



Vulnerabilidad sísmica en edificaciones educativas ecuatorianas evaluadas mediante modelos matemáticos de análisis dinámico

Sismic vulnerability in educational buildings of Ecuador evaluated through mathematical models of dynamic analysis

Vulnerabilidade sísmica em edifícios educacionais equatorianos avaliada por modelos matemáticos de análise dinâmica

Julio Cesar Morocho-Orellana ^I
juliojunior666@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-9211-1856>

Cristian Luis Inca-Balseca ^{II}
cristianl.inca@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-4795-8297>

Pedro Javier Cornejo-Reyes ^{III}
pedro.cornejo@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8256-9732>

Ángel Patricio Mena-Reinoso ^{IV}
angel.mena@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-3216-163X>

Correspondencia: juliojunior666@gmail.com

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Revisión

***Recibido:** 25 de febrero de 2022 ***Aceptado:** 10 de marzo 2022 * **Publicado:** 26 abril de 2022

- I. Facultad de Ingeniería, Universidad Metropolitana Sede Machala, Machala, Ecuador.
- II. Facultad de Informática y Electrónica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.
- III. Facultad de Recursos Naturales, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.
- IV. Facultad de Informática y Electrónica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.

Resumen

Se desarrolló un estudio de vulnerabilidad sísmica a un bloque de aulas de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Machala, aplicando un análisis dinámico lineal dentro del rango elástico, y con ayuda del método Tiempo-Historia, sometiendo el bloque de aulas a un set de acelerogramas sintéticos relacionados con el sismo registrado en Pedernales en 2016. El objetivo general de esta investigación fue estudiar el comportamiento elástico del bloque de aulas, frente a excitaciones sísmicas, mediante una simulación numérica basada en el método dinámico lineal tiempo-historia. Se aplicó el método de análisis tiempo-historia, que examina los resultados obtenidos mediante el algoritmo de Newark usando los modelos matemáticos ETABS y MATLAB. El estudio del comportamiento elástico de las edificaciones permitió simular su comportamiento y vulnerabilidad ante un evento sísmico de mediana intensidad y duración de 2 segundos. Los resultados demuestran que a los 20,08 y 25,84 segundos ocurrió un desplazamiento máximo de 3 y 5 centímetros en los pórticos 1 y 2 respectivamente, los desplazamientos observados no constituyen riesgo estructural para la edificación, ni para los usuarios, en el caso de sismo de mediana intensidad.

Palabras claves: desastre natural; prevención; riesgos sísmicos.

Abstract

A seismic vulnerability study was carried out on a block of classrooms of the Faculty of Civil Engineering of the Technical University of Machala, applying a linear dynamic analysis within the elastic range, and with the help of the Time-History method, subjecting the block of classrooms to a set of synthetic accelerograms related to the earthquake recorded in Pedernales in 2016. The general objective of this research was to study the elastic behavior of the classroom block, compared to seismic excitations, by means of a numerical simulation based on the dynamic linear time-history method. The time-history analysis method was applied, which examines the results obtained using the Newark algorithm using the mathematical models ETABS and MATLAB. The study of the elastic behavior of buildings allowed to simulate their behavior and vulnerability to a seismic event of medium intensity and duration of 2 seconds. The results show that at 20.08 and 25.84 seconds there was a maximum displacement of 3 and 5 centimeters in the frames 1 and 2 respectively, the observed displacements do not constitute structural risk for the building, nor for the users, in the case earthquake of medium intensity.

Keywords: natural disaster; prevention; seismic risk

Resumo

Foi desenvolvido um estudo de vulnerabilidade sísmica a um bloco de salas de aulas da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Técnica de Machala, aplicando uma análise dinâmica linear dentro do intervalo elástico, e com a ajuda do método Time-History, submetendo o bloco de salas de aula a um conjunto de acelerogramas sintéticos relacionados com o sismo registado em Pedernales em 2016. O objetivo geral desta investigação foi estudar o comportamento elástico do bloco de aulas, face a excitações sísmicas, através de uma simulação numérica baseada na dinâmica linear método de história do tempo. Foi aplicado o método de análise de histórico de tempo, que examina os resultados obtidos pelo algoritmo de Newark utilizando os modelos matemáticos ETABS e MATLAB. O estudo do comportamento elástico dos edifícios permitiu simular o seu comportamento e vulnerabilidade a um evento sísmico de média intensidade e duração de 2 segundos. Os resultados mostram que aos 20,08 e 25,84 segundos ocorreu um deslocamento máximo de 3 e 5 centímetros nos pórticos 1 e 2 respectivamente, os deslocamentos observados não constituem um risco estrutural para a edificação, nem para os usuários, no caso de terremoto de média intensidade. .

Palavras-chave: desastre natural; prevenção; riscos sísmicos.

Introducción

Ecuador se encuentra dentro del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico, por lo que su actividad sísmica es alta, incluyendo eventos tales como el de 1906, que alcanzó una magnitud de 8.8, ubicándose dentro de los sismos mayor magnitud de la historia. Salvo el sismo de Bahía de Caráquez en agosto de 1997 con una magnitud de 7.1, y que dejó en evidencia ciertos problemas relacionados al diseño sismo resistente en el Ecuador. Si bien es cierto, existe una Norma Ecuatoriana de la Construcción, también lo es el hecho que los estudios acerca del tema en el país son escasos (Quinde et al., 2016).

En épocas recientes, se han registrado sismos de mediana intensidad en ciudades como Machala, costa pacífica del Ecuador, colocando la zona como de alta vulnerabilidad frente a un evento

sísmico, por lo que se deben generar protocolos que permitan mejorar las respuestas de las estructuras civiles, frente a un sismo como el ocurrido en Manabí en 2016.

Flores (2017), desarrolló la modelación de un edificio ubicado en la zona de Pedernales, considerada de alto peligro sísmico en el Ecuador, la cual fue gravemente afectada por el terremoto del 16 de abril de 2016. Para la modelación del edificio uso dos programas diferentes de modelación estructural, como son el OpenSees y el ETABS 2015, los cuales proporcionan un análisis y simulación completa del comportamiento del edificio. Además, se realiza una evaluación dinámica de la estructura utilizando para ello el análisis sismo equivalente y el análisis tiempo historia.

García (2015), evaluaron la vulnerabilidad sísmica del Palacio Municipal de la ciudad de Machala, mediante la aplicación de métodos analíticos basados en el análisis no lineal de estructuras, como es el caso del análisis Tiempo-Historia y el análisis estático no lineal (Push-over), usando para ello SAP2000. Estos métodos analíticos, permite el desarrollo de estudios de vulnerabilidad sísmica a nivel detallado, obteniéndose un diagnóstico confiable del desempeño sísmico de las edificaciones, pero requiere la aplicación de importante de recursos y tiempo.

La caracterización de las estructuras en el Ecuador, en función del peligro sísmico al que se encuentra expuesto, resulta de suma importancia para poder identificar los posibles daños en las edificaciones, en el supuesto caso de un sismo de características superiores al considerado al momento del diseño (Páez et al., 2017). Razón por la cual la Norma Ecuatoriana de Construcción establece diferentes niveles de seguridad, que indican cómo criterio de diseño el nivel de seguridad de vida, ante un terremoto de 475 años de período de retorno y de igual forma, impedir el colapso total ante un sismo 2500 años de periodo de retorno.

Para evaluar la vulnerabilidad de una estructura frente a un evento sísmico, se debe cuantificar el desplazamiento horizontal, obtenido mediante algoritmos matemáticos, modelados mediante los programas de Cálculo Estructural como ETABS y MATLAB con el propósito de validar los resultados.

En este estudio se tomó como referencia una estructura de la escuela ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Machala, se evaluó el efecto de un sismo de mediana magnitud sobre el desplazamiento horizontal y vertical de una estructura de varios niveles, usando modelos matemáticos dinámicos, aplicando los programas computarizados ETABS y MATLAB, esta modelización permitió establecer la vulnerabilidad de la estructura ante eventos sísmicos de mediana intensidad y duración

Marco Teórico

Los sismos desde el punto de vista de la ingeniería: su caracterización.

Los terremotos más importantes son los tectónicos, pues son los que conllevan consecuencias mayores y desastrosas en las estructuras que afectan. Por ello son los que son tomados en cuenta para el desarrollo de normas para la construcción de estructuras sismo-resistentes.

La intensidad sísmica es considerada una medida de los efectos de los terremotos en el entorno, y en forma particular sobre las estructuras. Existen diferentes escalas de intensidades que describen, para cada valor que esta tome, los efectos que produce el terremoto (Cassano, 2009).

Para categorizar un sismo se toma en cuenta su intensidad (parámetro subjetivo) y por su magnitud (parámetro objetivo). La escala objetiva más popular es la de Richter, en la que la magnitud M mide la energía del terremoto en el foco y es el logaritmo decimal de la amplitud del movimiento sísmico, medido en micrones a 100 km del epicentro (medida con un sismógrafo Wood-Anderson estándar, (Chunga y col 2019). La magnitud M está relacionada con la energía del terremoto, en ergios, por la expresión: $\text{Log } E = 11,8 + 1,5M$.

Registro de ondas sísmicas. Parámetros utilizados y mapas de riesgo sísmico

Los terremotos son fenómenos debidos a la brusca liberación de energía de deformación acumulada durante periodos largos de tiempo en la zona superficial de la tierra. Los sismos originan ondas de varios tipos, que se propagan desde su foco en todas las direcciones a través de la tierra. Estas ondas pueden ser registradas mediante sismógrafos, que son diseñados para medir la aceleración, velocidad o a su vez el desplazamiento del movimiento sísmico.

Estos parámetros en realidad son relativos ya que los valores obtenidos están siendo afectados por las características del instrumento registrador y también por las condiciones de ruido ambiental en el lugar de registro. Los mapas de riesgo sísmico representan en si una síntesis de todos los datos sismológicos y geológicos de un país. Estos mapas son usados para determinar el nivel de protección que se debe alcanzar en las estructuras en cada zona de riesgo (Martínez, 2018).

Estudios de Ingeniería y Sismología:

1. Análisis del efecto que han ocasionado, sobre las estructuras y las personas, los terremotos suscitados en el pasado.
2. “Predicción” estadística de las características más probables de la acción sísmica que se produciría en la zona.

Es de suma importancia destacar que la geología local de la zona puede ser un factor determinante que modifica la propagación de las ondas sísmicas. Las ondas se reflejan y se refractan cuando en su recorrido aparece una discontinuidad, por ejemplo, cuando existe la presencia de una variación de las características mecánicas del terreno; ello produce cambios en la velocidad. En general, el cálculo y la cuantificación de las acciones sísmicas en las estructuras se realiza en función de protocolos, secuencias y definiciones de acciones dadas por normas y reglamentos (Ferreira y col, 2019).

Método tiempo historia

El análisis tiempo historia es un análisis “paso a paso” de la respuesta dinámica de una edificación para una carga específica que es variable en el tiempo. Cuando el comportamiento sísmico de las estructuras lo amerita es necesario un estudio más refinado para representar con mayor aproximación el comportamiento lineal de las estructuras ante fuerzas sísmicas. El método “paso a paso” en el tiempo consiste en someter a la estructura a un sismo real o sintético pudiendo estar o no escalado (Moncayo et al., 2017).

El análisis tiempo historia se usa en la determinación de la respuesta dinámica de una estructura bajo una carga arbitraria. Para esto se utilizan las ecuaciones de equilibrio dinámico:

$$k\mathbf{u}(t) + C\mathbf{u}'(t) + M\mathbf{u}''(t) = \mathbf{p}(t) \quad (2.1)$$

Donde K es la matriz de rigidez, C es la matriz de amortiguamiento, M es la matriz de masa, \mathbf{u} , \mathbf{u}' , \mathbf{u}'' , vienen a ser los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de la estructura, y \mathbf{p} las cargas aplicadas. Si la carga incluye aceleración del suelo, como lo es en el presente proyecto los desplazamientos, velocidades y aceleraciones son relativo a este movimiento del suelo.

El método tiempo historia es un método de análisis de la respuesta de la estructura frente a excitaciones sísmicas, para la evaluación numérica de la respuesta dinámica se tratan de métodos aproximados con 3 requisitos sumamente importantes: Convergencia, Estabilidad y Precisión.

Los métodos que se desarrollan paso a paso en el tiempo son: métodos basados en la interpolación de la carga, métodos basados en expresiones de diferencias finitas de velocidad y aceleración, y métodos basados en la variación supuesta de la aceleración (método de Newmark) que son de gran utilidad en el análisis de la respuesta dinámica ya que la aceleración del suelo varía de forma arbitraria con el tiempo (Fernández et al., 2018).

En el presente proyecto se ha empleado el método de Newmarck ya que el tiempo de registro entre un valor y el siguiente de los datos tomados en el sismograma equivale a una centésima de segundo, permitiendo la eficacia del método y adicionalmente es uno de los métodos más utilizados dentro del campo de la ingeniería, debido a su simplicidad, precisión y estabilidad.

Método de Newmarck

En 1959 N. M. Newmark mostró una serie de métodos de integración de paso simple para la resolución de problemas de dinámica estructural para cargas sísmicas. Durante los siguientes 40 años los métodos de Newmark han sido usados para el análisis dinámico de varias estructuras en ingeniería (Chopra, 2014).

Las ecuaciones utilizan los parámetros β y γ , que sirven para formular la forma en que varía la aceleración a través del tiempo. Para el desarrollo de una familia de métodos paso a paso en el tiempo Newmarck se basó en las siguientes ecuaciones:

$$\dot{q}_{i+1} = \dot{q}_i + [(1-\gamma)\ddot{q}_i + \gamma\ddot{q}_{i+1}] \Delta t \quad (2.2)$$

$$q_{i+1} = q_i + (\dot{q}_i) \Delta t + [(1/2-\beta)\ddot{q}_i + \beta\ddot{q}_{i+1}] [\Delta t]^2 \quad (2.3)$$

Los parámetros β y γ son los que definen la variación de la aceleración durante un paso de tiempo y determinan además las características de estabilidad y precisión del método. La selección típica de γ es de $1/2$, y $1/6 \leq \beta \leq 1/4$ es satisfactoria desde todos los puntos de vista, incluido el de precisión. Estas dos ecuaciones, en combinación con la ecuación de equilibrio al final del paso de tiempo, proporcionan la base para calcular q_{i+1} , \dot{q}_{i+1} , \ddot{q}_{i+1} en el tiempo $i+1$ a partir de $q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i$ conocidas en el tiempo i .

Aplicación del Método de Newark

El sistema de ecuaciones diferenciales que gobierna los problemas dinámicos, está definido por la ecuación (2.4).

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = -MJ\ddot{a}(t) \quad (2.4)$$

Donde:

M, C, K son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema.

Se consideran constantes para análisis lineal, q, \dot{q}, \ddot{q} son los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración, respectivamente, J es un vector que contiene unos para el caso plano, depende del modelo numérico de análisis, $a(t)$ corresponde a la aceleración de movimiento del suelo. Normalmente se considera como la componente horizontal (Falconí y Contreras, 2011).

Para el tiempo discreto $t_{(i+1)}$, la ecuación (2.4), queda:

$$M\ddot{q}_{(i+1)} + C\dot{q}_{(i+1)} + Kq_{(i+1)} = -MJ \{a\}_{(i+1)} \quad (2.5)$$

Por otra parte, el vector de desplazamientos en forma incremental es

$$q_{(i+1)} = \Delta q_{(i+1)} \{+q\}_i \quad (2.6)$$

Procedimiento de cálculo

El procedimiento de cálculo, para el análisis lineal, utilizando el método β de Newmark, es el siguiente (Cano y Col, 2017):

Se determina la matriz de rigidez efectiva.

$$K^* = K + 1/(\beta \{\Delta t\}^2) M + \gamma/\beta \Delta t C \quad (2.7)$$

Para el instante de tiempo $i+1$ se determina el vector de cargas efectivo.

$$F_{(i+1)} = -MJ a_{(i+1)} + M[1/\beta \Delta t \dot{q}_i + (1/2\beta - 1) \ddot{q}_i] - C[(1-\gamma/\beta) \dot{q}_i + (1-\gamma/2\beta) \Delta t \ddot{q}_i] - Kq_i \quad (2.8)$$

Se obtiene el incremento de desplazamiento para el tiempo $i+1$, para ello se debe resolver el sistema de ecuaciones lineales:

$$K^* \Delta q_{(i+1)} = F_{(i+1)} \quad (2.9)$$

Se calculan la aceleración, velocidad y desplazamiento en el incremento de tiempo $i+1$.

$$q''_{i+1} = 1/(\beta \Delta t^2) \Delta q_{i+1} - 1/\beta \Delta t q'_{i+1} + (1/2\beta - 1) q''_i$$

$$q'_{i+1} = \gamma/\beta \Delta t \Delta q_{i+1} + (1 - \gamma/\beta) q'_i + (1 - \gamma/2\beta) \Delta t q''_i$$

$$q_{i+1} = \Delta q_{i+1} + q_i$$

Se actualizan desplazamientos, velocidades y aceleraciones y se pasa al próximo punto desde el paso i.

$$q_i = q_{i+1}$$

$$q'_i = q'_{i+1}$$

$$q''_i = q''_{i+1}$$

Procedimiento Experimental

Se evaluó la vulnerabilidad sísmica de los bloques de aula de la Universidad Técnica de Machala, Ecuador. Esta institución tiene una matrícula actual de aproximadamente 4000 estudiantes.

La mayor parte de sus instalaciones son bloques de aulas de tres niveles con distribución y dimensiones muy similares, construidos en la década del 70, con procedimientos y normas constructivas vigentes para la época, particularmente para sismo de mediana magnitud.

Elementos estructurales de la edificación

Pórtico longitudinal A

En la Figura 1 se puede apreciar el pórtico A, se observa que tiene 20 nodos, 27 elementos y cuenta con 45 grados de libertad, debido a que es un pórtico plano con 3 grados de libertad por nodo, además de sus respectivas dimensiones

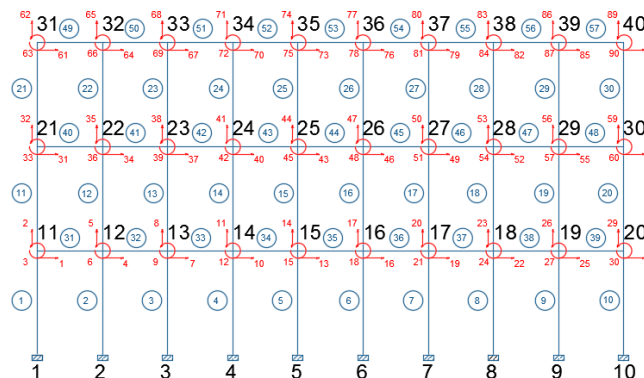


Figura 1. Pórtico longitudinal A de bloques de aulas, Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

La distribución de las cargas del pórtico A se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Distribución de las masas en pórtico longitudinal A de bloques de aula Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

NODOS 7,8,9,10,12,13,14,15		
Estructura	Carga (Ton)	
Losa	4,32	Carga muerta:10.16 Ton
Paredes	2,41	
Viga	2,49	
Columna	0,92	
		Carga viva:2.41 Ton
		Carga Total: 12.47 Ton
NODOS 6 y 11		
Estructura	Carga (Ton)	
Losa	2,16	Carga muerta:8,66 Ton
Paredes	3,58	
Viga	1,94	
Columna	0,92	
		Carga viva:1,21 Ton
		Carga Total: 9,77 Ton
NODOS 17,18,19.20		
Estructura	Carga (Ton)	
Losa	4,32	Carga muerta:6,82 Ton
Paredes	0,00	
Viga	2,49	
Columna	0,00	
		Carga viva:0,85 Ton
		Carga Total: 7,67 Ton
NODOS 16		
Estructura	Carga (Ton)	
Losa	2,16	Carga muerta:4,15 Ton
Paredes	0,00	
Viga	1,99	
Columna	0,00	
		Carga viva:0,42 Ton
		Carga Total: 4,57 Ton

Pórtico longitudinal B

En la Figura 3 se puede apreciar el pórtico B; se aprecia que tiene 20 nodos, 27 elementos y cuenta con 45 grados de libertad debido a que es un pórtico plano con 3 grados de libertad por nodo, además de sus respectivas dimensiones.

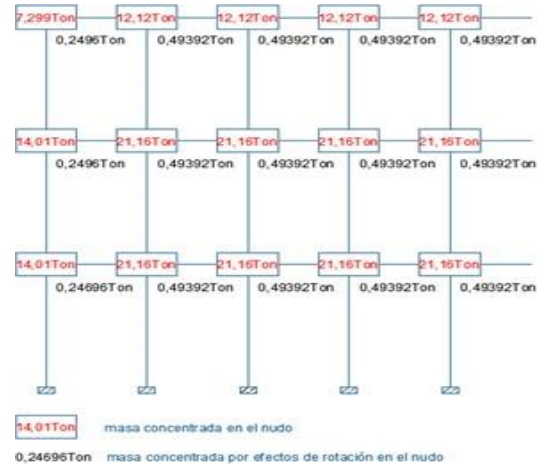


Figura 2. Distribución de masas en el Pórtico longitudinal B de bloques de aulas, Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

La distribución de las cargas del pórtico B se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Distribución de las masas en pórtico longitudinal B de bloques de aula Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

NODOS 7,8,9,10,12,13,14,15		
Estructura	Carga (Ton)	
Losa	7,21	Carga muerta: 14,88 Ton
Paredes	3,26	
Viga	3,49	
Columna	0,92	
		Carga viva: 6,27 Ton
		Carga Total: 21,87 Ton
NODOS 6 y 11		
Estructura	Carga (Ton)	
Losa	7,12	Carga muerta: 10,87 Ton
Paredes	0,00	
Viga	3,49	
Columna	0,00	
		Carga viva: 3,14 Ton
		Carga Total: 14,01 Ton
NODOS 17,18,19,20		
Estructura	Carga (Ton)	
Losa	3,61	Carga muerta: 10,69 Ton
Paredes	0,00	
Viga	2,99	
Columna	0,00	

		Carga viva:1,40 Ton
		Carga Total: 12,09 Ton
NODOS 16		
Estructura	Carga (Ton)	
Losa	2,16	Carga muerta:6,60 Ton
Paredes	0,00	
Viga	1,99	
Columna	0,00	
		Carga viva:0,70 Ton
		Carga Total: 7,30 Ton

Pórtico transversal 1 y 2

El análisis del comportamiento de la estructura en el tiempo se va a desarrollar también para los pórticos transversales denominados 1 y 2, aplicando el mismo método de Newmark y sometiendo a los pórticos al “componente Norte” del acelerograma del sismo ocurrido en Pedernales el 16 de abril de 2016. El pórtico 1 presenta igual dimensión que el pórtico 2, pero diferentes cargas debido a que el pórtico 1 se encuentra ubicado al extremo del edificio y el pórtico 2, al igual que los pórticos 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9, son centrales.

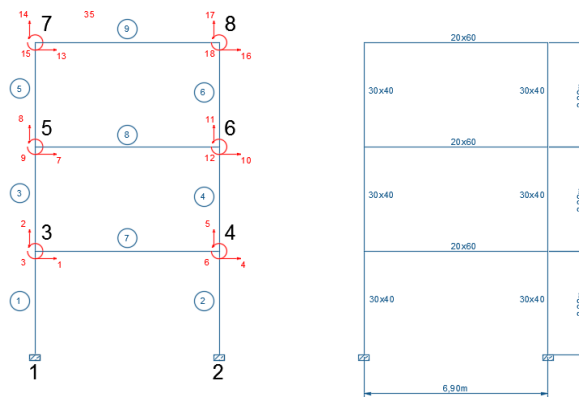


Figura 3. Descripción de pórticos transversales 1 y 2 de bloques de aulas, Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

La distribución de la masa del pórtico 1 y 2, se observa en las figuras 4 y 5, respectivamente.

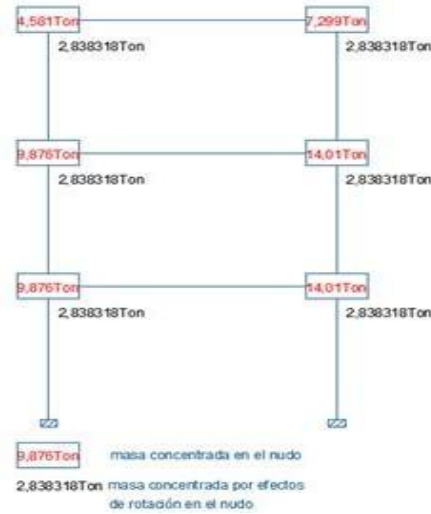


Figura 4. Distribución de las masas del pórtico transversales 1 de bloques de aulas, Universidad Técnica de Machala, Ecuador

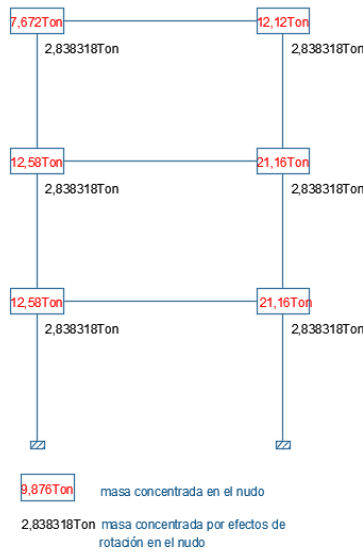


Figura 5. Distribución de las masas del pórtico transversales 2 de bloques de aulas, Universidad Técnica de Machala, Ecuador

Simulación del sismo

Para simular el sismo sobre la estructura educativa, se hizo un acelerograma, usando como datos la magnitud y duración de un sismo de magnitud y duración, el cual ocurrió en el año 2016 en la localidad de Pedernales, Ecuador.

Modelo matemático usado

Para estudiar la vulnerabilidad de la estructura a la excitación producto de las vibraciones sísmicas se usó un modelo matemático de análisis dinámico, el cual se basa en métodos de integración paso a paso permiten calcular la historia en el tiempo de una estructura. El método empleado en este estudio fue el método de Newmark para el cual se necesitan conocer las matrices de rigidez, masa, amortiguamiento; por lo antes de realizar este tipo de análisis se calcularon los parámetros: Número de nodos que posee el pórtico; número de nodos destacando si los mismos tienen restricciones de desplazamiento o rotación; número de elementos que componen el pórtico;

Paso para la aplicación del modelo

Para la aplicación del método de Newmark, se aplicaron los siguientes pasos: Se ingresó el nodo inicial y final de cada elemento, con lo cual se obtuvo el arreglo de los vectores de colocación, luego se ingresó el módulo de elasticidad ($E = 2188197,9 \text{ Ton m}^{-2}$); posteriormente se introduce la medida de la base de la sección transversal (m), altura de la sección transversal (m), longitud del elemento de nodo a nodo (m) y el ángulo de inclinación del elemento con respecto a la horizontal para la matriz de rigidez. Para la determinación de la matriz de masas se ingresó la masa concentrada en el nodo inicial, después la masa concentrada por efectos de rotación en el mismo nodo; este procedimiento se repite con todos los nodos haciendo uso del diagrama de distribución de masas en los nodos de los pórticos, finalmente para la determinación de la matriz de amortiguamiento se hizo uso del algoritmo de Wilson y Penzien, utilizando un factor de 0,05 para las frecuencias de amortiguamiento.

Una vez obtenidas las matrices de rigidez, masas y amortiguamiento se procede a la aplicación del método de Newmark, para obtener desplazamientos, velocidades y aceleraciones máximas en cada pórtico, el método fue evaluado apoyado en dos programas computarizados para facilitar los cálculos el ETABS (Habibullah, 1995) y Matlab (Mousa y Al-Shuhail 2011).

Discusión y Resultados

Una vez obtenidas las matrices de rigidez, masas y amortiguamiento se procedió a la aplicación del método de Newmark para calcular el desplazamiento, horizontal y vertical de los componentes de las estructuras pórticos (longitudinales y transversales); desplazamiento en función del nivel evaluado (planta, pisos y cubiertas) y comparar los resultados obtenidos con el modelo ETABS y el modelo Matlab. A continuación, se presenta los datos del desplazamiento vertical y horizontal

para los pórticos longitudinales A y B, resaltando los valores máximos de cada magnitud en la dirección correspondientes a cada grado de libertad y los instantes en que se desarrollan.

En la tabla 3, se presentan los resultados correspondientes al desplazamiento horizontal de los pórticos longitudinales A y B.

Tabla 3. Desplazamiento estructural observados en pórtico y 2 a diferentes intervalos de tiempo aplicando el modelo Newark.

Tiempo	Pórtico A	Tiempo	Pórtico B
7,91	0,00	9,53	0,00
8,46	0,00	9,54	0,00
8,73	0,00	9,56	0,00
14,93	0,00	13,72	0,00
23,62	0,00	20,03	0,02
24,31	0,01	20,07	0,04
25,84	0,02	20,08	0,04
25,84 ^{31*}	0,03	20,08 ^{31*}	0,05
25,84 ^{34*}	0,03	20,08 ^{34*}	0,05

*Los subíndices reflejan los grados de libertad.

La estructura presentó un desplazamiento máximo de 3 centímetros en el pórtico A lo cual ocurrió a los 25,84 segundos; mientras que para el caso del pórtico el desplazamiento máximo de 5 centímetros a los 20,08 segundos de la simulación.

En la tabla 4, se presentan los resultados correspondientes al desplazamiento horizontal de los pórticos transversales 1 y 2.

Tabla 4. Desplazamiento estructural observados en pórtico 1 y 2 a diferentes intervalos de tiempo aplicando el modelo Newark.

Tiempo	Pórtico 1	Tiempo	Pórtico 2
8,58	0,00	20,06	0,01
12,29	0,01	20,80	0,01
12,39 ^{16*}	0,02	20,99	0,00
22,09	0,00	21,69	0,01
29,84	0,00	32,28 ^{10*}	0,02
34,30	0,00	32,31 ^{16*}	0,02

*Los subíndices reflejan los grados de libertad.

Para el caso de los pórticos transversales el desplazamiento máximo fue de 2 centímetros y ocurrió a los 12,39 segundos, mientras que para el caso del pórtico transversal el desplazamiento máximo fue también de 2 centímetros y ocurrió a los 32,28 segundos. Los desplazamientos laterales que experimenta la estructura son valores que no se ven afectados de forma significativa por la componente vertical del sismo, ya que la estructura posee una geometría regular con un volado que no supera los 2,5 metros.

Los desplazamientos de las estructuras dependerán tanto de la magnitud del sismo como de las condiciones del suelo, como las tendencias de fabricación empleados en Chile una región altamente sísmica, Marcus y Thiers (2015) encontraron desplazamiento de 40 cm y 37 cm con estructuras tradicional y uniones híbridas, estos autores afirman los desplazamientos en el techo del pórtico sin uniones híbridas alcanzan los 37 cm. Este nivel de desplazamientos es importante, ya que está asociado a la presencia de daños en las uniones y posibles fallas frágiles no localizadas por el método de diseño en base a fuerzas, aunque en estructuras híbridas el desplazamiento pudiese alcanzar hasta 40 cm según no habría daño estructural asociado y la estructura recuperaría su posición original sin deformaciones remanentes, manifestando las ventajas del sistema propuesto.

Pinto y Torres (2016) al evaluar la vulnerabilidad sísmica en escuelas venezolanas compararon las curvas de capacidad tanto de un pórtico longitudinal como las un pórtico transversal de la estructura, considerando su condición original y su condición reforzada., observando claramente que las escuelas estudiada presentan una alta vulnerabilidad sísmica y pudiesen ser severamente afectadas ante la ocurrencia de un evento sísmico similar al propuesto por la norma COVENIN 1756 que rige la estructuras de construcción en Venezuela, en el caso del bloque de Aula de la >Universidad de Machala la vulnerabilidad sísmica es baja debido a que luego de la aplicación del acelerograma los desplazamientos se encuentran en el rango establecidos por la norma sísmica ecuatoriana.

Una edificación es vulnerable cuando el desplazamiento lateral máximo estimado en los pórticos, impuesto por la acción sísmica definida por el espectro normativo, supera la capacidad de los mismos en su condición original, es decir, el punto de desempeño queda afuera de la curva de capacidad en los pórticos analizados. Por el contrario, los pórticos en condición reforzada son capaces de soportar sismos similares al normativo tal como se evidencia en sus curvas de capacidad, ya que el punto de desempeño queda dentro de las mismas.

Los máximos desplazamiento en los pórticos longitudinales A y B ocurrieron con 31 y 34 grados de libertad, mientras que el pórtico longitudinal 1 y 2, el máximo desplazamiento ocurrió con 10 y 16 grados de libertad respectivamente (Figura 6).

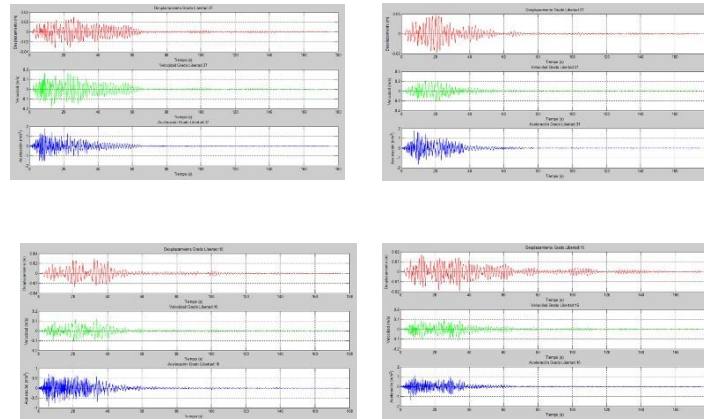


Figura 6. Desplazamiento, velocidad, aceleración versus tiempo en la dirección del grado de libertad (31, 34,10 y 16)

Para evaluar el efecto del sismo sobre los diferentes niveles de la estructura, se emplearon los modelos ETABS y MATLAB, esos modelos permitieron cuantificar los desplazamientos verticales y horizontales de la estructura a nivel de planta baja, pisos 1 y 2 y cubierta. En la tabla 5 se presentan los resultados para los pórticos longitudinales A y B.

Los resultados muestran que los desplazamientos de mayor magnitud ocurrieron en el nivel 2 y la cubierta con valores de 0,03 cm y 0,05 cm para el pórtico B, cuando se usó el modelo ETABS y de 0,04 cm y 0,05 m cuando se usó el modelo MATLAB, se observó que entre un modelo y otro no hubo una variación mayor al 10 %.

Tabla 5. Desplazamiento estructural observado en pórticos longitudinales A y B en diferentes niveles de la edificación usando los programas ETABS y MATLAB

Estructura	ETABS		MATLAB	
	A	B	A	B
PB	0	0	0	0
Nivel 1	0,014	0,02	0,01	0,02
Nivel 2	0,03	0,04	0,02	0,04
Cubierta	0,03	0,05	0,03	0,05

En la Tabla 6 se presentan los resultados para los pórticos transversales A y B, observando al igual que en caso de los pórticos longitudinales que el mayor desplazamiento corresponde a los niveles 2 y cubierta con valores de 0,01 y 0,02 cuando se usó del modelo ETABS y de 0,02 y 0,03 cuando se usó el modelo MATLAB.

Tabla 6. Desplazamiento estructural observados en pórticos trasversales 1 y 2 en diferentes niveles de la edificación usando los programas ETABS y MATLAB

Estructura	ETABS		MATLAB	
	1	2	1	2
PB	0	0	0	0
Nivel 1	0,009	0,01	0,013	0,01
Nivel 2	0,010	0,01	0,027	0,02
Cubierta	0,02	0,02	0,039	0,03

Ugel y Herrera (2016) afirman que las mayores variaciones se presentan en los últimos niveles mientras que para los no arriostrados, fueron mayores en los niveles inferiores. Entre los niveles 1, 2 y 3 o entre los niveles 17, 18 y 19 se presentaron los mayores desplazamientos, resultados acordes a los reportados por Bermúdez (2010); Günay y Sucuoğlu (2010) quienes afirman que los niveles superiores generalmente experimentan su máximo desplazamiento en el rango elástico de respuesta, mientras que existe una alta concentración de inelasticidad en los niveles bajos. En la investigación no se presentan resultados de los desplazamientos verticales, dado que los mismos fueron poco significativos y no presentaron riesgo sobre la estructura.

Conclusiones

Las respuestas cinemáticas de la estructura permiten tener una idea del comportamiento que experimenta durante el desarrollo del sismo, lo que posibilita obtener el momento para el cual el evento genera los estragos más significativos. En este caso para el pórtico longitudinal A en el instante de tiempo de 25.84 segundos ocurre el desplazamiento máximo de 3 centímetros; mientras que para el caso del pórtico longitudinal B en el instante de tiempo de 20.08 segundos ocurre el desplazamiento máximo de 5 centímetros. Para el caso del pórtico transversal 1 en el instante de tiempo de 12.29 segundos ocurre el desplazamiento máximo de 2 centímetros y para el caso del pórtico 2 en el instante de tiempo de 32.31 segundos ocurre el desplazamiento máximo de 3 centímetros.

De acuerdo a los resultados, el desplazamiento máximo horizontal que experimenta la estructura es de 5 centímetros, esto se presenta en los grados de libertad que se encuentran en la cubierta. Los desplazamientos laterales que experimenta la estructura son valores que no se ven afectados de forma significativa por la componente vertical del sismo, ya que la estructura posee una geometría regular con un volado que no supera los 2.5 metros.

Los desplazamientos verticales que sufrió la estructura, por efectos de la componente horizontal del sismo, no fueron de mayor significancia.

Referencias

1. Bermúdez, C. (2010). Vulnerabilidad sísmica de edificios de acero [tesis doctoral]. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93584/TCBM1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
2. Cano, G., Chargoy, C. E. D., León, A. L. L., López, V., Soto, M., Venegas, I. R. A., & Gama, J. I. C. (2016). Modelación analítica de la respuesta de estructuras con disipadores de energía pasivos del tipo histeréticos ante cargas dinámicas. *CULCyT: Cultura Científica y Tecnológica*, 13(59), 54-68. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7205645.pdf>
3. Cassano, A. M. (2009). Análisis de estructuras bajo acciones dinámicas. Editorial Universitaria de la Universidad Tecnológica Nacional.
4. Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras*. Pearson educación.
5. Chunga, K., Ochoa-Cornejo, F., Mulas, M., Toulkeridis, T., & Menéndez, E. (2019). Characterization of seismogenic crustal faults in the Gulf of Guayaquil, Ecuador. *Andean Geology*, 46(1), 66-81. <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV46n1-2991>
6. Falconí, R. A., & Contreras, J. S. (2011). Análisis Modal Espectral En Estructuras Con Aisladores Elastoméricos. In VI Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE 2011 (Vol. 1). <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/2910/1/A-CEINCI-ESPE-000004.pdf>
7. Fernández, I., Elena, V. B., Martín, P., Corona, Y., & Hernández, I. A. (2018). Análisis dinámico de una torre autosoportada sujeta a cargas de viento y sismo. *Obras y proyectos*, (23), 78-86. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-28132018000100078>

8. Ferreira, T. M., Mendes, N., & Silva, R. (2019). Multiscale seismic vulnerability assessment and retrofit of existing masonry buildings. *Buildings*, 9(4), 91. <https://doi.org/10.3390/buildings9040091>
9. Flores Flores, M. M. (2017). Evaluación dinámica de una estructura ubicada en Pedernales mediante un análisis de sismo equivalente y un análisis tiempo historia. Trabajo de grado. Pontificia Universidad Católica de Ecuador. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/13771>
10. Lao García, J. L. K. (2015) Evaluación de la vulnerabilidad sísmica del edificio municipal de la ciudad de Machala. En Memoria de artículos del I Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología UTMACH 2015 (pp. 22-29). Machala: Universidad Técnica de Machala. <http://186.3.32.121/handle/48000/4934>
11. Günay, M. S., & Sucuoğlu, H. (2010). An improvement to linear-elastic procedures for seismic performance assessment. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 39(8), 907-931. <https://doi.org/10.1002/eqe.980>
12. Habibullah, A. (1995). *Three-Dimensional Analysis of Building Systems: User's Manual*. Computers and Structures.
13. Marcus, J., & Thiers, R. (2015). Control del daño sísmico estructural en pórticos prefabricados de hormigón armado a través de uniones híbridas autocentrantes. *Obras y proyectos*, (18), 46-55. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132015000200004>
14. Martínez Viveros, E. (2018). Inteligencia geoespacial para desastres sísmicos: investigaciones en CentroGeo. *Revista mexicana de sociología*, 80(SPE), 71-94. <http://dx.doi.org/10.22201/iis.01882503p.2018.0.57774>
15. Moncayo, M., Jiménez, J. V., Velasco, G. M., & Zambrano, I. B. (2017). Análisis sobre la recurrencia de terremotos severos en Ecuador. *Prisma Tecnológico*, 8(1), 12-17. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/prisma/article/view/1526>
16. Mousa, W. A., & Al-Shuhail, A. A. (2011). Processing of seismic reflection data using MATLAB™. *Synthesis lectures on signal processing*, 5(1), 1-97. <https://doi.org/10.2200/S00384ED1V01Y201109SPR010>
17. Páez, D., Zabala, J., & Rodríguez, Y. (2017). Piso blando, una falla común en el terremoto de Pedernales. *Ciencia*, 19(1), 58-75. <https://doi.org/10.24133/ciencia.v19i1.327>

18. Pinto, A., & Torres, R. (2016). Evaluación postsísmica de edificaciones afectadas por terremotos. *Ciencia e Ingeniería*, 37(3), 167-176. <https://www.redalyc.org/journal/5075/507551271007/507551271007.pdf>
19. Quinde Martínez, P., & Reinoso Angulo, E. (2016). Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la Ciudad de Cuenca. *Ingeniería sísmica*, (94), 1-26. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0185-092X2016000100001&script=sci_arttext
20. Ugel, R. D., & González, R. I. H. (2015). Comportamiento sismo-resistente de tres edificios de mediana altura proyectados según las normas venezolanas. *Gaceta Técnica*, 14(1), 33-55. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6521684>