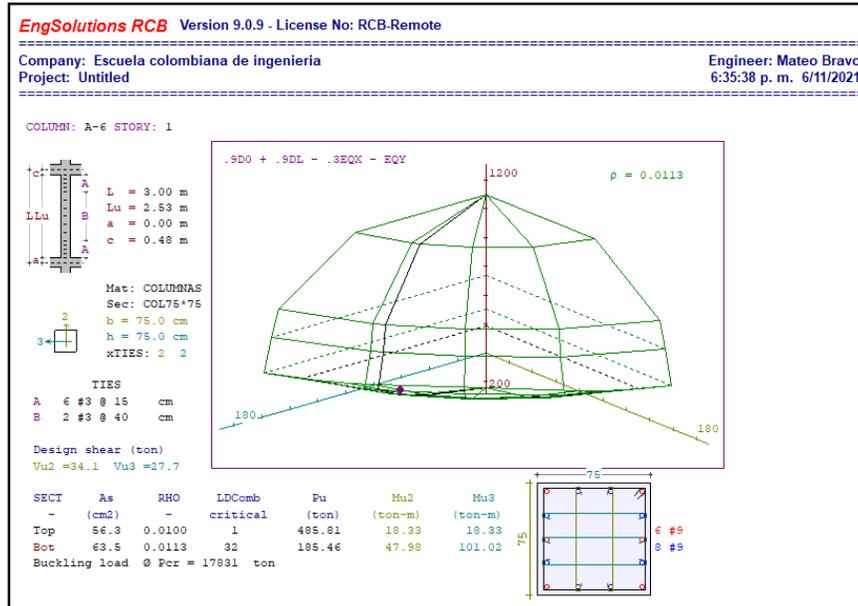


Figura 19. Sección de columna 75X75 cm losa maciza 1D-RCB

Fuente: Autores mediante EngSolutions RCB

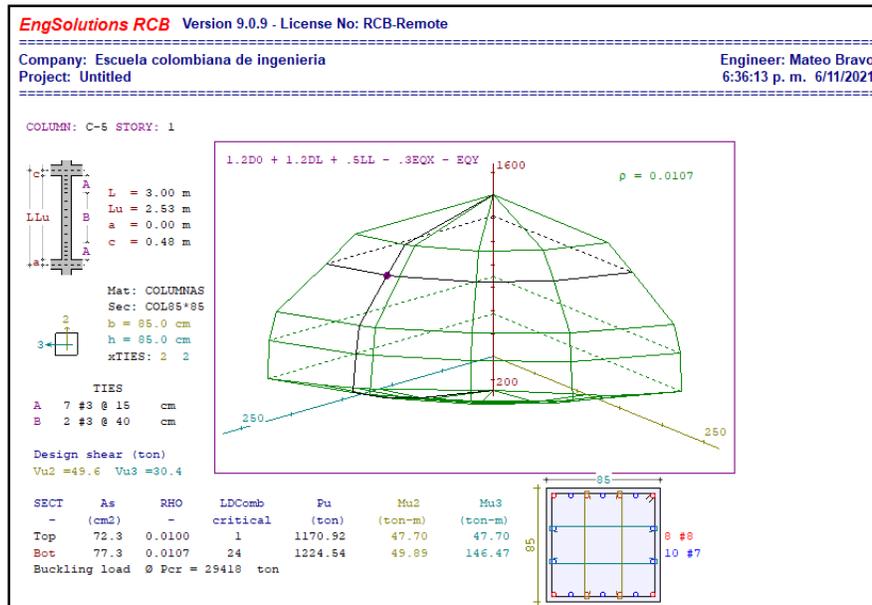


Figura 20. Sección de columna 85X85 cm losa maciza 1D-RCB

Fuente: Autores mediante EngSolutions RCB



ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES DE ENTREPISOS EN DOS DIRECCIONES, LOSAS MACIZAS Y LOSAS NERVADAS

Tabla 19. Consumos para columnas losa maciza 1D-RCB

CONSUMOS COLUMNAS		
MATERIAL	CANTIDAD	UNIDADES
Volumen de concreto	463.8	m ³
Acero longitudinal	45.014	kg
Estribos	21.472	Kg

Fuente: Autores

Vigas

Tabla 20. dimensiones de vigas para losa maciza 1D-RCB

ELEMENTOS ESTRUCTURALES	DIMENSIONES (CM)
Vigas principales	50X55
Vigas secundarias	40X55
Vigas intermedias	25X55

Fuente: Autores

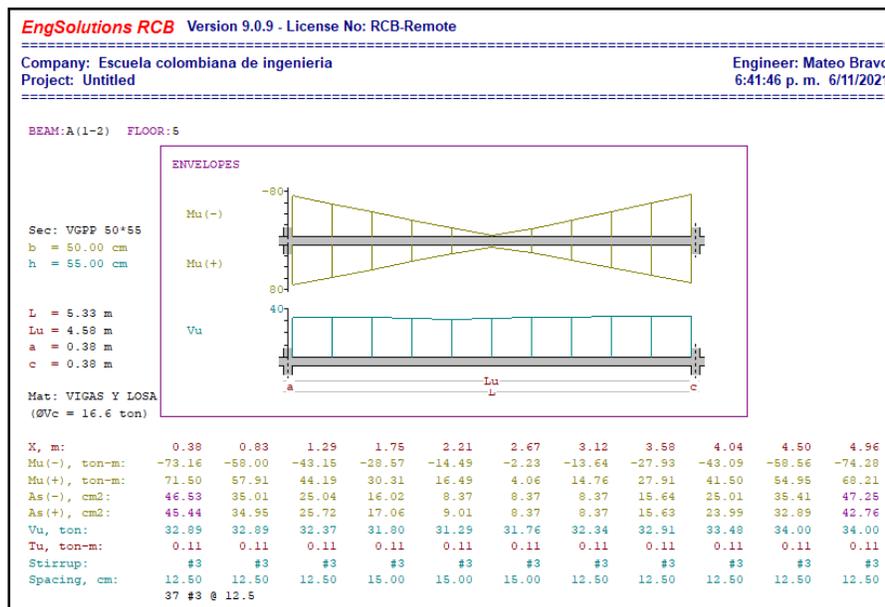


Figura 21. Sección de vigas 50X55 cm losa maciza 1D-RCB

Fuente: Autores mediante Eng solutions RCB

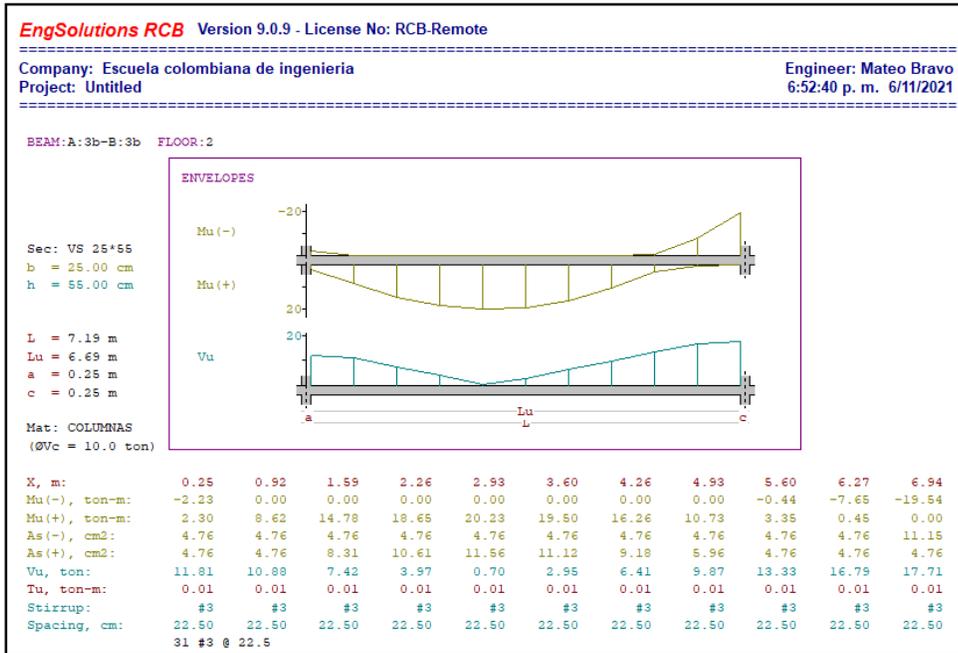


Figura 22. Sección de vigas 25X55 cm losa maciza 1D-RCB

Fuente: Autores mediante EngSolutions RCB

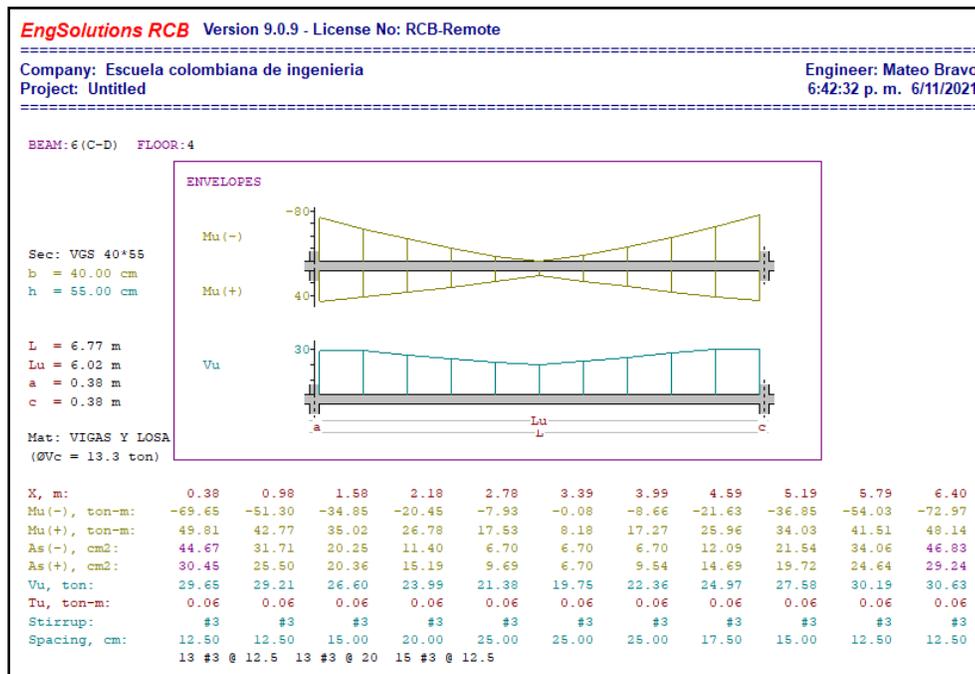


Figura 23. Sección de vigas 40X55 cm losa maciza 1D-RCB

Fuente: Autores mediante EngSolutions RCB



Tabla 21. Consumos para vigas losa maciza 1D-RCB

VIGAS		
MATERIAL	CANTIDAD	UNIDADES
Volumen de concreto	866.05	m ³
Acero longitudinal	104.688,6	kg
Estribos (3/8")	20.742,43	Kg

Fuente: Autores

Losa

Tabla 22. Consumos para losa maciza en 1D -RCB.

LOSA (14 CM)		
MATERIAL	CANTIDAD	UNIDADES
Volumen de concreto	1,293.39	m ³
Malla electrosoldada	73.908	Kg

Fuente: Autores

6.2.1.2.ETABS

Luego de la modelación y ejecución de la edificación realizada en el software de diseño ETABS se hace necesario cumplir con requisitos exigidos por la normativa colombiana de construcción sismorresistente, NSR-10. Dentro de los cuales se encuentran el factor de ajuste de la fuerza obtenida mediante el análisis dinámico y el periodo modal de la estructura.

Fuerzas sísmicas V_x y V_y , Factor de ajuste.

Una vez ejecutado el análisis modal dinámico de la estructura en el programa se hace necesario chequear que la cortante basal en los sentidos X y Y de la estructura cumplan con al menos el 90% de la cortante basal calculada por el método FHE. (NSR-10). A continuación, se muestra el desarrollo para la obtención de estas fuerzas:

Se calcula la cortante basal, V_s mediante la ecuación,

$$V_s = S_a g M$$

Donde, S_a , es la Pseudo aceleración,

g , es la gravedad



Y M, es la masa total de la edificación.

Para determinar el valor de la masa total de la edificación utilizamos los resultados de la ejecución de esta, dentro de los cuales se indica la reacción en la base de la estructura en el sentido Z, lo que genera un valor de 10778.5 Ton.

$$M = 10778.5 \text{ Ton}$$

Este valor corresponde a una reacción por lo que ya se encuentra calculada con la gravedad debido a su condición de fuerza.

La Pseudoaceleración corresponde al valor de la aceleración en el espectro de respuesta para el periodo fundamental de la estructura, este parámetro se indica en la gráfica de la ilustración 16 y tiene un valor de,

$$S_a = 0,136$$

Determinados los valores, se tiene que la cortante basal es igual a,

$$V_s = 0,136 \frac{m}{s^2} \times 10778.5 \frac{\text{Ton} \cdot m}{s^2}$$

$$V_s = 14689.747 \text{ Ton}$$

Debido a que la edificación objeto de estudio se trata de una estructura irregular, las fuerzas en los sentidos X y Y, deben cumplir por lo menos con el 90% de la cortante basal hallada por el método FHE, esto quiere decir que,

$$V_x, V_y \geq 90\% V_s$$

$$V_x, V_y \geq 90\%(14689.747 \text{ Ton})$$

$$V_x, V_y \geq 13220.34 \text{ Ton}$$

Para saber cuáles son las Fuerzas F_x y F_y que están dando, se revisan los resultados del análisis modal hecho por el software, y se reemplazan en la siguiente ecuación de factor de ajuste,

$$F_x, F_y = 0.9 \times \frac{V_s}{V_x, V_y}$$



Esta operación debe realizarse el número de veces necesarias hasta cumplir con la condición, los valores del factor de ajuste que vaya arrojando el cálculo anterior, deben ser reemplazados dentro de la definición de la carga del sismo por análisis modal dinámico dentro del software, para el caso del análisis de la losa maciza en una dirección apoyada sobre vigas principales y vigas secundarias, se obtuvo (después de varias iteraciones) el siguiente factor de ajuste,

Para un $V_x = 1327.34 \text{ Ton}$

$$F_x = 0.9 \times \frac{14689.747 \text{ Ton}}{1327.34 \text{ Ton}}$$

$$F_x = 9.964$$

Para un $V_x = 1325.75 \text{ Ton}$

$$F_x = 0.9 \times \frac{14689.747 \text{ Ton}}{1325.75 \text{ Ton}}$$

$$F_x = 9.9723$$

Al multiplicar el factor de ajuste por los valores de V_x y V_y arrojados por el software, se obtiene que,

$$V_x = 1327.34 \text{ Ton} \times 9.964 = 13220.7724 \text{ Ton}$$

$$V_y = 1325.75 \text{ Ton} \times 9.9723 = 13220.7724 \text{ Ton}$$

Al comparar estos últimos con el 90% de la cortante basal de referencia se evidencia el cumplimiento de esta condición,

$$13220.7724 \text{ Ton} \geq 13220.34 \text{ Ton} \text{ CUMPLE}$$

Periodo fundamental de la estructura

Una vez se cumpla con la condición anterior, se vuelve a ejecutar el análisis modal dinámico de la estructura en el programa y se hace necesario chequear que el periodo obtenido del análisis modal dinámico se menor o igual al periodo fundamental de la estructura, así,

$$T_m \leq C_u T_a$$



Para determinar el valor del periodo de la edificación utilizamos los resultados de la ejecución de esta, lo que genera un valor de 10778.5 Ton.

$$T_m = 2.27 \text{ Seg}$$

Al comparar ambos valores se tiene que la condición no se cumple,

$$2.27 \text{ seg} \leq 2.113 \text{ seg NO CUMPLE}$$

En este caso, antes de descartar el resultado se chequea si el error porcentual se encuentra dentro del 10%.

$$\varepsilon\% = \left| \frac{T_m - CuTa}{CuTa} \right| \times 100\%$$

$$\varepsilon\% = \left| \frac{2.27 \text{ seg} - 2.113 \text{ seg}}{2.113 \text{ seg}} \right| \times 100\%$$

$$\varepsilon\% = 7,42\% \text{ e encuentra dentro del margen de error}$$

Por lo tanto, se puede continuar con el análisis y diseño de la estructura.

Diseño de elementos estructurales

A continuación, se muestran los resultados correspondientes al desarrollo de la edificación en el software de diseño ETABS, para los elementos estructurales de columnas, vigas principales y losas, como lo son: dimensiones, secciones y consumos.



Columnas

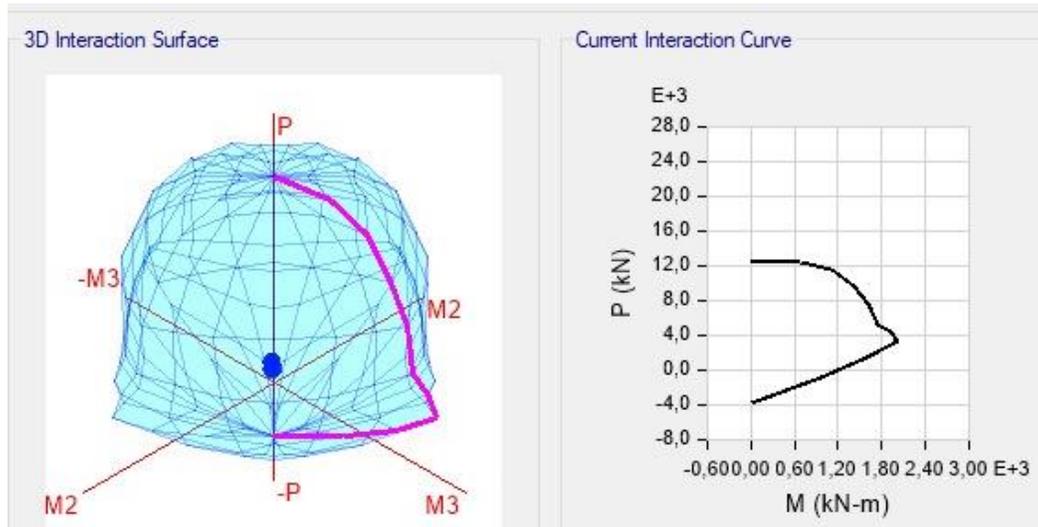


Figura 24. Sección de columna 75X75 cm losa maciza 1D-ETABS

Fuente: Autores mediante ETABS.

Tabla 23. Consumo para columnas losa maciza 1D-ETABS

CONSUMOS COLUMNAS		
MATERIAL	CANTIDAD	UNIDADES
Volumen de concreto	466.790	m ³
Acero longitudinal	45,305	kg
Estribos	21,611	Kg

Fuente: Autores

Vigas

Tabla 24. Consumo para vigas losa maciza 1D-ETABS

VIGAS		
MATERIAL	CANTIDAD	UNIDADES
Volumen de concreto	87,165.00	m ³
Acero longitudinal	105,365.00	kg
Estribos (3/8")	20,876.00	Kg

Fuente: Autores



Losa

Tabla 25. Consumo para losa maciza 1D-ETABS

LOSA (14 CM)		
MATERIAL	CANTIDAD	UNIDADES
Volumen de concreto	1,293.39	m ³
Malla electrosoldada	73,908.00	Kg

Fuente: Autores

6.3.Comparativo de sistemas de losa de entrepiso y software de diseño, ETABS y RCB Engolutions.

6.3.1. Filosofía de diseño

Al comenzar a utilizar los software de modelación numérica ETABS y RCB Engolutions, es importante entender que debido al origen de cada uno, existirán diferencias y precisiones de cálculo entre ambos, durante el desarrollo de la presente investigación se evidencio que el software ETABS arrojaba datos muy precisos en comparación con el software RCB, y se considera que esto sucede debido a que el software ETABS analiza las edificaciones mediante la metodología de elementos finitos mientras que RCB, utiliza dicha metodología principalmente en elementos de muros. A esto se le suma que. RCB trabaja con el método Hardy Cross y realiza análisis más conservadores con el fin de no presentar fallas en los detalles del análisis.

Por otra parte, RCB Engolution, resultó un software muy intuitivo a la hora de modelar y analizar edificaciones colombianas, debido a que permite a los ingenieros entender el funcionamiento de manera fácil y posee dentro de su base de datos información precisa de los requisitos y comentarios de la norma NSR-10 como referencia para todos los diseños, evitando fallar en cálculos. Mientras que ETABS, a pesar de tener la norma colombiana dentro de su base de datos para el análisis sísmico, carece de especificaciones mínimas de diseño de concreto para edificaciones colombianas. Como consecuencia, esto puede acarrear equivocaciones por parte del ingeniero al modelar, analizar o diseñar una edificación.

6.3.2. Derivas

De acuerdo con los resultados obtenidos durante el análisis y la comparación del comportamiento de la edificación modelada en los softwares de diseño ETABS y RCB



Engsoftolutions, se evidencia que las derivas obtenidas con el programa ETABS son mayores en relación con los resultados arrojados por RCB Engsoftolutions, la razón es que en el software de ETABS se puede generar una optimización ya que este trabaja con cuantía mínima de acero mientras que el software RCB es más conservador.

Tabla 26. Tabla comparativa de las derivas máximas de la estructura según el sistema de entrepiso analizado y software utilizado.

LOSA	DERIVAS			
	RCB		ETABS	
	X	Y	X	Y
Nervada 1D	0.0096	0.0092	0.00378	0.00629
Nervada 2D	0.0094	0.0091	0.00188	0.00214
Maciza 2D	0.0089	0.0089	0.00343	0.00549
Maciza 1D	0.0094	0.009	0.00322	0.00528

Fuente: Autores.

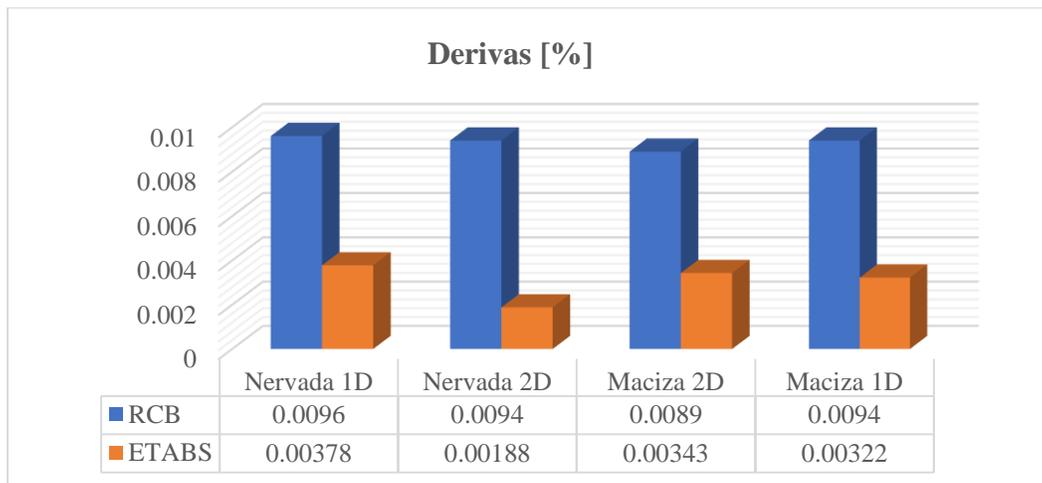


Figura 25. Grafica representativa del porcentaje de derivas de la estructura

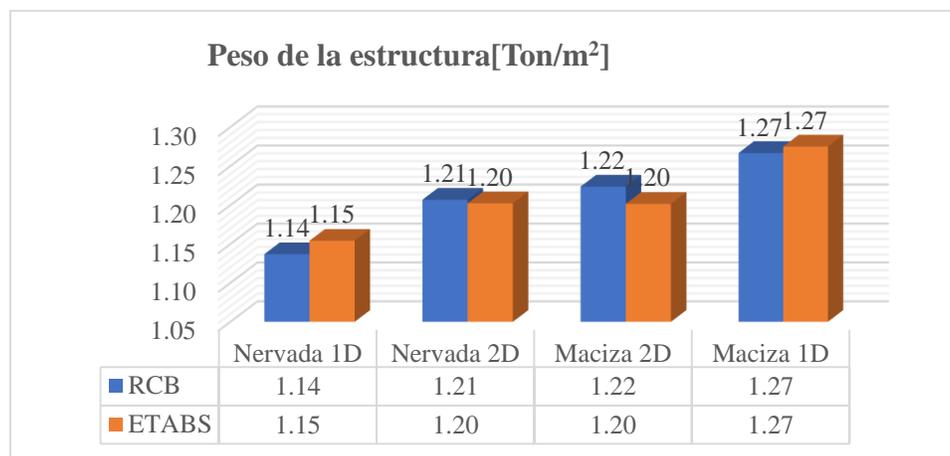
Fuente: Autores.

6.3.3. Pesos de la estructura

El peso de la estructura varía de manera significativa para los distintos modelos, debido que la losa al cambiar de espesores según su distribución de fuerzas aumenta o disminuye el volumen de material que la compone.

**Tabla 27.** Tabla comparativa de los pesos de la estructura según el sistema de losa de entrepiso analizado y software utilizado.

M ² TOTALES	PESO				DIFERENCIA PORCENTUAL
	RCB		ETABS		
9.238,50	PESO	Ton/m ²	PESO	Ton/m ²	
LOSAS					
Nervada 1D	10.504,03	1,14	10.663,25	1,15	1,5%
Nervada 2D	11.149,70	1,21	11.107,78	1,20	0,4%
Maciza 2D	11.305,00	1,22	11.100,84	1,20	1,8%
Maciza 1D	11.702,84	1,27	11.778,50	1,27	0,6%

Fuente: Autores.**Figura 26.** Grafica representativa de los pesos de la estructura*Fuente:* Autores.

6.3.4. Irregularidades

En cuanto al análisis de irregularidades, el software RCB representa una gran ventaja al momento de analizar las edificaciones, ya que RCB cuenta con la opción de generar en su reporte de cálculo, el análisis en detalle de cada una de las irregularidades que pueden presentarse en la estructura evaluada, lo que permite al ingeniero ahorro de tiempo y de recursos.

6.3.5. Análisis sísmico

A pesar de que ambos softwares poseen los parámetros de diseño de amenaza sísmica establecidos en la normativa colombiana, NSR-10. En ETABS, una vez ejecutado el análisis modal del programa con la estructura modelada, es necesario verificar el factor de ajuste de las fuerzas sísmicas para poder cumplir con la condición del 90% de la cortante basal del



método de la fuerza horizontal. Mientras que RCB Engsolution, al contar con el análisis de irregularidades dentro de su programación, facilita el análisis de este factor haciendo innecesario el cálculo de este fuera del software. Sin hacer necesario este paso en la modelación numérica.

6.3.6. Losas

En cuanto al diseño de losas, ETABS posee la ventaja de diseñar este tipo de elementos ya que cuenta con el análisis dentro de su programación, mientras que el software RCB Engolutions, no lo posee. Por lo tanto, si se utiliza este último software para analizar el sistema de resistencia de la edificación hará falta un programa alterno para analizar y diseñar la losa de entrepiso que puede ser de carácter estructural o no estructural.

6.3.7. Periodos

Tabla 28. Tabla comparativa del periodo de la estructura según el sistema de losa de entrepiso analizado y software utilizado.

LOSA	PERIODO	
	RCB	ETABS
Nervada 1D	2,041	2,273
Nervada 2D	1,981	2,272
Maciza 2D	1,859	2,107
Maciza 1D	1,843	2,152

Fuente: Autores

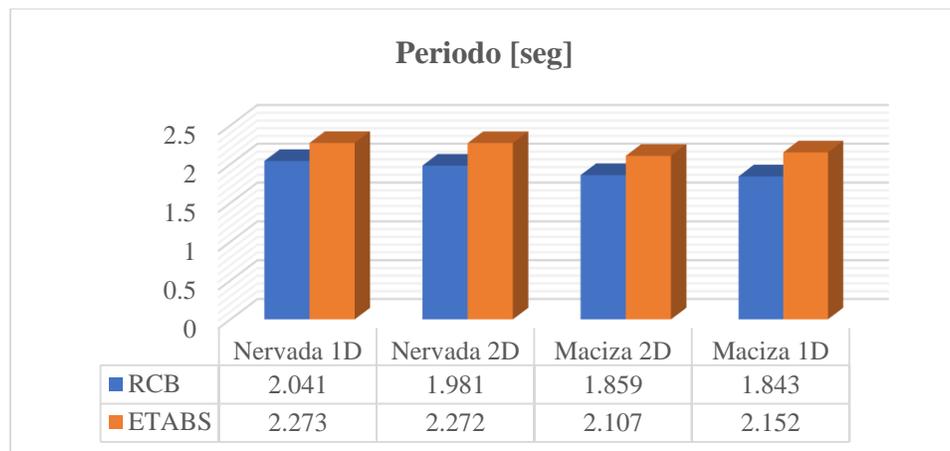


Figura 27. Grafica representativa de los periodos de la estructura

Fuente: Autores.



6.3.8. Rigidez de la estructura

Teniendo en cuenta que la rigidez se define como la resistencia generada por la estructura a la deformación debido a cargas horizontales aplicadas y que esta a su vez se encuentra relacionada con el periodo de la estructura, debido a que, a mayor masa, mayor periodo, y mientras más rigidez, menor periodo (Cevallos, Burbano, & Moreano, 2018). Se puede observar en la figura 27 que la estructura con sistema de entrepiso de losas nervadas en una y dos direcciones presenta menor rigidez que las losas macizas. Este comportamiento puede atribuírsele a la diferencia de espesores entre las losas ya que el espesor en losa nervada es mayor al espesor de la losa maciza.

6.3.9. Consumos concreto

En la siguiente tabla se muestra el consumo de concreto para el sistema a porticado (Columnas, vigas, viguetas o nervios y losa) para la losa maciza en una y dos direcciones y losa nervada en una y dos direcciones, apoyado por el software RCB y ETABS, para hacer mucho más fácil el cálculo, hallamos un factor m^3/m^2 , para escoger cuál de los cuatro diseños optimiza materiales, a continuación, se muestran los resultados:

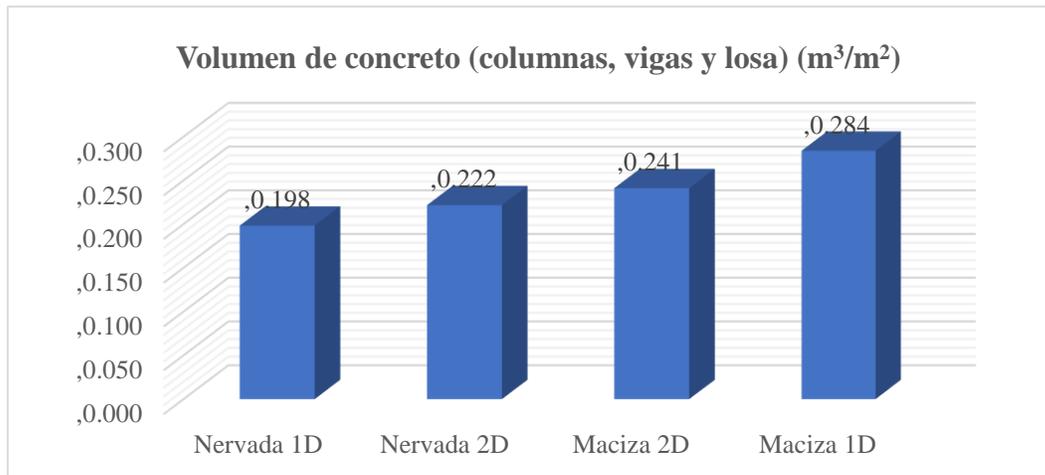
Tabla 29. Volúmenes de concreto de la estructura según el sistema de losa de entrepiso analizado

LOSA	VOLUMEN DE CONCRETO (COLUMNAS Y VIGAS Y LOSA) (m ³)	m ³ /m ²
Nervada 1D	1,831.29	0.198
Nervada 2D	2,047.59	0.222
Maciza 2D	2,228.06	0.241
Maciza 1D	2,623.24	0.284

Fuente: Autores.



Figura 28. Gráfica representativa de volúmenes de concreto



Fuente: Autores.

6.3.10. Consumos acero

A continuación, se muestra los resultados de las cuantías de acero para los cuatro tipos de losas, generadas por el promedio los softwares RCB y ETABS, incluyendo el acero longitudinal, estribos y malla electro soldada de las vigas, columnas y losa. Luego calculamos un factor kg/m^2 , tomando como referencia el área total del edificio, con el fin de determinar en una tabla ascendente cual es el tipo de losa que menos consume acero, como lo muestra la siguiente tabla:

Tabla 30. Consumo de acero de la estructura según el sistema de losa de entepiso analizado

LOSA	ACERO (LONGITUDINAL Y ESTRIBOS) (Kg)	Kg/m ²
Nervada 1D	207,730.48	22.485
Maciza 2D	225,776.41	24.439
Maciza 1D	265,825.03	28.774
Nervada 2D	301,995.94	32.689

Fuente: Autores.

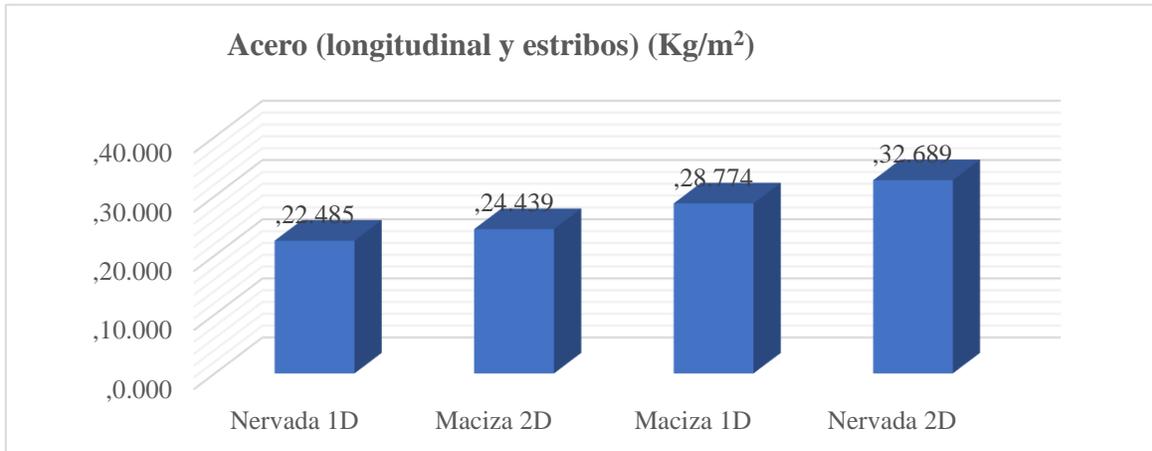


Figura 29. Gráfica representativa del consumo de acero

Fuente: Autores.



6.4. Análisis de costos

Con los resultados anteriormente mencionados, se procede a realizar un análisis detallado de costos, con el fin de escoger una alternativa económicamente viable y constructivamente posible. Posterior a esto se toman los valores de referencia del mercado y también se realiza la comparación de los diseños en ambos softwares de diseño, teniendo la recopilación de la información, se obtuvieron los siguientes APU:

6.4.1. APU de Edificación con losa maciza sobre vigas y vigas secundarias en una dirección, modelo de RCB.

Tabla 31. APU de edificación con losa maciza 1D-RCB.

ITEM	Losa maciza 1D (14 cm) - RCB	DESCRIPCIÓN:	Icopor y tricapa en alquiler	UNID:
DATOS DEL PROYECTO				
Nº torres	1	Nº pisos	15	

Formaleta

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL
Área de losa	M ²	828.15		
Icopor (densidad 14 kg/m ³)	M ²	8,205.00	\$ 18,000.00	\$ 147,690,000.00
Camilla (0.7mx1,4m)	M ² /día	900	\$ 300.00	\$ 40,500,000.00

Total, formaleta	\$ 188,190,000.00
Unitario formaleta	\$ 22,936.01

Materiales

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL
		D		



ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES DE ENTREPISOS EN DOS DIRECCIONES,
LOSAS MACIZAS Y LOSAS NERVADAS

Concreto	M ³	2,623.24	\$ 350,000.00	\$ 918,134,000.00
Acero	kg/m ²	265,825.00	\$ 5,000.00	\$ 1,329,125,000.00

	\$
Total, materiales	2,247,259,000.00
	\$
Unitario materiales	273,888.97

Total (Formaleta + materiales)	\$ 2,435,449,000.00
Unitario (Formaleta + materiales)	\$ 263,619.53

Fuente: Autores.



6.4.2. APU de Edificación con losa maciza sobre vigas y vigas secundarias en una dirección, modelo de ETABS.

Tabla 32. APU de edificación con losa maciza 1D-ETABS

ITEM	LOSA MACIZA 1D (14 CM) - ETABS	DESCRIPCIÓN:	ICOPOR Y TRICAPA EN ALQUILER	UNID:
DATOS DEL PROYECTO				
Nº torres	1	Nº pisos	15	Duración del proyecto (Días)

FORMALETA

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL
Área de losa	M ²	828.15		
Icopor (densidad 14 kg/m ³)	M ²	8,205.00	\$ 18,000.00	\$ 147,690,000.00
Camilla (0.7mx1,4m)	M ² /día	900	\$ 300.00	\$ 40,500,000.00

Total, formaleta	\$ 188,190,000.00
Unitario formaleta	\$ 22,936.01

MATERIALES

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL
Concreto	M ³	2,631.84	\$ 350,000.00	\$ 921,144,000.00



ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES DE ENTREPISOS EN DOS DIRECCIONES,
LOSAS MACIZAS Y LOSAS NERVADAS

Acero	kg/m ²	267,065.80	\$	\$
			5,000.00	1,335,329,000.00

	\$
Total, materiales	2,256,473,000.00
	\$
Unitario materiales	275,011.94

Total (Formaleta + materiales)	\$
	2,444,663,000.00
	\$
Unitario (Formaleta + materiales)	263,619.53

Fuente: Autores.



6.4.3. Comparativa de costos

Ya teniendo la información detallada de los consumos de acero y concreto, área aligerada para la edificación y valores de la formaleta en referencia, se procede a realizar un APU para cada uno de los diseños, con el fin de determinar cuál es la estructura más económica incluyendo la formaleta. La comparación que se realizó fue entre un sistema constructivo tradicional con casetones en icopor y camilla de madera para la losa maciza vs casetones plásticos (ATEX) para losa nervada, a continuación, se muestra el resumen del análisis:

Tabla 33. Comparativa de costos de formaleta + materiales

LOSA	COSTOS FORMALETA + MATERIALES (m ²)
Nervada 1D	\$ 226,015.05
Maciza 2D	\$ 226,973.32
Maciza 1D	\$ 263,619.53
Nervada 2D	\$ 294,106.07

Fuente: Autores.

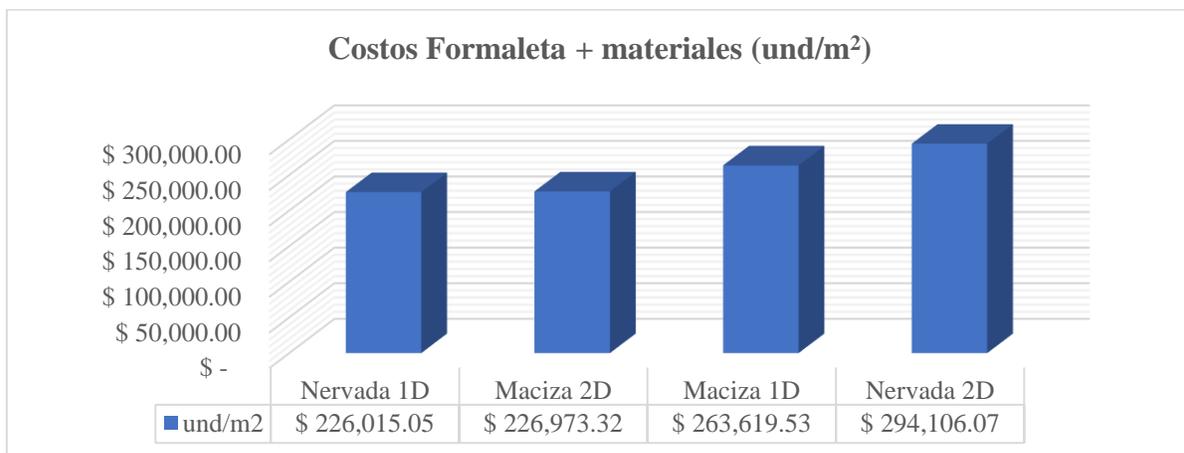


Figura 30. Gráfica representativa de costos y materiales según el tipo de losa analizada

Fuente: Autores.



CONCLUSIONES

Con la presente investigación se logró comparar la incidencia estructural del sistema de entrepiso de losas nervadas y losas macizas en una y dos direcciones en una edificación de 15 pisos mediante la modelación de la estructura en cada uno softwares y según el tipo de entrepiso empleado. En los resultados, inicialmente se pudo observar que el peso de la edificación considerado para las fuerzas sísmicas de diseño variaba a medida que se cambiaba el sistema de entrepiso, pues la losa genera un peso propio significativo gracias a las dimensiones de la placa, siendo así se obtuvo un menor peso de la estructura empleando el sistema de losa nervada en una dirección en relación con los demás tipos de losas. A su vez, este sistema de entrepiso presento un menor volumen de concreto y un mayor periodo. Con estos parámetros, se hace posible establecer una relación directa entre los mismos ya que a medida que aumenta el volumen de concreto, aumenta el peso de la estructura y disminuye el periodo de esta. Teniendo en cuenta, además, la deriva por piso de la estructura se puede concluir que para las losas nervadas al tener una mayor altura le aportan rigidez a la estructura.

Con este estudio se puede decir que para una edificación de 15 pisos con luces entre 5 mts y 8 mts se puede tener mejores consumos con la losa nervada en una dirección. Teniendo una reducción de 10% comparado con el tipo de losa más pesada.

Luego de la modelación, análisis y diseño estructural, se realizó también un estudio de costos de acuerdo con los diseños realizados, con la formaleta a implementar, para losa maciza se escogió el sistema mayormente empleado en Colombia para el sistema aporricado, la camilla de madera con casetones de icopor y para la losa nervada casetones plásticos.

Otra conclusión que se pudo plantear, es que, si se tiene una estructura más liviana, la cimentación de esta, va a requerir menos tiempo en ser construida y a su vez se va a tener un mayor ahorro para la inversión de los materiales.

En cuanto a la modelación de la estructura en los programas de diseño estructural ETABS y RCB Engnsolutions, para cada uno de los modelos se identificaron criterios técnicos de diseño similares con el fin de minimizar el número de variables al momento de comparar los resultados entre ellos, a pesar de esto, se logró observar diferencias notables en las derivas



*ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES DE ENTREPISOS EN DOS DIRECCIONES,
LOSAS MACIZAS Y LOSAS NERVADAS*

de la edificación según el sistema de entrepiso empleado ya que el diseño de las columnas evaluadas en el software de ETABS permite una optimización de estas, mientras que en RCB fueron dimensiones promedio de una deriva de 0,9%, de decir, al límite de 1% de las derivas, permitidos por la NSR-10. Siendo así, se puede concluir que para el contexto colombiano resulta óptimo modelar edificaciones con el software ETAB debido a que la precisión de los datos arrojados conlleva a una optimización interna de los elementos modelados que permitiría un menor costo de la construcción de la estructura, pues al ser mas conservador en el diseño, como es el caso del software RCB Engsolution, el aumento de las secciones para contrarrestar las derivas de la edificación resultan en un mayor consumo de material que elevaría los costos de la construcción de la misma.



RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones se recomienda el uso de ambos softwares de diseño por su facilidad, debido a que son programas muy intuitivos, para el caso de RCB Engolutions, muchos parámetros específicos de diseño requeridos por la normativa colombiana ya están dentro del programa, lo que minimiza los errores al momento de digitar la información requerida. Los informes exportados por el programa son fáciles de entender, ya que muestra el proceso y los factores que intervienen en el cálculo, facilitando la comparación de los cálculos manuales realizados por el ingeniero.

En el momento de digitar las cargas muertas en RCB Engolutions es recomendable utilizar una losa maciza equivalente, asumiendo todas las cargas muertas para minimizar errores al momento de digitar.

Para el caso del diseño de losas, se recomienda comparar softwares que puedan modelar, analizar y diseñar este tipo de elemento, ya que para la presente investigación fue necesario exportar la información y utilizar dos programas para obtener los resultados del diseño de las losas en el caso del software RCB Engolutions ya que este, no tiene dentro de sus características esta opción a diferencia de ETABS.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Avila, J. Berrocal, A. (director). (2017). *Análisis de costos de los sistemas de entrepisos más utilizados en Colombia. Universidad de Cartagena. Colombia.*
2. Surender Kumara, K. Lingeshwaranb, N. Syed Shamim Jeelani. (2020). *Analysis of residential building with STAAD. Pro & ETABS. Materials Today: Proceedings Volume 33, Part 1, 1221-1228. DOI.*
3. Solano Reyes, A. (2017). *Comparación del Análisis y Diseño de Losas Aligeradas Bidireccionales y Losas Macizas en Edificaciones de 5 Pisos. Universidad Peruana de los Andes. Perú.*
4. Gonçalves Silva, C. Campos Lopes, S. (2016). *Estudo comparativo entre laje maciça convencional e lajes nervuradas. Universidad Federal de Goiás. Brasil.*
5. Rodrigues Otoni, T. Abi-Ackel, E. (2015). *Análise comparativa entre sistemas estruturais: laje maciça e laje nervurada DOI. Revista Petra.*
6. Mieles, Y. (2019). *Losas macizas de hormigón armado en una dirección. Universidad Técnica de Manabí (UTM). Ecuador.*
7. Casco, J. & Majano, D., (2019). *Análisis comparativo de los diferentes sistemas de entrepiso en edificios basado en aspectos de seguridad y costo, Universidad del salvador (RIUES).*
8. Ramos, M, (2002). *Análisis técnico y económico de losas de entrepiso, Universidad de Piura, Piura, Perú.*
9. Mieles, Y. (2019). *Método del pórtico equivalente para el diseño de losas macizas de hormigón armado basado en el aci 318s-14. Universidad Técnica de Manabí (UTM). Ecuador.*
10. Merlano, A. (2008) *Alternativas de rigidización en edificios altos de concreto para la zona Caribe colombiana. Universidad del Norte. Colombia.*



11. Rodríguez, M. (2019) *Interpretación de los daños y colapsos en edificaciones observados en la ciudad de México en el terremoto del 19 de septiembre 2017*. Ingeniería sísmica: ISSN 0185-092X. No.101. México.
12. Ochoa, E. (2005). *Comportamiento inelástico de edificios con sistema reticular celularo y alternativas de reforzamiento*. Universidad de los Andes. Colombia.
13. Rodríguez. M. (2016). *Una revisión crítica de la práctica de diseño por sismo de estructuras en México*. Ingeniería sísmica: ISSN 0185-092X. No. 94 27-48. México.
14. Prashanth P. (2012). *Comparison of design results of a Structure designed using STAAD pro and ETABS Software*. International Journal of Civil and Structural Engineering, 2(3).
15. Saba, M. Meloni, D. (2017). *Comparison of different approaches of modelling in a masonry building*. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 935. DOI:10.1088/1742-6596/935/1/012072.
16. Briones, P. Alvarez, Jamil. Quispe, R. (Asesor) (2018). *Comparación del Modelamiento, Análisis y Diseño Estructural en Concreto Armado utilizando los Software Etabs y Robot Structural Analysis, para un Edificio de cinco niveles (cuatro pisos y un semisótano)*. Universidad Peruana Unión. Juliaca.
17. ACI 318S. (2019). *Requisitos del Reglamento para Concreto Estructural*, Estados Unidos de América.
18. Asosismica. (2020). *Norma Sismoresistente colombiana (NSR-10)*. Colombia.
19. Segura, J. (2011) *Estructuras de concreto I*.
20. ATEX. (2017). *Comparativos de consumo*. <https://www.atex.com.br/>
21. Espacio Leve Ingeniería. (2020). *Generalidades Viguetas Steel Joist*.
22. Acosta, D. (2016), *Análisis estructural con ETABS, aplicando el reglamento de construcción sismorresistente. NSR-10*. Universidad Santo Tomás. Bogotá. D.C.
23. Hernández, E. Morrison Ingenieros. (2008), *Análisis y Diseño Estructural Utilizando el Programa ETABS v9*



24. Cevallos, A; Burbano, A; Moreano, R; Caiza, P. (2018). Artículo. *Vulnerabilidad de estructuras en base a los periodos de vibración*. DOI. Ecuador.