



POSGRADOS

MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS SISMORRESISTENTES

RPC-SO-05-No.087-2024

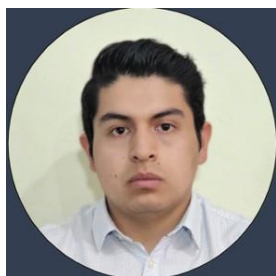
OPCIÓN DE TITULACIÓN:
PROYECTO DE TITULACIÓN CON
COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN
APLICADA Y/O DE DESARROLLO

TEMA:
OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO ESTRUCTURAL
DE UNA EDIFICACIÓN ALTA DE HORMIGÓN
ARMADO MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE
BIM, ANÁLISIS EN REVIT Y ROBOT
STRUCTURAL ANALYSIS

AUTORES:
PABLO ARMANDO CABRERA JARA
PABLO NELSON ULLAURI HERNÁNDEZ

DIRECTOR:
JAZMÍN CAROLINA ALMACHE HERNÁNDEZ

CUENCA – ECUADOR
2026

Autores:**Pablo Armando Cabrera Jara**

Ingeniero Civil.

Candidato a Magíster en Construcción de Estructuras Sismorresistentes por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

pcabreraj@est.ups.edu.ec

**Pablo Nelson Ullauri Hernández**

Ingeniero Civil.

Candidato a Magíster en Construcción de Estructuras Sismorresistentes por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

pullaurih@est.ups.edu.ec

Dirigido por:**Jazmín Carolina Almache Hernández**

Ingeniera Civil.

Magister en Ingeniería Civil.

jalmacheh@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2026 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

PABLO ARMANDO CABRERA JARA

PABLO NELSON ULLAURI HERNÁNDEZ

Optimización del diseño estructural de una edificación alta de hormigón armado mediante la integración de BIM, Análisis en REVIT y Robot Structural Analysis

DEDICATORIA:

Dedico este trabajo a mis hijos Elsa y Gabriel, que son el motor y el impulso que me guían a seguir adelante, esforzándome y superándome día a día para ser mejor persona en todos los ámbitos. De la misma manera, se lo dedico a mi mamá (+), ya que ella pudo sembrar en mi valores y pensamientos que han permitido tener esa fuerza que me permite preservar y vencer todos los desafíos que me he propuesto en la vida.

Pablo Nelson Ullauri Hernández

Dedico este trabajo a mis padres, quienes con su ayuda y esfuerzo constante me han alentado a cumplir cada una de mis metas; a mi familia, por su apoyo permanente, comprensión y motivación a lo largo de este proceso académico; y de manera especial a mis amigos, quienes fueron parte fundamental de este camino, brindándome apoyo, ánimo y confianza en los momentos más exigentes. Finalmente, dedico este trabajo a mi sobrinito, la mayor fuente de alegría de nuestra familia, para que crezca con la convicción de que los sueños se construyen con esfuerzo, fe y perseverancia, y que con la guía de Dios siempre es posible alcanzar las metas que se proponga.

Pablo Armando Cabrera Jara.

AGRADECIMIENTO

Yo, PABLO NELSON ULLAURI HERNÁNDEZ quiero agradecer infinitamente a mi esposa Paola, por el impulso que necesitaba para poder seguir con mi superación académica, por su constante apoyo durante este periodo de aprendizaje, su paciencia y sacrificio en las largas jornadas de clases, deberes y trabajos. Así mismo quiero dar un profundo agradecimiento a mi papá Gerardo, cuyo apoyo brindado desde siempre, me ha permitido permanecer y avanzar en este camino del estudio académico.

Yo, PABLO ARMANDO CABRERA JARA, expreso mi más sincero agradecimiento a mi madre, por su apoyo incondicional, paciencia y fortaleza, que han sido fundamentales a lo largo de mi formación académica y personal; a mi familia, por su comprensión, respaldo constante y motivación en cada etapa de este proceso, brindándome la confianza necesaria para continuar y superar cada desafío; y de manera especial a mis amigos, quienes con su compañía, palabras de aliento y apoyo sincero estuvieron presentes en los momentos más exigentes, contribuyendo de forma significativa a la culminación de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	11
Abstract	12
1. Introducción	13
1.1 Marco conceptual	13
1.1.1 Modelado en REVIT (Fase de diseño inicial).....	13
1.1.2 Optimización del diseño con DYNAMO (Fase de optimización automática)	13
1.1.3 Validación y comparación de resultados (Fase final de validación).....	14
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo general	14
1.2.2 Objetivos específicos	15
1.3 Justificación.....	15
1.4 Definición y alcance de las herramientas utilizadas	17
1.4.1 Alcance.....	17
2. Determinación del Problema.....	19
2.1 Antecedentes	19
2.1.1 Optimización estructural	19
2.1.2 Metodología y herramientas en la ingeniería estructural	21
3. Marco teórico referencial.....	26
3.1 Conceptos básicos de diseño sismo resistente.....	26
3.1.1 Diseño Sismorresistente	26
3.1.2 Metodología del análisis de diseño sismorresistente	31
3.1.3 Optimización estructural	44
4. Materiales y metodología.....	47
4.1 Formulación del problema de optimización estructural	47
4.2 Variables de diseño y restricciones estructurales	48
4.3 Alcance del proceso de optimización estructural.....	50
4.4 Criterio de uniformidad de secciones en columnas	51
4.5 Modelado en REVIT con la ayuda de DYNAMO.	52
4.6 Exportación de REVIT e importación a ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS	56
4.7 Definición de normativa, materialidad y cargas en ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS.....	59
4.8 Análisis Sismorresistente	63

4.8.1	Análisis Estático:	65
4.8.2	Análisis Dinámico:.....	67
4.8.3	Iteraciones para optimización de modos de vibración, relación cortante estático/ dinámico y derivas.....	73
5.	Resultados y discusión.....	79
5.1	Análisis de Resultados.....	80
5.1.1	Análisis combinado de período fundamental y masa estructural.....	80
5.1.2	Análisis global mediante gráfico radar multicriterio	82
5.1.3	Selección de la sección óptima.....	83
5.2	Diseño de elementos con ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS	84
5.2.1	Diseño de elementos de hormigón con acero de refuerzo de las vigas ..	90
5.2.2	Diseño de elementos de hormigón con acero de refuerzo de las Columnas	98
5.2.3	Verificación de diseño a flexión de las columnas viga fuerte columna débil	105
5.3	Modelado estructural de acero de Refuerzo en REVIT con DYNAMO	109
5.3.1	Zapatas, pedestales y vigas de amarre.....	109
5.3.2	Vigas, columnas y losas de diseño.....	111
5.3.3	Acero de refuerzo en los elementos estructurales	111
5.3.4	Detallado y laminado del proyecto con el programa REVIT.....	120
6.	Conclusiones.....	121
7.	Recomendaciones.....	123
	Referencias	124
	Anexos	127

LISTA DE IMÁGENES

Figura 1 Espectro de Diseño elástico	32
Figura 2 Mapa de peligrosidad sísmica del Ecuador	34
Figura 3 Programación Visual de DYNAMO.....	53
Figura 4 Entrada de datos para geometría del edificio	54
Figura 5 Ejes obtenidos de manera instantánea con DYNAMO de REVIT	55
Figura 6 Niveles obtenidos de manera instantánea con DYNAMO de REVIT	55
Figura 7 Estructura obtenida de manera instantánea con DYNAMO de REVIT.....	56
Figura 8 Realización de modelo físico a analítico	57
Figura 9 Modelo analítico de REVIT.....	57
Figura 10 Integración con ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS.....	58
Figura 11 Modelo exportado a ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS.....	58
Figura 12 Definición de parámetros de materialidad de acero de refuerzo y hormigón	59
Figura 13 Definición de Losa Alivianada	60
Figura 14 Adición de Peso Propio de la estructura	61
Figura 15 Adición de Carga Muerta Adicional	61
Figura 16 Adición de Carga Viva Adicional	62
Figura 17 Definición de Casos de carga	62
Figura 18 Análisis Modal	64
Figura 19 Número de modos, 3 por piso.....	64
Figura 20 Obtención del periodo de vibración en ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS	65
Figura 21 Fórmulas para determinar el espectro de respuesta de acuerdo al periodo de vibración.	65
Figura 22 Definición de cargas para en análisis estático equivalente	67
Figura 23 Espectro de Diseño de acuerdo a la (NEC-SE-DS, 2015)	69
Figura 24 Definición del análisis espectral en ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS	70
Figura 25 Definición de espectro para el análisis dinámico	70
Figura 26 Ingreso de valores de Espectro calculado.....	71
Figura 27 Definición de excentricidades y dirección escalada por 9.81 (gravedad)	71
Figura 28 Tipos de análisis para la evaluación de la estructura.....	72
Figura 29 Conversión de cargas en ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS	73
Figura 30 Comparación de periodos de vibración	76
Figura 31 Comparación de masas estructurales	77
Figura 32 Comparación de Cortante Basal Estático y Dinámico.....	78
Figura 33 Comparación de Derivas Máximas Inelásticas	79
Figura 34 Análisis combinado de período fundamental y masa estructural	81
Figura 35 Análisis global mediante gráfico radar multicriterio	82
Figura 36 Combinaciones de cargas	85
Figura 37 Todas las combinaciones para analizar conforme a la (NEC-SE-CG, 2015). ...	86
Figura 38 Fuerza Axial en columnas Caso de carga 1.2D+1.6L.....	87
Figura 39 Momentos en vigas Caso de carga 1.2D+D+Sx	87
Figura 40 Cortante en vigas. Caso de carga 1.2D+L-Sy	88

Figura 41 <i>Análisis estático en Y</i>	88
Figura 42 <i>Análisis Dinámico en Y</i>	89
Figura 43 <i>Parámetros de cálculo de Diseño</i>	90
Figura 44 <i>Selección de elementos vigas y diseño de acero de refuerzo</i>	91
Figura 45 <i>Selección de casos de carga para diseño de elementos vigas</i>	92
Figura 46 <i>Armaduras típicas para vigas</i>	93
Figura 47 <i>Geometría de la viga con sus respectivos tramos</i>	93
Figura 48 <i>Parámetros de los estribos, diámetro, recubrimiento</i>	94
Figura 49 <i>Distribución de estribos</i>	94
Figura 50 <i>Distribución de barras longitudinales superior e inferior</i>	95
Figura 51 <i>Refuerzo adicional superior</i>	95
Figura 52 <i>Refuerzo adicional inferior</i>	96
Figura 53 <i>Traslapes cuando los pórticos son mayores a 12 metros</i>	96
Figura 54 <i>Vista 3D de detalle de acero de refuerzo de vigas</i>	97
Figura 55 <i>Resultados de los cálculos a las demandas solicitadas</i>	97
Figura 56 <i>Plano detallado para le armado de acero de la viga</i>	98
Figura 57 <i>Selección de elementos columnas y diseño de acero de refuerzo</i>	99
Figura 58 <i>Selección de casos de carga para diseño de elementos columnas</i>	100
Figura 59 <i>Armaduras típicas para columnas</i>	100
Figura 60 <i>Geometría de la columna con sus respectivas dimensiones</i>	101
Figura 61 <i>Acero longitudinal</i>	101
Figura 62 <i>Parámetros de los estribos, diámetro, material y distribución</i>	102
Figura 63 <i>Estribos adicionales de confinamiento</i>	102
Figura 64 <i>Conectores para enlazar el siguiente piso</i>	103
Figura 65 <i>Vista 3D de detalle de acero de refuerzo de columnas</i>	103
Figura 66 <i>Diagrama de iteraciones de la columna</i>	104
Figura 67 <i>Plano detallado para el armado de acero de la columna</i>	105
Figura 68 <i>Nodo 2-B Nivel +3.00, con detalle de acero de columna y viga</i>	106
Figura 69 <i>Diagrama de iteración de columna de sección de 75x75 con 20 varillas de Φ 20mm</i>	108
Figura 70 <i>DYNAMO Creación de Zapatas, Pedestales y Viga de amarre</i>	110
Figura 71 <i>DYNAMO Vigas Columnas Losas</i>	111
Figura 72 <i>DYNAMO Acero de Refuerzo de Zapatas</i>	112
Figura 73 <i>DYNAMO Acero de Refuerzo Longitudinal de Columnas</i>	113
Figura 74 <i>DYNAMO Acero de Refuerzo Longitudinal de Vigas</i>	114
Figura 75 <i>DYNAMO Acero de Transversal de Columnas</i>	115
Figura 76 <i>DYNAMO Acero de Transversal de Vigas</i>	116
Figura 77 <i>Armado de Refuerzo total con DYNAMO</i>	117
Figura 78 <i>Vista Lateral de armado de acero de Columna</i>	118
Figura 79 <i>Sección Transversal de armado de acero de Columna</i>	118
Figura 80 <i>Vista Lateral de armado de acero de Viga</i>	119
Figura 81 <i>Sección Transversal de Armado de Viga</i>	119
Figura 82 <i>Sección Transversal de Armado de Zapata</i>	119

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Diseño y Optimización</i>	21
Tabla 2 <i>Clasificación del Daños en estructuras de hormigón armado</i>	27
Tabla 3 <i>Los 10 peores eventos de acuerdo a daños materiales</i>	28
Tabla 4 <i>Los peores eventos de acuerdo a daños personales</i>	29
Tabla 5 <i>Definiciones del espectro de diseño elástico</i>	33
Tabla 6 <i>Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada</i>	35
Tabla 7 <i>Clasificación de los perfiles de Suelo</i>	35
Tabla 8 <i>Tipo de suelo y factores de sitio Fa</i>	38
Tabla 9 <i>Tipo de suelo y factores de sitio Fd</i>	38
Tabla 10 <i>Tipos de suelo y factores del comportamiento inelástico del Subsuelo Fs</i>	39
Tabla 11 <i>Valores de C_t y α de acuerdo al tipo de estructura.</i>	40
Tabla 12 <i>Coeficiente R para sistemas estructurales dúctiles</i>	41
Tabla 13 <i>Coeficiente R para sistemas estructurales de ductilidad limitada</i>	42
Tabla 14 <i>Valores de ΔM máximos, expresados como fracción de la altura de piso</i>	44
Tabla 15 <i>Datos iniciales de geometría del edificio de Hormigón Armado.</i>	53
Tabla 16 <i>Cargas Asumidas</i>	60
Tabla 17 <i>Periodo de Vibración del Edificio</i>	63
Tabla 18 <i>Espectro de Respuesta elástico en base al periodo obtenido de la estructura</i>	66
Tabla 19 <i>Determinación del coeficiente del cortante basal</i>	66
Tabla 20 <i>Parámetros para determinación de fuerzas sísmicas</i>	68
Tabla 21 <i>Valores del Espectro de Diseño</i>	68
Tabla 22 <i>Modelos Estructurales definidos para el análisis</i>	75
Tabla 23 <i>Combinaciones de cargas</i>	84
Tabla 24 <i>Datos de viga concurrentes al nodo</i>	107
Tabla 25 <i>Datos de viga concurrentes al nodo</i>	108
Tabla 26 <i>Datos de viga concurrentes al nodo</i>	109
Tabla 27 <i>Dimensiones de zapatas pedestales y viga de cimentación.</i>	110

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN ALTA DE HORMIGÓN ARMADO MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE BIM, ANÁLISIS EN REVIT Y ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS

Autores:

PABLO NELSON ULLAURI HERNÁNDEZ
PABLO ARMANDO CABRERA JARA

RESUMEN

El diseño estructural de edificaciones de gran altura constituye un reto importante en la ingeniería civil, debido a la necesidad de garantizar un adecuado desempeño estructural, optimizar el uso de materiales y cumplir con la normativa vigente. En este marco, la presente investigación tiene como objetivo optimizar el diseño estructural de una edificación alta de hormigón armado mediante la integración de la metodología Building Information Modeling (BIM), utilizando Autodesk Revit para el modelado, Dynamo para la automatización y Robot Structural Analysis para el análisis estructural.

La metodología desarrollada se basa en un proceso iterativo que inicia con el modelado tridimensional de la estructura en Revit, a partir de un predimensionamiento inicial de los elementos estructurales. Posteriormente, mediante scripts desarrollados en Dynamo, se automatizó la modificación de las secciones de columnas, manteniendo constantes otros elementos estructurales como vigas y losas. Cada alternativa generada fue evaluada mediante análisis estáticos y dinámicos en Robot Structural Analysis, de acuerdo con los criterios establecidos en la normativa de diseño sismorresistente.

Para la evaluación de las distintas configuraciones se analizaron parámetros como el periodo fundamental de vibración, la masa estructural, el cortante basal y las derivas máximas inelásticas. Los resultados obtenidos muestran que la integración de herramientas BIM con procesos de automatización permite mejorar la eficiencia del diseño, reducir los tiempos de modelado y optimizar el uso de materiales, facilitando además la toma de decisiones técnicas fundamentadas y aportando una metodología replicable para el diseño estructural conforme a la normativa vigente.

Palabras clave: Diseño estructural, Edificaciones de hormigón armado, Análisis sismorresistente, Optimización estructural, Modelado paramétrico.

ABSTRACT

The structural design of high-rise buildings represents a significant challenge in civil engineering, due to the need to ensure adequate structural performance, optimize material usage, and comply with current design codes. Within this framework, the objective of this research is to optimize the structural design of a reinforced concrete high-rise building through the integration of the Building Information Modeling (BIM) methodology, using Autodesk Revit for modeling, Dynamo for design automation, and Robot Structural Analysis for structural analysis.

The proposed methodology is based on an iterative process that begins with the three-dimensional modeling of the structure in Revit, starting from an initial pre-dimensioning of the structural elements. Subsequently, through scripts developed in Dynamo, the modification of column cross-sections was automated, while other structural elements such as beams and slabs were kept constant. Each generated alternative was evaluated through static and dynamic analyses performed in Robot Structural Analysis, in accordance with the criteria established in seismic design codes.

For the evaluation of the different structural configurations, parameters such as the fundamental vibration period, structural mass, base shear, and maximum inelastic interstory drifts were analyzed. The results show that the integration of BIM tools with automation processes improves design efficiency, reduces modeling time, and optimizes material usage. Furthermore, this approach facilitates well-founded technical decision-making and provides a replicable methodology for structural design in compliance with current regulations.

Keywords: Structural design, Reinforced concrete buildings, Building Information Modeling (BIM), Seismic analysis, Structural optimization

1. INTRODUCCIÓN

1.1 MARCO CONCEPTUAL

Para la optimización del diseño estructural de una edificación, se basa en la integración de herramientas avanzadas como REVIT, análisis estructural (ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS) y automatización mediante DYNAMO. Este proceso, permitirá optimizar el tiempo utilizado en el análisis, eficiencia en el diseño y obtención de resultados y planos, con el objetivo de encontrar la mejor configuración para el desempeño de la estructura, basándose en las normativas vigentes, eficiencia de materiales, menores costos, mayor seguridad y una buena sostenibilidad.

1.1.1 MODELADO EN REVIT (FASE DE DISEÑO INICIAL)

Consiste en el modelado de la estructura de la eficiencia en REVIT, o la importación del diseño arquitectónico, mediante el software REVIT que permite la creación de modelos 3D donde se detalla la edificación. En esta fase inicial, se realiza el modelado tridimensional con un pre dimensionamiento de los elementos estructurales (zapatas, columnas, vigas y losas) de la edificación planteada. Cabe recalcar que, con la tecnología BIM, el modelo quedara parametrizado para que luego de la integración con el análisis estructural, pueda ser modificado hasta optimizar su función estructural.

1.1.2 OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO CON DYNAMO (FASE DE OPTIMIZACIÓN AUTOMÁTICA)

El presente proyecto, integra el software DYNAMO, que es un complemento de REVIT, mediante el cual utiliza programación visual, que permite automatizar los procesos y se puede modificar las condiciones iniciales del diseño. A través de DYNAMO, se desarrollarán scripts personalizados necesarios para que se pueda modificar o cambiar los elementos estructurales (dimensiones de columnas, vigas y losas) de manera instantánea, para que puedan ser nuevamente analizados en ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS. Estos scripts

mediante programación podrán realizar cambios necesarios en la geometría y distribución de elementos estructurales, de tal manera que se verifique que pueda cumplir los parámetros de diseño sismorresistente establecidos, obteniendo diferentes configuraciones para encontrar el diseño óptimo en términos de dimensionamiento, uso de materiales y desempeño estructural, conforme la normativa establecida para el diseño sismorresistente de una estructura.

1.1.3 VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS (FASE FINAL DE VALIDACIÓN)

Luego de la optimización del diseño estructural, se realizará una validación final para asegurar que la estructura analizada cumpla con los requisitos de códigos y normativas vigentes. Se realizará una comparativa entre varios modelos con distintas secciones de columnas, realizando varios análisis para optimizar la estructura, evaluando tanto el ahorro de materiales como en el mejor desempeño estructural. Se verificará la viabilidad constructiva de la estructura analizada, tomando en cuenta aspectos prácticos de ejecución y disponibilidad de materiales.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Optimizar el modelado y diseño estructural de una edificación alta en hormigón armado, utilizando la integración de Building Information Modeling (BIM) a través de REVIT y el análisis estructural realizado en ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, con el fin de mejorar la eficiencia de modelado, diseño, tiempo, reducción de costos y asegurar el cumplimiento de las normativas vigentes y de seguridad.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar la estructura de hormigón armado en REVIT, para crear un modelo en 3D preciso que permita la visualización, modificación y gestión de la información del proyecto de manera integral.
- Aplicar DYNAMO para optimizar y parametrizar el modelado estructural, utilizando scripts (secuencia de comandos) automatizados para ajustar los elementos estructurales (columnas) con vigas y losas constantes, relacionando la geometría del edificio, de tal manera que se pueda buscar soluciones eficientes que disminuyan el uso de materiales, sin comprometer la seguridad y el desempeño de la estructura e iterar distintas configuraciones basadas en los resultados obtenidos en el análisis de ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS.
- Realizar un análisis estructural extendido mediante ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, para comprobar la estabilidad, la resistencia y la rigidez de la estructura en diferentes estados de carga (tanto estáticos como dinámicos) entre cargas muertas, cargas vivas, cargas sísmicas, cargas de viento, etc.
- Realizar una comparación con el modelo estructural convencional y optimizado en relación a la eficiencia de las materias/recursos, a los costes y al comportamiento estructural, a fin de determinar las virtudes del uso de herramientas como REVI, ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS y DYNAMO para el diseño y la optimización estructural.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La justificación del diseño estructural, es un objetivo fundamental en la ingeniería civil, especialmente en un contexto donde la demanda de edificaciones óptimas, seguras y sostenibles es cada vez mayor. Los métodos tradicionales de diseño, que dependen de procesos manuales y de la coordinación separada entre distintas disciplinas, a menudo resultan en demoras errores de diseño y sobrecostos. Partiendo de ello, la implementación

de tecnologías avanzadas, como el Building Information Modeling (BIM), ha transformado significativamente la industria de la construcción, permitiendo la digitalización de los procesos de diseño, construcción y gestión de edificaciones. BIM favorece la construcción de modelos digitales pormenorizados respecto a la propia construcción, logrando aumentar la colaboración y disminuyendo la probabilidad de errores y pérdidas durante las etapas de diseño y construcción (C. Eastman et al., 2011).

Sin embargo, a pesar de los beneficios evidentes que sugieren la integración BIM y las herramientas de análisis estructural, su uso en la práctica profesional encuentra obstáculos, sobre todo, en la interoperabilidad entre plataformas y en la formación de los profesionales. La falta de experiencia de los usuarios en estos instrumentos y una resistencia al cambio de las metodologías de trabajo tradicionales limitan su utilización. Aun así, la investigación por (Alsehaimi et al., 2025) considera que la integración BIM con análisis estructuras no solo mejora la precisión y la coordinación de los equipos, si no que también permite simular distintos escenarios de diseño, aumentan el rendimiento estructural y disminuyendo el tiempo de toma de decisiones. El análisis estructural proporcionado por ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS permite hacer un análisis mucho más exhaustivo de las condiciones de carga, resistencia de los materiales así como la respuesta de las estructuras a diferentes tipos de esfuerzos. Este análisis también permitirá optimizar los recursos que se utilizan en el diseño estructural, con una reducción de costes y a la vez permitiendo la seguridad y estabilidad. Tal como explican (Song et al., 2021), esta capacidad de poder integrar el análisis estructural con un modelado mediante geometrías en 3D tal como lo proporciona REVIT permite a los ingenieros estructurales generar modelos mucho más precisos y optimizados y así ser capaces para elegir la mejor solución estructural posible en determinados criterios de desempeño coste-eficiencia y sostenibilidad. La sostenibilidad se presenta como otro de los aspectos clave del diseño actual de las estructuras y la implementación del BIM permite la simulación de múltiples situaciones y la valoración de las construcciones en un proceso de hacerlas más sostenibles. Tal y como se indica en (Bynum et al., 2013), , el BIM no solo permite optimizar el proceso de diseño, sino también valorar el impacto ambiental del edificio en su ciclo de vida, algo que a su vez ayuda a la concepción de soluciones más

eficientes y menos contaminantes. La integración de estas herramientas permite a los ingenieros estructurales no solo tomar decisiones más informadas, sino también aplicar estrategias de diseño más responsables medioambientalmente

En la actualidad, cuando la digitalización y la innovación tecnológica son dos variables clave del desarrollo de la industria de la construcción, el uso de herramientas como el REVIT o el ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS es una buena solución a los problemas del diseño estructural. Es decir, la optimización del diseño no solo mejora la eficiencia de los procesos, sino que sirve para garantizar la creación de edificaciones seguras y en un entorno más rico en sostenibilidad. Así, este trabajo se convierte en un avance significativo a la especificación y práctica de la ingeniería estructural, así como el recurso para el desarrollo y la implementación efectiva de estrategias BIM en los proyectos estructurales (C. Eastman et al., 2011; Song et al., 2021; Travaglini et al., 2014).

1.4 DEFINICIÓN Y ALCANCE DE LAS HERRAMIENTAS UTILIZADAS

1.4.1 ALCANCE

La presente investigación tiene como alcance a través de BIM con sus softwares REVIT y ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS; y, la interoperabilidad de DYNAMO, poder optimizar el modelado estructural de una edificación de tal manera que, al utilizarlos se pueda realizar varios análisis configurando la geometría de los elementos estructurales, de tal manera que cumpla con el análisis estructural y que se pueda lograr el objetivo de mejorar la eficiencia de modelado y asegurar y asegurar el cumplimiento de las normativas vigentes y de seguridad.

BIM (BUILDING INFORMATION MODELING)

Building Information Modeling BIM (Modelado de Información para la construcción), es un sistema (software) que tiene por objeto principal la gestión de la información (proyectos) en arquitectura, ingeniería y construcción; por lo tanto, crea una metodología de trabajo colaborativa y gestiona información digital de un proyecto durante todo su ciclo de vida. Es un trabajo colaborativo de los distintos actuantes como arquitecturas e ingenierías en la etapa de diseño, construcción y operación que busca la rapidez en la toma de decisiones, optimización de recursos y mejora continua en los tiempos del proyecto y su construcción.

BIM (Building Information Modeling) es una visualización que integra el diseño, la construcción y la administración de los proyectos (edificios) que se caracteriza por la constante disponibilidad de la información de manera consistente, exacta y confiable. BIM permite visualizar, simular y analizar el proyecto antes de su construcción en la etapa de diseño arquitectónico para poder unificar las ingenierías como: estructural, hidráulicas, sanitarias, eléctricas, aire acondicionado, etc. (Poó Rubio & Audeves Pérez, 2023).

REVIT

Revit es un software de diseño inteligente para el desarrollo de la metodología BIM (Building Information Modeling) en proyectos de arquitectura e ingeniería, que facilitan el diseño de los proyectos en 3D, el programa utiliza objetos inteligentes que se pueden utilizar a partir de una base de datos (familias paramétricas) o a su vez crear, editar o modificar a conveniencia del diseño, además de crear y coordinar automáticamente los cambios de vistas; el modelado se puede realizar entre equipos multidisciplinarios creando un modelo unificado y a detalle del proyecto que se pretende realizar.

DYNAMO

Dynamo es una herramienta de programación visual para la gestión de modelos BIM que sirve para automatizar tareas mediante programación visual como flujos de trabajo, automatizar tareas y generar geometría, se integra con el programa REVIT y también con otros programas de AUTODESK, que permiten al usuario crear algoritmos personalizados de

fácil codificación que permite que modelos en 3D complejos, procesamiento de datos y la manipulación de la información BIM sean más fáciles de usar.

ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS

Robot Structural Analysis es un software de diseño estructural, mediante el cual se verifica el cumplimiento de los códigos y normas utilizados para diseño y construcción de edificaciones sometidos a las distintas condiciones de cargas: permanentes, dinámicas y accidentales (muertas, vivas, sísmicas y de viento). Este software utiliza flujos de trabajo en BIM (Building Information Modeling) para intercambiar datos con REVIT y poder optimizar la estructura en base a los requerimientos estructurales mínimos requeridos por la estructura.

2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

El diseño estructural de edificaciones, en las últimas décadas, ha atravesado varias transformaciones significativas, gracias al desarrollo, inclusión y experimentación de nuevas tecnologías, que permiten mejorar la eficiencia y precisión de los diseños de los proyectos; BIM (Building Information Modeling) pionera en el mundo de modelado 3D, es una metodología que se ha consolidado como un enfoque integral para la creación y gestión de todos los aspectos del ciclo de vida de una construcción, desde la planificación y diseño hasta la construcción y operación. El uso de la metodología BIM ha revolucionado la construcción de proyectos gracias a la forma en que los equipos de trabajo de las distintas ramas facilitan su coordinación y optimizan los procesos de diseño y construcción (C. M. . Eastman, 2008).

Dentro del diseño estructural, la adopción de herramientas BIM como REVIT (software de modelado de información de construcción) y su integración con ROBOT STRUCTURAL

ANALYSIS (software de análisis estructural), ha permitido avanzar en la simulación y validación de modelos estructurales de manera más eficiente y precisa. Dentro de la metodología BIM, el software REVIT, proporciona un entorno paramétrico que permite la creación de modelos unificados 3D de alta precisión de las construcciones, mientras que el software ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS es un programa de análisis de elementos finitos que ofrece avanzadas capacidades para realizar cálculos estructurales, análisis de cargas y simulaciones bajo diferentes condiciones de carga (Hurtado & Minaya, 2014). Esta integración facilita una colaboración más fluida entre los arquitectos e ingenieros estructurales, permitiendo que los cambios en el modelo arquitectónico se reflejen automáticamente en los cálculos estructurales y viceversa, reduciendo el rediseño tanto estructural como arquitectónico del proyecto, así como disminuyendo errores y mejorando la calidad del proyecto.

El uso del software BIM con el diseño y modelación en REVIT y análisis estructural en ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, no solo mejora el diseño en tiempo y costo si no que incluye la toma de decisiones en las etapas iniciales del proyecto, mejorando y permitiendo a los ingenieros evaluar las diferentes alternativas de diseño a elegir la opción o alternativa más eficiente desde el punto de vista de diseño estructural, constructiva y económica. Según un estudio de (Kassem & Succar, 2017) la integración BIM con el análisis estructural permite una mayor optimización del diseño, ya que facilita la evaluación de diferentes variables, como la selección de materiales y el dimensionamiento de los elementos estructurales.

Mediante los avances de la tecnología BIM, muchos estudios señalan que la adopción de estas herramientas en el sector de la ingeniería estructural aun enfrenta grandes retos, especialmente en lo que respecta a la integración fluida entre plataformas como el caso de REVIT y ROBOT ANALYSIS STRUCTURAL y la capacitación de los profesionales en su uso efectivo (Bryde et al., 2013). No obstante, la gran tendencia hacia la digitalización en la ingeniería estructural es irreversible y se espera que el uso combinado del software BIM como herramienta de diseño y modelado de las construcciones como el análisis estructural

continúe incrementándose a gran escala, favoreciendo la optimización tanto en el modelo, diseño y construcción de todo tipo de estructuras.

El estudio se enfoca principalmente en explorar, analizar y optimizar modelos estructurales, mediante el diseño y modelado en REVIT y ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS con el objetivo de optimizar el proceso de diseño estructural, identificando las ventajas y desafíos que presenta esta metodología en la práctica profesional y evaluando su impacto en la optimización de recursos, tiempo y sobre todo calidad de proyectos de construcción.

2.1.2 METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS EN LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL

La metodología y las herramientas utilizadas en el modelado y análisis estructural consiste en el siguiente esquema:

Tabla 1

Diseño y Optimización

DISEÑO			
DISEÑO CONCEPTUAL	MODELADO ESTRUCTURAL	DISEÑO ESTRUCTURAL	MODELADO ESTRUCTURAL (Final)
REVIT ARQUITECTONICO Obtiene la distribución y geometría de los elementos estructurales, en ejes y niveles	REVIT ESTRUCTURAL Con la parametrización de DYNAMO se obtiene el modelo inicial	ROBOT ESTRUCTURAL ANALYSIS Analiza y verifica conforme a la normativa el cumplimiento de las misma	REVIT ESTRUCTURAL Obtiene el modelado definitivo para detallado y laminado
	DYNAMO		DYNAMO
BIM (Building Information Modeling)			

Fuente: Elaboración Propia

MODELADO EN REVIT

La metodología BIM (Building Information Modeling), es una estrategia que permite el trabajo colaborativo de múltiples disciplinas a través de la creación de simulaciones digitales de diseño, para ello la principal herramienta a desarrollar en este presente trabajo es el programa REVIT, software de modelado de información de construcción, el mismo que permite al usuario dibujar y diseñar con elementos de modelación y parametrización de los mismos y realizar al mismo tiempo dibujos de planta, alzados, vistas 3D, cortes, detallado, etc.

El programa REVIT, le permite al usuario adquirir elementos básicos para modelar diseños estructurales parametrizados, mediante el cual se creará un modelo estructural que permitirá tener una visión clara del proyecto a diseñarse (Estructurales et al., n.d.).

OPTIMIZACIÓN CON DYNAMO

DYNAMO para REVIT es el matrimonio perfecto entre Autodesk REVIT y Autodesk DYNAMO; dos de las herramientas claves dentro la industria de la arquitectura, ingeniería y construcción.

DYNAMO es una herramienta que se usa para automatizar tareas y procesos dentro del Software BIM, como es el caso de REVIT. Dynamo permite a los usuarios crear guiones visuales basados en nodos para poder manipular elementos dentro de un modelo REVIT. Esto hace posible la automatización de tareas repetitivas, como la generación de geometría paramétrica avanzada analítica basada en datos (Jose Manuel Palomino Ojeda, 2023)

DYNAMO permite a los profesionales crear flujos de trabajo profesionales que hacen posible aumentar la eficiencia en las tareas del proyecto de construcción. Con DYNAMO es posible automatizar la generación de familias REVIT, generar diseños generativos, realizar análisis de rendimiento estructural y utilizar cálculos complejos directamente dentro de REVIT. REVIT DYNAMO, presenta las siguientes características que le permiten a los profesionales de

arquitectura, ingeniería y construcción la personalización y automatización de sus flujos de trabajo:

- Programación visual: DYNAMO permite la escritura de scripts a partir de una interfaz para la creación de nodos, evitando la escritura del código.
- Integración: permite manipular elementos dentro del modelo BIM para automatizar tareas.
- Tareas automáticas: Los scripts generados en DYNAMO permiten la automatización de procesos repetitivos como la creación de informes personalizados y la gestión de familias.
- Diseño generativo: Los diseñadores pueden desarrollar algoritmos para generar soluciones de diseño que se basen en el rendimiento estructural o coste.
- Análisis avanzado: permite realizar análisis de rendimiento y simulaciones estructurales, análisis de coste etc.- Personalización de Familias: DYNAMO personaliza la creación/modificación de familias en REVIT adaptadas a los requerimientos del proyecto.
- Acceso a Bibliotecas: La herramienta permite acceder a bibliotecas y recursos comunes, acelerando el desarrollo de flujos de trabajo.
- Conexión con otros programas: Se puede integrar a otros productos como Autocad, REVIT STRUCTURAL ANALYSIS, etc. para automatizar tareas en diferentes aplicaciones.
- Colaboración: DYNAMO mejora la interoperatividad y colaboración entre diferentes disciplinas de un proyecto de arquitectura, ingeniería y construcción.

En conclusión, DYNAMO es una herramienta que ofrece versatilidad que mejora la personalización y la eficiencia de los proyectos BIM.

Se han organizado la interfase de usuario de DYNAMO en cinco áreas principales, el menú, las barras de herramientas, la biblioteca, el espacio de trabajo y la barra de ejecución. El menú nos permite gestionar la funcionalidad base de DYNAMO. Los primeros menús son

como en todos los softwares de WINDOWS están relacionados con la gestión de ficheros, operaciones de selección y edición de contenido. La barra de herramientas de DYNAMO contiene en sí gran parte de los iconos de acceso rápido para la gestión de ficheros. La biblioteca es una colección de scripts compuesta por nodos agrupada por categorías. El espacio de trabajo es donde se genera la programación visual de la geometría previa a la 3D. La barra de ejecución nos permite acceder a dos opciones de ejecución del script manual, donde se ejecuta cuando se hace clic en el botón "Ejecutar" o automático, donde el script se ejecuta/actualiza en tiempo real. En la parte izquierda estará el recuadro de a ventana de trabajo y en la derecha el ícono que permite exportar una instancia del espacio de trabajo. (Ojeda et al., 2023).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL EN ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS

Robot Structural Analysis, es un software de elementos finitos, que se utiliza para analizar y diseñar estructuras complejas, realizar cálculos de resistencia, simular el comportamiento bajo diversas cargas y condiciones. Permite modelar estructuras de diferentes materiales como acero, hormigón, madera y cualquier material que tenga comportamiento de soporte estructural, ofreciendo flujos de trabajo integrados con herramientas BIM como REVIT para un intercambio de datos eficiente (Vorwerk & Bd+c, n.d.).

Capacidades generales de ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS

- Modelado estructural para elementos lineales, planos, losas y sólidos.
- Condiciones de carga y contorno completas, incluyendo cargas nodales, lineales y superficiales normales, así como cargas avanzadas (aceleración, cargas variables de tiempo, desplazamientos, temperatura, etc.).
- Capacidades avanzadas de acero malla para elementos de losas.
- Amplia gama de tipos de análisis, incluyendo el análisis estático, no lineal, no lineal/p-delta, modal, cargas móviles, tiempo-historia, pandeo y pushover.
- Implementación completa del método de análisis directo AISC.

- Mas de 70 códigos de países diferentes para el diseño de materiales: 40 para acero y 30 para hormigón.
- Documentación para la presentación de los resultados de los cálculos.
- Interfaz de programación de aplicaciones (API) completa para crear soluciones personalizadas o funcionalidades avanzadas y diseños personalizados.

Limitaciones Generales

ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS es un programa de gran cantidad de capacidades, sin embargo, existen algunos elementos estructurales que no son compatibles con el software:

- Diseño compuesto no compatible.
- Pretensado / postensado no compatible directamente.
- El diseño de resistencia y capacidad de servicio del acero es asincrónico.

(Marsh -Marsh & Llc, 2014).

3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE DISEÑO SISMO RESISTENTE

3.1.1 DISEÑO SISMORRESISTENTE

El diseño sismorresistente, consiste en garantizar que una estructura o edificación pueda resistir a las diferentes cargas (estáticas y dinámicas) como cargas muertas, vivas, sísmicas y de viento, garantizando que la estructura no colapse principalmente ante un evento sísmico, protegiendo la vida de las personas, reduciendo daños y asegurando que la edificación pueda seguir funcionando según su uso.

Para entender de mejor manera en que aspectos principales se basa el diseño sismorresistente, se parte de varios conceptos que determinan por qué y para que del diseño sismorresistente:

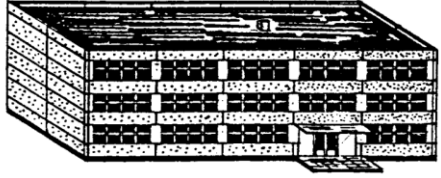
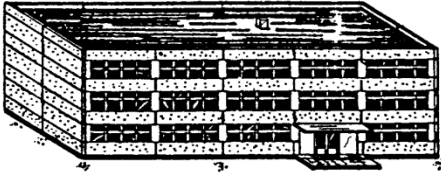


TERREMOTOS, IMPACTO SOCIAL Y ECONÓMICO


El conocimiento de los terremotos de acuerdo a su carácter, dinámica, probabilidad y magnitud son componentes básicos de los conocimientos necesarios para acometer con éxito los proyectos de estructuras sismorresistentes. El comportamiento global y a largo plazo de estos fenómenos, así como los movimientos sísmicos aportan para el estudio directo y en profundidad de la estructura terrestre, de modo que, en el campo de la ingeniería estructural, todos los movimientos son fuente de información, centrándose en los movimientos fuertes, en las sacudidas del terreno que son capaces de provocar daño y en la manera con la que inciden las construcciones (Jorge Conde-Conde, 2021).

El diseño sismorresistente, esta, por lo tanto, ligado al potencial de riesgo que supone la amenaza probable de los terremotos que pudieran producirse a lo largo de la vida útil de un proyecto.

Tabla 2

Clasificación del Daños en estructuras de hormigón armado

<p>Grado 1: Sin daños a daño leve (Sin daño estructural, daño no estructural leve)</p> <p>Grietas finas en el recubrimiento sobre los elementos de la estructura o en los muros en la base. Grietas finas en tabiques y rellenos.</p>	
<p>Grado 2: Daños moderados (Daño estructural leve, daño no estructural moderado)</p> <p>Grietas en columnas y vigas de pórticos y en muros estructurales. Grietas en tabiques y muros de rellenos, caída de revestimientos y acabados frágiles. Caída de mortero de las juntas de los paneles de pared.</p>	
<p>Grado 3: Daños sustanciales a severos (Daño estructural moderado, daño no estructural severo)</p> <p>Grietas en columnas y uniones entre columnas y vigas de la estructura en la base y en las uniones de muros acoplados. Desprendimiento del recubrimiento del hormigón, pandeo de varillas de refuerzo. Importantes grietas en tabiques y muros de particiones, fallo de tabiques individualizados.</p>	
<p>Grado 4: Daños muy graves (Daños estructurales graves, daño no estructural muy grave)</p> <p>Se identifican grietas de gran tamaño en los elementos estructurales, acompañadas del fallo por compresión del hormigón y la fractura de las armaduras. Se constata la pérdida de adherencia de las barras de refuerzo en las vigas, así como la inclinación de las columnas. Se ha producido el colapso de algunas columnas o de una sola planta superior.</p>	

<p>Grado 5: Destrucción (Daño estructural muy severo)</p> <p>Colapso de la planta baja o de partes del edificio por ejemplo alas.</p>	
--	--

Fuente: (Grünthal, 1998)

Los efectos de los sismos están ligados a la generación de daños a las personas y económicos por daños a las construcciones o infraestructuras. Cabe recalcar que los daños a las personas son solo parte directa de los terremotos y que adicionalmente, existen otros daños adicionales producidos por tsunamis, erupciones volcánicas, deslizamientos de terrenos, etc. (Jorge Conde-Conde, 2021).

El efecto combinado de los terremotos y la creciente exposición de la población mundial, de la vulnerabilidad pese a las mejoras significativas de emplear normativas sismorresistentes aplicadas a las construcciones hacen que la evolución de las pérdidas y daños no sea muy alentadora. Las pérdidas humanas, se localizan preferentemente en las regiones del mundo subdesarrolladas, mientras que las económicas se localizan en su mayor parte en el mundo desarrollado. (Jorge Conde-Conde, 2021).

Tabla 3

Los 10 peores eventos de acuerdo a daños materiales

Fecha	País	Evento	Mw	Muertes	Afectados	Daño (M\$)	Asegurados (M\$)
11/03/2011	Japón	2011 Tohoku Earthquake*	9	19846	368 820	\$210.000,00	\$37.500,00
17/01/1995	Japón	1995 Great Hanshin Earthquake	7,2	5297	541 636	\$100.000,00	\$3.000,00
12/05/2008	China	2008 Sichuan Earthquake	7,9	87476	45 976 596	\$85.000,00	\$300,00
27/02/2010	Chile	2010 Chile Earthquake*	8,8	562	2 671 556	\$30.000,00	\$8.000,00

17/01/1994	USA	1994 Northridge Earthquake	6,6	60	27 000	\$30.000,00	\$10.400,00
23/10/2004	Japón	2004 Chuetsu Earthquake	6,63	40	62 183	\$28.000,00	\$760,00
17/08/1999	Turkey	1999 Izmit Earthquake	7,4	17127	1 358 953	\$20.000,00	\$2.000,00
23/11/1980	Italy	1980 Irpinia Earthquake	7,2	4689	407 700	\$20.000,00	\$ -
16/04/2016	Japón	2016 Kumamoto-Oita Earthquakes	7,3	49	298 432	\$ 20.000,00	\$5.000,00
20/05/2012	Italia	2012 Emilia Earthquakes	6	7	11 050	\$15.800,00	\$128,00

Fuente: (Jorge Conde-Conde, 2021)

Tabla 4

Los peores eventos de acuerdo a daños personales

Fecha	País	Evento	Mw	Muertes	Afectados	Daño (M\$)	Asegurados (M\$)
27/07/1976	China	1976 Tangshan Earthquake	7,8	242 000	164 000	\$5.600,00	\$0,00
12/01/2010	Haití	2010 Haití Earthquake	7	222 570	3 700 000	\$8.000,00	\$200,00
26/12/2004	Indonesia	2004 Indian Ocean Earthquake*	9,1	165 708	532 898	\$4.452,00	\$225,00
12/05/2008	China	2008 Sichuan Earthquake	7,9	87476	45 976 596	\$85.000,00	\$300,00
08/10/2005	Pakistán	2005 Kashmir Earthquake	7,6	73338	5 128 309	\$5.200,00	\$0,00
31/05/1970	Perú	1970 Ancash Earthquake	7,8	66794	3 216 240	\$530,00	\$0,00
20/06/1990	Irán	1990 Manjil-Rudbar Earthquake	7,3	40000	710 000	\$8.000,00	\$115,00
26/12/2004	Sri Lanka	2004 Indian Ocean Earthquake*	9,1	35399	1 019 306	\$1.317,00	\$0,00
26/12/2003	Irán	2003 Bam Earthquake	6,6	26796	267 628	\$500,00	\$0,00
16/09/1978	Irán	1978 Tabas Earthquake	7,8	25000	40000	\$50,00	\$0,00

Fuente: (Jorge Conde-Conde, 2021)

EL DISEÑO SISMORRESISTENTE: PASADO PRESENTE Y FUTURO

Los terremotos han existido desde la antigüedad con distinta frecuencia y magnitud, por lo tanto, las civilizaciones antiguas ya debieron adaptarse a ellos, algunas estrategias empleadas fueron la reducción de peso, construcciones flexibles (madera y bambú), uso de llaves metálicas, etc.

Los devastadores terremotos del primer cuarto de siglo XX, especialmente el de Kanto en Japón, de 1923, y de magnitud 7.9 Mw; y, el de San Francisco de 1906, de magnitud 7.8 Mw, tuvieron grandes repercusiones tanto en daños materiales como de víctimas. Es, en este primer cuarto del siglo XX que aparecen los primeros códigos, el japonés con un coeficiente de acción lateral de 0.1g, el de California de EEUU de 1913 con un coeficiente de 0.08g, el de Los Ángeles de 1943 con un coeficiente de 0.13g y seguido del código Nacional Japonés de 1950 que manejaba ya un código de 0.2g. Estos códigos se basaban en asegurar resistencia y rigidez suficiente para las fuerzas laterales derivadas de la aceleración inducida por los sismos.

A finales del siglo XX, inicia la normativa de la capacidad y ductilidad, desplazamiento y diseños plásticos. Aquí entra el debate académico y técnico, al obtener resultados en edificios de gran altura, permitiendo ver que la acción sísmica lateral, disminuye en edificios flexibles al aumentar el periodo fundamental de vibración, lo que se vio influenciado en el ahorro de la necesaria resistencia y desplazamientos laterales apreciables.

Aquí se vio manifiesto la dificultad de conjugar los aspectos de resistencia y rigidez. Aquí inicia el dominio plástico, disminuyendo las características de los edificios de estructuras no excesivamente rígidas o más flexibles en sus fases de comportamiento plástico. Dando como resultado un enfoque en caracterizar la capacidad de disipar energía mediante la flexibilidad y la rigidez. Aquí nace el término de asegurar un fallo dúctil, e impone el modelo de viga débil columna fuerte.

Suscitados los eventos sísmicos de Northridge de 1994, de 6.7 Mw, y de Kobe de 1995, de 6.9 Mw, se vieron influenciado en fallos de nodos de las estructuras, todos los diseños de acuerdo a la normativa vigente se vieron afectados, que se vio reflejado directamente en daños materiales y aquí nacen los mecanismo de disipación de energía o aisladores de base, que ayudan a que los desplazamientos se vean reducidos significativamente y que las estructuras no sufran daños graves (Jorge Conde-Conde, 2021).

3.1.2 METODOLOGÍA DEL ANALISIS DE DISEÑO SISMORRESISTENTE

METODO BASADO EN FUERZAS

CONSIDERACIONES GENERALES

El análisis estático lineal se determina mediante el método basado en fuerzas (MBF), para el diseño sismorresistente de todo tipo de estructuras. La metodología se basa en que las estructuras deben diseñarse para resistir fuerzas sísmicas y poder determinar los efectos relacionados. Esta metodología presenta varias deficiencias, como factores de reducción sísmica R , siendo constantes para cada tipología de estructuras, esto implica que, la demanda de ductilidad y la sobre resistencia sean iguales para todos los edificios de una misma categoría, asumiendo que R no cambiará ante la variación de la altura, periodo, tipo de suelo o sistema de aportamiento de la estructura. El método basado en fuerzas es uno de los métodos de mayor uso en el Ecuador y el mundo (NEC-SE-DS, 2015); (Suárez, 2009).

Para proceder con el cálculo del método basado en fuerzas (MBF), se debe realizar lo siguiente:

- Determinar el espectro de diseño $S_a(T)$ de acuerdo al lugar de emplazamiento de la estructura y sus características geotécnicas.
- Realizar el cálculo del periodo fundamental de vibración (T_a) de la estructura.
- Determinar el cortante basal (V).
- Determinar la distribución del cortante basal de la estructura.
- Verificar las derivas de la estructura para que no sobrepasen el límite permisible.

ESPECTRO DE DISEÑO ELÁSTICO.

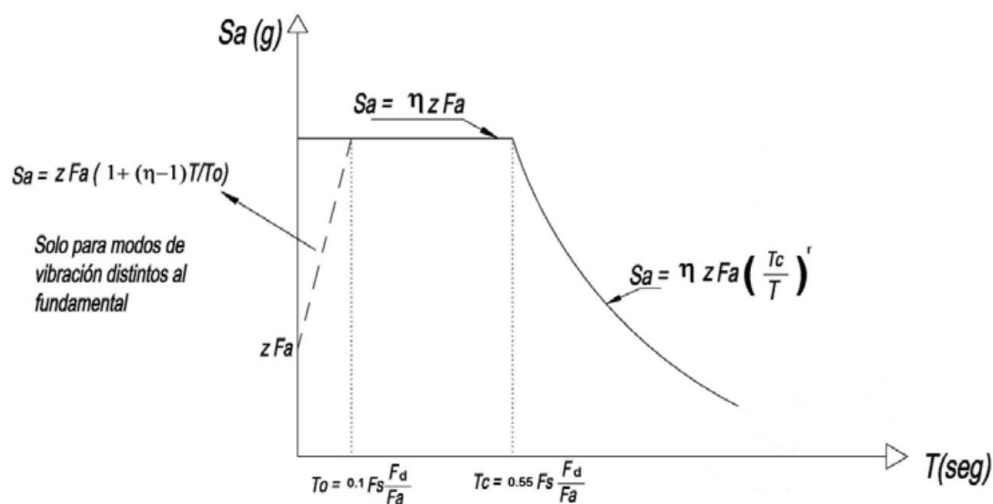
El espectro elástico de diseño, esta representa la máxima aceleración que una estructura tendría si se comporta elásticamente, sin considerar la disipación de la energía no lineal, el espectro se basa en la configuración de ciertos parámetros para el diseño satisfaga ciertos requisitos para nuevas estructuras o evaluación de la seguridad sísmica de estructuras existentes, con el único objetivo de que pueda resistir sismos de gran magnitud a futuro (CHOPRA, 2014). De esta manera, a continuación, se indica como se calcula el espectro de diseño, conforme a los códigos y normas establecidas, según la (NEC-SE-DS, 2015), el mismo que es expresado como una fracción de la aceleración de la gravedad en el eje de las ordenadas y el periodo de vibración en el eje de las abscisas.

Para poder determinar el espectro de diseño, consiste en los siguientes datos:

- El factor de Zona Sísmica.
- El tipo de suelo del sitio de emplazamiento de la estructura.
- La consideración de los valores de los coeficientes de ampliación del suelo F_a , F_d , F_s .

Figura 1

Espectro de Diseño elástico



Fuente: (NEC-SE-DS, 2015).

Tabla 5

Definiciones del espectro de diseño elástico

Donde:	
η	Razón entre la aceleración espectral S_a ($T= 0.1s$) y el PGA para el periodo de retorno seleccionado
F_a	Factor de amplificación del suelo para periodos cortos: este factor ajusta el espectro de respuesta elástico en aceleraciones, considerando las características del lugar para el diseño.
F_d	Factor de amplificación del suelo: incrementa el espectro de respuesta elástico en desplazamientos al diseñar en roca, según las propiedades del sitio.
F_s	Factor de amplificación del suelo con comportamiento no lineal: este factor examina cómo responden los suelos de manera no lineal, la modificación del periodo del sitio por el sismo, y los movimientos relativos del terreno. Se aplica a los espectros de aceleraciones y desplazamientos.
S_a	Espectro elástico de respuesta en aceleraciones: muestra la aceleración como fracción de la gravedad (g), basada en el periodo o modo de vibración de la estructura.
T	Periodo fundamental de vibración de la estructura: es el tiempo típico del principal modo de vibración de la estructura.
T_o	Periodo límite del espectro sísmico elástico de aceleraciones: establece el límite de vibración del sismo de diseño en el espectro elástico.

T_c	Periodo límite del espectro sísmico elástico de aceleraciones: establece el límite de vibración del sismo de diseño en el espectro elástico.
Z	Aceleración máxima esperada en roca: es la aceleración máxima esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la gravedad (g).

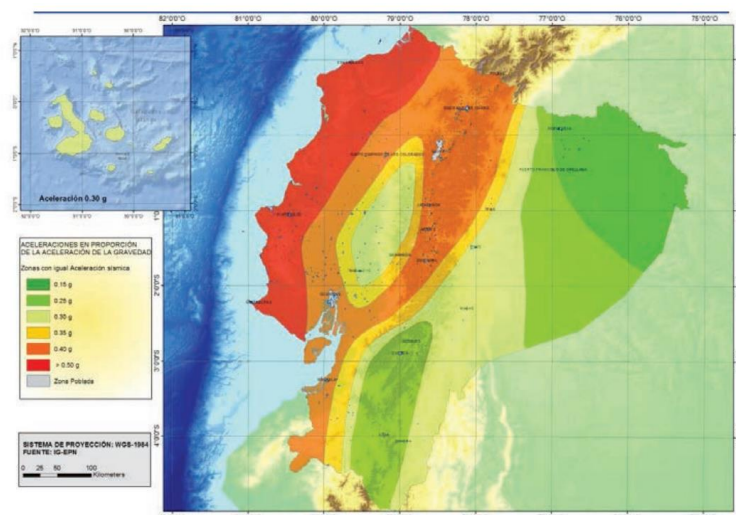
Fuente:(NEC-SE-DS, 2015)

a. Zonificación sísmica y factor de zona Z

Para los edificios de uso normal, se usa el valor de Z, que representa la aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad (NEC-SE-DS, 2015). Nuestro país, Ecuador, está catalogado como zona sísmica alta, con excepción del nororiente ecuatoriano que representa una amenaza sísmica intermedia y del litoral ecuatoriano que representa una amenaza sísmica muy alta y se divide en seis zonas sísmicas.

Figura 2

Mapa de peligrosidad sísmica del Ecuador



Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

El mapa de zonificación sísmica para diseño proviene del resultado de estudio de peligro sísmico para un 10% de excedencia en 50 años (periodo de retorno 475 años).

Tabla 6

Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada

ZONA SÍSMICA	I	II	III	IV	V	VI
VALOR FACTOR DE Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.50
CARACTERIZACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy Alta

Fuente:(NEC-SE-DS, 2015)

b. Tipos de suelos

Se definen seis tipos de suelos, los cuales tienen características geotécnicas de sitios específicos de sitios específicos, que tienen una gran influencia en la estructura, debido al comportamiento que tendrán durante los temblores:

Tabla 7

Clasificación de los perfiles de Suelo

SUELO	DESCRIPCIÓN	DEFINICIÓN
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500 \text{ m/s}$
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > V_s \geq 760 \text{ m/s}$

C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de corte, o	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50.0$ $S_u \geq 100 \text{ KPa}$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de corte, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ $100 \text{ KPa} > V_s \geq 50 \text{ KPa}$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de corte, o	$V_s < 80 \text{ m/s}$
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $S_u < 50 \text{ kPa}$
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases:	

F1: Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cimentados, etc.
F2: Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).
F3: Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con índice de Plasticidad IP > 75).
F4: Perfiles con gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 30 m).
F5: Los suelos que muestran variaciones en la impedancia α en los primeros 30 metros, como las transiciones entre materiales blandos y roca, se caracterizan por cambios bruscos en la velocidad de las ondas de corte.
F6: Rellenos colocados sin control ingenieril.

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015).

c. Coeficientes de perfil de suelo Fa, Fd, Fs

- **Fa: Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de periodo corto**

El coeficiente Fa, amplifica las ordenadas del espectro de respuesta elástico de aceleraciones para el diseño en roca, tomando en cuenta los efectos de sitio:

Tabla 8

Tipo de suelo y factores de sitio Fa

Tipo de perfil del subsuelo	Zona Sísmica y Factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.50
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E	1.8	1.4	1.25	1.1	1.0	0.85
F	Véase Tabla 5					

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015).

- **Fd: Coeficiente de desplazamiento para diseño en roca**

El coeficiente Fd, amplifica las ordenadas del espectro de respuesta elástico de desplazamientos para el diseño en roca, considerando los efectos del sitio:

Tabla 9

Tipo de suelo y factores de sitio Fd

Tipo de perfil del subsuelo	Zona Sísmica y Factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.50
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
D	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
E	2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5
F	Véase Tabla 5					

Fuente:(NEC-SE-DS, 2015).

- **F_s: Comportamiento no lineal de los suelos**

El coeficiente F_s, considera el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del periodo del sitio que depende de la intensidad y contenido de la frecuencia de la excitación sísmica y los desplazamientos relativos del suelo, para los espectros de aceleraciones y desplazamientos:

Tabla 10

Tipos de suelo y factores del comportamiento inelástico del Subsuelo F_s

Tipo de perfil del subsuelo	Zona Sísmica y Factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.50
A	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
D	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.40
E	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
F	Véase Tabla 5					

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015).

PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN

La estimación del periodo natural, de vibración de una estructura de hormigón armado es un procedimiento esencial en el diseño o evaluación sísmica, la misma depende de la altura, rígenes, y masa de la estructura (Julián et al., 2009). Se describen dos métodos para determinar el periodo de vibración aproximado de la estructura, según la (NEC-SE-DS, 2015), el valor obtenido será una estimación razonable que permitirá el cálculo de fuerzas sísmicas que serán aplicadas en la estructura, Los periodos se podrán calcular con la Ecuación 1 y Ecuación 2:

a. Método 1 (empírico)

$$T = C_t * h_n^\alpha$$

Ecuación 1

Donde:

C_t : Coeficiente que depende del tipo del edificio.

h_n : Altura máxima de la edificación de n pisos, medidos desde la base de la estructura en metros.

T : Periodo de vibración.

Tabla 11

Valores de C_t y α de acuerdo al tipo de estructura.

TIPO DE ESTRUCTURA	C_t	α
Estructuras de acero		
Sin arriostramiento	0.072	0.8
Con arriostramiento	0.073	0.75
Pórticos especiales de hormigón armado		
Sin muros estructurales ni diagonales rigidizadoras	0.055	0.9
Con muros estructurales o diagonales rigidizadoras y para otras estructuras basada en muros estructurales y mampostería estructural	0.055	0.75

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015).

b. Método 2 (analítico)

El método analítico, considera las propiedades estructurales y las características de deformación en los elementos resistentes, en un análisis apropiado y adecuadamente sustentado para la determinación del periodo de vibración. Este requisito puede ser cumplido mediante la siguiente expresión o también se lo puede determinar por medio de un análisis modal.

$$T_a = 2\pi * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i * \delta_i^2)}{g * \sum_{i=1}^n (f_i * \delta_i)}}$$

Ecuación 2

Donde:

f_i : Representa cualquier distribución aproximada de las fuerzas laterales en el piso i , de acuerdo con los principales descritos en el presente capítulo, o cualquiera distribución racional.

δ_i : Deflexión elástica del piso i , calculada utilizando las fuerzas laterales f_i .

w_i : Peso asignado al piso o nivel i de la estructura, siendo una fracción de la carga reactiva W (incluye la fracción de la carga viva correspondiente)
 $W(\text{peso}):w/\text{cargas}$.

El valor del periodo de vibración T_a , según el método 2 no debe ser mayor a un 30% calculado con el método 1.

FACTOR DE REDUCCIÓN SÍSMICA

El factor de reducción sísmica R , permite una reducción de fuerzas sísmicas, siempre y cuando las estructuras sismorresistentes y sus conexiones que se diseñen para desarrollar un mecanismo de falla previsible y con adecuada ductilidad, especialmente en las rótulas plásticas (NEC-SE-DS, 2015). EL factor R se utiliza para el cálculo del cortante basal.

Tabla 12

Coficiente R para sistemas estructurales dúctiles

SISTEMAS ESTRUCTURALES DUCTILES	
SISTEMAS DUALES	R
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas y con muros estructurales de hormigón armado o con diagonales rigidizadoras (sistemas duales).	8
Pórticos especiales sismo resistentes de acero laminado en caliente, sea con diagonales rigidizadoras (excéntricas o concéntricas) o con muros estructurales de hormigón armado.	8
Pórticos con columnas de hormigón armado y vigas de acero laminado en caliente con diagonales rigidizadores (excéntricas o concéntricas).	8

Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas banda, con muros estructurales de hormigón armado o con diagonales rigidizadores.	7
PÓRTICOS RESISTENTES A MOMENTOS	R
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas.	8
Pórticos especiales sismo resistentes, de acero laminado en caliente o con elementos armados de placas.	8
Pórticos con columnas de hormigón armado y vigas de acero laminado en caliente.	8
OTROS SISTEMAS ESTRUCTURALES PARA EDIFICACIONES	R
Sistemas de muros estructurales dúctiles de hormigón armado.	5
Pórticos especiales sismo resistentes de hormigón armado con vigas banda.	5

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015).

Tabla 13

Coefficiente R para sistemas estructurales de ductilidad limitada

SISTEMAS ESTRUCTURALES DE DUCTILIDAD LIMITADA	
PÓRTICOS RESISTENTES A MOMENTO	R
Hormigón Armado con secciones de dimensión menor a la especificada en la NEC-SE-HM, limitados a viviendas de hasta 2 pisos con luces de hasta 5 metros.	3
Hormigón Armado con secciones de dimensión menor a la especificada en la NEC-SE-HM con armadura electrosoldada de alta resistencia	2.5
Estructuras de acero conformado en frío, aluminio, madera, limitados a 2 pisos.	2.5
MUROS ESTRUCTURALES PORTANTES	R
Mampostería no reforzada, limitada a un piso.	1
Mampostería reforzada, limitada a 2 pisos.	3
Mampostería confinada, limitada a 2 pisos.	3
Muros de hormigón armado, limitados a 4 pisos.	3

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015).

CORTANTE BASAL

El cortante basal, es la fuerza total por cargas laterales aplicada en la base de la estructura, que se obtiene de la suma de todas las fuerzas horizontales del edificio, generadas por la

acción del sismo con o sin reducción de acuerdo a las especificaciones de la normativa, aplicadas a la estructura en una dirección específica (NEC-SE-DS, 2015).

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

Ecuación 3

Donde:

S_a : Espectro de diseño en aceleración.

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

I : Coeficiente de importancia.

I : Factor de reducción de resistencia sísmica.

V : Cortante basal total de diseño.

W : Carga sísmica reactiva.

T_a : Periodo de vibración.

DERIVAS

La deriva es el desplazamiento lateral relativo de un piso (causado por la acción de una fuerza horizontal), con relación al piso consecutivo, medido en dos puntos ubicados en la misma línea vertical de la estructura y dividido para la altura del entrepiso. Para el control de derivas, se debe realizar una revisión de deformaciones, a través del cálculo de derivas inelásticas máximas de piso, considerando las secciones agrietadas (NEC-SE-DS, 2015). El cálculo de las derivas está definido por la Ecuación 4 y tiene que cumplir lo establecido en la Tabla 12.

$$\Delta_m = 0.75 * R * \Delta_E$$

Ecuación 4

Donde:

Δ_m : Deriva máxima inelástica.

Δ_E : Desplazamiento obtenido en aplicación de las fuerzas laterales de diseño reducidas.

R : Factor de reducción de resistencia.

Tabla 14

Valores de ΔM máximos, expresados como fracción de la altura de piso

ESTRUCTURAS DE:	Δ_m máxima (sin unidad)
Hormigón armado, estructuras metálicas y de madera	0.02
De mampostería	0.01

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015).

3.1.3 OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

El uso responsable de recursos es de vital importancia en la mayoría de disciplinas técnicas, entre ellas la ingeniería estructural, con el objetivo de garantizar un desarrollo sostenible de la sociedad desde un punto de vista económico, social y medioambiental. La optimización estructural, busca crear estructuras eficientes y seguras mediante procesos de diseño, minimizando el uso de materiales y por ende el costo, cumpliendo con el objetivo de rendimiento y normativas de diseño. Para poder lograr la optimización estructural se puede lograr la mejora de los diseños mediante la ayuda de herramientas como programas computacionales, algoritmos de optimización, etc., los cuales se puede aproximar el valor de

los parámetros que definen el sistema estructural para conseguir llegar a los resultados objetivos. La linealidad de la función a optimizar dependerá del orden de los parámetros del sistema (Bravo, 2022).

Los objetivos principales de la optimización, consisten en minimizar el peso de la estructura, reduciendo las secciones de los elementos estructurales, por ende, la reducción del costo, sin disminuir la integridad estructural; maximizar el rendimiento de la estructura aumentando su capacidad resistencia a las diferentes acciones de carga externa y propias de la estructura, obteniendo el diseño de una estructura más eficiente.

La optimización estructural está compuesta por los siguientes factores:

- Variables de diseño: Son los parámetros que se pueden modificar para alcanzar el objetivo tales como la forma de la estructura, distribución, materialidad, dimensiones de secciones, etc.
- Restricciones: Son los parámetros que se deben cumplir como la normativa y los códigos de seguridad estructural vigentes.
- Algoritmos de optimización: Métodos matemáticos mediante la utilización de programas que facilitan modificar los parámetros de diseño tales como las variables y restricciones de tal manera que encuentre la mejor solución que optimizaría el modelo estructural.

La optimización estructural se clasifica de acuerdo a (Bravo, 2022):

- Optimización de la sección: Consiste en minimizar el material empleado, a partir de la configuración inicial mediante la localización del área seccional óptima para cada elemento estructural.
- Optimización de la geometría: consiste en modificar los elementos que componen la estructura inicial, optimizando la distribución de cargas y tensiones de la estructura de tal manera que optimice la resistencia de la estructura.

- Optimización tipológica: Consiste en encontrar la distribución de materiales de manera más eficiente dentro de un espacio de diseño definido, sometido a condiciones de carga y soporte.

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

El presente capítulo se procede a realizar los pasos y la esquematización para modelar, analizar y diseñar un edificio de gran altura, el mismo que, con la parametrización de DYNAMO en la operatividad con REVIT, se podrá obtener varios modelos en función de número de pisos, número de ejes y su respectiva separación en el sentido en el eje “X”, número de ejes y su respectiva separación en el sentido en el eje “Y” y asignación de elementos estructurales tanto para columnas, vigas y losas.

4.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

Con el fin de establecer de manera formal el problema de optimización abordado en la presente investigación, el proceso de diseño estructural puede expresarse mediante una formulación matemática en la que se busca minimizar la masa estructural total de la edificación, garantizando al mismo tiempo el cumplimiento de los criterios establecidos en la normativa de diseño sismorresistente NEC-15.

La masa estructural total del edificio puede representarse como la suma de las masas correspondientes a cada uno de los elementos estructurales que componen el sistema resistente. De manera general, esta relación puede expresarse como:

$$M = \sum_{i=1}^n p_i V_i$$

Donde:

- M = masa total de la estructura
- p_i = peso específico del material del elemento estructural i
- V_i = volumen del elemento estructural i

- n = número total de elementos estructurales considerados en el modelo estructural

En el presente estudio, el proceso de optimización se enfoca específicamente en la variación de las dimensiones de las columnas del sistema estructural, manteniendo constantes las dimensiones de vigas, losas y demás elementos estructurales del edificio. Para ello se generaron diferentes configuraciones estructurales correspondientes a secciones cuadradas de columnas de 65×65 cm, 70×70 cm, 75×75 cm, 80×80 cm, 85×85 cm, 90×90 cm, 95×95 cm y 100×100 cm, las cuales fueron evaluadas mediante análisis estructural.

Cada una de estas configuraciones fue analizada mediante el software ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, considerando las condiciones de carga y los parámetros establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15 para diseño sismorresistente. La evaluación de cada alternativa estructural se realizó comparando parámetros de desempeño como el periodo fundamental de vibración, la masa estructural total, el cortante basal y las derivas máximas entre pisos, con el objetivo de identificar la configuración que presenta un comportamiento estructural adecuado con un uso eficiente de material.

4.2 VARIABLES DE DISEÑO Y RESTRICCIONES ESTRUCTURALES

Para el desarrollo del proceso de optimización estructural fue necesario definir las variables de diseño y los criterios de evaluación que permiten comparar las distintas configuraciones estructurales analizadas. En este contexto, las variables de diseño corresponden a los parámetros del modelo estructural que pueden modificarse durante el proceso iterativo de análisis.

En el presente estudio, la variable principal de diseño corresponde a las dimensiones de las secciones transversales de las columnas del edificio. De forma general, el conjunto de variables de diseño puede representarse como:

$$x = (b_1, h_1, b_2, h_2, \dots, b_n, h_n)$$

En el caso particular de esta investigación, las columnas fueron consideradas con secciones cuadradas, por lo que las variables geométricas se reducen a una única dimensión característica por sección. Las configuraciones analizadas corresponden a columnas con dimensiones de 65×65 cm, 70×70 cm, 75×75 cm, 80×80 cm, 85×85 cm, 90×90 cm, 95×95 cm y 100×100 cm, evaluadas en distintos modelos estructurales.

Para cada una de estas configuraciones se realizó el análisis estructural mediante el software ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, obteniendo como parámetros de evaluación los siguientes criterios de desempeño estructural:

- Periodo fundamental de vibración (T)
- Masa estructural total (M)
- Cortante basal (V)
- Derivas máximas entre pisos (Δ)

Estos parámetros permiten evaluar el comportamiento dinámico y la respuesta sísmica de la estructura conforme a los requisitos establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15.

Adicionalmente, el proceso de optimización se encuentra sujeto a restricciones estructurales que garantizan la seguridad y estabilidad del sistema estructural. Entre las principales restricciones consideradas se encuentran:

- Cumplimiento de los límites de deriva máxima entre pisos establecidos por la normativa NEC-15.
- Cumplimiento de las condiciones de resistencia y capacidad estructural de los elementos.
- Compatibilidad entre el cortante basal obtenido mediante análisis dinámico y estático equivalente.

- Verificación del adecuado comportamiento dinámico de la estructura, representado mediante el periodo fundamental de vibración.

De esta manera, el proceso de optimización consiste en evaluar distintas configuraciones estructurales de columnas y seleccionar aquella que permita obtener un comportamiento estructural adecuado, cumpliendo las restricciones normativas y logrando una utilización eficiente de los materiales.

4.3 ALCANCE DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

En el desarrollo del presente estudio, el proceso de optimización estructural se enfocó específicamente en la variación de las dimensiones de las columnas del sistema estructural. Esta decisión responde a criterios técnicos y metodológicos orientados a analizar de manera controlada el efecto que tienen las secciones de columnas sobre el comportamiento global de la estructura.

En edificaciones de hormigón armado de varios niveles, las columnas constituyen uno de los elementos estructurales más relevantes en la transmisión de cargas verticales y en la resistencia frente a acciones sísmicas. La variación de sus dimensiones influye directamente en parámetros estructurales como la rigidez global del edificio, el periodo fundamental de vibración, la distribución de fuerzas internas y el comportamiento dinámico de la estructura.

En este contexto, el proceso de optimización desarrollado en esta investigación se basa en la generación de distintos modelos estructurales en los cuales se modifican únicamente las dimensiones de las columnas, manteniendo constantes las características geométricas y estructurales de los demás elementos del sistema. Este enfoque permite evaluar de forma clara el impacto de las dimensiones de las columnas en el desempeño estructural del edificio, evitando introducir múltiples variables simultáneamente que dificulten la interpretación de los resultados.

Por lo tanto, dentro del proceso de optimización se definieron como **constantes de diseño** los siguientes parámetros estructurales:

- La **distribución arquitectónica y estructural del edificio**, incluyendo la disposición de ejes y niveles.
- Las **dimensiones de vigas y losas**, las cuales se mantienen constantes durante el análisis.
- La **configuración del sistema estructural tipo pórtico de hormigón armado**.
- Las **condiciones de apoyo y configuración de la cimentación** consideradas en el modelo estructural.
- Las **condiciones de carga**, incluyendo cargas muertas, cargas vivas y cargas sísmicas definidas conforme a la normativa NEC-15.

De esta manera, el proceso de optimización se centra en analizar el efecto de las diferentes secciones de columnas consideradas en el estudio (65×65 cm hasta 100×100 cm), permitiendo identificar la configuración que presenta un comportamiento estructural adecuado y un uso eficiente de materiales, manteniendo constantes los demás parámetros del modelo estructural.

4.4 CRITERIO DE UNIFORMIDAD DE SECCIONES EN COLUMNAS

En edificaciones de hormigón armado de varios niveles, es común que el dimensionamiento de columnas varíe en altura, reduciendo progresivamente sus secciones en los pisos superiores en función de la disminución de cargas gravitacionales y demandas internas. No obstante, en la presente investigación se adoptó como criterio metodológico el uso de una **sección uniforme de columnas en toda la altura de la edificación para cada modelo analizado**.

Esta decisión responde a la necesidad de mantener un procedimiento de comparación homogéneo entre las distintas configuraciones estructurales evaluadas. Al emplear una única sección de columna por modelo, fue posible aislar con mayor claridad el efecto de la variación geométrica de las columnas sobre parámetros globales de respuesta estructural, tales como el período fundamental de vibración, la masa estructural, el cortante basal y las derivas máximas entre pisos.

Además, la adopción de secciones uniformes permitió simplificar el proceso de modelado paramétrico y automatización mediante Dynamo, así como mantener consistencia en la interoperabilidad entre Revit y Robot Structural Analysis durante las iteraciones desarrolladas. De esta manera, el estudio se concentró en comparar alternativas estructurales bajo un mismo criterio geométrico, evitando introducir variaciones simultáneas en altura que hubieran incrementado la complejidad del análisis y dificultado la interpretación de resultados.

En consecuencia, el uso de columnas con sección constante en toda la elevación no constituye una omisión del proceso de diseño, sino una **delimitación metodológica del estudio**, adoptada con el propósito de desarrollar una comparación controlada entre modelos y evaluar la influencia global de las secciones de columnas en el comportamiento estructural del edificio.

4.5 MODELADO EN REVIT CON LA AYUDA DE DYNAMO.

Para el presente trabajo de titulación, se ha elegido usar un edificio ubicado en la ciudad de Cuenca, con los siguientes parámetros geométricos, los mismos que podría ser modificados conforme a los requerimientos presentados:

Tabla 15

Datos iniciales de geometría del edificio de Hormigón Armado.

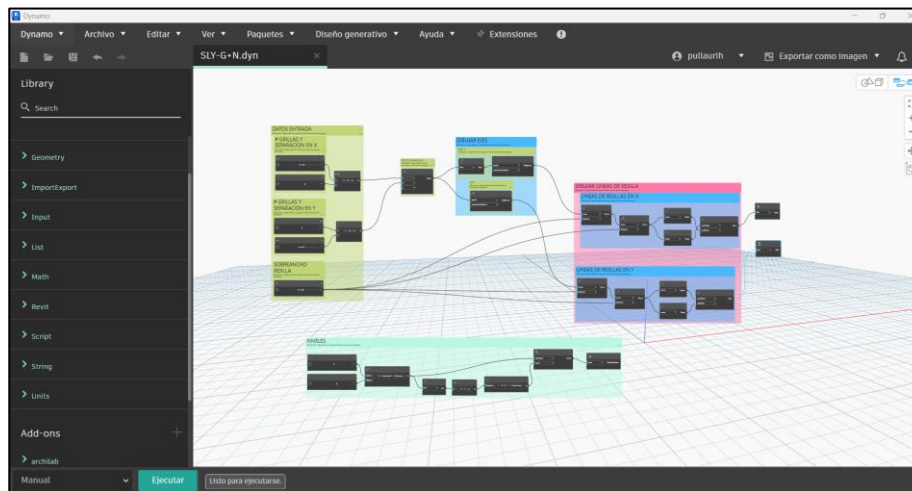
DATOS INICIALES DE GEOMETRÍA		
Número de Pisos	8	
Altura de Pisos	3	m
Numero de ejes sentido "X"	5	
Separación entre ejes "X"	6	m
Numero de ejes sentido "Y"	4	
Separación entre ejes "Y"	5	m

Fuente: Elaboración Propia

Para iniciar la optimización, con la ayuda de DYNAMO, se ha realizado la programación visual, que comprende en scripts y secuencia de comandos, que permiten ingresar los parámetros anteriores, para poder obtener los ejes tanto en planta como en elevación y creación de elementos estructurales como columnas, vigas y losas de dimensiones predeterminadas.

Figura 3

Programación Visual de DYNAMO



Fuente: Elaboración Propia

Realizada la programación visual en DYNAMO, con los datos de entrada en el reproductor de DYNAMO de la pestaña gestionar de REVIT, se inicia con la distribución de la geometría y distribución de elementos:

Figura 4

Entrada de datos para geometría del edificio

The image shows a screenshot of the 'Reproductor de Dynamo' (Dynamo Player) window. The title bar reads 'Reproductor de Dynamo'. The main window title is 'SLY-Vigas-Columnas-Losas'. Below the title, there is a section labeled 'Entradas' (Inputs) with a list of parameters:

- Altura Piso: 0 to 10, value 3
- Nro. Ejes en X: 0 to 20, value 5
- Nro. Ejes en Y: 0 to 20, value 4
- Nro. Pisos: 0 to 50, value 8
- Sección Columnas: C 60x60 (checked)
- Sección Vigas en X: V 30X60 (checked)
- Sección Vigas en Y: V 30X60 (checked)
- Separación eje X [m]: 0 to 20, value 6
- Separación eje Y [m]: 0 to 20, value 5
- Tipo de Losa: Viga y bloque 200 mm (checked)

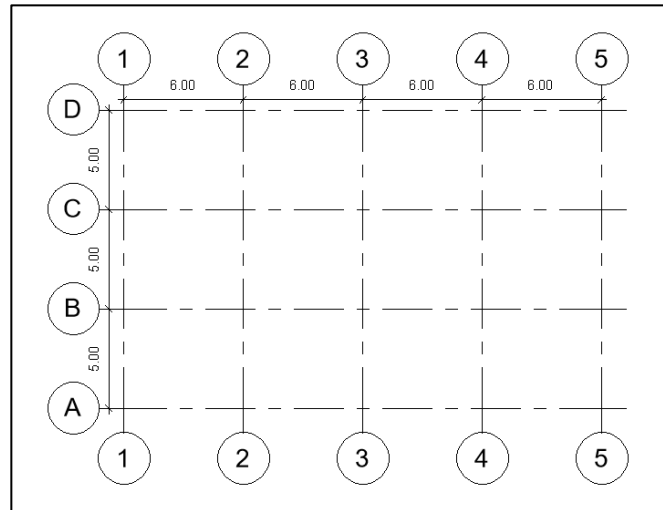
At the bottom, there is a status bar that says 'Listo para ejecutar' (Ready to execute) with a green checkmark. Below that, there are two buttons: 'Atrás' (Back) and 'Ejecutar' (Execute).

Fuente: Elaboración Propia.

Dando como resultado la siguiente distribución de geometría y elementos.

Figura 5

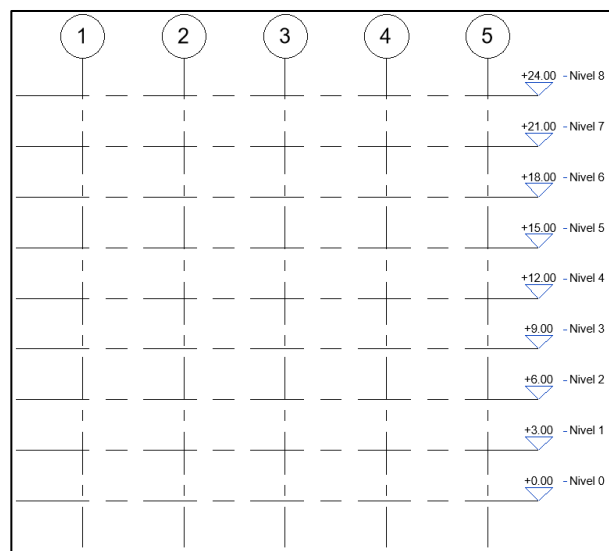
Ejes obtenidos de manera instantánea con DYNAMO de REVIT



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6

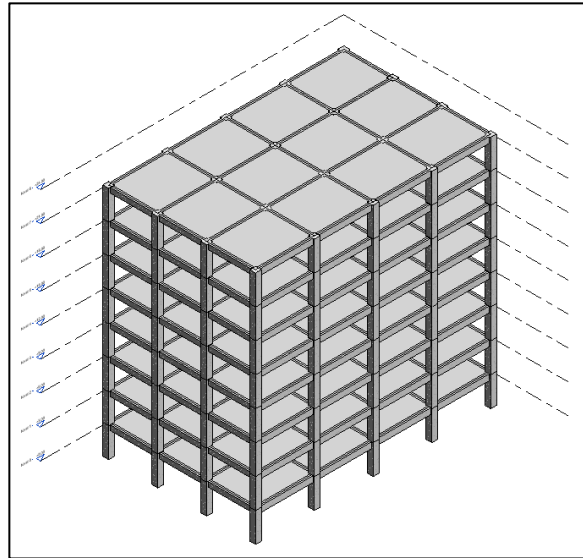
Niveles obtenidos de manera instantánea con DYNAMO de REVIT



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 7

Estructura obtenida de manera instantánea con DYNAMO de REVIT



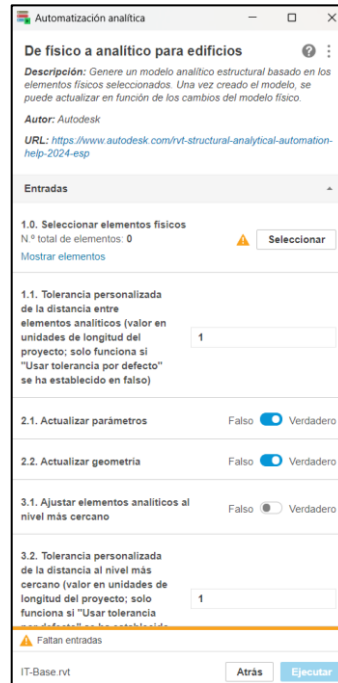
Fuente: Elaboración Propia.

4.6 EXPORTACIÓN DE REVIT E IMPORTACIÓN A ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS

Una vez que se cuenta con el modelado de la estructura con sus elementos definidos en 3 dimensiones en el programa REVIT, para poder exportar al programa ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, el modelo físico debe pasar a modelo analítico, con la ayuda de DYNAMO de REVIT, se puede obtener el modelo analítico:

Figura 8

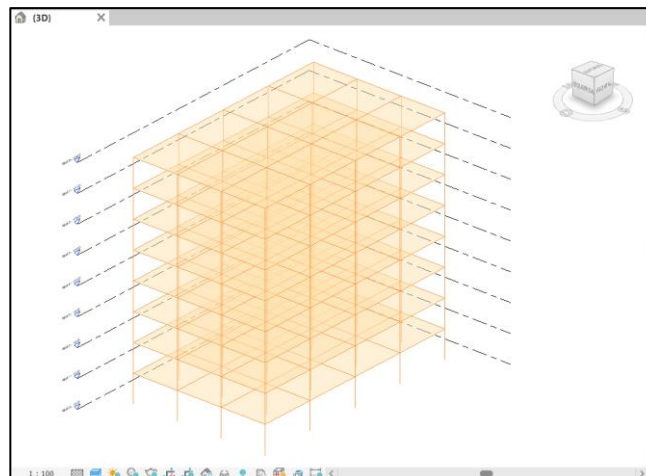
Realización de modelo físico a analítico



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 9

Modelo analítico de REVIT

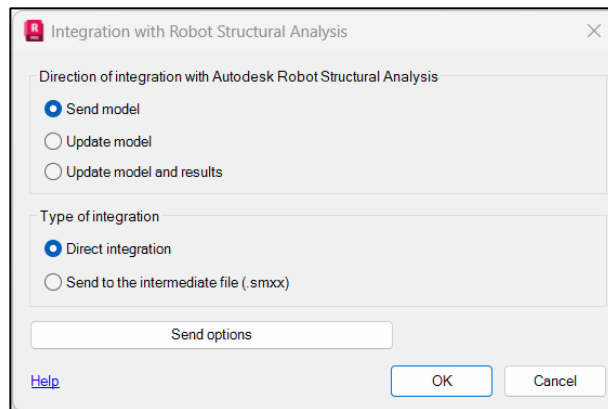


Fuente: Elaboración Propia.

Obtenido el modelo analítico, se inicia el software ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS y se procede a exportar el modelo creado desde REVIT, hacia ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS.

Figura 10

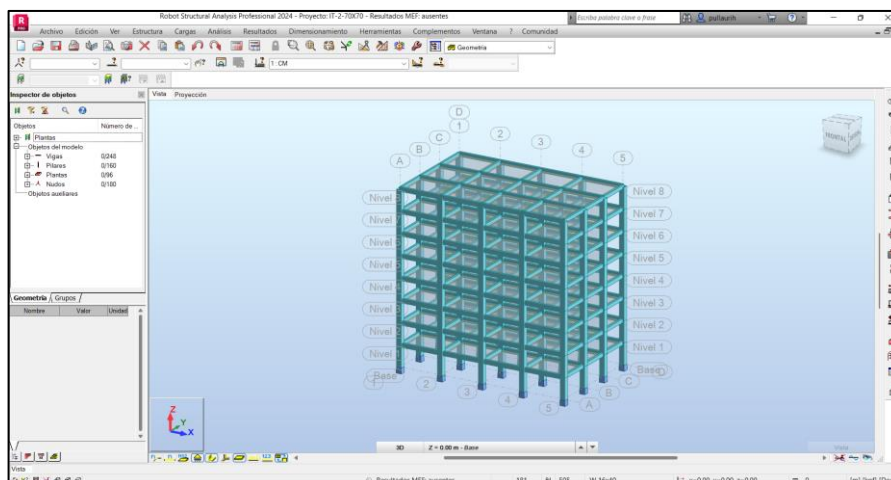
Integración con ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS



Fuente: Elaboración Propia

Figura 11

Modelo exportado a ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS



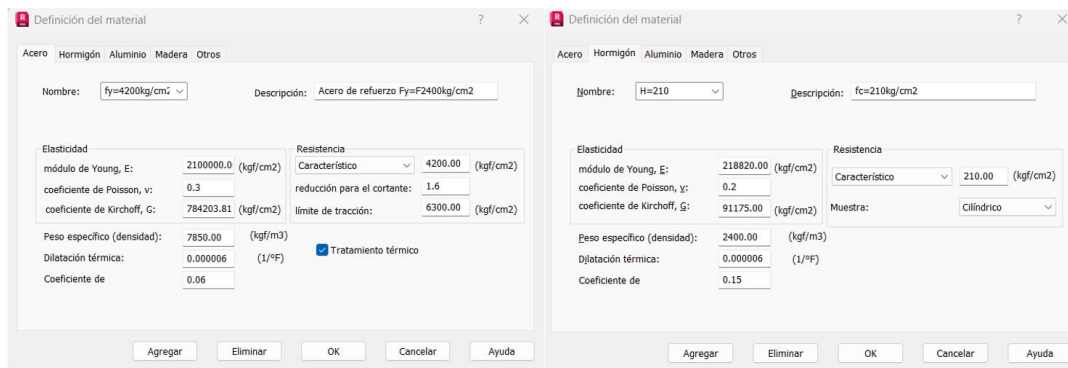
Fuente: Elaboración Propia.

4.7 DEFINICIÓN DE NORMATIVA, MATERIALIDAD Y CARGAS EN ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS.

En ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, se procede a realizar las configuraciones iniciales, la normativa a ser utilizada para el diseño. Se utilizará unidades métricas, idioma español y código de diseño ACI-318, (American Concrete Institute & Jack P. Moehle, 2019).

Figura 12

Definición de parámetros de materialidad de acero de refuerzo y hormigón

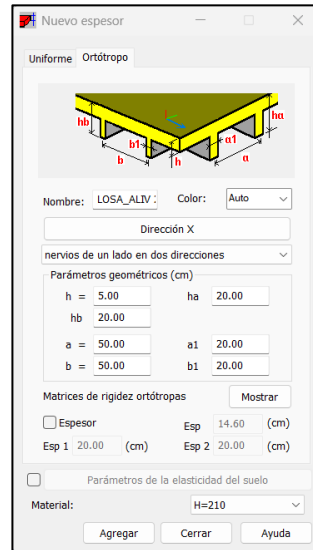


Fuente: Elaboración Propia.

Los elementos estructurales como vigas, columnas y losas, son creadas con la ayuda y parametrización de DYANMO en REVIT, pero es necesario cambiar el tipo de losa en ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, creando una losa aliviada con las siguientes características:

Figura 13

Definición de Losa Aliviada



Fuente: Elaboración Propia.

En ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS se definen los casos de carga y se ingresan los valores asumidos para cada condición de carga.

Tabla 16

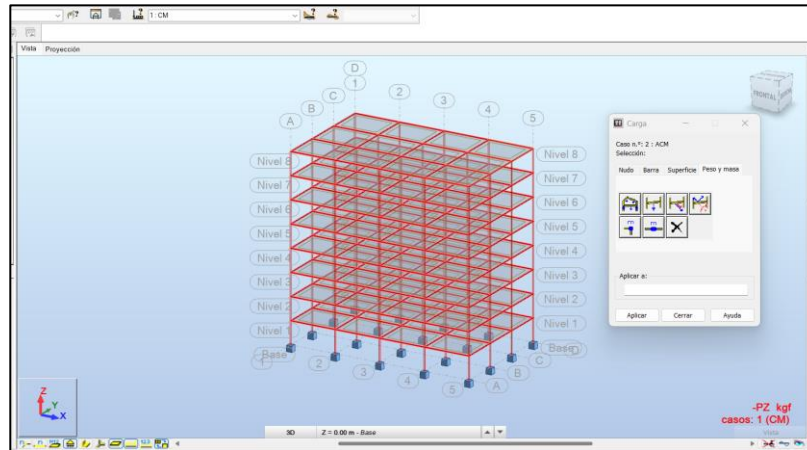
Cargas Asumidas

DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	VALOR	UNIDAD
Carga Muerta	CM	Peso Propio de elementos	kg/m ²
Adicional de Carga Muerta	ACM	300	kg/m ²
Carga Viva	CV	200	kg/m ²

Fuente: Elaboración Propia

Figura 14

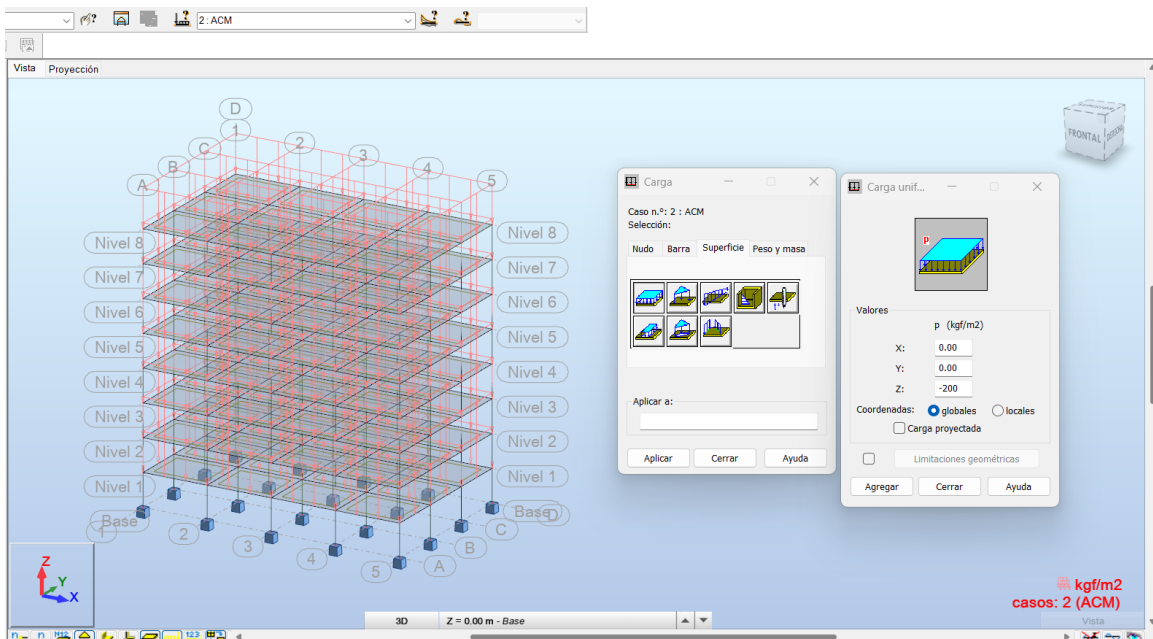
Adición de Peso Propio de la estructura



Fuente: Elaboración Propia

Figura 15

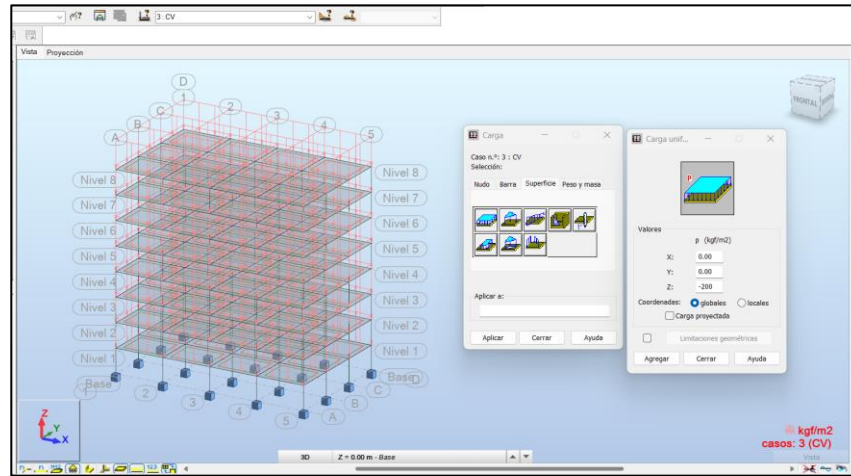
Adición de Carga Muerta Adicional



Fuente: Elaboración Propia

Figura 16

Adición de Carga Viva Adicional

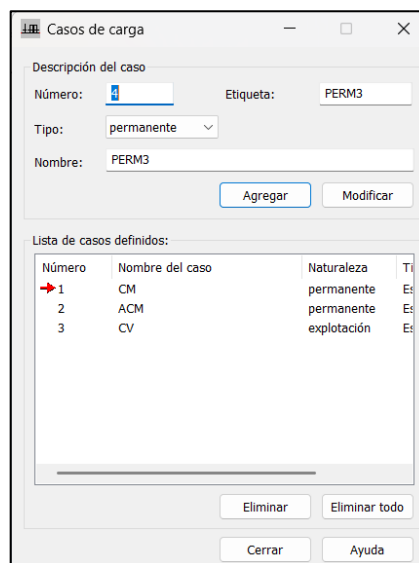


Fuente: Elaboración Propia

Obteniendo como resultado los siguientes tipos de cargas:

Figura 17

Definición de Casos de carga



Fuente: Elaboración Propia

4.8 ANÁLISIS SISMORRESISTENTE

Para iniciar los análisis estático y dinámico, se calcula el período de vibración de la estructura conforme a lo establecido en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS, 2015), método 1:

El periodo de vibración calculado con la (NEC-SE-DS, 2015), es el siguiente:

Tabla 17

Periodo de Vibración del Edificio

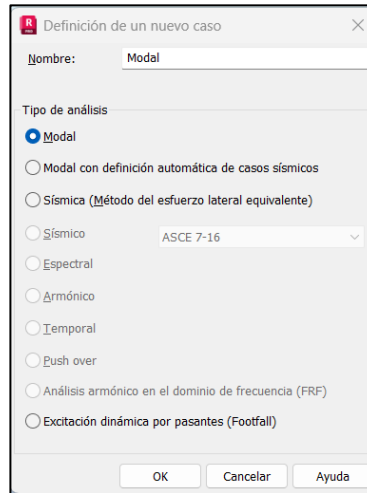
PERIODO DE VIBRACIÓN		
Hn	24	Altura del edificio en (m)
Ct	0.055	Coeficiente del tipo de edificio
α	0.9	Coeficiente α
Ta	0.961	Periodo de Vibración (s)

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

Para iniciar el análisis sismorresistente en el programa ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, es necesario crear el análisis modal. Se definen los diferentes modos de vibración de la estructura en las direcciones principales, considerando tres modos por cada nivel, lo que da como resultado un total de 24 modos de vibración; y, colocando una excentricidad relativa del 5% y amortiguamiento del 0.05:

Figura 18

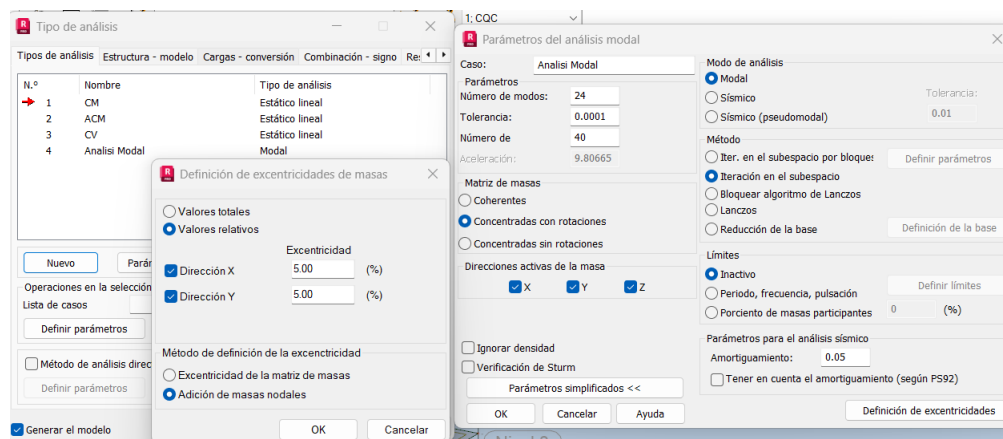
Análisis Modal



Fuente: Elaboración Propia

Figura 19

Número de modos, 3 por piso

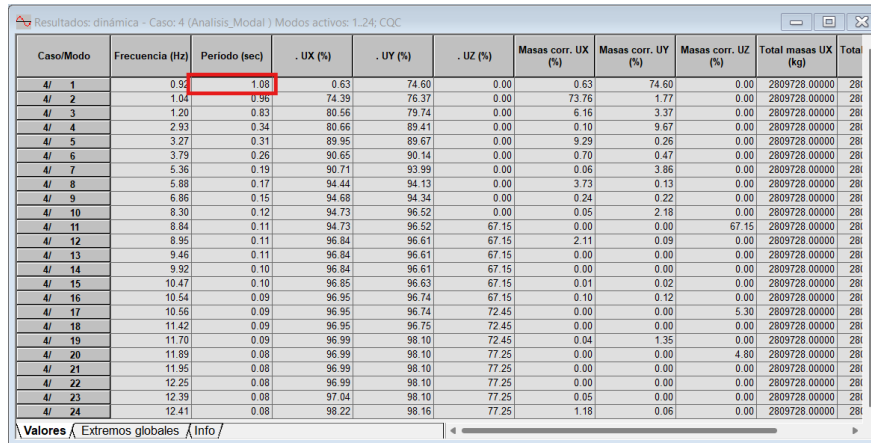


Fuente: Elaboración Propia

El cálculo se realiza en el programa Robot Structural Analysis y, con el período de vibración obtenido a partir del modelo estructural definido, se procede a la determinación del coeficiente de cortante basal correspondiente.:

Figura 20

Obtención del periodo de vibración en ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS



Caso/Modo	Frecuencia (Hz)	Periodo (sec)	. UX (%)	. UY (%)	. UZ (%)	Masas corr. UX (%)	Masas corr. UY (%)	Masas corr. UZ (%)	Total masas UX (kg)	Total
4/ 1	0.92	1.08	0.63	74.60	0.00	0.63	74.60	0.00	2809728.00000	281
4/ 2	1.04	0.95	74.39	76.37	0.00	73.76	1.77	0.00	2809728.00000	281
4/ 3	1.20	0.83	80.56	79.74	0.00	6.16	3.37	0.00	2809728.00000	281
4/ 4	2.93	0.34	80.66	89.41	0.00	0.10	9.67	0.00	2809728.00000	281
4/ 5	3.27	0.31	89.95	89.67	0.00	9.29	0.26	0.00	2809728.00000	281
4/ 6	3.79	0.26	90.65	90.14	0.00	0.70	0.47	0.00	2809728.00000	281
4/ 7	5.36	0.19	90.71	93.99	0.00	0.06	3.86	0.00	2809728.00000	281
4/ 8	5.88	0.17	94.44	94.13	0.00	3.73	0.13	0.00	2809728.00000	281
4/ 9	6.86	0.15	94.68	94.34	0.00	0.24	0.22	0.00	2809728.00000	281
4/ 10	8.30	0.12	94.73	96.52	0.00	0.05	2.18	0.00	2809728.00000	281
4/ 11	8.84	0.11	94.73	96.52	67.15	0.00	0.00	67.15	2809728.00000	281
4/ 12	8.95	0.11	96.84	96.61	67.15	2.11	0.09	0.00	2809728.00000	281
4/ 13	9.46	0.11	96.84	96.61	67.15	0.00	0.00	0.00	2809728.00000	281
4/ 14	9.92	0.10	96.84	96.61	67.15	0.00	0.00	0.00	2809728.00000	281
4/ 15	10.47	0.10	96.85	96.63	67.15	0.01	0.02	0.00	2809728.00000	281
4/ 16	10.54	0.09	96.95	96.74	67.15	0.10	0.12	0.00	2809728.00000	281
4/ 17	10.56	0.09	96.95	96.74	72.45	0.00	0.00	5.30	2809728.00000	281
4/ 18	11.42	0.09	96.95	96.75	72.45	0.00	0.00	0.00	2809728.00000	281
4/ 19	11.70	0.09	96.99	98.10	72.45	0.04	1.35	0.00	2809728.00000	281
4/ 20	11.89	0.08	96.99	98.10	77.25	0.00	0.00	4.80	2809728.00000	281
4/ 21	11.95	0.08	96.99	98.10	77.25	0.00	0.00	0.00	2809728.00000	281
4/ 22	12.25	0.08	96.99	98.10	77.25	0.00	0.00	0.00	2809728.00000	281
4/ 23	12.39	0.08	97.04	98.10	77.25	0.05	0.00	0.00	2809728.00000	281
4/ 24	12.41	0.08	98.22	98.16	77.25	1.18	0.06	0.00	2809728.00000	281

Fuente: Elaboración Propia

4.8.1 ANÁLISIS ESTÁTICO:

Mediante la Ecuación 3 del apartado 3.1.2.1.5, correspondiente al cortante basal, se obtiene:

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

Figura 21

Fórmulas para determinar el espectro de respuesta de acuerdo al periodo de vibración.

$$S_a = \eta Z F_a \quad \text{para } 0 \leq T \leq T_c$$

$$S_a = \eta Z F_a \left(\frac{T_c}{T}\right)^r \quad \text{para } T > T_c$$

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

Tabla 18

Espectro de Respuesta elástico en base al periodo obtenido de la estructura

Periodo de ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS		
η	2.48	Razón entre la aceleración y el PGA
T_a	1.08	Periodo de respuesta del análisis modal
$S_a(T_a)$	0.380	Espectro de diseño de aceleración

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

Tabla 19

Determinación del coeficiente del cortante basal

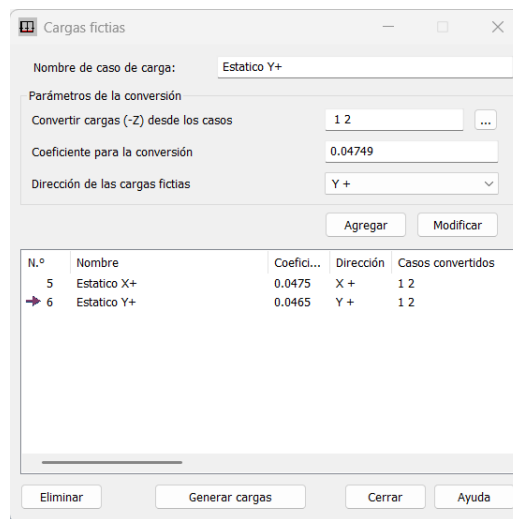
Coeficiente de Cortante Basal		
I	1	Coeficiente de importancia del edificio
R	8	Factor de Reducción sísmica
ϕ_E	1	Coeficiente de configuración en elevación
ϕ_P	1	Coeficiente de configuración en planta
Coef:	0.04749	Coeficiente del Cortante Basal

Fuente:(NEC-SE-DS, 2015)

Con el Coeficiente de cortante obtenido, para el análisis estático equivalente, se ubica en la pestaña cargas, cargas especiales, se adiciona cargas ficticias del programa ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, para determinar las cargas laterales ejercidas por el sismo. Para este análisis estático en edificios según la (NEC-SE-DS, 2015), únicamente se considera el peso propio de los elementos y el adicional de carga muerta:

Figura 22

Definición de cargas para en análisis estático equivalente



Fuente: Elaboración Propia

4.8.2 ANÁLISIS DINÁMICO:

Para definir el análisis Dinámico, se define el análisis espectral, que de acuerdo a la (NEC-SE-DS, 2015), se ha obtenido el siguiente espectro de diseño de acuerdo a los siguientes parámetros:

Tabla 20

Parámetros para determinación de fuerzas sísmicas

PARAMETRO	VALOR	DESCRIPCION
Ciudad	Cuenca	Sierra
Z	0.25	Zonificación Sísmica
TIPO DE PERFIL	C	Geología Local tipo Suelo
Fa	1.3	Coficiente de ampliación del suelo
Fd	1.28	Coficiente de ampliación del suelo
Fs	0.94	Coficiente de ampliación del suelo

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

Tabla 21

Valores del Espectro de Diseño

T	Sa(g)	Inelástico
0.00	0.325	0.041
0.03	0.45	0.057
0.05	0.58	0.073
0.08	0.71	0.089
0.10	0.81	0.101
0.13	0.81	0.101
0.15	0.81	0.101
0.18	0.81	0.101
0.20	0.81	0.101
0.23	0.81	0.101
0.25	0.81	0.101
0.28	0.81	0.101
0.30	0.81	0.101
0.33	0.81	0.101
0.35	0.81	0.101
0.38	0.81	0.101
0.40	0.81	0.101
0.43	0.81	0.101
0.45	0.81	0.101
0.48	0.81	0.101

T	Sa(g)	Inelástico
0.68	0.61	0.076
0.70	0.59	0.073
0.73	0.57	0.071
0.75	0.55	0.068
0.78	0.53	0.066
0.80	0.51	0.064
0.83	0.50	0.062
0.85	0.48	0.060
0.88	0.47	0.059
0.90	0.46	0.057
0.93	0.44	0.055
0.95	0.43	0.054
0.98	0.42	0.053
1.00	0.41	0.051
1.03	0.40	0.050
1.05	0.39	0.049
1.08	0.38	0.048
1.10	0.37	0.047
1.13	0.36	0.046
1.15	0.36	0.045

T	Sa(g)	Inelástico
1.35	0.30	0.038
1.38	0.30	0.037
1.40	0.29	0.037
1.43	0.29	0.036
1.45	0.28	0.035
1.48	0.28	0.035
1.50	0.27	0.034
1.53	0.27	0.034
1.55	0.26	0.033
1.58	0.26	0.033
1.60	0.26	0.032
1.63	0.25	0.032
1.65	0.25	0.031
1.68	0.24	0.031
1.70	0.24	0.030
1.73	0.24	0.030
1.75	0.23	0.029
1.78	0.23	0.029
1.80	0.23	0.028
1.83	0.22	0.028

0.50	0.81	0.101
0.53	0.78	0.098
0.55	0.75	0.093
0.58	0.71	0.089
0.60	0.68	0.085
0.63	0.66	0.082
0.65	0.63	0.079

1.18	0.35	0.044
1.20	0.34	0.043
1.23	0.33	0.042
1.25	0.33	0.041
1.28	0.32	0.040
1.30	0.32	0.039
1.33	0.31	0.039

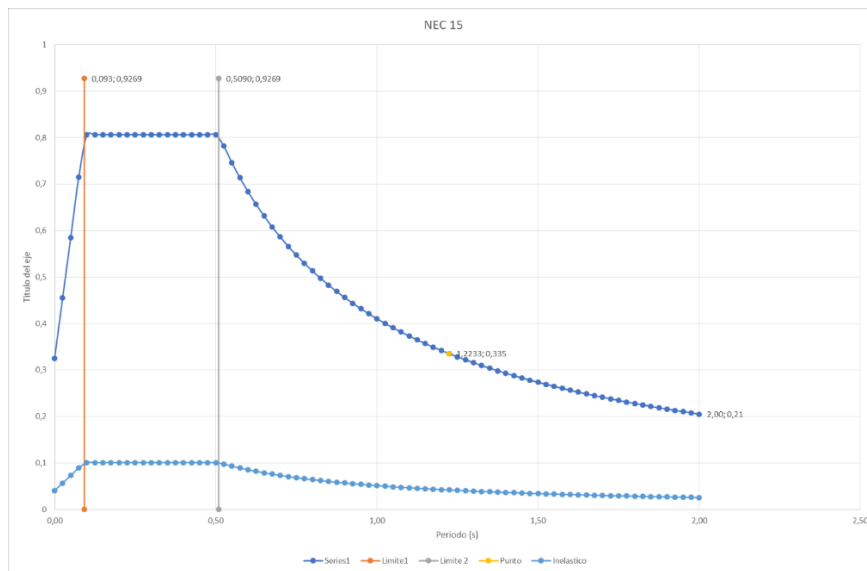
1.85	0.22	0.028
1.88	0.22	0.027
1.90	0.22	0.027
1.93	0.21	0.027
1.95	0.21	0.026
1.98	0.21	0.026
2.00	0.21	0.026

Fuente: Autores

Con los valores obtenidos, se diseña el espectro de aceleración:

Figura 23

Espectro de Diseño de acuerdo a la (NEC-SE-DS, 2015)

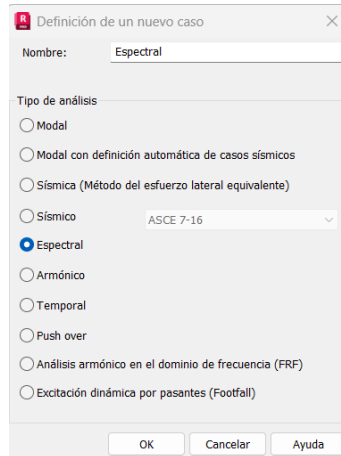


Fuente: Elaboración Propia

En el software ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, se ingresará el espectro de diseño de la siguiente manera:

Figura 24

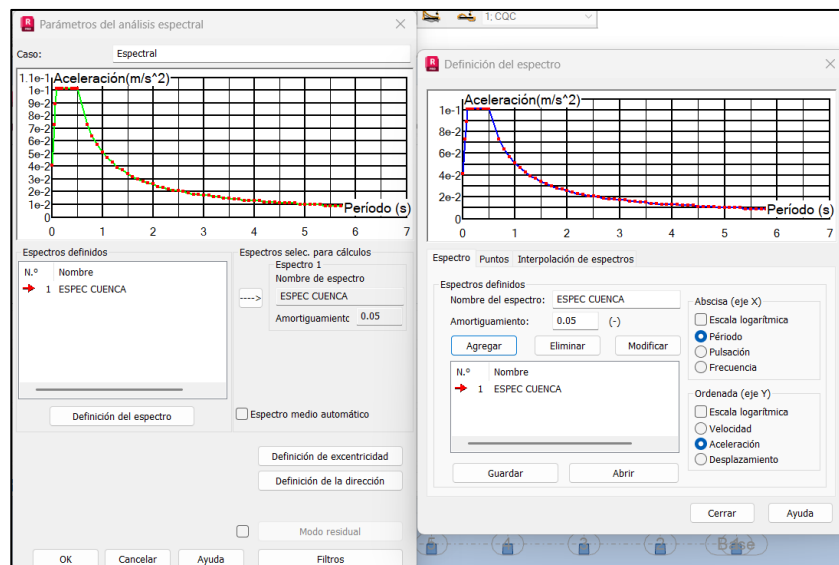
Definición del análisis espectral en ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS



Fuente: Elaboración Propia

Figura 25

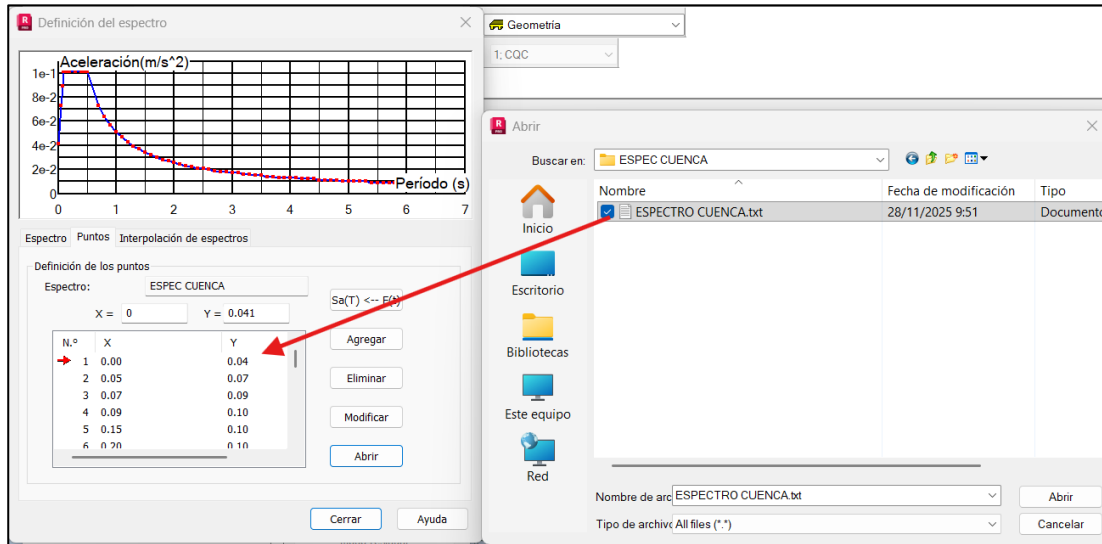
Definición de espectro para el análisis dinámico



Fuente: Elaboración Propia

Figura 26

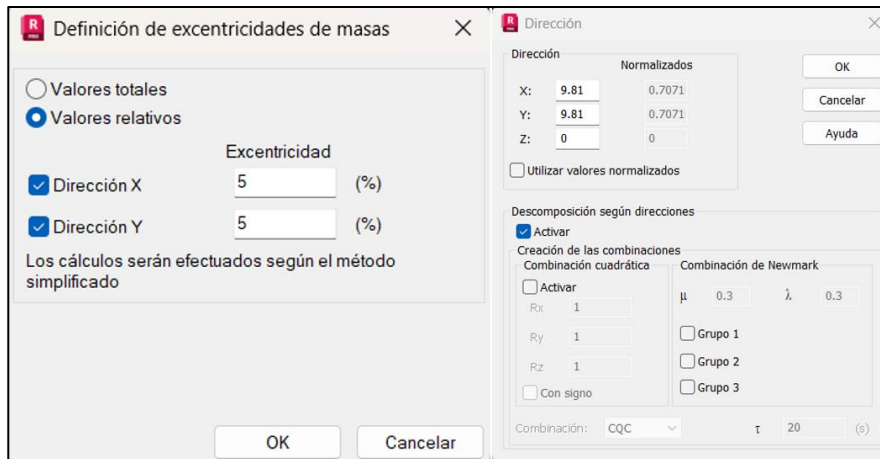
Ingreso de valores de Espectro calculado



Fuente: Elaboración Propia

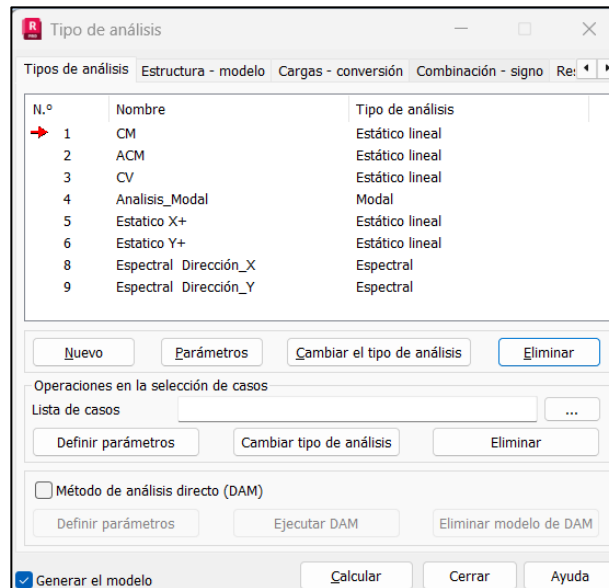
Figura 27

Definición de excentricidades y dirección escalada por 9.81 (gravedad)



Fuente: Elaboración Propia

Una vez logrado el análisis dinámico con el espectro de aceleración, se obtiene los análisis estáticos y dinámicos en la dirección "X" como en "Y".

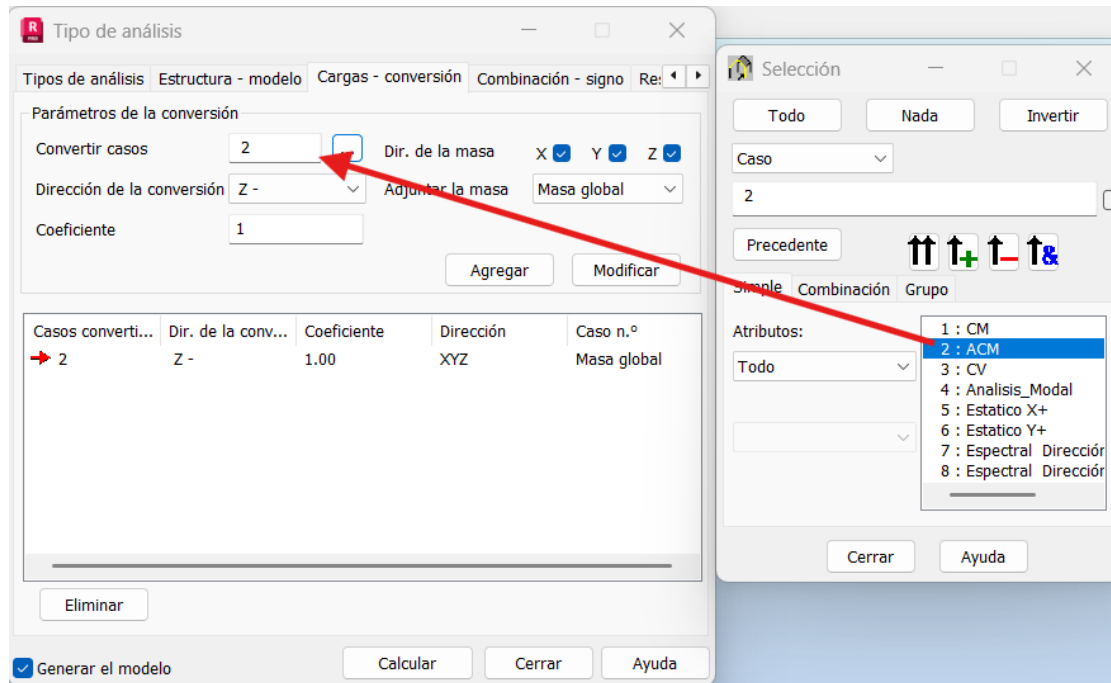
Figura 28*Tipos de análisis para la evaluación de la estructura*

Fuente: Elaboración Propia

Como paso adicional para que el programa ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, considere todas las cargas de peso propio y sobre carga, para en análisis estático y dinámico, se debe convertir el tipo de sobrecarga.

Figura 29

Conversión de cargas en ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS



Fuente: Elaboración Propia

4.8.3 ITERACIONES PARA OPTIMIZACIÓN DE MODOS DE VIBRACIÓN, RELACIÓN CORTANTE ESTÁTICO/DINÁMICO Y DERIVAS.

Con el apoyo del script paramétrico desarrollado en DYNAMO, se logró automatizar el modelado estructural de edificaciones en un tiempo reducido, a partir de la definición de parámetros geométricos tales como dimensiones de vigas y columnas, separación de ejes estructurales y configuración general del sistema resistente. Esta herramienta permitió generar de manera eficiente múltiples variantes estructurales bajo un esquema controlado de iteraciones.

Para el presente estudio se definieron ocho modelos estructurales, considerando que el diseño estructural involucra un número elevado de variables. Con el fin de evitar una

proliferación indefinida de combinaciones y garantizar la trazabilidad del análisis, se decidió variar únicamente la dimensión transversal de las columnas, manteniendo constantes el resto de parámetros geométricos y estructurales. De esta manera, se evaluó el efecto directo del aumento de rigidez asociado a las columnas sobre la respuesta dinámica y sísmica de la edificación.

Para obtener el modelo óptimo de la estructura analizada, se realizó varias interacciones con distintas configuraciones de dimensiones de columnas con el objetivo de obtener valores para realizar gráfica mediante las cuales se puedan analizar y obtener la estructura óptima.

Las iteraciones se establecieron a partir de secciones cuadradas de columnas C65×65 hasta C100×100, con incrementos uniformes de 5 cm entre modelos. Cada configuración fue posteriormente analizada en Robot Structural Analysis, obteniéndose para cada edificio modelo los principales parámetros de respuesta estructural, tales como: período fundamental de vibración, masa sísmica, cortante basal estático y dinámico, y derivas máximas de piso. Estos resultados permitieron realizar comparaciones directas entre modelos y evaluar tendencias asociadas al incremento de rigidez.

Es importante señalar que todas las edificaciones analizadas cumplen con los requisitos establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15, ya que el análisis de estructuras que no satisfacen la normativa vigente carecería de validez técnica para los objetivos del estudio.

A continuación, se presenta la tabla resumen de los ocho modelos estructurales analizados, en la cual se detallan las dimensiones de columnas y vigas empleadas en cada iteración.

Tabla 22

Modelos Estructurales definidos para el análisis

ID	Columna	Vigas	
		Dirección Eje X	Dirección Eje Y
M1	C65x65	V30x45	V30x40
M2	C70x70		
M3	C75x75		
M4	C80x80		
M5	C85x85		
M6	C90x90		
M7	C95x95		
M8	C100x100		

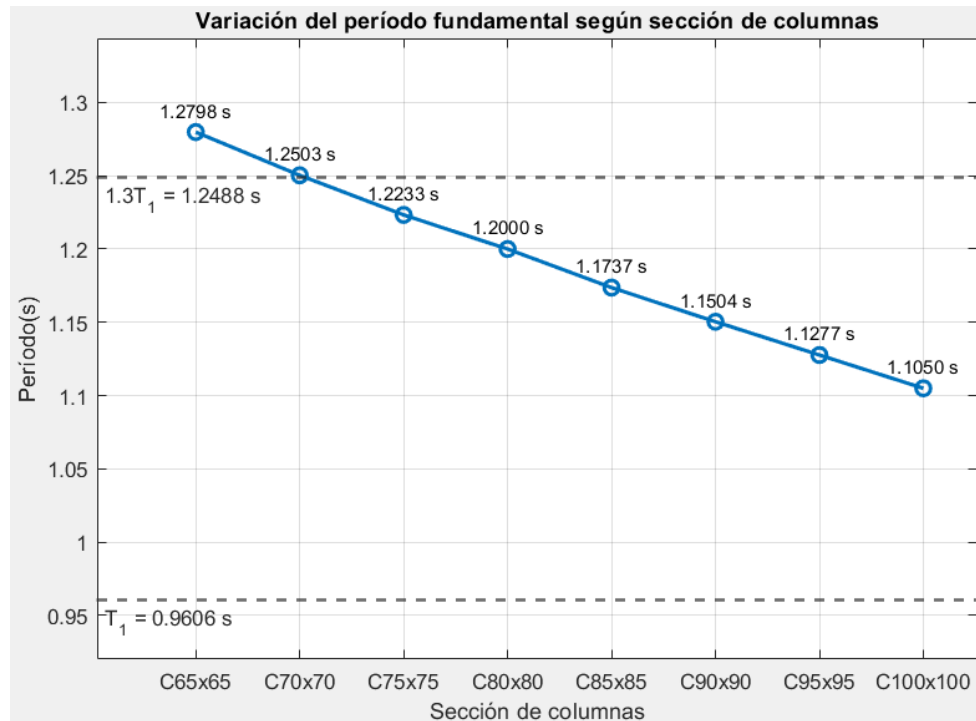
Fuente: Elaboración Propia

- **ANÁLISIS DE LOS PERÍODOS DE VIBRACIÓN**

La Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15 establece dos procedimientos para la determinación del período fundamental de vibración de una edificación:

- i. un **método aproximado**, basado en expresiones empíricas dependientes de la altura y tipología estructural.
- ii. un **método dinámico**, obtenido a partir de un análisis modal que considera explícitamente las propiedades de rigidez, masa y deformación de los elementos resistentes.

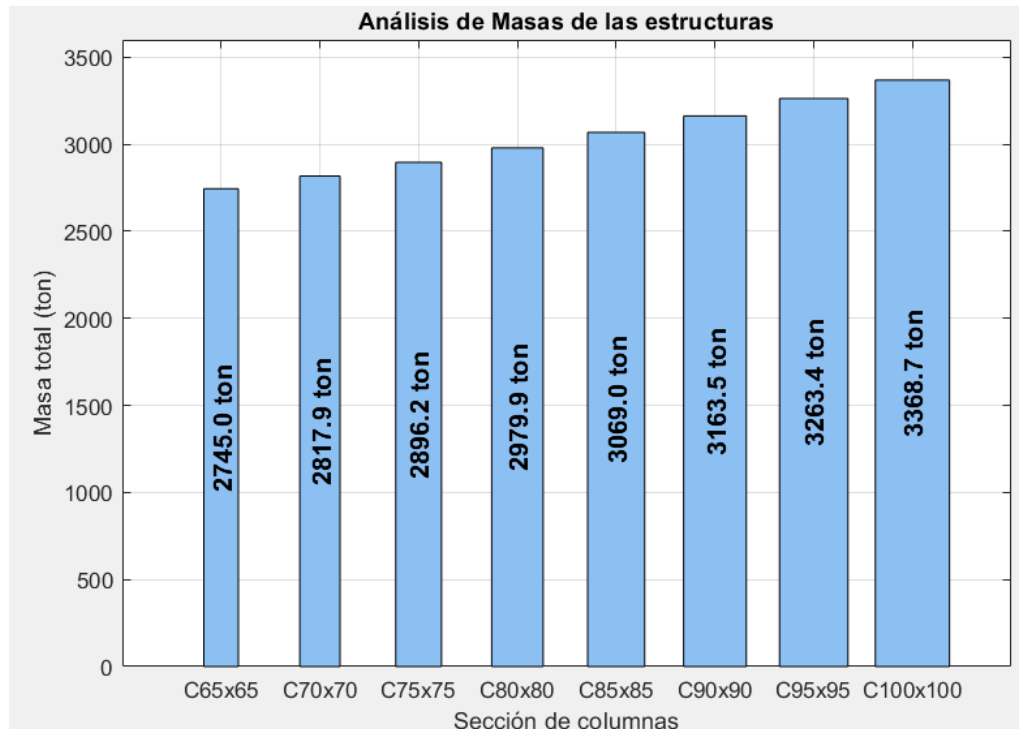
De acuerdo con la NEC-15, el período obtenido mediante análisis modal **no debe exceder en más del 30 %** al período calculado mediante el método aproximado. En este contexto, los ocho modelos estructurales fueron evaluados verificando el cumplimiento de esta condición normativa, garantizando la consistencia entre ambos métodos. Los resultados obtenidos para los períodos de vibración se presentan y analizan comparativamente en el apartado correspondiente.

Figura 30*Comparación de periodos de vibración*

Fuente: Elaboración Propia

- ANÁLISIS DE MASAS ESTRUCTURALES

Para cada uno de los modelos estructurales se determinó la **masa sísmica total**, considerando los pesos propios de los elementos estructurales y las cargas permanentes relevantes, conforme a los lineamientos de la NEC-15. Con el objetivo de visualizar el efecto del incremento progresivo de las dimensiones de las columnas, se realizó un análisis comparativo de las masas mediante herramientas de procesamiento, cuyos resultados se presentan gráficamente en la sección siguiente.

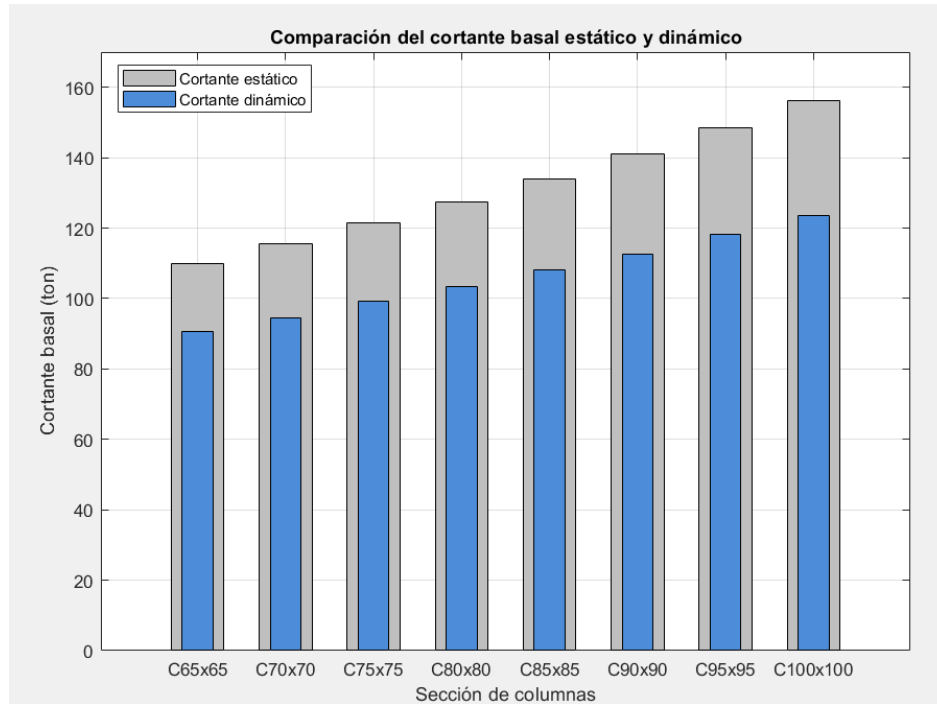
Figura 31*Comparación de masas estructurales*

Fuente: Elaboración Propia

- **ANÁLISIS DEL CORTANTE BASAL DE DISEÑO**

De acuerdo con la NEC-15, el cálculo del cortante basal de diseño se realizó con el método estático equivalente y el método dinámico modal espectral, los cuales son obligatorios según las propiedades del edificio. Para construcciones regulares, la norma indica que el cortante basal del análisis dinámico no debe ser menor al 80 % del cortante basal calculado con el método estático equivalente.

En este trabajo, se confirmó esa relación para cada modelo estructural, y se valoró cómo el incremento de la rigidez afecta la relación entre ambos métodos de análisis. Los resultados se muestran en gráficas comparativas que ayudan a ver el comportamiento general del edificio ante un sismo.

Figura 32*Comparación de Cortante Basal Estático y Dinámico*

Fuente: Elaboración Propia

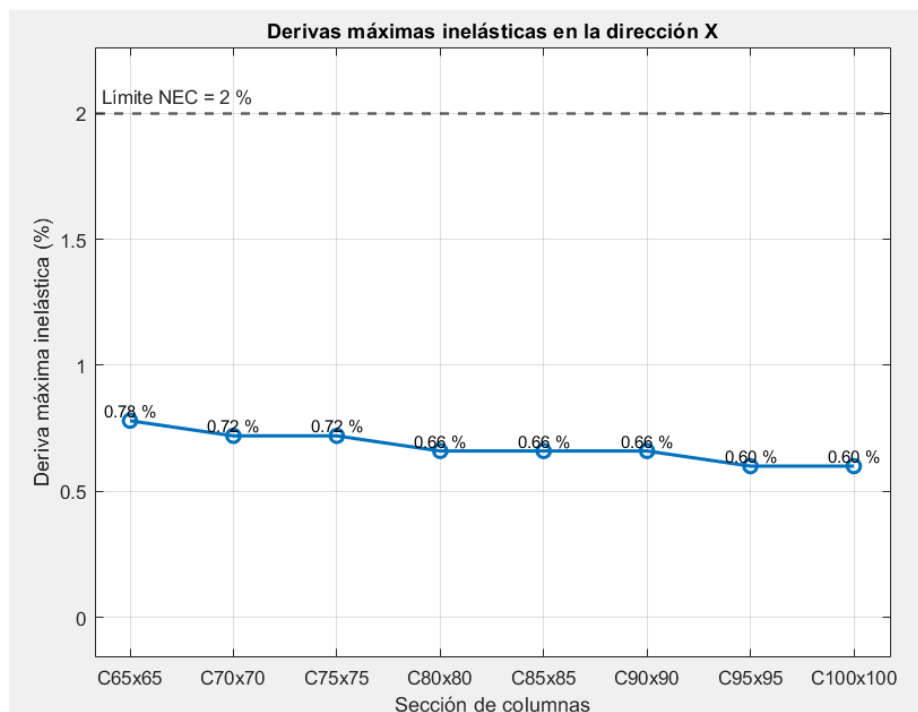
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se determinaron las derivas máximas inelásticas de piso para los ocho modelos estructurales analizados. En el caso de edificaciones de hormigón armado, la NEC-15 establece un límite máximo de deriva del 2 %, valor que fue verificado en todos los casos.

El análisis comparativo de las derivas permitió evaluar el efecto del incremento de las dimensiones de las columnas sobre el control de desplazamientos laterales, constituyéndose en un criterio fundamental para la optimización estructural planteada en este estudio.

Figura 33

Comparación de Derivas Máximas Inelásticas



Fuente: Elaboración Propia

5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis integral de los resultados obtenidos a partir de las ocho iteraciones estructurales permitió evaluar de forma comparativa la influencia del incremento progresivo de la sección transversal de las columnas sobre el desempeño dinámico y sísmico global de la edificación. Para este propósito, se emplearon representaciones gráficas que facilitan la interpretación conjunta de los principales parámetros de respuesta estructural exigidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15.

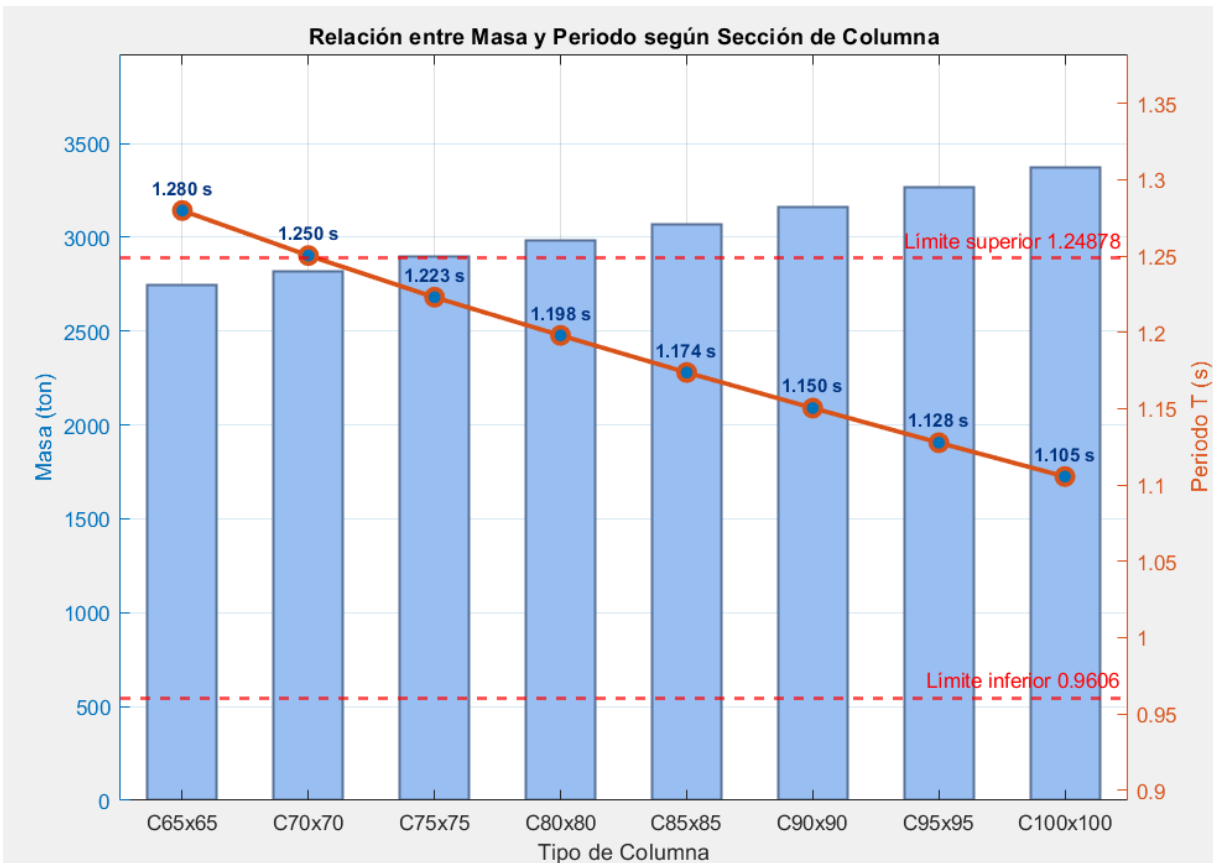
En este estudio, el diseño estructural se optimiza mediante un proceso iterativo paramétrico. Este proceso genera y compara varias configuraciones estructurales que cumplen con los requisitos de las normas sismorresistentes actuales. La alternativa óptima se escoge según criterios de desempeño estructural, como la masa total de la estructura, el periodo fundamental de vibración, las derivas máximas inelásticas y el cortante basal de diseño. Se da prioridad a las configuraciones que equilibran bien la eficiencia estructural y el cumplimiento normativo.

5.1.1 ANÁLISIS COMBINADO DE PERÍODO FUNDAMENTAL Y MASA ESTRUCTURAL

La gráfica que integra el período fundamental de vibración y la masa sísmica total permite identificar de manera simultánea el cumplimiento normativo y la eficiencia estructural de cada modelo. En dicha representación se delimitan los rangos admisibles del período fundamental conforme a la NEC-15, lo que posibilita verificar visualmente qué alternativas estructurales se encuentran dentro de los límites normativos establecidos. Tal como se presenta en la figura correspondiente.

Figura 34

Análisis combinado de período fundamental y masa estructural



Fuente: Elaboración Propia

Se observa que, a medida que aumenta la sección de las columnas, el período fundamental disminuye progresivamente debido al incremento de rigidez lateral del sistema resistente, mientras que la masa estructural presenta un crecimiento prácticamente lineal como consecuencia directa del mayor volumen de hormigón incorporado. La relación inversa entre rigidez y período, y la relación directa entre rigidez y masa, muestran la tensión entre controlar las deformaciones dinámicas y evitar el aumento de peso propio.

En este sentido, el criterio de selección favorece el modelo que cumple con los límites de período de la NEC-15 y tiene la menor masa sísmica total. Bajo esta premisa, la sección de columna C75×75 es la opción más eficiente, ya que cumple con los requisitos de período

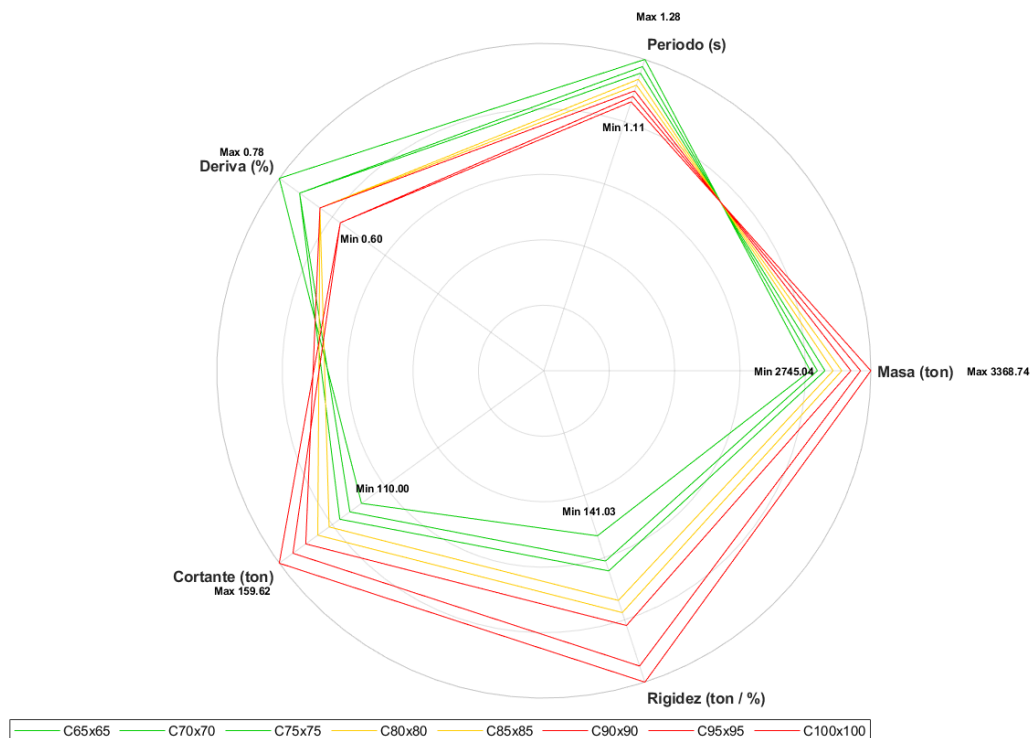
fundamental y control dinámico, a la vez que reduce al mínimo el peso estructural en comparación con secciones más grandes, que aumentan la masa sin mejorar proporcionalmente el rendimiento general.

5.1.2 ANÁLISIS GLOBAL MEDIANTE GRÁFICO RADAR MULTICRITERIO

Con el objetivo de integrar y comparar de manera simultánea los distintos parámetros de respuesta estructural evaluados, se empleó un gráfico radar en el que se representan cinco variables clave: masa estructural total, período fundamental de vibración, deriva máxima inelástica, cortante basal de diseño y rigidez equivalente, definida como la relación entre cortante basal y deriva máxima.

Figura 35

Análisis global mediante gráfico radar multicriterio



Fuente: Elaboración Propia

Cada polígono del gráfico corresponde a una sección de columna, desde C70×70 hasta C100×100, permitiendo visualizar de forma sintética el comportamiento relativo de cada alternativa. Para facilitar la interpretación, en cada eje del gráfico se muestran únicamente los valores extremos, destacándose el valor mínimo en color rojo y el valor máximo en color verde, lo cual resalta las tendencias generales del conjunto de modelos analizados.

El análisis gráfico muestra que las secciones más grandes (C95×95 y C100×100) tienen la mayor rigidez equivalente y cortante basal, y los valores más bajos de período fundamental y deriva inelástica. Esto sugiere que aumentar el tamaño de las columnas ayuda a mejorar el comportamiento sísmico en cuanto al control de las deformaciones y la respuesta dinámica. Sin embargo, estas mejoras aumentan la masa estructural y las fuerzas sísmicas de diseño, lo que podría no ser conveniente desde el punto de vista de la eficiencia estructural y económica.

Por otro lado, las secciones más pequeñas (C70×70 y C75×75) tienen períodos y derivas más grandes, aunque se mantienen dentro de los límites permitidos por la NEC-15. La sección C75×75, en particular, parece encontrar un buen equilibrio entre rigidez, control de deformaciones y masa estructural, siendo una opción intermedia que evita problemas de tamaño insuficiente o excesivo en el sistema resistente.

5.1.3 SELECCIÓN DE LA SECCIÓN ÓPTIMA

Como resultado del proceso de optimización estructural, considerando de manera conjunta los criterios normativos de período fundamental, límite de derivas, resistencia sísmica y eficiencia en términos de masa estructural, se determina que la sección de columna C75×75 constituye la alternativa óptima para la edificación analizada. Esta sección corresponde a la configuración de menor masa que cumple simultáneamente con todos los requisitos establecidos por la NEC-15, garantizando un desempeño sísmico adecuado sin incurrir en incrementos innecesarios de peso y cortante basal.

En el gráfico radar, esta opción se muestra como equilibrada, donde estas secciones más grandes solo mejoran ligeramente el rendimiento estructural, lo que no justifica el incremento en masa y las exigencias sísmicas. Por lo tanto, elegir la sección $C75 \times 75$ mejora la relación entre la demanda sísmica, la rigidez estructural y la eficiencia del sistema resistente, cumpliendo así con los objetivos de este estudio.

5.2 DISEÑO DE ELEMENTOS CON ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS

Una vez que se obtenga la estructura que cumpla con los requisitos de la (NEC-SE-DS, 2015), se realiza el diseño de los elementos con el programa ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS. Robot tiene la configuración de obtener el diseño de acero de refuerzo en base a las demandas solicitadas.

El modelo obtenido, en función de su desempeño sísmico, se realiza las combinaciones de cargas de acuerdo a la (NEC-SE-CG, 2014) para considerar el análisis en ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS y proceder a realizar el diseño de elementos conforme a las demandas solicitadas y obtener el acero de refuerzo requerido de los elementos de la estructura.

Tabla 23

Combinaciones de cargas

Combinación 1	1.4D
Combinación 2	1.2D+1.6L
Combinación 3	1.2D+L+E
Combinación 4	0.9D+E

Fuente: (NEC-SE-CG, 2014).

Donde:

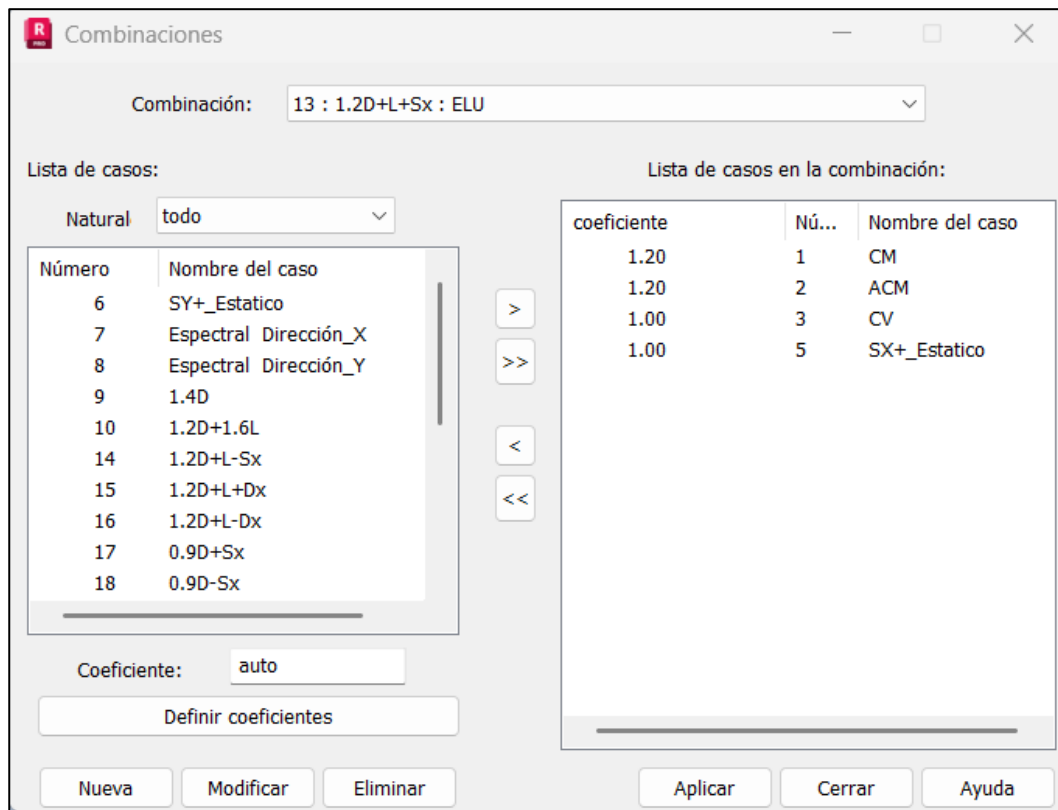
D: Carga muerta CM (peso propio) y adicional de carga muerta ACM.

L: Carga viva.

E: Sismo Estático y Dinámico (Sx, Sy, Dx, Dy).

Figura 36

Combinaciones de cargas



Fuente: Elaboración Propia

Figura 37

Todas las combinaciones para analizar conforme a la (NEC-SE-CG, 2015).

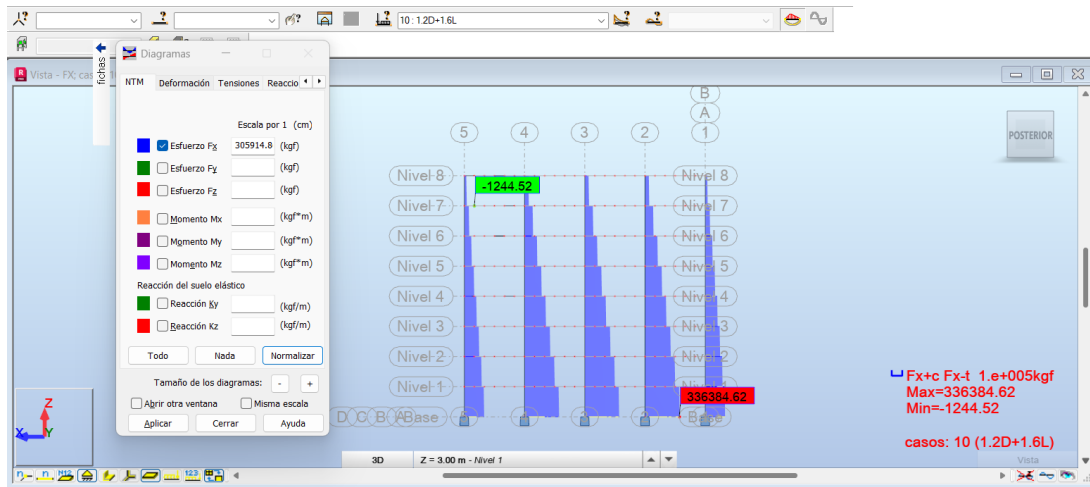
Combinación	Nombre	Tipo de análisis	Tipo de combin	Naturaleza de caso	Definición
9 (C)	1.4D	Combinación line	ELU	permanente	$(1+2)*1.4000$
10 (C)	1.2D+1.6L	Combinación line	ELU	permanente	$(1+2)*1.2000+3*1.6000$
13 (C)	1.2D+L+Sx	Combinación line	ELU	permanente	$(1+2)*1.2000+(3+5)*1.0000$
14 (C)	1.2D+L-Sx	Combinación line	ELU	permanente	$(1+2)*1.2000+3*1.0000+5*-1.0000$
15 (C) (CQC)	1.2D+L+Dx	Combinación line	ELU	permanente	$(1+2)*1.2000+(3+7)*1.0000$
16 (C) (CQC)	1.2D+L-Dx	Combinación line	ELU	permanente	$(1+2)*1.2000+3*1.0000+7*-1.0000$
17 (C)	0.9D+Sx	Combinación line	ELU	permanente	$(1+2)*0.9000+5*1.0000$
18 (C)	0.9D-Sx	Combinación line	ELU	permanente	$(1+2)*0.9000+5*-1.0000$
19 (C) (CQC)	0.9D+Dx	Combinación line	ELU	permanente	$(1+2)*0.9000+7*1.0000$
20 (C) (CQC)	0.9D-Dx	Combinación line	ELU	permanente	$(1+2)*0.9000+7*-1.0000$
21 (C)	1.2D+L+Sy	Combinación line	ELU	permanente	$(1+2)*1.2000+(3+6)*1.0000$
22 (C)	1.2D+L-Sy	Combinación line	ELU	permanente	$(1+2)*1.2000+3*1.0000+6*-1.0000$
23 (C) (CQC)	1.2+L+Dx	Combinación line	ELU	permanente	$(1+2)*1.2000+(3+8)*1.0000$
24 (C) (CQC)	1.2D+L-Dy	Combinación line	ELU	permanente	$(1+2)*1.2000+3*1.0000+8*-1.0000$
25 (C)	0.9D+Sy	Combinación line	ELU	permanente	$(1+2)*0.9000+6*1.0000$
26 (C)	0.9D-Sy	Combinación line	ELU	permanente	$(1+2)*0.9000+6*-1.0000$
27 (C) (CQC)	0.9D+Dy	Combinación line	ELU	permanente	$(1+2)*0.9000+8*1.0000$
28 (C) (CQC)	0.9D-Dy	Combinación line	ELU	permanente	$(1+2)*0.9000+8*-1.0000$

Fuente: Elaboración Propia

Colocadas las combinaciones de cargas de acuerdo a la (NEC-SE-CG, 2014), en el programa ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, se procede a correr el programar para calcular nuevamente la estructura y obtener los esfuerzos que demanda las combinaciones de cargas estáticas dinámicas y accidentales.

Figura 38

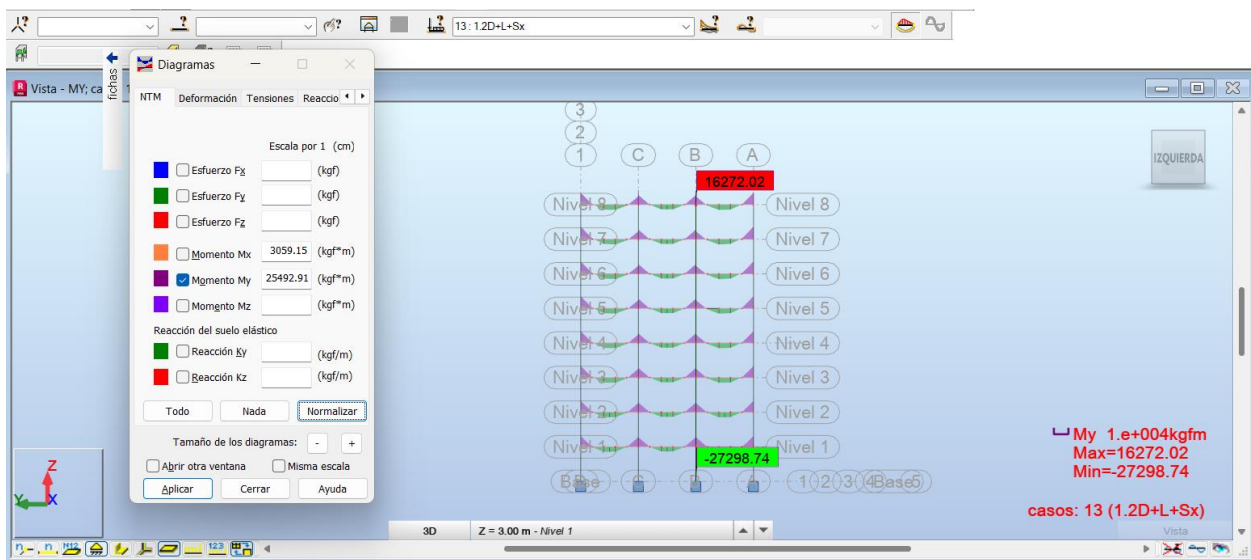
Fuerza Axial en columnas Caso de carga 1.2D+1.6L



Fuente: Elaboración Propia

Figura 39

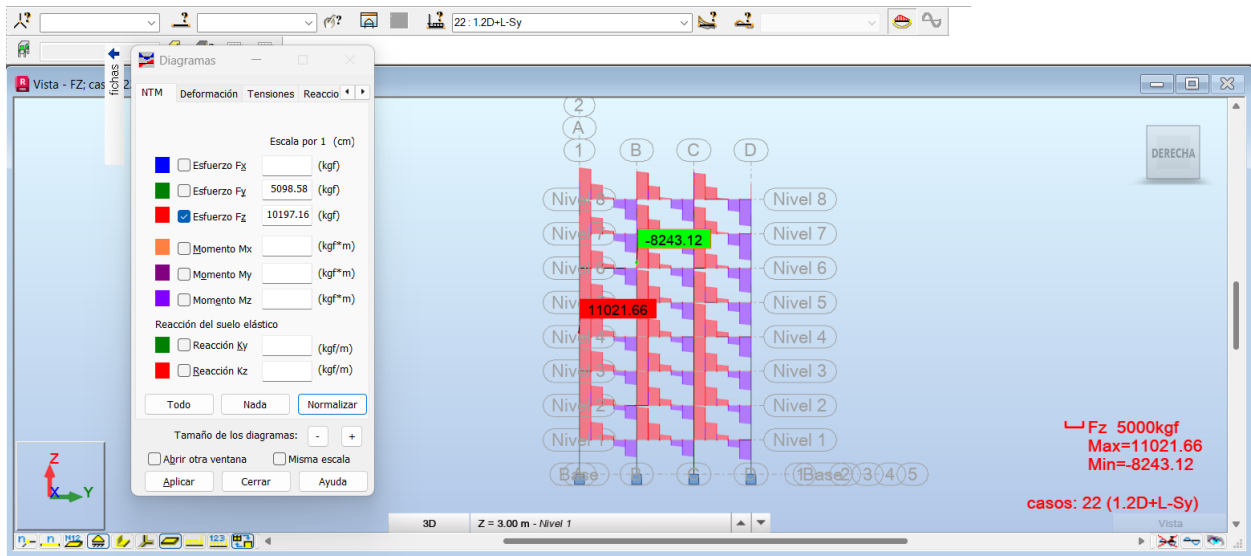
Momentos en vigas Caso de carga 1.2D+D+Sx



Fuente: Elaboración Propia

Figura 40

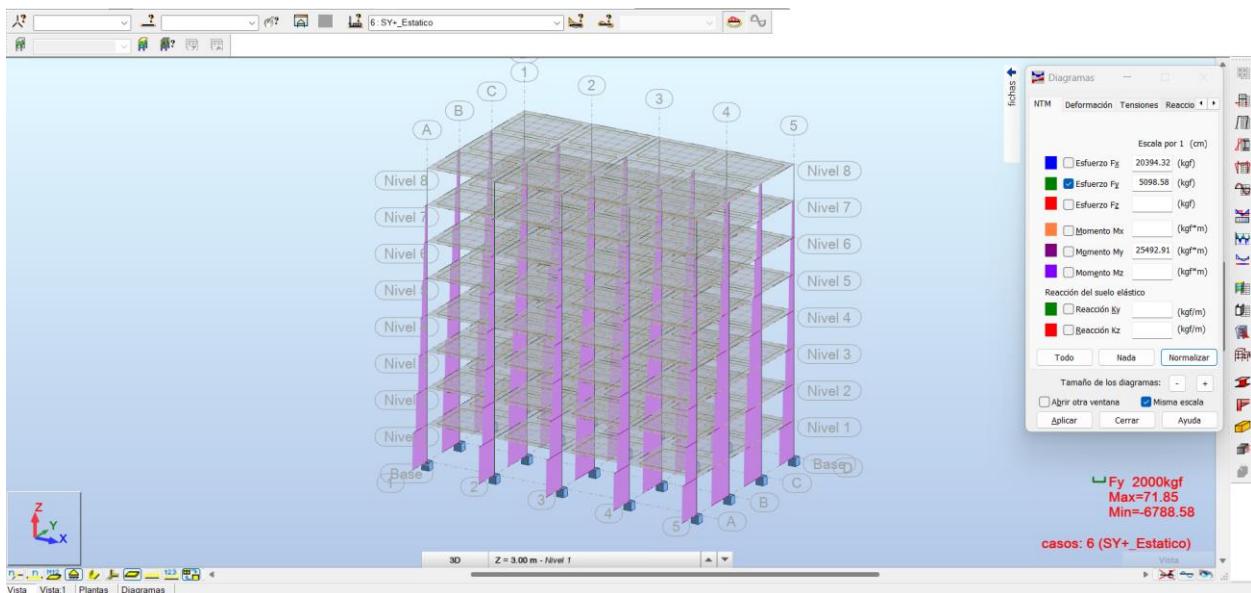
Cortante en vigas. Caso de carga 1.2D+L-Sy



Fuente: Elaboración Propia

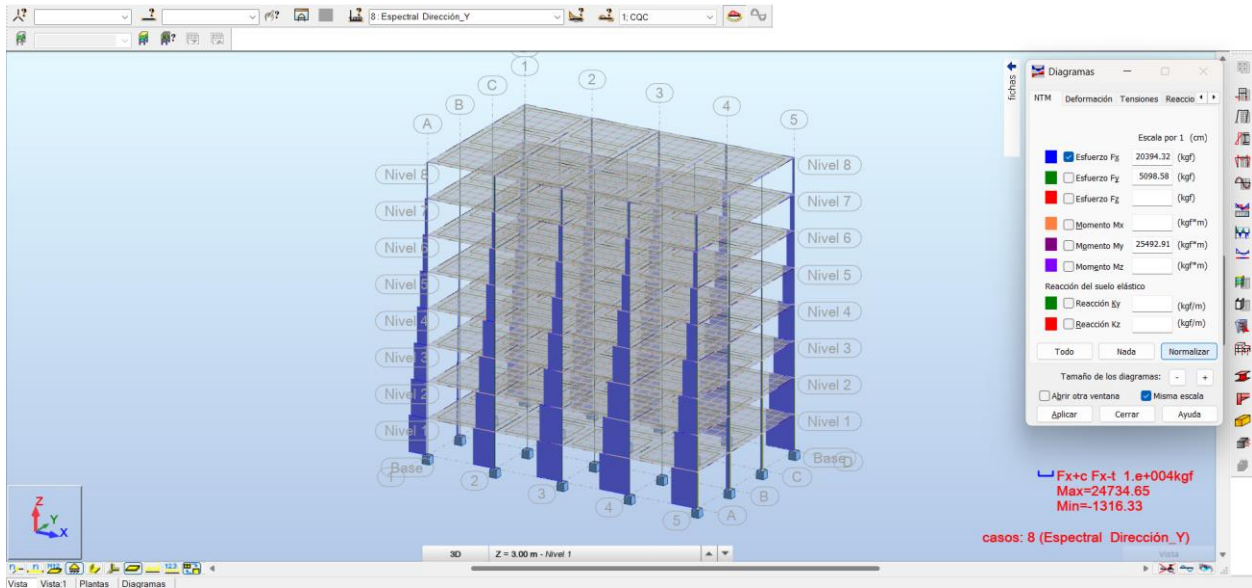
Figura 41

Análisis estático en Y



Fuente: Elaboración Propia

Figura 42

Análisis Dinámico en Y

Fuente: Elaboración Propia

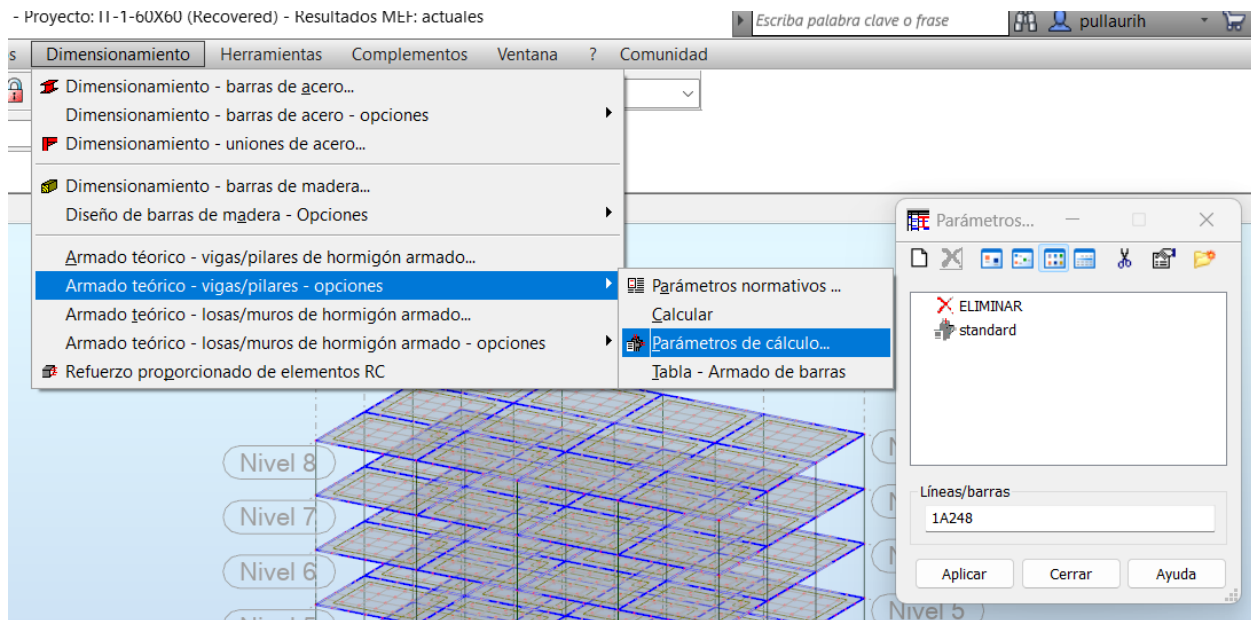
Estos son algunos de los ejemplos gráficos de que el programa ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS presenta.

Para el cálculo de acero de refuerzo, se selecciona primero las vigas y luego las columnas y en ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, se coloca los parámetros de cálculo de diseño.

5.2.1 DISEÑO DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN CON ACERO DE REFUERZO DE LAS VIGAS

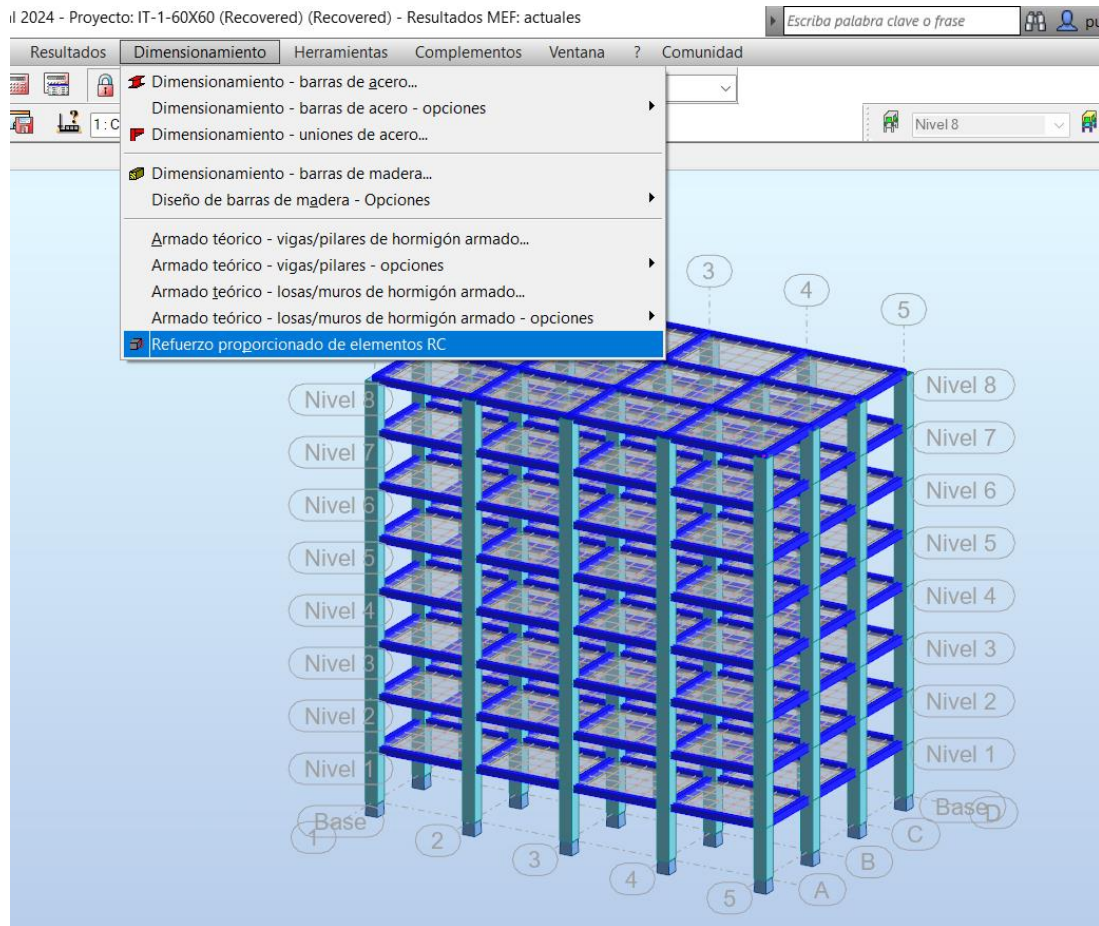
Figura 43

Parámetros de cálculo de Diseño



Fuente: Elaboración Propia

Se selecciona todas las vigas y en la pestaña Dimensionamiento, Refuerzo proporcionado de elementos RC, se calcula el acero de refuerzo para las vigas seleccionadas.

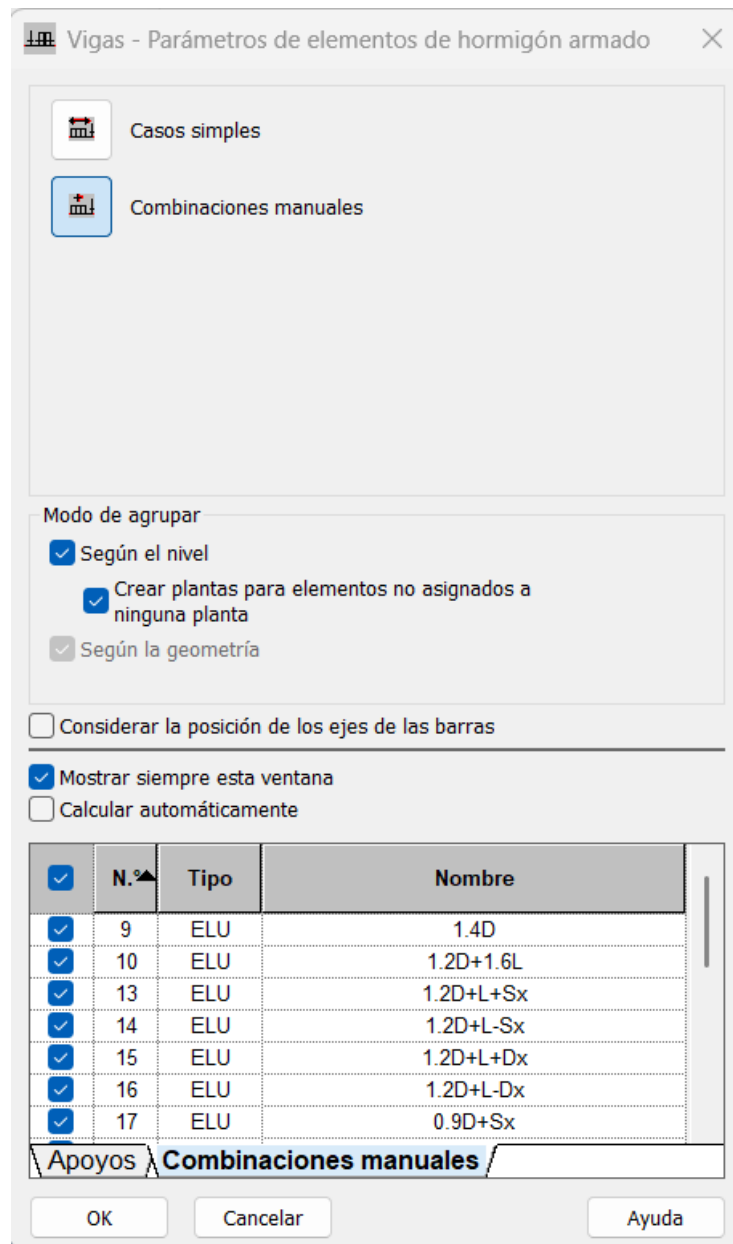
Figura 44*Selección de elementos vigas y diseño de acero de refuerzo*

Fuente: Elaboración Propia

Se selecciona las combinaciones que actuarán para calcular el acero de refuerzo de los elementos seleccionados (vigas).

Figura 45

Selección de casos de carga para diseño de elementos vigas

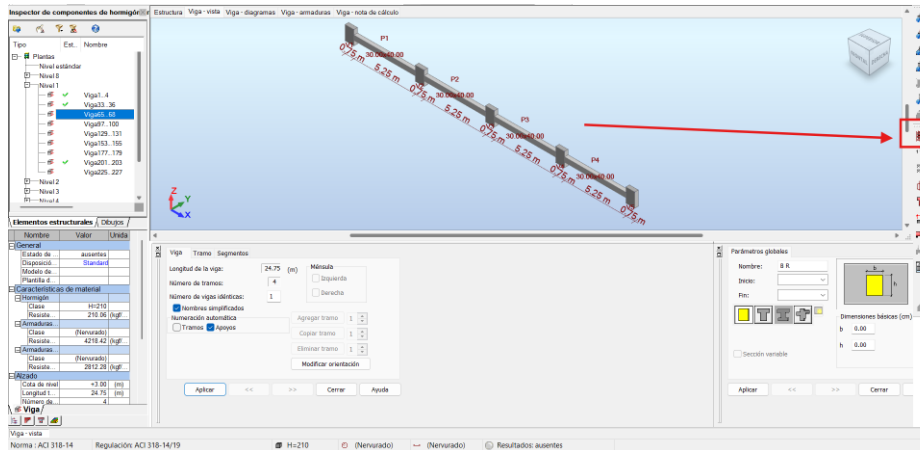


Fuente: Elaboración Propia

Una vez que ROBOT ESTRUCTURAL ANALYSIS, haya calculado el acero necesario para la ENVOLVENTE, se procede a colocar las armaduras reales.

Figura 46

Armaduras típicas para vigas

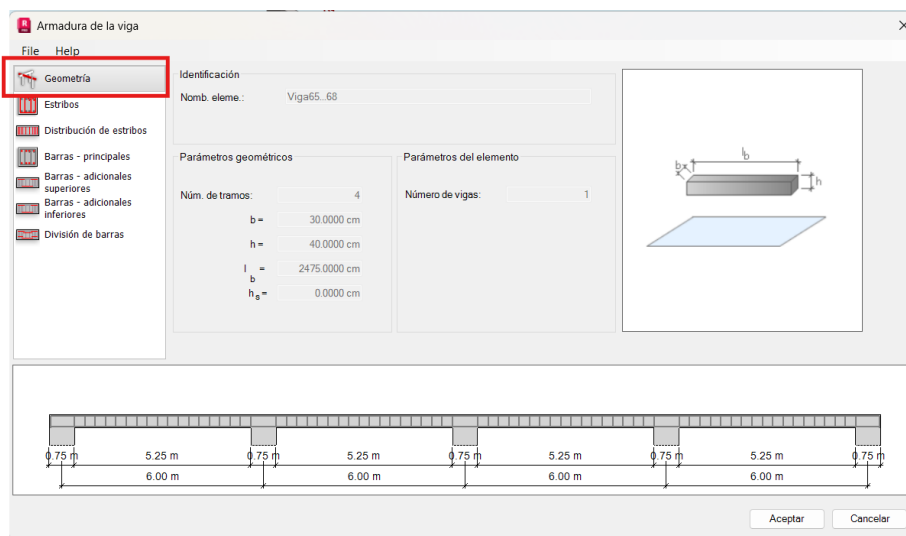


Fuente: Elaboración Propia

La siguiente sección de ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS - ARMADURAS DE VIGAS, se va a determinar el armado del acero principal y refuerzos superiores e inferiores, distribución de estribos con sus separaciones y los traslapes, en base a la geometría determinada.

Figura 47

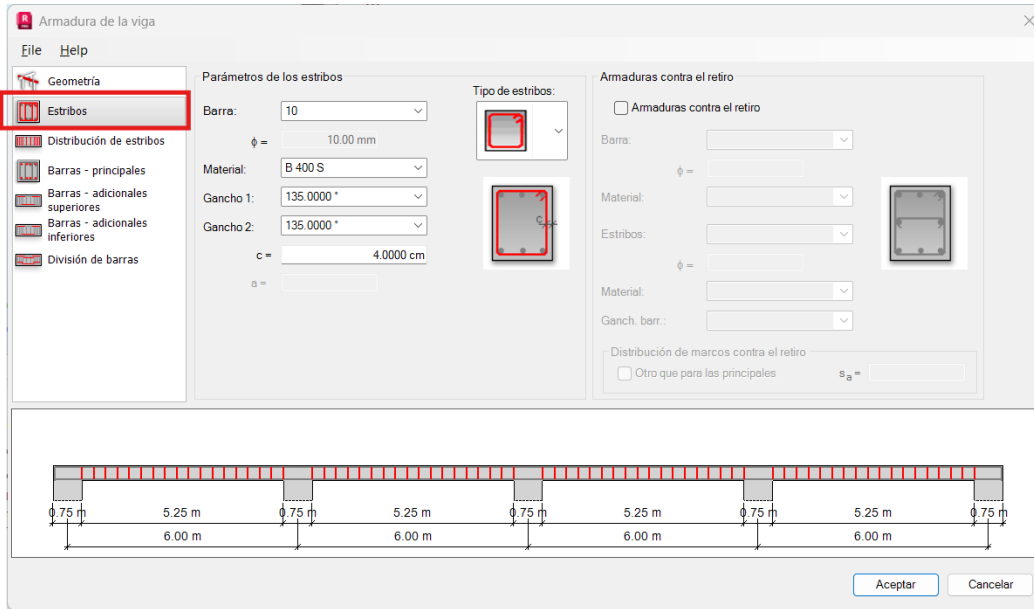
Geometría de la viga con sus respectivos tramos



Fuente: Elaboración Propia

Figura 48

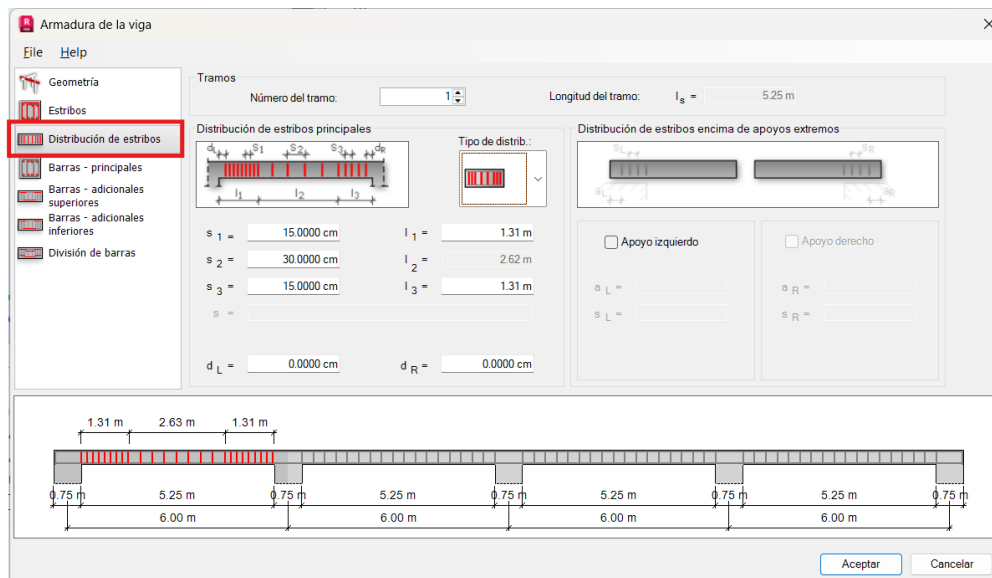
Parámetros de los estribos, diámetro, recubrimiento



Fuente: Elaboración Propia

Figura 49

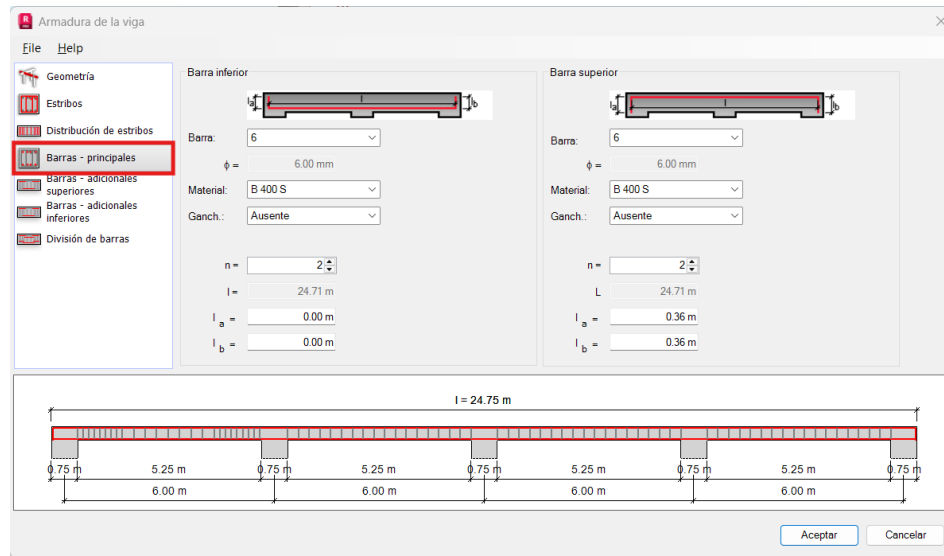
Distribución de estribos



Fuente: Elaboración Propia

Figura 50

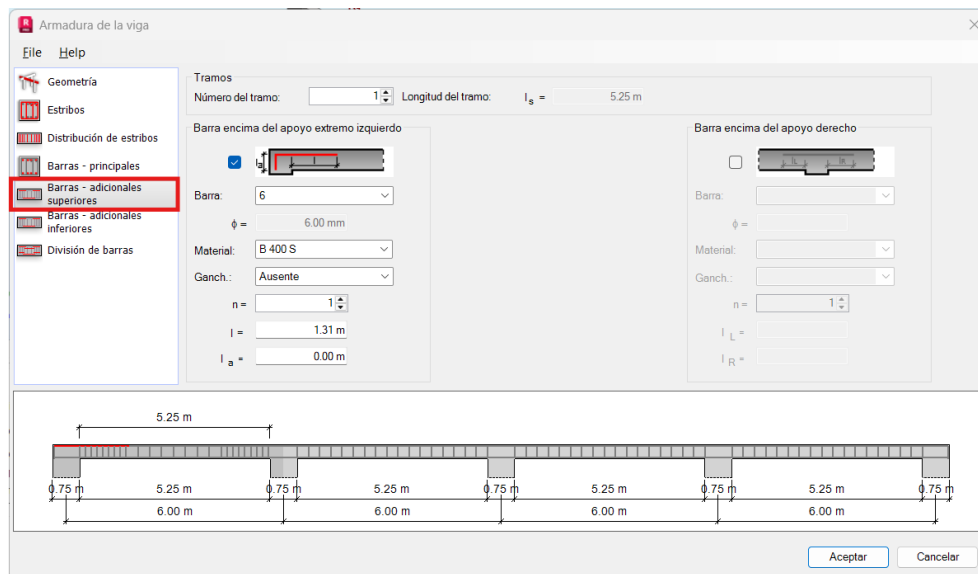
Distribución de barras longitudinales superior e inferior



Fuente: Elaboración Propia

Figura 51

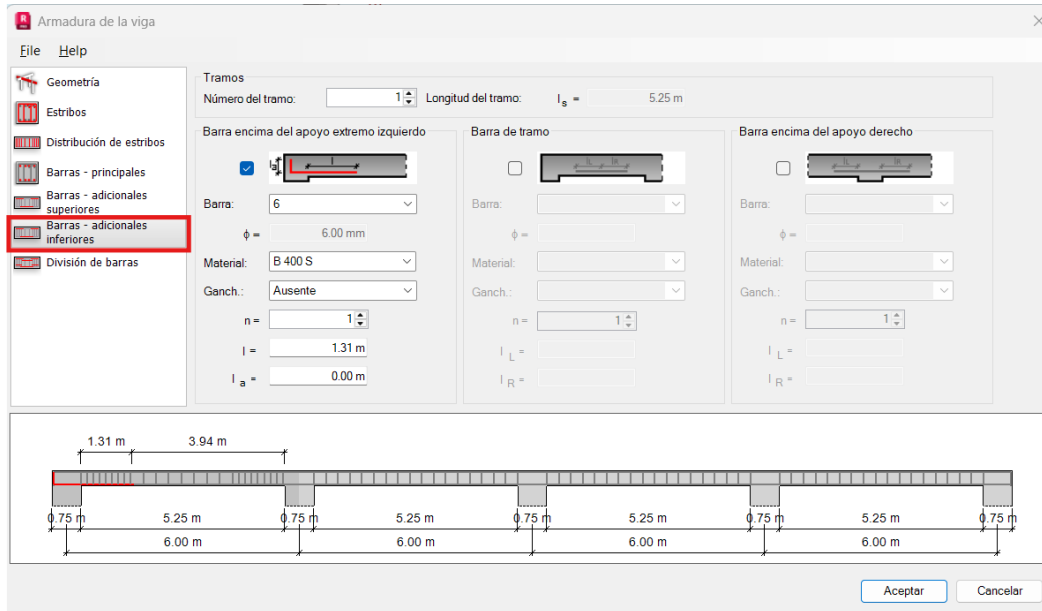
Refuerzo adicional superior



Fuente: Elaboración Propia

Figura 52

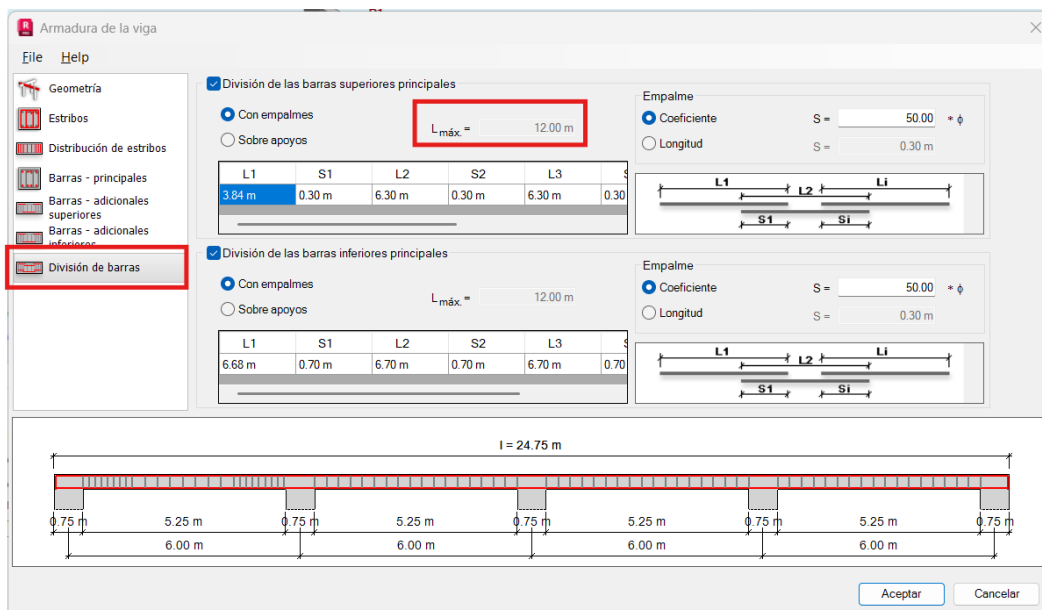
Refuerzo adicional inferior



Fuente: Elaboración Propia

Figura 53

Traslapes cuando los pórticos son mayores a 12 metros

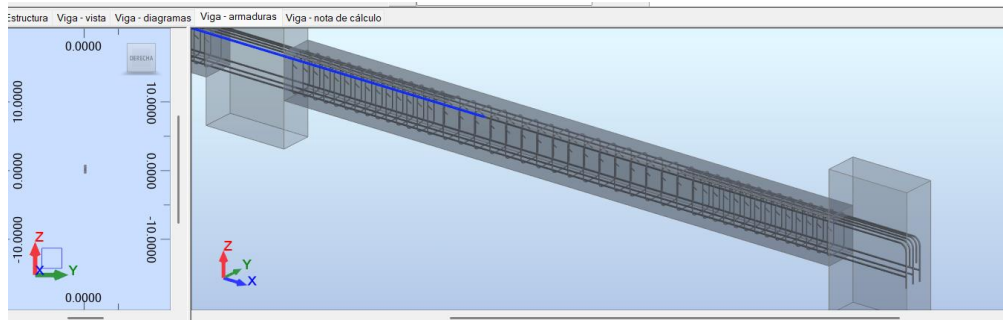


Fuente: Elaboración Propia

Dando como resultado el acero parametrizado y verificado que cumpla con los requisitos mínimo de demanda:

Figura 54

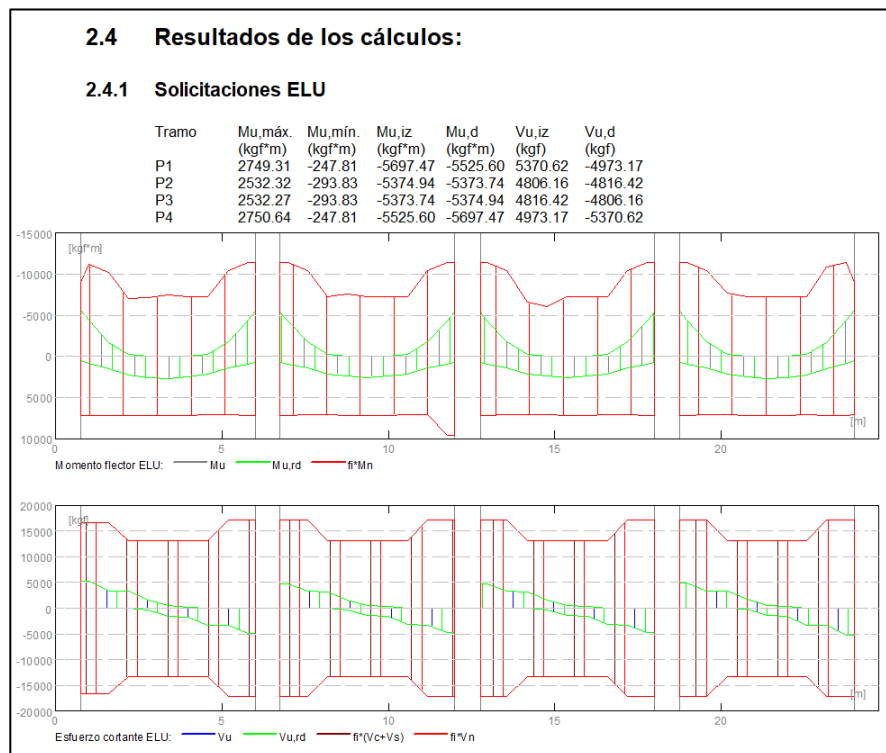
Vista 3D de detalle de acero de refuerzo de vigas



Fuente: Elaboración Propia

Figura 55

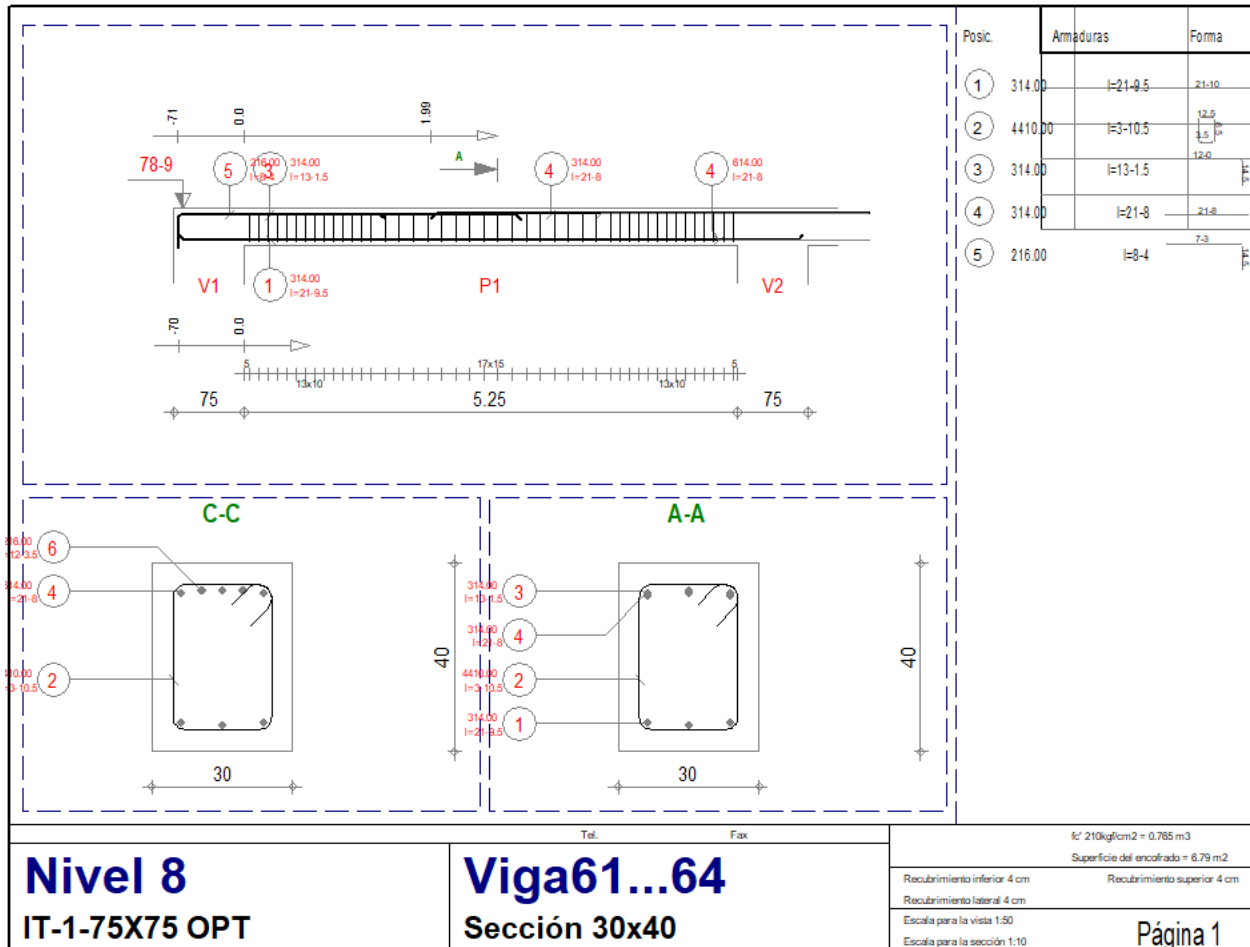
Resultados de los cálculos a las demandas solicitadas



Fuente: Elaboración Propia

Figura 56

Plano detallado para le armado de acero de la viga



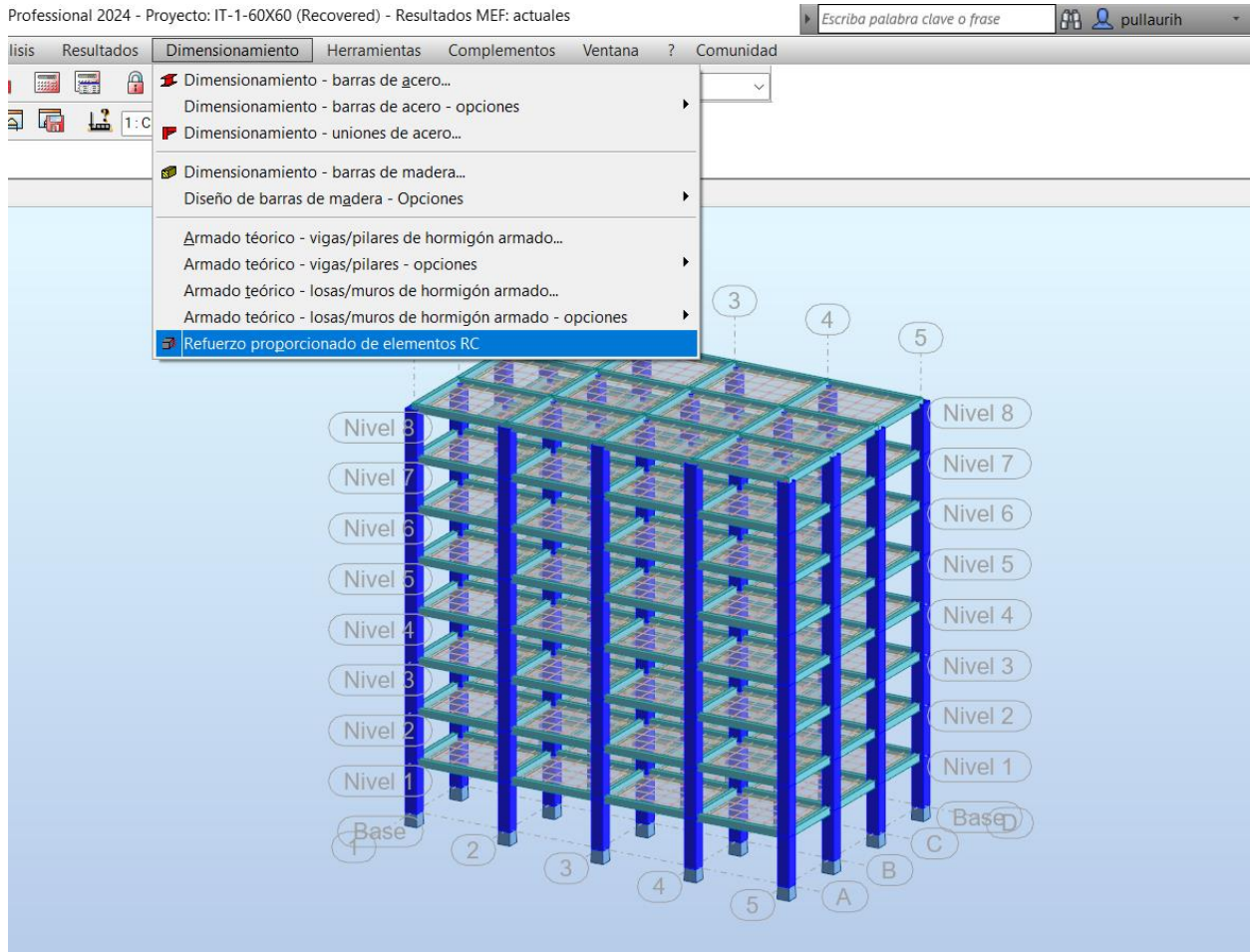
Fuente: Elaboración Propia

5.2.2 DISEÑO DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN CON ACERO DE REFUERZO DE LAS COLUMNAS

Se realiza los pasos descritos en el apartado 4.5.1 (Diseño de elementos de hormigón con acero de refuerzo de las vigas), hasta seleccionar las columnas y en dimensionamiento, Refuerzo proporcionado de elementos RC, se calcula el acero de refuerzo para las columnas seleccionadas.

Figura 57

Selección de elementos columnas y diseño de acero de refuerzo

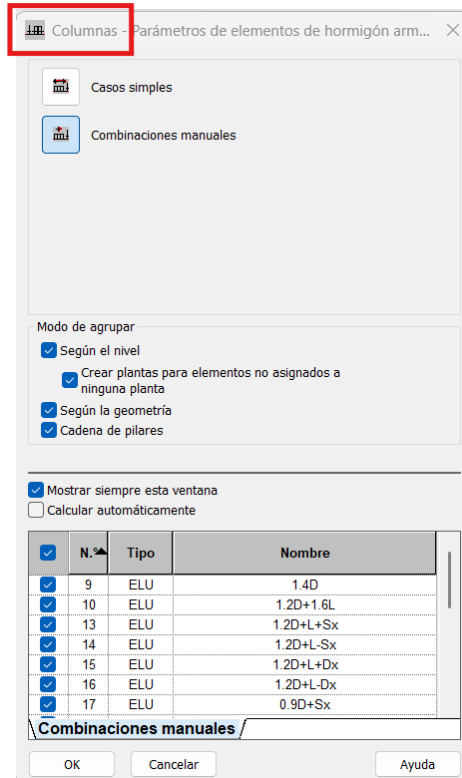


Fuente: Elaboración Propia

Se selecciona las combinaciones que actuaran para calcular el acero de refuerzo de los elementos seleccionados (columnas).

Figura 58

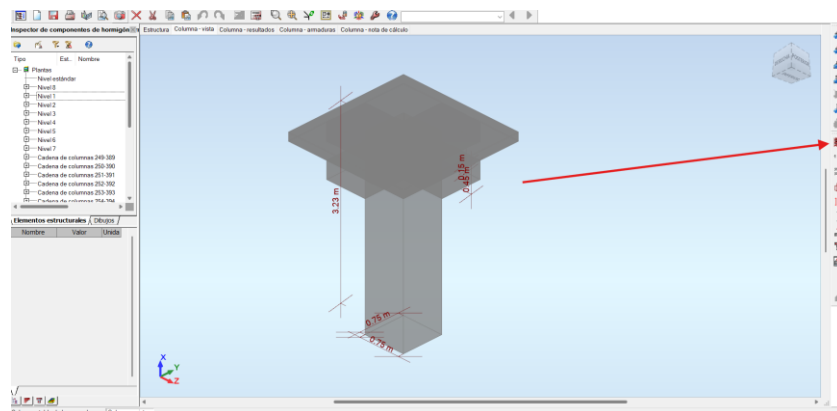
Selección de casos de carga para diseño de elementos columnas



Fuente: Elaboración Propia

Figura 59

Armaduras típicas para columnas

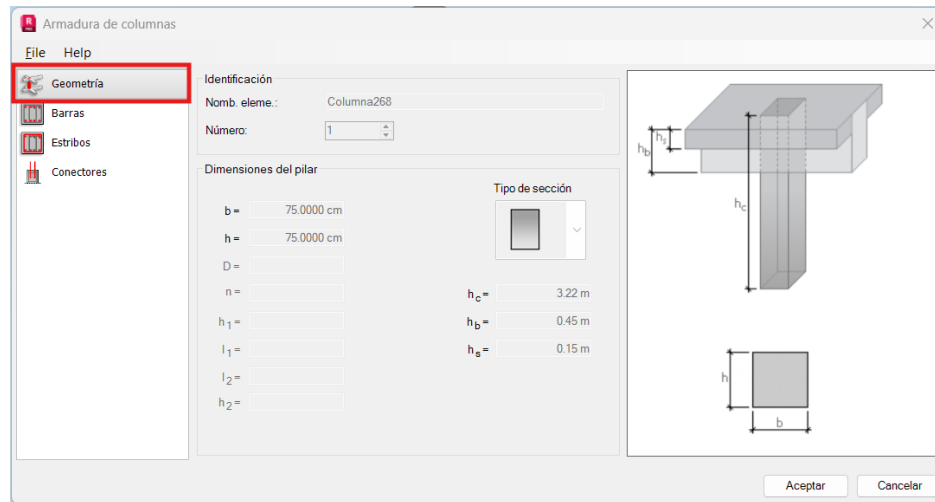


Fuente: Elaboración Propia

La siguiente sección de ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS - ARMADURAS DE COLUMNAS, se va a determinar el armado del acero principal longitudinal, los estribos de confinamiento con sus separaciones y los traslapes, en base a la geometría determinada.

Figura 60

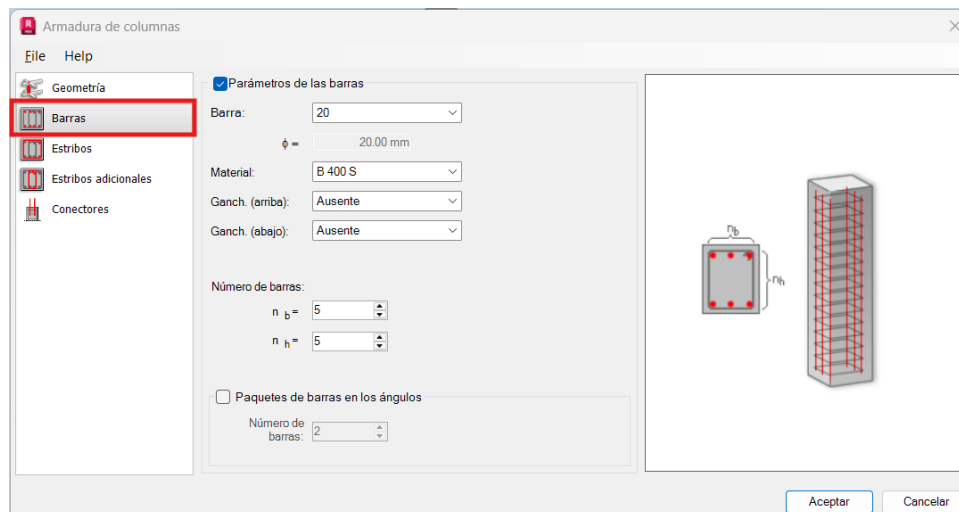
Geometría de la columna con sus respectivas dimensiones



Fuente: Elaboración Propia

Figura 61

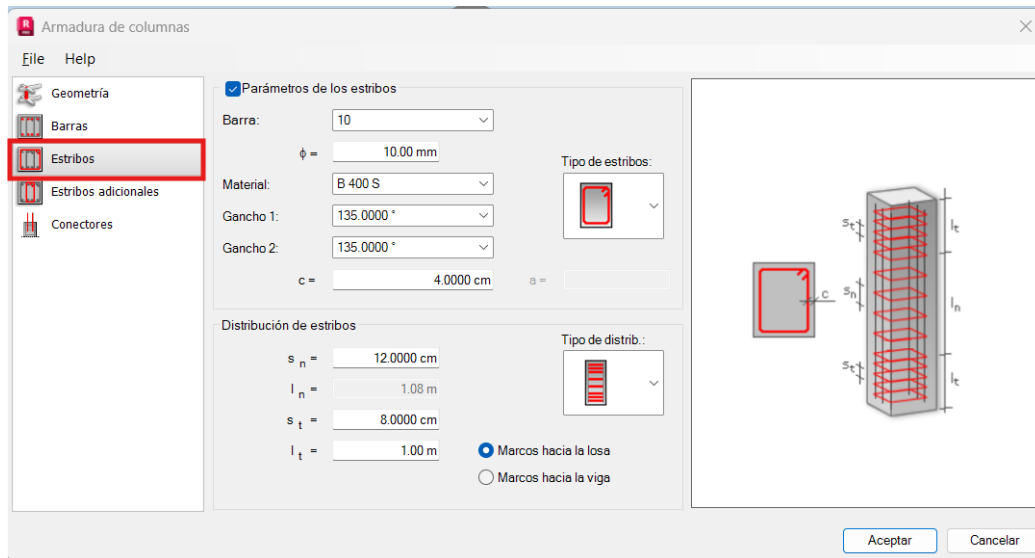
Acero longitudinal



Fuente: Elaboración Propia

Figura 62

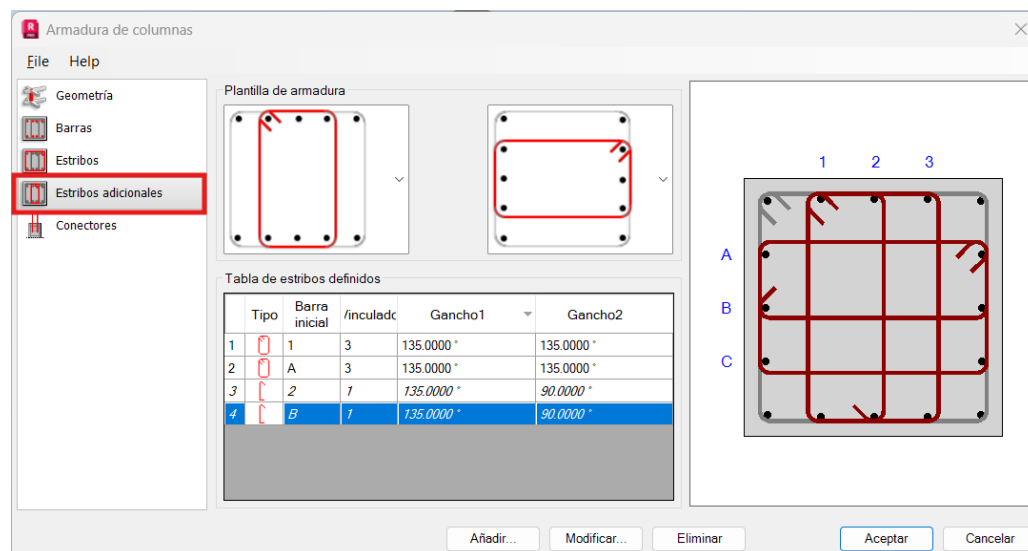
Parámetros de los estribos, diámetro, material y distribución



Fuente: Elaboración Propia

Figura 63

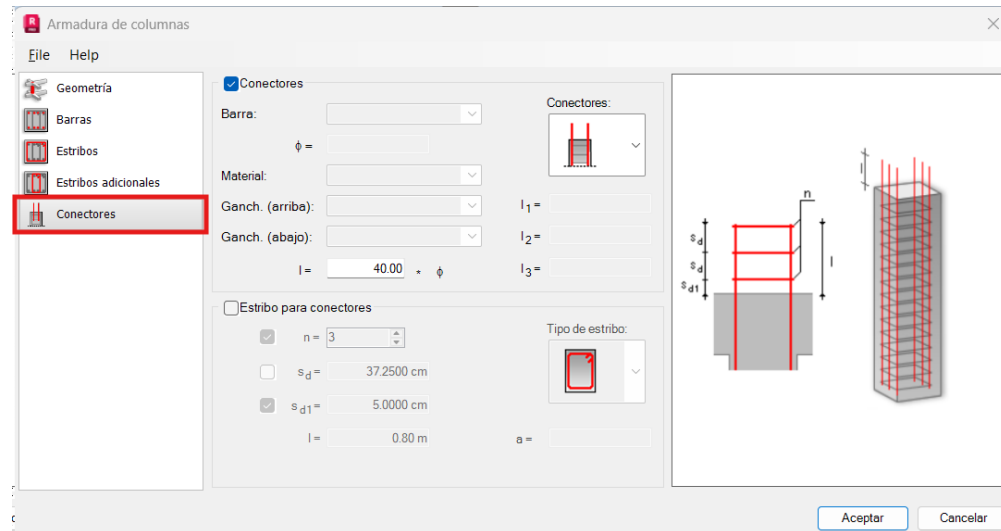
Estribos adicionales de confinamiento



Fuente: Elaboración Propia

Figura 64

Conectores para enlazar el siguiente piso

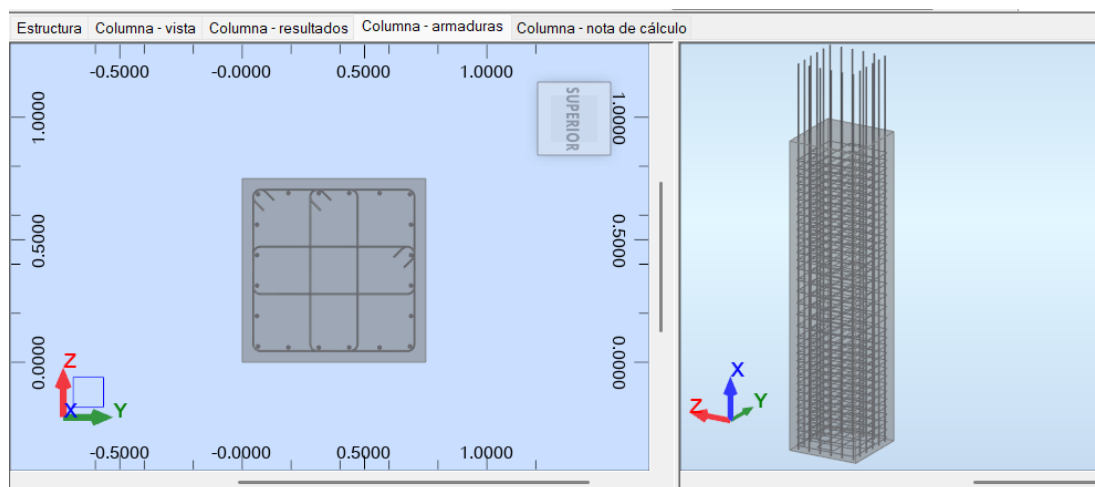


Fuente: Elaboración Propia

Dando como resultado el acero parametrizado y verificado que cumpla con los requisitos mínimo de demanda:

Figura 65

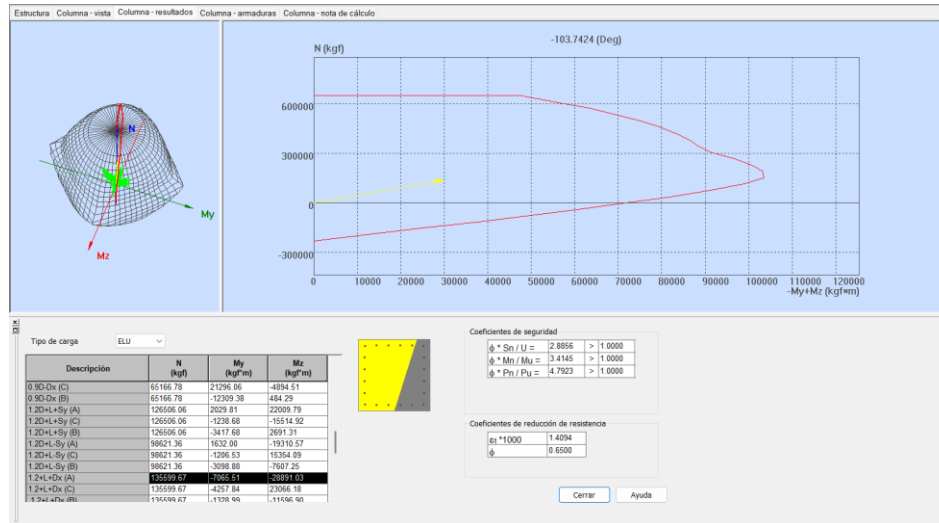
Vista 3D de detalle de acero de refuerzo de columnas



Fuente: Elaboración Propia

Figura 66

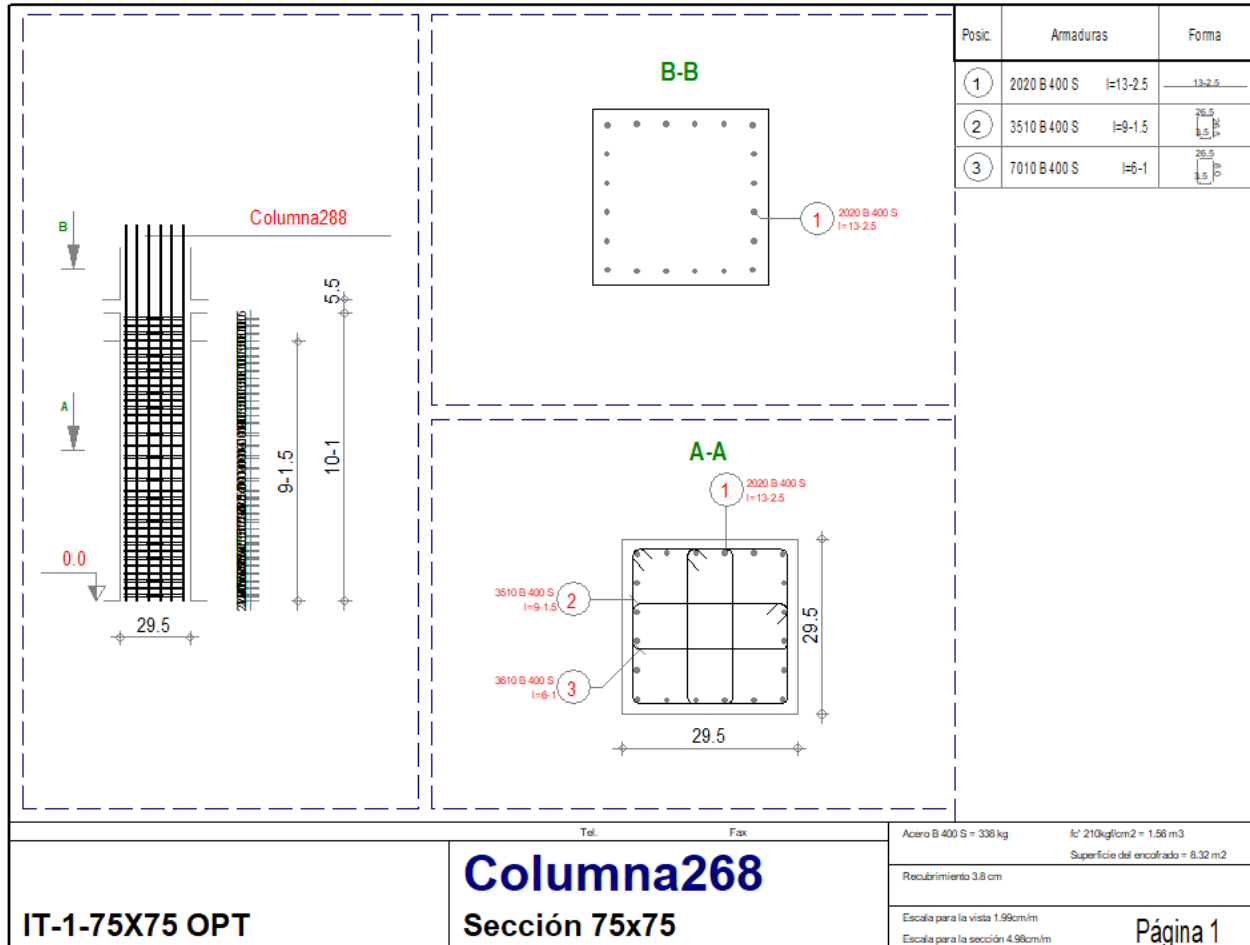
Diagrama de iteraciones de la columna



Fuente: Elaboración Propia

Figura 67

Plano detallado para el armado de acero de la columna



Fuente: Elaboración Propia

5.2.3 VERIFICACIÓN DE DISEÑO A FLEXIÓN DE LAS COLUMNAS VIGA FUERTE COLUMNA DÉBIL

En el diseño sismorresistente, en pórticos especiales resistentes a momento, la resistencia a flexión de las columnas, según el apartado 18.7.3.2 de la ACI 318-19 (American Concrete Institute & Jack P. Moehle, 2019), indica que debe cumplir con el criterio de resistencia a flexión de columna fuerte viga débil y debe cumplir con:

$$\sum M_{nc} \geq \frac{6}{5} \sum M_{nv}$$

Donde:

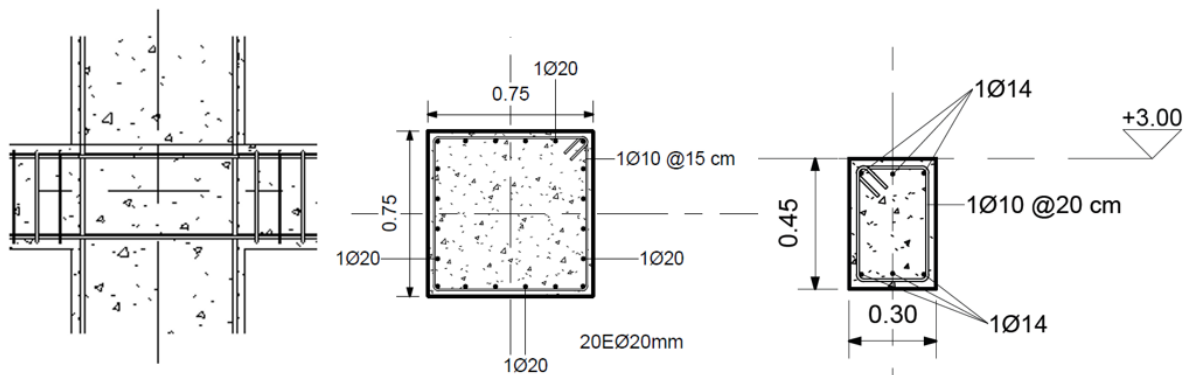
$\sum M_{nc}$: Sumatoria de Momentos nominales a flexión de las columnas que llegan al nodo.

$\sum M_{nv}$: Sumatoria de Momentos nominales a flexión de las vigas que llegan al nodo.

El nodo a ser analizado está en el primer piso, ya que suele ser el más crítico por mayor cortante basal, fuerza axial y demanda de ductilidad, ubicado en el Nivel +3.00, en el eje 2-BA con las siguientes secciones de viga y columna:

Figura 68

Nodo 2-B Nivel +3.00, con detalle de acero de columna y viga



Fuente: Elaboración Propia

Momento nominal en las vigas.

$$M_n = 1.25 * A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$a = \frac{A_s * \alpha * f_y}{0.85 * f'_c * b}$$

$$\alpha = 1.25$$

Tabla 24

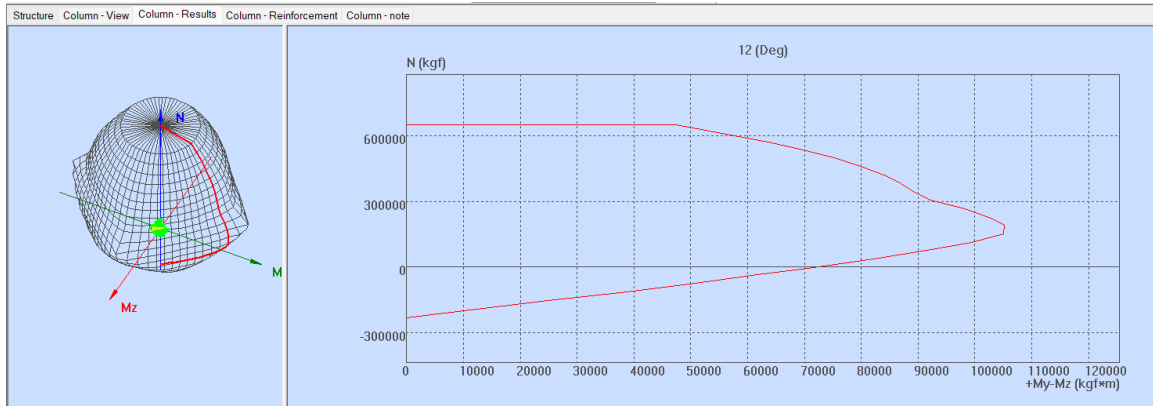
Datos de viga concurrentes al nodo

DATOS DE LA VIGA		
f'c (Resistencia Hormigón)	240	kg/cm ²
Fy (Fluencia del acero)	4200	kg/cm ²
b (base de la viga)	30	cm
h (Altura de la viga)	45	cm
α (coeficiente)	1.25	
Nro. varillas superiores	5	
Diámetro varilla superiores	14	mm
As sup. (Acero superior)	7.7	cm ²
Nro. varillas inferiores	5	
Diámetro varilla Inferiores	14	mm
As inf. (Acero Inferior)	4.62	cm ²
D (brazo de palanca)	39.3	cm
Mn sup (Momento nominal superior)	11.86	Tn-m
Mn inf (Momento nominal inferior)	7.11	Tn-m

Fuente: Elaboración propia

Figura 69

Diagrama de iteración de columna de sección de 75x75 con 20 varilla de Φ 20mm



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 25

Datos de viga concurrentes al nodo

CARGAS EN COLUMNAS	SUPERIOR	INFERIOR
Ppermanente [Kg]	143504	139454
Pmuerta [Kg]	72431	42110
Psismo [Kg]	476	398
Pn [Kg]	216411	181962
Mn [kg-m]	102000	105000
Mn [Tn-m]	102	105

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26

Datos de viga concurrentes al nodo

MOMENTOS VIGAS [Tn-m]		MOMENTOS COLUMNAS [Tn-m]		Σ Momento VIGAS	Σ Momento COLUMNAS	$\Sigma MC/\Sigma MV > 1.2$	CUMPLE/NO CUMPLE
VIGA IZQ	VIGA DER	COL SUP	COL INF	Tn-m	Tn-m		
11.86	7.11	105	102	18.97	207	10.91	Cumple

Fuente: Elaboración propia

El nodo 2-B nivel +3.00, cumple con el criterio de columna fuerte viga débil, conforme el apartado 18.7.3.2 de la ACI 318-19

5.3 MODELADO ESTRUCTURAL DE ACERO DE REFUERZO EN REVIT CON DYNAMO

Conforme al diseño de acero de refuerzo obtenido y el armado requerido en ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, se procede a realizar el armado de acero de refuerzo real en los elementos de vigas y columnas, tanto en acero longitudinal como en acero transversal (estribos), para ello se utilizará scripts de DYNAMO, para parametrizar y optimizar este procedimiento. Adicional se ha incluido una cimentación para incluir en el detallado de acero de refuerzo.

A continuación, se presenta el esquema realizado para realizar el armado de acero de refuerzo:

5.3.1 ZAPATAS, PEDESTALES Y VIGAS DE AMARRE

Primero se coloca zapatas, pedestales y vigas de cimentación, predeterminados.

Tabla 27

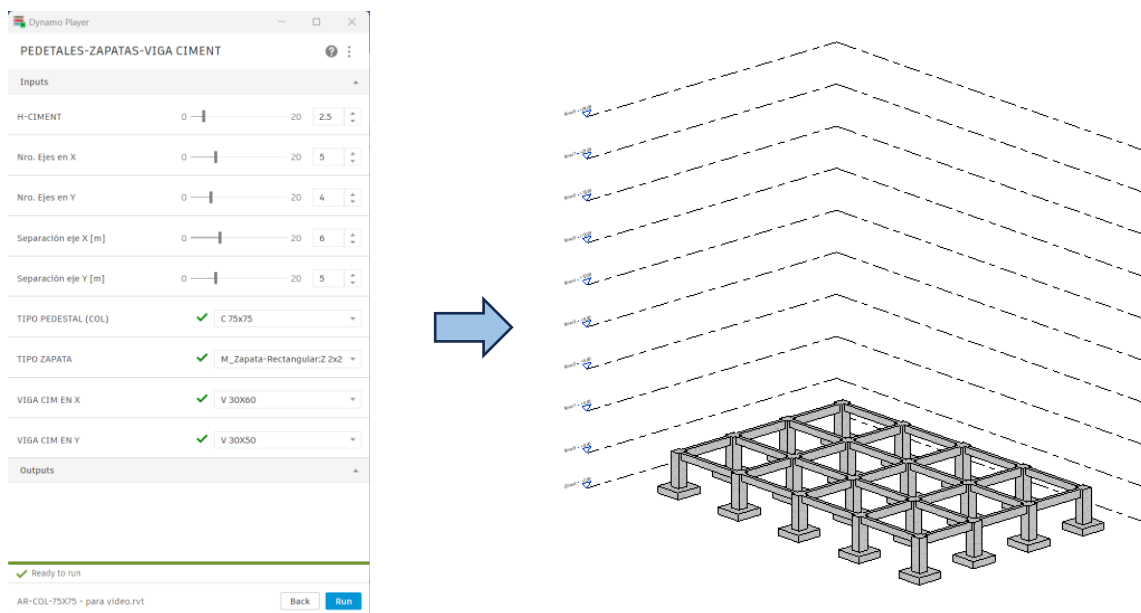
Dimensiones de zapatas pedestales y viga de cimentación.

ID	Zapata	Pedestal	Vigas	
			Dirección Eje X	Dirección Eje Y
1	Z-2x2x0.50m	C75x75cm	V30x60cm	V30x50cm

Fuente: Elaboración Propia

Figura 70

DYNAMO Creación de Zapatas, Pedestales y Viga de amarre



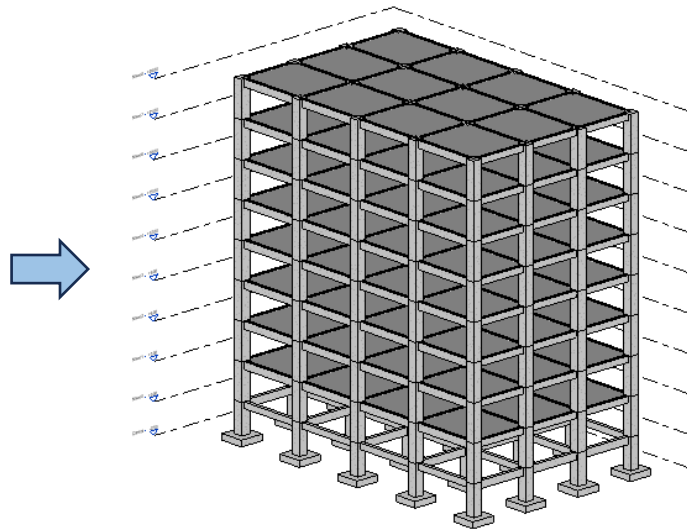
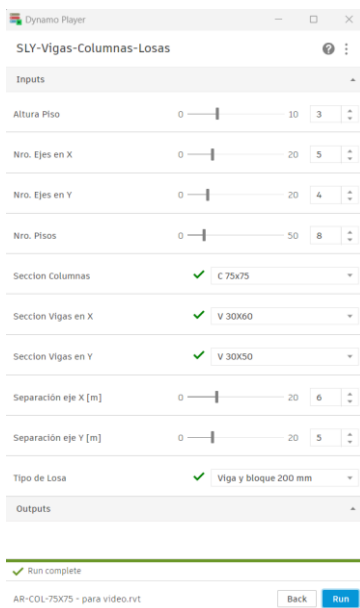
Fuente: Elaboración Propia

5.3.2 VIGAS, COLUMNAS Y LOSAS DE DISEÑO.

Dibujado de columnas, vigas y losas obtenidas del diseño en ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, con sus secciones optimas de diseño.

Figura 71

DYNAMO Vigas Columnas Losas



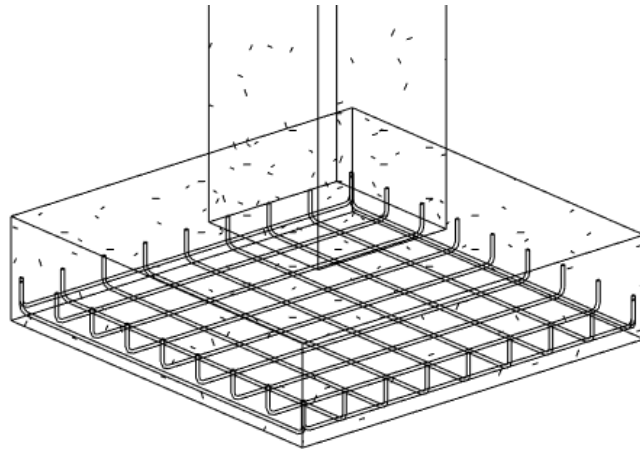
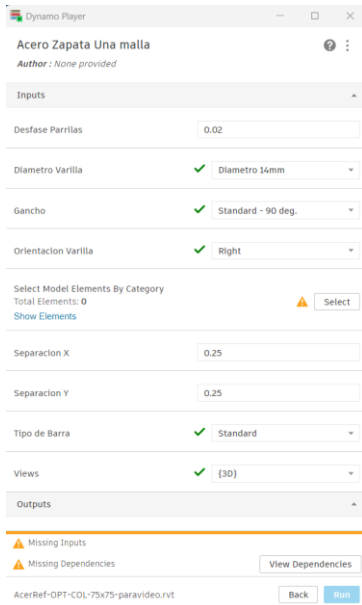
Fuente: Elaboración Propia

5.3.3 ACERO DE REFUERZO EN LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Con los scripts de DYNAMO realizados, se coloca el acero de refuerzo en zapatas, vigas, columnas y pedestales de manera parametrizada y automática.

Zapatas

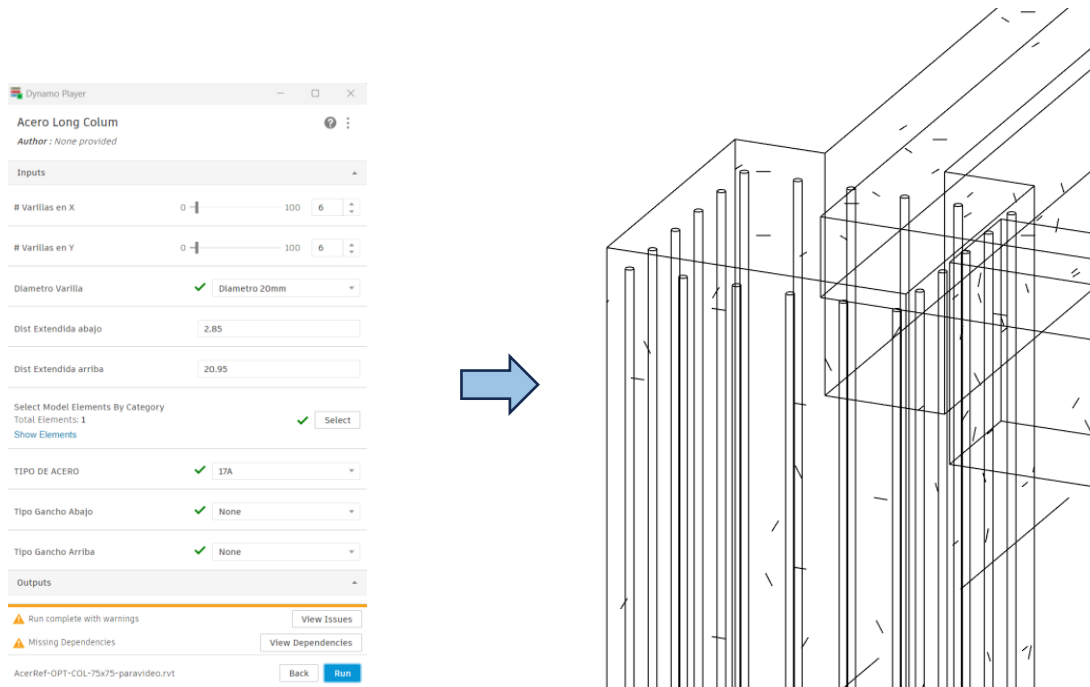
Con DYNAMO, se coloca el acero de refuerzo tipo parrilla en las zapatas, de manera automatizada.

Figura 72*DYNAMO Acero de Refuerzo de Zapatas*

Fuente: Elaboración Propia

Acero longitudinal en columnas

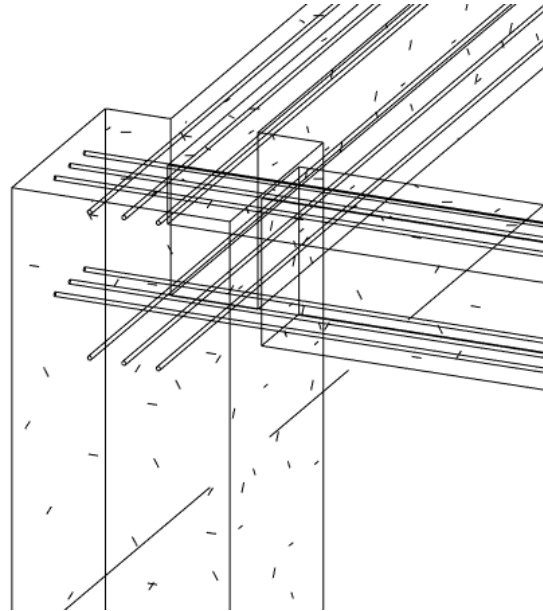
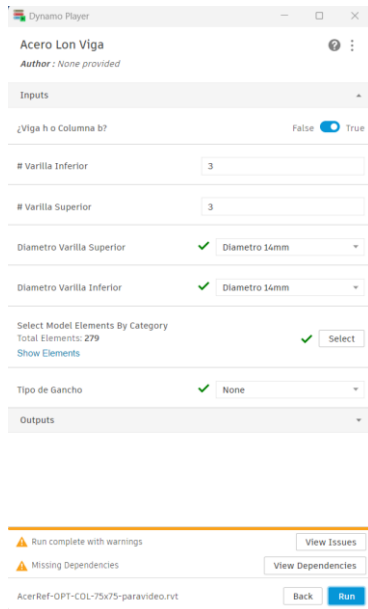
Con la ayuda de DYNAMO, se coloca el acero longitudinal de refuerzo en las columnas conforme al diseño de ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, 6 varillas longitudinales en cada cara de 20mm de diámetro, un total de 20 varillas, de maneta automatizada.

Figura 73**DYNAMO Acero de Refuerzo Longitudinal de Columnas**

Fuente: Elaboración Propia

Acero longitudinal en vigas

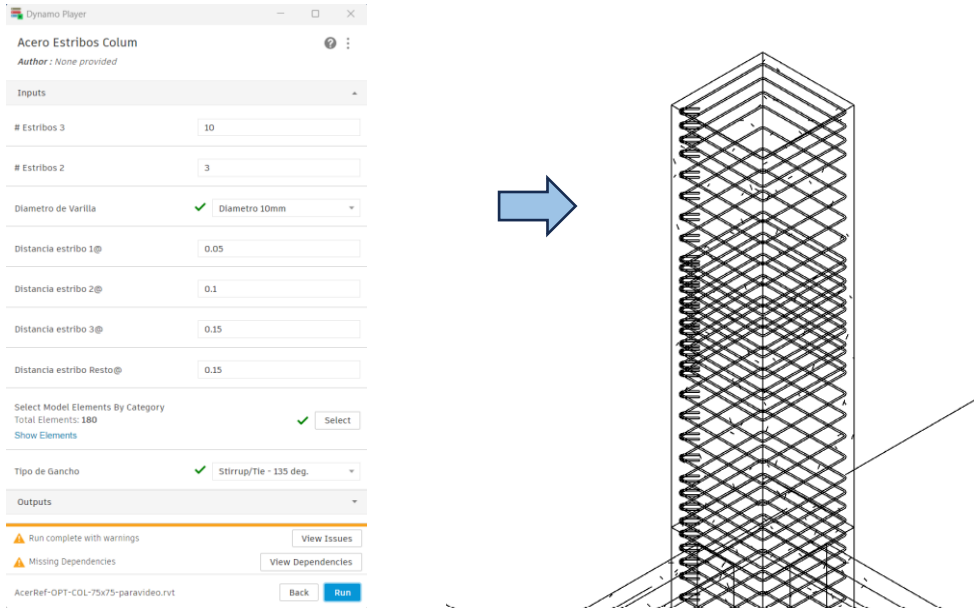
Con la ayuda de DYNAMO, se coloca el acero longitudinal de refuerzo en las vigas conforme al diseño de ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, 6 varillas longitudinales, 3 en la parte superior y 3 en la parte inferior de 14mm de diámetro, de maneta automatizada.

Figura 74**DYNAMO Acero de Refuerzo Longitudinal de Vigas**

Fuente: Elaboración Propia

Acero Transversal en columnas (estribos)

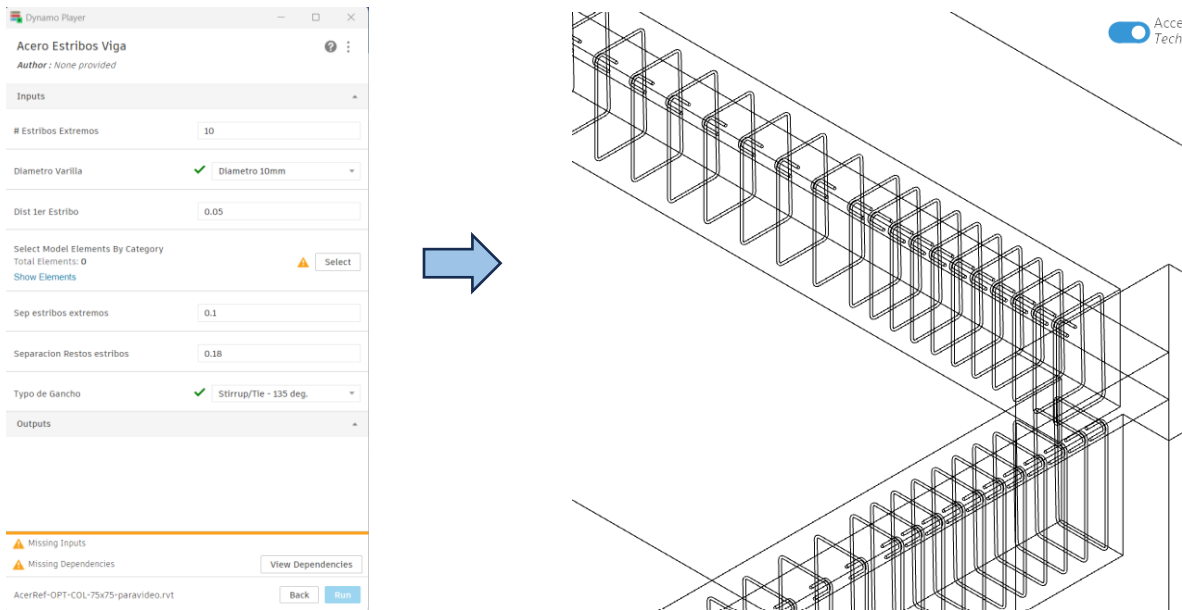
Con la ayuda de DYNAMO, se coloca el acero trasversal de refuerzo en las columnas conforme al diseño de ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, 1 estribo de 10mm con separaciones de 10 cm en los extremos y 15 cm en la parte central, de maneta automatizada.

Figura 75*DYNAMO Acero de Transversal de Columnas*

Fuente: Elaboración Propia

Acero transversal en vigas (estribos)

Con la ayuda de DYNAMO, se coloca el acero trasversal de refuerzo en las vigas conforme al diseño de ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, 1 estribo de 10mm con separaciones de 10 cm en los extremos y 18 cm en la parte central, de maneta automatizada.

Figura 76*DYNAMO Acero de Transversal de Vigas*

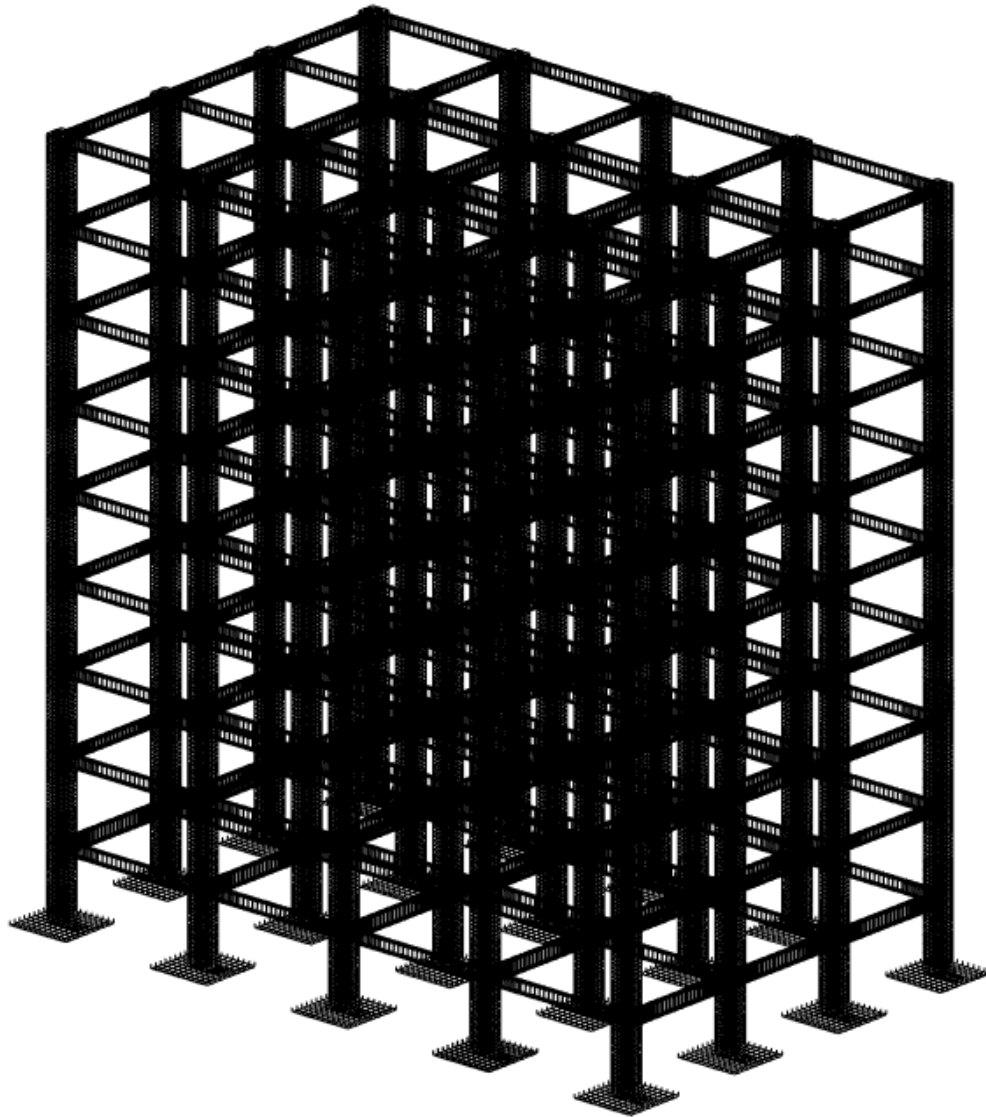
Fuente: Elaboración Propia

Armado total del Proyecto con acero de Refuerzo

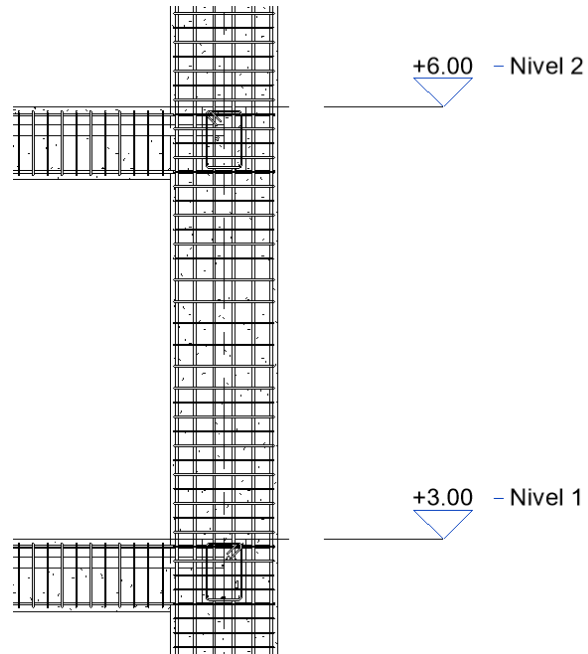
Con la ayuda de DYNAMO, se ha podido optimizar el armado de acero de refuerzo en REVIT conforme el diseño requerido en ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS de los elementos estructurales, acero longitudinal (acero principal) y transversal (estribos). Obteniendo de manera total el armado de refuerzo como se indica a continuación:

Figura 77

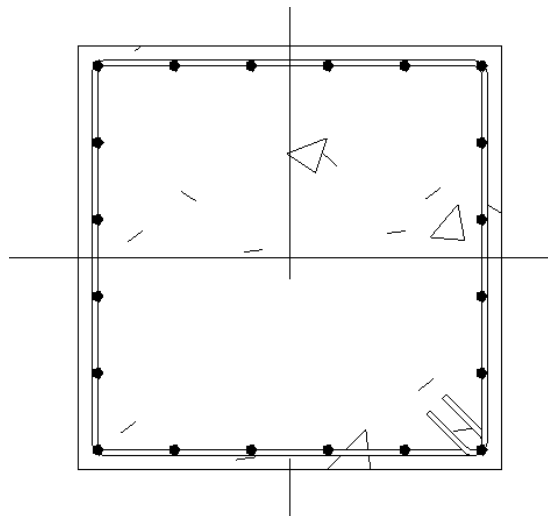
Armado de Refuerzo total con DYNAMO



Fuente: Elaboración Propia

Figura 78*Vista Lateral de armado de acero de Columna*

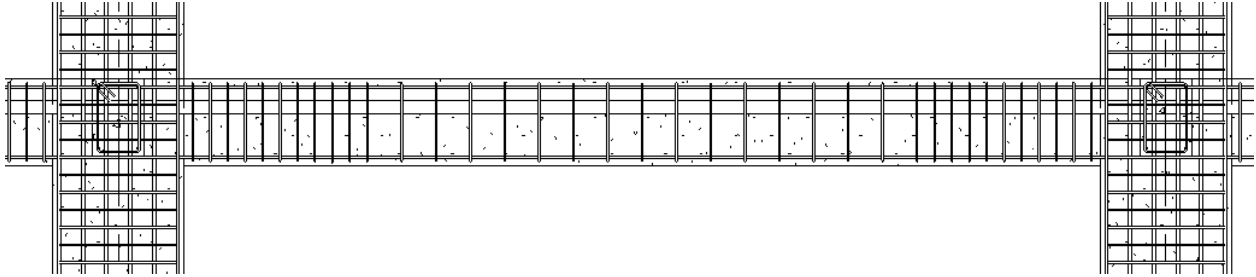
Fuente: Elaboración Propia

Figura 79*Sección Transversal de armado de acero de Columna*

Fuente: Elaboración Propia

Figura 80

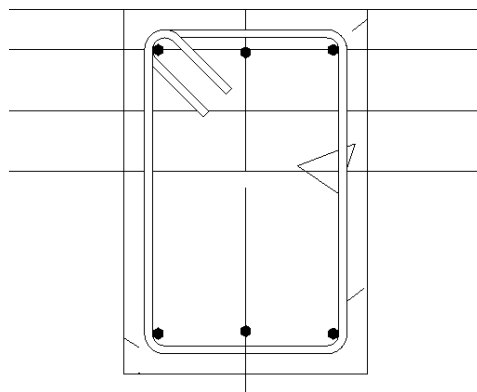
Vista Lateral de armado de acero de Viga



Fuente: Elaboración Propia

Figura 81

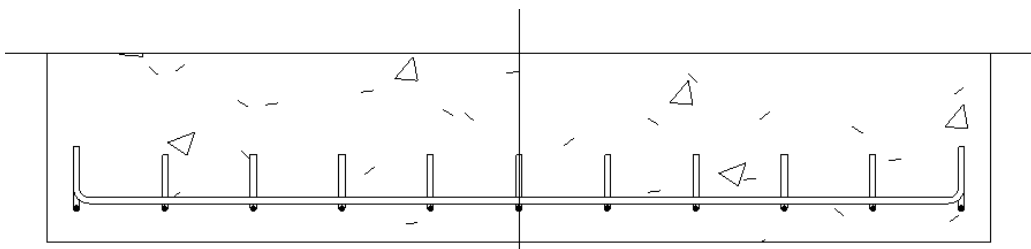
Sección Transversal de Armado de Viga



Fuente: Elaboración Propia

Figura 82

Sección Transversal de Armado de Zapata



Fuente: Elaboración Propia

5.3.4 DETALLADO Y LAMINADO DEL PROYECTO CON EL PROGRAMA REVIT

Con la ayuda REVIT, y sus componentes se procederá a realizar el detallado de los elementos como cortes, secciones, vista 3D, cuantificación de materiales, entre otros con sus tablas de cantidades. Ver Anexo 1.

6. CONCLUSIONES

La integración de la metodología Building Information Modeling (BIM) mediante el uso combinado de Autodesk Revit, Dynamo y Robot Structural Analysis permitió desarrollar un flujo de trabajo eficiente para el modelado, análisis y optimización del diseño estructural de una edificación alta de hormigón armado, mejorando la coherencia entre el modelo geométrico, el modelo analítico y los resultados estructurales obtenidos.

La parametrización y automatización del modelo estructural con Dynamo simplificó la creación de varias alternativas de diseño en menos tiempo. Esto hizo posible una valoración sistemática del comportamiento sísmico del edificio en aspectos como masa estructural, periodo fundamental, cortante basal y derivas, mostrando la utilidad de estas herramientas en comparación con los métodos de diseño usuales.

Los resultados del análisis modal, estático equivalente y dinámico espectral dieron muestra que las configuraciones estructurales estudiadas cumplen con las exigencias de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-DS (2015), confirmándose el control apropiado de los periodos de vibración, los cortantes basales y las derivas máximas inelásticas.

Se pudo identificar con el análisis comparativo de las distintas alternativas de diseño, una configuración estructural óptima, en la cual se logra un equilibrio adecuado entre rigidez, masa y desempeño sísmico, evitando el sobredimensionamiento de los elementos estructurales y demostrando que la optimización debe abordarse desde una perspectiva global del comportamiento estructural y no únicamente desde la reducción de secciones.

La parametrización y automatización del dibujo de acero de refuerzo en REVIT, mediante scripts de DYNAMO, ha facilitado realizar en un tiempo muy reducido la creación del acero de refuerzo requerido conforme al diseño obtenido en ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS.

Con la ayuda de la metodología BIM, mediante la implementación de las HERRAMIENTAS como REVIT, ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS Y DYNAMO, ha ayudado de manera significativa transformando el proceso de diseño y análisis sismo resistente. DYNAMO ha permitido y facilitado la creación de múltiples modelos, para poder realizar un análisis más eficaz y versátil. Al centrarse en la aplicación y cumplimiento de la normativa sísmica NEC-DS (Normativa Ecuatoriana de la Construcción – Diseño Sísmico), se ha podido obtener y garantizar un diseño confiable. Con la parametrización de DYNAMO que permite el detallado del acero de refuerzo en REVIT, se ha podido obtener cantidades de materiales precisas. Con la conjunción de estas herramientas han permitido mejorar la productividad, seguridad en diseño estructural con normativa sísmica, pudiendo realizarse un proceso más dinámico e integrado.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda que en futuras investigaciones se amplíe el proceso de optimización estructural incorporando un mayor número de variables de diseño, tales como la variación simultánea de secciones en columnas, vigas y losas, así como diferentes configuraciones estructurales. Esto permitiría evaluar con mayor profundidad el comportamiento global de la edificación y validar la selección del modelo óptimo bajo distintos escenarios de diseño, manteniendo el cumplimiento de los criterios establecidos en la NEC-15.

Se aconseja complementar el análisis lineal con métodos no lineales, como el análisis estático no lineal o el análisis dinámico paso a paso, para valorar de forma más realista el comportamiento sísmico de la estructura ante demandas sísmicas elevadas. Esto posibilitaría comprender mejor el comportamiento inelástico, la disipación de energía y los modos de fallo del sistema estructural.

Es recomendable mejorar y estandarizar los scripts de Dynamo, documentando su lógica y funcionamiento, para permitir su reutilización y adaptación en otros proyectos con diferentes alturas, geometrías y condiciones sísmicas. Así, la metodología BIM propuesta podría consolidarse como una herramienta replicable en la práctica profesional, reduciendo tiempos de modelado, minimizando errores y mejorando la eficiencia del diseño estructural.

REFERENCIAS

- Alsehaimi, A., Baarimah, A. O., Ramu, M. B., Alajmi, M., & Ahmed, W. (2025). Integration of BIM in project management phases for achieving sustainable success in small construction projects: A SEM-based approach. *Ain Shams Engineering Journal*, 16(10).
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103649>
- American Concrete Institute, & Jack P. Moehle. (2019). *ACI 318-19*.
- Bravo, F. (2022). *OPTIMIZACION ESTRUCTURAL MEDIANTE ALGORITMOS*.
- Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2013). The project benefits of building information modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31(7).
<https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>
- Bynum, P., Issa, R. R. A., & Olbina, S. (2013). Building Information Modeling in Support of Sustainable Design and Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000560](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000560)
- CHOPRA, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras*.
- Eastman, C. M. . (2008). *BIM handbook : a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. Wiley.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). BIM handbook: A Guide to building Information Modeling for owners, managers, designers, Engineers and contractors (2nd edition ed.): Wiley Publishing. *John Wiley & Sons, Inc, Hoboken*.
- Estructurales, F., María Orózco Murillo, E., Edith Pacheco Hernández, L., & Pérez Niño Carlos Daniel Quintero Mercado, Á. (s/f). *MANUAL INTERACTIVO PARA MODELADO REVIT: Centro para el Desarrollo del Hábitat y la Construcción Regional Antioquia AUTORES*.
www.sena.edu.co
- Grünthal, Gottfried. (1998). *European macroseismic scale 1998 : EMS-98*. European Seismological Commission, Subcommittee on Engineering Seismology, Working Group Macroscopic scales.

- Hurtado, N. R. D., & Minaya, A. E. M. (2014). Diseño Estructural Sismorresistente De Un Edificio De Siete Niveles Bajo La Metodología Bim En La Provincia De Pomabamba, Ancash, 2018. *Huaraz-Perú*.
- Jorge Conde-Conde, M. B. B. A. B. L. M. de la C. M. J. C. B. J. G.-M. M. A. M. M. L. N.-S. J. F. de la T. (2021). *Estructuras sismorresistentes* (UPM Press, Ed.).
- Jose Manuel Palomino Ojeda. (2023). Algoritmo para automatizar el detallado de acero de refuerzo en modelos BIM mediante Dynamo. *Revista Científica Pakamuros*, 11(1), 67–83. <https://doi.org/10.37787/pakamuros-unj.v11i1.359>
- Julián, W., León, C., & Civil, I. (2009). ESTIMACIÓN DE LOS PERIODOS NATURALES DE VIBRACIÓN DE VIVIENDAS DE BAJA ALTURA CON MUROS DE CONCRETO ESTIMATION OF THE NATURAL VIBRATION PERIODS IN TRADITIONAL HOUSING WITH CONCRETE WALLS. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 19(1), 39–54.
- Kassem, M., & Succar, B. (2017). Macro BIM adoption: Comparative market analysis. *Automation in Construction*, 81, 286–299. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.04.005>
- Marsh -Marsh, K., & Llc, A. (2014). *Robot Structural Analysis: Making the Change Code Learning Objectives*. www.marshapi.com
- NEC-SE-CG. (2014). *CARGAS (NO SÍSMICAS)*.
- NEC-SE-DS. (2015). *PELIGRO SÍSMICO DISEÑO SISMO RESISTENTE*.
- Ojeda, J. M. P., Calderón, B. A. C., Huatangari, L. Q., Campos, L., & Lozano, F. (2023). Algoritmo para automatizar el detallado de acero de refuerzo en modelos BIM mediante Dynamo. *Revista Científica Pakamuros*, 11(1). <https://doi.org/10.37787/4tn1hb28>
- Poó Rubio, A. M., & Audeves Pérez, S. A. (2023). Introducción a Building Information Modeling (BIM) en Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AEC). En *Avances de las mujeres en las ciencias, las humanidades y todas las disciplinas. Libro científico I 2023* (pp. 297–309). Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Azcapotzalco. <https://doi.org/10.24275/uama.128.10464>
- Song, S. Y., Lin, J. R., Zhou, Y. C., & Ding, W. Q. (2021). Parameterized FEA Model Generation and Simulation of Underground Structures Based on BIM: A Case Study. *Computing in*

- Civil Engineering 2021 - Selected Papers from the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering 2021*. <https://doi.org/10.1061/9780784483893.051>
- Suárez, V. (2009). Diseño Basado en Desplazamientos, una Alternativa Racional al Diseño Basado en Fuerzas. En *Revista Tecnológica ESPOL-RTE* (Vol. 22). Noviembre.
- Travaglini, A., Radujkovic, M., & Mancini, M. (2014). Building Information Modelling (BIM) and Project Management: a Stakeholders Perspective. *Organization, technology and management in construction: An international journal*, 6(2).
<https://doi.org/10.5592/otmcj.2014.2.8>
- Vorwerk, A. M., & Bd+c, A. P. (s/f). *Integrating Structural Design and Analysis: The Basics of a Revit-Robot Structural Analysis Workflow*. <http://dynamobim.org/>.

ANEXOS