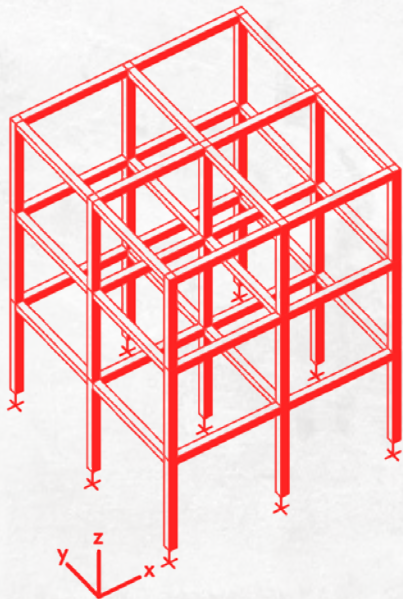
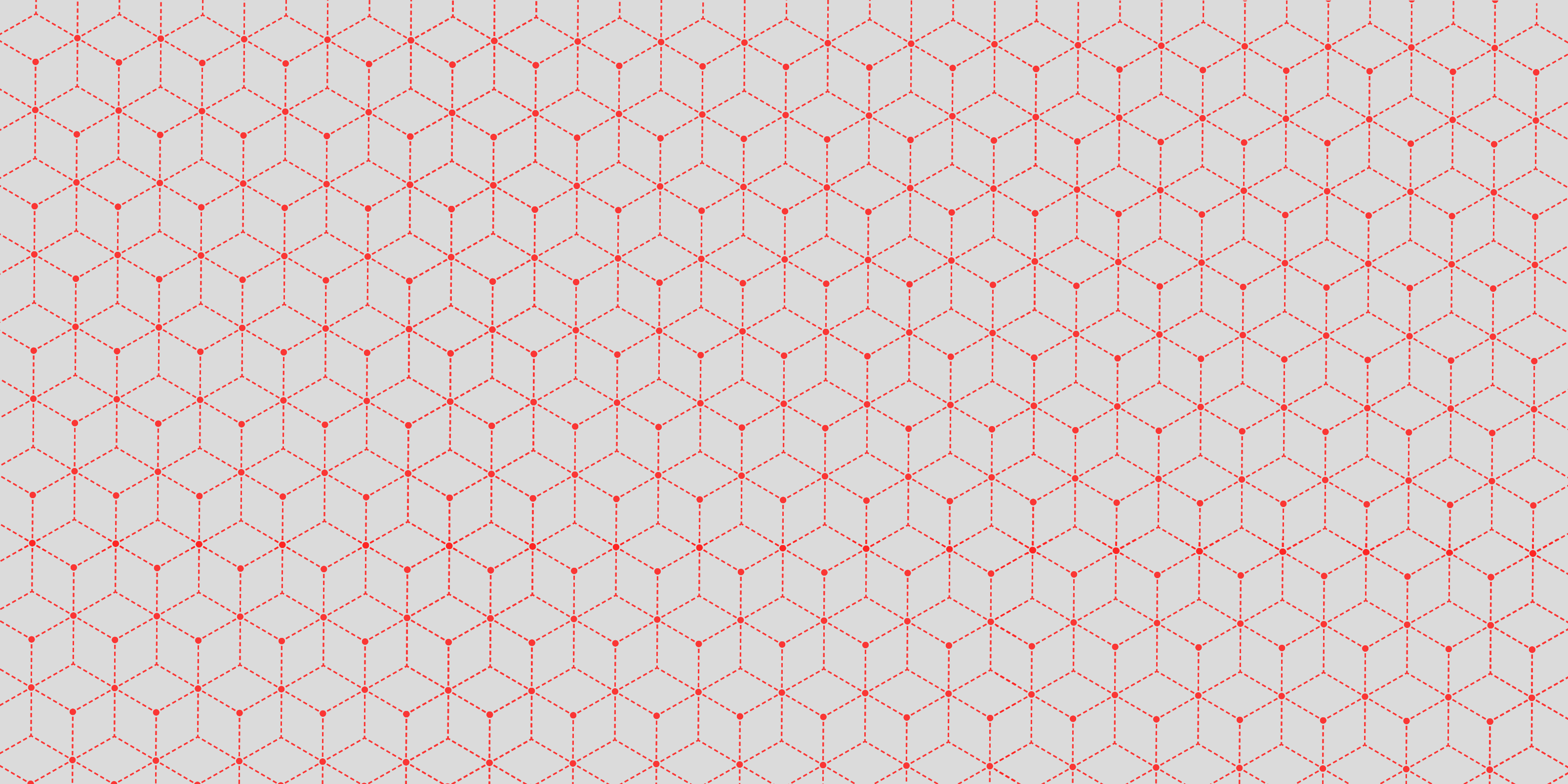
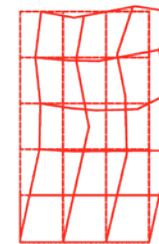
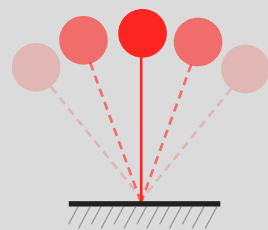




Manual práctico de aplicación *de análisis modal a edificaciones* con integración de herramientas BIM





Este manual se desarrolló como parte de la tesis de grado:
«La vulnerabilidad sísmica en edificaciones de mediana altura y la identificación de zonas seguras mediante análisis modal: Caso Centro de Documentación Juan Bautista»

Autores

Sebastian Israel Morocho Arenillas

Maria Elisa Sarmiento Jaramillo

Bajo la dirección de:

Ing. Hernán Alfredo García Erazo, MSc.

Agradecimientos

Universidad de Cuenca - Facultad de Arquitectura y Urbanismo

¿Qué es y para qué sirve el ANÁLISIS MODAL?

El análisis modal se define como el proceso involucrado en someter elementos a pruebas, con el objetivo de obtener una descripción matemática de su dinámica o de su comportamiento ante vibraciones. Es una herramienta eficiente para escribir, comprender y modelar el comportamiento de las estructuras. Se aplica el análisis modal con el objetivo de predecir los niveles de respuesta a excitaciones complejas.

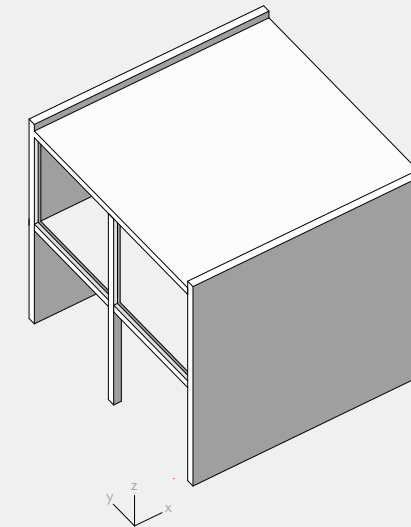
La comprobación de los principales modos de vibración mediante pruebas puede proporcionar una garantía de la validez básica del modelo aplicado. El análisis modal se materializa al realizar **modelos discretos**, generalmente por elementos finitos, con mayor o menor grado de precisión e idealización.

El análisis modal contempla tres etapas:

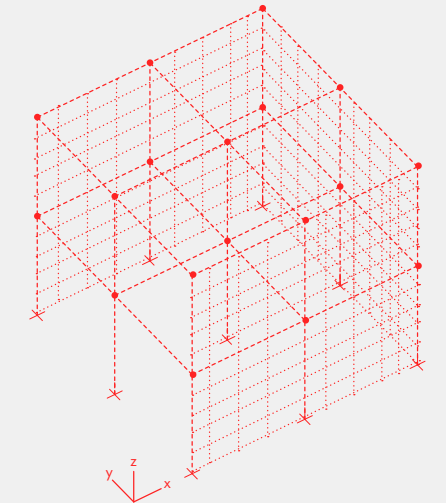
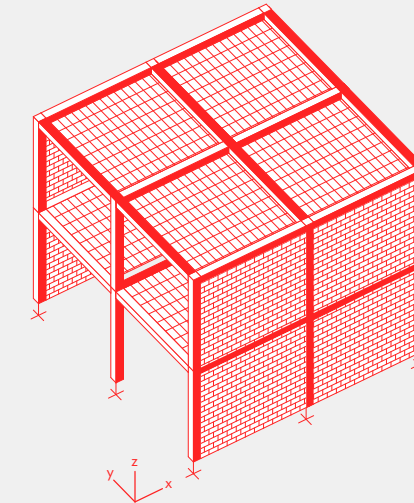
Proceso de recolección de datos preliminares.
Generación del modelo discreto, dinámico y matemático.

Post proceso donde se interpretan los datos y resultados obtenidos.

análisis MODAL

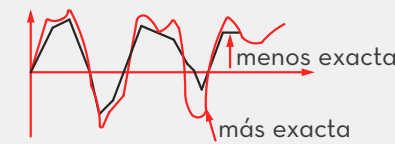


**modelo
BIM**



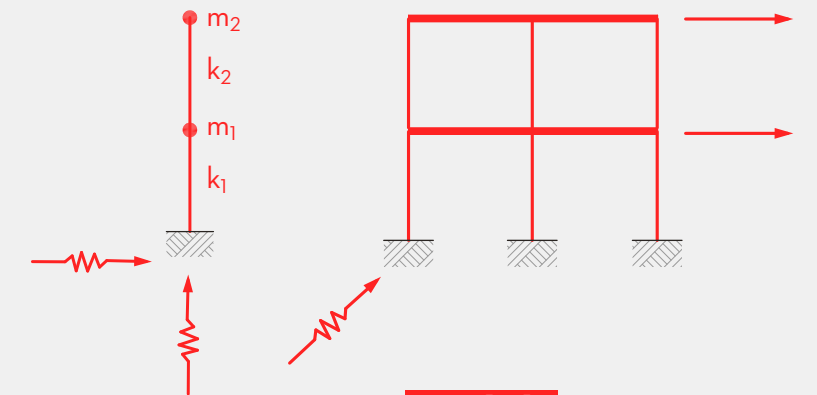
**modelo
discreto**

respuesta



$$[M]x + [K]x = -[M]a$$

**modelo
matemático**



**modelo
dinámico**

¿Por qué es necesario realizar *un análisis modal a las edificaciones?*

El análisis modal permite obtener datos sobre el estado y comportamiento de una estructura ante eventos sísmicos.

Es necesario analizar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones por medio de un análisis modal para determinar el factor de exposición a riesgos y la susceptibilidad del territorio de estudio, con el objetivo de evitar pérdidas potenciales y consecuencias catastróficas de afectación.

La importancia del enfoque de la vulnerabilidad sísmica relacionada con la reducción de riesgo de desastres permite una aproximación a la consideración de presencia de amenazas y la comprensión de debilidades en las edificaciones, para generar planes adecuados en gestión de riesgos.



¿Qué herramientas se requiere para realizar *un análisis modal a las edificaciones?*

La metodología presentada a continuación en este manual permite la generación de modelos computacionales completos y dinámicos a través de la integración de diversos programas digitales, los cuales permiten la obtención de aproximaciones más precisas del comportamiento real de una edificación.

Se requiere el uso de 3 softwares distintos:

➤ BIM

Archicad, Revit.

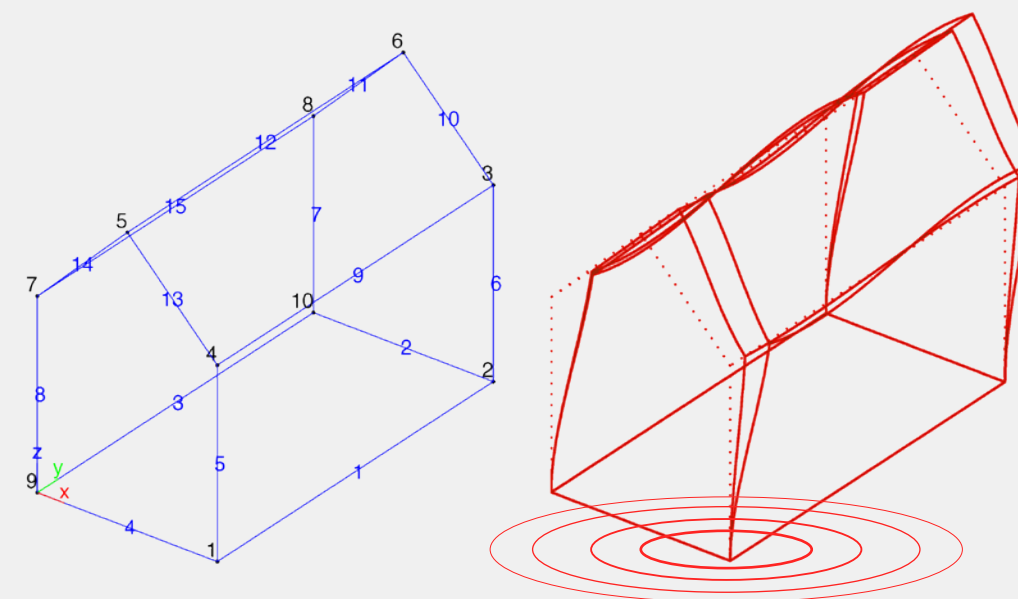
➤ Software Aplicado al Cálculo de Estructuras

Integrated Software for Structural Analysis and Design (SAP)

➤ Software matemático con entorno de desarrollo integrado (IDE)

MATLAB

La aplicación de esta metodología integra a través de estos programas el estado actual de la edificación y su configuración geométrica para implementar un modelo numérico tridimensional que ejecuta simulaciones de su comportamiento sísmico.



¿Qué pasos

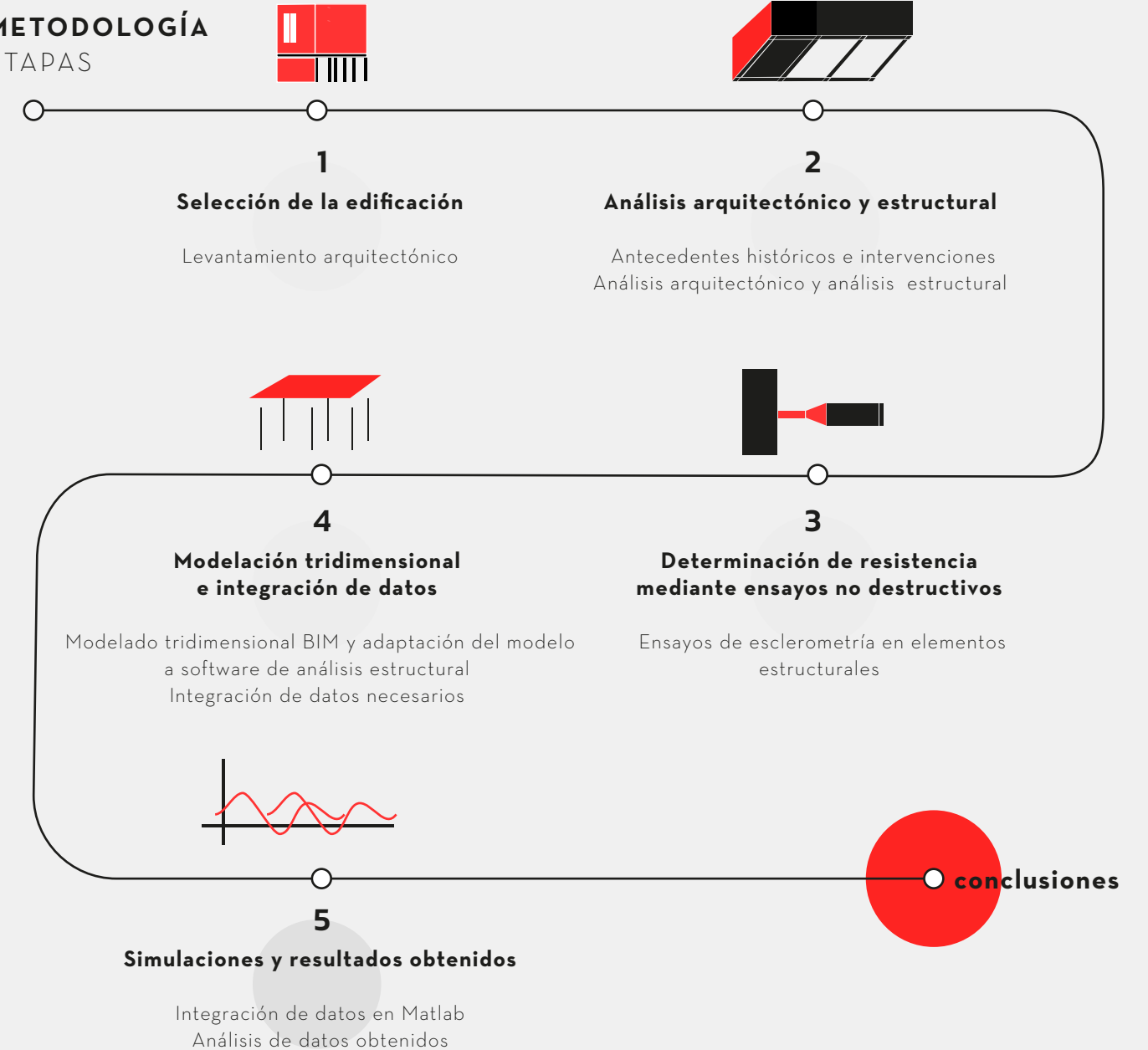
se deben ejecutar para realizar
un análisis modal a las edificaciones?

La metodología presentada se consolida en base al sustento teórico de los métodos analíticos más empleados, principalmente el método FEMA (310). El proceso aplicado conlleva a identificar las zonas seguras de ocupación de cualquier edificación en caso de evento sísmico.

La metodología expuesta resume su proceso en 5 pasos principales:

- > **Etapas 1:** Seleccionar la edificación a analizarse.
- > **Etapas 2:** Recolectar datos en sitio y realizar el levantamiento arquitectónico y estructural para evidenciar el estado actual y sus características físicas.
- > **Etapas 3:** Determinar la resistencia de los elementos estructurales existentes mediante ensayos no destructivos.
- > **Etapas 4:** Realizar la representación tridimensional y la integración de datos obtenidos.
- > **Etapas 5:** Someter el modelo a simulaciones y analizar los resultados obtenidos.

METODOLOGÍA ETAPAS



Etapa 1

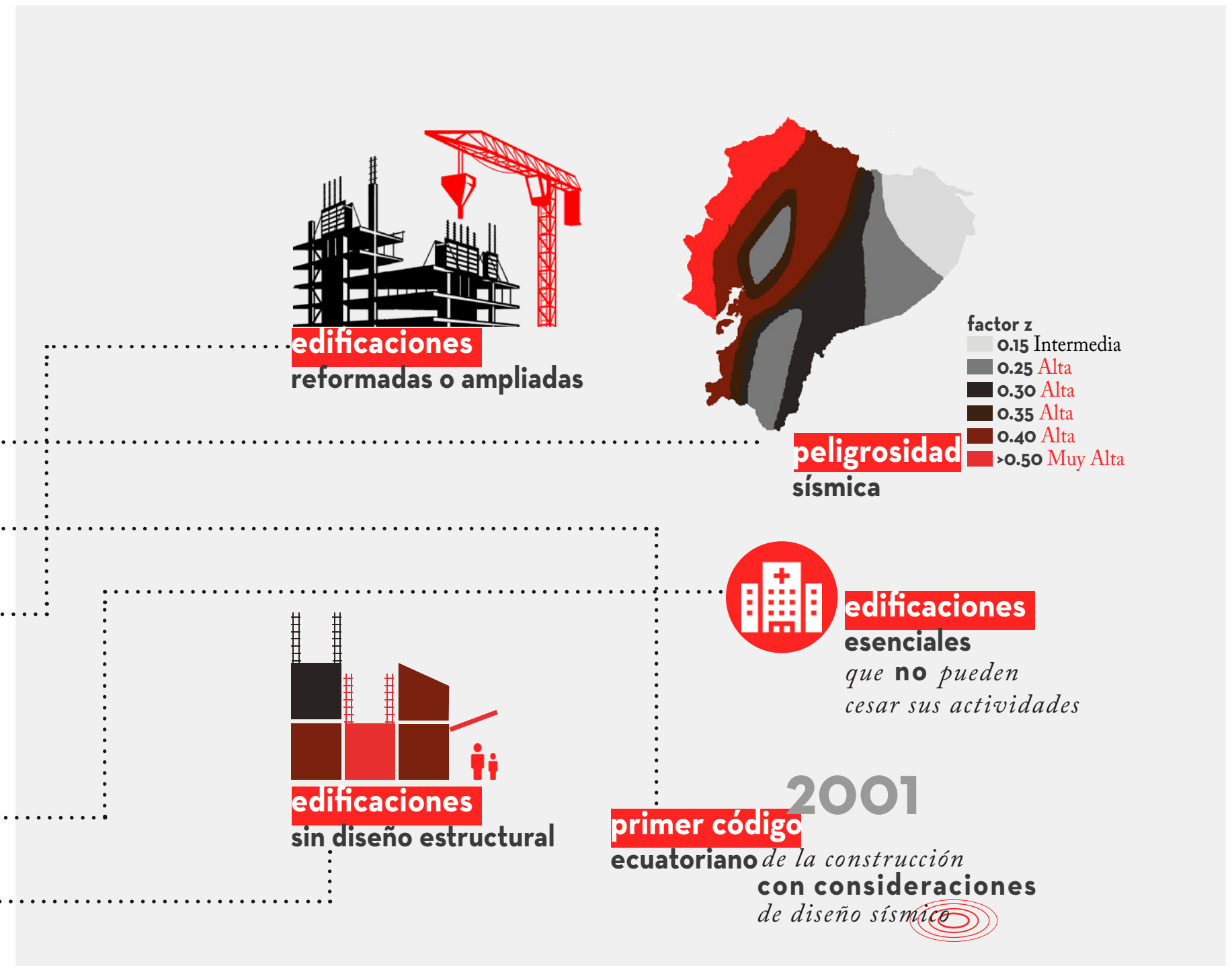
selección de la edificación

consideraciones generales

La edificación seleccionada para aplicación de esta metodología debería contener alguna de estas características para *considerarse necesario un análisis de vulnerabilidad sísmica*¹ más completo:

- Edificación localizada en zonas con alta peligrosidad sísmica.
- Edificación construida previo a la promulgación de códigos de construcción.
- Edificación reformada o ampliada a lo largo de su vida útil.
- Edificación que han sufrido un cambio en el tipo de uso.
- Edificación que no pueden cesar sus actividades luego de un sismo: hospital o instituciones de socorro, de policía o gobierno.
- Edificación que no ha sido diseñada bajo criterios de diseño estructural.

1. Según la normativa NEC 2013



Etapas

Etapas 2 **análisis arquitectónico y estructural** *consideraciones y particularidades*

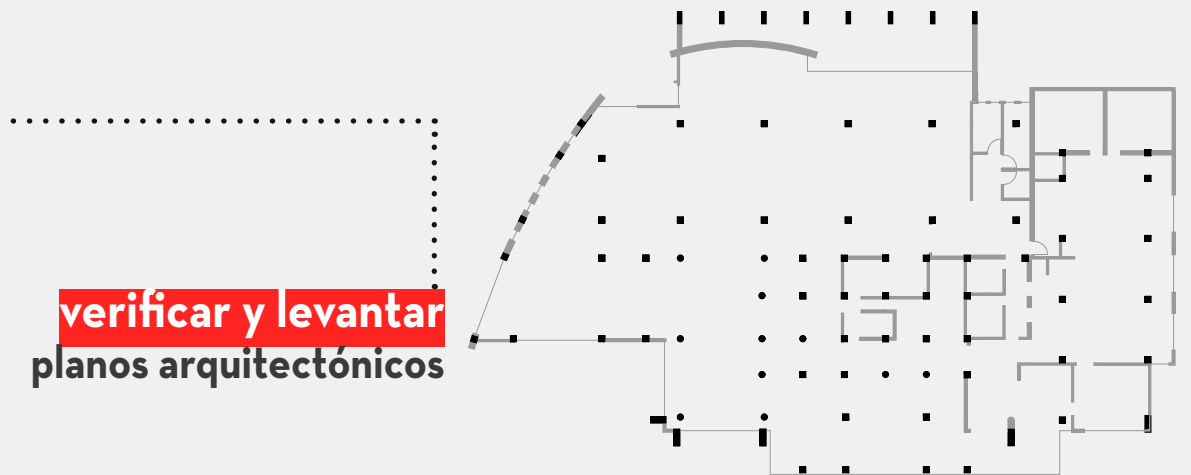
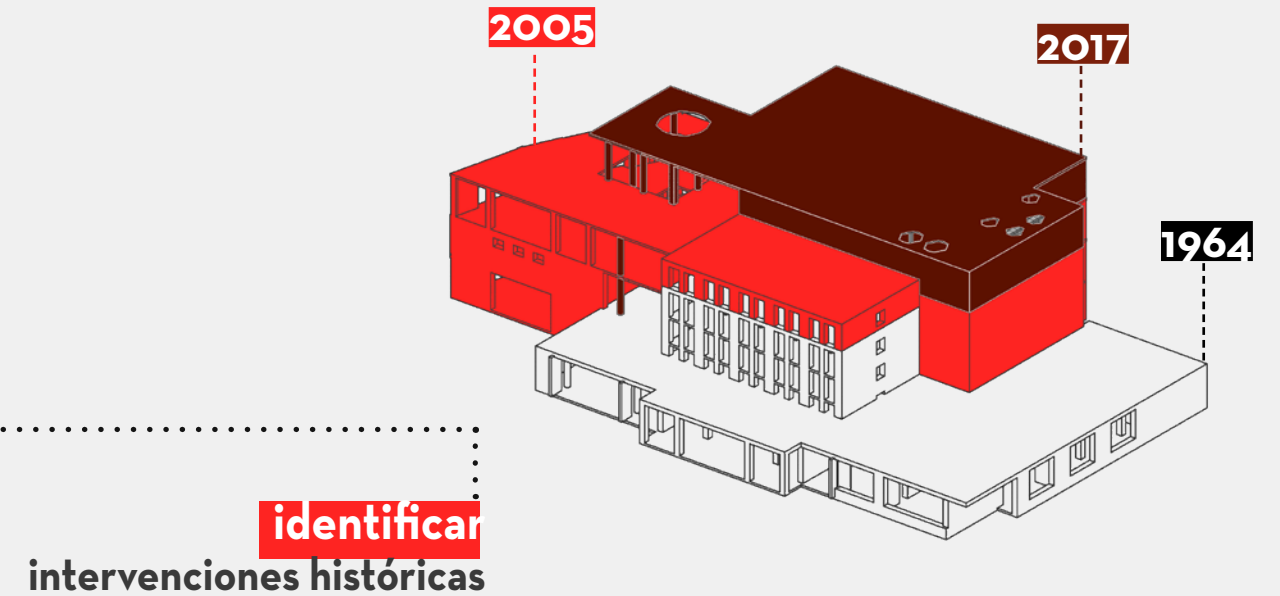
En esta etapa es necesario considerar la siguiente información para consolidar un análisis arquitectónico y estructural integral:

➤ **2.1 Antecedentes históricos e intervenciones en la edificación**

Las edificaciones pueden estar sometidas a procesos de cambios o ampliaciones, los cuales se ejecutan con materiales o tecnologías distintas a las empleadas inicialmente en procesos de diseño.

➤ **2.2 Levantamiento y documentación del estado actual de la edificación**

Se verifica y se contrasta la información existente en planos y la ejecución en sitio, ya que pudieron sufrir eventuales cambios que alteraron la propuesta original en la fase de construcción y ampliación.



Etapa 3

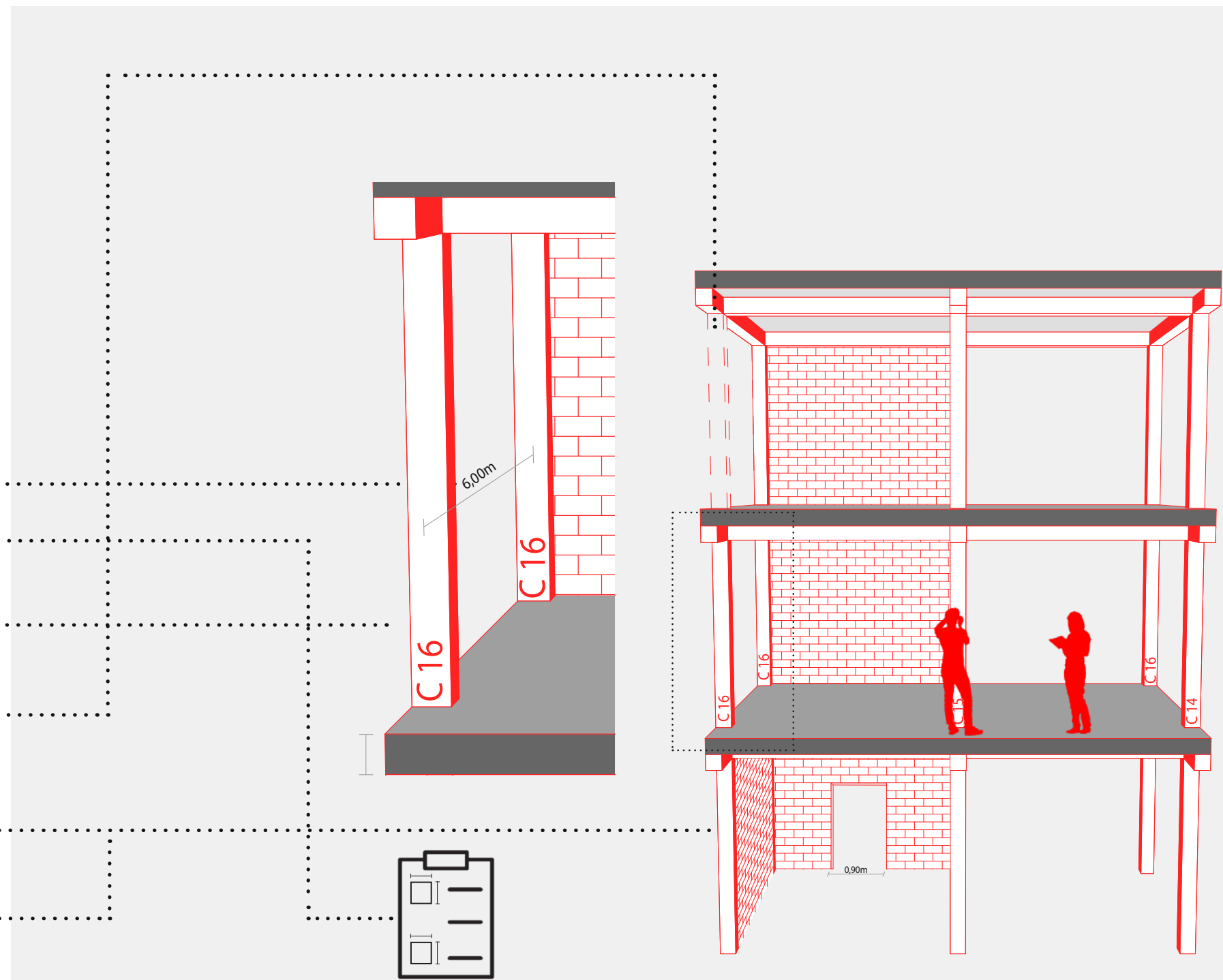
análisis arquitectónico y estructural

consideraciones y particularidades

2.2 Levantamiento y documentación del estado actual de la edificación

El levantamiento y actualización incluye:

- Verificación de la dimensión existente entre elementos estructurales (columna a columna en ejes estructurales).
- Verificación de la sección de columnas existentes.
- Registro, codificación y verificación de elementos estructurales.
- Verificación de la continuidad de elementos estructurales existentes.
- Verificación de rigidez de elementos de mampostería: se determina qué elementos son estructurales y cuales no.
- Verificación de las dimensiones de los vanos y aberturas existentes en paredes.
- Verificación de los espesores de losas.



Etapa 3

análisis arquitectónico y estructural

consideraciones y particularidades

2.2 Determinación de resistencia mediante ensayos no destructivos

➤

Identificación de los elementos y selección de la muestra a someterse a ensayo.

✗

La ubicación y configuración de ciertos elementos estructurales que imposibilita la toma de muestra y la omisión de las columnas circulares de hormigón armado y los perfiles estructurales metálicos.

✓

Elementos estructurales óptimos para la toma de muestras.

➤

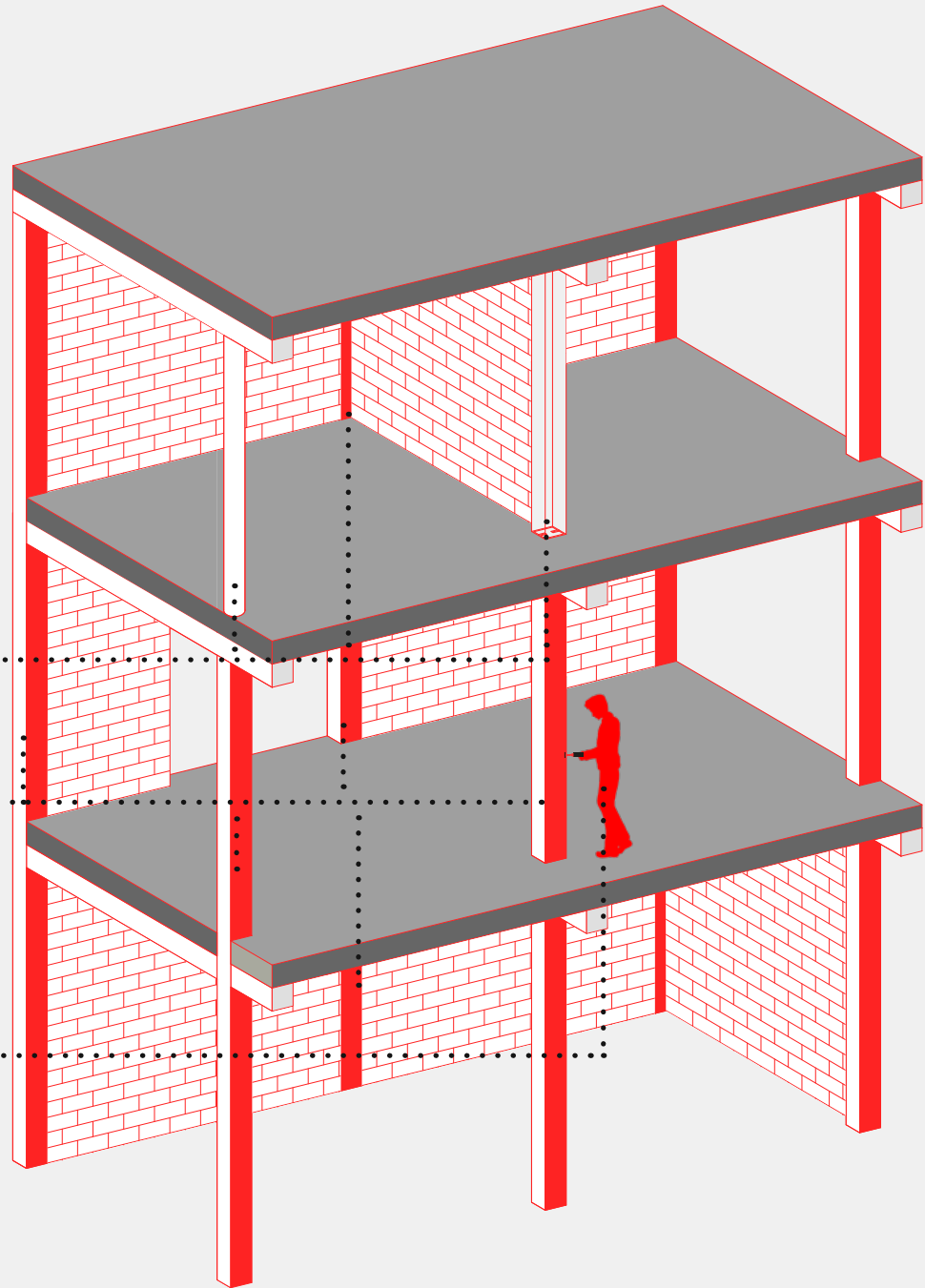
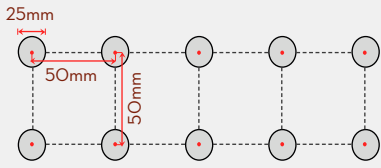
Preparación del equipo y del área de prueba.

➤

Ejecución del ensayo en el elementos estructural seleccionados.

➤

Cálculos y reporte de resultados.



Etapa 3

análisis arquitectónico y estructural

consideraciones y particularidades

2.2 Cálculo y reporte de datos

El reporte de todos los datos obtenidos considera:

- >

Identificación de la ubicación del área de prueba en la estructura.
- >

Tamaño del miembro de prueba.
- >

Información sobre el número de rebote.
- >

Números individuales de rebote.
- >

Media de rebote.

Para eficacia y síntesis del manejo de datos obtenidos se aplica el siguiente procedimiento:

- >

Realizar un registro de los elementos existentes por cada grupo.
- >

Obtener la media de resistencia (N/mm2) y módulo de elasticidad (GPa) de cada grupo para posteriormente emplar este dato en la integración de datos del modelo tridimensional.
- >

Este procedimiento se aplicó al total de 60 ensayos realizados en la edificación.

ensayos modelo

Ensayo 1		Ensayo 2	
Elemento	69	Elemento	68
Grupo 1		Grupo 1	
Lecturas		Lecturas	
1	28	1	24
2	26	2	24
3	25	3	20
4	24	4	22
5	25	5	25
6	26	6	27
7	24	7	24
8	29	8	24
9	24	9	23
10	27	10	20
Media	26	Media	23
ENSAYO VÁLIDO		ENSAYO VÁLIDO	

identificación de elementos

Lecturas de número de rebote por ensayo

media de rebote

de rebotes a (N/mm2)

R	σ° (N/mm2)	R	σ° (N/mm2)
20	-	30	20,6
21	-	31	21,6
22	10,8	32	23,3
23	11,8	33	24,5
24	12,7	34	25,5
25	13,7	35	27,5
26	15,5	36	28,4
27	16,2	37	30,4
28	17,7	38	31,4
29	18,6	39	33,3

cálculo de resistencia de elementos

Ensayo	Grupo de Elemento	Elemento	Media del Número de Rebote	Resistencia (N/mm2) (MPa)	Media de Resistencia (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)
21	Grupo 1	9	20	10,8	12,557	16,655
22	Grupo 1	15	20	10,8		
25	Grupo 1	25	21	10,8		
3	Grupo 1	67	26	15,5		
2	Grupo 1	68	23	11,8		
1	Grupo 1	69	26	15,5	21,360	21,722
4	Grupo 1	70	24	12,7		
27	Grupo 2A	13	26	15,5		
42	Grupo 2A	30	35	27,5		
28	Grupo 2A	40	33	24,5		
29	Grupo 2A	41	28	17,7	10,800	15,45
30	Grupo 2A	65	31	21,6		
24	Grupo 2	43	22	10,8		
25	Grupo 2	44	20	10,8		
26	Grupo 2	45	20	10,8		

Etapa 3

análisis arquitectónico y estructural

consideraciones y particularidades

2.2 Discretización de elementos

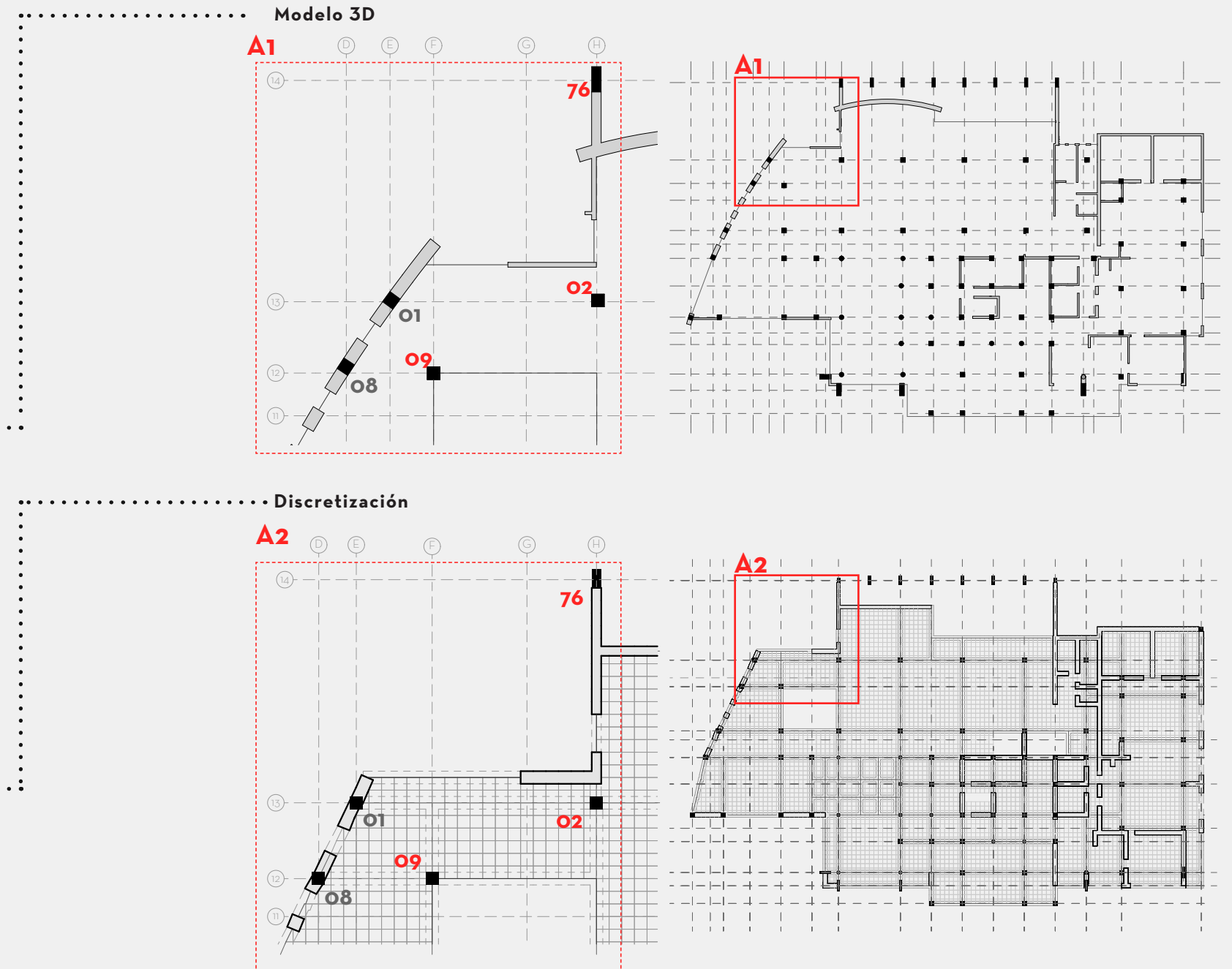
Para realizar el proceso de discretización de elementos estructurales, es necesario generar una malla modular que permita regularizar la configuración espacial de todo el modelo. Para este caso de estudio, se propone:

- Una malla modular de 40 x 40 cm para los elementos bidimensionales de piso (losas)
- Una malla modular de 40 x 20 cm para los elementos bidimensionales como paredes (muros de mampostería)

Esta dimensiones se proponen con la finalidad de que exista una correcta conectividad entre los mismos. Por medio de esta segmentación los elementos se integrarán adecuadamente para obtener las deformaciones e información del comportamiento ante un movimiento telúrico.

La discretización de elementos estructurales, sintetiza el modelo en dos sistemas:

- **Elementos Lineales:** Vigas y columnas
- **Elementos Bidimensionales:** Losas y paredes



Etapa 4

Modelación tridimensional *e integración de datos*

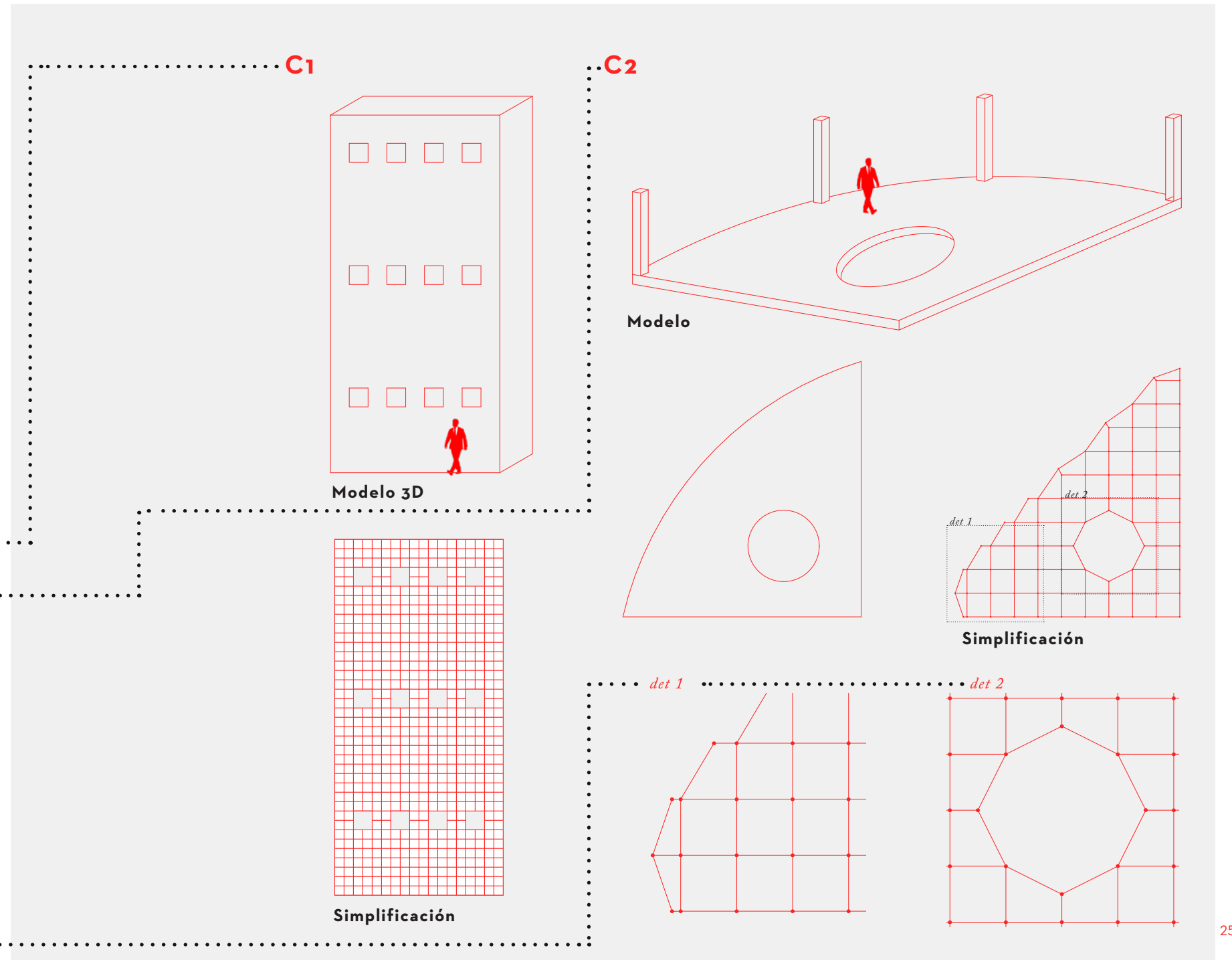
En este apartado es necesario tener en cuenta particularidades del edificio que se presentarán al momento de interpretar y realizar el modelo 3D.

4.1 Consideraciones especiales

C1_ En caso de encontrar vanos pequeños, es necesario representar el módulo adecuadamente para que, al discretizar el muro con los vanos, se genere un elemento equilibrado en dimensiones de vanos y muro.

C2_ La representación adecuada de un elemento curvo es compleja por la cantidad de elementos que se debe generar, ya que, al exportar el modelo a MATLAB, el programa unicamente genera elementos shell conformados por 4 nodos. Esta particularidad se resuelve simplificando el elemento buscando una aproximación a la realidad sin perder la curvatura inicial pero representada a través de elementos con 4 nodos.

det 1, 2_ Muestra a detalle la transición de elementos con curvaturas o circunferencias a elementos regulares a la malla establecida.



Etapa 4

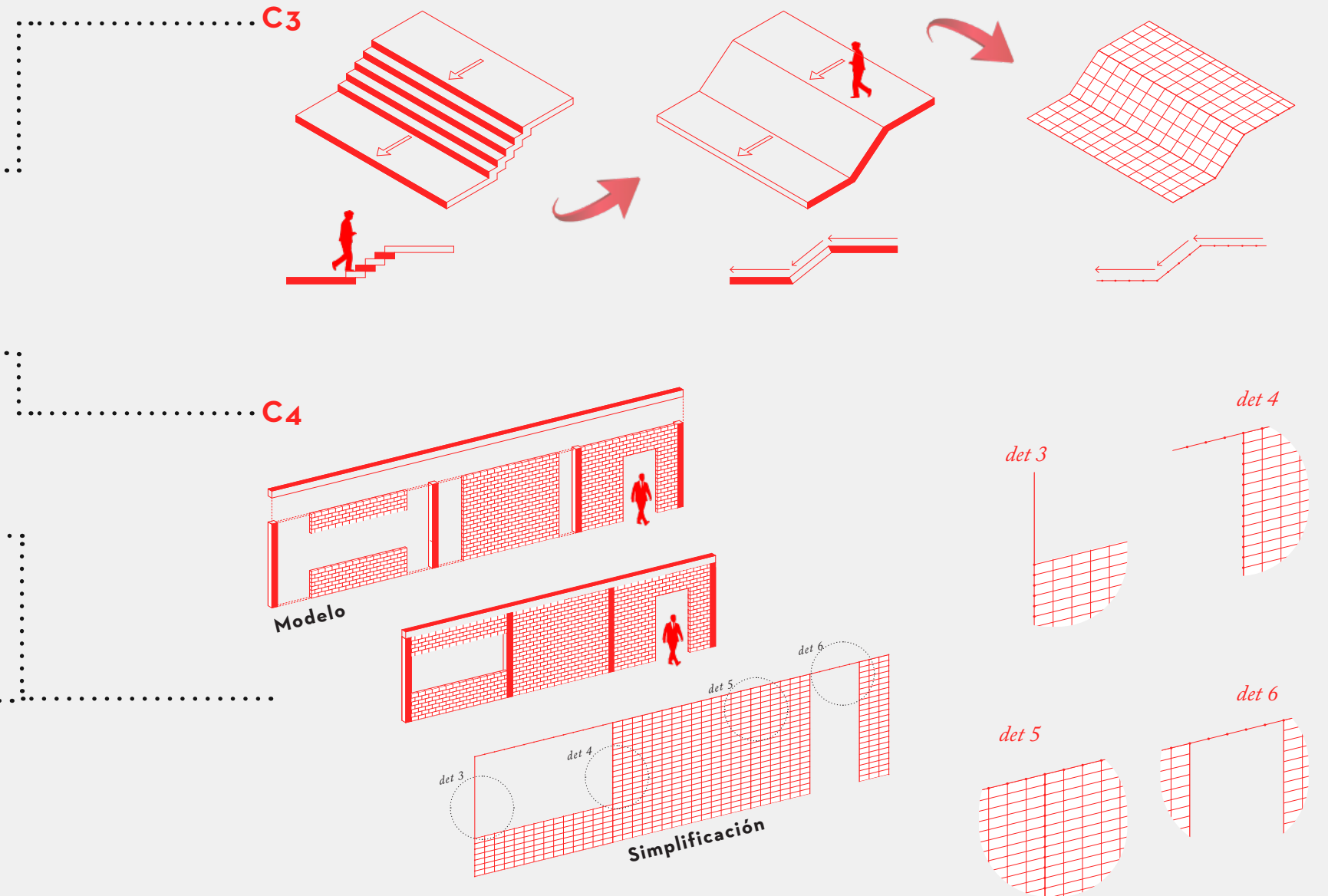
Modelación tridimensional e integración de datos

C3. Para representar una escalera es necesario omitir los peldaños y generar una losa inclinada a manera de rampa.

C4. Al crear elementos como ventanas y puertas dentro de muros se debe considerar únicamente el antepecho de ventana. Para estos 2 casos se desprecia la gráfica de dintel pues no influye en el cálculo estructural.

det 3,4. Para la elaboración de muros conectados con columnas se procede a discretizar la columna en elementos cuya dimensión sea igual a la de los muros, para que exista continuidad y conectividad entre elementos estructurales.

det 5,6. Para la elaboración de losas conectadas a vigas y muros se discretizarán los elementos para que exista una correcta conectividad entre los diferentes elementos estructurales.

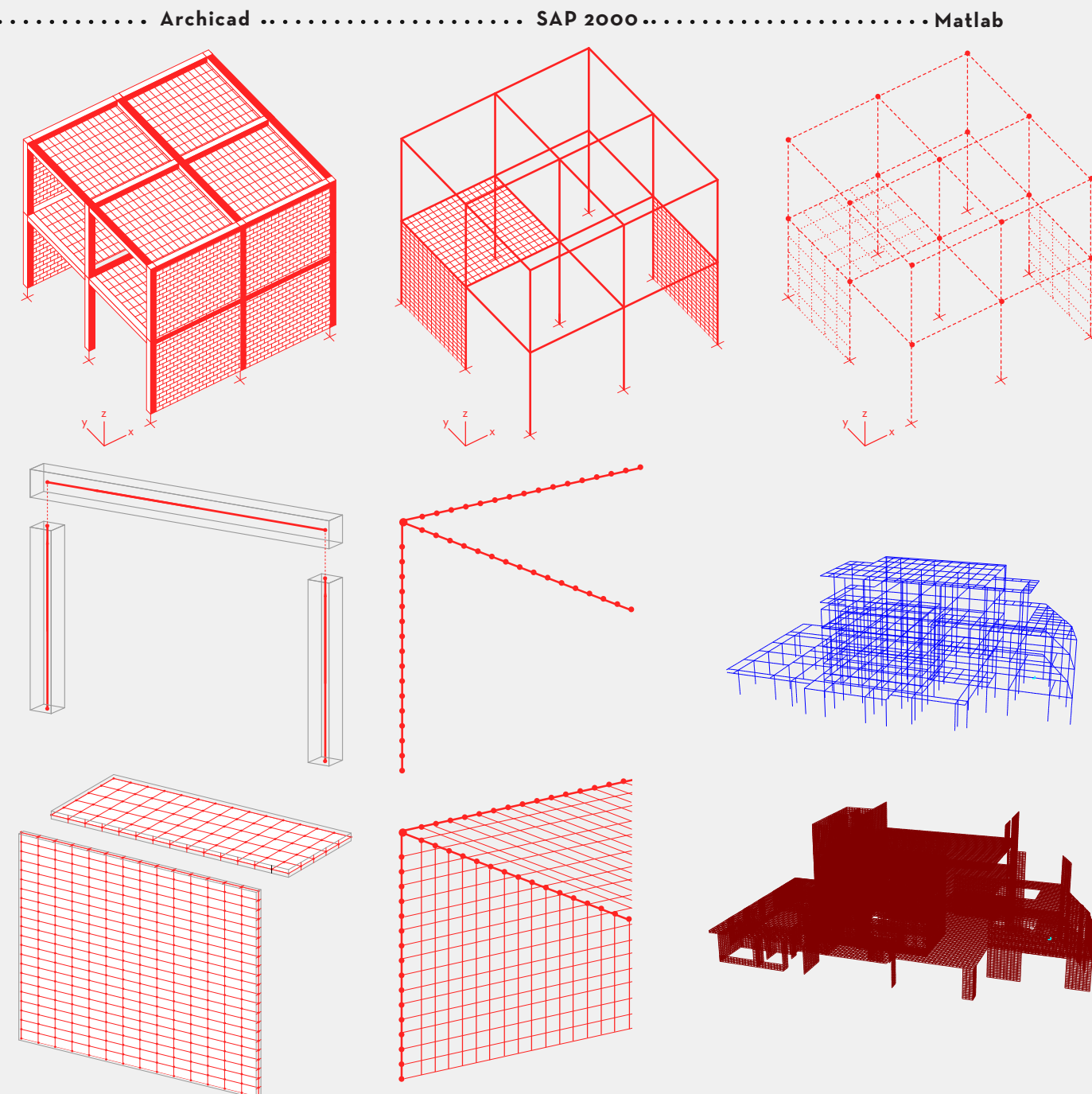


Etapa 4

Modelación tridimensional *e integración de datos*

Para la integración Archicad - SAP - Matlab se tomarán en cuenta los siguientes criterios:

- En la elaboración del modelo en Archicad no se tomará en cuenta los espesores de los elementos estructurales.
- Columnas y vigas_ conexión por ejes.
- Muros y losas_ conexión por vertices.
-
- Una vez concluido el modelo 3D se procede a exportar el archivo a SAP en formato ifc, en este software podremos obtener los nodos, elementos lineales y bidimensionales ubicados en el espacio. De aquí podremos exportar las matrices que generarán la creación del modelo en matlab con algunas de sus características como sección, material y tipo.
-
-
- En Matlab incluiremos el resto de propiedades mecánicas y mas datos para poder ejecutar el modelo y encontrar sus deformaciones, modos de vibración y derivas.



Etapa 4
Modelación tridimensional
e integración de datos

5.1 Integración y programación de matrices de
nodos, elementos, secciones y materiales

> Matriz de Nodos

> Matriz de Elementos

> Matriz de Secciones

> Matriz de Materiales

Propiedades mecánicas de los mteriales

> Coaficiente de Poisson

> Módulo Elástico

> Densidad

> Grados de Libertad

nodos

Table with 5 columns: Nombre de Matriz, Nombre de nodo, eje X, eje Y, eje Z. It contains two rows of node data.

Table with 5 columns: Nombre de Matriz, Nombre de nodo, Módulo de Elasticidad, Coeficiente de Poisson, Densidad del material. It contains two rows of material data.

materiales

Table with 9 columns: Nombre de Matriz, Nombre de Elemento, Tipo, Sección, Material, Nodo 1, Nodo 2, Nodo referencial, NaN. It contains three rows of element data.

elementos

secciones

Table with 8 columns: Nombre de Matriz, Nombre de Sección, A, ky, kz, lxx, lyy, lzz. It contains two rows of section data.

coeficiente de poisson

mu = - epsilon_t / epsilon_l

módulo de elasticidad

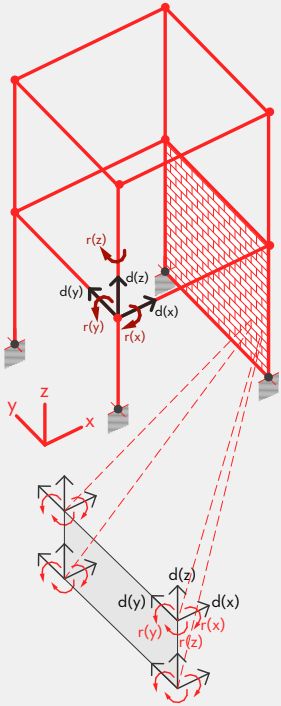
E = sigma / epsilon

densidad

rho = d_m + d_c

grados de libertad

- desplazamiento en x
- desplazamiento en x
- desplazamiento en x
- rotación alrededor del eje x
- rotación alrededor del eje y
- rotación alrededor del eje z



Etapas

Etapa 5 **Simulación** *y resultados obtenidos*

5.1 Análisis Estático

El análisis estático refiere a la deformación de la estructura por pesos propios de los elementos que integran el edificio; para obtener dichas deformaciones, es necesario calcular:

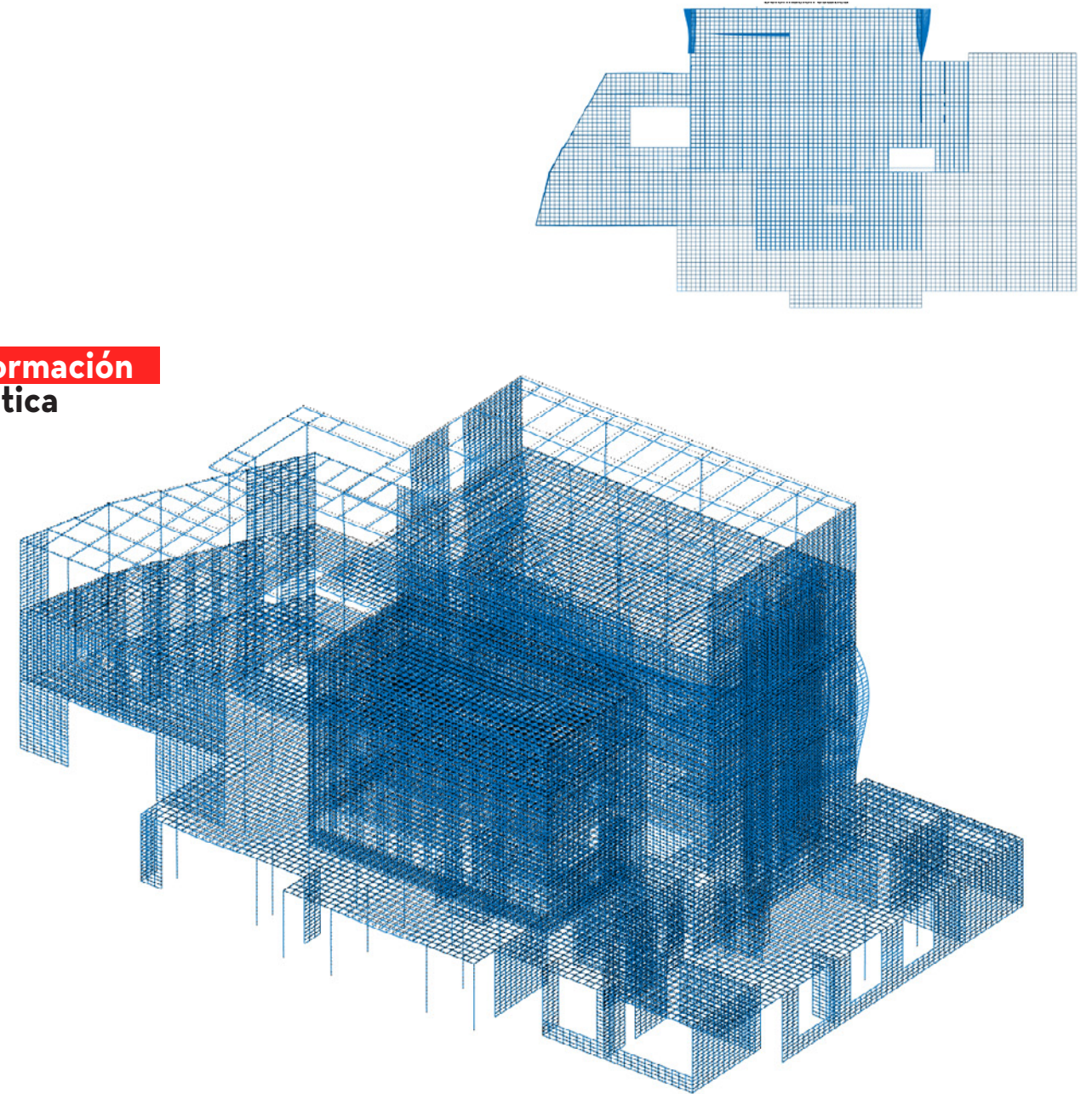
1) La matriz de rigidez del sistema (K), que se obtiene a partir de lo siguiente:

- El tipo de elemento definido (lineal o bidimensional)
- Las características geométricas de las secciones transversales
- Las propiedades de los materiales
- Los nodos presentes en los elementos
- Los desplazamientos en los respectivos nodos

2) La matriz (P), la cual contiene los pesos asignados a los materiales de cada elemento.

Las deformaciones se determinan a partir de encontrar matricialmente la inversa de la matriz de rigidez. El vector de deformaciones resultante posee una dimensión de (n x 1). La representación de cálculo de la matriz de deformación es el siguiente: $U = K^{-1}\{P\}$

deformación estática



Etapa 5

Simulación

y resultados obtenidos

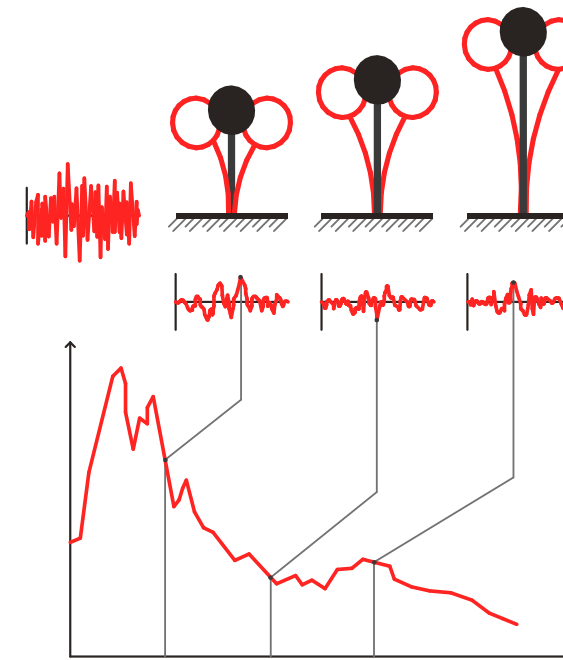
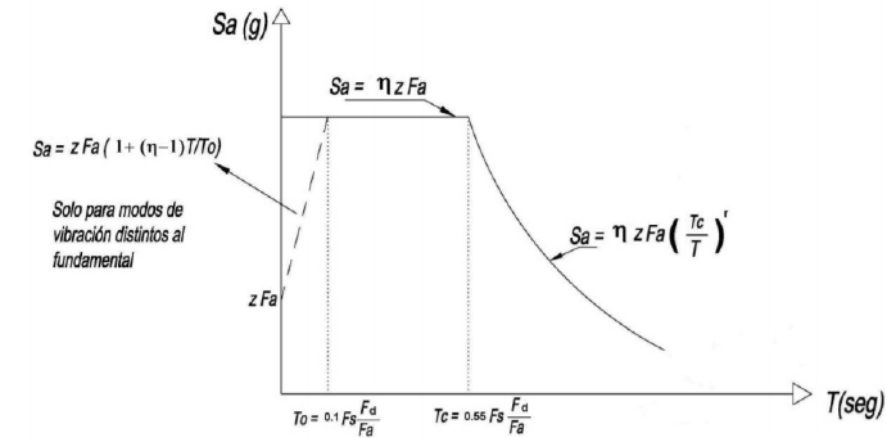
5.1 Espectro de diseño

El espectro se define como la curva que une las aceleraciones espectrales asociadas a un período de retorno (Jaramillo 2002). Según la normativa NEC (2015) el espectro de diseño consiste en una representación del espectro de respuesta de una estructura en función de sus condiciones geológicas, tectónicas, sismológicas y el tipo de suelo asociado a su emplazamiento.

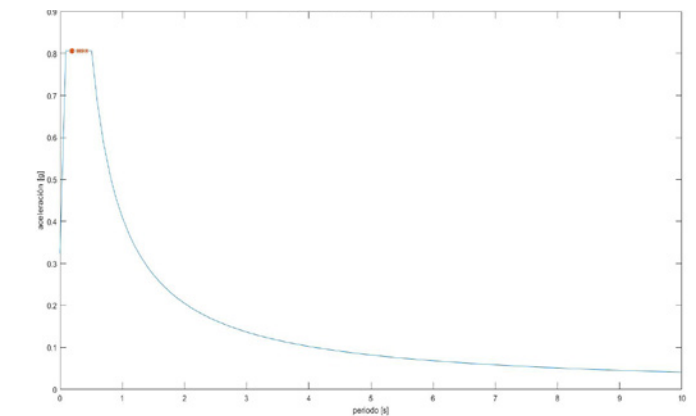
El espectro de diseño es utilizado para representar los efectos dinámicos del sismo de diseño, el cual se define como un evento sísmico que tiene una probabilidad del 10% de ser excedido en 50 años (periodo de retorno de 475 años).

Para el caso de estudio, se asignaron los siguientes valores correspondientes a las características y condiciones geológicas de la ciudad de Cuenca:

$z = 0,25$
 $f_a = 1,30$
 $f_d = 1,28$
 $f_s = 0,94$



espectro de diseño



Etapas

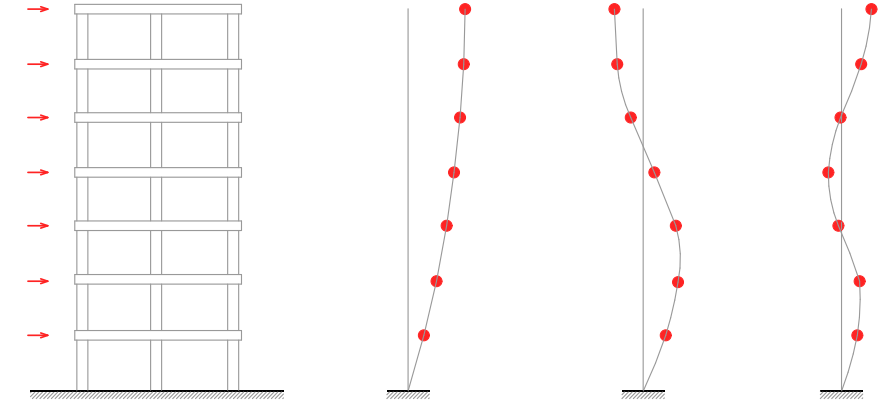
Etapa 5 **Simulación** *y resultados obtenidos*

5.1 Análisis Modal

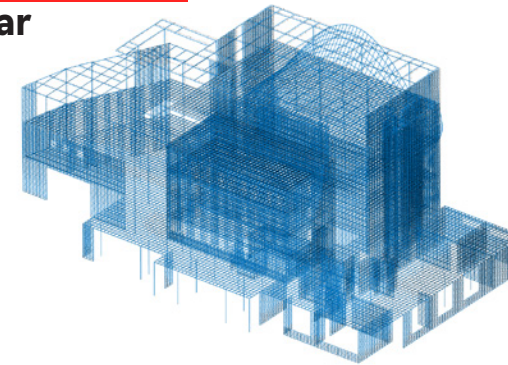
El análisis modal tiene como finalidad determinar los periodos y modos de vibrar de una estructura (García, 2017). Los modos de vibración de un edificio dependen de las cargas dinámicas que, en caso de un evento sísmico, pueden afectar en mayor o menor medida a la estructura. Según la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2014) en el análisis se debe considerar:

- Todos los modos de vibración que contribuyan significativamente a la respuesta total de la estructura, mediante los varios periodos de vibración.
- Todos los modos que involucren la participación de una masa modal adecuada de al menos el 90% de la masa total de la estructura.

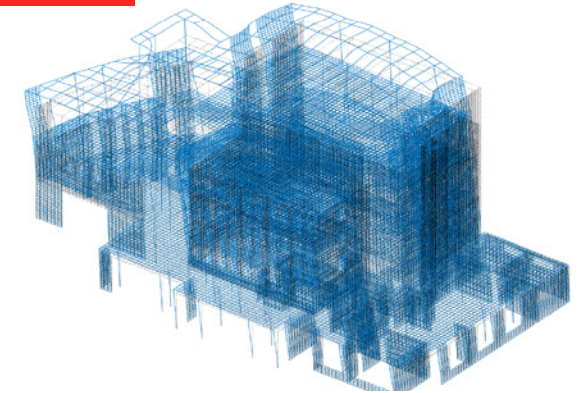
En este caso se consideran los primeros 20 modos de vibrar, ya que, en función a lo estipulado en la norma, se deberá considerar los valores de los modos de vibrar que en sumatoria, representen aproximadamente el 90% del desplazamiento de masa total del edificio. En las figuras a continuación se presentan los 4 primeros modos de vibrar.



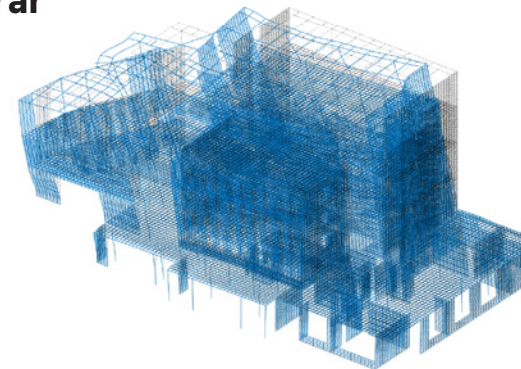
1er modo de vibrar



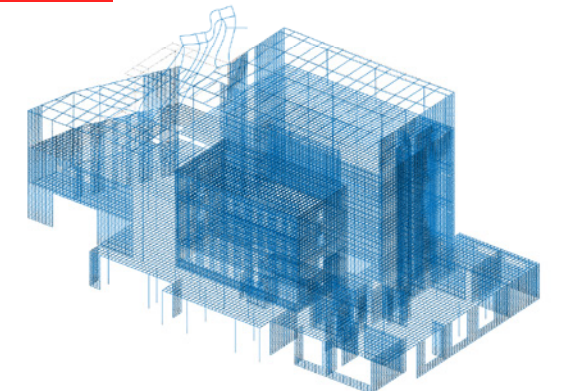
3er modo de vibrar



2do modo de vibrar



4to modo de vibrar



5.1 Análisis Espectral

El análisis espectral simula el comportamiento de una estructura sometido a fuerzas sísmicas. En este proceso, el espectro de diseño define las condicionantes que determinan los desplazamientos que sufre una edificación. Los desplazamientos máximos evidencian la distancia que se desplaza una edificación al ser sometida a fuerzas sísmicas.

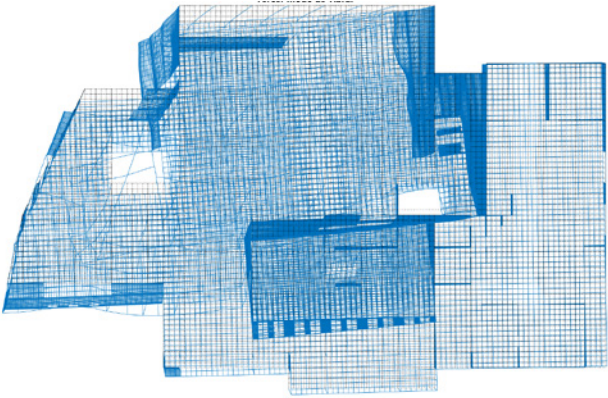
En este análisis se puede interpretar la participación de las fuerzas sísmicas sobre la estructura. Las fuerzas modales que actúan en dos direcciones determinantes (x) y (y), generan desplazamientos en dichos sentidos. Los gráficos expuestos a continuación visibilizan las deformaciones causadas.

En la tabla 2.24 se exponen los valores correspondientes a las deformaciones en las direcciones (x) y (y).

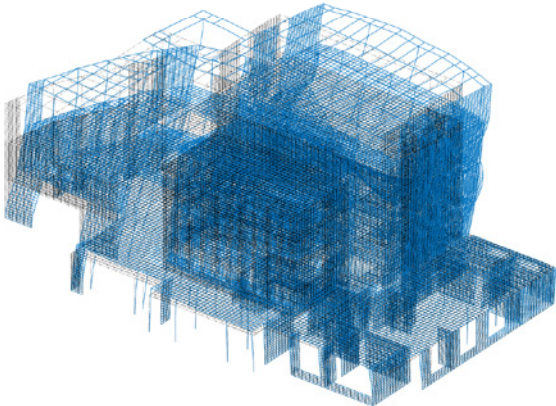
Tabla 2.24: Periodos de la estructura	
Dirección	Desplazamiento (m)
Ux	0,06306
Uy	0,06659

2do modo de vibrar

		Masa Total (Kg)		3346416,24
Modo de vibrar	Periodo (sg)	Masa en Y (Kg)	% de Masa en Y	
1	0,3695	16295,62	0,49	
2	0,3239	1260939,22	37,68	
3	0,2853	629863,38	18,82	
4	0,2063	24408,17	0,73	
5	0,1988	1692,34	0,05	
6	0,1956	37816,53	1,13	
7	0,1884	373615,16	11,16	



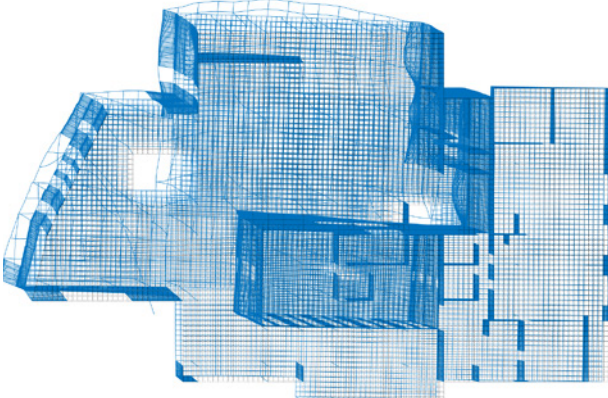
Segundo modo de vibrar: modo relevante de movimiento en (y)



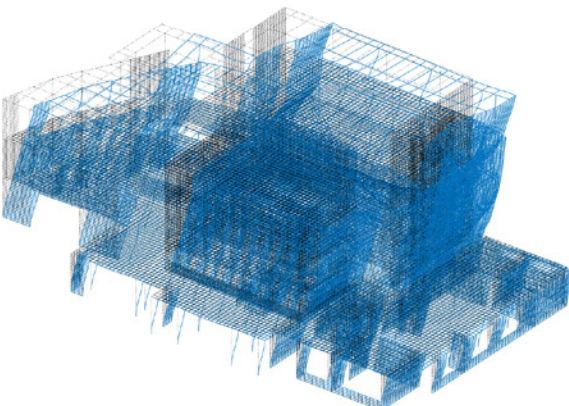
Segundo modo de vibrar en axonometría.

3er modo de vibrar

		Masa Total (Kg)		3346416,24
Modo de vibrar	Periodo (sg)	Masa en X (Kg)	% de Masa en X	
1	0,3695	1551,41	0,05	
2	0,3239	513388,88	15,34	
3	0,2853	1729024,36	51,67	
4	0,2063	505,04	0,02	
5	0,1988	98,16	0,00	
6	0,1956	21239,30	0,63	
7	0,1884	76812,40	2,30	



Tercer modo de vibrar: modo relevante de movimiento en (x)



Tercer modo de vibrar en axonometría.

Etapa 5

Simulación

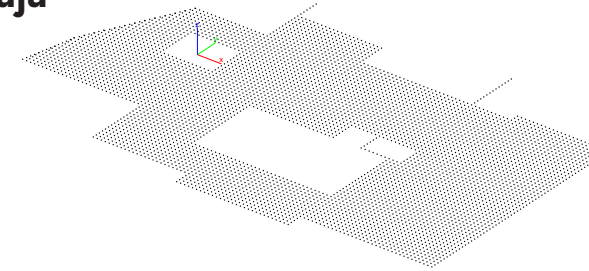
y resultados obtenidos

5.1 Derivas

La normativa NEC (2014) define a una deriva de piso como un desplazamiento lateral relativo, generado particularmente por la acción de una fuerza horizontal, con respecto al piso consecutivo, es decir, se calcula restando el desplazamiento del extremo superior con el desplazamiento del extremo inferior del piso. Los siguientes valores presentan márgenes para interpretar los valores correspondientes a las derivas de piso:

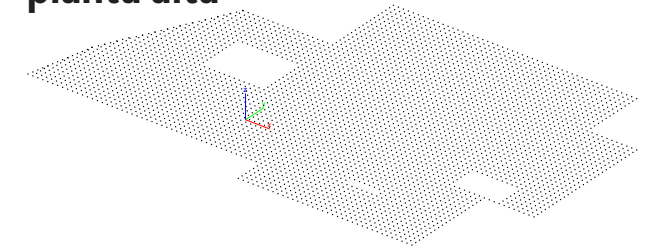
- Si el valor de la deriva es igual o mayor a 0,006, el edificio corre riesgo de colapso.
- Si el valor de la deriva es superior a 0,003 y menor a 0,006 se presentarán daños considerables.
- Si el valor de la deriva es inferior a 0,003, el edificio no presentará daños considerables.

deriva planta
baja

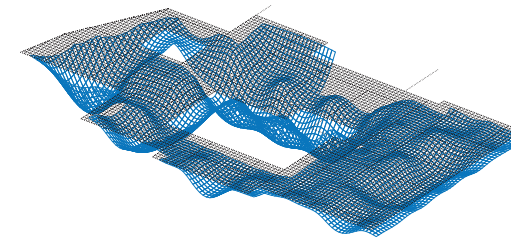


(a) Planta Baja - Base

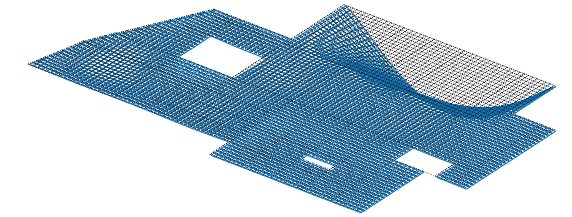
deriva 1era
planta alta



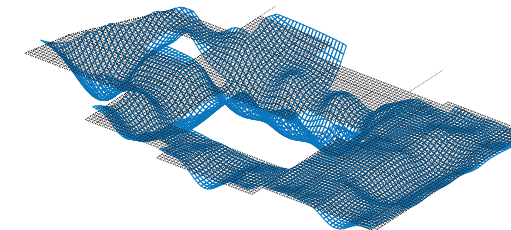
(d) Primera planta alta base - Base



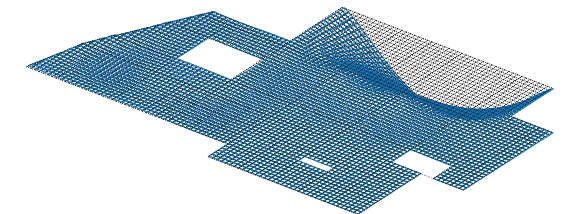
(b) Planta Baja Deriva en x



(e) Primera planta alta Deriva en x



(c) Planta Baja Deriva en y



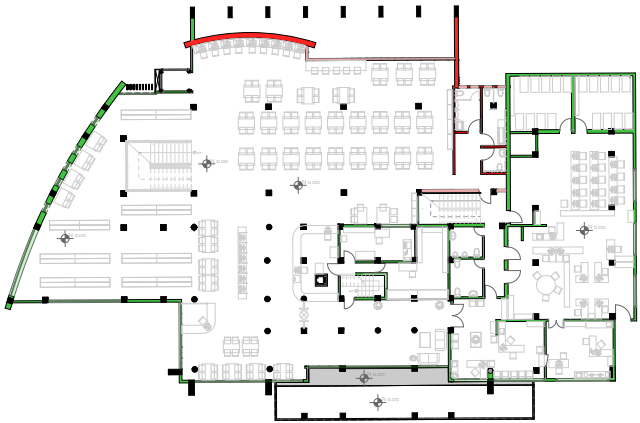
(f) Primera planta alta Deriva en y

5.1 Identificación de zonas seguras

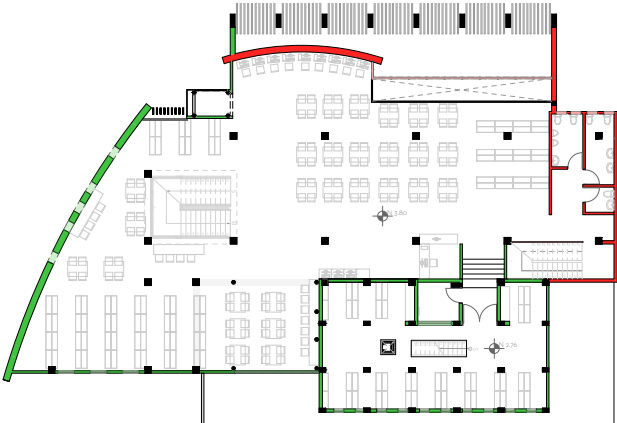
- Al analizar los gráficos, es posible detectar que el edificio posee una mayor deriva en su parte posterior, además se puede evidenciar que los muros pintados de color rojo presenta mayor movimiento con respecto al resto de paredes.
- Al observar las deformaciones y desplazamientos, es posible concluir que el área con mayor desplazamiento o deriva corresponde a la parte de ocupación por el público, específicamente la zona de lectura, en la que se desarrollan las actividades más comunes de la biblioteca.
- La disposición de elementos estructurales y la falta de continuidad de los mismos, alteran y afectan considerablemente su comportamiento estructural.

zonas seguras

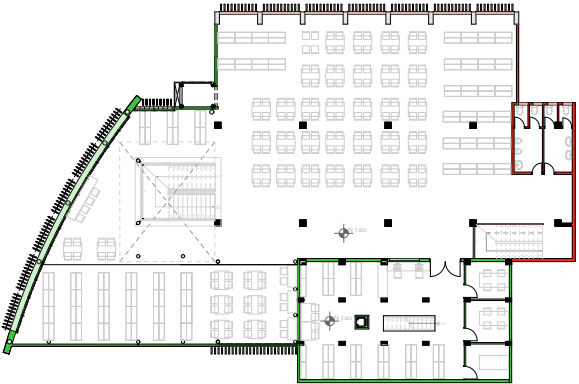
zonas vulnerables



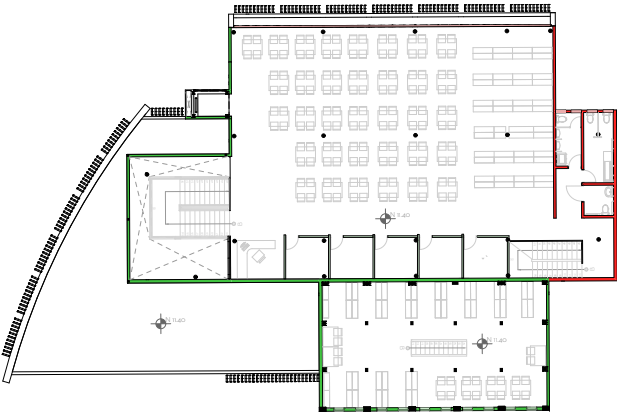
Zonas seguras localizadas en Planta Baja. Morocho & Sarmiento (2020).



Zonas seguras localizadas en Primera Planta Alta. Morocho & Sarmiento (2020).



Zonas seguras localizadas en Segunda Planta Alta. Morocho & Sarmiento (2020).



Zonas seguras localizadas en Tercera Planta Alta. Morocho & Sarmiento (2020).

