



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**CALIBRACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO PARA UN EDIFICIO NO
CONVENCIONAL DE HORMIGON ARMADO**

POR

Monseratt Alejandra Estay Espinoza

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Rodrigo Silva Muñoz

Profesionales Supervisores
Alexander Opazo Vega
Víctor Aguilar Vidal

Marzo 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Monseratt Alejandra Estay Espinoza

© 2024 Monserratt Alejandra Estay Espinoza

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado especialmente a mi Madre, quien no dudó en apoyarme desde el día uno en que comenzó este camino y que hoy, a pesar de su ausencia, le da sentido a mi esfuerzo.

También a mis amigos, Javiera, Gabriel, Lucca, Joaquín, Sebastián, Felipe y Pedro, por hacer de esta etapa una travesía entre estrés y risas. Por su compañía y paciencia, gracias.

AGRADECIMIENTOS

Mis sinceros agradecimientos a los profesores Alexander Opazo y Rodrigo Silva, por su trabajo como docentes dentro del departamento de Ingeniería Civil y como guías de este trabajo, sus grandes capacidades para transmitir sus conocimientos motivaron y enriquecieron mi formación como profesional.

También agradecer al profesor Víctor Aguilar, por su compromiso como profesor de comisión al brindarme en cada oportunidad sus consejos y retroalimentación constructiva.

RESUMEN

El desarrollo de métodos numéricos y herramientas de monitoreo han incentivado el estudio del comportamiento de estructuras existentes, generando modelos digitales actualizados que disminuyan las diferencias entre el comportamiento observado y el digital. Lo anterior, junto con el interés sobre su aplicación en edificios de mediana altura y de valor arquitectónico, agrupan las principales motivaciones para estudiar el Edificio Innovación de la Universidad del Bio-Bio. Por estas razones, el objetivo general de este trabajo fue calibrar un modelo numérico para este edificio en base a sus mediciones experimentales.

Para cumplir con dicho objetivo, se modeló el edificio utilizando el programa ETABS. El error del modelo se calculó en base a las diferencias entre las frecuencias numéricas y experimentales, resultando en un error del 12% para el modelo base preliminar. Del modelo se identificaron 18 variables potencialmente significativas sobre su comportamiento dinámico. De estas, 12 correspondían a módulos de elasticidad del modelo (rigideces), y 6 cargas distribuidas (masas). Luego se aplicó un análisis de sensibilidad mediante el programa quoFEM, utilizando el método de muestreo LHS. Se realizaron 100 iteraciones por variable y de este análisis tres variables se identificaron como significativas utilizando los Índices de Sobol. Dos de las variables pertenecían a los módulos de elasticidad de muros y columnas del primer y último piso, y la última correspondía a la carga distribuida aplicada en el último piso. Con respecto a estos resultados, la influencia del módulo de elasticidad del primer piso es esperada debido a que estos representan una parte fundamental dentro de la transmisión de cargas desde los pisos superiores a la base. En cuanto a la carga aplicada en su último piso, se puede explicar su influencia debido a que los desplazamientos con respecto a la base del edificio aumentan en altura y la masa en este nivel puede amplificar los momentos torsionales, afectando el comportamiento del edificio.

Con estas tres variables se procedió a realizar la calibración del edificio, también utilizando el programa quoFEM, junto con el método de optimización NL2SOL. Los resultados de la calibración produjeron distintas soluciones óptimas (óptimos locales), lo que podría responder a una escasa cantidad de datos experimentales con los cuales discriminar soluciones. Para sortear este problema, se decidió calibrar el modelo con los Diagramas Boxplot, con la cual se obtuvo un 5% de error con respecto a las mediciones experimentales.

ABSTRACT

The development of numerical methods and monitoring tools has encouraged the study of the behavior of existing structures, leading to the generation of updated digital models that reduces differences between observed and analytical behavior. This, together with the interest in their application in medium-rise buildings of architectural value, is the main motivation for studying the Edificio Innovación of the Universidad del Bio-Bio. For these reasons, the main objective of this project was to calibrate its numerical model based on experimental measurements.

To achieve this objective, the building was modeled using the ETABS software. The model error was calculated based on the differences between numerical and experimental frequencies, resulting in 12% error for the preliminary baseline model. From the model, 18 potentially significant variables were identified for its dynamic behavior. Among these, twelve were modules of elasticity (stiffness) and six were loads distributed on each floor (masses). Then, a sensitivity analysis was applied, using the quoFEM software, employing the LHS sampling method. A total of 100 iterations per variable were performed, and from this analysis, three variables were identified as significant using Sobol's Indices. Two of the variables pertained to the modules of elasticity of walls and columns on the first and last floors, while the last one corresponded to the distributed load applied on the fifth floor. Regarding these results, the influence of the elastic modulus of the first floor is expected because these represent a fundamental part in the transmission of loads from upper floors to the base. As for the load applied on its last floor, its influence can be explained due to the displacements relative to the building's base increasing in height, and the mass at this level may amplify torsional moments, affecting the behavior of the building.

With these three variables, the building calibration was conducted, also using the quoFEM program, along with the NL2SOL optimization method. The calibration produced different optimal solutions (local optima), which could be due to a limited amount of experimental data with which to discriminate solutions. To overcome this problem, it was decided to calibrate the model with Boxplot Diagrams, resulting in an 5% error with respect to experimental measurements.

INDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivo de la memoria.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Metodología de trabajo.....	2
1.4 Principales resultados y conclusiones.....	3
1.5 Organización de la memoria.....	4
CAPÍTULO 2: BASES CONCEPTUALES Y APLICACIONES PRACTICAS.....	6
2.1 Introducción.....	6
2.2 Alcances de la modelación.....	6
2.3 Bases teórico-prácticas del análisis de sensibilidad.....	7
2.4 Bases teórico-prácticas de los procesos de calibración.....	9
2.5 Conclusiones.....	10
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	11
3.1 Introducción.....	11
3.2 Materiales.....	11
3.2.1 Planos y especificaciones técnicas del edificio.....	11
3.2.2 Periodos fundamentales del edificio.....	17
3.2.3 Software ETABS.....	19
3.2.4 Aplicación quoFEM.....	19
3.3 Metodología.....	20
3.3.1 Modelación del edificio de hormigón armado.....	20

3.3.2 Análisis de sensibilidad	22
3.3.3 Calibración numérica del edificio modelado	25
3.4 Conclusiones	26
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	27
4.1 Introducción	27
4.2 Validación del modelo numérico inicial	27
4.3 Ranking de variables por sensibilidad	34
4.4 Modelo calibrado del edificio	38
4.5 Conclusiones	43
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	44
5.1 Conclusiones	44
5.2 Comentarios	47
GLOSARIO	48
REFERENCIAS	49
ANEXOS	50
ANEXO 1.1 Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible	50
ANEXO 4.1 Cubicación de elementos no estructurales	51
ANEXO 4.2 Aplicación Cargas No Estructurales	53
ANEXO 4.3: Configuración de quoFEM para el Análisis de Sensibilidad	57
ANEXO 4.4 Configuración de quoFEM para la Calibración	60
ANEXO 4.5 Códigos Python Análisis de Sensibilidad	62
ANEXO 4.6 Código Python Calibración	67

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Modos de vibrar experimentales	18
Tabla 3.2 Tipos de elementos en la modelación.....	21
Tabla 3.3 Nomenclatura módulos de elasticidad.....	22
Tabla 3.4 Nomenclatura cargas distribuidas.....	23
Tabla 4.1 Resumen Cargas Distribuidas.....	30
Tabla 4.2 Resultados del análisis modal.....	31
Tabla 4.3 Índices de Sobol	35
Tabla 4.4 Variables fijas.....	39
Tabla 4.5 Variables a iterar	39
Tabla 4.6 Definición variables a iterar (Calibración N°1)	40
Tabla 4.7 Variables Calibradas (Calibración N°1).....	40
Tabla 4.8 Definición variables a iterar (Calibración N°2)	40
Tabla 4.9 Variables Calibradas (Calibración N°2).....	41
Tabla 4.10 Definición valores calibración N°3	42
Tabla 4.11 Modos de vibrar del modelo calibrado.....	42
Tabla 4.12 Resumen error asociado a las frecuencias numéricas.....	42
Tabla 4.13 Resumen Frecuencias numéricas.....	43
Tabla A.4.1.1 Cubicación elementos no estructurales - Oficinas.....	51
Tabla A.4.1.2 Cubicación elementos no estructurales - Losas de H.A	51
Tabla A.4.1.3 Cubicación elementos no estructurales - Aleros Perimetrales.....	51
Tabla A.4.1.4 Cubicación elementos no estructurales - Techumbre	52
Figura A.4.2.1 Cargas No estructurales - Oficinas (kg/m).....	53
Figura A.4.2.2 Cargas No Estructurales 1er Piso - Aleros (kg/m ²).....	54
Figura A.4.2.3 Cargas No Estructurales 1er piso - Losas de Hormigón (kg/m ²)	55
Figura A.4.2.4 Cargas No estructurales - Techumbre (kg/m ²)	56

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Imagen del proceso constructivo losa nivel 5	12
Figura 3.2 Plano de estructuras primer nivel (cm)	13
Figura 3.3 Plano de estructuras quinto nivel (cm).....	14
Figura 3.4 Estructuración en vigas de madera primer piso (cm).....	15
Figura 3.5 Esquema estructura de techo (Parte 1)	16
Figura 3.6 Esquema estructura de techo (Parte 2)	17
Figura 3.7 Puntos de medición (Vista en planta quinto piso).....	18
Figura 4.1 Vista en planta Piso 1	28
Figura 4.2 Modelo 3D (Vista frontal muros continuos)	29
Figura 4.3 Modelo 3D (Vista frontal muros discontinuos)	29
Figura 4.4 Modelo 3D desde un punto superior	30
Figura 4.5 Vista en planta deformada nivel 5 (Modo 1)	32
Figura 4.6 Vista en planta deformada nivel 5 (Modo 2)	32
Figura 4.7 Vista en planta deformada nivel 5 (Modo 3)	33
Figura 4.8 Resultados índices principales	36
Figura 4.9 Comparación Diagramas Boxplot para " <i>Ecm2</i> "	36
Figura 4.10 Comparación Diagramas Boxplot para " <i>Ecm6</i> "	37
Figura 4.11 Comparación Diagramas Boxplot para " <i>PH5</i> "	37
Figura 4.12 Comparación Diagramas Boxplot para " <i>Ecm1</i> "	38
Figura 4.13 Grafico 3D para la variación de <i>Ecm2</i> y <i>Ecm6</i>	41
Figura A.4.2.1 Cargas No estructurales - Oficinas (kg/m).....	53
Figura A.4.2.2 Cargas No Estructurales 1er Piso - Aleros (kg/m ²)	54
Figura A.4.2.3 Cargas No Estructurales 1er piso - Losas de Hormigón (kg/m ²)	55
Figura A.4.2.4 Cargas No estructurales - Techumbre (kg/m ²)	56
Figura A.4.3.1 Entrada método de cuantificación de incertidumbre.....	57
Figura A.4.3.2 Entrada modelo de elementos finitos y parámetros	57
Figura A.4.3.3 Entrada variables a iterar (Parte 1).....	58

Figura A.4.3.4 Entrada variables a iterar (Parte 2).....	59
Figura A.4.3.5 Entrada variable de interés	59
Figura A.4.4.1 Entrada método de cuantificación de incertidumbre.....	60
Figura A.4.4.2 Entrada modelo de elementos finitos y parámetros	60
Figura A.4.4.3 Entrada variables a calibrar	60
Figura A.4.4.4 Entrada variable de interés	61
Figura A.4.5.1 Código principal análisis de sensibilidad (Parte 1)	62
Figura A.4.5.2 Código principal análisis de sensibilidad (Parte 2)	63
Figura A.4.5.3 Código principal análisis de sensibilidad (Parte 3)	64
Figura A.4.5.4 Código principal análisis de sensibilidad (Parte 4)	65
Figura A.4.5.5 Código de parámetros (Análisis de sensibilidad).....	66
Figura A.4.6.1 Código Principal Calibración (Parte 1)	67
Figura A.4.6.2 Código Principal Calibración (Parte 2)	68
Figura A.4.6.3 Código Principal Calibración (Parte 3)	69
Figura A.4.6.4 Código Principal Calibración (Parte 4)	70

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Con el desarrollo de herramientas de monitoreo y procesamiento de información estructural se genera una oportunidad para la mejora del análisis de edificios existentes. La calibración de modelos numéricos es una vía para utilizar esta información, la que resulta de especial interés para estructuras con una arquitectura no convencional, que por su naturaleza resulta difícil comparar o predecir su comportamiento en el tiempo.

La calibración de estructuras permite generar modelos numéricos que intentan disminuir las incertidumbres sobre el comportamiento estructural, pues los errores y cambios dentro de los procesos constructivos, condiciones de contorno y el uso alejan los modelos numéricos no calibrados respecto a la realidad.

La calibración de modelos numéricos se encuentra dentro de un campo en continua mejora, que se orienta hacia el monitoreo de la salud estructural de edificios. El monitoreo se realiza en base a la toma y análisis sucesiva de datos a lo largo del tiempo y por lo tanto la calibración inicial del modelo puede servir para proyectos futuros de monitoreo.

Por consiguiente, es interesante el desarrollo de estos modelos en edificios que además son de gran valor arquitectónico e irregularidad estructural. El edificio “Centro de Innovación” emplazado en el campus de la Universidad del Bio-Bio, es un ejemplo de arquitectura atípica, con muros en forma de semicírculos que se expanden y una abertura central de losa que se reduce, al ascender por los cinco pisos que componen el edificio. La calibración de su modelo numérico permitirá disminuir las incertidumbres sobre el comportamiento actual del edificio además de servir como base para futuros estudios de su estado.

Por último, el Anexo 1.1 muestra la contribución de La Memoria de Título a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

1.2 Objetivo de la memoria

1.2.1 Objetivo general

Calibrar el modelo numérico de un edificio no convencional de hormigón armado en base a las mediciones experimentales de sus propiedades dinámicas para disminuir las incertidumbres acerca de su comportamiento estructural.

1.2.2 Objetivos específicos

- 1) Sintetizar el estado del arte sobre calibración de modelos numéricos en edificios para conocer el desempeño de métodos y herramientas que actualmente se utilizan.
- 2) Generar un modelo base en ETABS de acuerdo a la planimetría disponible sobre el cual poder aplicar luego el análisis de sensibilidad y calibraciones.
- 3) Realizar un análisis de sensibilidad para determinar los parámetros más influyentes en el modelo utilizando el programa quoFEM sobre el modelo definido en ETABS.
- 4) Realizar la calibración del modelo numérico de ETABS mediante el programa quoFEM para encontrar los valores de las variables mas influyentes que minimicen las diferencias entre las propiedades dinámicas numéricas y experimentales.

1.3 Metodología de trabajo

Para cumplir con los objetivos planteados primero se estudió la literatura y cuerpos normativos sobre la modelación, análisis de sensibilidad y calibración de edificios de hormigón armado.

A continuación, se consultaron los planos de arquitectura y documentos de especificaciones técnicas del edificio en estudio para generar el modelo base de elementos finitos. La información no encontrada en estos documentos se complementó con supuestos, que se especifican en la

medida que se van utilizando. El error asociado a la modelación se define como la diferencia entre las frecuencias fundamentales numéricas y las experimentales.

Luego, se identificó desde el modelo una lista de variables potencialmente significativas sobre su comportamiento que se analizarán en base a su sensibilidad usando el programa quoFEM. La conexión entre el modelo y el programa se realiza mediante códigos de Python escritos en base a comandos entregados por las herramientas de la *Application Programming Interface* (Interfaz de programación de aplicaciones; API según sus siglas en inglés) las cuales están integradas en el *software* ETABS.

Luego del análisis de sensibilidad se utilizan las variables de mayor incidencia en el modelo para calibrarlo, utilizando igualmente la aplicación quoFEM. Finalmente, con las variables calibradas se modifican estos valores en el modelo inicial y se calcula el error de igual forma que en la etapa de modelación.

1.4 Principales resultados y conclusiones

Se modeló el edificio en base al método de elementos finitos, logrando un error inicial del 12%, por lo tanto, se cumple con el criterio que limitaba el error en un 30%. Del análisis de sus parámetros se identificaron 18 variables potencialmente significativas. Estas pertenecían a seis módulos de elasticidad de muros y columnas, seis módulos de elasticidad de vigas y losas, y seis cargas distribuidas sobre las losas de hormigón armado.

De la etapa de análisis de sensibilidad se identificaron tres variables significativas, en base a los resultados de los Índices de Sobol, estas fueron: los módulos de elasticidad de muros y columnas del primer y quinto piso, y la carga distribuida del quinto piso, con índices principales de 0.305, 0.12 y 0.203, respectivamente. Con respecto a la variable más influyente del análisis, correspondiente al módulo de elasticidad de muros y columnas del primer piso, esta se puede explicar por su rol dentro de la transmisión de cargas desde los pisos superiores hacia la base, donde los módulos de elasticidad representan la rigidez de estos elementos que componen parte

de la matriz de rigidez del edificio, y que se relaciona directamente con el cálculo de las frecuencias fundamentales. Por lo tanto, se reafirma la relevancia de los módulos de elasticidad en las etapas de diseño y construcción del primer piso de edificios para asegurar el comportamiento deseado en las estructuras. La segunda variable más influyente corresponde a la carga distribuida sobre la losa de hormigón del quinto piso, variable relacionada con las masas del sistema, inversamente proporcionales al cálculo de las frecuencias fundamentales. La influencia en particular de esta carga se puede explicar debido a que el aumento en los desplazamientos de los pisos superiores puede amplificar los momentos torsionales generados por las cargas en este piso. En tercer lugar, está el módulo de elasticidad del quinto piso de muros y columnas, donde su influencia puede responder a la alta densidad de muros en este piso, con respecto a los demás niveles.

De la calibración del modelo con la aplicación quoFEM se obtuvieron distintos valores de las variables significativas al variar los puntos iniciales desde los cuales el algoritmo buscaba una solución, mostrando que por este método no era posible encontrar de manera eficiente un óptimo global. Este desempeño del método de calibración se podría explicar debido a la escasa cantidad de datos experimentales con los que se contaba, generando que varios conjuntos de soluciones cumplieran con el comportamiento medido.

Por esta razón se cambió de método de calibración y se utilizaron en su lugar los Diagramas de Boxplot para calibrar las tres variables significativas. Al modificar el modelo con los valores calibrados de estas variables se disminuyó el error a un 5%.

1.5 Organización de la memoria

La memoria se organizó en cinco capítulos, incluyendo el actual de introducción. Para guiar la lectura se mostrarán los principales contenidos de los capítulos en los que se dividió.

El Capítulo 2 explica las bases conceptuales de los métodos utilizados durante las etapas de modelación, análisis de sensibilidad y calibración, para luego mostrar la forma en que estos fueron aplicados para llevar a cabo los objetivos específicos, dentro de los límites prácticos.

En el Capítulo 3, se enlistan los principales materiales que se necesitaron para modelar la estructura y programar las iteraciones, además de las metodologías, separadas según el objetivo específico a abarcar.

En el capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos, donde los primeros corresponden a las características del modelo inicial, junto con sus propiedades dinámicas. Luego se muestran los resultados del análisis de sensibilidad, donde se obtuvo de forma cuantitativa la influencia por parte de cada variable sobre el modelo. De la etapa de calibración se obtuvo los valores de las variables que minimizaban el error del modelo. Por último, las conclusiones y comentarios sobre los procesos realizados y resultados obtenidos se muestran en el Capítulo 5.

CAPÍTULO 2: BASES CONCEPTUALES Y APLICACIONES PRACTICAS

2.1 Introducción

El propósito de este capítulo es presentar las directrices, teóricas y prácticas, que se siguieron a lo largo de la memoria. Para lograr esto, en primer lugar, se exponen las bases normativas y consideraciones prácticas empleadas en el modelamiento de la estructura en ETABS. Posteriormente, se establecen los fundamentos conceptuales y los límites prácticos del análisis de sensibilidad y calibración respecto al modelo previamente definido.

2.2 Alcances de la modelación

Para poder trabajar eficazmente sobre el modelo en las etapas de análisis de sensibilidad y calibración, se buscó representar los movimientos del edificio de la forma más detallada y precisa posible. Para esto se decidió considerar todos los elementos de hormigón armado y todos los pisos del edificio, incluyendo el zócalo, pues a pesar de estar bajo el nivel del terreno, se consideró que podía ser significativo en la definición de sus propiedades dinámicas. Cabe destacar, que dentro de los elementos de hormigón armado se debieron crear 12 materiales, para representar las potenciales variaciones de los módulos de elasticidad que se necesitarán para los procesos de análisis de sensibilidad y calibración realizados en *quoFEM*, y seis cargas distintas para aplicarlas sobre las losas de este mismo material.

En cuanto a los elementos de madera se consideraron en la modelación únicamente aquellos que desempeñaban una función estructural, evitando con esto saturar el modelo con detalles que no aporten cambios significativos en su desempeño, que correspondían a la estructuración de las oficinas del edificio.

En particular, los muros, losas y vigas altas de hormigón armado fueron modeladas como elementos tipo *Shell*. Vigas cortas y columnas de este mismo material fueron modeladas como

elementos tipo *Frame*, al igual que las vigas de madera que componen la estructura del piso en las esquinas del edificio.

Con respecto a los elementos no estructurales, solo se consideró su masa aportada al modelo y se despreció su influencia en la rigidez, representándolas simplemente como cargas distribuidas. Los elementos cubicados para estos efectos corresponden a los encontrados en el entrepiso sobre las losas de hormigón, sobre las vigas de maderas del área de oficinas y los elementos que componen el techo del edificio.

2.3 Bases teórico-prácticas del análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es una técnica que cuantifica la contribución de variables de entrada específicas sobre la incertidumbre de la variable de interés de salida. En el contexto de este estudio permitió identificar las variables más influyentes en el comportamiento del modelo numérico y de esta manera reducir la dimensionalidad del problema en la siguiente etapa de calibración.

Para su ejecución se utilizó el programa quoFEM (acrónimo para “Cuantificación de la Incertidumbre con Optimización para el Método de Elementos Finitos” en inglés) con el cual se programaron las características del análisis para realizarlas de forma automática. El proceso específico utilizado se llama Análisis de Sensibilidad Global (GSA, por sus siglas en inglés) que además de evaluar la influencia en particular de las variables de entrada, cuantifica cómo interactúan estas variables en conjunto sobre la salida del modelo. Para evaluar estas interacciones se utilizan los índices de Sobol, los cuales son medidas basadas en la varianza de las variables y se dividen en Índice Principal e Índice Total. El Índice Principal (S_i) muestra la fracción de varianza de la variable de salida (Y) que se puede atribuir a una variable de entrada específica (x_i), mientras que el Índice Total (T_i), además, toma en consideración las interacciones con el resto de las variables de entrada, por lo tanto, un valor de índice mayor indicaría que la variable tendría una mayor incidencia dentro del modelo.

El motor de cuantificación que se utilizó para ejecutar el análisis corresponde a Dakota y calcula el Índice Principal comparando la varianza de la esperanza condicional $\text{Var}_{x_i}[E(Y|x_i)]$ con respecto a la varianza total $\text{Var}(Y)$. Las fórmulas se muestran a continuación:

$$S_i = \frac{\text{Var}_{x_i}[E(Y|x_i)]}{\text{Var}(Y)} \quad (2.1)$$

$$T_i = \frac{\text{Var}(Y) - \text{Var}(E[Y|x_{-i}])}{\text{Var}(Y)} \quad (2.2)$$

Donde $Y = f(x)$ y $x_{-i} = (x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, x_m)$. Las definiciones y fórmulas del GSA fueron extraídas del Manual Técnico de Dakota (Adams *et al.*, 2020).

La técnica de muestreo que se usó junto con el motor de cuantificación Dakota es el Muestreo de Hiper cubo Latino (LHS, por sus siglas en inglés). Esta técnica es ampliamente utilizada cuando las variables de entrada son múltiples y se busca explorar eficientemente el dominio del modelo, pues se basa en dividir el rango de cada variable de entrada en intervalos iguales y luego seleccionar una única muestra aleatoria en cada intervalo para cada variable. Esto asegura una distribución más uniforme de las muestras evitando agrupamientos o brechas que podrían surgir con otros métodos más simples como el muestreo de Monte Carlo (también disponible en la aplicación). Para aplicarla se requiere especificar el número de muestras que se desea utilizar, el cual dependerá de la complejidad del modelo, la cantidad de variables de entrada y el nivel de precisión que se busca en los resultados. Sin embargo, se recomienda emplear al menos 100 muestras por variable para obtener índices razonablemente precisos (Adams *et al.*, 2020). Como el método considera la elección de valores de forma aleatoria, el programa además requiere que el usuario ingrese un número al azar, al que llaman *seed*, que controle la secuencia de números pseudoaleatorios generados por los algoritmos del método de muestreo.

La programación de este análisis también implicó el desarrollo de códigos con los cuales conectar el programa quoFEM y el edificio modelado en ETABS, para esto se utilizó el lenguaje de

programación Python que logró comunicación con el modelo gracias a las herramientas API con las que cuenta el programa de modelación.

Por razones prácticas y teniendo como limitantes el tiempo y los recursos computacionales, las variables utilizadas en el análisis de sensibilidad son una parte del total de variables del modelo numérico y corresponden a los módulos de elasticidad del hormigón y pesos no estructurales sobre las losas de hormigón. Ambas fueron escogidas por su alto nivel de incertidumbre además de una gran incidencia en el comportamiento del modelo, condiciones necesarias para luego poder calibrarlo eficientemente.

Los módulos de elasticidad fueron segmentados para cada piso y por grupo de elementos, esto es, considerando que estos grupos se hormigonan en distintas partidas de construcción, aumentando la posibilidad de variación en la resistencia del hormigón. De esta forma, se agruparon columnas junto a muros y luego vigas junto a losas. En cuanto a las cargas distribuidas no estructurales se definió una para cada piso con una distribución uniforme sobre las losas de hormigón.

2.4 Bases teórico-prácticas de los procesos de calibración

La calibración consiste en ajustar los parámetros de un modelo para aproximarlos a las características medidas experimentalmente. En particular, en este estudio, las mediciones experimentales consistían en los periodos fundamentales de vibración.

Las variables a calibrar se identifican luego del proceso de análisis de sensibilidad, siendo escogidas las variables con mayores índices de Sobol, pues, como se explicó anteriormente, estos indican una mayor incidencia dentro del comportamiento del modelo y permitirían un proceso de calibración más eficiente.

Para su ejecución, al igual que en el análisis de sensibilidad, se utilizó el programa quoFEM, el cual ofrece dos métodos de calibración, el determinista y el probabilístico. Teniendo en cuenta que la calibración determinista tiende a ser más rápida que la probabilística (Ereiz *et al*, 2022),

pues se enfoca en encontrar un conjunto específico de parámetros, y por la simplicidad del proceso, que conlleva a una mayor eficiencia computacional, se decidió utilizar el método determinista.

La calibración se realizó en base al método NL2SOL, que se distingue por su capacidad de adaptación dinámica para resolver problemas de optimización no lineales. Para esto, utiliza un enfoque de región de confianza, ajustando dinámicamente el tamaño de la región en la que se busca la solución óptima, que corresponderá al conjunto de valores que minimicen la función objetivo. Esto es especialmente útil en problemas complejos donde la función objetivo puede tener múltiples mínimos locales o características no lineales. Su algoritmo utiliza dos aproximaciones diferentes de la matriz Hessiana; la aproximación de Gauss-Newton y una combinación de la aproximación de Gauss-Newton con una aproximación cuasi-Newton para el resto de la matriz. Las aproximaciones son fundamentales para calcular la dirección de búsqueda y garantizar la convergencia hacia un mínimo óptimo.

En este caso, la función objetivo corresponde a la diferencia entre las frecuencias de vibración experimentales con las frecuencias de vibración simuladas. Para validar los resultados se espera lograr un error igual o menor al 5% con una tolerancia de convergencia de 0,0001.

2.5 Conclusiones

Los alcances y definiciones teórico-prácticas se utilizaron de base para definir la metodología de trabajo. La profundización de estos procedimientos para cada etapa se encuentra en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1 Introducción

A continuación, se presentan los materiales que se utilizaron durante la ejecución de este trabajo, donde se explica los procesos que se llevaron a cabo con ellos y a que objetivos estaban enfocados.

Luego se especifica la metodología que se siguió en los procesos de modelación, análisis de sensibilidad y calibración del modelo numérico.

3.2 Materiales

3.2.1 Planos y especificaciones técnicas del edificio

Se tuvo acceso a través de plataformas públicas a los planos y especificaciones técnicas del edificio. Con esta información se modeló el edificio en el *software* ETABS.

El edificio en estudio se compone de cinco niveles más un zócalo y su estructura está compuesta por marcos y muros de hormigón armado. A nivel de zócalo los muros se proyectan de 30 cm. La estructura presenta dos *sets* diagonalmente opuestos de muros discontinuos en altura de 20 cm de espesor, apoyados en vigas de 30x60 cm. En cuanto a los muros continuos, estos desde el zócalo al segundo piso se proyectan de 30 cm de espesor y luego este disminuye a 20 cm hasta el último piso.

A nivel de piso, la estructura se compone de una losa de hormigón armado de 15 cm de espesor, sobre la cual en tres de las esquinas del edificio se arma una estructura envigada de madera que cumple con la función de piso de la estructura. La vista en planta de la enfierradura utilizada en la losa del piso cinco se muestra en la Figura 3.1. La fundación de la estructura corresponde a una losa de fundación.



Figura 3.1 Imagen del proceso constructivo losa nivel 5

El emplazamiento del edificio se encuentra en las dependencias de la Universidad del Bío-Bío, correspondiente a un suelo tipo E y zona 3 según normativa sísmica.

A continuación, en la Figura 3.2 y Figura 3.3 se muestran los planos del primer y último piso del edificio, respectivamente, señalando las distancias entre los ejes que se utilizan para describir la estructura, donde los elementos achurados corresponden a muros y columnas, y el resto a vigas. Notar además en dichas figuras que el eje donde se encuentran los muros discontinuos corresponde al eje Z01.

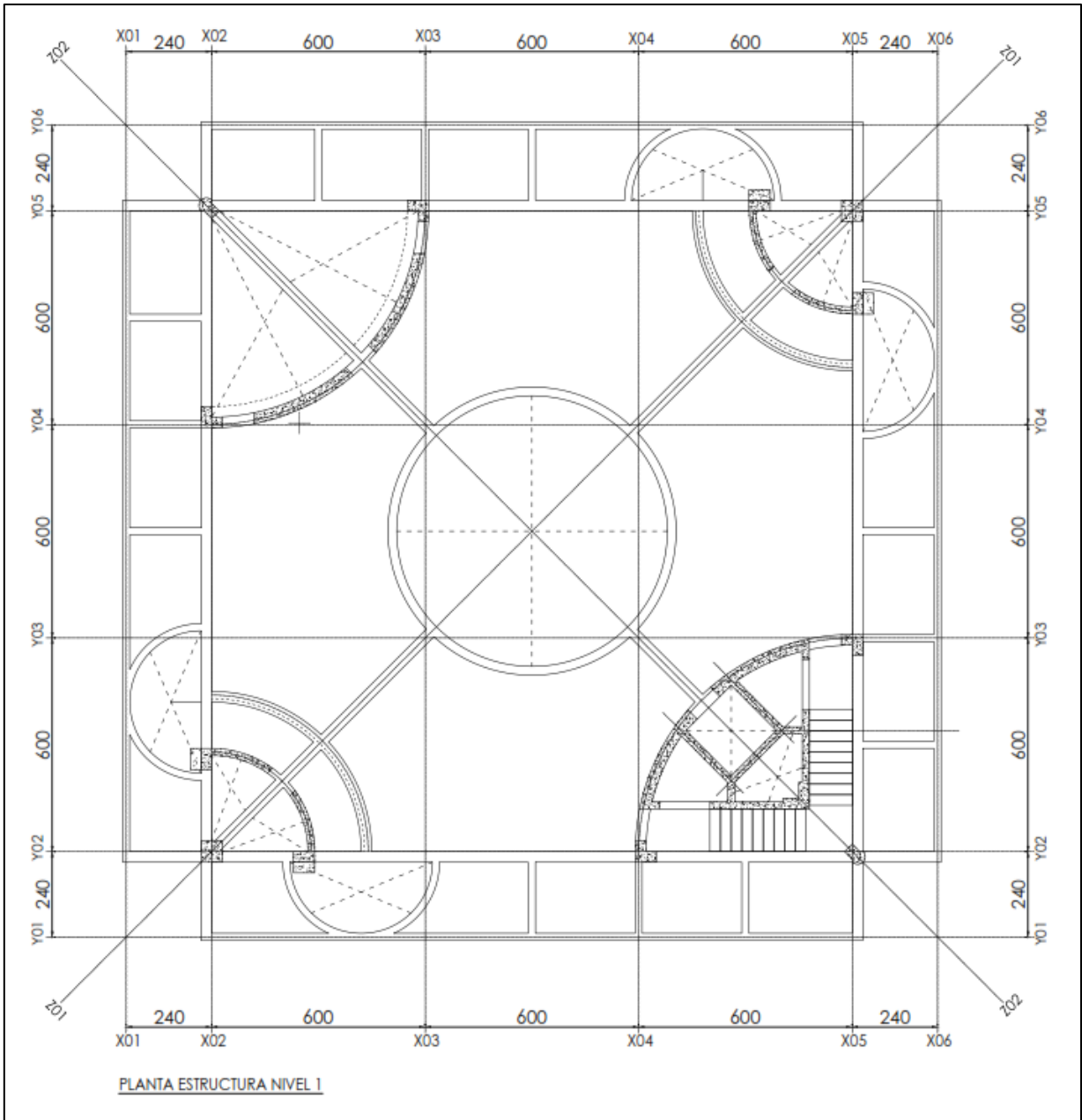


Figura 3.2 Plano de estructuras primer nivel (cm)

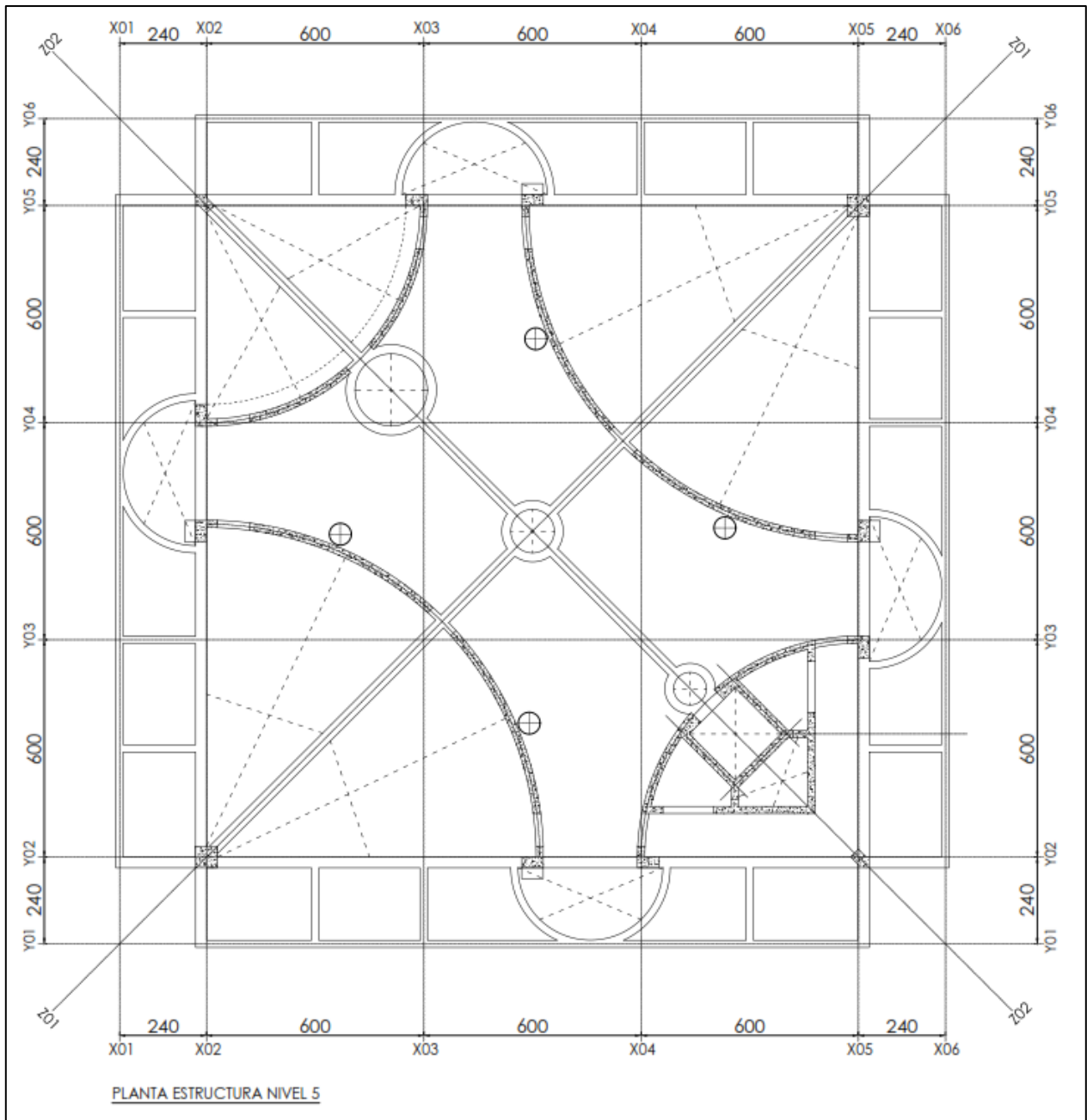


Figura 3.3 Plano de estructuras quinto nivel (cm)

La estructuración del piso en las esquinas del edificio se realiza mediante vigas de madera de 3x8” y 3x12” cada 40 cm. En la Figura 3.4 se muestra la disposición de estos elementos en el plano del primer piso.

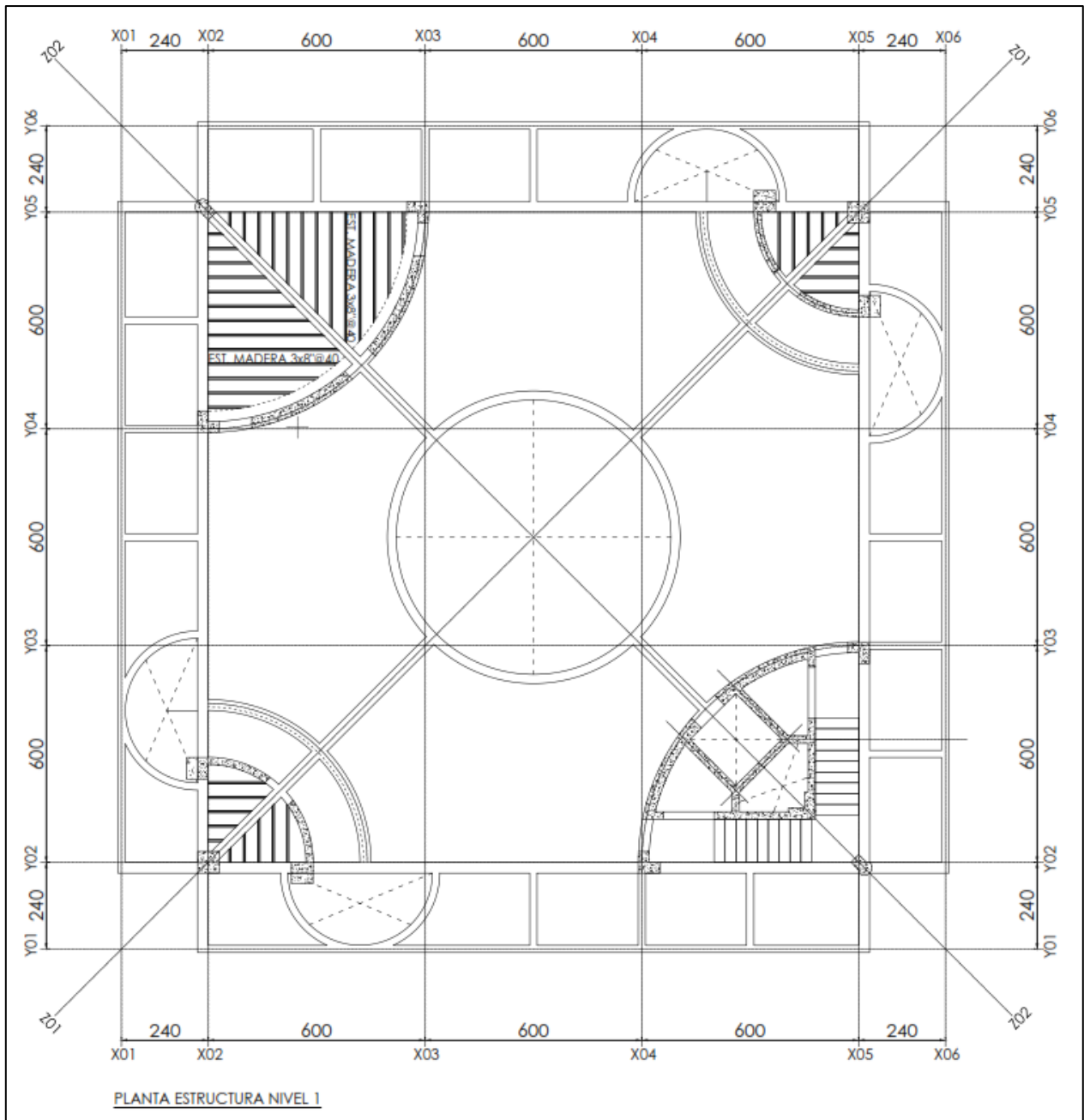


Figura 3.4 Estructuración en vigas de madera primer piso (cm)

Por último, la estructuración del techo del edificio se compone de dos estructuras superpuestas. La primera se estructura en base a perfiles de acero IC 150, señalado en color azul en la Figura 3.5, junto a un cadenetado de madera de 2x6”.

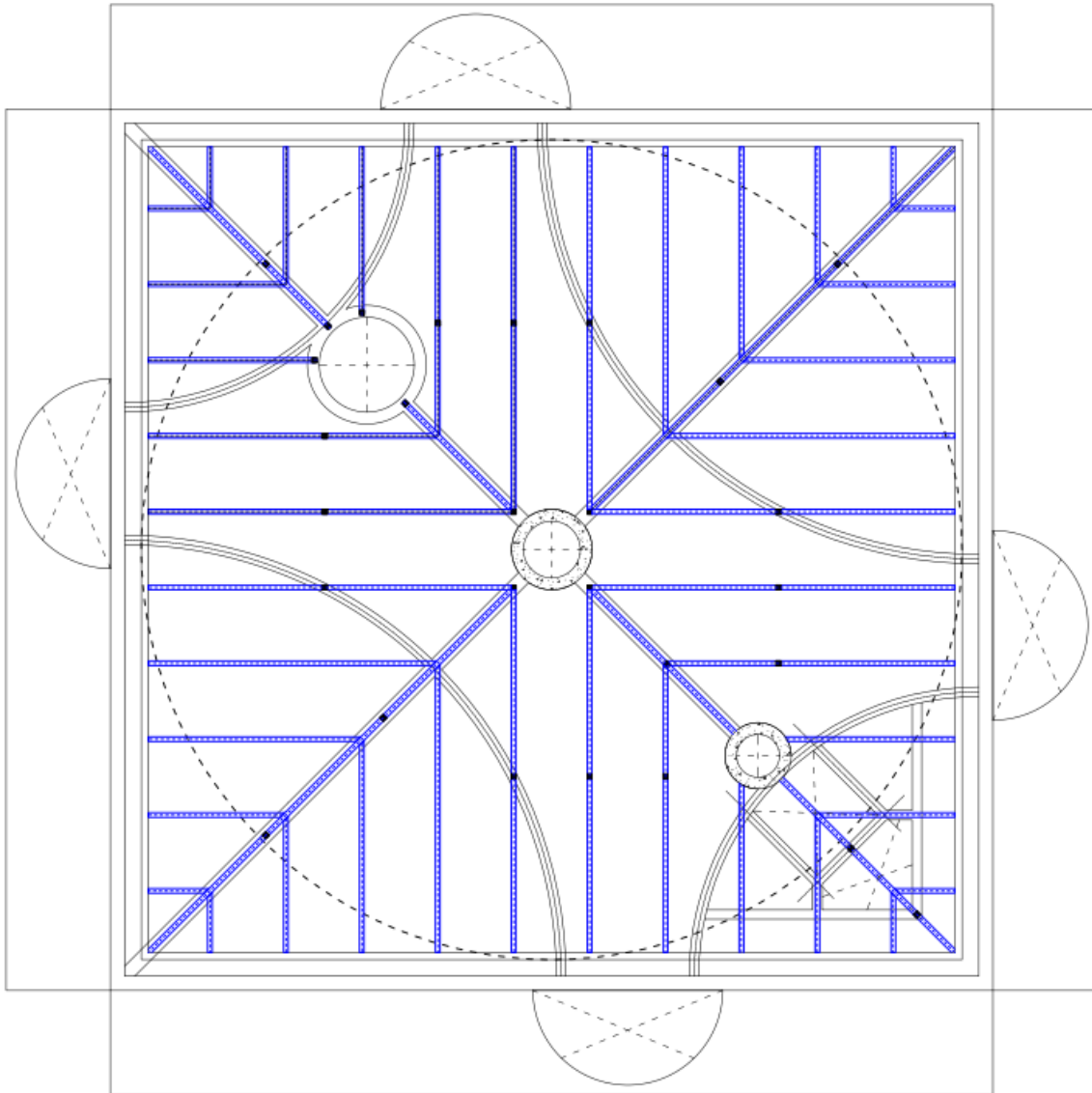


Figura 3.5 Esquema estructura de techo (Parte 1)

Sobre esta estructura se encuentra una segunda parte de perfiles de acero IC 150 también con un cadeneteado de madera de 2x6" que describe la plataforma de la terraza que se encuentra en el techo del edificio.

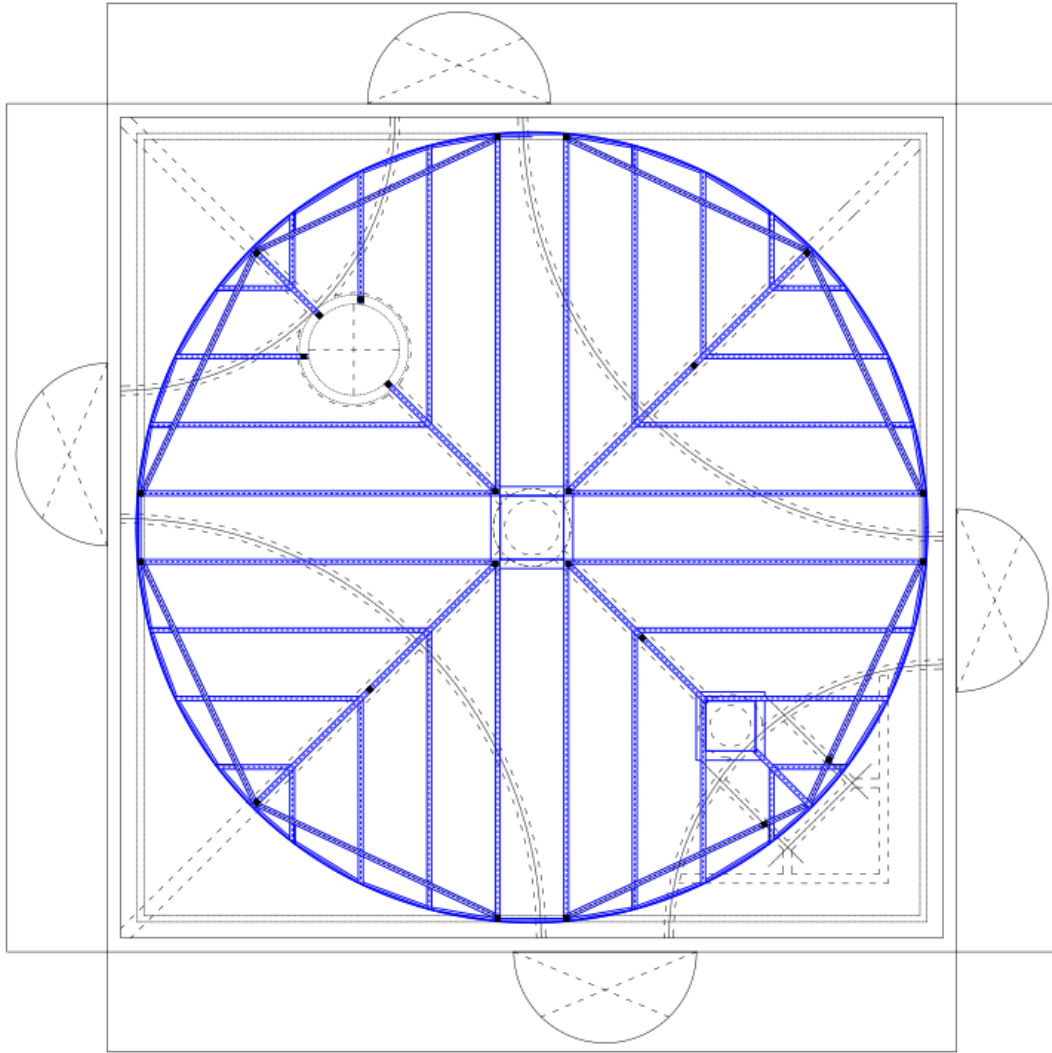


Figura 3.6 Esquema estructura de techo (Parte 2)

La cubicación del techo del edificio junto con las cargas no estructurales del resto del edificio se encuentra en el Anexo 4.1.

3.2.2 Periodos fundamentales del edificio

Las mediciones experimentales son fundamentales a lo largo de todo el proceso de calibración, pues sirven desde validar el modelo numérico inicial hasta calcular el error asociado a cada iteración, necesario para los procesos de análisis de sensibilidad y calibración en sí mismo.

En particular, para calibrar el modelo se midieron las vibraciones del edificio en base a tres acelerómetros instalados en el quinto piso, la distribución aproximada se muestra en la Figura 3.7. Cabe destacar que los datos recabados se midieron en el año 2021 y el edificio no estaba en uso en ese momento.

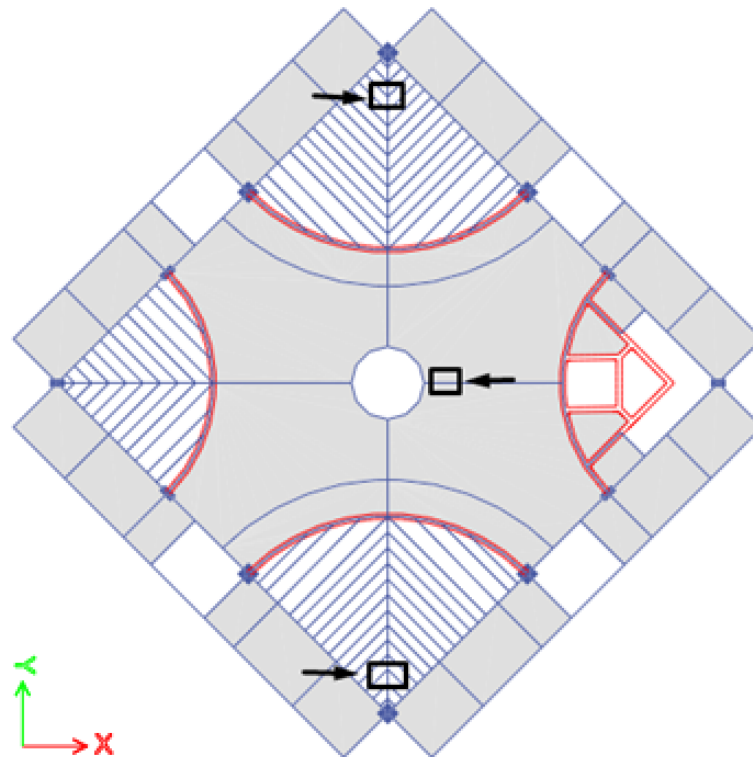


Figura 3.7 Puntos de medición (Vista en planta quinto piso)

Luego, mediante técnicas de procesamiento de señales se determinaron los tres periodos fundamentales en los que oscila el edificio. En la Tabla 3.1 se muestra el valor de estos periodos, sus frecuencias y se identifica además el sentido predominante de movimiento.

Tabla 3.1 Modos de vibrar experimentales

Modo	Periodo (s)	Frecuencia (1/s)	Tipo
1er modo	0,35	2,85	Traslacional en X
2do modo	0,32	3,09	Traslacional en Y
3er modo	0,26	3,84	Rotacional

3.2.3 Software ETABS

Para la modelación de la estructura se utilizó el *software* ETABS (Versión 20.3.0) de análisis estructural y diseño, ampliamente utilizado en la industria de la ingeniería civil, la cual modela las estructuras utilizando el método de elementos finitos.

El modelo desarrollado en este programa fue utilizado como base para los procesos de análisis de sensibilidad y calibración, procesos que fueron controlados desde la aplicación quoFEM gracias a que ETABS incluye dentro de sus propiedades la Interfaz de Programación de Aplicaciones (API, por sus siglas en inglés), herramienta que sirve para establecer comunicación con otros programas a través de *scripts* en distintos lenguajes de programación, siendo en este caso desarrollado en Python.

3.2.4 Aplicación quoFEM

QuoFEM (versión V3.4.0) es una aplicación desarrollada para la cuantificación de incertidumbre y optimización dentro del campo de la ingeniería de peligros naturales. Este programa funciona principalmente utilizando modelos de elementos finitos de aplicaciones existentes junto con aplicaciones de cuantificación de incertidumbre.

La aplicación se utilizó en particular para desarrollar el análisis de sensibilidad y calibración determinística del modelo numérico, donde se utilizó ETABS como el programa de elementos finitos base y Dakota como la aplicación de cuantificación de incertidumbre. En particular, para el análisis de sensibilidad se utilizó el Muestreo Latino de Hipercubos (LHS, por sus siglas en inglés) la cual es una técnica especialmente útil para análisis con múltiples variables de entrada y para las calibraciones se utilizó el método NL2SOL.

3.3 Metodología

3.3.1 Modelación del edificio de hormigón armado

Se realizó un análisis minucioso de los planos arquitectónicos disponibles, los cuales sirvieron como base para identificar y definir todos los elementos estructurales del edificio. Posteriormente, estos elementos fueron generados digitalmente utilizando el programa ETABS. Las propiedades de los materiales, por su parte, fueron obtenidas de los documentos de especificaciones técnicas pertinentes y aplicadas a los elementos previamente definidos.

En particular, el módulo de elasticidad del hormigón (E) para el modelo inicial se calculó según su relación con la resistencia a la compresión especificada (f_c'), esto es:

$$E = 4700\sqrt{f_c'} \text{ MPa}, \quad (3.1)$$

Para hormigones de densidad normal (*American Concrete Institute* [ACI], 2019, Sección 19.2.2.1). Para las vigas de madera, el módulo de elasticidad se extrajo desde la Tabla 4 de la NCh 1198 (2014), que lo especifica según la calidad de madera informada.

Luego de la etapa de definición de elementos y suposiciones, se modeló el edificio mediante el método de elementos finitos en ETABS. Como se mencionó anteriormente, se modelaron todos los pisos, incluyendo el Zócalo del edificio, pues se consideró que este podría incidir en la rigidez del modelo y ser significativo en la definición de sus periodos fundamentales.

Como el objetivo de esta etapa es representar de manera óptima el edificio, se hace énfasis en modelar con los tipos de elementos finitos que mejor se ajusten al comportamiento real. En la Tabla 3.2 se muestran los tipos de elementos que se usaron para lograr esto.

Tabla 3.2 Tipos de elementos en la modelación

Componente estructural	Elemento finito
Muros H.A e = 20 cm	<i>Shell-Thin</i>
Muros H.A e = 30 cm	<i>Shell-Thin</i>
Columnas H.A	<i>Frames</i>
Vigas H.A	<i>Frames</i>
Vigas Madera	<i>Frames</i>
Losa de Hormigón e = 15 cm	<i>Shell-Thin</i>

La discretización de los elementos tipo *Shell* se realizó de forma manual en los muros, dejando mallas de 50x50 cm² aproximadamente. En losas se discretizó de manera automática utilizando la opción de dejar como máximo elementos finitos de 50x50 cm.

Luego de modelar los elementos estructurales tanto de hormigón armado como madera, se procedió a ubicar los elementos que se representarían en el modelo en base a cargas distribuidas, estos corresponden a los elementos no estructurales que al no incidir de manera significativa en la rigidez del edificio sólo se considerará su masa dentro del modelo. A modo de simplificar la ubicación, se identificaron espacios que tuvieran una composición similar y así homogeneizar la aplicación de cargas. Las cargas distribuidas por lo tanto se separan en las aplicadas sobre: oficinas, aleros perimetrales, y losas de hormigón (separadas en losas de hormigón interiores y techumbre). En esta etapa además se supusieron algunas distribuciones y características al no encontrar esta información en los documentos, en base a datos y prácticas comunes. Luego, estas cargas se aplican al modelo.

Finalmente, para validar el modelo numérico se corre el análisis modal del programa y con estos resultados se calcula el error asociado al modelo. Este error corresponde al promedio del valor absoluto de las diferencias relativas entre las frecuencias fundamentales experimentales (f_e) y numéricas (f_n):

$$error_{total} = \frac{\left| \frac{f_{n1} - f_{e1}}{f_{e1}} \right| + \left| \frac{f_{n2} - f_{e2}}{f_{e2}} \right| + \left| \frac{f_{n3} - f_{e3}}{f_{e1}} \right|}{3} \quad (3.2)$$

Siendo los índices 1, 2 y 3 correspondientes a los modos fundamentales asociados a los modos traslacionales en el eje X, eje Y y rotacionales en Z, respectivamente. Se consideró como criterio de validación del modelo que el equivalente porcentual del error total debe ser menor a un 30%.

3.3.2 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó con el fin de identificar las variables significativas sobre el comportamiento del modelo numérico, que luego se utilizaron en la calibración del modelo.

En particular, como se mencionó en el Capítulo 2, este análisis se llevó a cabo utilizando como variables los módulos de elasticidad de los elementos de hormigón y pesos no estructurales sobre las losas de hormigón (incluyendo la techumbre en la carga del último piso), debido a que estas se consideran como las variables con mayor incertidumbre e incidencia dentro del comportamiento del modelo. En consecuencia, el resto de las propiedades de los materiales y cargas distribuidas permanecerán constantes durante este proceso.

El análisis se ejecutó a través del programa quoFEM, por lo tanto, dentro de este subcapítulo se mencionarán las consideraciones que se tuvieron en él. La nomenclatura que se utilizó para identificar las variables dentro de la aplicación se muestran en Tabla 3.3 y Tabla 3.4.

Tabla 3.3 Nomenclatura módulos de elasticidad

Notación	Variable	Notación	Variable
Ecm1	Módulo de elasticidad de columnas y muros Zócalo	Ev11	Módulo de elasticidad de vigas y losas Zócalo
Ecm2	Módulo de elasticidad de columnas y muros Piso 1	Ev12	Módulo de elasticidad de vigas y losas Piso 1
Ecm3	Módulo de elasticidad de columnas y muros Piso 2	Ev13	Módulo de elasticidad de vigas y losas Piso 2
Ecm4	Módulo de elasticidad de columnas y muros Piso 3	Ev14	Módulo de elasticidad de vigas y losas Piso 3
Ecm5	Módulo de elasticidad de columnas y muros Piso 4	Ev15	Módulo de elasticidad de vigas y losas Piso 4
Ecm6	Módulo de elasticidad de columnas y muros Piso 5	Ev16	Módulo de elasticidad de vigas y losas Piso 5

Tabla 3.4 Nomenclatura cargas distribuidas

Notación	Variable
PH1	Carga distribuida losa cielo Zócalo
PH2	Carga distribuida losa cielo Piso 1
PH3	Carga distribuida losa cielo Piso 2
PH4	Carga distribuida losa cielo Piso 3
PH5	Carga distribuida losa cielo Piso 4
PH6	Carga distribuida losa cielo Piso 5

Dentro de quoFEM es necesario especificar con qué motor se desea trabajar para la cuantificación de incertidumbre, en este caso se optó por el motor Dakota, y de esta forma se habilitó la opción de trabajar con el método de muestreo LHS (en el Capítulo 2 se presentaron los argumentos que respaldan la elección de este método). Para el método LHS además, se requiere especificar la cantidad de muestras con las que se desea trabajar durante el análisis. Para esto, se decidió utilizar 100 muestras por variable, el cual es el valor mínimo sugerido por los desarrolladores del programa.

Se vinculó el modelo numérico de ETABS al programa quoFEM para de esta forma primero permitir que el programa itere los valores de las variables de interés según el método LHS, luego correr un análisis de sensibilidad al modelo y finalmente extraer las propiedades dinámicas del modelo modificado. La vinculación se realizó a través de la codificación en Python y las herramientas API.

Luego de identificar las variables a iterar dentro del programa, se deben definir las distribuciones de probabilidad para cada una de ellas. En este caso se decidió utilizar la distribución uniforme para todas las variables, pues se consideró que la probabilidad de encontrar valores óptimos dentro de los rangos es igual en toda su extensión.

Los rangos se definieron en base a dos criterios, en primer lugar, se debe en lo posible minimizar los recursos computacionales y para esto definir un rango lo más acotado posible, sin embargo, en segundo lugar, esto se debe equilibrar con la necesidad de definir un rango lo suficientemente

amplio para encontrar la solución óptima dentro de éste. En base a esto, para los módulos de elasticidad se decidió utilizar un margen de un $\pm 20\%$ alrededor de su valor nominal.

- Límite inferior: 22240 MPa
- Límite superior: 33360 MPa

Como a diferencia de las características del hormigón, el peso de los elementos no estructurales no es un valor controlado durante la construcción, se consideró un rango ligeramente más amplio de valores y se propuso un $\pm 30\%$ de margen con respecto al valor cubicado para los elementos no estructurales sobre las losas de hormigón:

- Límite inferior: 0.001 N/mm² (100 kg/m²)
- Límite superior: 0.002 N/mm² (200 kg/m²)

Por último, para la carga distribuida no estructural que representa el peso de la techumbre del edificio se tiene lo siguiente:

- Límite inferior: 0.0004 N/mm² (40 kg/m²)
- Límite superior: 0.0008 N/mm² (80 kg/m²)

Finalmente, uno de los últimos aspectos a definir en el programa antes de ejecutarlo es identificar la variable de interés a minimizar. En este caso, corresponde al error asociado a las iteraciones, el cual se calcula como la diferencia relativa entre las frecuencias simuladas, pertenecientes a los primeros tres modos fundamentales de vibración, y las frecuencias experimentales.

Luego de definir la variable de interés a minimizar se corre el análisis de sensibilidad en *quoFEM*, el cual una vez finalice las iteraciones entregará una lista con las variables analizadas junto a sus índices de Sobol (Principal y Total) además de una lista con todas las combinaciones de valores que el programa probó mediante el muestreo LHS junto con el error asociado a cada una de ellas. El resultado de todo este proceso, por lo tanto, corresponderá a las variables que

posean los mayores índices de Sobol, en particular, el índice Principal y serán estas las que se calibrarán en la siguiente etapa.

Para validar este análisis se espera que los índices de las variables significativas posean índices de Sobol notablemente más altos que el promedio del resto de variables.

3.3.3 Calibración numérica del edificio modelado

El último análisis aplicado al modelo corresponde a su calibración. Esta etapa busca encontrar los valores óptimos de las variables significativas identificadas al realizar el análisis de sensibilidad, que minimicen la diferencia entre las propiedades del modelo numérico y las propiedades medidas en terreno.

La calibración también se desarrolla a través del programa quoFEM, el cual tiene integrado dentro de sus funciones la calibración determinística y probabilística. Se optó, como se explicó en el Capítulo 2, en utilizar la calibración determinística, método que en el programa se lleva a cabo por el motor de cuantificación Dakota.

La optimización de este proceso se lleva a cabo por el método NL2SOL, que utiliza regiones de confianza y cambia de forma adaptativa entre dos aproximaciones de la matriz Hessiana, la de Gauss-Newton y otra de Gauss-Newton junto a una aproximación de quasi-Newton en el resto de la Hessiana (Deierlein, 2020). La última aproximación es especialmente útil en casos donde la suposición inicial está lejos de la solución, resultando más confiable que el método OPT++Gauss Newton disponible también en el programa, que ocupa solamente el algoritmo Gauss-Newton. Además, el algoritmo de calibración se programó para detener el proceso al converger a una solución con una tolerancia de 0.0001 y un número máximo de 1000 iteraciones.

Luego se adjuntan al programa los *scripts* de Python que, a diferencia de los utilizados durante el análisis de sensibilidad, fija los valores de las variables que no fueron seleccionadas como significativas, pues estas desde ahora se mantendrán constantes, en su valor nominal o promedio,

mientras se calibra el resto de las variables. Por esta misma razón, en el código que enlista los parámetros a iterar solo se incluirán los seleccionados del análisis de sensibilidad.

Después de adjuntar los códigos, se identifican las variables a calibrar en los datos de entrada del programa y se escoge la distribución que estas seguirán durante la ejecución del algoritmo. Se utilizó la distribución de Diseño Continuo, es decir, se consideró que las variables pueden tomar cualquier valor dentro de un rango continuo. Para esto, fue necesario definir tres datos para cada una de las variables: Límite Inferior, Límite Superior y Punto Inicial. El Límite Inferior y Superior consisten simplemente en los límites del rango que se desea estudiar. Por otra parte, el Punto Inicial define el valor que tomará la variable en la primera iteración y desde este punto buscará la solución óptima más próxima, es decir, el valor de la variable que minimice la función objetivo. De lo anterior se puede deducir que existe la posibilidad de encontrar más de una solución dentro del rango asignado, dependiendo del valor inicial que se utilice. Por esta razón, se realizan varias calibraciones variando el punto inicial de las variables para definir si la calibración posee un óptimo global o cuenta con diferentes óptimos locales.

En el caso de presentar distintos óptimos locales se procederá a calibrar las variables mediante los Diagramas Boxplot. Para esto, se identifica el 5% de las iteraciones del análisis de sensibilidad que poseen los errores más bajos entre el total de iteraciones. Con este grupo de iteraciones se generan los Diagramas de Boxplot y se identifica el valor promedio de las variables. Este valor corresponderá a su valor calibrado. Como criterio para validar la calibración se espera que al utilizar los valores de las variables calibradas en el modelo numérico y correr un análisis modal se obtengan frecuencias numéricas con un error menor o igual al 5% con respecto a las mediciones en terreno.

3.4 Conclusiones

En base a los materiales y metodologías señaladas en este capítulo, se explicó cómo se realizó la modelación, análisis de sensibilidad y calibración del modelo numérico. Los resultados al seguir esta metodología se muestran en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 Introducción

En el presente capítulo, se muestran los resultados al seguir los procedimientos descritos en el Capítulo 3. Estos se dividirán en resultados de la etapa de modelación, análisis de sensibilidad y calibración.

4.2 Validación del modelo numérico inicial

Se modelaron los elementos estructurales según su geometría informada en planos de arquitectura y definiendo los tipos de elementos finitos a utilizar según la Tabla 3.2. La calidad del hormigón para todos los elementos de este material en el edificio corresponde a un G-35 y su módulo de elasticidad se calcula según la Ecuación 4.1:

$$E = 4700 \sqrt{35} \text{ MPa} = 27800 \text{ MPa} \quad (4.1)$$

Para los elementos estructurales de madera se tiene estos consisten en vigas de pino radiata de 3"x8" cada 40 cm y de grado G1, por lo tanto, les corresponde un módulo de elasticidad de 10000 MPa (INN, 2014).

Estas propiedades luego se cargan a los elementos del programa y se modelan. En la Figura 4.1 se muestra la disposición de algunos elementos de hormigón armado (donde se identifican muros en color rojo y vigas junto a columnas en color azul) para el piso 1, donde se destaca la forma circular inusual de los elementos.

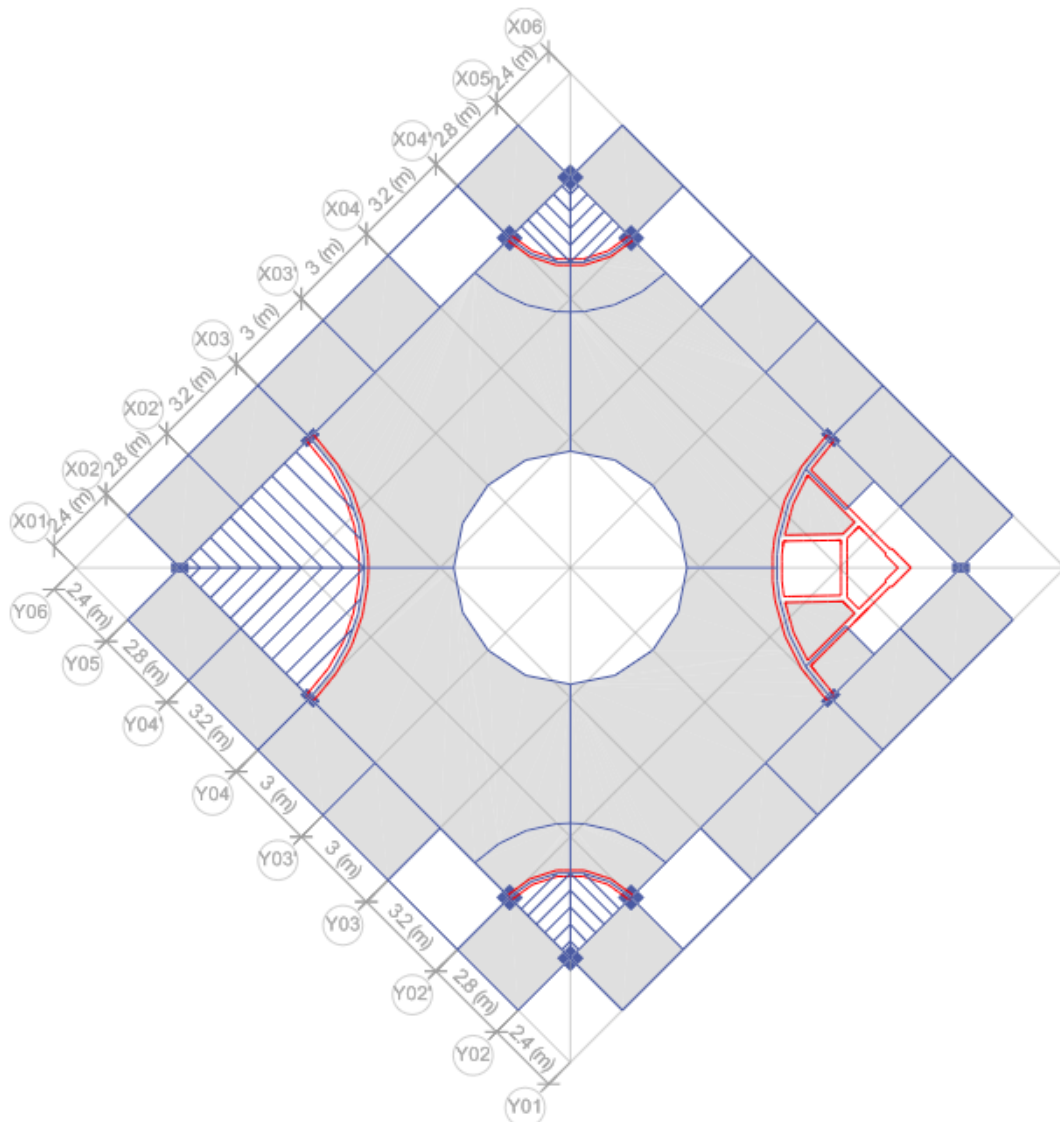


Figura 4.1 Vista en planta Piso 1

Cabe destacar, que el edificio se modeló de tal forma que los ejes principales de rigidez se alineen con los ejes del programa (X e Y) y de esta manera identificar los modos de vibrar que posean la mayor masa participante de forma más clara.

La discretización de los elementos tipo *Shell* se realizó de forma manual en muros, dejando mallas de 50x50 cm aproximadamente y en losas se discretizó de manera automática utilizando la opción de dejar como máximo elementos finitos de 50x50 cm (Figura 4.2). Además, se consideró que las losas trabajaban como diafragmas semirrígidos.

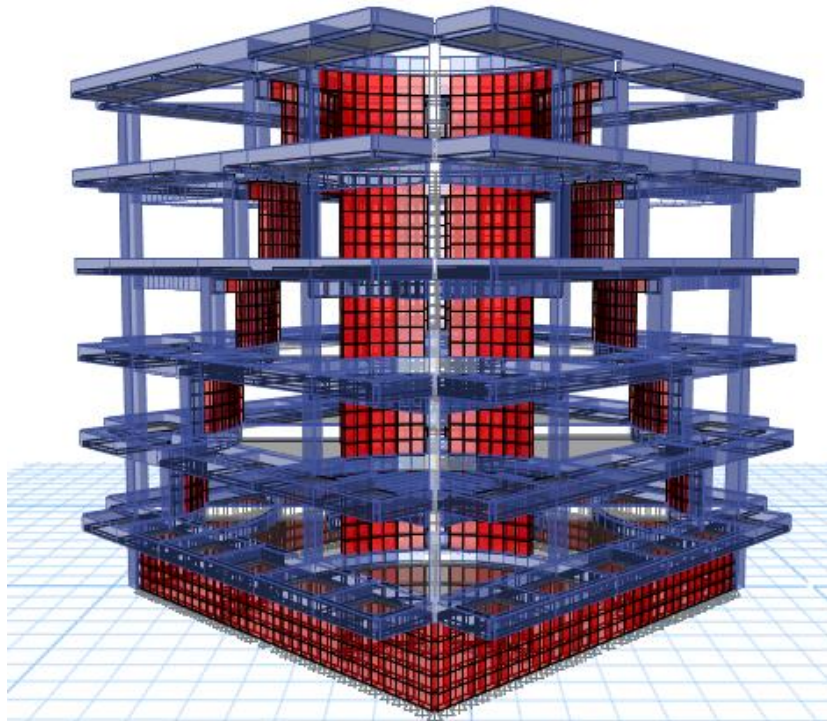


Figura 4.2 Modelo 3D (Vista frontal muros continuos)

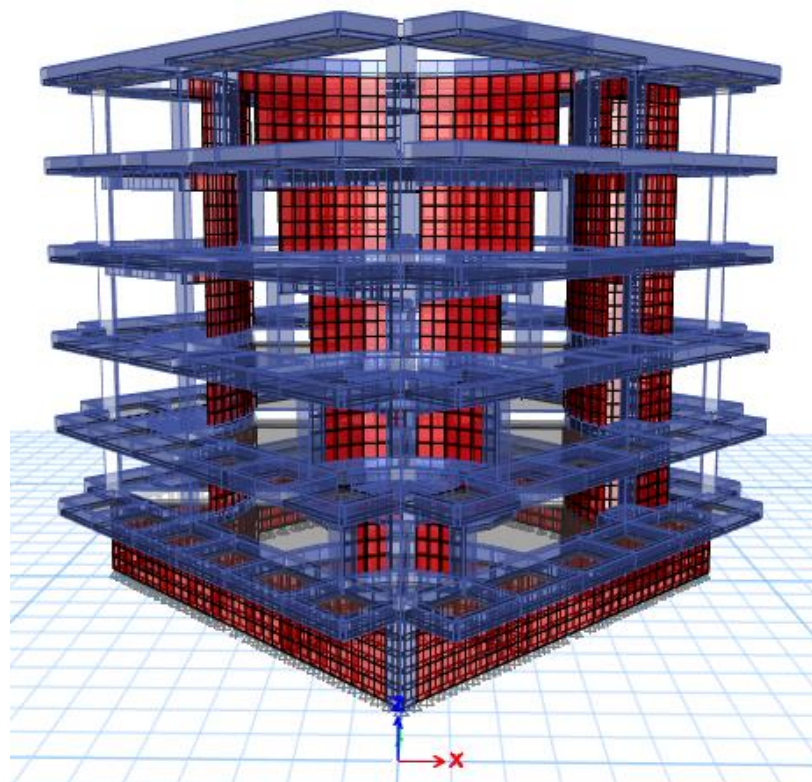


Figura 4.3 Modelo 3D (Vista frontal muros discontinuos)

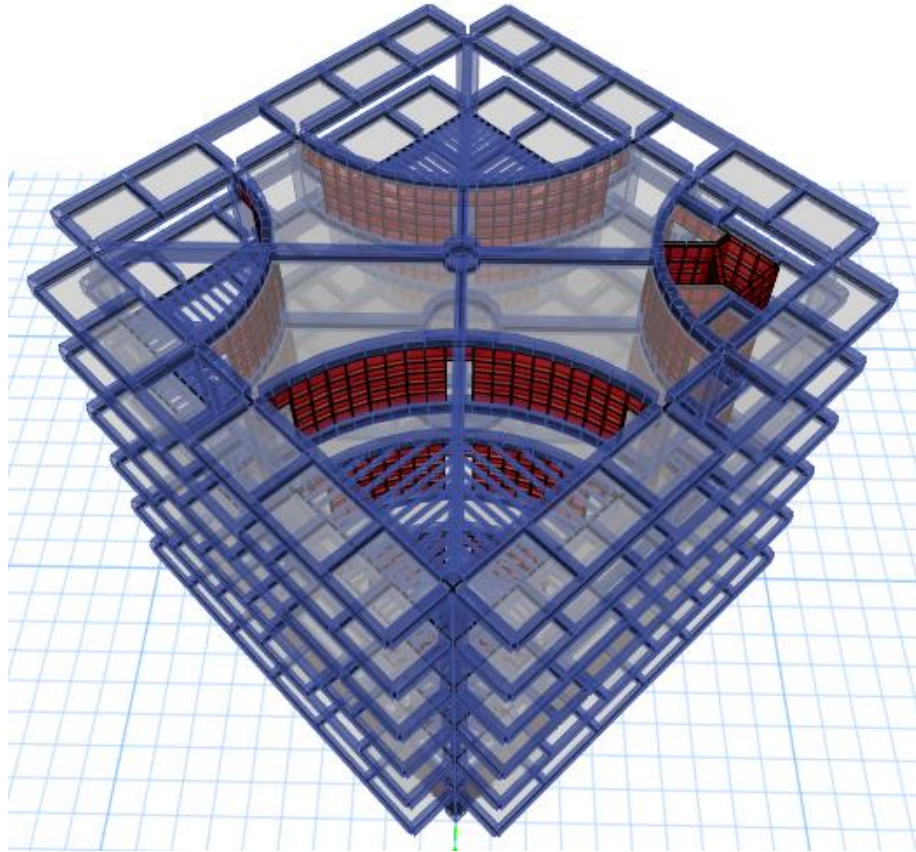


Figura 4.4 Modelo 3D desde un punto superior

Luego de modelar los elementos estructurales se procede a modelar los elementos no estructurales, que como se mencionó en la metodología, se representarán en base a cargas distribuidas. Para esto, se ubicaron los elementos existentes sobre el espacio de oficinas, aleros perimetrales y losas de hormigón (interiores y techumbre). En el Anexo 4.1 se adjunta el detalle de los elementos considerados en la cubicación. A continuación, en la Tabla 4.1 se muestra un resumen de las cargas distribuidas de los elementos no estructurales.

Tabla 4.1 Resumen Cargas Distribuidas

Espacio de Aplicación	Carga Distribuida (kg/m²)
Oficinas	51,6
Aleros Perimetrales	274,8
Losas de hormigón (Zócalo – 5to piso)	159
Losa de hormigón (Techumbre)	52,7

Para aplicar la carga sobre el área de oficinas, estructurada en base a vigas de madera (modelada con *frames*), se multiplica la carga distribuida por su ancho tributario de 40 cm:

$$C_{madera} = 51,6 \frac{kg}{m^2} \cdot 0,4 m = 20,6 kg/m \quad (4.2)$$

Luego este valor se redondea al entero más próximo y aplica al modelo. Las cargas distribuidas pertenecientes a los aleros perimetrales y losas de hormigón son aplicadas directamente sobre los elementos de área (*shell*) en el que se modelaron. Las imágenes de la aplicación de estas cargas se pueden consultar en el Anexo 4.2.

En cuanto a las cargas vivas, estas no se consideraron dentro del modelo ya que al momento de realizar las mediciones de las vibraciones el edificio no estaba en uso.

Después de aplicar las cargas no estructurales al modelo se corre el análisis modal. De este análisis nos interesa en particular los periodos de los modos de vibrar con mayor masa traslacional participante en el eje X, eje Y, y en rotación con respecto al eje Z. Las deformadas de los modos fundamentales se muestran de la Figura 4.5 a la Figura 4.7.

Tabla 4.2 Resultados del análisis modal

Case	Mode	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RZ
Modal	1	0.367	0.614	0.000	0.000	0.614	0.000	0.000	0.000
Modal	2	0.310	0.000	0.303	0.000	0.614	0.304	0.000	0.312
Modal	3	0.280	0.000	0.310	0.000	0.614	0.614	0.000	0.301
Modal	4	0.151	0.001	0.000	0.351	0.615	0.614	0.351	0.000
Modal	5	0.140	0.000	0.007	0.002	0.615	0.620	0.353	0.000
Modal	6	0.134	0.000	0.002	0.006	0.615	0.622	0.358	0.000
Modal	7	0.123	0.001	0.001	0.036	0.616	0.623	0.394	0.000
Modal	8	0.119	0.002	0.003	0.006	0.618	0.626	0.400	0.000
Modal	9	0.115	0.052	0.000	0.001	0.670	0.626	0.401	0.000
Modal	10	0.111	0.000	0.001	0.000	0.670	0.627	0.401	0.005
Modal	11	0.105	0.031	0.005	0.000	0.701	0.632	0.401	0.003
Modal	12	0.104	0.019	0.014	0.001	0.720	0.645	0.402	0.009

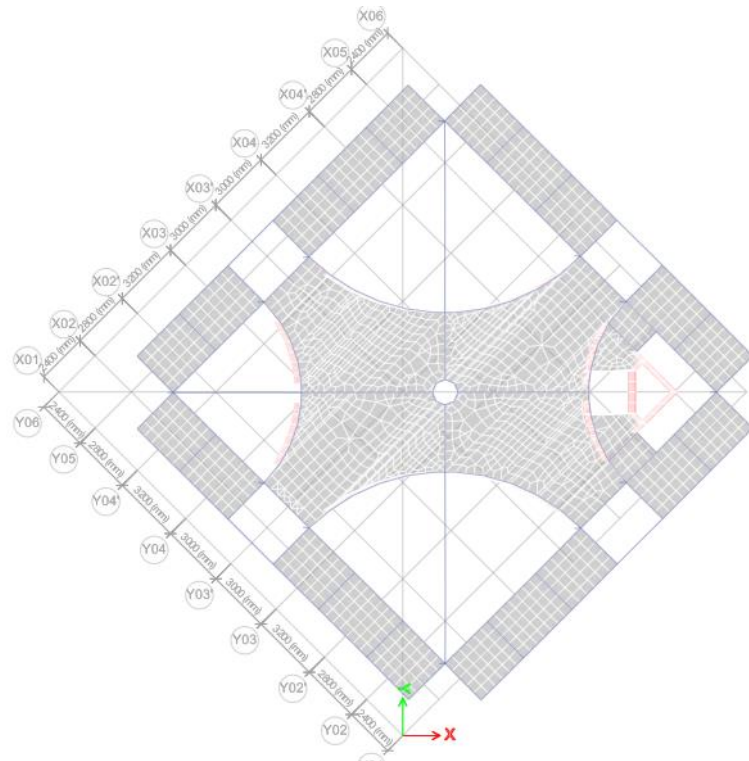


Figura 4.5 Vista en planta deformada nivel 5 (Modo 1)

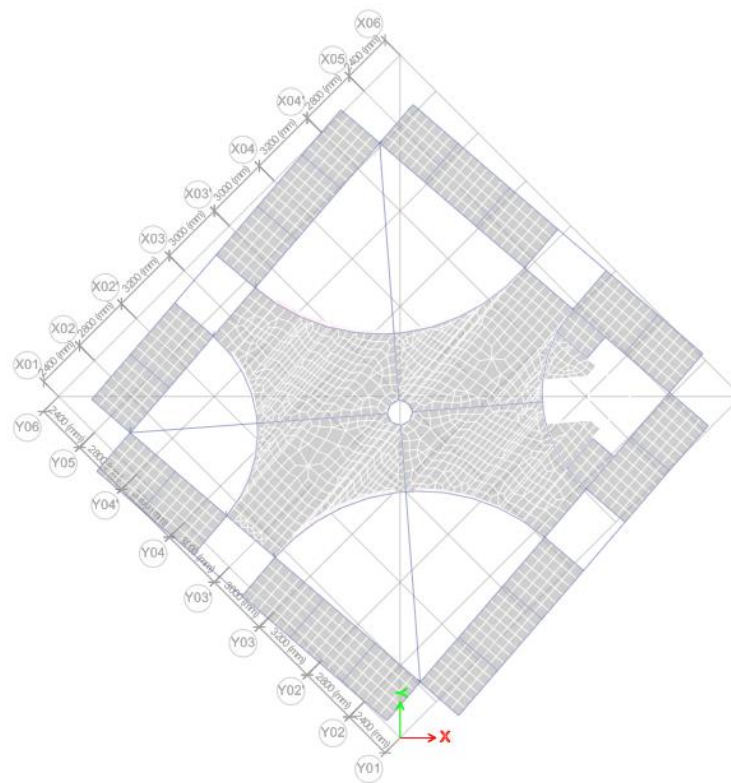


Figura 4.6 Vista en planta deformada nivel 5 (Modo 2)

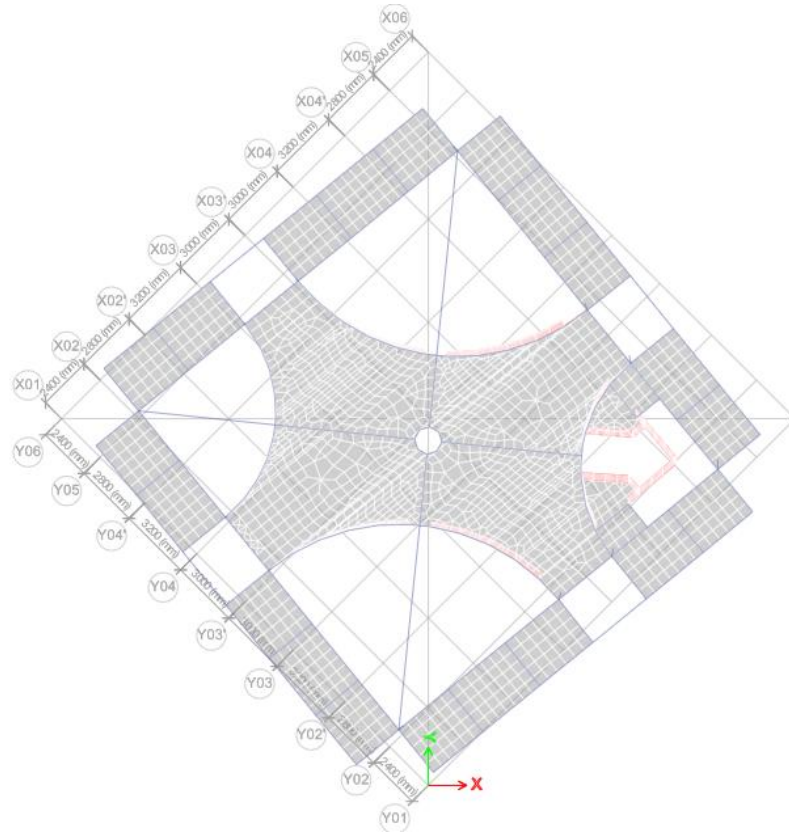


Figura 4.7 Vista en planta deformada nivel 5 (Modo 3)

Los periodos por lo tanto son extraídos desde la Tabla 4.2 y luego se les calcula su inverso para obtener las frecuencias de los modos simulados:

$$f_{n1} = \frac{1}{0.367 \text{ s}} = 2,72 \text{ Hz}$$

$$f_{n2} = \frac{1}{0.28 \text{ s}} = 3,57 \text{ Hz}$$

$$f_{n3} = \frac{1}{0.31 \text{ s}} = 3,22 \text{ Hz}$$

Con estos valores se procede a calcular el error asociado a la modelación del edificio con la Ecuación 3.2 del Capítulo 3:

$$error_{total} = \frac{\left| \frac{2,72 - 2,85}{2,85} \right| + \left| \frac{3,57 - 3,09}{3,09} \right| + \left| \frac{3,22 - 3,84}{3,84} \right|}{3} = 0,12 \tag{4.3}$$

En conclusión, como el error porcentual asociado a la modelación inicial con propiedades nominales (12%) es menor al límite que se estableció en la metodología (30%) se valida el modelo numérico.

4.3 Ranking de variables por sensibilidad

Como se mencionó en la metodología del análisis de sensibilidad, este se ejecutó desde el programa quoFEM, por lo tanto, parte del desarrollo de este análisis se basó en configurar opciones dentro del programa. Las configuraciones se pueden separar en cuatro etapas: la relacionada con la definición del algoritmo que realiza el análisis, la que vinculan el modelo de elementos finitos, la que define las variables a iterar y la que define la variable a minimizar.

Con respecto al algoritmo que realiza el análisis de sensibilidad se definió que se realizaría con el motor de cuantificación Dakota y su método de muestro LHS. Este método se ejecutó especificando 100 muestras por variable y un valor pseudoaleatorio *seed* de 34.

Luego, con respecto a la vinculación del modelo de elementos finitos, esta se realiza en base a la codificación en Python, la cual permite a quoFEM controlar ciertas funciones de ETABS a través de los comandos entregados por las herramientas API. En particular, se escriben dos códigos, uno principal y otro con las variables en estudio. En síntesis, lo que realiza el código principal es una copia temporal del modelo del edificio y mediante comandos del API identifica dentro del modelo ETABS los parámetros a manipular. En este caso, se identifican materiales isotrópicos, para definir los módulos de elasticidad, y cargas uniformemente aplicadas a elementos tipo *Shell*, para definir las cargas no estructurales sobre losas de hormigón armado, de esta manera se reconocen como variables a controlar por quoFEM (El nombre de la variable tiene que coincidir con el nombre utilizado en el modelo ETABS y se pueden consultar en la Tabla 3.3 y Tabla 3.4). Luego, el código corre un análisis modal y calcula el error asociado a la iteración para después guardarlo dentro de las respuestas del programa. El detalle del código se adjunta en el Anexo 4.4.

Después de adjuntar los códigos, se enlistan las variables en la interfaz del programa (Identificándolas con los nombres que se utilizaron tanto en el código como en el modelo) y se escoge la distribución Uniforme. Luego se señalan los límites inferiores y superiores para cada variable de entrada según se señaló en el Capítulo 3.

El último *input* a definir en el programa consiste en el nombre de la variable de interés a minimizar, en este caso corresponde a la variable error total que se define en la Ecuación 3.2 y que está definida igualmente en el código Python.

Al correr el análisis de sensibilidad se obtiene la lista de variables con sus índices de Sobol respectivos (Tabla 4.3). Para una mejor comprensión de los resultados estos también se muestran gráficamente en la Figura 4.8, donde se grafican los índices de Sobol principales.

Tabla 4.3 Índices de Sobol

Variable	Main	Total
Ecm1	0,023	0,009
Ecm2	0,305	0,816
Ecm3	-0,011	0,228
Ecm4	-0,006	0,006
Ecm5	0,003	0,226
Ecm6	0,12	0,278
Ev11	0,015	0,018
Ev12	-0,014	0,172
Ev13	0,003	0,036
Ev14	-0,035	0,045
Ev15	0,007	0,098
Ev16	-0,037	0,212
PH1	0	0
PH2	0	0
PH3	0,046	0,038
PH4	0,021	0,14
PH5	0,203	0,21
PH6	0,019	0,052

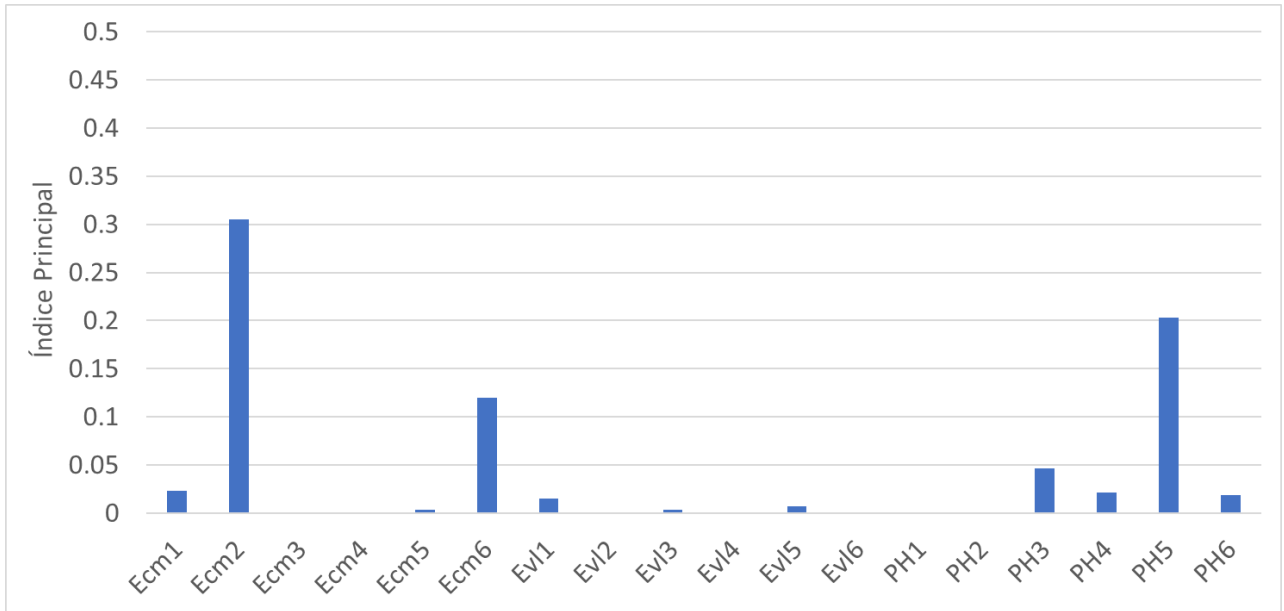


Figura 4.8 Resultados índices principales

Se observa que, de las 18 variables, tres poseen un Índice Principal notoriamente mayor al resto de variables, estas son las identificadas como Ecm2, Ecm6 y PH5. Se graficaron los Diagramas Boxplot de estas iteraciones, encontrando que las tres variables significativas muestran una desviación importante con respecto a los rangos intercuartiles entre los datos totales (2000 iteraciones) y los datos correspondientes al 5% de menor error, equivalentes a 100 iteraciones (Figura 4.9 a Figura 4.11), lo que reafirma su calidad de variables significativas.

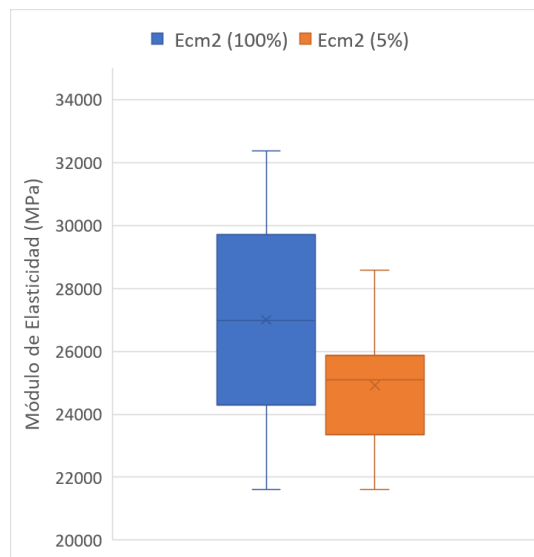


Figura 4.9 Comparación Diagramas Boxplot para " E_{cm2} "

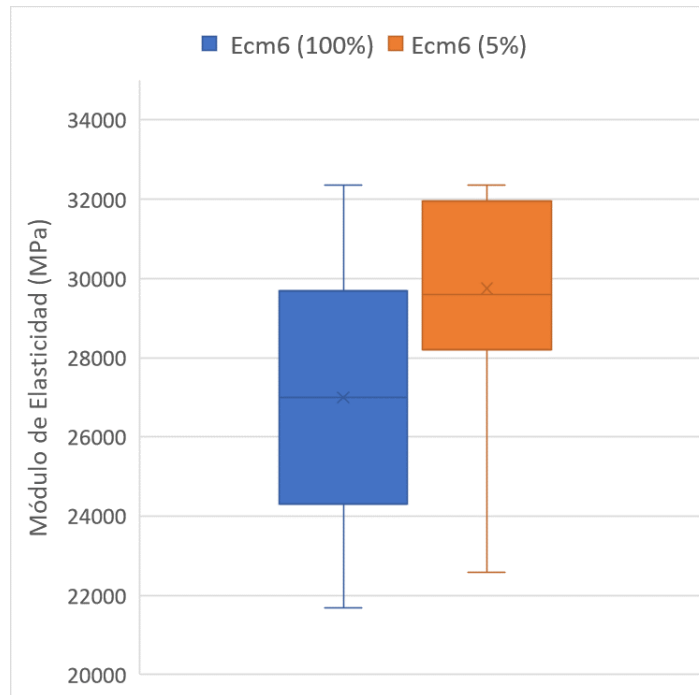


Figura 4.10 Comparación Diagramas Boxplot para " E_{cm6} "

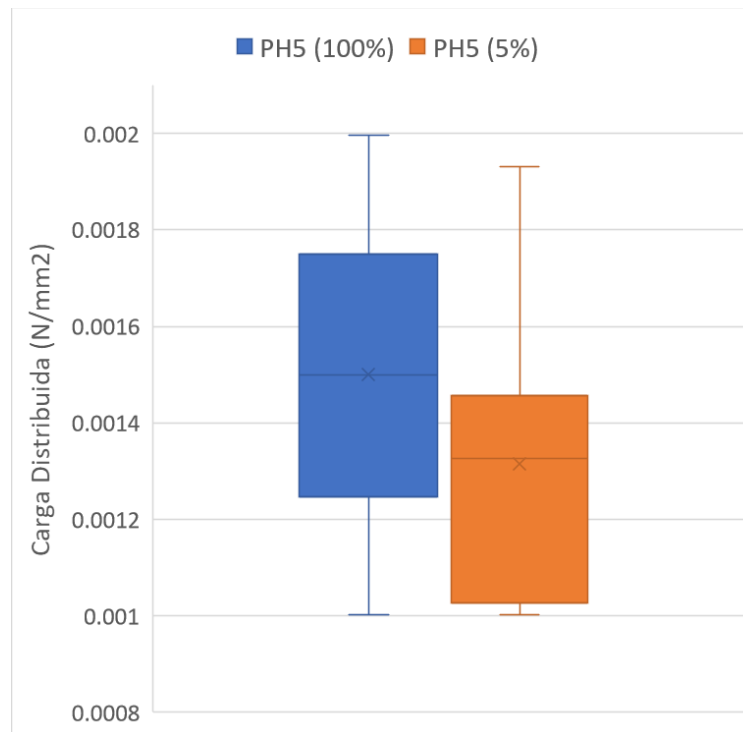


Figura 4.11 Comparación Diagramas Boxplot para " P_{H5} "

Para mostrar la diferencia de estos diagramas con respecto a las variables no significativas se adjunta también a continuación el diagrama para la variable E_{cm1} :

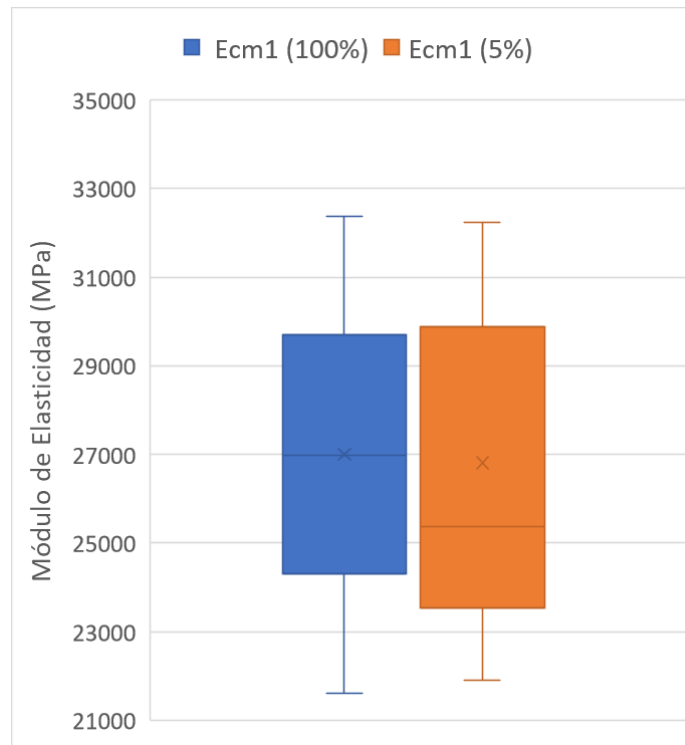


Figura 4.12 Comparación Diagramas Boxplot para " E_{cm1} "

4.4 Modelo calibrado del edificio

Al igual que la configuración del análisis de sensibilidad, la ejecución de la calibración se puede dividir en cuatro etapas. En la primera etapa se define el algoritmo que llevará a cabo la calibración, en la segunda, se vincula el modelo a quoFEM, en la tercera se definen las variables a calibrar y la última etapa consiste en definir la variable a minimizar durante la calibración.

Para la primera etapa se define que el tipo de calibración a ejecutar corresponde a la determinista y será ejecutada por el motor de cuantificación Dakota. El método de optimización considerado es el NL2SOL y usará como criterio para terminar las iteraciones una tolerancia de convergencia de 0,0001.

Para la vinculación del modelo de elementos finitos a qtoFEM se utiliza un código de Python similar al utilizado para el análisis de sensibilidad. Este se distingue del código anterior al fijar los valores de las variables que no fueron seleccionadas significativas. Su valor ahora será igual al valor nominal, en el caso de los módulos de elasticidad, y a su valor promedio, en el caso de las cargas distribuidas (Tabla 4.4)

Tabla 4.4 Variables fijas

Variable	Valor fijo (N/mm ²)
Ecm1	27800
Ecm3	27800
Ecm4	27800
Ecm5	27800
Ev11	27800
Ev12	27800
Ev13	27800
Ev14	27800
Ev15	27800
Ev16	27800
PH1	0,0015
PH2	0,0015
PH3	0,0015
PH4	0,0015
PH6	0,0006

Luego de fijar estas variables en el código Principal este se carga al programa. El resto de las variables se deben definir en el código de Parámetros y se igualan a su valor nominal o promedio (Tabla 4.5)

Tabla 4.5 Variables a iterar

Variable	Valor por iterar (N/mm ²)
Ecm2	27800
Ecm6	27800
PH5	0,0015

En la tercera etapa se definieron los rangos en que las tres variables significativas se calibrarán además de definir el punto inicial desde donde iniciarán las iteraciones. Para la primera calibración se utilizaron los mismos rangos definidos en el análisis de sensibilidad, y el punto inicial se consideró igual al límite inferior del rango. La Tabla 4.6 muestra los valores ingresados a q_{FEM} .

Tabla 4.6 Definición variables a iterar (Calibración N°1)

Variable	Límite Inferior (N/mm ²)	Límite Superior (N/mm ²)	Punto Inicial (N/mm ²)
Ecm2	22240	33360	22240
Ecm6	22240	33360	22240
PH5	0,001	0,002	0,001

Como última etapa se define que la variable de interés a minimizar corresponde nuevamente al error total. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.7 Variables Calibradas (Calibración N°1)

Variable	Valor (N/mm ²)
Ecm2	33360
Ecm6	33360
PH5	0,001

El error asociado a esta calibración fue de 11,6%. Para evaluar la convergencia de las soluciones, se realiza una segunda calibración, solo variando el punto inicial desde donde comienzan a iterar las variables. Los nuevos Puntos Iniciales se muestran en la Tabla 4.8 y se escogieron específicamente por ser las soluciones óptimas de estas variables encontradas durante el análisis de sensibilidad.

Tabla 4.8 Definición variables a iterar (Calibración N°2)

Variable	Límite Inferior (N/mm ²)	Límite Superior (N/mm ²)	Punto Inicial (N/mm ²)
Ecm2	22240	33360	24900
Ecm6	22240	33360	29800
PH5	0,001	0,002	0,0013

Los resultados de esta calibración se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.9 Variables Calibradas (Calibración N°2)

Variable	Valor (N/mm ²)
Ecm2	24900
Ecm6	29800
PH5	0,0012

El error asociado a esta calibración fue de un 8%. Como ambas calibraciones no convergen a una misma solución se estima que este problema tiene óptimos locales y no un único global. Lo anterior también se pudo apreciar al graficar las iteraciones entre las variables Ecm2 y Ecm6 con respecto a su error (Figura 4.13), donde se observa la múltiple presencia de valles representando los óptimos encontrados en ese espacio.

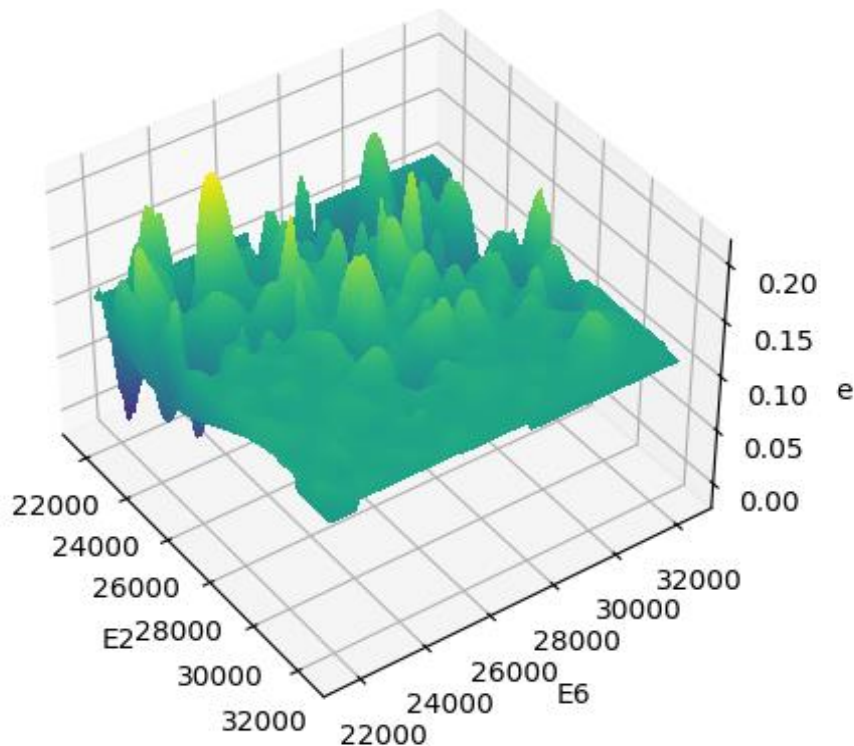


Figura 4.13 Grafico 3D para la variación de Ecm2 y Ecm6

Se prueba entonces, realizar la calibración en base a los Diagramas Boxplots, resultado del análisis de sensibilidad. Desde los diagramas del 5% de los datos de menor error se extraen los

promedios de las variables significativas y el resto de las variables se mantiene con su valor nominal o promedio.

Tabla 4.10 Definición valores calibración N°3

Variable	Valor (N/mm ²)
Ecm2	24900
Ecm6	29800
PH5	0,0013

El modelo se cargó con estos valores y se corrió el análisis modal, los resultados de las propiedades dinámicas se muestran en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Modos de vibrar del modelo calibrado

Modo	Periodo (s)	Frecuencia numérica (Hz)
1er modo	0,366	2,73
2do modo	0,311	3,21
3er modo	0,281	3,55

El error asociado a esta iteración fue de un 5%.

A modo de resumen, se muestra en la siguiente tabla el error entre las frecuencias de los modelos inicial y calibrado con respecto a las mediciones experimentales:

Tabla 4.12 Resumen error asociado a las frecuencias numéricas

Modo	Frecuencias modelo inicial (Hz)	Error (%)	Frecuencia modelo calibrado (Hz)	Error (%)
1er modo	2,72	4%	2,73	4%
2do modo	3,57	16%	3,21	4%
3er modo	3,22	16%	3,56	7%

Desde donde se observa que el error correspondiente al primer modo no disminuyó luego de la calibración, pero representaba desde un principio un error bajo. En cambio, para los otros dos modos de vibrar, donde el error era considerablemente mayor, si se logró disminuir su valor. Se identifica además la dificultad de la calibración para disminuir en este caso el error asociado al modo de vibrar torsional.

En la Tabla 4.13 se muestra un resumen de las frecuencias simuladas versus las experimentales, de la cual se puede observar que en general las frecuencias simuladas (Modo 1 y 3) se mostraron menores en relación con las medidas en terreno, identificando modos de vibrar más flexibles en los ejes X y rotacionales. En cambio, para el modo 2 las frecuencias simuladas fueron mayores, identificando un modo de vibrar más rígido en la dirección Y, con respecto a las experimentales.

Tabla 4.13 Resumen Frecuencias numéricas

Modo	Frecuencias experimentales (Hz)	Frecuencias modelo inicial (Hz)	Frecuencia modelo calibrado (Hz)
1er modo	2,85	2,72	2,73
2do modo	3,09	3,57	3,21
3er modo	3,84	3,22	3,56

4.5 Conclusiones

De lo anterior, se concluye que se cumplió con los objetivos específicos señalados, logrando modelar una estructura, realizar un análisis de sensibilidad a sus variables y finalmente calibrar el modelo.

A continuación, se analizarán los resultados vistos en este capítulo.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

5.1 Conclusiones

En conclusión, se pudo cumplir con los objetivos específicos del trabajo. A continuación, se realizó un análisis de los principales resultados obtenidos en cada etapa del trabajo.

En cuanto a la revisión del estado del arte, con respecto a la calibración de estructuras se concluyó que actualmente es una herramienta con un potencial importante debido al creciente desarrollo de nuevos métodos numéricos que incentiva a desarrollar modelos más precisos para conocer el comportamiento de la estructura como también para el desarrollo de un tópico emergente en la industria de la ingeniería civil que es el estudio continuo de edificios, que permita detectar daños y estrategias de mantenimiento con técnicas no destructivas.

En segundo lugar, se logró una revisión de las técnicas de muestreo disponibles en $qFEM$ para el análisis de sensibilidad de modelos numéricos, identificando su fundamento teórico y forma de aplicación, de la cual se concluyó que se utilizaría la técnica de muestreo LHS, por su utilidad frente a problemas con variables de entrada múltiples. En cuanto a la calibración, la revisión permitió definir que el método de optimización adecuado sería el NL2SOL.

Con respecto a la modelación, se logró que el error entre los resultados del análisis modal del modelo base preliminar y las mediciones experimentales fueran de un 12%, significativamente menor al límite del 30% propuesto en metodología, lo que indica una buena representatividad del comportamiento de este modelo inicial y precisión en los supuestos para avanzar luego en un análisis más profundo.

De los resultados del análisis de sensibilidad se consideró que solo tres de las 18 variables analizadas fueron significativas para el comportamiento del modelo. Estos fueron los módulos de elasticidad de muros y columnas del primer y último piso (E_{cm2} y E_{cm6} , respectivamente) y la carga no estructural aplicada a la losa de hormigón del último piso (PH5).

La incidencia de parte de los módulos de elasticidad del primer y último piso es esperada, pues los módulos de elasticidad influyen directamente en la rigidez de la estructura y, por lo tanto, en los modos de vibrar del edificio, que son finalmente las propiedades que se están evaluando. La variable más influyente dentro del modelo (Con un Índice de Sobol Principal de 0,305) corresponde al módulo de elasticidad de muros y columnas del primer piso. Su influencia se puede explicar debido a que la rigidez de estos elementos representa una parte fundamental para la transmisión de cargas desde los pisos superiores hasta la base del edificio, afectando las deformaciones que este puede sufrir. Esto, considerando que el zócalo no fue significativo en este caso por tener elementos de mayores dimensiones con respecto a los demás pisos que resultaba muy rígido independiente de la variación de sus módulos de elasticidad. Por otra parte, la incidencia del módulo de elasticidad de muros y columnas del último piso (Con un Índice de Sobol Principal de 0,12) representa la tercera variable más influyente dentro del modelo y esta influencia se puede explicar debido a la mayor densidad de muros en este nivel, mayor a cualquier otro piso y que toma en este nivel los movimientos torsionales del edificio. De esto se puede concluir, además, que los módulos de elasticidad de vigas y losas, en este edificio, no fueron significativos para su comportamiento.

Por último, las cargas no estructurales aplicadas a la losa del último piso representan la segunda variable más influyente del modelo, con un Índice Principal de Sobol de 0,2. Las cargas pueden influir de distintas formas en la flexibilidad de una estructura, dependiendo principalmente de su magnitud y distribución dentro de ella. En este caso, una carga distribuida en el último piso aumenta la flexibilidad del edificio y su influencia se puede explicar debido al mayor desplazamiento de los pisos superiores, lo que puede generar un aumento de los momentos torsionales generados por esta carga. Además, su magnitud, mayor a la carga representada por la techumbre del edificio, y una mayor área de aplicación, explicaría por qué una carga ligeramente más alejada del centro de masa no fue tan significativa como la aplicada en este piso. Por lo anterior, se puede concluir que los resultados del análisis de sensibilidad son consistentes con los principios teóricos que explican la respuesta modal de un edificio.

Otra de las características que validaron el análisis fueron los Diagramas Boxplot (Figura 4.9 a Figura 4.11), de los cuales se pudo corroborar por análisis visual la influencia de las variables señaladas significativas por los Índices de Sobol.

Con respecto a la calibración del modelo, se debe notar que las primeras 2 calibraciones que se realizaron mediante quofEM mostraron una divergencia de las soluciones, es decir, utilizando los mismos rangos para cada variable pero variando los Puntos Iniciales el algoritmo encontró soluciones óptimas distintas. Esto también se pudo observar gráficamente al modelar en 3D los resultados del análisis de sensibilidad (Figura 4.13), en los cuales se muestran numerosos valles en los que se encontrarían los mínimos locales. Se concluyó con esto que el modelo no podía ser calibrado eficientemente utilizando el algoritmo de quofEM y se procedió a utilizar los diagramas Boxplot. Las razones por las que el modelo tuvo dificultades para calibrarse mediante este algoritmo se podrían explicar por la escasa cantidad de mediciones experimentales con las que se contaba, no pudiendo abarcar la variabilidad del sistema de forma representativa, disminuyendo así la probabilidad de encontrar un óptimo global.

Los valores de la calibración de las variables significativas mediante los diagramas de Boxplot llegaron como máximo a un 13% de variación con respecto a los valores nominales o promedio, y el resto de las variables se ajustó con variaciones aun menores, lo que indicaría una buena representatividad del modelo inicial y los supuestos ocupados. Con respecto a los módulos de elasticidad de muros y columnas del primer piso este valor resultó menor al nominal, lo que podría responder a micro fisuras iniciales en este nivel debido a que representa el piso con menor densidad de muros y al mismo tiempo debe soportar la carga de todos los pisos superiores. Cabe destacar que esta disminución del módulo de elasticidad corresponde solo a un 10% con respecto a la nominal. Finalmente, con respecto a la carga distribuida del último piso el valor calibrado resultó menor al cubicado en un 13%. Al reemplazar estos valores en el modelo se logró un error total del 5%, logrando así el ultimo objetivo de este trabajo.

5.2 Comentarios

Con respecto a la metodología, se señala la importancia de contar con una buena cantidad de mediciones experimentales, por ejemplo, de sus formas modales, para mejorar la representatividad del comportamiento de la estructura y evitar resultados con múltiples óptimos locales.

Con respecto a líneas futuras de trabajo, se destaca la posibilidad de seguir realizando mediciones en este edificio con el objetivo de realizar un monitoreo de la salud estructural, con las cuales se podrían generar modelos de menor incertidumbre y planificar estrategias de mantenimiento a la estructura.

GLOSARIO

API: Interfaz de Programación de Aplicaciones

GSA: Análisis de sensibilidad global

LHS: Muestreo de hipercubo latino

ACI: *American Concrete Institute*

INN: Instituto Nacional de Normalización

REFERENCIAS

- Adams, B. M., Bohnhoff, W. J., Dalbey, K. R., Ebeida, M. S., Eddy, J. P., Eldred, M., Hooper, R., Hough, P. D., Hu, K. T., Jakeman, J. D., Khalil, M., Maupin, K., Monschke, J., Ridgway, E., Rushdi, A., Seidl, D., Stephens, J. A., & Winokur, J. (2020). *Dakota, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis: Version 6.13 User's Manual*. <https://doi.org/10.2172/1817318>
- American Concrete Institute. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete*. (ACI 318-19). Michigan, EE.UU: Autor
- Deierlein, G. G., McKenna, F., Zsarnóczy, Á., Kijewski-Correa, T., Kareem, A., Elhaddad, W., Lowes, L. N., Schoettler, M. J., & Govindjee, S. (2020). A Cloud-Enabled application framework for simulating Regional-Scale impacts of natural hazards on the built environment. *Frontiers in Built Environment*, 6. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.558706>
- Ereiz, S., Duvnjak, I., & Jiménez-Alonso, J. F. (2022). Review of finite element model updating methods for structural applications. *Structures*, 41, 684-723. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.05.041>
- Instituto Nacional de Normalización. (2014). *Madera – Construcciones en Madera - Cálculo*. (NCh 1198). Santiago, Chile: Autor

ANEXOS

ANEXO 1.1 Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ODS-2 : Hambre cero.
- ODS-3 : Salud y bienestar.
- ODS-4 : Educación de calidad.
- ODS-5 : Igualdad de género.
- ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ODS-10: Reducción de las desigualdades.
- ODS-11: Ciudades y comunidades sostenibles.
- ODS-12: Producción y consumo responsables.
- ODS-13: Acción por el clima.
- ODS-14: Vida Submarina.
- ODS-15: Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS-16: Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ODS-17: Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación
<p>El uso de nuevas herramientas y métodos para calibrar edificios contribuye a la innovación dentro de la industria de la construcción. Además, el monitoreo de estructuras realizado mediante calibraciones permite disminuir las incertidumbres acerca de su comportamiento en el tiempo, permitiendo optimizar el uso de materiales y planificaciones de mantenimiento, promoviendo prácticas sostenibles en el campo de la ingeniería civil.</p>

ANEXO 4.1 Cubicación de elementos no estructurales

Tabla A.4.1.1 Cubicación elementos no estructurales - Oficinas

Cargas distribuidas - Oficinas		
Elementos considerados	Peso según unidad	Unidad
Piso entablado roble MH 1x4"	9.2	kg/m ²
Aislación p. expandido 10 kg/m ³ (e=10 mm)	10	kg/m ³
Aislación p. expandido 30 kg/m ³ (e=20 mm)	30	kg/m ³
Terciado estructural (e=18 mm)	9.93	kg/m ²
Listoneado pino bruto 2x3"	8.7	kg/m ²
Aislación acústica lana mineral (e=50 mm)	14	kg/m ³
Volcanita RF (e=15 mm)	10.2	kg/m ²
Entablado pino MH 1x4"	12.2	kg/m ²
Total por área	51.6	kg/m ²

Tabla A.4.1.2 Cubicación elementos no estructurales – Losas de H.A

Cargas distribuidas - Losas de H.A.		
Elementos considerados	Peso según unidad	Unidades
Entramado 2x3" cada 40 cm	16	kg/m ²
Terciado estructural (e=18mm)	10	kg/m ²
Poliestireno expandido (e=40mm)	30	kg/m ³
Sobrelosa (e=50 mm) + af cemento (10mm)	2200	kg/m ³
Total por área	159.2	kg/m ²

Tabla A.4.1.3 Cubicación elementos no estructurales – Aleros Perimetrales

Cargas distribuidas - Aleros Perimetrales		
Elementos considerados	Peso según unidad	Unidad
Hormigón (e=10 cm)	2500	kg/m ³
Terciado estructural (e=18 mm)	9.9	kg/m ²
Estructura madera 2x3"	14.9	kg/m ²
Total por área	274.8	kg/m ²

Tabla A.4.1.4 Cubicación elementos no estructurales - Techumbre

Cargas distribuidas - Techumbre					
Elementos Considerados	Dimensiones	Unidad	Peso por unidad	Unidad	Total (kg)
Vigas IC15	262.2	m	5.7	kg/m	1484.3
Vigas 2x6" cada 80 cm	711.0	m	3.9	kg/m	2795.8
Vigas C15	50.0	m	5.7	kg/m	283.3
Cubierta de acero (e=0.6 mm)	299.3	m ²	5.8	kg/m ²	1735.9
Filtro 16 Lb	299.3	m ²	0.2	kg/m ²	67.3
Terciado e=18 mm	299.3	m ²	9.9	kg/m ²	2972.1
Aislación térmica (e=50 mm)	299.3	m ²	1.0	kg/m ²	299.3
Aislación térmica (e=150 mm)	299.3	m ²	3.0	kg/m ²	897.9
Volcanita RF (e=15 mm)	299.3	m ²	10.2	kg/m ²	3052.8
Entablado pino MH 1x4"	235.1	m ²	9.2	kg/m ²	2160.3
Total (kg)					15749
Total por área (kg/m ²)					52.7

ANEXO 4.2 Aplicación Cargas No Estructurales

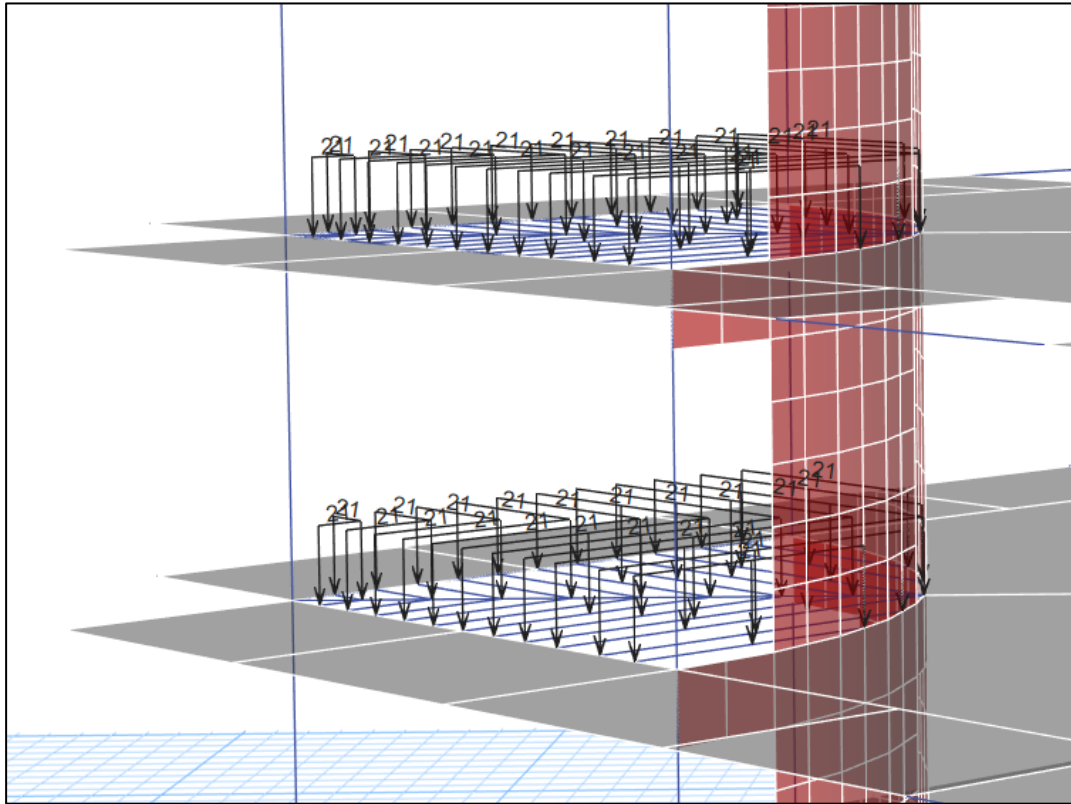


Figura A.4.2.1 Cargas No estructurales - Oficinas (kg/m)

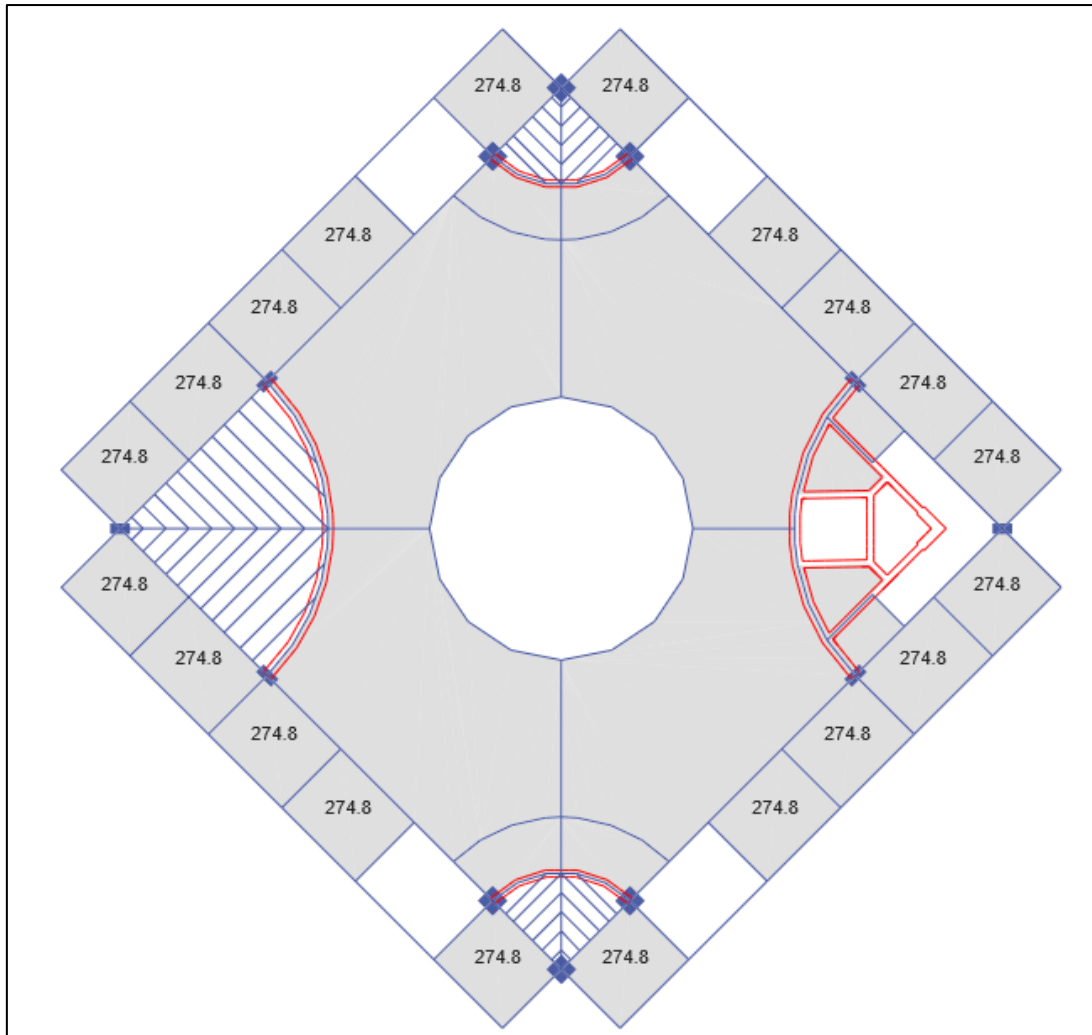


Figura A.4.2.2 Cargas No Estructurales 1er Piso - Aleros (kg/m²)

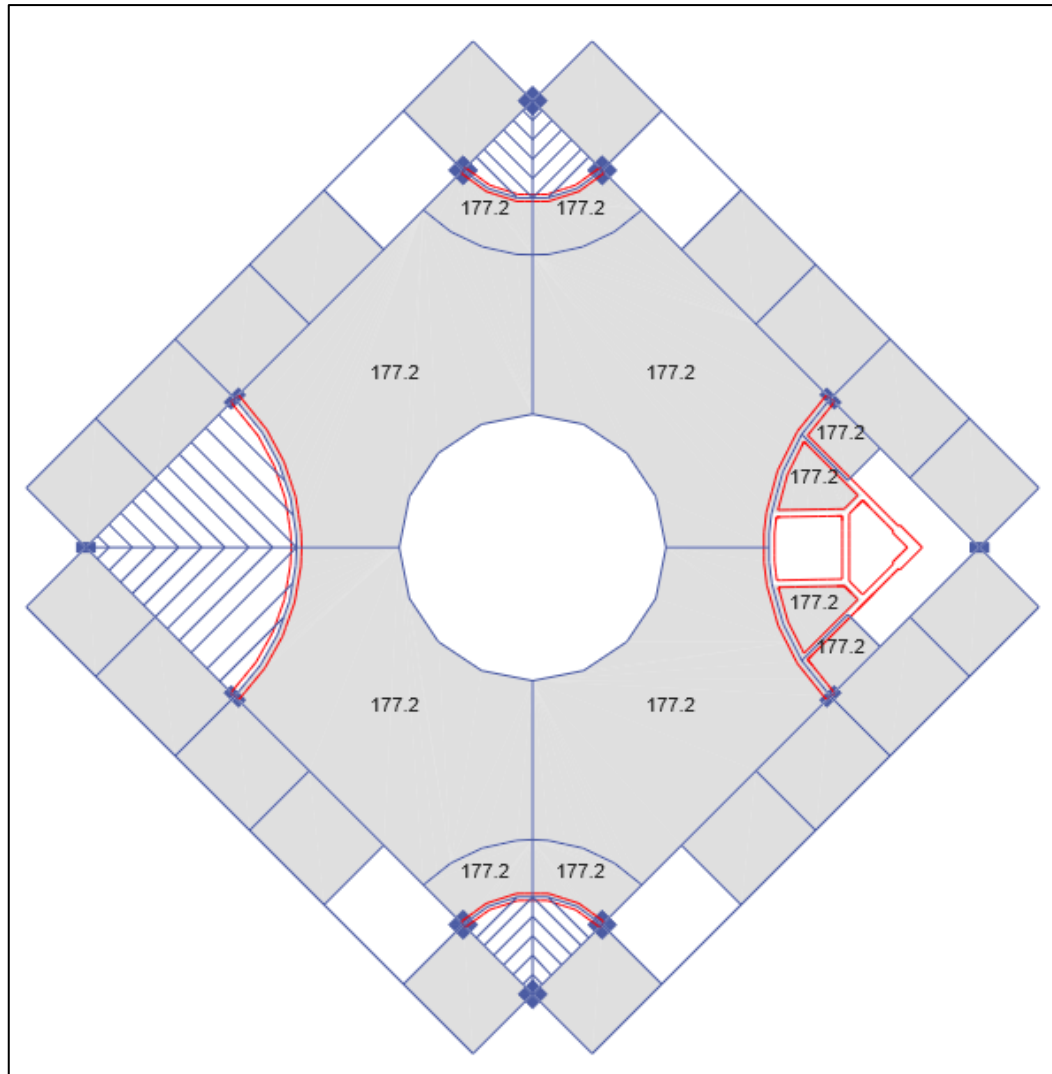


Figura A.4.2.3 Cargas No Estructurales 1er piso - Losas de Hormigón (kg/m²)

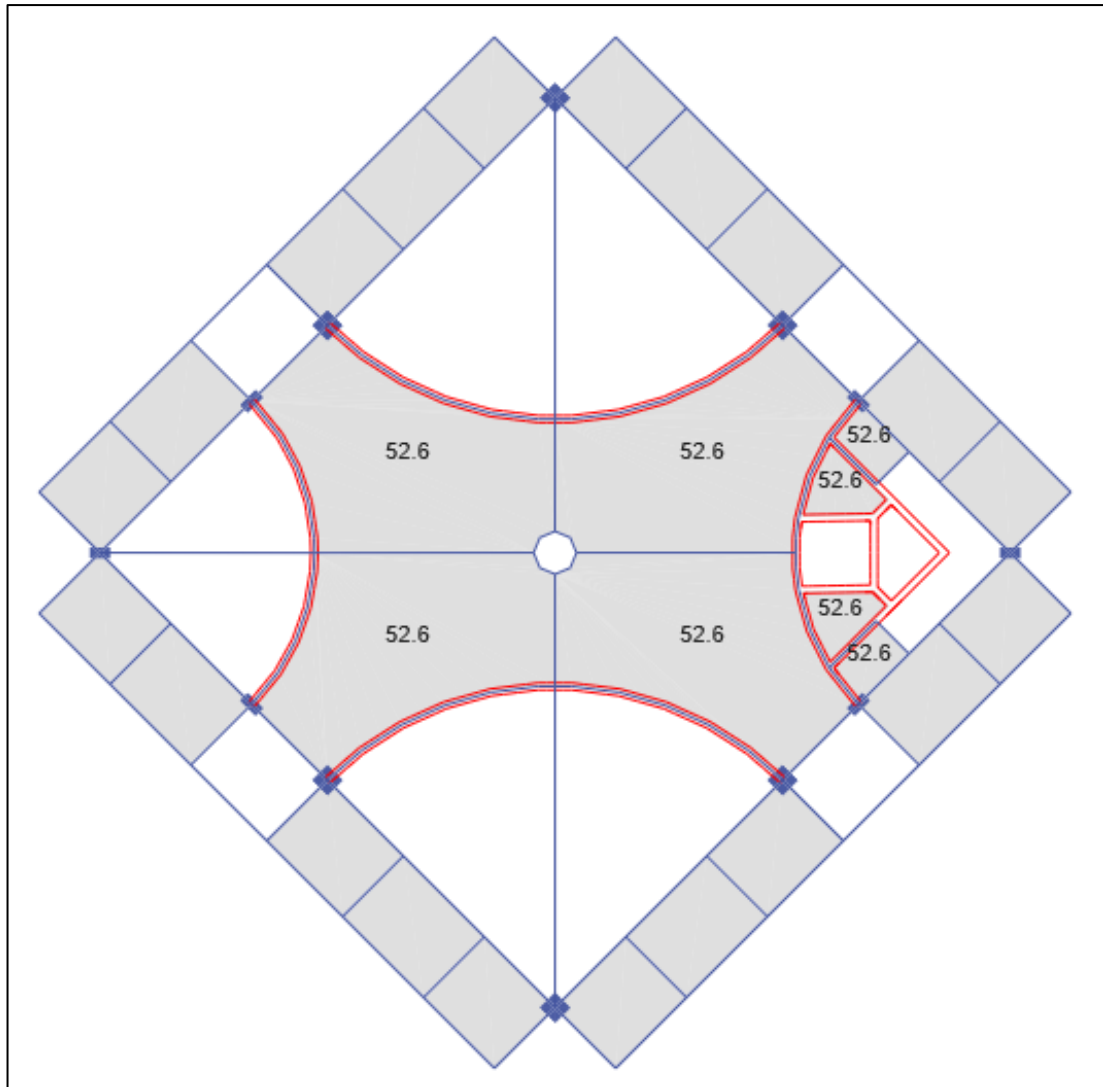
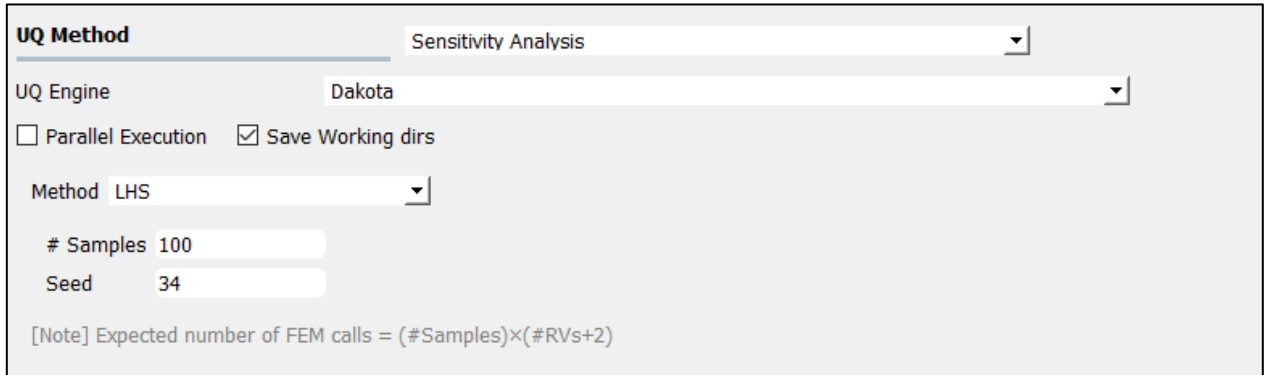


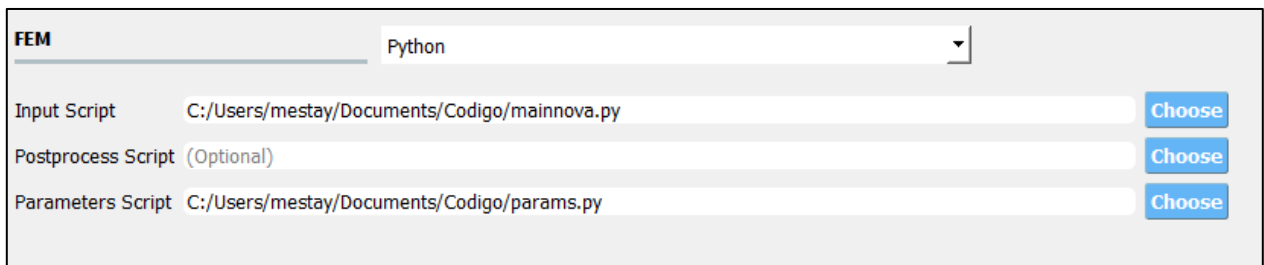
Figura A.4.2.4 Cargas No estructurales - Techumbre (kg/m^2)

ANEXO 4.3: Configuración de quoFEM para el Análisis de Sensibilidad



The screenshot shows a configuration window titled "UQ Method" with a dropdown menu set to "Sensitivity Analysis". Below this, the "UQ Engine" is set to "Dakota". There are two checkboxes: "Parallel Execution" (unchecked) and "Save Working dirs" (checked). The "Method" dropdown is set to "LHS". There are two input fields: "# Samples" with the value "100" and "Seed" with the value "34". At the bottom, a note states: "[Note] Expected number of FEM calls = (#Samples)×(#RVs+2)".

Figura A.4.3.1 Entrada método de cuantificación de incertidumbre



The screenshot shows a configuration window titled "FEM" with a dropdown menu set to "Python". There are three input fields, each with a "Choose" button to its right: "Input Script" with the path "C:/Users/mestay/Documents/Codigo/mainnova.py", "Postprocess Script (Optional)" which is currently empty, and "Parameters Script" with the path "C:/Users/mestay/Documents/Codigo/params.py".

Figura A.4.3.2 Entrada modelo de elementos finitos y parámetros

Input Random Variables [Add](#) [Clear All](#) [Correlation Matrix](#) [Export](#) [Import](#)

Variable Name	Distribution	Min.	Max.	
<input type="checkbox"/> Ecm1	Uniform	22240	33360	Show PDF
<input type="checkbox"/> Ecm2	Uniform	22240	33360	Show PDF
<input type="checkbox"/> Ecm3	Uniform	22240	33360	Show PDF
<input type="checkbox"/> Ecm4	Uniform	22240	33360	Show PDF
<input type="checkbox"/> Ecm5	Uniform	22240	33360	Show PDF
<input type="checkbox"/> Ecm6	Uniform	22240	33360	Show PDF
<input type="checkbox"/> Evl1	Uniform	22240	33360	Show PDF
<input type="checkbox"/> Evl2	Uniform	22240	33360	Show PDF
<input type="checkbox"/> Evl3	Uniform	22240	33360	Show PDF

Figura A.4.3.3 Entrada variables a iterar (Parte 1)

Input Random Variables Add Clear All Correlation Matrix Export Import

Variable Name	Distribution	Min.	Max.	
<input checked="" type="checkbox"/> Ev4	Uniform	22240	33360	Show PDF
<input checked="" type="checkbox"/> Ev5	Uniform	22240	33360	Show PDF
<input checked="" type="checkbox"/> Ev6	Uniform	22240	33360	Show PDF
<input checked="" type="checkbox"/> PH1	Uniform	0.001	0.002	Show PDF
<input checked="" type="checkbox"/> PH2	Uniform	0.001	0.002	Show PDF
<input checked="" type="checkbox"/> PH3	Uniform	0.001	0.002	Show PDF
<input checked="" type="checkbox"/> PH4	Uniform	0.001	0.002	Show PDF
<input checked="" type="checkbox"/> PH5	Uniform	0.001	0.002	Show PDF
<input checked="" type="checkbox"/> PH6	Uniform	0.0004	0.0008	Show PDF

Figura A.4.3.4 Entrada variables a iterar (Parte 2)

Quantities of Interest Add Clear All

Variable Name	Length
<input checked="" type="checkbox"/> error_total	1

Figura A.4.3.5 Entrada variable de interés

ANEXO 4.4 Configuración de quoFEM para la Calibración

UQ Method Deterministic Calibration

UQ Engine Dakota

Parallel Execution Save Working dirs

Method NL2SOL

Max # Iterations 1000

Convergence Tol 0.0001

Calibration data file C:/Users/mesta/Documents/Doceavo_semestre/Tutorial_AS_C/Arch_Py/timePeriodData.out [Choose](#)

Figura A.4.4.1 Entrada método de cuantificación de incertidumbre

FEM Python

Input Script C:/Users/mesta/Documents/Doceavo_semestre/Tutorial_AS_C/Arch_Py/mainnovaC.py [Choose](#)

Postprocess Script (Optional) [Choose](#)

Parameters Script C:/Users/mesta/Documents/Doceavo_semestre/Tutorial_AS_C/Arch_Py/params.py [Choose](#)

Figura A.4.4.2 Entrada modelo de elementos finitos y parámetros

Input Random Variables [Add](#) [Clear All](#) [Correlation Matrix](#) [Export](#) [Import](#)

Variable Name	Distribution	Lower Bound	Upper Bound	Initial Point
<input checked="" type="checkbox"/> Ecm2	ContinuousDesign	22240	33360	22240
<input checked="" type="checkbox"/> Ecm6	ContinuousDesign	22240	33360	22240
<input checked="" type="checkbox"/> PH5	ContinuousDesign	0.001	0.002	0.001

Figura A.4.4.3 Entrada variables a calibrar

Quantities of Interest Add Clear All

<input type="checkbox"/>	Variable Name	Length
<input checked="" type="checkbox"/>	error_total	1

Figura A.4.4.4 Entrada variable de interés

ANEXO 4.5 Códigos Python para análisis de sensibilidad

```
import os, sys

try:
    import comtypes.client
except:
    import subprocess
    subprocess.check_call([sys.executable, "-m", "pip", "install",
'comtypes'])
    import comtypes.client

import numpy as np

from params import *

FileName = r"C:\\Users\\mesta\\Documents\\Doceavo_semestre\\Modelo_ETABS
\\INNOVA_6.3.EDB"
TmpFileName = r"C:\\Users\\mesta\\Documents\\Doceavo_semestre\\Modelo_ETABS
\\INNOVA_6.3_tmp.EDB"

f1_target = 2.85
f2_target = 3.09
f3_target = 3.84

NroModos = 12
DataModos = []
DataModosX = []
DataModosY = []
DataFreqs = []
DataModos2 = []
DataFreqs2 = []

ModoExp1 = [0.160, 0.413, 0.625, 0.850, 1.000, 0.029]
ModoExp2 = [0.008, 0.000, 0.057, 0.054, 0.040, 0.230]
ModoExp3 = [0.149, 0.556, 0.710, 0.894, 1.000, -0.133]
```

Figura A.4.5.1 Código principal análisis de sensibilidad (Parte 1)

```
f_targets = [f1_target, f2_target, f3_target]
ModosExp = [ModoExp1, ModoExp2, ModoExp3]

def connect_to_ETABS():

    try:
        #get the active ETABS object
        myETABSObject = comtypes.client.GetActiveObject
("CSI.ETABS.API.ETABSObject")

    except:
        print('ETABS object was not found. Creating a new one.')

        #create API helper object
        helper = comtypes.client.CreateObject('ETABSV17.Helper')
        helper = helper.QueryInterface(comtypes.gen.ETABSV17.cHelper)

        try:
            #create an instance of the ETABS object from the latest
            installed ETABS
            myETABSObject = helper.CreateObjectProgID
("CSI.ETABS.API.ETABSObject")
            except (OSError, comtypes.COMError):
                sys.exit("Cannot start a new instance of the program.")

            myETABSObject.ApplicationStart()

        myETABSObject.Hide()
        #myETABSObject.Unhide()

    return myETABSObject

def modal_analysis(params):

    Ecm1, Ecm2, Ecm3, Ecm4, Ecm5, Ecm6, Ev11, Ev12, Ev13, Ev14, Ev15,
    Ev16, PH1, PH2, PH3, PH4, PH5, PH6 = params
```

Figura A.4.5.2 Código principal análisis de sensibilidad (Parte 2)

```

myETABSObject = connect_to_ETABS()

# get SapModel
SapModel = myETABSObject.SapModel

# initialize model
SapModel.InitializeNewModel()

# open an existing file and create a temporary file to work with
SapModel.File.OpenFile(FileName)
SapModel.File.Save(TmpFileName)

# Make sure the model is not locked
SapModel.SetModelIsLocked(False)

# Adjust the material properties
N_mm_C = 9
SapModel.SetPresentUnits(N_mm_C)

SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('CM1', Ecm1, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('CM2', Ecm2, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('CM3', Ecm3, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('CM4', Ecm4, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('CM5', Ecm5, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('CM6', Ecm6, 0.2, 0.00001)

SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('VL1', Ev11, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('VL2', Ev12, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('VL3', Ev13, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('VL4', Ev14, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('VL5', Ev15, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('VL6', Ev16, 0.2, 0.00001)

# Aplicar carga distribuida
SapModel.AreaObj.SetLoadUniform('Losas 1', 'PH1', -1 * PH1, 3, True,
'Local', 1)
SapModel.AreaObj.SetLoadUniform('Losas 2', 'PH2', -1 * PH2, 3, True,
'Local', 1)
SapModel.AreaObj.SetLoadUniform('Losas 3', 'PH3', -1 * PH3, 3, True,
'Local', 1)
SapModel.AreaObj.SetLoadUniform('Losas 4', 'PH4', -1 * PH4, 3, True,
'Local', 1)
SapModel.AreaObj.SetLoadUniform('Losas 5', 'PH5', -1 * PH5, 3, True,
'Local', 1)
SapModel.AreaObj.SetLoadUniform('Losas 6', 'PH6', -1 * PH6, 3, True,
'Local', 1)

# Run analysis
SapModel.Analyze.RunAnalysis()

# Get vibration periods
SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput()
SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput("Modal")

```

Figura A.4.5.3 Código principal análisis de sensibilidad (Parte 3)

```

[], [], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ] = SapModel.Results.ModalPeriod(0, [],
[], [], [ ], [ ], [ ], [ ])

Freqs = np.array([1 / T[k] for k in range(NroModos)])
DataFreqs.append(Freqs)
DataFreqs2=np.array(DataFreqs)
DataFreqs2 = DataFreqs2.T

# Get modal coordinates in certain points
PointNames = ['4375', '265', '93']
for s in PointNames:
    SapModel.Results.Setup.SetOptionModeShape(1, NroModos)
    [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ] =
SapModel.Results.ModeShape(s, 1, 0, [], [], [], [], [], [], [], [], [], [], [])
    print(len(U1))
    CoordxPto = np.array([U1[r] for r in range(NroModos)])
    CoordyPto = np.array([U2[r] for r in range(NroModos)])
    DataModosX.append(CoordxPto)
    DataModosY.append(CoordyPto)
DataModos = np.concatenate((DataModosX, DataModosY))
DataModos2 = np.array(DataModos)
DataModos2 = DataModos2.T

[ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ] =
SapModel.Results.ModalParticipatingMassRatios(0, [], [], [], [], [], [], [], [], [],
[], [], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ])
partUX = np.array([UX[r] for r in range(NroModos)])
ind1 = np.argmax(partUX)

[ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ] =
SapModel.Results.ModalParticipatingMassRatios(0, [], [], [], [], [], [], [], [], [],
[], [], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ])
partUY = np.array([UY[r] for r in range(NroModos)])
ind2 = np.argmax(partUY)

[ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ] =
SapModel.Results.ModalParticipatingMassRatios(0, [], [], [], [], [], [], [], [], [],
[], [], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ], [ ])
partRZ = np.array([RZ[r] for r in range(NroModos)])
ind3 = np.argmax(partRZ)

return [DataFreqs2, DataModos2, [ind1, ind2, ind3]]

with open('results.out', 'w') as f:
    PropDin = modal_analysis([Ecm1, Ecm2, Ecm3, Ecm4, Ecm5, Ecm6, Evl1, Evl2,
Evl3, Evl4, Evl5, Evl6, PH1, PH2, PH3, PH4, PH5, PH6])
    FreqsNum = np.array([PropDin[0][i] for i in PropDin[2]])
    ModosNum = np.array([PropDin[1][i] for i in PropDin[2]])
    error_freqs = np.array([np.abs(FreqsNum[j] - f_targets[j]) / f_targets[j]
for j in range(3)])
    error_freqs = np.mean(error_freqs)
    alfa1 = 1
    error_total = alfa1 * error_freqs

```

Figura A.4.5.4 Código principal análisis de sensibilidad (Parte 4)

```
Ecm1 = 27800  
Ecm2 = 27800  
Ecm3 = 27800  
Ecm4 = 27800  
Ecm5 = 27800  
Ecm6 = 27800  
Ev11 = 27800  
Ev12 = 27800  
Ev13 = 27800  
Ev14 = 27800  
Ev15 = 27800  
Ev16 = 27800  
PH1 = 0.0015  
PH2 = 0.0015  
PH3 = 0.0015  
PH4 = 0.0015  
PH5 = 0.0015  
PH6 = 0.0006
```

Figura A.4.5.5 Código de parámetros (Análisis de sensibilidad)

ANEXO 4.6 Código Python para calibración

```
import os, sys

try:
    import comtypes.client
except:
    import subprocess
    subprocess.check_call([sys.executable, "-m", "pip", "install", 'comtypes'])
    import comtypes.client

import numpy as np

from params import *

FileName = r"C:\\Users\\mesta\\Documents\\Doceavo_semestre\\Modelo_ETABS\\
\\INNOVA_6.3.EDB"
TmpFileName = r"C:\\Users\\mesta\\Documents\\Doceavo_semestre\\Modelo_ETABS\\
\\INNOVA_6.3_tmp.EDB"

# Parámetros fijos
Ecm1 = 27800
Ecm3 = 27800
Ecm4 = 27800
Ecm5 = 27800
Ev11 = 27800
Ev12 = 27800
Ev13 = 27800
Ev14 = 27800
Ev15 = 27800
Ev16 = 27800
PH1 = 0.0015
PH2 = 0.0015
PH3 = 0.0015
PH4 = 0.0015
PH6 = 0.0006

f1_target = 2.85
f2_target = 3.09
f3_target = 3.84

NroModos = 12
DataModos = []
DataModosX = []
DataModosY = []
DataFreqs = []
DataModos2 = []
DataFreqs2 = []

ModoExp1 = [0.160, 0.413, 0.625, 0.850, 1.000, 0.029]
ModoExp2 = [0.008, 0.000, 0.057, 0.054, 0.040, 0.230]
ModoExp3 = [0.149, 0.556, 0.710, 0.894, 1.000, -0.133]
```

Figura A.4.6.1 Código Principal Calibración (Parte 1)

```
f_targets = [f1_target, f2_target, f3_target]
ModosExp = [ModoExp1, ModoExp2, ModoExp3]

def connect_to_ETABS():

    try:
        #get the active ETABS object
        myETABSObject = comtypes.client.GetActiveObject("CSI.ETABS.API.ETABSObject")

    except:
        print('ETABS object was not found. Creating a new one.')

        #create API helper object
        helper = comtypes.client.CreateObject('ETABSv17.Helper')
        helper = helper.QueryInterface(comtypes.gen.ETABSv17.cHelper)

        try:
            #create an instance of the ETABS object from the latest installed ETABS
            myETABSObject = helper.CreateObjectProgID("CSI.ETABS.API.ETABSObject")
        except (OSError, comtypes.COMError):
            sys.exit("Cannot start a new instance of the program.")

        myETABSObject.ApplicationStart()

    myETABSObject.Hide()
    #myETABSObject.Unhide()

    return myETABSObject

def modal_analysis(params):

    Ecm1, Ecm2, Ecm3, Ecm4, Ecm5, Ecm6, Ev11, Ev12, Ev13, Ev14, Ev15, Ev16, PH1,
    PH2, PH3, PH4, PH5, PH6 = params

    myETABSObject = connect_to_ETABS()

    # get SapModel
    SapModel = myETABSObject.SapModel

    # initialize model
    SapModel.InitializeNewModel()

    # open an existing file and create a temporary file to work with
    SapModel.File.OpenFile(FileName)
    SapModel.File.Save(TmpFileName)

    # Make sure the model is not locked
    SapModel.SetModelIsLocked(False)

    # Adjust the material properties
    N_mm_C = 9
    SapModel.SetPresentUnits(N_mm_C)
```

Figura A.4.6.2 Código Principal Calibración (Parte 2)

```

SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('CM1', Ecm1, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('CM2', Ecm2, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('CM3', Ecm3, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('CM4', Ecm4, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('CM5', Ecm5, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('CM6', Ecm6, 0.2, 0.00001)

SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('VL1', Ev11, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('VL2', Ev12, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('VL3', Ev13, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('VL4', Ev14, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('VL5', Ev15, 0.2, 0.00001)
SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic('VL6', Ev16, 0.2, 0.00001)

# Aplicar carga distribuida
SapModel.AreaObj.SetLoadUniform('Losas 1', 'PH1', -1 * PH1, 3, True, 'Local', 1)
SapModel.AreaObj.SetLoadUniform('Losas 2', 'PH2', -1 * PH2, 3, True, 'Local', 1)
SapModel.AreaObj.SetLoadUniform('Losas 3', 'PH3', -1 * PH3, 3, True, 'Local', 1)
SapModel.AreaObj.SetLoadUniform('Losas 4', 'PH4', -1 * PH4, 3, True, 'Local', 1)
SapModel.AreaObj.SetLoadUniform('Losas 5', 'PH5', -1 * PH5, 3, True, 'Local', 1)
SapModel.AreaObj.SetLoadUniform('Losas 6', 'PH6', -1 * PH6, 3, True, 'Local', 1)

# Run analysis
SapModel.Analyze.RunAnalysis()

# Get vibration periods
SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput()
SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput("Modal")

_, _, _, _, T, _, _, _, _ = SapModel.Results.ModalPeriod(0, [], [], [],
[], [], [], [])

Freqs = np.array([1 / T[k] for k in range(NroModos)])
DataFreqs.append(Freqs)
DataFreqs2=np.array(DataFreqs)
DataFreqs2 = DataFreqs2.T

# Get modal coordinates in certain points
PointNames = ['4375', '265', '93']
for s in PointNames:
    SapModel.Results.Setup.SetOptionModeShape(1, NroModos)
    _, _, _, _, _, U1, U2, _, _, _, _ =
SapModel.Results.ModeShape(s, 1, 0, [], [], [], [], [], [], [], [], [], [])
    print(len(U1))
    CoordxPto = np.array([U1[r] for r in range(NroModos)])
    CoordyPto = np.array([U2[r] for r in range(NroModos)])
    DataModosX.append(CoordxPto)
    DataModosY.append(CoordyPto)
DataModos = np.concatenate((DataModosX, DataModosY))
DataModos2 = np.array(DataModos)
DataModos2 = DataModos2.T

```

Figura A.4.6.3 Código Principal Calibración (Parte 3)


```

    __, __, __, __, __, UX, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __ =
SapModel.Results.ModalParticipatingMassRatios(0, [], [], [], [], [], [], [], [], [], [], [],
[], [], [], [], [], [])
    partUX = np.array([[UX[r] for r in range(NroModos)]])
    ind1 = np.argmax(partUX)

    __, __, __, __, __, UY, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __ =
SapModel.Results.ModalParticipatingMassRatios(0, [], [], [], [], [], [], [], [], [], [], [],
[], [], [], [], [], [])
    partUY = np.array([[UY[r] for r in range(NroModos)]])
    ind2 = np.argmax(partUY)

    __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __, __ =
SapModel.Results.ModalParticipatingMassRatios(0, [], [], [], [], [], [], [], [], [], [], [],
[], [], [], [], [], [])
    partRZ = np.array([[RZ[r] for r in range(NroModos)]])
    ind3 = np.argmax(partRZ)

    return [DataFreqs2, DataModos2, [ind1, ind2, ind3]]

with open('results.out', 'w') as f:
    PropDin = modal_analysis([Ecm1, Ecm2, Ecm3, Ecm4, Ecm5, Ecm6, Evl1, Evl2, Evl3,
Evl4, Evl5, Evl6, PH1, PH2, PH3, PH4, PH5, PH6])
    FreqsNum = np.array([PropDin[0][i] for i in PropDin[2]])
    ModosNum = np.array([PropDin[1][i] for i in PropDin[2]])
    error_freqs = np.array([np.abs(FreqsNum[j] - f_targets[j]) / f_targets[j] for j
in range(3)])
    error_freqs = np.mean(error_freqs)
    alfa1 = 1
    error_total = alfa1 * error_freqs
    print(error_total)
    print(FreqsNum)

    f.write('{:.60g}'.format(error_total))

```

Figura A.4.6.4 Código Principal Calibración (Parte 4)

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Monserratt Alejandra Estay Espinoza
Título de la memoria : Calibración numérica de un edificio no convencional de hormigón armado
Fecha de la presentación oral :

Profesor(es) Guía : Rodrigo Silva M.
Profesor(es) Revisor(es) : Alexander Opazo V., Víctor Aguilar V.
Concepto :
Calificación :

Resumen

El desarrollo de métodos numéricos y herramientas de monitoreo han incentivado el estudio del comportamiento de estructuras existentes. Lo anterior, junto con el interés arquitectónico de la estructura, agrupan las principales motivaciones para estudiar el Edificio Innovación de la Universidad del Bio-Bio. El objetivo general, por lo tanto, fue realizar una calibración al modelo numérico del edificio en base a sus mediciones experimentales.

Para esto, se modeló el edificio utilizando el programa ETABS, resultando en un error del 12% con respecto a sus mediciones experimentales. Del modelo se identificaron 18 variables potencialmente significativas con las cuales se aplicó al modelo un análisis de sensibilidad, utilizando quofEM. De este análisis, tres se identificaron como significativas. Dos de las variables pertenecían a los módulos de elasticidad de muros y columnas del primer y último piso, y la última correspondía a la carga distribuida aplicada al último piso. La influencia de estos parámetros era esperada debido a su impacto en la transmisión de cargas y su ubicación dentro del edificio.

La calibración con NL2SOL produjo múltiples soluciones óptimas locales, atribuidas a la limitada cantidad de datos experimentales. Se implementaron Diagramas Boxplot para mejorar la calibración, logrando un error del 5% respecto a las mediciones experimentales.