



# INSTRUMENTACIÓN ACELEROGRÁFICA DE EDIFICIOS

L.E. Guzmán<sup>1</sup>, G. E. Romero<sup>1</sup>, M.A. Surio<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Departamento de Mecánica Estructural, UCA, San Salvador, El Salvador  
Teléfono (503) 7490-3014 E-mail: 00035412@uca.edu.sv

*Resumen — El objetivo de esta investigación, es brindar un nuevo uso significativo a los equipos acelerográficos propiedad de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA), que fueron parte de la antigua red acelerográfica denominada TALULIN, en un estudio que permita predecir el comportamiento estructural de edificios frente a solicitaciones sísmicas mediante modelos matemáticos y compararlo con el que se registra realmente. Para predecir el comportamiento estructural del edificio mediante el uso de registros acelerográficos, se crearon dos modelos: un modelo matemático simplificado y un modelo digital 3D para el que se utilizó el programa de diseño y análisis estructural SAP 2000.*

*Los datos que se introdujeron en el modelo matemático simplificado y en el modelo digital 3D para obtener posiciones específicas y aceleraciones absolutas en los niveles superiores se tomaron del evento sísmico registrado el 30 de mayo de 2019. Como conclusión, la precisión entre el modelo digital y el modelo matemático simplificado fue alta, pero la precisión entre ambos modelos y registros acelerográficos no fue tan alta, pero la tendencia de los resultados y los valores máximos y mínimo de aceleración obtenidos estuvieron cerca del registro acelerográfico.*

*Palabras Clave — Aceleraciones absolutas, aceleraciones relativas, acelerógrafos, acelerogramas, análisis modal, período fundamental.*

*Abstract — The objective of this research is to provide a meaningful use to the accelerographic equipment owned by Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA), which were part of the old accelerographic network called TALULIN, in a study that allows to predict the structural behavior of buildings in front of seismic requests by using mathematical models and compare it with a real registry. In order to predict the structural behavior of the building through the use of accelerographic records, two models were created: a simplified mathematical model and a 3D digital model for which the SAP 2000 structural analysis and design program was used.*

*The data that was introduced in the simplified mathematical model and in the 3D digital model to obtain specific positions and absolute accelerations at the upper levels were from the recorded seismic event that was reported on May 30 of 2019. As conclusion, the precision obtained between the digital model and the simplified mathematical model was high, but the precision between both models and the accelerographic records was not as high, but the tendency of the results and the maximum and minimum values of acceleration obtained were close to the accelerographic register.*

*Keywords — Absolute accelerations, specific accelerations, accelerometers, accelerograms, modal analysis, fundamental period.*

## I. INTRODUCCIÓN

Para fines investigativos y académicos, los equipos acelerográficos de la antigua red acelerográfica de la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, llamada también red TALULIN, han sido destinados a nuevos usos, como es la instrumentación de edificios para monitoreo de desempeño estructural ante solicitaciones sísmicas. Para ello se presenta una metodología conforme al recurso con el que se cuenta, para la instrumentación acelerográfica y la forma de obtención y procesamiento de la información para tales fines.

Para poner en marcha el desarrollo de dicho objetivo, fue necesario la recuperación de los equipos acelerográficos de la red TALULIN, los cuales estaban distribuidos en torno a San Salvador. Posteriormente, se seleccionaron cuatro de estos equipos con el fin de instrumentar el edificio Jon de Cortina y se les realizó previo a su instalación, una adecuada revisión, calibración y configuración para lograr la correcta obtención de registros.

Con el fin de predecir el comportamiento estructural del edificio mediante el uso de registros acelerográficos, se crearon dos modelos: un modelo matemático simplificado y un modelo digital 3D para el cual fue utilizado el programa comercial de análisis y diseño estructural SAP 2000.

Primero, se compararon los resultados obtenidos de un análisis modal realizado con ambos modelos para verificar la precisión del modelo matemático simplificado y posteriormente se definió un procedimiento para obtener resultados ante un evento sísmico.

Se utilizó el evento sísmico registrado el 30 de mayo de 2019. Se introdujeron los datos de este registro en el modelo matemático simplificado y en el modelo digital 3D para obtener las posiciones relativas y aceleraciones absolutas en los niveles superiores.

Algunos lineamientos que pueden seguirse para una adecuada instrumentación de edificios son los siguientes:



- USGS [1]. el cual menciona que es posible tener una mejor captura de datos distribuyendo sensores tanto en la parte central como en los bordes del edificio y observar el comportamiento de los diafragmas. Como recomendación adicional de USGS si es físicamente factible, es recomendable incluir en el esquema de instrumentación, una estación de campo libre específica del edificio. Esta estación de campo libre suele desplegarse a una distancia mayor de 1.5 - 2 veces la altura del edificio más alto y más cercano.

- International Building Code (IBC), apéndice L “Earthquake recording instrumentation” [3]. Especifica que, en Estados Unidos, para cada estructura ubicada donde la respuesta de aceleración espectral sea alta (IBC Sección 1613.3), y que la estructura posea 6 pisos de altura con un área de planta de 5574.18 m<sup>2</sup> o más, o que posea una altura de 10 pisos sin importar el área de planta deberán ser equipados con al menos tres equipos acelerográficos que estén conectados entre sí para que posean un inicio y tiempo sincronizado.

De acuerdo al USGS [1]. Una estructura bien instrumentada debería proveer información útil para:

- Revisar la idoneidad del modelo dinámico en el rango elástico.
- Seguir la propagación del comportamiento no lineal en toda la estructura a medida que aumenta la respuesta y determine el efecto de este comportamiento no lineal en la frecuencia y amortiguación.
- Correlacionar el daño con el comportamiento inelástico.
- Determinar los parámetros del movimiento del terreno que se correlacionan bien con el daño de la respuesta del edificio y hacen recomendaciones para mejorar los códigos sísmicos.
- Facilitar decisiones para retroalimentar/reforzar el sistema estructural, así como asegurar los contenidos dentro de las estructuras.

Para la obtención de los registros acelerográficos, denominados acelerogramas, fue necesario la utilización de softwares desarrollados por Kinematics, como el QTSSA y SS2EVT. Además, para el procesamiento de los registros, se contó con software especializados, en este caso, el ViewWave, el cuál es utilizado para la corrección y filtrado de la información que contiene el acelerograma.

## II. METODOLOGÍA

### A. Equipo utilizado para la instrumentación.

La instrumentación del edificio fue realizada con aparatos denominados acelerógrafos, los cuales son capaces de obtener un registro de aceleraciones en su lugar de instalación. En este caso se utilizó acelerógrafos digitales Kinematics SSA-2 como se muestra en la Fig. 1.



Fig. 1 Acelerógrafo Kinematics SSA-2.

La unidad está compuesta de sensores eléctricos, baterías, fuente eléctrica y un dispositivo de almacenamiento de información dentro de una cubierta de protección cerrada a prueba de agua.

### B. Edificio instrumentado.

El edificio seleccionado para la instrumentación fue el Edificio Jon de Cortina, ubicado en el campus de la UCA.

1) *Descripción del edificio:* El edificio Jon de Cortina es un edificio de 4 niveles que posee dimensiones de 80 metros de largo y 18 metros de ancho, con una altura de 15.8 metros. Su estructura principal está conformada por marcos de acero, 11 en el eje transversal y 4 en el eje longitudinal. Los marcos en el eje transversal están separados por una distancia de 8 metros y en el eje longitudinal están separados por distancias de 8 metros y 5 metros, lo cual se puede apreciar en la Fig. 2. De los 11 marcos que se encuentran en el eje transversal 6 son arriostrados.

Además de los marcos principales, el edificio cuenta con un sistema de vigas secundarias de acero estructural, lo cual brinda soporte a los sistemas de piso y techo.

La altura del nivel del suelo al primer piso es de 3.2 metros, mientras que el resto de niveles poseen una diferencia de 4.2 m de altura entre sí, como se muestra en la Fig. 3.

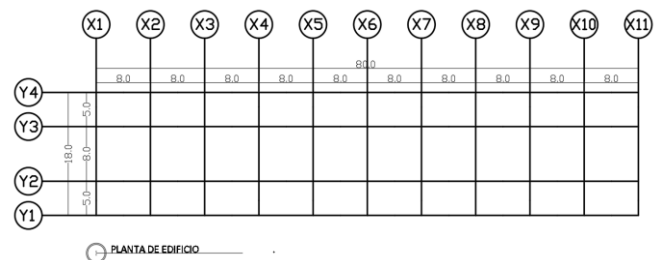


Fig. 2. Vista en planta del edificio Jon de Cortina.

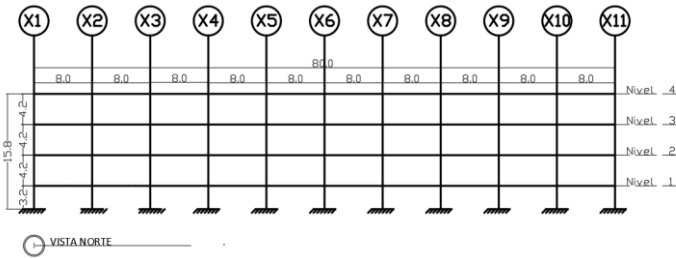


Fig. 3. Vista lateral del edificio Jon de Cortina.

- 2) *Instrumentación:* Se colocaron cuatro acelerógrafos en el edificio: uno en el sótano (base o nivel del terreno) y el resto, uno en cada nivel: 1, 2 y 3. Todos ellos fueron ubicados próximos a la columna que se encuentra en la intersección del eje X6 y Y1 del modelo del edificio como se puede observar en la Fig. 4.

Como parte de la instalación, cada espacio tuvo que acondicionarse adecuadamente para tener un óptimo desempeño. Parte de la instalación consistió en lo siguiente:

- Alimentación eléctrica. Cada acelerógrafo, además de contar con sus respectivas baterías verificadas, es alimentado por una fuente permanente de energía para asegurar el funcionamiento continuo del mismo.
- Protección física y aislamiento de los equipos. La protección consiste en una cobertura con forma de caja construida a base de plywood. Con esto se evita el riesgo que cada aparato sufra percances accidentales, que comprometan los resultados o la integridad misma del aparato.

*C. Procesamiento de los registros*

El procedimiento para procesar los registros es el siguiente:

1. Obtener los registros con el programa QTSSA con extensión .SSA.
2. Utilizar el programa SSA2EVT, con el propósito de convertir los registros de extensión .SSA a .EVT.
3. Utilizar el programa ViewWave para corregir la línea base y aplicar filtros de los registros. La corrección de la línea base consiste en centrar los valores de aceleración con respecto a una referencia cero. La aplicación de filtros se hace con el propósito de corregir toda aquella información adicional registrada que no corresponde a un evento sísmico, pueden ser aplicados filtros de alta frecuencia y filtros de baja frecuencia. Con el programa ViewWave, se obtienen valores de

aceleración contra tiempo del acelerograma completo. Se puede utilizar la parte más significativa del acelerograma con el fin de reducirlo en el tiempo utilizando parámetros que definen el movimiento fuerte del terreno.

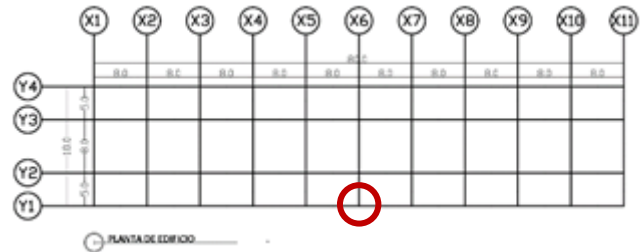


Fig. 4. Ubicación de los acelerógrafos en el edificio.

*D. Modelo matemático simplificado*

1. Se creó un modelo matemático simplificado partiendo de un sistema de cuatro masas concentradas, consecuentes con las masas de la estructura del edificio y cargas de servicio. A partir de este sistema, se definió la matriz de masas.
2. Se determinó la rigidez de entrepiso de cada tipo de marco de la edificación, la cual fue calculada utilizando un sistema de fuerzas proporcional al que se utilizaría en un análisis sísmico estático de la edificación. Luego, se determinó la rigidez para cada entrepiso y se definió la matriz de rigidez del sistema.
3. Con la matriz de masa y de rigidez del sistema se procedió a realizar el análisis modal clásico, obteniendo así las ecuaciones modales que conforman el vector de funciones modales junto con la matriz modal.
4. Se utilizó el método numérico de Newmark para la solución de sistemas de un grado de libertad, en donde para cada instante de tiempo se le da una solución diferente a la ecuación diferencial en función de la aceleración de la base.

III. RESULTADOS

A. Análisis modal

Se llevó a cabo el análisis modal de la edificación utilizando el modelo matemático simplificado y el modelo digital 3D creado con el software SAP2000.



La tabla 1, presenta los primeros dos períodos de vibración del edificio en la dirección longitudinal y la tabla 2 en la dirección transversal.

Tabla 1. Periodos fundamentales de vibración dirección longitudinal del edificio.

Modo	Modelo matemático simplificado	Modelo digital 3D
1	0.588 s	0.572 s
2	0.298 s	0.218 s

Tabla 2. Periodos fundamentales de vibración dirección longitudinal del edificio.

Modo	Modelo matemático simplificado	Modelo digital 3D
1	0.437 s	0.420 s
2	0.173 s	0.173 s

### B. Análisis de la historia en el tiempo.

Ante un evento sísmico para el cual se obtenga un registro en el acelerógrafo de la base y registros en el resto de los acelerógrafos, el procedimiento previsto para realizar la comparación entre los resultados obtenidos con los modelos matemáticos y los registros acelerográficos es el siguiente:

1. Introducir en el modelo simplificado el registro de la
2. base y obtener así las posiciones relativas, velocidades relativas y aceleraciones relativas en los diferentes instantes de tiempo utilizando un procedimiento de análisis de historia en el tiempo.

3. Obtener las aceleraciones absolutas en cada nivel. Para ello, se le suma a la aceleración relativa de cada masa, la aceleración de la base.
4. Comparar las aceleraciones absolutas así obtenidas con las que directamente se obtienen de los registros provenientes de los equipos acelerográficos instalados en cada nivel.

El registro acelerográfico utilizado para este estudio fue el correspondiente al terremoto del 30 de mayo de 2019

Del análisis de la historia en el tiempo, es posible obtener las aceleraciones absolutas para cada nivel. En la figura 5, se presenta la gráfica en el tiempo de las aceleraciones obtenidas en el nivel 1, eje transversal.

En la figura 6, se muestra el acelerograma en la dirección transversal de los datos recopilados por el acelerógrafo instalado en el nivel 1. Mientras que, en la figura 7 se muestran las aceleraciones absolutas obtenidas por el programa SAP-2000.

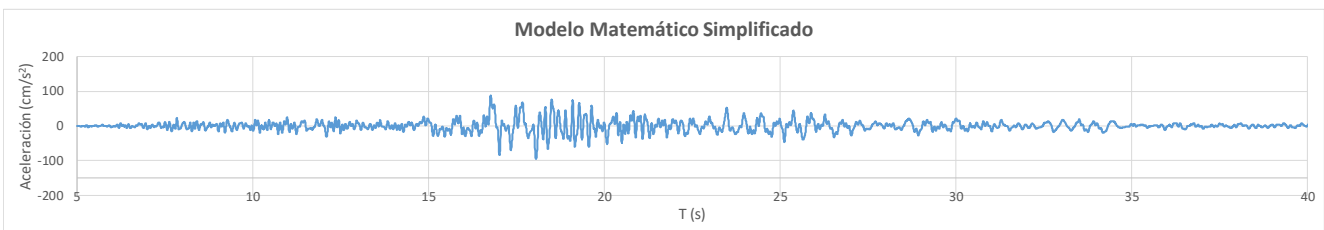


Fig. 5 Aceleraciones del nivel 1, eje transversal del edificio Jon de Cortina. Modelo Simplificado

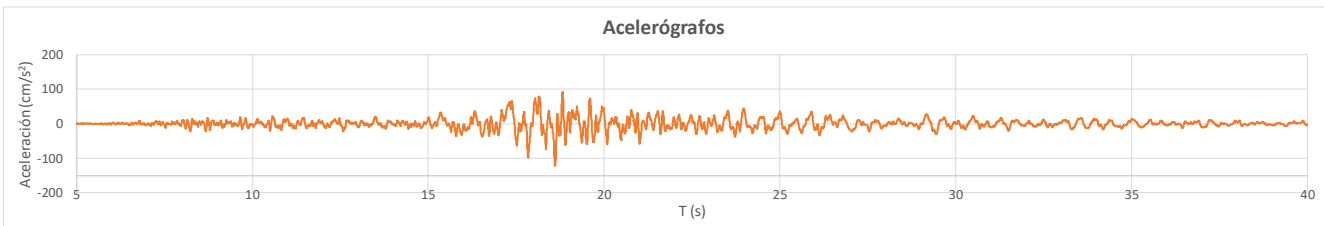


Fig. 6 Aceleraciones del nivel 1, eje transversal del edificio Jon de Cortina. Acelerógrafos.

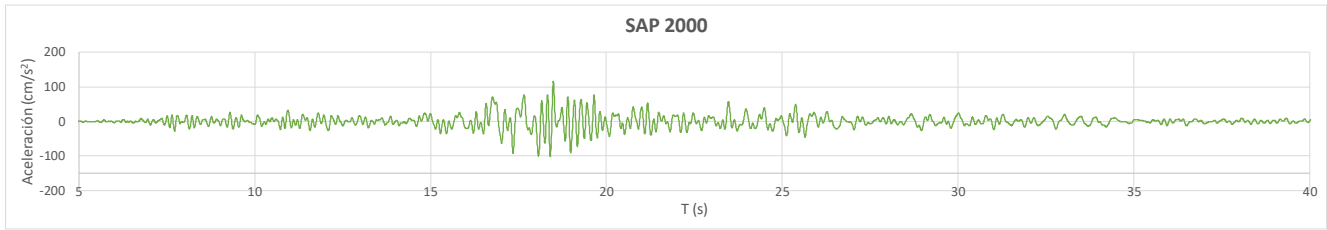


Fig. 7 Aceleraciones del nivel 1, eje transversal del edificio Jon de Cortina. SAP-2000.

#### IV. CONCLUSIONES

- Durante la creación del modelo matemático simplificado, por la complejidad que supone obtener el coeficiente de amortiguamiento del edificio, racionalmente se consideró una fracción de amortiguamiento crítico igual a 0.05, una consideración comúnmente adoptada en el análisis dinámico de edificaciones. La racionalidad de este parámetro solo puede ser verificada al comparar los registros acelerográficos obtenidos contra los resultados del modelo matemático simplificado.
- Se alcanzó una buena precisión entre los resultados del modelo matemático simplificado y el modelo digital 3D para predecir el comportamiento dinámico del edificio en la dirección longitudinal.
- Al utilizar la duración del movimiento fuerte como parámetro con el propósito de acotar y tomar los datos más representativos del acelerograma, se obtienen los mismos resultados de desplazamientos relativos que al considerar el acelerograma completo.

#### REFERENCIAS

- 1] USGS. (2000). *Seismic Instrumentation of Buildings. Menlo Park.*
- 2] Bommer, J. (2007). *Sismología para ingenieros.* San Salvador: UCA editores.
- 3] International Council Code. (s.f.). <https://codes.iccsafe.org/>. Obtenido de <https://codes.iccsafe.org/content/IBC2015/appendix-l-earthquake-recording-instrumentation> (Consulta: 28/09/2018)