



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE UNA ESTRUCTURA DE CONCRETO ARMADO
Y ESTRUCTURA METÁLICA, APLICANDO METODOLOGÍA BIM**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Civil

AUTOR: Edison David Manobanda Chariguaman

TUTOR: David Patricio Guerrero Cuasapaz

Quito - Ecuador
2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Edison David Manobanda Chariguaman con documento de identificación N° 1726411083 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 12 de agosto del 2024

Atentamente,



Edison David Manobanda Chariguaman

1726411083

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Edison David Manobanda Chariguaman con documento de identificación N° 1726411083, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto de Investigación: “Análisis comparativo entre una estructura de concreto armado y estructura metálica, aplicando metodología BIM”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 12 de agosto del 2024

Atentamente,



Edison David Manobanda Chariguaman

1726411083

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, David Patricio Guerrero Cuasapaz con documento de identificación N° 1715215974, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE UNA ESTRUCTURA DE CONCRETO ARMADO Y ESTRUCTURA METÁLICA, APLICANDO METODOLOGÍA BIM, realizado por Edison David Manobanda Chariguaman con documento de identificación N° 1726411083, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 12 de agosto del 2024

Atentamente,



Ing. David Patricio Guerrero Cuasapaz, MSc.

1715215974

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE UNA ESTRUCTURA DE CONCRETO ARMADO Y ESTRUCTURA METÁLICA, APLICANDO METODOLOGÍA BIM

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN A REINFORCED CONCRETE STRUCTURE AND A STEEL STRUCTURE, APPLYING BIM METHODOLOGY

Edison Manobanda-Chariguaman ¹, David Guerrero-Cuasapaz ²

Resumen

En la industria de la construcción, la elección de materiales y métodos de diseño estructural es crucial para la realización de cualquier proyecto constructivo. En todo el mundo, hay una gran variedad de métodos empleados en la edificación de infraestructuras. Sin embargo, en Ecuador predominan principalmente dos técnicas: la construcción en estructura metálica y en concreto armado. Ambos sistemas estructurales presentan beneficios y limitaciones, por eso es fundamental analizar las características técnicas y económicas de cada uno antes de la toma de decisión. En el presente artículo académico con el fin de determinar el sistema estructural más adecuado desde el punto de vista técnico se realizó un análisis comparativo de un proyecto constructivo unifamiliar entre una estructura de concreto armado y estructura metálica, aplicando metodología BIM. Las modelaciones fueron diseñadas a partir de Revit y Robot Structural analysis, gracias a la interoperabilidad y trabajo colaborativo entre distintas áreas del proyecto desde un mismo modelo único que ofrece estos paquetes computacionales. Las estructuras fueron diseñadas como sismorresistente en concreto armado y estructura metálica, de acuerdo a los parámetros establecidos en NEC-15, y como referencias el ACI 318-14 y AISC 360-16. En el análisis se ha verificado: periodo de vibración,

Abstract

In the construction industry, the choice of materials and structural design methods is crucial to the success of any building project. Throughout the world, there is a wide variety of methods used in infrastructure construction. However, two main techniques predominate in Ecuador: steel structure and reinforced concrete construction. Both structural systems have benefits and limitations; therefore, it is essential to analyze the technical and economic characteristics of each one before making a decision. In this academic paper, in order to determine the most adequate structural system from the technical point of view, a comparative analysis of a single-family construction project between a reinforced concrete structure and a steel structure was carried out, applying BIM methodology. The modeling was designed from Revit and Robot Structural analysis, thanks to the interoperability and collaborative work between different areas of the project from a single model offered by these computational packages. The structures were designed as seismic-resistant in reinforced concrete and steel structure, according to the parameters established in NEC-15, and as references ACI 318-14 and AISC 360-16. The analysis has verified: vibration period, mass participation, basal shear, floor drift, beam-

¹ Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

² Docente de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

Autor para correspondencia: emanobandac@est.ups.edu.ec ¹, dguerrero@ups.edu.ec ²

participación de masa, corte basal, deriva de piso, conexión viga- columna y relación peso-estructura. Con relación a los resultados obtenidos de las derivas inelásticas de ambos sistemas constructivos analizados en esta investigación, se pudo apreciar que la estructura metálica muestra una disminución del 29 % en comparación con la estructura de concreto armado.

column connection and weight-structure ratio. In relation to the results obtained for the inelastic drifts of both construction systems analyzed in this research, it could be seen that the steel structure shows a decrease of 29 % in comparison with the reinforced concrete structure.

Palabras Clave: Análisis estructural, Bim, Interoperabilidad, Modelo arquitectónico, NEC-15, Revit, Robot structural analysis.

Keywords: Structural analysis, Bim, Interoperability, Architectural model, NEC-15, Revit, Robot structural analysis.

1. Introducción

En Ecuador, la aplicación de concreto armado en edificaciones de todo tipo de infraestructuras son las más empleadas por los constructores por la gran variedad que se encuentra en el mercado. El concreto se forma por la mezcla de cemento, grava, arena y agua cuidadosamente dosificada obteniendo una determinada resistencia con la forma y dimensión deseada mediante el uso de encofrados. Aunque el concreto posee una alta resistencia a la compresión, presenta una notable fragilidad ante las fuerzas de tracción. Para mitigar esta limitación, se incorpora acero de refuerzo, lo que resulta en una mejora sustancial en su capacidad de soportar esfuerzos tensionales. [1]. Por otro lado, el acero estructural es otra opción de material en construcción, se obtiene mediante la aleación entre el hierro, carbono, y otros elementos que le proporcionan características de gran resistencia, durabilidad y ductilidad, cualidades que son requeridas en construcción. Actualmente el sector de la construcción continúa con nuevas infraestructuras modernas utilizando acero estructural [2].

Como ente regulador está la Norma Ecuatoriana de Construcción NEC-15 que establece los requisitos mínimos de seguridad y calidad tanto para concreto armado y estructura metálica. El propósito del cumplimiento de la norma es la edificación de infraestructuras seguras y confiables, ante la vulnerabilidad por eventos sísmicos, en donde busca salvaguardar la vida de sus ocupantes [3].

Como el avance de la ciencia y tecnología están en el orden del día, el campo de la construcción no es la excepción. Se ha comenzado hablar y trabajar con una nueva metodología diferente al convencional a la hora de diseñar proyectos, en donde, deja a un lado el trabajo individual y se convierte en un trabajo colaborativo denominado BIM.

Building Information Modeling no es un paquete computacional como comúnmente se relaciona, BIM es una nueva metodología de trabajo inteligente, donde todos los agentes están vinculados mediante un modelo único virtual [4].

Existen paquetes computacionales como: Revit, Archicad, Robot Structural Analysis entre otros que trabajan con BIM, gracias a la compatibilidad entre ellos permite que cualquier cambio en el modelo arquitectónico, estructural, sanitario entre otros campos, se vea reflejado en el modelo virtual [4].

Al vincular la modelación arquitectónica de Revit a Robot Structural Analysis, la interoperabilidad de estos paquetes computacionales permite compartir datos y vincular distintos modelos en uno solo facilitando trabajar de manera colaborativa con otras áreas de la construcción [5].

El objetivo principal del presente artículo académico fue realizar un análisis técnico comparativo entre una estructura de concreto armado y estructura metálica aplicando la metodología BIM, concluyendo con la elección del modelo estructural que mejor se ajusta a los requisitos técnicos de este proyecto.

2. Materiales y Métodos

Para este proyecto se contó con un plano arquitectónico como se aprecia en la figura 1, además, un estudio de mecánica de suelos, que consta de un esfuerzo admisible del suelo de 13 T/m^2 , cuya zona pertenece a la parroquia de Tumbaco de la ciudad de Quito-Ecuador.

El diseño constructivo abarca un área bruta de $478,84 \text{ m}^2$, tres plantas de $3,06 \text{ m}$ de altura entrepiso. La edificación está destinada para vivienda, tiene irregularidad en planta y elevación.

Los materiales de construcción deben cumplir con los estándares y requisitos de la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN 152:201) [6] y el Reglamento Técnico Ecuatoriano (RTE INEN 007) [7], para garantizar la durabilidad y seguridad de las infraestructuras.

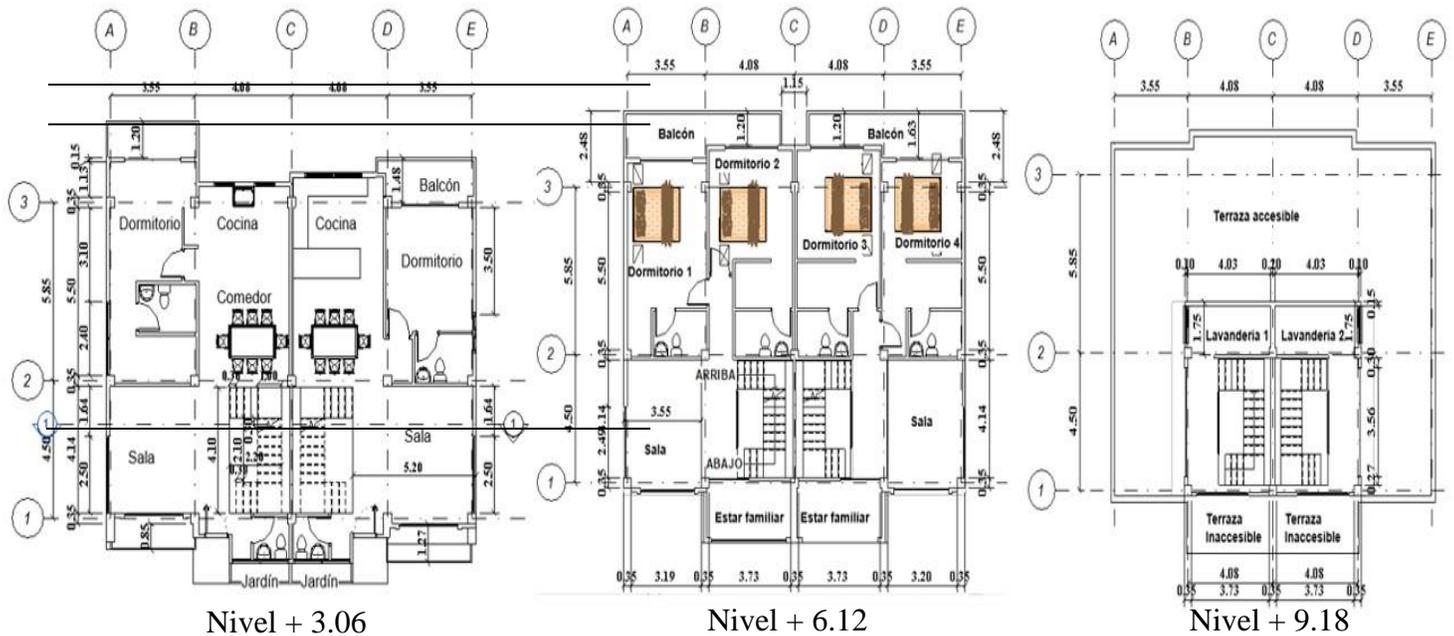


Figura 1. Vista en planta arquitectura

La resistencia a compresión del concreto es de 240 kg/cm^2 para los elementos estructurales en concreto armado como vigas, columnas, losa y grada. La estructura metálica se compone de perfiles laminados en caliente en acero estructural ASTM A36, las propiedades de los materiales utilizados se pueden apreciar en la tabla 1.

Tabla 1. Características de los materiales

Material	Valor	Unidad
f'_c	240	kg/cm^2
f_y	4200	kg/cm^2
γ concreto	2400	kg/m^3
γ acero	7850	kg/m^3
E concreto	209141	kg/cm^2
E acero	2100000	kg/cm^2
ASTM A36	2536	kg/cm^2
Fu	4086	kg/cm^2

2.1 Parámetro de entrada

Las secciones se basan en prediseños de los elementos estructurales conforme a la normativa Ecuatoriana NEC-15, complementada por el ACI 318-14 y AISC 360-16 [3], [8], [9].

Cabe recalcar que en las modelaciones estructurales de concreto armado y estructura metálica cuenta con el módulo de grada, como se resume en la tabla 2.

Tabla 2. Espesor de losa y grada

Elemento estructural	Espesor (cm)
Losa aligerada	25
Losa deck	10
Grada	15

El sistema estructural utilizado en la modelación fue de pórticos especiales sísmos resistentes en concreto armado con vigas peraltadas, cuyas secciones se pueden observar en la tabla 3.

Tabla 3. Secciones en concreto armado

Nivel	Elemento	Dimensión	
		b(cm)	h(cm)
N + 3.06	Viga central	35	55
N + 6.12		35	55
N + 9.18		30	30
N + 3.06	Viga borde	30	45
N + 6.12		30	45
N + 9.18		30	30
N + 3.06	Columna central	40	30
N + 6.12		40	30
N + 9.18		40	30
N + 3.06	Columna borde	30	30
N + 6.12		30	30
N + 9.18		30	30

La configuración en estructura metálica fue diseñada en base de la premisa de pórticos especiales a momento (SMF/PEM) obteniendo las dimensiones de la tabla 4, tal como establece la norma correspondiente al capítulo de acero estructural NEC-SE-AC [10].

Tabla 4. Secciones en estructura metálica

Elemento	Perfil AISC (lb/ft)	Perfil AISC (kg/m)
Viga Principal	W12X35	W310X52
Viga Secundaria	W10X45	W250X67
Vigueta	W8X15	W200X22.5
Columna	W14X34	W360X51
Grada	W6X12	W150X18

2.2 Análisis de Cargas

El análisis de cargas considera el peso propio de la estructura, sobrecarga y la carga viva, este último valor fue extraído de la NEC-SE-CG Cargas (No sísmicas) [11], en donde los datos varían de acuerdo con el uso de la edificación. La carga viva de diseño aplicada en las modelaciones tiene un valor de 200 kg/cm².

Se realizó un análisis detallado de sobrecarga (mampostería, acabados, enlucido, estucado entre otros) para cada nivel obteniéndose valores que fluctúan entre 250 a 370 kg/m².

Como carga variable se consideró un valor de 100 kg/m² para granizo, pues Quito, al estar ubicado a más de 1500 m.s.n.m está expuesto a estas consideraciones y otras de acuerdo en lo estipulado de la normativa NEC-SE-CG en el capítulo de cargas variables sección 3.2.5 [10]. En la tabla 5 se expone las cargas aplicadas en la modelación.

Tabla 5. Cargas consideradas en el diseño

Variable	Valor (kg/m ²)	Descripción
L	200	Carga viva
PP	370	Sobrecarga
S	100	Granizo

Para balcones y tapa grada se asignará un valor de 180 y 140 kg/m² de sobrecarga, respectivamente.

Se debe considerar que el Ecuador está ubicado en una zona geográfica de alta peligrosidad sísmica, por tal motivo la Normativa Ecuatoriana de la Construcción establece de carácter obligatorio lo siguiente: los calculistas y diseñadores cumplirán con los requisitos mínimos en el diseño sismorresistente de estructuras de edificaciones que están sujetas a los efectos de terremotos, que podrían presentarse en algún momento de su vida útil según la NEC-SE-DS[12].

2.2.1 Cortante basal de diseño

El corte basal de diseño V se lo ha determinado de acuerdo con el capítulo 6.3.2. de la NEC-SE-DS (parte2), con la siguiente expresión:

$$V = \frac{I S_a(T_a)}{R \phi_P \phi_E} W \quad (1)$$

Donde:

V: Cortante basal total de diseño.

I: Coeficiente de importancia.

S_a (T_a): Espectro de diseño en aceleración.

R: Factor de reducción de resistencia sísmica.

φ_P, φ_E: Coeficientes de configuración en planta y elevación.

W: Carga sísmica reactiva.

T_a: Periodo de vibración.

En el análisis sismo estático equivalente en dirección X-X e Y-Y, se utilizó un coeficiente de corte basal (V) de 0,184 W, valor calculado a partir de la ecuación 1 tanto para estructuras metálicas y concreto armado.

Para la creación de la gráfica del espectro de diseño utilizado en los modelos estructurales, se fundamentó de acuerdo con la sección 3.3.1. NEC-SE-DS (parte 1), como se puede apreciar en la tabla 6.

Tabla 6. Espectro elástico de diseño en aceleraciones

Parámetro	Valor	Unidad
I	1,00	s.u.
R	8,00	s.u.
Z	0,40	s.u.
n	2,48	s.u.
Ct	0,055	s.u.
hn	9,18	m
α	0,90	s.u.
Tipo suelo	D	
Fa	1,20	s.u.
Fd	1,19	s.u.
Fs	1,28	s.u.
r	1,00	s.u.
\emptyset_p	0,90	s.u.
\emptyset_e	0,90	s.u.
g	9,81	m/s ²
Tm1	0,40	s
Tm2	0,53	s
To	0,127	s
Tc	0,698	s
TL	2,856	s
Sa	0,480	g
Sa _o	1,190	g
f	0,13	s.u.

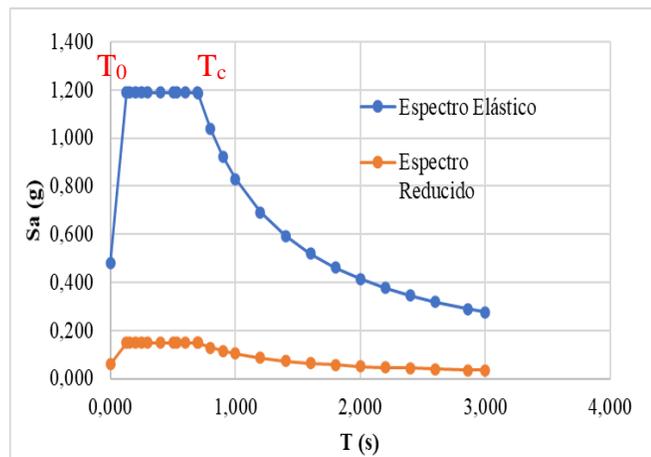


Figura 2. Espectro de diseño basado en aceleraciones [12].

El análisis estructural se basa en las combinaciones de carga para el diseño por última resistencia del capítulo de cargas no sísmicas de la normativa. La resistencia de diseño de la estructura debe ser igual o mayor que los efectos resultantes

de las combinaciones de cargas listadas a continuación. [10]

$$U1 = 1,4 D \quad (2)$$

$$U2 = 1,2 D + 1,6 L + 0,5 \max [Lr; S; R] \quad (3)$$

$$U3 = 1,2 D + 1,6 \max [Lr; S; R] + \max. [L; 0,5 W] \quad (4)$$

$$U5x (+) = 1,2 D + 1,0 E + L + 0,2 S \quad (5)$$

$$U5x (-) = 1,2 D - 1,0 E + L + 0,2 S \quad (6)$$

$$U5y (+) = 1,2 D + 1,0 E_y + L + 0,2 S \quad (7)$$

$$U5y (-) = 1,2 D - 1,0 E_y + L + 0,2 S \quad (8)$$

$$U7x (+) = 0,9 D + 1,0 E \quad (9)$$

$$U7x (-) = 0,9 D - 1,0 E \quad (10)$$

$$U7y (+) = 0,9 D + 1,0 E_y \quad (11)$$

$$U7y (-) = 0,9 D - 1,0 E_y \quad (12)$$

Donde:

D: carga permanente

E: carga de sismo

L: sobrecarga (carga viva)

S: carga de granizo

Lr: sobrecarga de cubierta (carga viva)

W: carga del viento

2.3 Normativa de diseño estructural

La NEC-SE-DS regula la seguridad estructural de las edificaciones en Ecuador principalmente en edificaciones de concreto armado y estructura metálica de manera detallada.

Las estructuras deben cumplir con los parámetros principales como: período de vibración, deriva máxima, porcentaje de participación de masa, cortante basal estipulados en la norma.

Estos criterios son esenciales para asegurar la resistencia sísmica y la estabilidad de las construcciones frente a posibles terremotos. Se tienen en cuenta otros factores como la resistencia de los materiales, la capacidad de carga y la correcta distribución de esfuerzos para garantizar la integridad estructural y la seguridad de los ocupantes de los edificios. Además, se toma de referencias normas extranjeras como el ACI 318-14, ASCE 7-16, ANSI/AISC 360-16, [3], [12], [9].

Siguiendo estos principios se realizó un diseño sismorresistente del proyecto tanto en estructura de concreto armado y estructura metálica, evaluando técnicamente los resultados de cada modelo y así determinar la opción óptima.

2.4 Metodología BIM aplicado al proyecto

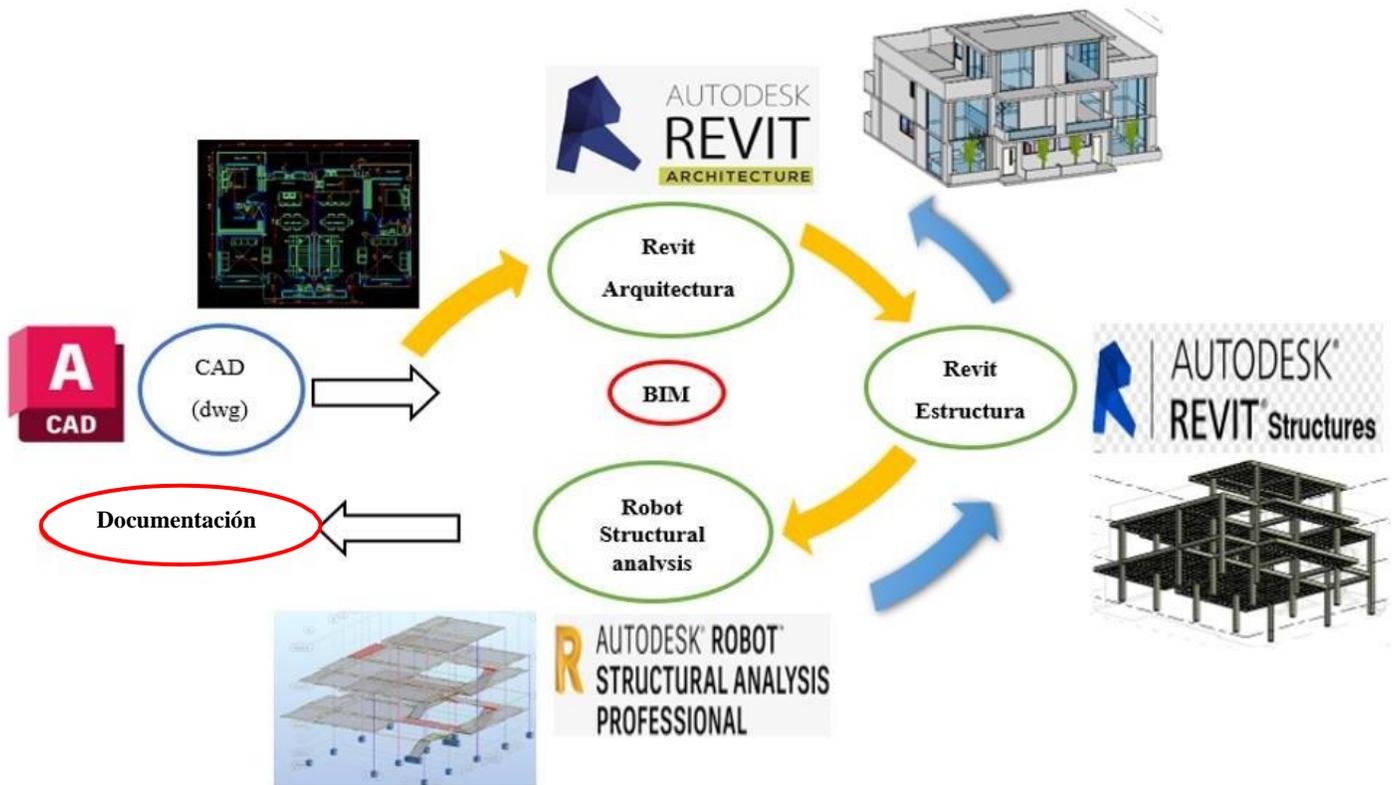


Figura 3. Metodología BIM de trabajo [16].

En este proceso se utilizó el flujo de trabajo de la metodología BIM para el diseño y análisis estructural del proyecto constructivo.

Dado que no existe una normativa o estandarización ecuatoriana específica para la implementación de herramientas BIM en el modelado y diseño estructural, se seguirán las recomendaciones y referencias de las normas ISO 19650 [14].

Se adoptó el flujo de trabajo mostrado en la Figura 3, que describe los pasos mínimos necesarios para ejecutar el flujo de trabajo BIM en el diseño y análisis estructural de una edificación. [15].

2.4.1. Importación archivo DWG a Revit

Del plano arquitectónico en archivo dwg del proyecto, se importó el diseño 2D al software de Revit arquitectura 2021 como se logra apreciar en

la figura 4, en donde se levantó el modelo arquitectónico en 3D. Además, se colocó las secciones de los elementos estructurales calculadas en el prediseño tanto para concreto armado y estructura metálica mostradas en las tablas 3 y 4.

Cabe mencionar que, al contar con el plano arquitectónico en CAD del proyecto constructivo, se realizó este paso adicional pre-modelación en Revit.

En el modelo 3D hasta ahora configurado la rama arquitectónica y estructural en Revit, se verificó e inspeccionó si existen interferencias entre sus elementos estructurales, en este caso no se presentó inconvenientes y se procedió a análisis de los modelos en el programa Robot Structural Analysis.

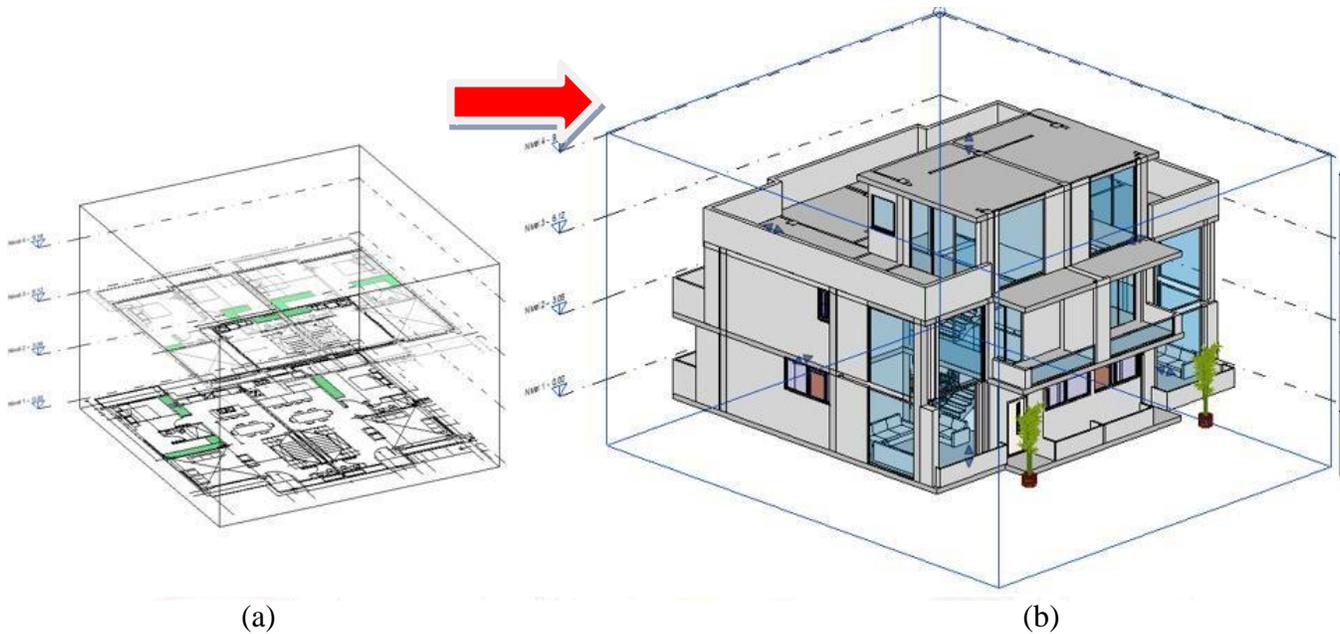


Figura 4. Plano arquitectónico en 2D formato dwg. a) Plano 2D, b) Plano arquitectónico en 3D formato rvt.

2.4.2. Vinculación Revit – Robot Structurals Analysis

Una vez configurado el modelo estructural en concreto armado y estructura metálica mostrados en la figura 5 y 6 se exportó de Revit a Robot para su respectivo análisis y diseño estructural.

La interoperabilidad entre los archivos de distintos paquetes computacionales como Revit y Robot, permiten compartir información y resultados de los modelos, pues son herramientas de trabajo del BIM [17].

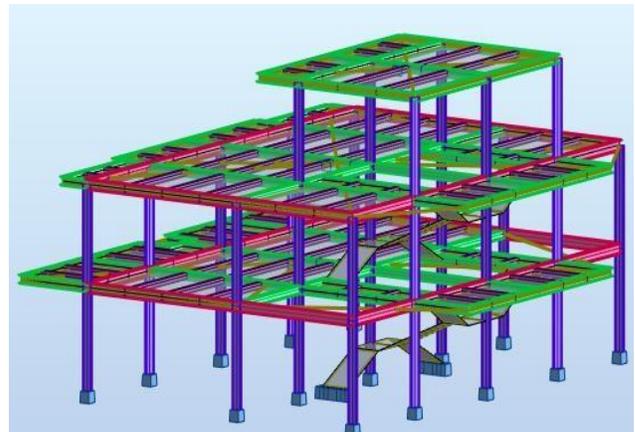


Figura 6. Modelo 3D en estructura metálica

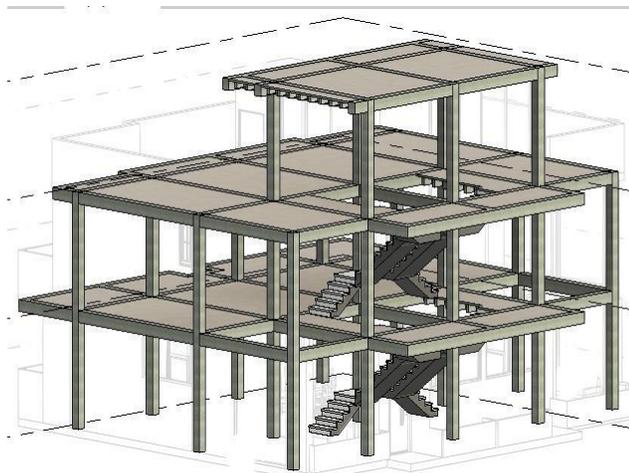


Figura 5. Modelo 3D en concreto armado

Antes de proceder con la exportación, se verificó si el modelo analítico generado por Revit es el adecuado, especialmente en la unión de los nodos entre sus elementos, de no ser así existe la probabilidad de posibles errores en los resultados en su análisis.

Los modelos de concreto armado y estructura metálica el modelo analítico generados en Revit, fueron las adecuadas, tal como se aprecia en la figura 8.

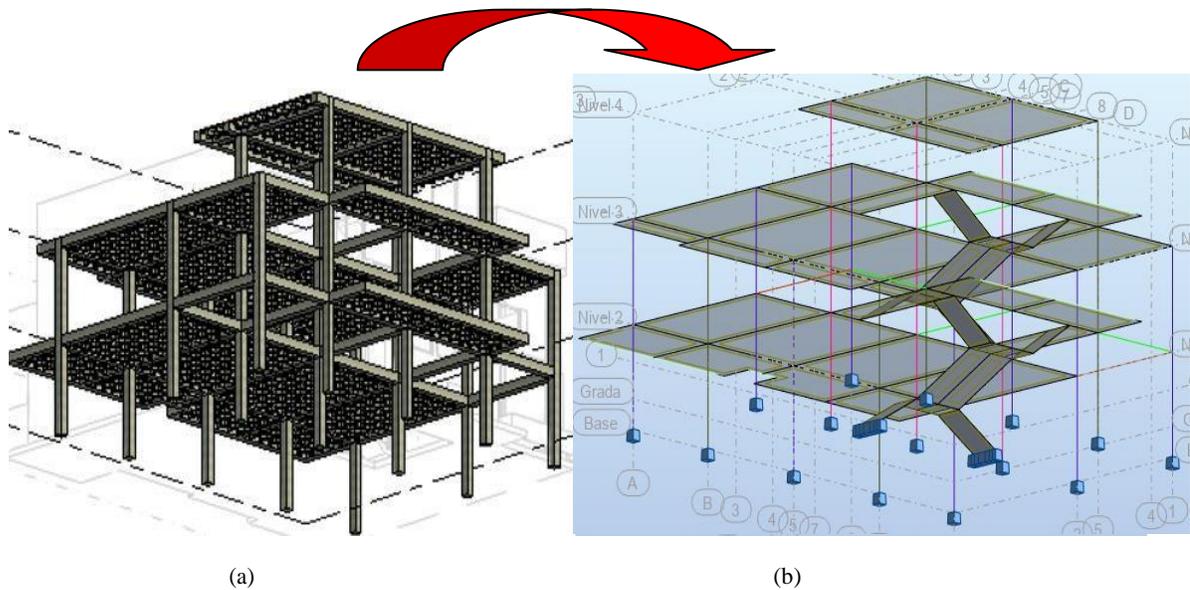


Figura 7. Vinculación modelos. a) Arquitectura en Revit b) Estructura en Robot

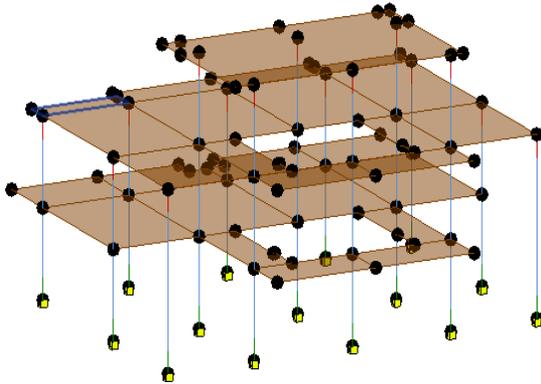


Figura 8. Modelo analítico proyecto [18]

2.5. Análisis Estructural

Al modelo en Robots, se insertó las cargas dediseño correspondiente, incluido el espectro de diseño para su respectivo análisis estático lineal, modal y espectral de los modelos tanto enconcreto armado y estructura metálica.

Se ha realizó varios modelos en estructura, en cada modelo se modificó la geometría, orientación de las secciones, espesor de losas a fin de encontrar una configuración estructural que sea la óptima desde el punto de vista técnico de un diseño sismorresistente entre las dos tipologías de estructuras de acuerdo NEC-SE-DS y NEC-SE-AC [12], [10].

3. Resultados y Discusión

Con el objetivo de analizar, verificar y determinar el mejor comportamiento estructural desde el punto de vista técnico entre las opciones estructurales mencionadas, se realizó un análisis comparativo entre los modelos propuestos. Con base a los datos obtenidos se eligió el diseño más adecuado que garantice la seguridad estructural e integridad de las personas que ocupen la edificación, cumpliendo con el diseño sismorresistente establecido en la NEC, aplicando la metodología de trabajo BIM.

3.1. Periodo de Vibración

Para la determinación del periodo de vibración aproximado de la estructura, la NEC-SE-DS [12] establece dos métodos. Método uno se calcula a partir de la ecuación (13) y método dos, el cual menciona que el valor de T_a calculado no debe ser mayor en un 30 % de valor de T_a calculado con el método 1, valores mostrados en la tabla 7.

$$T_a = C_t * h_n^\alpha \quad (13)$$

Donde:

T_a : periodo estimado de la estructura

Ct, α : coeficientes que depende del tipo de edificio.

hn: altura máxima de la edificación, medida desde la base.

El periodo de vibración aproximado de la estructura oscila entre 0,40 y 0,53 s de acuerdo a la ecuación 13. Con referencia al parámetro del periodo de vibración aproximado dispuesto en normativa, los modelos presentaron los siguientes valores de la tabla 7.

Tabla 7. Periodos de vibración de la estructura

MODO	Periodo (s)	UX	UY
Concreto Armado			
1	0,41	0,31	0,00
2	0,40	0,00	0,79
3	0,31	0,54	0,000
Estructura Metálica			
1	0,50	0,84	0,00
2	0,40	0,00	0,84
3	0,36	0,13	0,00

Al verificar los periodos fundamentales de vibración, el modo 1 y 2 de la estructura en concreto armado se ubicaban dentro del límite mínimo permisible de 0.40 segundos, teniendo un comportamiento más rígido.

Mientras que los modos en la estructura metálica llegaron hasta 0.50 s, este es un valor intermedio para un buen comportamiento flexible recomendable, pero sin sobrepasar el rango límite, por lo tanto, dispondrá de una mejor capacidad de disipación de energía en el rango elástico en consecuencia se garantiza que no esté en la zona de resonancia.

Los materiales influyen significativamente en el comportamiento modal de la estructura, el concreto al ser un material pesado y de gran volumen se conforman estructuras rígidas, mientras que los perfiles de acero en estructurales metálicas son altamente dúctiles, de gran resistencia, ocupan

menor volumen, traduciendo a menor cantidad de material, y creando estructuras flexibles.

3.2 Participación de masa

La NEC-15 en el capítulo diseño sismorresistente sección 6.6.2, establece que en el análisis dinámico estructural todos los modos que involucren la participación de una masa modal acumulada sea al menos el 90 % de la masa total de la estructura, en cada una de las direcciones horizontales principales consideradas.

El porcentaje de participación de masa que exige la NEC se cumplieron en los modelos de concreto armado y acero estructural, como se aprecia en los valores de la tabla 8.

Sin embargo, el desplazamiento de masa en la estructura de concreto armado, mostró un comportamiento de manera no traslacional, con un valor de 0.313 en UX lo que se interpreta que se comporta con moderada torsión, cualidad inaceptable en los primeros modos. En la estructura metálica se aprecia un mejor desplazamiento en sus tres modos fundamentales con un valor de 0.840 y 0.835 de distribución de masa.

Cabe recalcar que se debe evitar a toda costa un comportamiento torsional en los 2 primeros modos fundamentales, para ello se castigó en los coeficientes en el diseño espectral debido a la irregularidad en planta y elevación como se mostró en la tabla 6, con el fin de que la estructura planteada sea adecuada a condiciones sísmicas extremas.

3.3 Verificación del corte basal

De acuerdo con el capítulo 6.2.2. de la normativa de diseño sismorresistente, establece que el cortante dinámico total (VD) en la base no supere al 80 y 85 % de cortante basal (VE) calculado con el método estático, dependiendo de que una estructura sea regular o irregular [12].

Tabla 8. Porcentaje de participación de masas.

Modo	Frecuencia (Hz)	Período (s)	Ux	Uy	Uz	Masas Ux (%)	Masas Uy (%)	Masas Uz (%)
Concreto Armado								
1	2,46	0,41	31,00	0,00	0,00	31,00	0,00	0,00
2	2,49	0,40	31,00	79,44	0,00	0,00	79,44	0,00
3	3,22	0,31	85,01	79,44	0,00	54,01	0	0,00
4	4,34	0,23	85,01	92,76	0,03	0	13,31	0,03
5	4,43	0,23	92,45	92,76	0,03	7,44	0,00	0,00
6	5,37	0,19	92,74	92,76	0,03	0,29	0,00	0,00
7	5,74	0,17	95,08	92,76	0,03	2,34	0,00	0,00
8	7,8	0,13	95,08	98,34	0,03	0,00	5,58	0,00
9	9,06	0,11	95,08	98,56	0,11	0,00	0,22	0,08
Estructura Metálica								
1	2,02	0,50	83,97	0,06	0	83,97	0,06	0
2	2,50	0,40	84,03	83,64	0	0,06	83,57	0
3	2,75	0,36	85,31	83,64	0	1,27	0	0
4	5,11	0,2	92,91	83,64	0	7,6	0	0
5	5,49	0,18	92,91	93,7	0	0	10,06	0
6	6,17	0,16	92,91	93,71	0,31	0	0,01	0,31
7	7,25	0,14	95,43	93,71	0,32	2,52	0	0
8	7,6	0,13	95,43	93,77	0,88	0	0,06	0,57
9	7,86	0,13	98,39	93,77	0,88	2,96	0	0

Los resultados de los modelos estructurales del concreto armado y estructura metálica por el software Robot son presentados en la tabla 9.

Para el análisis estático se utilizó un coeficiente de corte basal igual a 0,184 W, tal como se calculó en base a la ecuación (1). Del modelo se extrae la información del peso de la estructura en concreto armado igual a 498,23 t, del cual 91,49 t corresponde al corte basal de diseño, mientras que la estructura metálica pesa 170,29 t y 31,27 t corresponde al corte basal de diseño.

Con estos valores se determinó que las dos tipologías de estructuras cumplieron este parámetro, justamente con la ecuación (14) que esta que establece la norma. El porcentaje de corte basal en ambas estructuras llega al 85 % con una mínima diferencia, determinando que las estructuras garantizan un buen comportamiento estructural ante eventos de fuerzas laterales causando por los sismos.

$$\text{Dinámico} \geq 85 \% * \text{Estático} \quad (14)$$

Tabla 9. Fuerza lateral de la estructura

Nivel (m)	VE (t)	VD (t)	VE (t)	VD (t)
Concreto Armado		Estructura Metálica		
Sentido X-X				
9,18	9,56	19,16	3,93	5,81
6,12	39,85	36,55	12,71	12,75
3,06	42,26	22,22	14,7	8,15
	91,67	77,93	31,33	26,71
Sentido Y-Y				
9,18	9,56	19,87	3,93	6,68
6,12	39,85	37,87	12,71	12,56
3,06	42,26	21,43	14,7	7,42
	91,67	79,17	31,33	26,67

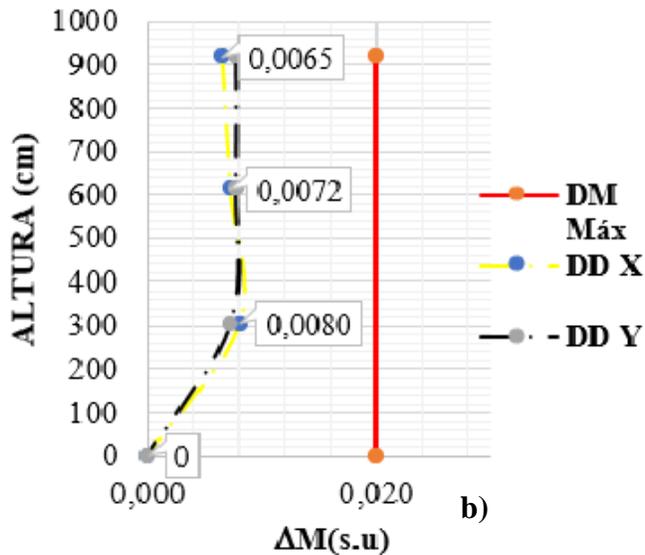
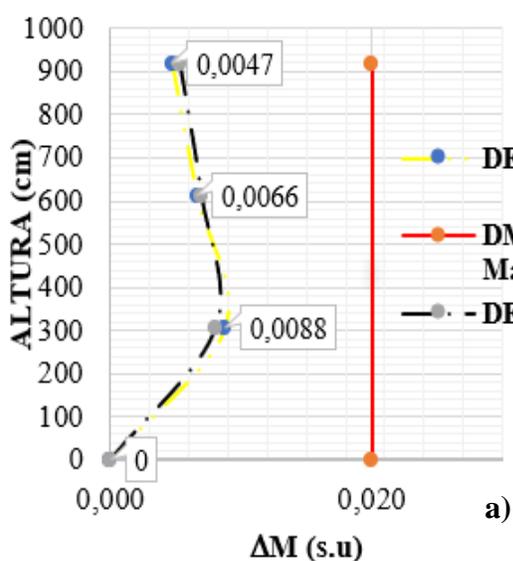
3.4 Deriva de piso

De acuerdo con la normativa capítulo 4.4.2 NEC-SE-DS [12], establece que las derivas inelásticas de piso no pueden exceder del 2 % al verificar con la ecuación 15 y 16.

Los modelos planteados en concreto armado y acero estructural de las derivas obtenidas son mostradas en la tabla 10, y de manera gráfica en la figura 9.

Tabla 10. Derivas de los modelos estructurales

CONCRETO ARMADO					ESTRUCTURA METÁLICA						
DERIVA ESTÁTICA											
Dirección X											
Nivel	H(m)	U (mm)	ΔE (s.u)	ΔM (s.u)	Δ máx. (s.u)	OK	U (mm)	ΔE (s.u)	ΔM (s.u)	ΔM máx. (s.u)	OK
9,18	3,06	9,67	0,00056	0,00337	0,2	OK	10,28	0,00079	0,00473	0,2	OK
6,12	3,06	7,95	0,00085	0,00508	0,2	OK	7,87	0,00110	0,00663	0,2	OK
3,06	3,06	5,36	0,00175	0,01051	0,2	OK	4,49	0,00147	0,00880	0,2	OK
Dirección Y											
9,18	3,06	10,84	0,00118	0,00710	0,2	OK	10,35	0,00088	0,00529	0,2	OK
6,12	3,06	7,22	0,00098	0,00588	0,2	OK	7,65	0,00116	0,00696	0,2	OK
3,06	3,06	4,22	0,00138	0,00827	0,2	OK	4,1	0,00134	0,00804	0,2	OK
DERIVA DINÁMICA											
Dirección X											
9,18	3,06	12,55	0,00105	0,00627	0,2	OK	11,1	0,00108	0,00649	0,2	OK
6,12	3,06	9,35	0,00117	0,00704	0,2	OK	7,79	0,00121	0,00724	0,2	OK
3,06	3,06	5,76	0,00188	0,01129	0,2	OK	4,1	0,00134	0,00804	0,2	OK
Dirección Y											
9,18	3,06	14,03	0,00220	0,01318	0,2	OK	11,56	0,00129	0,00773	0,2	OK
6,12	3,06	7,31	0,00115	0,00688	0,2	OK	7,62	0,00128	0,00771	0,2	OK
3,06	3,06	3,8	0,00124	0,00745	0,2	OK	3,69	0,00121	0,00724	0,2	OK



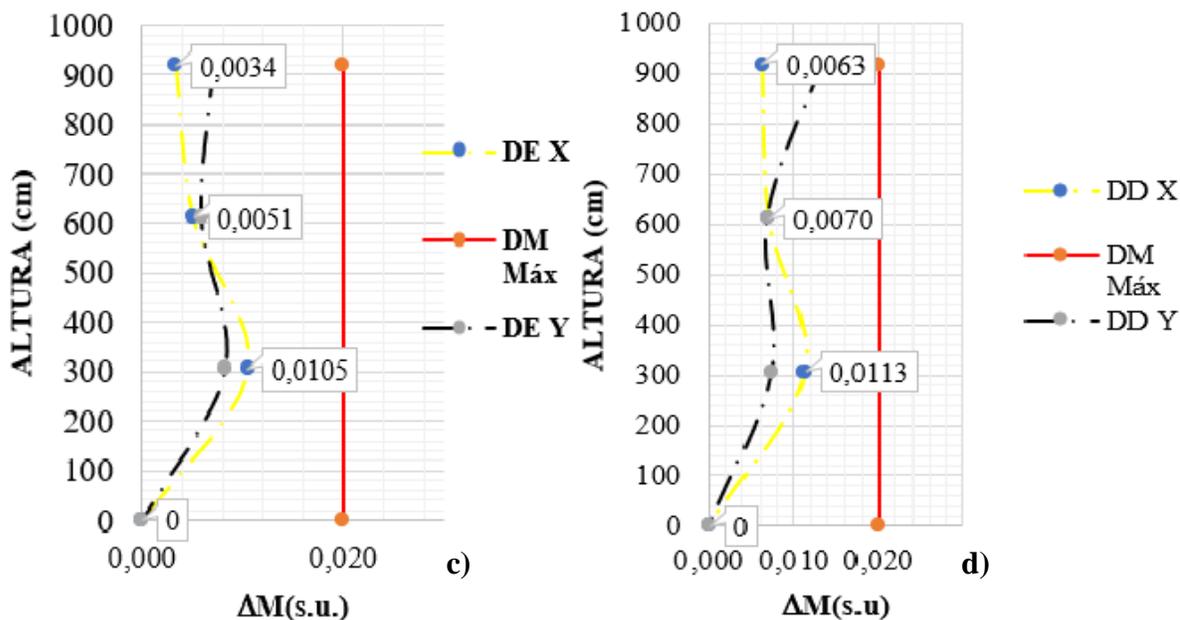


Figura 9. Deriva de piso. a), b) Deriva estática y dinámica concreto armado. c), d) Deriva estática y dinámica estructura metálica

Con esa premisa los modelos analizados cumplieron con las disposiciones, y se evidencia que las deformaciones ante fuerzas horizontales sean mínimas.

Las derivas de piso en la estructura metálica se ajustan de manera más óptima al estar entre el rango de 1 a 1,5 %, que son valores deseados, sobre todo se verifica que no existirá deformaciones excesivas evitando daños catastróficos durante un terremoto.

$$\Delta_M = 0.75 * R * \Delta_E \quad (15)$$

$$\Delta_M < \Delta_M \text{ máxima} \quad (16)$$

Donde:

Δ_M : deriva de piso máxima horizontal inelástico.

Δ_E : deriva elástica de piso.

R: factor de reducción de respuesta.

3.5. Relación peso-estructura

A pesar de que la densidad del acero con 7850 kg/m³ es mayor al del hormigón con 2400 kg/m³, las estructuras metálicas pesan mucho menos que en concreto armado, debido a que

permiten diseñar elementos estructurales más delgados y livianos por la alta resistencia del acero a tracción y compresión.

Con los datos extraídos de los modelos, se aprecia que el peso en estructura de concreto armado es superior al metálico de acuerdo con el gráfico 10. Por cada m² en concreto armado pesa 319,15 kg/m² y 67,08 kg/m² en peso de la estructura metálica, claramente este dato revela una diferencia significativa, construir en hormigón conlleva a requerir grandes cantidades de materiales en obra, si bien en estructura metálica es necesario menos material el costo de los mismo es elevado.

En estructuras de concreto armado generalmente se requieren mayores volúmenes de material para lograr la misma capacidad de carga que en las estructuras de acero.

Aunque esta investigación no realiza el análisis de costos, se conoce que el peso influye directamente en la economía del proyecto constructivo.

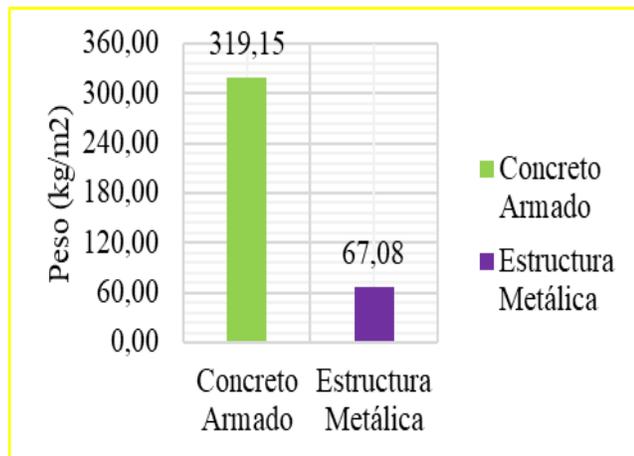


Figura 10. Peso de las estructuras

3.6 Conexión Viga columna

La NEC-SE-HM [19] sección 6.2 correspondiente a conexiones vigas-columnas establece que los requisitos deberán cumplir con las especificaciones del capítulo de Estructuras Sismo Resistentes del ACI 318-14 [8]. Esta normativa establece lo siguiente: el propósito de la ecuación 17 es reducir la posibilidad de fluencia de las columnas que forman parte del sistema de resistencia ante fuerzas sísmicas, garantizando columnas fuertes ante vigas débiles, de acuerdo con la filosofía de diseño de estructuras resistentes a sismos.

$$\Sigma M_{nc} / \Sigma M_{nb} \geq 1,2 \quad (17)$$

ΣM_{nc} : sumatoria de los momentos nominales de flexión de las columnas que llegan al nudo.

ΣM_{nb} : sumatoria de los momentos resistentes nominales a flexión de las vigas que llegan al nudo.

En estructuras metálicas sismos resistentes aplica el mismo criterio de columna fuerte-viga débil, consiste en generar rotulas plásticas en zonas específicas de vigas, es decir provocar fluencia por flexión en vigas antes que en las columnas durante un evento sísmico como lo establece el AISC 341-16 sección E3.4 [9] con la ecuación (18). De esta manera se garantiza la estabilidad y seguridad de

la estructura ante la falla temprana de columnas antes que las vigas [20].

$$\Sigma M_{pc} / \Sigma M_{pv} \geq 1.0 \quad (18)$$

ΣM_{pc} : sumatoria de los momentos plásticos nominales de las columnas que llegan a la junta, se incluye la reducción de la carga axial de la columna.

ΣM_{pv} : sumatoria de los momentos plásticos nominales de las vigas que llegan a la junta.

En la tabla 11 se muestra los respectivos momentos plastificantes en concreto armado y estructura metálica obtenidas una vez realizados sus respectivos cálculos.

Tabla 11. Momentos plastificantes de la estructura

Elemento	Σ Momento Plastificante (t*m)		Chequeo
	Concreto Armado	Estructura Metálica	
Columna	32,41	38,74	OK
Viga	26,66	32,14	OK

La estructura de concreto armado refleja un valor de 1,22, el cual cumple este parámetro de columna fuerte-viga débil con una cuantía del 1,5 % de refuerzo longitudinal en columna, se aprecia un excedente del 0,83 % de capacidad disipativa de energía sísmica requerida. Mientras que la estructura metálica cumple la condición con 1,21, observando un excedente del 21 %, siendo esta la estructura apropiada frente a cargas laterales requeridas.

Pese a que la conexión teórica viga-columna en estructura metálica cumple la condición deseada, un factor determinante es la calidad y control del tipo de conexión entre miembros estructurales que aplicará en obra. La conexión por atornillamiento o soldadura requiere de profesionales certificados para garantizar seguridad, estabilidad y durabilidad estructural.

3.7 Diseño sismorresistente de la estructura

Con el análisis de los modelos se ha determinado que tanto la estructura de concreto armado y estructura metálica tienen su pro y contra. El desempeño sísmico de la estructura metálica frente al concreto armado es mejor, los resultados de las derivadas muestran que se comporta como una estructura menos rígida, dentro del rango acorde con la NEC-15 de un diseño sismorresistente, capaz de disipar la energía, debido a la característica de su material de ductilidad: capaz de deformarse sin llegar a la rotura.

La estructura de concreto armado, al estar conformado por secciones considerables, agrega un peso significativo en la edificación, como se demuestra en la tabla 7, el periodo de vibración oscila entre 0.40 y 0.41 segundos estando en la zona límite a la caracterización de estructuras muy rígidas.

4. Conclusiones

Con los resultados obtenidos de los modelos y al verificar el análisis técnico comparativo entre las dos estructuras aplicando metodología BIM, se determinó que la estructura metálica con su configuración estructural de SMF/PEM es la que mejor se comporta frente a las solicitaciones de carga y eventos sísmicos. La estructura metálica al estar conformado por perfiles laminados en caliente posee la capacidad sísmica y rigidez adecuada para una buena disipación de la energía. También se observó que los desplazamientos de masa fueron de forma traslacional en sus modos fundamentales de vibración, llegando a la conclusión que la estructura garantiza la estabilidad, integridad y seguridad durante y después de un evento sísmico.

Por último, construir con acero estructural permitirá tener secciones no tan grandes como en la estructura de concreto armado, influyendo directamente en su peso y traduciendo en una variable a considerar términos de costo por el volumen de materiales a ocupar.

Mientras se realizó el presente artículo académico se facilitó y mejoró el proceso de trabajo gracias a la interoperabilidad que ofrece BIM entre los modelos vinculados de Revit y Robot. Se trabajó desde un mismo modelo virtual de forma colaborativa, permitiendo obtener resultados detallados e intercambiar informaciones para analizar, verificar y determinar la estructura adecuada para este proyecto constructivo. BIM mejoró la eficiencia y coordinación en el proyecto, resultando en una significativa reducción del tiempo empleado en el diseño del proyecto constructivo.

Referencias

- [1] A. Nilson, “Diseño de estructuras de concreto” Editora McGRAW-HILL, Santafé de Bogotá, Colombia, 2001, pp.1-5.
- [2] C. Quiroga, “El acero en la ingeniería civil, usos ventajas y limitaciones” Trabajo de grado, Universidad Cooperativa De Colombia, Villavicencio, Colombia. Nov. 2021.
- [3] Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, Ecuador, enero 2015, Actualización 2023.
- [4] IP21 Ingeniería, “BIM y sus ventajas que aportan”, Innovación aplicada a la ingeniería, España, 2019.
Disponible en:
<https://ip21ingenieria.com/blog/quienes-necesitan-bim-y-que-ventajas-les-aportan/>
- [5] Smart Building Spanish Chapter 2018, “Implantación y estandarización del BIM”, [online].
Disponible en:
<https://www.buildingsmart.es/bim/>

- [6] Instituto Ecuatoriano de Normalización 152:201, “Cemento Portland Requisitos”, Ministerio de Industrias y Productividad 2021.
- [7] Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 007, “Cementos, Cal y Yeso”, Ministerio de Industrias y Productividad 2006.
- [8] American Concrete Institute ACI 318-14, “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary”. Farmington Hills, MI, USA: ACI, 2014.
- [9] ANSI/AISC 341-16, “Seismic Provisions for Structural Steel Buildings”, Chicago, Illinois 60601: American Institute of Steel Construction, 2016.
- [10] Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-AC, “Estructuras de Acero”, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, Ecuador, enero 2015.
- [11] Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-, “Cargas No Sísmicas”, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015.
- [12] Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-CG, “Diseño Sismo Resistente”, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015.
- [13] American Society of Civil Engineers, "Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures," ASCE/SEI 7-16, Reston, VA: ASCE, 2016.
- [14] Building Information Modelling Iso 19650-1:218,” Concepts and Principles”, International Organization for Standardization, Reino Unido, 2011.
- [15] A. Añilema, “Modelado y cálculo estructural con herramientas BIM”, Trabajo de Integración Curricular, Escuela Politécnica Nacional, febrero 2024.
- [16] D. Quisiguiña, M. Buñay, “Aplicación De La Metodología BIM Para La Planificación De Proyectos De Construcción Desde La Etapa De Factibilidad Hasta La Presentación De Documentos Al Ente De Regulación Previo A La Construcción. Caso De Estudio: Edificio Lluma, Ubicado En La Ciudad De Riobamba”, Tesis de grado, Repositorio Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2021, pp. 20-25.
- [17] E. Villaroel, “Análisis y Diseño de Estructuras con AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS” Primera Edición, Santa Cruz, Bolivia 2016, pp. 310-329.
- [18] C. Pico, O, “INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA BIM. Barcelona”: Departament d’Expressió Gràfica Arquitectònica I., España 2008.
- [19] Norma Ecuatoriana de la construcción NEC-SE-HM, “Estructuras de Hormigón Armado”, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, Ecuador, enero 2025.
- [20] N. Padilla, “Análisis, diseño y aplicación para la conexión Viga-columna en elementos de hormigón Armado referidos a las recomendaciones del ACI 352 RS-02”, Proyecto de titulación, Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador, septiembre 2015.