

AUTOMATIC GENERATION AND ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES WITH CEINCI-LAB

Julia Pilatasig⁽¹⁾, Brian Cagua⁽¹⁾, Roberto Aguiar^(2,3), Felix Vaca⁽⁴⁾

⁽¹⁾Maestría en Estructuras. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. bjcagua@espe.edu.ec
jepilatasig3@espe.edu.ec

⁽²⁾Profesor. Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE. Av. Gral. Rumiñahui s/n, Valle de los Chillos. rraguiar@espe.edu.ec

⁽³⁾Facultad de Ingeniería. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí ULEAM.

⁽⁴⁾Coordinador de Ingeniería. Entidad Colaboradora Desintecsa. felvaca@hotmail.com

Received: March 2020. Accepted: April 2020

Published: July 1, 2020

ABSTRACT

In Ecuador there is a representative number of three-story reinforced concrete structures with a regular configuration. It is important to indicate that many of these buildings have been built without adequate technical criteria, they are informal. Many existing buildings present high seismic vulnerability. This implies that these structures must be analyzed to know their behavior under the design earthquake established by the Ecuadorian Construction Standard (NEC).

This article presents a methodology for the automatic generation of structures, based on random parameters and real information from structural surveys that reflect the reality of construction in our environment, in order to carry out a simplified seismic analysis that shows the behavior of the structures and based on these results take reinforcing or other actions. **CEINCI-LAB**, facilitates the development of this methodology since it allows the user to generate algorithms for structural analysis with different study parameters.

From the simulation of 200 three-story structures created with random data and 100 real cases in Quito, with soil type D parameters, a correlation is observed between the drifts and the parameters of the amount of columns (area of columns in the first floor / area total construction), H / T (total height of the building (m) / Fundamental period of vibration (s)). These parameters could be used, in a referential way, to get an idea of the maximum drifts that can occur in a structure in the face of a design earthquake.

keywords: **CEINCI-LAB** computer system. Reinforced Concrete frame structures. Automatic generation of structures. Spectral Analysis.

GENERACIÓN AUTOMÁTICA Y ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS PORTICADAS DE HORMIGÓN ARMADO CON *CEINCI-LAB*

RESUMEN

En el Ecuador existe un número representativo de estructuras de hormigón armado de tres pisos con una configuración regular, es importante indicar que muchas de estas edificaciones han sido construidas sin criterio técnico adecuado, es decir, que son informales y en muchos de los casos presentan alta vulnerabilidad ante amenaza sísmica. Esto implica que estas estructuras deben ser analizadas para conocer su comportamiento bajo el sismo de diseño establecido por la Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC).

En este artículo se presenta una metodología para la generación automática de estructuras, basada en parámetros aleatorios e información real de levantamientos estructurales que reflejen la realidad de la construcción en nuestro medio, con el propósito de realizar un análisis sísmico simplificado que muestre el comportamiento de las estructuras y en base a estos resultados tomar acciones de reforzamiento u otros. *CEINCI-LAB*, facilita el desarrollo de esta metodología ya que permite al usuario generar algoritmos para el análisis estructural con diferentes parámetros de estudio.

De la simulación de 200 estructuras de tres pisos creadas con datos aleatorios y 100 casos reales en Quito, con parámetros de suelo tipo D, se observa una correlación entre las derivas y los parámetros de cuantía de columnas (área de columnas en planta baja/área total de construcción), H/T (altura total de la edificación (m)/Periodo fundamental de vibración(s)). Estos parámetros podrían llegar a emplearse, de forma referencial, para tener una idea de las máximas derivas que pueden presentarse en una estructura ante un sismo de diseño.

Palabras Claves: Sistema de computación *CEINCI-LAB*. Estructuras porticadas de Hormigón Armado. Generación automática de estructuras. Análisis Espectral.

1. INTRODUCCIÓN

La generación automática de estructuras es un aspecto importante en el campo de la ingeniería estructural, permite generar múltiples modelos de forma sencilla y rápida, donde se pueden ajustar los parámetros de la demanda (sismo), geometría de las estructuras (dimensiones y números de vanos, número de pisos, alturas de entrepiso, área de construcción), dimensiones de los elementos estructurales (columnas, vigas, muros, etc.).

Actualmente los programas comerciales tienen un potencial muy grande para el análisis estructural, pero presentan una limitación en cuanto a modificar los parámetros mencionados anteriormente de forma automática, para generar múltiples estructuras con evaluaciones de varios parámetros. Sin embargo, algunos sistemas computacionales de código libre permiten realizar algoritmos

adaptables a las necesidades de los usuarios de forma más flexible, en este caso para la generación automática de estructuras y el análisis modal espectral se emplea el sistema computacional **CEINCI-LAB**.

CEINCI-LAB es una herramienta de complementación académica para temas de Ingeniería Estructural, como Análisis Matricial, Dinámica de Estructuras, entre otros. Adicionalmente se utiliza **CEINCI-LAB** para realizar investigaciones del comportamiento de estructuras de hormigón armado o de acero, en análisis simplificados de 2 dimensiones, estructuras espaciales, con disipadores de energía, reforzamiento de estructuras y con la aplicación de sistemas de aislamiento sísmico, entre otros temas relevantes de Ingeniería Estructural.

Para comprender de mejor manera la metodología de generación de estructuras y análisis paso a paso del Método Espectral con el sistema de computación **CEINCI-LAB**, el usuario puede tener como referencia los artículos publicados por los primeros tres autores de este artículo (Aguiar *et al.* 2019, 1 y 2).

En Ecuador, al igual que en muchos países latinoamericanos, la construcción de edificaciones de mediana o baja altura es importante, pero muchas veces la informalidad genera estructuras con una alta vulnerabilidad ante sismos. Es por ello necesario generar metodologías de análisis sísmico de estructuras para que se pueda plantear reforzamientos de las edificaciones que no cumplen con los parámetros mínimos de seguridad para los ocupantes.

En este artículo se expone una metodología para el análisis sísmico de edificaciones porticadas de hormigón armado, nuevas funciones de **CEINCI-LAB** para automatizar este proceso y poder analizar múltiples estructuras, adicionalmente se estudia la relación entre las derivas con varios parámetros estructurales como: cuantía de columnas y muros; periodo fundamental de vibración; el parámetro H/T, que corresponde a un valor resultante de la división de la altura total de la edificación para el periodo fundamental de vibración.

2. GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE ESTRUCTURAS Y ANÁLISIS SÍSMICO

Inicialmente se plantea la generación automática de estructuras, es decir que en base a ciertos parámetros predefinidos se puede generar múltiples estructuras, donde se mantiene la geometría de los pórticos y se cambia las dimensiones de los elementos estructurales (vigas y columnas). Para los pórticos en sentido longitudinal se puede calcular las matrices de rigidez y masa de la estructura, luego con ello se procede al análisis sísmico mediante el Método Espectral.

2.1. Tipologías de estructuras en análisis

En algunos trabajos de investigación se definen las tipologías típicas de construcciones de mediana y baja altura en Quito; por ejemplo, según la tesis de Cupuerán en 2016, de la evaluación estructural en 538 lotes de Turubamba en el

Sur de Quito, la mayoría de las edificaciones son de hormigón armado y una clasificación por número de pisos refleja que 13% son de un piso, 41% de dos pisos, 34% de tres pisos y el 12% son de 4 o más pisos. En el trabajo de Celi *et al.* en 2016, se realiza un estudio de curvas de capacidad de tipologías estructurales; en este caso la información recopilada corresponde a 11556 edificaciones de la ciudad de Quito. De este trabajo se tiene clasificación de las edificaciones en 4 tipologías, 16% son estructuras de un piso, 62% son parte de las tipologías 2 y 3 que son estructuras de 2 a 3 pisos irregulares en “L” y regulares con forma rectangular, 10% son estructuras de 4 a 6 pisos que tiene forma rectangular, estas estructuras son porticadas con vigas, columnas y losas de entrepiso de hormigón armado, donde se tiene mampostería de bloque. En consecuencia, se puede concluir de manera parcial, que, al hablar de estructuras de mediana altura en nuestro medio, el grupo de edificaciones de 3 pisos es representativo. En este artículo se presenta inicialmente el análisis de 20 geometrías de estructuras de 3 pisos como se puede apreciar en la figura 1; las distancias entre ejes de columnas para los pórticos en ambos sentidos son de 4 y 3.5 metros, lo que representa la tipología habitual de estructuras de hormigón armado en nuestro medio.

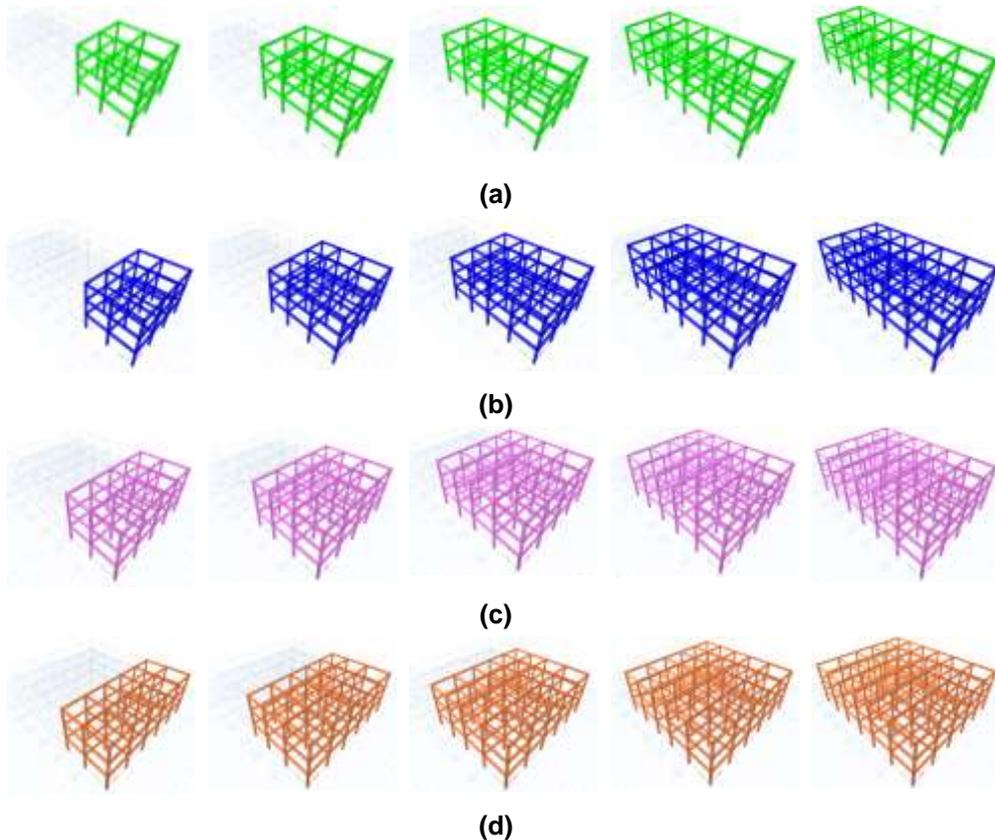


Figura 1 Geometría de las estructuras variando los vanos en sentido transversal con pórticos tipos de sentido Longitudinal “X”, siendo estos pórticos tipos de; a) 2 vanos; b) 3 vanos; c) 4 vanos; d) 5 vanos.

2.2. Modelo de análisis sísmico

De manera simplificada se realiza el análisis sísmico de estructuras considerando un modelo de un grado de libertad por piso, es decir que se asume que el piso es rígido y que las coordenadas principales corresponden a los grados de libertad horizontales, como se muestra en la figura 2.

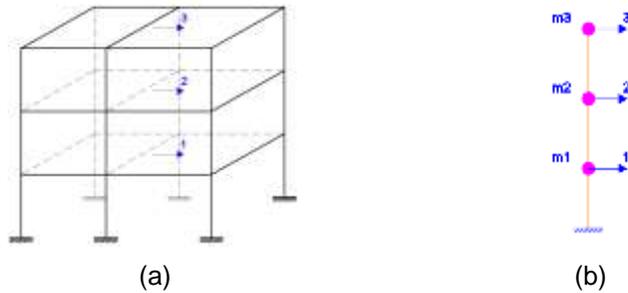


Figura 2 a) Vista tridimensional de la edificación considerando piso rígido; b) Esquema simplificado de ubicación de las masas y grado de libertad para el análisis sísmico.

2.3. Funciones de CEINCI-LAB para la generación y análisis de estructuras

Para la generación de las estructuras se requiere el número de vanos en sentido X e Y, además de la separación de cada vano como ilustra la figura 3; para cada tipo de pórtico se detalla estos datos en las matrices **vanosX** y **vanosY**. Por ejemplo, en la matriz **vanosX** cada una de sus columnas corresponde a un pórtico en sentido longitudinal "X", la primera celda de cada columna es el número de vanos, luego seguido de este valor se tiene la separación de las columnas del pórtico que define el espaciamiento de cada vano, esto para cada tipo de pórtico; de manera similar se hace en la matriz de **vanosY**, como se puede ver en las figuras 3a y 3b.

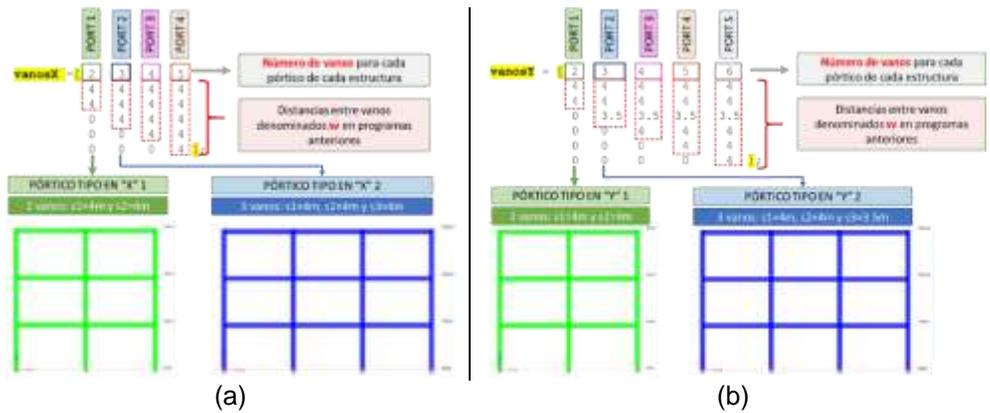


Figura 3 Datos de los vanos para cada estructura. (a) Sentido X. (b) Sentido Y.

Es importante indicar que se puede tener diferentes valores en las dimensiones de vanos, además es posible generar más pórticos de los que se muestra en este ejemplo. Adicionalmente para evitar problemas de definición de matrices en Matlab se debe completar con ceros los espacios vacíos en las matrices **vanosX** y **vanosY**. Con estos datos se puede generar las diferentes geometrías de las estructuras; para las estructuras en análisis se tiene 4 tipos de pórticos en sentido "X" y 5 pórticos en sentido transversal "Y", entonces es posible generar las geometrías de las 20 estructuras mostradas en la figura 1.

Una vez asignados los vanos en sentido longitudinal de análisis "X" y en sentido transversal "Y", es necesario indicar las alturas de entrepiso de la estructura y para ello se emplea el vector **sp**. En la primera parte de este artículo, todas las estructuras en análisis son de 3 pisos, por lo tanto, se deben incluir 3 datos en el vector **sp**. También es importante conocer las dimensiones de las matrices **vanosX** y **vanosY**, esto se hace debido a que con esta información es posible conocer el número total de geometrías en análisis (en este caso 20 tipos de estructuras con geometrías diversas como se muestra en la figura 1).

Este artículo, por ser pedagógico y con el principal objetivo de ilustrar de manera detallada el proceso de análisis de estructuras, se presenta el código del programa en figuras; por ejemplo, la parte 1 del código del programa principal es presentado en la figura 4, con un encabezado en la parte superior izquierda, que presenta la secuencia del código.

Código del programa principal. Parte 1:

```
%Geometría del pórtico
vanosX =[2 3 4 5
         4 4 4 4
         4 4 4 4
         0 4 4 4
         0 0 4 4
         0 0 0 4]; % En la primera línea es #vanos y luego la separación

vanosY =[2 3 4 5 6
         4 4 4 4 4
         4 4 4 4 4
         0 3.5 3.5 3.5 3.5
         0 0 4 4 4
         0 0 0 4 4
         0 0 0 0 4]; % En la primera línea es #vanos y luego la separación

sp =[2.7; 2.70; 2.70]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en (metros)
[fil, vanosXX] = size(vanosX);
[filY, vanosYY] = size(vanosY);
```

Figura 4 Desarrollo del programa en **CEINCI-LAB**.

Las estructuras en análisis son porticadas conformadas por columnas y vigas de hormigón armado. La sección de estos elementos para cada estructura en análisis es constante y única, es decir una misma sección de columna para todos los elementos verticales y una misma sección de viga para elementos horizontales.

Las 20 estructuras mencionadas anteriormente (figura 1), se analizan inicialmente con columnas de 0.10m x 0.10m y vigas bandas de 0.35m x 0.25m, estas columnas con una sección tan pequeña no son reales, sin embargo, esto representa una forma fácil para generar diferentes secciones variando el lado de estos elementos de 5cm en 5cm, hasta llegar a una sección de 0.55m x 0.55m (10 tipos de columnas como se muestra en la figura 5). En consecuencia, el programa está realizando el análisis de 200 estructuras.

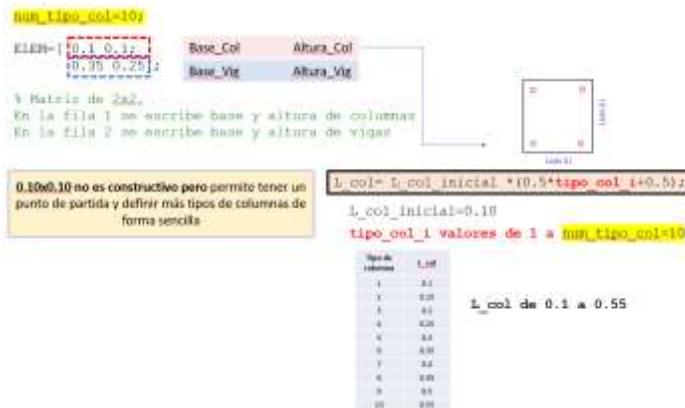


Figura 5 Variación de secciones transversales de columnas.

Posteriormente, se debe asignar los datos del material, en este caso se asumen estructuras de hormigón armado con resistencia a la compresión de 210 kg/cm², para con ello determinar el módulo de elasticidad E. De manera conservadora, se puede asumir el valor de $E = 13500 \cdot \sqrt{f'c}$, sin embargo, es posible realizar una modificación al programa para considerar un módulo de elasticidad diferente para cada estructura.

Código del programa principal. Parte 2:

```
%% Secciones % Col(varia); Vigas(35x25) (cm)
num_tipo_col=10;
ELEM=[ 0.1 0.1;
      0.35 0.25]; % Matriz de 2x2, En la fila 1 va base altura de columnas
                % en la fila 2 se escribe base y altura de vigas

%% Propiedades del material
fc =210; % La resistencia a la compresión del hormigón f'c (kg/cm2)
E=135000*sqrt(fc); % Calcula el módulo de elasticidad del hormigón (T/m2)
```

Figura 6 Datos de las secciones de vigas, columnas y materiales.

2.4. Datos del espectro

Se considera el análisis en la ciudad de Quito, en base al espectro de aceleraciones de la NEC-15; los datos necesarios son: el tipo de suelo, la zona sísmica, la región, el factor de amortiguamiento se asume como 5% y para el factor de reducción de fuerzas sísmicas se toma un valor de $R = 5$.

De estudios de microzonificación sísmica (Aguiar, 2015), se menciona que en Quito gran parte del suelo se puede clasificar como suelos tipo D y un porcentaje representativo como C, siendo en menor porcentaje suelos tipo E, como se presenta en la figura 7. Más adelante se requiere esta información para el análisis modal espectral.

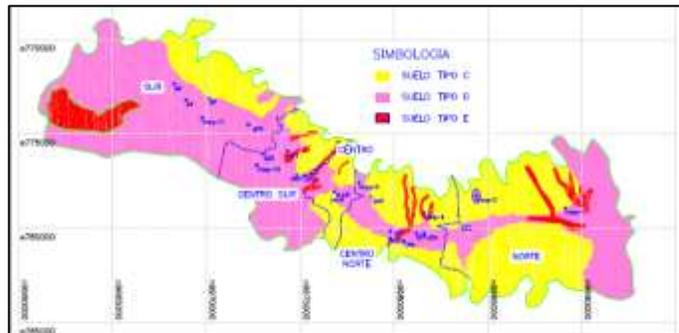


Figura 7 Clasificación de suelos para Quito. (Aguiar, 2015).

De forma didáctica se asumen que las estructuras en análisis están en suelos tipo D, de la ciudad de Quito, con los parámetros del espectro como se puede apreciar en la figura 8.

Código del programa principal. Parte 3:

```
%% Datos para el espectro
b=[1;1;1];
R=5;
zeda=0.05;
fip=1;fie=1;
is=4; % Suelo D
iz=5; % Zona sísmica 5 = 0.4g
ip=2; % Región Sierra
```

Figura 8 Datos del espectro de la NEC-15.

2.5. Desarrollo de análisis sísmico

El procedimiento de cálculo para que sea automático debe ser estandarizado, este proceso consiste en determinar la rigidez lateral de los pórticos en sentido longitudinal "X" con cada tipo de sección de columna, es decir con una determinada dimensión de ese elemento como se muestra en la figura 9.

De forma automática se determina el área de columnas en planta baja del pórtico en análisis y se almacena en la “matriz de celdas” denominada **Acol_PB_XX**.

Código del programa principal. Parte 4:

```

** Análisis en sentido X
COP TIPO COL = TIPO COL
...
** Definición de los datos de la estructura
n = n + 1
av = av + av * (1/n)
...
** Cálculo de la rigidez lateral de los pórticos en sentido X. (4 TIPOS)
...
** Área en Planta baja de columnas del pórtico en análisis
Acol_PB_XX(tipo_col, i) = Acol_indiv(tipo_col, i) * nri
...

```

Cambia el tipo de columna que se relaciona con la dimensión de ese elemento

Calcula la rigidez lateral de los pórticos en sentido X. (4 TIPOS)

Áreas en Planta baja de columnas del pórtico en análisis

Figura 9 Procedimiento de cálculo de los pórticos tipo con diferentes secciones de columnas para el sentido X.

Hasta este punto, los pórticos totales calculados representan 40 matrices de rigidez lateral y se almacena estos cálculos en la “matriz de celdas” denominada **KL_EST**, como se muestra en la figura 10 (**4 pórticos x 10 tipos_columnas = 40 matrices de rigidez lateral**).

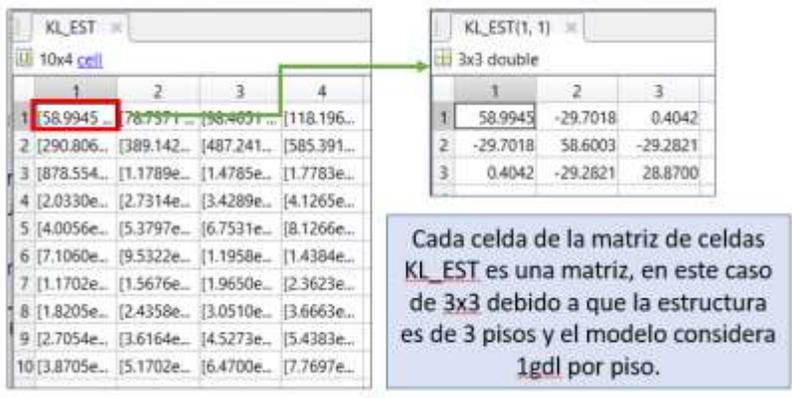


Figura 10 Matrices de rigidez de los pórticos tipos que componen a la estructura en el sentido de análisis.

En la figura 11 se muestra la geometría de los pórticos en sentido de análisis con la numeración de grados de libertad (para los datos de separación de vanos se hace referencia la matriz **vanosX**).

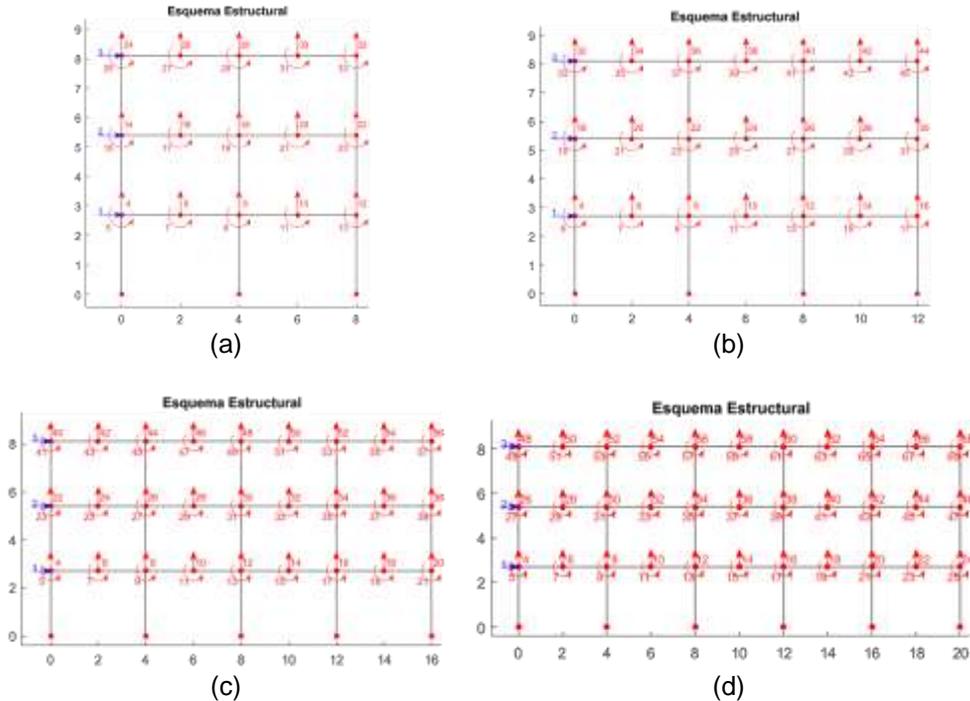


Figura 11 Grados de libertad en pórticos de análisis. (a) Pórtico 1 de 2 vanos. (b) Pórtico 2 de 3 vanos. (c) Pórtico 3 de 4 vanos. (d) Pórtico 4 de 5 vanos.

Para determinar la matriz de masas se puede asumir que la carga reactiva por el sismo (W) la compone la carga permanente más la carga muerta correspondiente al peso de las estructuras. De forma simplificada se puede considerar que la dimensión de la columna no será muy relevante para el valor total y por ello la carga reactiva se asume como 0.8 T/m^2 para todas las estructuras (en futuro es posible generar variaciones de esta carga). En consecuencia, se requiere el área de construcción de cada piso que dependerá únicamente de la geometría de las estructuras, en este caso al ser losas rectangulares, el área de construcción de cada piso es la multiplicación de la longitud de la losa en sentido "X" por la longitud de la losa en sentido transversal, conforme a las geometrías mostradas en la figura 1. Las áreas de cada piso se almacenan en la matriz **A_Const_Piso** y las matrices de masa en la matriz de celdas denominada **M_EST** similar a lo mostrado en la figura 10.

Para determinar la matriz de rigidez total de cada estructura, se multiplica el número de pórticos en sentido transversal por la matriz de rigidez del pórtico tipo en X, ya que los elementos y la geometría de estos pórticos son iguales. De igual manera se hace para el área de columnas en planta baja.

AcolPB, se refiere al área total de columnas en planta baja (m^2), siendo esta la suma del área de cada columna en planta baja como se muestra en la figura 14c; **Aconst**, es el área total de construcción que aporta a la carga reactiva del sismo (m^2), es decir el área sobre el nivel de planta baja como se aprecia en la figura 14b; **Deriva**, es la máxima deriva que se calcula en la estructura (%); **Cuantía**, $AcolPB/Aconst$, la división entre el área de columnas en PB para el área total de construcción (ecuación 1).

$$\text{Cuantía de columnas} = \frac{\sum A_{col_i}}{\sum A_{const_i}} = \frac{\text{Área de elementos resistentes a cargas laterales en PB (m}^2\text{)}}{\text{Área de construcción que aporta a la carga reactiva (m}^2\text{)}} \quad (1)$$

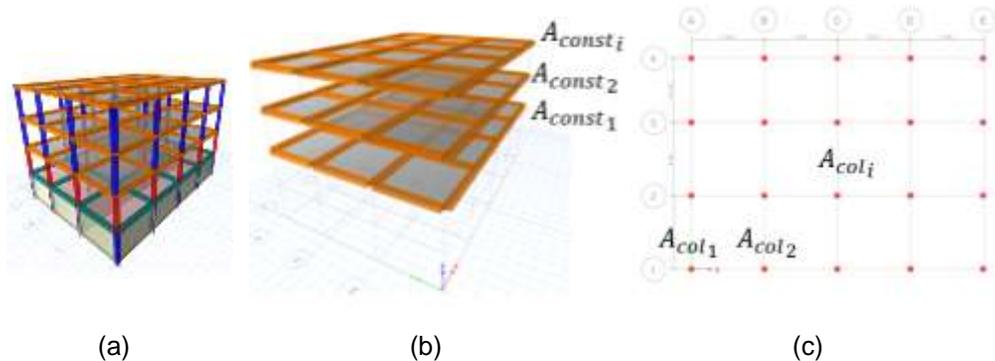


Figura 14 (a) Vista en 3D de una estructura tipo. (b) Losas que aportan al área de construcción. (c) Columnas de Planta Baja que aportan al área de elementos estructurales.

La matriz **TablePeriodos**, es una matriz de 200×2 donde las filas representan cada estructura, la primera columna es el periodo fundamental (s) y la segunda es la relación H/T , que representa la altura total de la edificación (m) dividida para el periodo fundamental (s).

El parámetro H/T , es un índice de rigidez que tiene unidades de velocidad (m/s), esta relación se emplea para estimar la rigidez traslacional de un edificio de hormigón armado, de forma general, se puede clasificar estas estructuras de acuerdo a la tabla 1 (Guendelman *et al.*, 1997).

Tabla 1 Clasificación de estructuras en función del parámetro H/T (Chile).

Parámetro H/T (m/s)	Estructuras
< 20	Muy Flexibles
20 a 40	Flexibles
40 a 70	Rigidez normal
> 70	Rígidos

Acorde al estudio de Moroni y Astroza (2002), en el análisis de estructuras después del sismo del 3 de marzo de 1985 en Viña del Mar, se puede estimar el daño en función del parámetro H/T como se presenta en la tabla 2.

Tabla 2 Nivel de daño esperado en función de H/T (Moroni y Astroza, 2002).

Parámetro H/T (m/s)	Nivel de daño
30 a 40	Daños estructurales moderado
40 a 50	Daño estructural leve
50 a 70	Daño no estructural
> 70	Despreciable

Es posible observar que en la tabla 2, no se presenta estimaciones de daños en estructuras de valores H/T menores a 30; no obstante, es lógico suponer que los daños serán mayores en los elementos estructurales y no estructurales, por ejemplo, Guendelman *et al.* (1997) indica que valores inferiores a 20 m/s suponen una estructura muy flexible y probablemente presentara problemas de cumplimiento de disposiciones de desplazamientos como se fijan en las normas de diseño sísmico. Según Cevallos *et al.* (2018), en estructuras con valores de H/T de 10 o menos se puede producir daño excesivo y hasta probablemente colapso.

2.6. Presentación de resultados en gráficas

En base a la información de resultados se puede crear gráficas que representan el comportamiento de este grupo de estructuras. En la figura 15a es posible observar que la cuantía de columnas, es decir, la relación entre el área de columnas en Planta Baja respecto al área total de construcción, para estructuras de 3 pisos con vigas bandas, en suelos tipo D, de la ciudad de Quito, es de 0.005 o superior para poder controlar las derivas y tener valores inferiores a 2% como lo establece la normativa nacional. En la figura 15b se presenta las derivas en función del parámetro de altura total de la edificación respecto al periodo fundamental de vibración, en este caso valores de H/T menores a 15 generan derivas superiores a 2% y esto en consecuencia implicaría mucho daño ante un evento sísmico. Es importante notar, que el periodo de vibración es calculado en modelos numéricos simplificados, sin considerar la mampostería; en modelos con mampostería el periodo disminuiría y consecuentemente el parámetro H/T podría aumentar. En el artículo de Cevallos *et al.* (2018), este parámetro aumenta aproximadamente 50% al considerar la mampostería en los modelos.

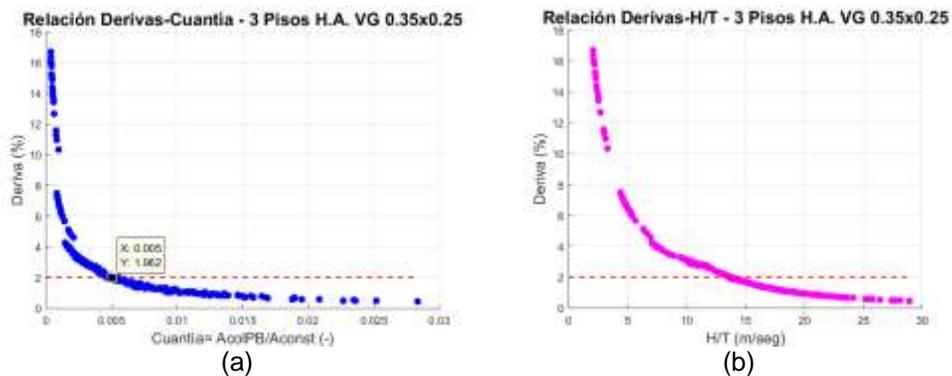


Figura 15 Gráficas de resultados del análisis sísmico (a) Derivas vs Cuantía de columnas. (b) Derivas vs H/T.

3. GENERACIÓN DE ESTRUCTURAS A PARTIR DE BASE DE DATOS DE EDIFICACIONES REALES Y ANÁLISIS SÍSMICO

En esta sección del artículo se presenta una metodología para generar la geometría de las estructuras para análisis, a diferencia del caso anterior esto se lo hace en base a datos reales de edificaciones; es decir, que no dependerá de pórticos tipo o de asumir dimensiones únicas de elementos estructurales.

3.1 Configurar la base de datos de estructuras

Para poder automatizar este proceso de generación de estructuras, es necesario tener un orden específico en la matriz de levantamiento de información de cada estructura. Por facilidad, la plantilla de toma de datos se presenta en Excel y está disponible en [researchgate.net/profile/Julia_Pilatasig/research](https://www.researchgate.net/profile/Julia_Pilatasig/research) junto a los programas necesarios para el análisis sísmico.

En la figura 16a se presenta el formato base del levantamiento de información de una estructura; para ejemplificar el uso de esta hoja de datos se presentará una estructura de 1 piso, con 3 vanos en sentido “X” y 4 vanos en sentido transversal “Y”. La geometría de la estructura se presenta en la figura 16b.

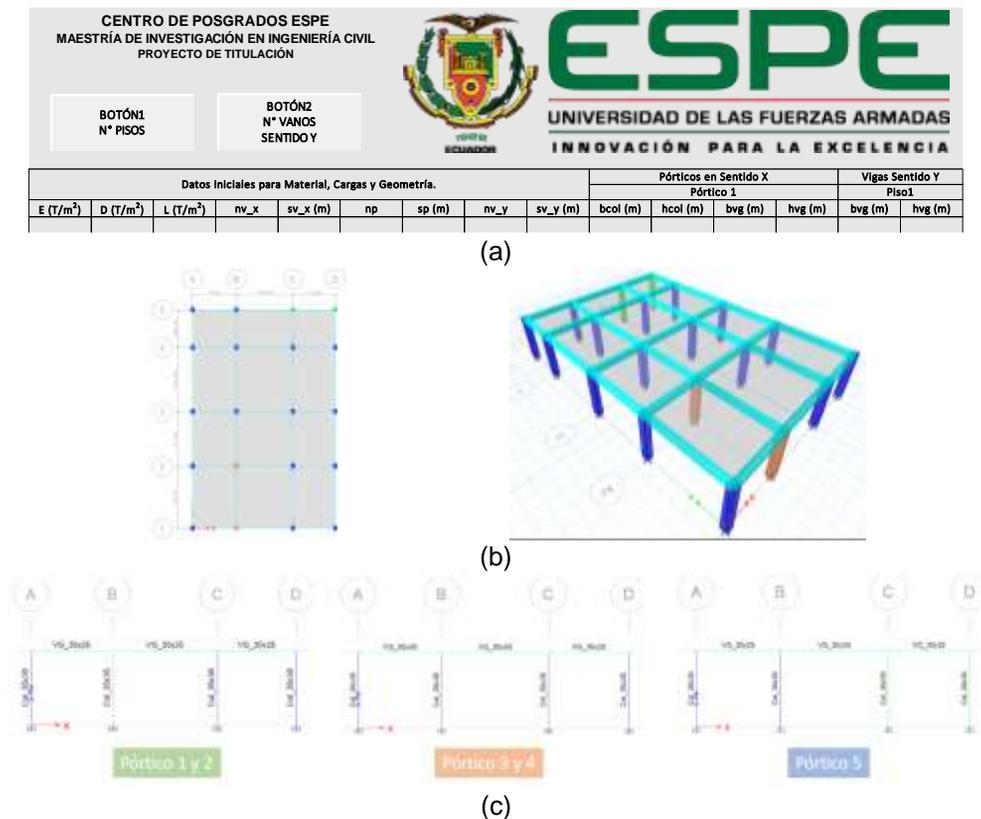


Figura 16 (a) Formato de levantamiento de información (HOJA_BASE). (b) Vistas en planta y 3D de una estructura en análisis (ejemplo). (c) Pórticos “X”.

Para empezar, se debe hacer una copia de la HOJA_BASE y colocar como nombre **EST#**, donde # corresponde al identificador de la estructura. Antes de llenar los datos se recomienda configurar las columnas de la hoja de datos siguiendo los pasos en la figura 17, en este caso dar clic en **BOTÓN1** y colocar el número de pisos (en este caso 1), siguiente dar clic en **BOTÓN2** y escribir el número de vanos en sentido transversal (sentido Y), para este caso corresponde a 4 vanos; con esto se define el número de columnas de la hoja en Excel para la geometría de la estructura.

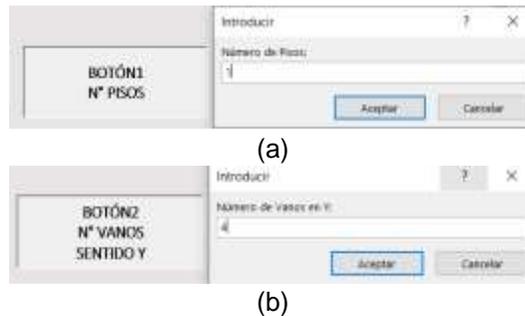


Figura 17 (a) BOTÓN1 N° PISOS. (b) BOTÓN2 N° VANOS SENTIDO Y.

Los datos iniciales de material, cargas y geometría de pórticos son registrados en la plantilla de la figura 16a; las columnas de datos son: módulo de elasticidad (T/m^2); carga muerta distribuida en la losa de cada piso (T/m^2); carga viva distribuida en la losa de cada piso (T/m^2); en caso de ser varios pisos las cargas deben ingresarse de cada piso en vertical, es decir que existirá “n” filas de cargas en función de los pisos; número de vanos en sentido “X”; longitud de cada vano en forma descendente (m); número de pisos; altura de entrepiso (m); el número de vanos en sentido “Y” y finalmente la longitud de cada vano en sentido “Y”. Estas 9 columnas son fijas e independiente del número de pisos y vanos en sentido “X” o “Y”, es decir que para toda estructura se tendría estos datos (figura 18a), luego es necesario las dimensiones de las columnas y vigas para poder definir las estructuras. En este caso, las siguientes columnas de la matriz de la plantilla de levantamiento de información tiene que ver con base, altura de columnas y vigas, es decir 4 columnas adicionales para cada pórtico en sentido “X”, para la estructura de la figura 16b se tiene 5 pórticos en “X”, ver figura 18b. En este punto faltaría las dimensiones de las vigas transversales; estas dimensiones se colocan en las siguientes columnas, donde las dimensiones de base y altura de las vigas se registran para cada piso, ver los datos de la figura 18c.

Datos Iniciales para Material, Cargas y Geometría.								
E (T/m^2)	D (T/m^2)	L (T/m^2)	nv_x	sv_x (m)	np	sp (m)	nv_y	sv_y (m)
1.96E+06	0.5	0.1	3	3	1	2.7	4	4.2
0	0	0	0	3.85	0	0	0	3.7
0	0	0	0	2.9	0	0	0	4.35
0	0	0	0	0	0	0	0	2.55

(a)

Los datos en Excel, de las estructuras que se requieren analizar deben ser almacenados, de forma individual en archivos de texto, dentro de una carpeta denominada **DATOS_ESTRUCTURAS**. La información de cada estructura, únicamente los datos numéricos (completando con ceros los espacios vacíos), deben ser guardadas en un archivo de bloc de notas (extensión .txt) con el nombre de **EST#.txt**, donde # tiene que ver con una identificación del número de estructura (ver figura 20).



Figura 20 Datos de Estructuras para el ejemplo propuesto.

3.2 Análisis sísmico considerando 1 gdl por piso

El proceso de análisis se detalla en la figura 21, los datos (EST#.txt) deben ser almacenados en una carpeta denominada **DATOS_ESTRUCTURAS**. Posteriormente se debe ejecutar el programa de CEINCI-LAB **Modelos_JEP_Automatizacion_1GDL.m** que genera la estructura y realiza el análisis de cada modelo, de manera similar a lo que se indicó en la sección 2 del presente artículo; en este caso la diferencia es que la geometría, cargas, materiales, dimensiones de columnas y vigas se encuentran previamente definidas en los archivos EST#.txt. Al ejecutar este modelo se genera automáticamente una carpeta **RESULTADOS_ESTRUCTURAS_1GDL** con los resultados de los análisis sísmicos realizados, en esta carpeta se generan archivos de textos que almacenan los resultados de cada estructura, que son denominados **RES_1GDL_EST_#.txt**. Finalmente, para poder trabajar con los resultados se debe ejecutar el programa **Resultados_JEP_Automatizacion_1GDL.m** que genera gráficas como se aprecia en la figura 23, que son similares a las presentadas en la figura 15, pero con los datos de cada estructura.

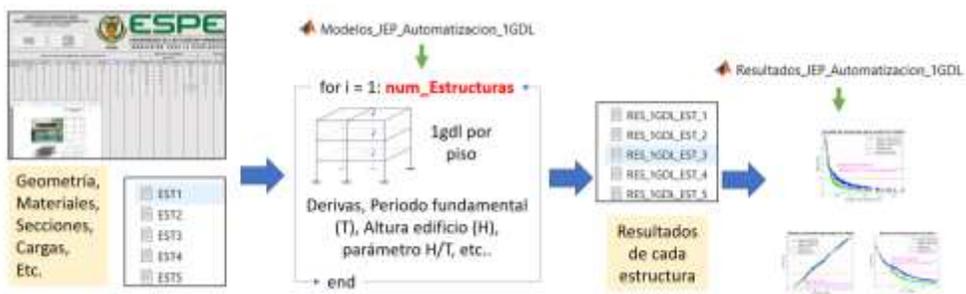


Figura 21 Proceso de análisis sísmico de las estructuras.

Para el cálculo de la matriz de rigidez, se considera un modelo similar al presentado en la figura 2, es decir, un modelo con 1 grado de libertad por piso; se realiza un análisis en sentido X y posteriormente se cambian los grados de libertad para hacer un análisis en sentido transversal Y (modelos de la figura 22).

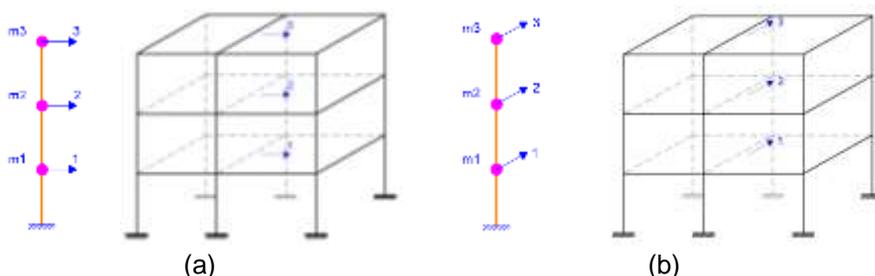


Figura 22 Modelos de 1 gdl para análisis sísmico (a) Análisis en sentido longitudinal “X”. (b) Análisis en sentido transversal “Y”.

La codificación del programa empleado en esta sección es similar al presentado anteriormente; en la figura 23 se puede apreciar parte del código del programa **Modelos_JEP_Automatizacion_1GDL.m** que difiere de lo presentado en otros artículos sobre el análisis sísmico con CEINCI-LAB. En este caso se puede notar que al inicio se debe dar el nombre de la carpeta **RESULTADOS_ESTRUCTURAS_1GDL** que almacenará los resultados del análisis de cada estructura, seguido del número de estructuras que están en la carpeta de datos, para este caso 50 estructuras con datos reales correspondientes a viviendas de Hormigón Armado de 1 a 3 pisos y una estructura de 4 pisos en la ciudad de Quito.

El análisis sísmico de este grupo de estructuras es secuencial, es decir desde la estructura 1 a la nEst, es por ello que se presenta un bucle **for ... end** en el cual se alberga el código que realiza los cálculos del análisis. En la figura 23 es posible notar que la información de cada estructura se almacena en una matriz denominada **EST**, la dimensión de esta matriz varía en función de la geometría de cada estructura (número de vanos y número de pisos), también varían las dimensiones de las matrices que se involucran en el análisis, por ejemplo las matrices de rigidez y de masa depende del número de pisos de cada estructura, por ello antes de finalizar el bucle se coloca un comando de Matlab **“clearvars - except ij”** que elimina todas las variables del espacio de trabajo (rigidez, masa, np, sv, etc.) con excepción del identificador de la estructura en análisis denominado **ij**, esto se lo realiza para evitar problemas de dimensiones de matrices en los cálculos y tener la seguridad de que cada análisis es realizado con los datos que corresponden a cada estructura.

Las columnas de la matriz de datos están ordenadas de forma que se pueda aplicar un programa para automatización del análisis, una nueva función de **CEINCI-LAB** es **Secciones_X_Y_EST** con la cual se obtienen las dimensiones de las columnas y vigas de cada pórtico (base y altura de los elementos, asumiendo elementos rectangulares) para el análisis en sentido X y Y.

```

Modelos_JEP_Automatizacion_1GDL.m:
%% Carpeta en la cual se van a grabar los archivos de resultados
mkdir RESULTADOS_ESTRUCTURAS_1GDL
nEst = 50; % Número de estructuras en análisis (Mismo # de archivos txt)
for ij=1:nEst
    %% Leer cada archivo con los datos de cada estructura
    EST = load(['DATOS_ESTRUCTURAS\EST' num2str(ij) '.txt']);
    E=EST(1,1); % Modulo de elasticidad, T/m2
    Cmuerta=nonzeros(EST(:,2)) ; % Carga muerta en cada piso, T/m2
    Cviva=nonzeros(EST(:,3)) ; % Carga viva en cada piso, T/m2
    nvx=EST(1,4); % Número de vanos en X
    svx=EST(1:nvx,5); % Longitud de cada vano en X, m
    np=EST(1,6); % Número de pisos
    sp=EST(1:np,7); % Altura de entrepiso, m
    nvy=EST(1,8); % Número de vanos en Y
    svy=EST(1:nvy,9); % Longitud de cada vano en Y, m
    % Número de elementos de un pórtico en sentido X
    numColX=np*(nvx+1);
    numVigasX=np*(nvx)*2;
    % Número de elementos de un pórtico en sentido Y
    numColY=np*(nvy+1);
    numVigasY=np*(nvy)*2;
    % Secciones de cada elemento de cada pórtico
    [SeccionPorticosX,SeccionPorticosY]=Secciones_X_Y_EST(np,nvx,nvy,EST);
    Análisis sísmico en sentido X considerando 1GDL por piso
        Metodología similar a la presentada en la sección anterior
    Análisis sísmico en sentido Y considerando 1GDL por piso
        Metodología similar a la presentada en la sección anterior
    ResultadosGeneral=[np, Acol_PB_TOTAL, A_Const_TOTAL, HTedificio,
        maxDervX, maxDervY];
    [f1,c1]=size(ResultadosGeneral);
    ResultadosX=[Masa_Traslacional, KL_T_X, TX, qteX];
    [f2,c2]=size(ResultadosX);
    ResultadosY=[KL_T_Y, TY, qteY];
    [f3,c3]=size(ResultadosY);
    ResultadosDESP=[qtiX', DervX', qtiY', DervY'];
    [f4,c4]=size(ResultadosDESP);
    filas=max([f1,f2,f3,f4]);
    columnas=c1+c2+c3+c4;
    Resultados=zeros(filas,columnas);
    Resultados(1:f1,1:c1)=[ResultadosGeneral];
    Resultados(1:f2,c1+1:c1+c2)=[ResultadosX];
    Resultados(1:f3,c1+c2+1:c1+c2+c3)=[ResultadosY];
    Resultados(1:f4,c1+c2+c3+1:c1+c2+c3+c4)=[ResultadosDESP];
    %% Grabar los archivos
    save(['RESULTADOS_ESTRUCTURAS_1GDL\RES_1GDL_EST_' num2str(ij)
        '.txt'],['Resultados'],'-ascii'); % .DATO: Dirección carpeta
    clearvars -except ij
end

```

Figura 23 Fragmento del programa principal para el análisis sísmico.

3.3 Presentación de resultados y generación de gráficos

En los archivos de resultados de cada estructura **RES_1GDL_EST_#.txt**, que se almacenan en la carpeta **RESULTADOS_ESTRUCTURAS_1GDL**, se presenta la información para cada estructura, ordenada de la siguiente manera: primera columna es el número de pisos de la estructura; el área de la sección transversal de todas las columnas en planta baja (m^2); área total de construcción (m^2); altura total de la edificación (m); máxima deriva presentada en el análisis en "X" (%); máxima deriva presentada en el análisis en "Y" (%); matriz de masa ($T \cdot \text{seg}^2/m$); matriz de rigidez total en sentido "X" (T_m), periodos de vibración del análisis en sentido "X" (s); desplazamientos elásticos en cada piso del análisis en "X" (m); de manera similar en sentido "Y" se presenta matriz de rigidez, periodos de vibración y desplazamientos elásticos del análisis; continúan los resultados con desplazamientos inelásticos (m) y derivas (%) en cada piso para el análisis en sentido "X", finalmente estos mismos parámetros para el análisis en sentido "Y".

El programa **Resultados_JEP_Automatizacion_1GDL.m** genera las gráficas con los archivos de resultados, su metodología consiste en extraer los datos resultantes del análisis sísmico e identificar los parámetros del archivo (matrices y vectores), en función del número de pisos de cada estructura y posteriormente realizar las gráficas que el usuario quiera para hacer una discusión de análisis, la parte principal del código del programa se muestra en la figura 24.

Resultados_JEP_Automatizacion_1GDL.m:
<pre> nEst = 50; % Número de estructuras en análisis (Mismo # de archivos txt) for ij=1:nEst %% Leer cada archivo con los datos de cada estructura EST{ij,1} = load(['RESULTADOS_ESTRUCTURAS_1GDL\RES_1GDL_EST_' num2str(ij) '.txt']); % DATO: Dirección carpeta np(ij,1)=EST{ij,1}(1,1); Acol_PB_TOTAL(ij,1)=EST{ij,1}(1,2); A_Const_TOTAL(ij,1)=EST{ij,1}(1,3); HTedificio(ij,1)=EST{ij,1}(1,4); maxDervX(ij,1)=EST{ij,1}(1,5); maxDervY(ij,1)=EST{ij,1}(1,6); TX(ij,1)=EST{ij,1}(1,6+2*np(ij,1)+1); TY(ij,1)=EST{ij,1}(1,6+1+3*np(ij,1)+1+1); % Cálculos Cuantia_Col(ij,1)=Acol_PB_TOTAL(ij,1)/A_Const_TOTAL(ij,1); HTX(ij,1)=HTedificio(ij,1)/TX(ij,1); HTY(ij,1)=HTedificio(ij,1)/TY(ij,1); end </pre>

Figura 24 Fragmento del programa principal para resultados.

Se puede notar en la figura 25, que los resultados de análisis de casos reales son similares a los presentados en la figura 15, correspondientes a

estructuras generadas aleatoriamente. No obstante, la cuantía mínima de columnas en este caso debería ser 0.004 para cumplir con las derivas máximas permitidas de la NEC-15, esto se debe a que las estructuras reales representan modelos de estructuras con vigas bandas y vigas peraltadas.

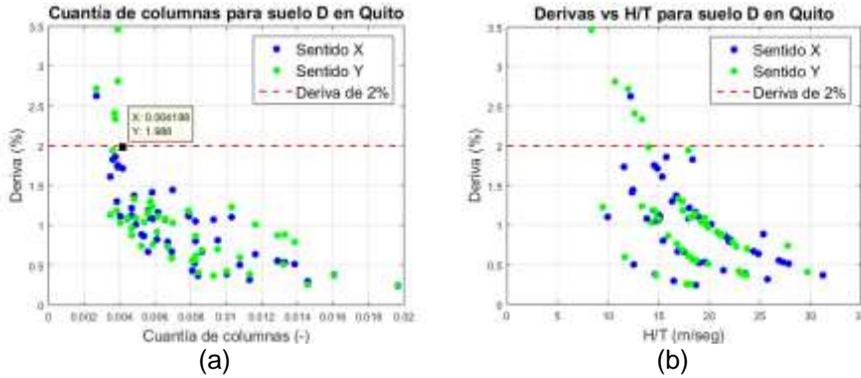


Figura 25 Gráficas de resultados del análisis sísmico (a) Derivas vs Cuantía de columnas. (b) Derivas vs H/T.

3.4 Análisis complementarios sobre las cuantías de columnas

Se realiza el análisis de estructuras de 3 pisos de Hormigón Armado ubicadas en suelo tipo D de la ciudad de Quito, considerando vigas bandas de 35x25, vigas peraltadas de 30x40 y otras estructuras con vigas de 25x35, con la metodología de generación aleatoria de estructuras en base a parámetros predefinidos (sección 2). En la figura 26, se presenta los resultados más relevantes de estos análisis junto a los resultados de los análisis de estructuras reales (sección 3), es posible observar que las estructuras aleatorias engloban a la tipología de estructuras reales y hacen posible visualizar una tendencia exponencial decreciente entre las variables de máximas derivas (%) y cuantía de columnas, destacando como valor referencial una cuantía mínima de 0.004 para obtener derivas inferiores a 2%.



Figura 26 Derivas vs Cuantía de columnas.

Es posible generar análisis de este parámetro en función del tipo de suelo, sin embargo, al ser estructuras de 3 pisos donde la mayoría de estas estructuras tienen periodos hasta 0.6 segundos aproximadamente, entonces el tipo de suelo no genera un cambio representativo, por ejemplo, en la figura 27a se puede observar una tendencia similar a la presentada en la figura 26, siendo adecuado una cuantía de 0.004 para controlar las derivas. En la figura 27b se muestra como influye el tipo de suelo en las estructuras con geometría real en la ciudad de Quito (sección 3 de este artículo), se aprecia que existe poca variación entre los resultados para suelo C y D, esto se debe a que para el rango de periodos de estas estructuras de 1 a 3 pisos los espectros de la NEC 15 para suelos C y D presentan una forma similar (magnitudes de aceleraciones), las estructuras en suelos tipo E varían debido a que las aceleraciones del espectro NEC 15 para suelo E es menor en este rango de periodos.

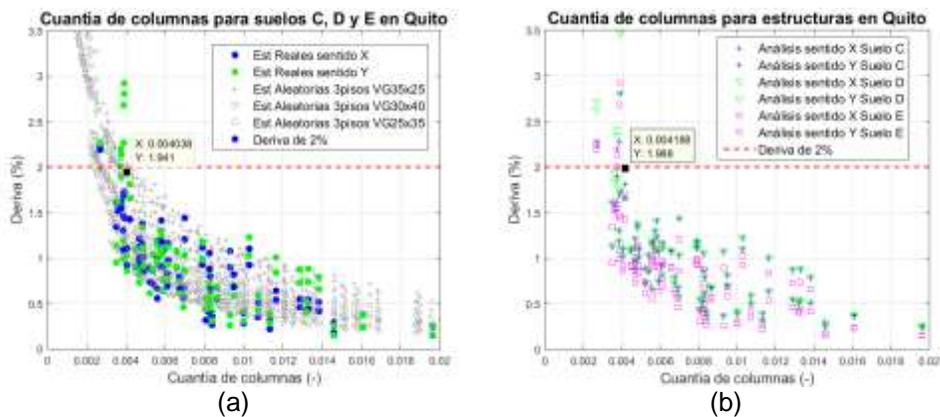


Figura 27 Derivas vs Cuantía de columnas.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta una metodología para generar estructuras de manera automática, con la combinación de parámetros predefinidos, y también con información de una base de datos de estructuras pertenecientes a Quito. Esto permite optimizar el tiempo de cálculo y generar nuevas investigaciones en las cuales se estudie el impacto de los parámetros estructurales y de la demanda sísmica, en el comportamiento de las edificaciones. Los resultados presentados son parciales y pertenecen a la tesis de Maestría de Julia Pilatasig.

El sistema de computación **CEINCI-LAB** permite realizar modificaciones a los códigos presentados, para adaptarse a las necesidades de cada usuario; debido a esta flexibilidad y a que es de libre acceso representa una ventaja para estudiantes, profesionales e investigadores en el área de estructuras.

Del análisis sísmico de 200 estructuras de hormigón armado de 3 pisos, con vigas bandas (35x25), 400 estructuras con vigas peraltadas (25x35 y 30x40) y de 100 casos adicionales de estructuras reales de 1 a 3 pisos con diferentes geometrías y dimensiones de elementos estructurales, simuladas sobre suelo tipo "D" en la ciudad de Quito, se puede inferir que existe una correlación entre las derivas de piso y la cuantía de columnas, para cumplir con derivas inferiores al

2%, que es el límite de la NEC-15, se recomienda una cuantía de columnas mínima, es decir, una relación de área de la sección transversal de todas las columnas en planta baja respecto al área total de construcción superior a 0.004. Este valor es referencial y solo es aplicable en base a las condiciones estudiadas, más adelante se presentará resultados con mayores simulaciones. Respecto al parámetro H/T, con valores menores a 15 m/s las estructuras podrían ser categorizadas como muy flexibles, con derivas superiores a 2%, por lo tanto, podrían presentar mucho daño ante un evento sísmico.

Los parámetros presentados en este artículo, para predecir el comportamiento sísmico, son fáciles de determinar, de manera que pueden representar un buen valor referencial para conocer de manera simplificada las derivas de las estructuras ante un sismo de diseño e incluso se podrían emplear para evaluaciones rápidas de vulnerabilidad estructural, luego en base a estos resultados se puede considerar estudios más detallados en las estructuras que considere el ingeniero Estructural.

5. REFERENCIAS

1. Aguiar, R., Cagua, B., Pilatasig, J., & Zambrano, E. (2019). "Interfase ICEINCI-LAB y nuevas funciones". *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **24(2)**, 167-199.
2. Aguiar, R., Cagua, B., & Pilatasig, J. (2019). "Nuevas funciones del sistema CEINCI-LAB para análisis sísmico espacial". *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **24(3)**, 259-276.
3. Aguiar, R. (2015). "Espectros de control para la ciudad de Quito-Ecuador". *Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE, Universidad Politécnica de Cataluña, IS-72, Barcelona*.
4. Celi, C., Pantoja, J., Ayala, C., & Sosa, D. (2016). "Capacity Curves of Structural Typologies of Quito-Ecuador, Project GEM-SARA". *Estado del Arte en Ingeniería Estructural y Materiales*.
5. Cevallos, A., Burbano, A., Moreano, R., & Caiza, P. (2018). Vulnerabilidad de estructuras en base a los periodos de vibración. In *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE* (Vol. 13, No. 1).
6. Guendelman, T., Guendelman, M., & Lindenberg, J. (1997). Perfil bio-sísmico de edificios. *Proc. Séptimas jornadas chilenas de sismología e ingeniería antisísmica*.
7. Moroni, O., & Astroza, M. (2002). Characteristic housing types in Chile. In *7th US National Conference on Earthquake Engineering*.
8. Norma ecuatoriana de la Construcción. (2015). "Peligro Sísmico/Diseño Sismo Resistente". Código: NEC-SE-DS, Quito, Ecuador.
9. Ríos, H., Music, J., & Vladilo, I. (2006). Perfil Bio-Sísmico de edificios representativos de la construcción en altura de la ciudad de Antofagasta. *Memoria de título, Universidad Católica del Norte, Antofagasta*.
10. Yáñez, C., & Isabel, M. (2016). Evaluación del riesgo por subsidencia en la zona de Turubamba, sur de Quito, como aporte al diseño de un plan integral de gestión de riesgos del Distrito Metropolitano de Quito.