

Regulatory foundation for the seismic evaluation of buildings based on resilience. Case study: reinforced concrete mid-rise building, reinforced after the Ecuador earthquake of April 16, 2016

José Paúl Olmedo-Cueva^a & Ana Gabriela Haro^b

^aMaestría de Investigación en Ingeniería Civil, Mención Estructuras, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Quito, Ecuador. jpaul.olmedo@gmail.com

^bUniversidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Quito, Ecuador. agharo@espe.edu.ec

Received: June 21st, 2023. Received in revised form: October 10th, 2023. Accepted: October 31st, 2023.

Abstract

This investigation presents a seismic evaluation methodology based on resilience, with a focus on the functional recovery times of structures for public use or requiring immediate operation following a seismic event. The case study involves a seven-story reinforced concrete building that was affected by the earthquake on April 16, 2016, in Ecuador. The building underwent seismic reconditioning. The methodology includes a comprehensive assessment of potential damage to both structural and non-structural elements that may be impacted by a seismic event. Additionally, a Resilience Index was developed using a tabulated evaluation with assigned weights for different criteria. The resulting index provides a star rating reflecting the building's level of resilience. The proposed methodology aims to serve as a regional regulatory foundation, promoting resilient communities to earthquakes.

Keywords: seismic resilience; seismic evaluation; functional recovery time; resilience index.

Fundamento normativo para la evaluación sísmica de edificaciones basada en resiliencia. Caso de estudio: edificio de mediana altura de concreto armado, reforzado después del sismo de Ecuador del 16 de abril de 2016

Resumen

La presente investigación se enfoca en proponer una metodología de evaluación sísmica basada en resiliencia, considerando los tiempos de recuperación funcional, de una estructura de uso público que puede necesitar una operación inmediata posterior a un evento sísmico. El caso de estudio es un edificio de hormigón armado de siete pisos afectado por el sismo del pasado 16 de abril del 2016 en Ecuador, y que posteriormente tuvo un reacondicionamiento sísmico. Como parte de la metodología propuesta, se realizó un control de daños de los elementos estructurales y no estructurales. Adicionalmente, se definió un Índice de Resiliencia mediante una evaluación tabulada didáctica e interactiva, con sus respectivos pesos para una posterior calificación por estrellas asociado al nivel de resiliencia de la edificación. Como resultado, se estima que esta metodología sirva como fundamento normativo regional y fomentar comunidades resilientes ante terremotos.

Palabras clave: resiliencia sísmica; evaluación sísmica; tiempo de recuperación funcional; índice de resiliencia.

1. Introducción

1.1 Antecedentes

El Ecuador al encontrarse en el Cinturón de fuego del Pacífico es muy sensible a los constantes eventos sísmicos de

variadas magnitudes debido a la convergencia de placas tectónicas y también está atravesado por la mega falla geológica denominada Guayaquil-Caracas [1]. Los movimientos sísmicos son eventos recurrentes y las probabilidades de que se presente nuevamente en estos sitios son relativamente altas.

How to cite: Olmedo-Cueva, J.P. y Haro-Báez, A.G., Fundamento normativo para la evaluación sísmica de edificaciones basada en resiliencia. Caso de estudio: Edificio de mediana altura de concreto armado, reforzado después del sismo de Ecuador del 16 de abril de 2016. DYNA, 90(229), pp. 159-169, October - December, 2023.

El pasado 16 de abril de 2016, a las 18:58 horas aproximadamente, se produjo un movimiento sísmico con una magnitud de 7.8 grados en la escala de Richter cuyo hipocentro estuvo localizado frente a las costas ecuatorianas, a 29 Km de la ciudad de Muisne, provincia de Esmeraldas, a una profundidad de 19 Km, y sus efectos fueron sentidos en todo el país. Según los registros del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional en la estación de Pedernales (APED) se registró un valor pico de aceleración (PGA) de 13.803 m/s² (1.407 g) [2]. Este valor casi triplicó el límite inferior de la zona VI del mapa de peligro sísmico de [3], por esta razón, motivaron a una revisión de la amenaza sísmica y la definición de un nuevo mapa de peligro sísmico, para la mejora del diseño sismo resistente, como también la implementación de nuevas metodologías de diseño y evaluación estructural.

El Ecuador actualmente se encuentra en proceso de actualización para los nueve capítulos del eje de Seguridad Estructural de la Norma Ecuatoriana de la Construcción. Parte de los trabajos, se han enfocado en mejorar el diseño sismo resistente de edificaciones con el aumento de la rigurosidad de los parámetros y requisitos mínimos de seguridad estructural, sobre todo en el diseño basado en desplazamiento y desempeño sísmico.

En el mencionado proceso de actualización no se ha considerado el diseño y evaluación basada en resiliencia, por tal motivo existe la necesidad de la implementación de esta metodología, considerando que Ecuador es un país con una alta vulnerabilidad sísmica, y de esta manera se podrá dar un paso más para estar a la vanguardia de la Ingeniería Estructural.

Ecuador no es un caso aislado, dado que se evidencia que países desarrollados como Japón y Estados Unidos, todavía no pueden implementar el concepto de resiliencia sísmica en un 100%, y así poder catalogar sus ciudades como resilientes. Sin embargo, es necesario reconocer su avance, que se convierte en un referente para lograr el objetivo de reducir tiempos de recuperación ante eventos sísmicos.

Para el efecto, el caso de estudio es un edificio de mediana altura de concreto armado, reforzado después del sismo de Ecuador del 16 de abril de 2016, se recopiló los datos utilizados para la evaluación estructural como; estudios geotécnicos, vibración ambiental, ensayos no destructivos, destructivos y resultados de análisis estructurales como parámetros de comparación y análisis de la propuesta planteada de reforzamiento.

Posteriormente se realizó un Análisis No lineal Estático (Push Over), junto con un Análisis No lineal Dinámico (Time History Analysis). Como resultado de los análisis se obtuvieron los desplazamientos máximos en el último piso, para el cálculo de derivas globales y derivas residuales, parámetro necesario para estimar el daño en elementos estructurales y no estructurales, como su desempeño sísmico.

Finalmente, se determinó el tiempo de recuperación funcional a través de un tiempo objetivo y un control de daño. Planteando una tabla con pesos de evaluación de valores ponderados correspondientes al proceso antes descrito se determina un índice de resiliencia.

A través del índice calculado, se realiza una calificación de la estructura para determinar qué tan resiliente es la

edificación a un evento sísmico, de esta manera se categoriza entre 0 a 5 estrellas, como se detalla más adelante.

1.2 Estudios de evaluación Estructural realizados en 2016

Posterior al sismo del 16 de abril el gobierno de la República del Ecuador a través del Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda MIDUVI, contrató estudios para la evaluación estructural de edificaciones públicas y de alta concurrencia [4], de esta muestra de edificaciones se seleccionó un edificio de hormigón armado de 7 pisos de uso especial, con un reforzamiento estructural como caso de estudio de esta investigación.

La información de esta edificación se procederá a analizar y servirá de manera didáctica para determinar su correspondiente Índice de Resiliencia y posteriormente calificar qué tan resiliente es ante un evento sísmico.

1.3 Resiliencia Sísmica en el mundo

El concepto de Resiliencia sísmica nace a nivel mundial con la necesidad de tener la capacidad de recuperación ante los eventos catastróficos, que afecten la operatividad de las comunidades, tomando en cuenta las lecciones aprendidas post evento, se describe las acciones más destacadas para implementar la resiliencia sísmica como una metodología y optimizar el desempeño estructural.

1.3.1 Estados Unidos de Norte América

En 2015 en Oregón se realizó un Plan de resiliencia sísmica en el que revela brechas significativas entre el desempeño esperado de los sectores de infraestructura, basado en sus condiciones actuales y los niveles de desempeño deseables tomando en cuenta las necesidades de la comunidad y la recuperación económica.

Además, se plantea el triángulo de resiliencia de Oregón en comparación con otras ciudades con alto peligro sísmico, como Chile y Japón, y muestra que Oregón tiene una baja resiliencia a los terremotos [5].

Posteriormente en Estados Unidos existieron varias réplicas para hacer una política pública, la ocupación inmediata de las edificaciones posterior a un evento sísmico en la que el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología NIST tuvo varias contribuciones:

En el 2016 publicó una Guía de Planificación de Resiliencia Comunitaria para Edificios y Sistemas de Infraestructura, en la misma, indica el Objetivo Nacional de los Estados Unidos, de preparación para los desastres indicado por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA). Esta guía respalda ese objetivo al abordar el desempeño de los edificios y los sistemas de infraestructura para garantizar la salud y la vitalidad del tejido social y económico de la comunidad [6].

En el 2018 publicó una investigación que indica la importancia del desempeño de un edificio y su funcionalidad después de un evento natural y su amenaza, la cual dependen de múltiples factores, incluido el diseño original, la condición actual y la capacidad del edificio para resistir los riesgos que

plantean los peligros. Para abordar esta brecha entre el rendimiento actual y el deseado de los edificios [7].

En 2020 el Consejo de Seguridad Sísmica de Edificios del Instituto Nacional de Ciencias de la Construcción publicó un artículo científico en el que realiza una recopilación de disposiciones e indica que la política federal ahora exige aumentar la resiliencia ante terremotos a escala comunitaria e identifica los códigos y normas de construcción como herramienta principal. Para las condiciones actuales basadas en seguridad, los criterios para un nuevo edificio asignado a la Categoría de riesgo II deben garantizar que la probabilidad de colapso sea inferior al 10 por ciento, dado el MCE_R (Sismo Máximo Considerado para Riesgo Objetivo) específico del sitio: $P(\text{Colapso}) < 10\%$, dado MCE_R .

También indica dentro de la capacidad y la demanda de una edificación, se debe plantear los tiempos de recuperación, a través de un tiempo objetivo de recuperación funcional [8].

1.3.2 México

En México se ha introducido ya el concepto de Resiliencia sísmica en la que existe un proyecto impulsando políticas públicas para obtener comunidades resilientes a eventos sísmicos, en la que la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM es líder, llevando varios proyectos para desarrollar planes y programas para mejorar el desempeño sísmicos de los edificios y la rehabilitación estructural, y tener edificaciones seguras reduciendo afectaciones socioeconómicas [9].

En otro trabajo realizado en la UNAM resalta un concepto completo de resiliencia sísmica. El autor planteó examinar la capacidad de resiliencia de la infraestructura estratégica en ciudades densamente pobladas y ubicadas en regiones propensas a sufrir terremotos. Identificó la infraestructura importante vulnerable ante eventos sísmicos, se obtuvieron perfiles estratigráficos de las diferentes zonas sismogénicas existentes en el área de estudio y posteriormente se definieron curvas de fragilidad y funciones de recuperación apropiadas para cada tipo de infraestructura existente en el área de estudio. Con los espectros de respuesta obtenidos mediante el análisis probabilístico de respuesta de sitio, las curvas de fragilidad y funciones de recuperación anteriormente seleccionadas, se llevó a cabo la metodología propuesta evaluando distintos aspectos: pérdida de conectividad en la red de transporte, daños estructurales en hospitales y en inmuebles importantes, afectaciones en túneles, puentes, pasos a desnivel, puntos de alta demanda y en sistemas de transporte (metro, tren ligero y Metrobús) [10].

1.3.3 Chile

De la experiencia del caso chileno se destacan dos trabajos. Por un lado, en [11] toma en particular la experiencia que dejó el terremoto de Maule de 2010, que afectó a la zona centro y sur del país, para realizar recomendaciones más generales para la región.

Principalmente plantea 3 puntos importantes que se debe considerar para obtener estructuras resilientes:

1. Obtener datos fidedignos y de acceso público.

2. Aprender del daño y de lo que falla, como lo es también aprender de lo que sí funciona correctamente.
3. La implementación del concepto de resiliencia no solo a nivel de edificaciones si no a nivel Político-Institucional para obtener infraestructuras Resilientes.

Por otro lado, en [12] utilizan la relación H_0/T_{cr} donde, H_0 es la altura de la edificación y T_{cr} es el primer periodo natural traslacional de la edificación en la dirección de análisis que se lo puede interpretar como el índice la rigidez y desempeño de los edificios a carga horizontal, según la Tabla 1.

En este artículo señalan que el desafío de los ingenieros estructurales en Chile es que las estructuras al menos una vez debe resistir el sismo de diseño en su vida útil y su desempeño debe ser de ocupación inmediata.

1.3.4 Ecuador

En Ecuador posterior al sismo del 16 de abril del 2016, el Gobierno de la república del Ecuador con el apoyo de la Agencia de cooperación Internacional del Japón JICA, trabajaron en el proyecto “Construcción de Ciudades Seguras y Resilientes contra Desastres Naturales por Terremotos y Tsunami” como uno los productos del componente 2, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda MIDUVI en conjunto de la Academia, Gremios Profesionales y otros sectores, se publicó un manual para la regulación de procesos constructivos el contenido del mismo es una herramienta y un apoyo práctico para la construcción sismo resistente, con ejemplos de ordenanza, formularios de revisión, contenidos de planos y memorias estructurales y otros materiales didácticos, para que los Gobiernos Autónomos y Descentralizados puedan controlar el cumplimiento de los capítulos del eje de Seguridad Estructural la Norma Ecuatoriana de la Construcción, aportando a comunidades Resilientes. Dentro del proyecto antes mencionados se trabajó también con socialización del manual a la comunidad y se elaboró también un plan de implementación para la regulación de los procesos constructivos [13] y [14].

En [15] se evidenció que los autores, realizaron un diseño por desempeño y se calificó su resiliencia sísmica de una edificación de hormigón armado de 6 pisos, en el mismo se determinaron variables de decisión como: costos de reparación, tiempo de rehabilitación, fatalidades – heridos y carteles de seguridad; mediante un análisis dinámico lineal modal espectral se calcularán las demandas sísmicas, además de un análisis PUSHOVER, para obtener la curva de capacidad de la estructura, valores que servirán para el ingreso de datos en el software PACT del FEMA P-58. Finalmente lograr una certificación según el Consejo de Resiliencia de los Estados Unidos (USRC) en función de los resultados obtenidos.

Tabla 1.
Rigidez de edificios representativos de la practica chilena

Fuera de Rango	Flexible	Normal	Rígido	Fuera de Rango
$H_0=T_{cr}/11$	$H_0/T_{cr}:$ 11-21	$H_0/T_{cr}:$ 21-43	$H_0/T_{cr}:$ 43-80	$H_0=T_{cr}.80$

Fuente: Adaptado de [12].

2. Evaluación sísmica basada en resiliencia

Para realizar una propuesta de evaluación sísmica basada en resiliencia, este estudio consideró principalmente los tiempos de recuperación que debe tener una estructura de uso público o que necesite una operación inmediata posterior a un evento sísmico.

Para lo que, adicionalmente, se incluyó el control de los daños en elementos estructurales como no estructurales que pueden presentarse posterior a un evento sísmico.

2.1 Información de la Edificación, Evaluación y propuesta de Reforzamiento Estructural

El edificio para el caso de estudio está ubicado en la ciudad de Bahía de Caráquez, provincia de Manabí de la República del Ecuador. La edificación está compuesta de pórticos de hormigón armado con vigas banda, repartidos en una planta baja y 7 plantas altas, en su segunda planta alta tiene una piscina que afecta la estabilidad estructural. Como se indica en las Figs. 1a. y 1b. y 2.

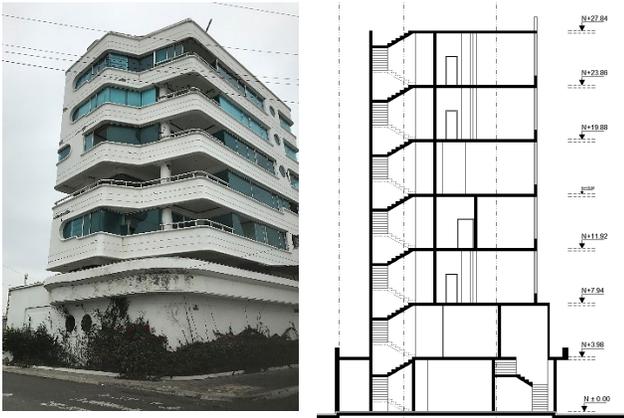


Figura 1a. Vista estado Actual Edificio, 1b. Vista en elevación del edificio
Fuente: MIDUVI, 2016

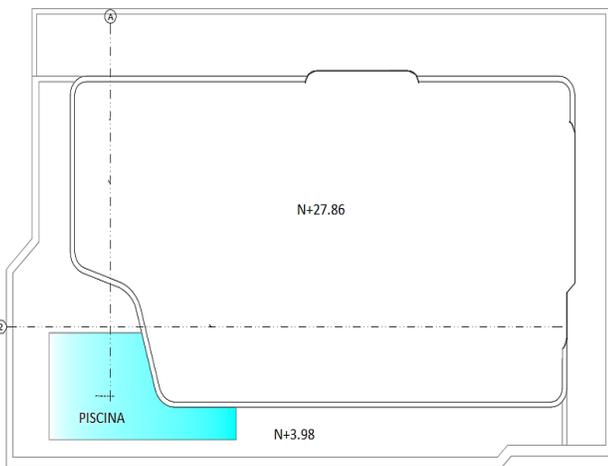


Figura 2. Vista en Planta Edificio caso de Estudio
Fuente: MIDUVI, 2016

Tabla 2.

Resumen de prospección: Estado Actual, Ensayos No destructivos y destructivos

Acción	Resultado	Observaciones
Inspección Visual	Daño severo aparente solo en elementos no-estructurales	Nivel de daño importante en mampostería
Suelo	Tipo D, $T \sim 0.523s$, $q_a \sim 44 t/m^2$	Arenas limosas
Período estructura	$T_{trans} = 0.95 [s]$, $T_{long} = 0.89 [s]$, $T_{tor} = 0.73 [s]$	Segundo modo torsional

Fuente: MIDUVI, 2016.

A continuación, se muestra el resumen de los datos recopilados de [4] referente a los ensayos destructivos y no destructivos en la Tabla 2.

De la evaluación Estructural de [4] obtuvieron los siguientes resultados por métodos lineales estáticos.

En las Figs. 3 y 4 se observa que las derivas de piso en el sentido “X” como en el sentido “Y”, de la edificación antes del reforzamiento, en la que superan considerablemente el límite permitido por la normativa vigente [3]. También se identifica las derivas de piso posterior al reforzamiento estructural, claramente se visualiza el aumento de rigidez de la edificación donde se observa que disminuye los desplazamiento y derivas de piso.

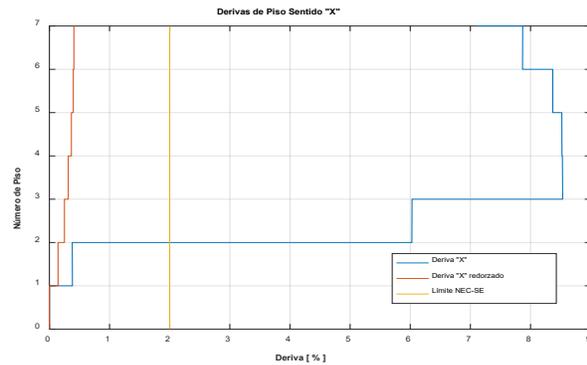


Figura 3. Derivas de Piso estado Actual y Propuesta de Reforzamiento
Fuente: Adaptación de MIDUVI, 2016

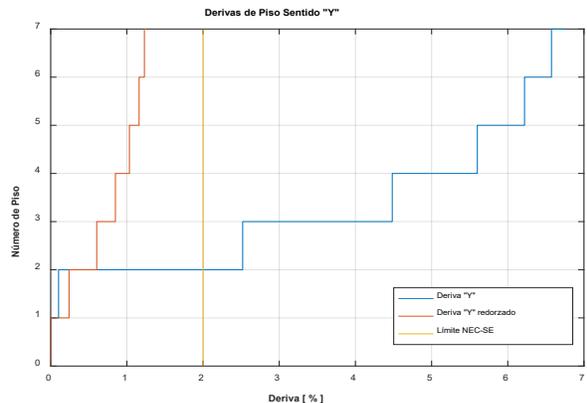


Figura 4. Derivas de Piso estado Actual y Propuesta de Reforzamiento
Fuente: Adaptación de MIDUVI, 2016

2.2 Metodología de evaluación del Caso de Estudio

2.2.1 Modelamiento de la Edificación

Para realizar la simulación de la estructura del presente caso de estudio y efectuar los Análisis no lineales tanto estáticos como dinámicos, se definió en primer lugar los modelos constitutivos de los materiales: Para el acero se utilizó el modelo de Menegotto-Pinto, 1973 y para el hormigón se utilizó el de modelo no lineal de Mander, 1998, de esta manera permitió capturar el comportamiento no lineal de los mismos. Posteriormente se realizó la verificación de secciones y armadura de refuerzo, tanto de vigas, columnas, losas y muros de cortos. Previo al Análisis Estructural.

2.2.2 Análisis estructural No Lineal

Para el análisis Estructural No lineal se realizó los recomendados por [16], los cuales son los siguientes:

1. Análisis No lineal Estático (Push Over)
2. Análisis No lineal Dinámico (Time History Analysis)

En el Push Over, se realizó para determinar los desplazamientos máximos definiendo los objetivos de desempeño mínimos según [17], para estructuras de alta concurrencia más 2 niveles de desempeño: Operacional y Ocupación Inmediata para una mejor visualización de los resultados. Como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Objetivos de Desempeños utilizados para el Análisis No lineal Estático

Niveles Objetivos de Desempeño de la Edificación		(1-A)	(1-B)	(3-C)	(5-D)
Niveles de Peligro	50% / 50 años	a	b	c	d
	BSE-1E	e	f	g	h
	(20% / 50 años)	i	j	k	l
	BSE-2E	m	n	o	p
	(5% / 50 años)				
	BSE-2N				
	(2% / 50 años)				

Fuente: Adaptado de [16]

Nota: (1-A) Operacional, (1-B) Ocupación Inmediata (3-C), Seguridad de Vida (5-D), Prevención de Colapso

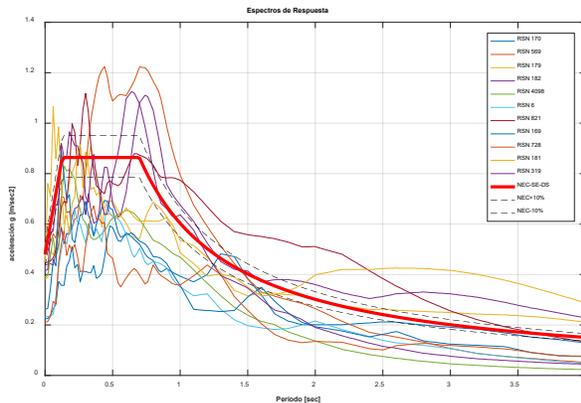


Figura 5. Esp. de respuesta de 11 sismos seleccionado, espectro objetivo. Fuente: Los Autores

Tabla 4. Factores de escalamiento y registros de aceleraciones del PEER

Evento/Estación	RSN	Factor de Escala
Imperial Valley-06/EC County Center FF	170	1.704
San Salvador/National Geographical Inst	569	0.986
Imperial Valley-06/El Centro Array #4	179	1.421
Imperial Valley-06/El Centro Array #7	182	1.207
Parkfield-02, CA/Parkfield - Cholame 1E	4098	1.654
Imperial Valley-02/El Centro Array #9	6	1.955
Erzican, Turkey/Erzincan	821	1.071
Imperial Valley-06/Delta	169	1.793
Superstition Hills-02/Westmorland Fire Sta	728	1.882
Imperial Valley-06/El Centro Array #6	181	1.452
Westmorland/Westmorland Fire Sta	319	1.199

Fuente: Los autores

Se aplicó una carga impuesta de 100 kN, definida en función de la carga vertical y el desplazamiento objetivo definidos según [16], necesaria para llegar a la falla del edificio, la misma que se distribuye uniformemente en todos los nudos tanto en la dirección “X” como en la dirección “Y” definiendo un desplazamiento objetivo.

Para el Análisis No lineal Dinámico se realizó la selección de 11 pares de registros de aceleraciones sísmicas, con estas aceleraciones se determinó sus respectivos espectros de respuesta identificados con RSN y un espectro objetivo en este caso el correspondiente a [3], como se muestra en la Fig. 5.

Acorde a las recomendaciones de [16] se realizó el escalamiento de los espectros RSN al Espectro objetivo, de esta manera se obtuvieron los factores de escala que se indica en la Tabla 4.

Los factores de escalas calculados se los ingresó en el programa de análisis estructural y determinar los desplazamientos del Edificio y los demás resultados.

3. Resultados y Discusiones

3.1 Análisis No Lineal Estático (Push Over)

Posterior al análisis Push Over se muestra a continuación la deformación de la edificación tanto en la dirección “X” como en la dirección “Y”, además se observa la formación de rótulas plásticas en vigas, cabeza y pies de columnas. En la figura 6 a y 6b. se puede visualizar la clave de colores que permite apreciar los daños producidos por la carga horizontal representando el sismo estático.

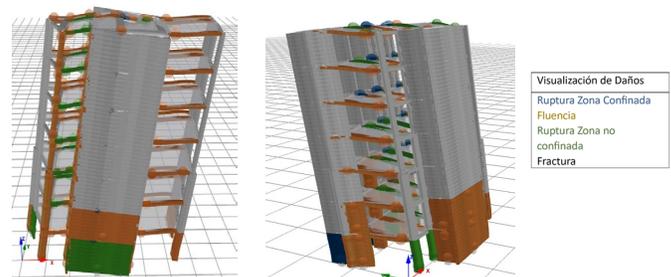


Figura 6. a. Deformada sentido X. b. Deformada en el sentido Y. Fuente: Autores

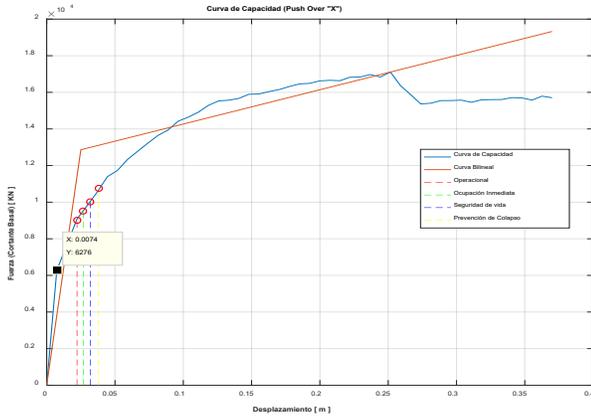


Figura 7. Curva de Capacidad Push Over en la dirección "X".
Fuente: Los Autores

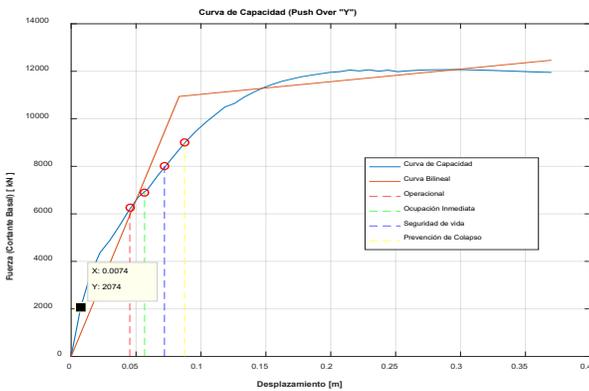


Figura 8. Curva de Capacidad Push Over en la dirección "Y".
Fuente: Los Autores

A continuación, en la Figura 7 se muestra la curva de Capacidad, Fuerza vs. Desplazamiento en el sentido "X".

Se puede observar que el edificio tiene un comportamiento inelástico a partir del desplazamiento 0.007m, además, se puede visualizar que los niveles de desempeño están en el rango inelástico. En la curva bilineal se observa que los niveles de desempeño: Operacional y Ocupación Inmediata, están en los rangos elásticos y los niveles de desempeño Seguridad de Vida y Prevención de Colapso, están en el segundo tramo de la curva bilineal correspondiente al rango inelástico.

De la misma manera se presenta la curva de capacidad en el sentido "Y", como se muestra en la figura 8.

Se observa que la edificación tiene un comportamiento inelástico a partir de 0.0074 m y los niveles de desempeños se producen en el rango inelástico de la curva. En la curva bilineal en este caso los tres niveles de desempeño Operacional, Ocupación Inmediata, Seguridad de Vida están en el rango elástico y el nivel Prevención de Colapso están en la parte inelástica. Al comparar las dos gráficas se aprecia que en la dirección Y tiene una mayor ductilidad por esta razón se generan mayores desplazamientos para cada nivel de desempeño.

Los valores de desplazamiento de los niveles de desempeño ocupación inmediata para un sismo del 20% de

Tabla 5.
Derivas Globales para el análisis Estático No Lineal (Push Over)

Nivel de Desempeño	Derivas Globales	
	Dirección "X" (%)	Dirección "Y" (%)
Operacional (1-A)	0.040	0.160
Ocupación Inmediata (1-B)	0.050	0.200
Seguridad de Vida (3-C)	0.070	0.260
Prevención de colapso (5-D)	0.080	0.310

Fuente: Los Autores

excedencia en 50 años, serán los utilizado para calcular las derivas globales como se muestra en la Tabla 5, debido que este es el desempeño que debe tener una edificación para minimizar los daños y la recuperación funcional sea inmediata siendo así una estructura resiliente.

Con esta información de derivas globales se realizará la evaluación para la estimación de daño y posterior ponderación para el índice de resiliencia de la edificación.

3.2 Análisis No Lineal Dinámico (Time History Analysis).

Del análisis de la estructura con los 11 pares de sismos se determinó el desplazamiento máximo en el último piso con el sismo de Imperial Valley-06/El Centro Array #6 tanto en la dirección "X" y la dirección "Y" como se muestran en las Figs. 9 y 10.

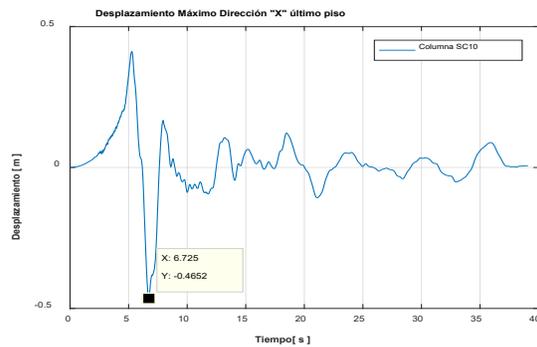


Figura 9. Desplazamiento en el Nivel 7 columna SC10 en la dirección "X",
Fuente: Los Autores

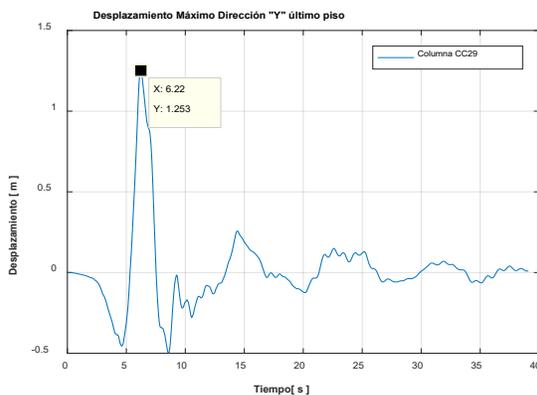


Figura 10. Desplazamiento en el Nivel 7 columna CC29 en la dirección "Y",
Fuente: Los Autores

A continuación, se observa la formación de rótulas plásticas en vigas, muros en la planta baja y la fluencia de los elementos como se indica en la clave de colores que se muestra en la Fig. 11.

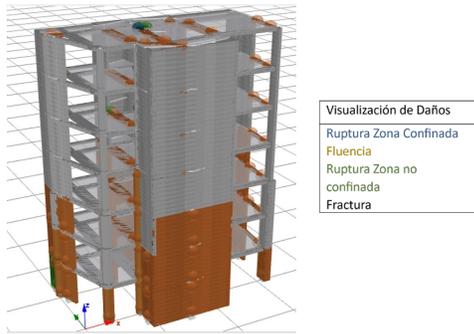


Figura 11. Deformada del Edificio y Daños (THA).
Fuente: Los autores

Tabla 6. Derivas Globales y Residuales del Análisis Tiempo Historia

Derivas Análisis tiempo Historia			
Deriva Global %		Deriva Residual %	
DgX	DgY	DrX	DrY
0.0115	0.0233	0.000650	0.00035

Fuente: Los Autores

Con los resultados de este análisis se determinó los desplazamientos máximos en el último piso, realizando un promedio de los 11 análisis en cada dirección, para el cálculo de las derivas globales, posteriormente se calcularon derivas residuales con los valores de desplazamiento residual al final del registro sísmico, en la Tabla 6 se indica los valores de las derivas mencionados.

Como se puede observar las mayores derivas globales son en el sentido “Y”, sería una alerta para optimizar y mejorar el diseño del reforzamiento estructural.

3.3 Estimación de daño

Para la estimación de daño se realizó en los elementos estructurales y los elementos no estructurales como se detalla a continuación.

3.3.1 Elementos no estructurales

Los límites de deriva para la comparación y determinación de daño en elementos no estructurales son acordes a la Tabla 2-1 correspondiente a los límites de deriva de piso para diferentes niveles de desempeño en edificios considerando elementos no estructurales de [18], en la que indica que el límite de deriva para DS1: Ocupación Inmediata para Edificios con elementos no estructurales dúctiles es 0.7%. El nivel de DS1 corresponde a daño leve, Desempeño que se define como requisito a una edificación para considerarla resiliente.

Con este parámetro se realizó la comparación con las derivas globales para cada análisis estático y dinámico tanto

Tabla 7. Estimación de Daño en función de Derivas Globales

Análisis Lineal Estático	
Chequeo con DgX	Daño Leve
Chequeo con DgY	Daño Moderado
Análisis Lineal Dinámico	
Chequeo con DgX	Daño Leve
Chequeo con DgY	Daños Leves
Análisis No Lineal Estático (Push Over)	
Chequeo con DgX	Daño Leve
Chequeo con DgY	Daño Leve
Análisis No Lineal Dinámico (Time History 11 Pares de Sismos)	
Chequeo con DgX	Daño Moderado
Chequeo con DgY	Daño Excesivo/Completo

Fuente: Los Autores

para el caso lineal y no lineal, para determinar su estado de Daño, como se muestra en la siguiente Tabla 7.

Esta estimación de daño se reflejará en la calificación de la estructura para determinar su índice de resiliencia.

3.3.2 Elementos Estructurales

Para los elementos Estructurales y siguiendo los lineamientos de [18], para estimar el daño, el parámetro de comparación son las derivas residuales, teniendo como valor límite para el nivel DS1: Ocupación Inmediata 0.2%, por lo que al realizar la evaluación con los resultados del análisis se determina que los elementos estructurales tienen un daño es leve.

De la misma manera siguiendo las recomendaciones [19], de la tabla C-1 para la estimación de daño en función de la deriva residual, indica que para DS1: Operacional tiene un límite del 0.2% y para DS2: Ocupación Inmediata, tiene un límite 0.5%, los cuales son desempeños necesarios para una estructura resiliente. Comparando con derivas residuales obtenidas del análisis dinámico no lineal, se tiene un valor menor al límite, por lo que el daño de los elementos estructurales es Leve.

También se realizó una estimación de daño para derivas globales según las recomendaciones de [20], en la que plantea curvas de fragilidad para la determinara la probabilidad de daño en función de la deriva de piso.

En la Fig. 12. Se muestra mencionadas curvas y los valores.

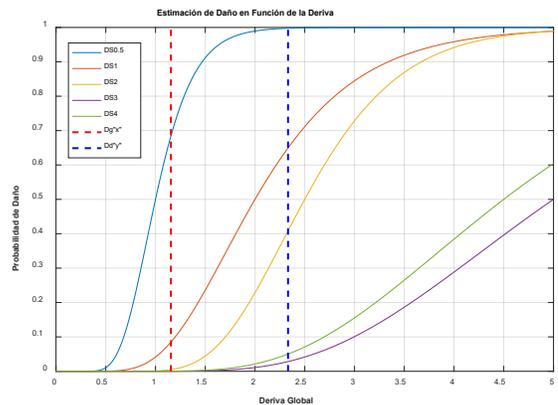


Figura 12. Probabilidad de Daño en función de la Deriva global
Fuente: Los Autores

Tabla 8.

Probabilidad de daño y Nivel de desempeño

Nivel de Daño	Probabilidad de Daño "X"	Probabilidad de Daño "Y"
DS0.5: No conocido	0.00%	0.00%
DS1: Leve	10.00%	25.00%
DS2: Moderado-OI	2.00%	45.00%
DS3: Excesivo-SV	0.00%	2.50%
DS4: Completo PC	0.00%	2.50%
Mayor Probabilidad de Daño	10.00%	45.00%
Resultado de Desempeño	DS1: Leve Operacional	DS2: Moderado Ocupación Inmediata

Fuente: Los Autores

Con estos valores se determinó la probabilidad de daño para cada nivel de desempeño tanto en la dirección "X" como en la dirección "Y", en la que se obtuvo la Tabla 8.

Como se observa en la tabla anterior la mayor probabilidad de Daño corresponde a Leve en la dirección "X", y Moderado para la dirección "Y" y los niveles de desempeño obtenidos son Operacional para "X" y Ocupación Inmediata para la dirección "Y".

Con todos estos parámetros de estimación de daño y desempeño sísmico procedemos a calcular los tiempos de recuperación funcional y el Índice de Resiliencia.

3.4 Índice de resiliencia

Para definir el índice de resiliencia y determinar qué tan resiliente es la edificación del caso de estudio, se utilizaron dos parámetros importantes según las recomendaciones de [21], la primera indica que una estructura es resiliente, si la probabilidad de colapso es menor del 10% dado el MCE_R , (Máximo Sismo Considerado para un riesgo objetivo), para la evaluación de este parámetro se consideró el sismo de diseño, debido que en el país no se dispone de estos datos, y se revisa el valor obtenido en de la probabilidad de colapso DS4 de la Tabla 8 de la anterior sección.

El segundo indica que se debe plantear un tiempo de recuperación objetivo dependiendo de la categoría de la estructura, para el caso de estudio es Categoría III de uso Especial, Con esta consideración se plantea la Tabla 9 correspondiente al tiempo objetivo de recuperación según [8] y [22].

Par el nivel de DS2: Daño Moderado y Categoría III corresponde el tiempo objetivo de recuperación de 15 días y nivel de desempeño Ocupación inmediata.

Para la determinar el tiempo de recuperación funcional en función del tiempo objetivo se utilizó las recomendaciones de [23], en la tabla del A3 correspondiente a la Distribución de probabilidad de los tiempos de reparación de los estados de daño como se muestra en la Fig. 13.

Tabla 9.

Tiempo Objetivo de Recuperación en días

Categoría	DS1: Leve	DS2: Moderado	DS3: Excesivo	DS4: Completo
IV	0.04	1	7	30
III	7	15	30	60
I-II	15	30	60	150

Fuente: Los Autores adaptado de [8] y [22].

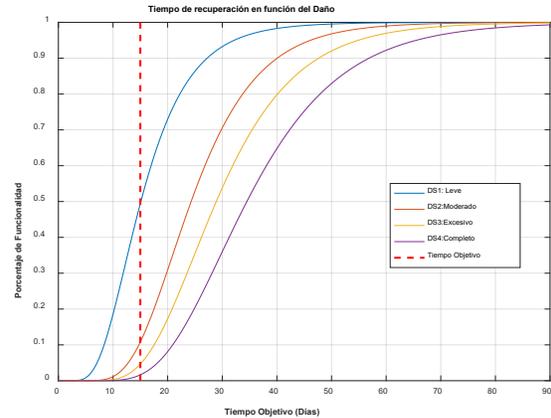


Figura 13. Probabilidad de Recuperación Funcional con un tiempo objetivo
Fuente: Los autores, adaptado de [23].

Tabla 10.

Probabilidad de recuperación funcional en función del daño

Estado de Daño	Porcentaje de Recuperación Funcional
DS1: Leve	40.00%
DS2: Moderado-OI	6.50%
DS3: Excesivo-SV	3.50%
DS4: Completo P.C.	1.50%
Mayor Probabilidad Funcional a Daño	40.00% DS1: Leve

Fuente: Los Autores

Como se puede apreciar en la gráfica se ingresa el valor del tiempo objetivo, para determinar las probabilidades de funcionalidad correspondiente a cada estado de daño, obteniendo como resultado un 40 % de probabilidad que la edificación se puede recupera a un daño leve y un 6.5 % a un daño moderado si mi tiempo objetivo es de 15 días. Lo cual se resume en la Tabla 10.

Con este estado daño Leve, se realiza una comparación con los daños obtenidos en función de las derivas globales y residuales según las recomendaciones [18-20]. Para su posterior calificación.

Por ejemplo, con la estimación de daño de la Tabla 8, se obtuvo que en la dirección "X" la Edificación tiene un daño leve por lo que obtiene la máxima puntuación, sin embargo, en la dirección "Y", tiene un Daño Moderado por lo que su calificación no será la máxima si no según la tabla de ponderación que se muestra en Anexo 1.

Todos los parámetros descritos en el punto 3 de este documento, se resumen en una tabla de evaluación y determinación del Índice de Resiliencia (IR), cuyo procedimiento se detalla en el Anexo 1.

Para la calificación de la estructura y la obtención del mencionado Índice se aplican 12 pesos de evaluación que se les asigna una ponderación correspondiente a valores máximos, mínimos y si cumple con ciertos requisitos de desempeño, según el caso. Principalmente y los mayores pesos de Evaluación corresponde a la ponderación de los parámetros de resiliencia.

A continuación, se describe brevemente lo que

corresponde a cada peso de evaluación:

El peso 1, califica con el puntaje máximo si se han realizado Estudios Geotécnicos, Estáticos y Dinámicos.

Para el peso 2 de igual manera se califica la edificación en función de los periodos de la estructura, para determinar su rigidez y desempeño sísmico.

En los pesos 3, 4, 5 y 6, tiene un valor de ponderación máximo, si se realiza el Análisis Estructural estático y dinámico tanto lineales como no lineales, para el cálculo de desplazamientos máximos en el último piso, derivas globales y residuales correspondiente a cada análisis.

En los pesos 7, 8, 9, y 10 se determina el desempeño de la estructura y se estima el daño en función de las derivas calculadas en los pesos anteriores, tendrán el puntaje máximo si el nivel de desempeño de la edificación corresponde a Operacional.

Finalmente, en los pesos 11 y 12 corresponde a los Parámetros de Resiliencia descritos anteriormente siendo este peso de evaluación que tiene mayor ponderación. Lo antes mencionado se resume en la Tabla 11.

También en la Tabla 11 se muestra la calificación de la estructura del caso de estudio una vez realizada la evaluación con todos los pasos antes descritos con un valor de 9.23 /10.

Una vez obtenido el índice de Resiliencia (IR), se debe determinar su grado de resiliencia de la edificación, por lo que se definió una tabla de valores con diferentes parámetros en relación de las ponderaciones mínimas y máximas que pueda tener el mencionado Índice (IR), midiendo así su desempeño y resiliencia sísmica del caso de estudio, como se muestra a continuación en la Fig. 14.

Como se observa en la figura anterior, los rangos presentados están en función del Índice de Resiliencia (IR), que determinan si la Edificación: No es Resiliente, es medianamente Resiliente y es Resiliente, para facilitar la comprensión de la calificación realizada, se utiliza una simbología de calidad representado por estrellas doradas, las mismas que van de 0 a 5 estrellas.

Al aplicar los pesos de evaluación para el caso de estudio en función del Índice de Resiliencia (IR) se determinó que la estructura tiene una calificación de 5 estrellas, lo que implica que es una estructura resiliente a un evento sísmico como se observa en la Tabla 12.

Tabla 11. Resumen de evaluación para Índice de Resiliencia Sísmica

Pesos de Evaluación	Descripción	Ponderación	Calificación
1	Estudios Geotécnicos	0.20	0.20
2	Periodo/Rigidez	0.1	0.09
3,4,5,6	Análisis/Evaluación Estructural	0.7	0.7
7,8,9,10	Desempeño y Estimación de Daños	4	3.4
11,12	Parámetros de Resiliencia	5	4.83
Índice de Resiliencia (IR)		10.00	9.23

Fuente: Los Autores

Parámetros de Calificación Índice de Resiliencia			ESTRELLAS	
1	0<IR<=3	No Resiliente	0 ESTRELLAS	
2	3<IR<=5		1 ESTRELLAS	★
3	5<IR<=6	Medianamente Resiliente	2 ESTRELLAS	★★
4	6<IR<=7		3 ESTRELLAS	★★★
5	7<IR<=8	Resiliente	4 ESTRELLAS	★★★★
6	8<IR<=10		5 ESTRELLAS	★★★★★

Figura 14. Parámetros para evaluar el Índice de Resiliencia Sísmica Fuente: Los Autores

Tabla 12. Calificación final de la Estructura

Calificación Final de la Estructura	
Resiliente	5 Estrellas ★★★★★

Fuente: Los Autores

Al aplicar los pesos de evaluación para el caso de estudio en función del Índice de Resiliencia (IR) se determinó que la estructura tiene una calificación de 5 estrellas, lo que implica que es una estructura resiliente a un evento sísmico como se observa en la Tabla 12.

4. Conclusiones

En el presente trabajo de Investigación se plantea una metodología de evaluación sísmica basada en resiliencia, considerando los tiempos de recuperación funcional, que debe tener una estructura de uso público o que pueda necesitar una operación inmediata posterior a un evento sísmico, el caso de estudio es un edificio de hormigón armado de 7 pisos que fue afectado por el sismo de pasado 16 de abril del 2016, para el efecto, se realizó un control de daños de los elementos estructurales y no estructurales que resultan afectado posterior a un evento sísmico.

Con el aporte del presente trabajo de investigación como fundamento normativo, permitirá dar un paso más adelante de la Ingeniería Sísmica basada en Desempeño y Estructural, implementando nuevos parámetros y conceptos que aportarán a tener Estructuras Resilientes ante eventos Sísmicos, sobre todo a edificaciones Esenciales, Especiales y de alta concurrencia.

El contenido de esta metodología planteada en el presente trabajo es didáctico, de fácil aplicación para cualquier Ingeniero Diseñador y/o Evaluador Estructural, como se detalla en el Anexo 1. Con una planificación clara del proceso, permitirá cumplir parámetros definidos y necesarios para una evaluación estructural completa, iniciando con estudios geotécnicos estáticos y dinámicos, utilizar el periodo de la estructura para determinar su desempeño y rigidez, además hacer hincapié en los Análisis Estructurales recomendados por la ASCE 7-22, lineales, no

lineales, tanto estáticos como dinámicos, para posteriormente determinar su desempeño como control de daños y finalmente definir los parámetros de resiliencia con el tiempo de recuperación funcional, y la probabilidad de colapso menor al 10% dado el Sismo de Diseño, Determinando su respectivo Índice de Resiliencia (IR), para su calificación.

La mayor ponderación del Índice de Resiliencia de los pesos de evaluación, corresponden a los parámetros de resiliencia, con una ponderación correspondiente al 50% distribuido de la siguiente manera: si la probabilidad de colapso es menor del 10% dado el sismo de diseño (para este caso), corresponde un 20% y si la mayor probabilidad de recuperación funcional para daños leves y moderados están dentro del tiempo de recuperación objetivo para una estructura de categoría III y IV corresponde un valor del 30%.

El Índice de Resiliencia obtenido para el caso de estudio es de 9.23, este valor corresponde una calificación de 5 estrellas por lo que se puede concluir que es una estructura resiliente dado que ocurra un evento sísmico, puesto que los daños que puedan presentarse en la edificación serán leves y moderados, de la misma manera su tiempo de recuperación funcional estará dentro de lo planificado y permitirá la ocupación inmediata en el peor de los casos.

Cabe recalcar la importancia del reforzamiento estructural para mejorar su desempeño y su resiliencia sísmica en una edificación. Y sobre todo con la adecuada evaluación y rehabilitación estructural se puede controlar los daños y salvaguardar la vida de los usuarios y los bienes materiales.

El manejo del concepto de resiliencia sísmica y la recuperación funcional obviamente disminuirá los costos de reparación, por lo que el aporte de esta investigación, como fundamento normativo, contribuirá notablemente para garantizar edificaciones seguras y aportará a una comunidad resiliente.

Siguiendo el ejemplo y las experiencias de muchos países en el mundo, la inclusión de varios actores tanto públicos y privados para la institucionalización de la normativa sismo resistente, permitirá incluir esta metodología, y más estudios sobre el Diseño y Evaluación Sísmica basada en Resiliencia. Conjuntamente, con el estado se puede lograr que las políticas públicas incentiven a los usuarios a construir edificaciones y ciudades Resilientes ante las amenazas sísmicas latentes, de la misma manera fortalecer a la Ingeniería Estructural del país y al código modelo en la región.

Referencias

[1] Acosta, A., Guerrero, D., León, R., Oña, P., Cruz, M., and Toulkeridis, T., Calificación y cuantificación de fallas geológicas en el Distrito Metropolitano de Quito. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa* [En línea]. 1(3), pp. 35-24, 2016. Disponible en: <https://docplayer.es/62721865-Calificacion-y-cuantificacion-de-fallas-geologicas-en-el-distrito-metropolitano-de-quito.html>

[2] Área de Sismología - Instituto Geofísico, Informe Sísmico Especial N. 18 - 2016, IG-EPN [En línea]. 2016, [Día de la referencia: 04 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1324-informe-sismico-especial-n-18-2016>

[3] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda MIDUVI, NEC-SE-DS: Peligro Sísmico, Diseño Sismo Resistente [En línea]. Ecuador, 2015. Disponible en: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/3.-NEC-SE-DS-Peligro-Sismico-parte-2.pdf>

[4] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, Análisis, estudio y planteamiento de soluciones estructurales de edificaciones afectadas por el terremoto del 16 de abril del 2016 en la provincia de Manabí, Cantón Sucre, identificadas como de alto riesgo. Ecuador. 2016.

[5] Kent, Y., Wilson, J., and Wang, Y., Overview of the Oregon resilience plan for next Cascadia earthquake and tsunami, *Proceedings of 10th US National Conference on Earthquake Engineering*. 2015. DOI: <https://doi.org/10.4231/D3CN6Z08T>

[6] NIST, NIST Special Publication 1190: Community Resilience Planning Guide for Buildings and Infrastructure Systems [Online]. National Institute of Standards and Technology, United States of America, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1190v1>

[7] Sattar, S., Mcallister, T., Johnson, K., et al., Research Needs to Support Immediate Occupancy Building Performance Objective Following Natural Hazard Events, NIST, United States of America, 2018. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1224>

[8] National Institute of Building Sciences (NIBS), and Building Seismic Safety Council (BSSC), Resilience-Based Design and the NEHRP Provisions, FEMA IDIQ Contract HSFE60-15-D-0022, 2020.

[9] Universidad Nacional Autónoma de México-UNAM, Resiliencia Sísmica, Desarrollo de Capacidades Nacionales para la rehabilitación de Edificios, 2022. Disponible en: <https://www.resilienciasismica.unam.mx/>

[10] Alcaráz, J.M., Un enfoque integral para la evaluación de la resiliencia sísmica. Tesis. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2017.

[11] Gil-Ureta, M., De-la-Llera, J.C., Rivera, F., Cienfuegos R., Santa-Maria, H., Infraestructura resiliente lecciones del caso chileno [En línea]. Chile, 2017. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/321595193>

[12] Lagos, R., Lafontaine, M., Bonelli, P., et al., The quest for resilience: The Chilean practice of seismic design for reinforced concrete buildings, *Earthquake Spectra* [Online]. 37(1), pp. 26-45, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1177/8755293020970978>

[13] Ministerio De Desarrollo Urbano Y Vivienda, Manual-para-la-Regulación de procesos constructivos Enfoque en Construcciones Sismorresistentes [en línea]. Quito, Ecuador, 2019. Disponible en: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/06/Manual-para-la-Regulacion-de-Procesos-Constructivos.pdf>

[14] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, Plan de Implementación para la Regulación de los procesos Constructivos, Ecuador, 2021

[15] Aveiga, J., Carvajal, F., Análisis de pérdidas y estimación de daños utilizando la herramienta PACT del FEMA P-58, en una edificación ubicada en la ciudad de Quito. Tesis, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Central Del Ecuador, Ecuador, 2018.

[16] American Society of Civil Engineers, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings ASCE/SEI 41-17 [Online]. Reston, VA, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1061/9780784414859>

[17] Ministerio de Desarrollo Urbano y vivienda MIDUVI, NEC-SE-RE: Riesgo sísmico, evaluación, rehabilitación de estructuras [En línea], Ecuador, 2015, Disponible en: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/6.-NEC-SE-RE-Riesgo-sismico.pdf>

[18] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, Diseño Basado en Desplazamientos. Ecuador, 2023.

[19] Mahoney, M., and Hanson, R. D., Seismic Performance Assessment of Buildings Volume 1-Methodology [Online]. APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL, California. Available at: www.ATCouncil.org

[20] Heintz, J., A. et al., Resilient Repair Guide Source Report: Case Study [Online]. APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL, California, 2021. Available at: www.ATCouncil.org

- [21] FEMA, Recommended Seismic Provisions: Design Examples, Training Materials, and Design Flow Charts, [Online]. California, 2021. Available at: <https://www.fema.gov/emergency-managers/risk-management/building-science/earthquakes>.
- [22] FEMA, Recommended Seismic Provisions: Design Examples, Training Materials, and Design Flow Charts [Online]. California, 2020, Available at: <https://www.fema.gov/emergency-managers/risk-management/building-science/earthquakes>.
- [23] Gutierrez-Trejo, J., Ayala-Milián, G., Análisis de la Resiliencia sísmica de edificios, Revista de Ingeniería Sísmica [En línea], 107, pp. 47–73, 2022, DOI: <https://doi.org/10.18867/ris.107.603>

J.P. Olmedo-Cueva, obtuvo su título Ingeniero Civil, con Especialidad de Estructuras de la Universidad Central del Ecuador, tiene un Máster en ciencias en Ingeniería Civil mención Estructuras en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Dentro de su especialización estructural. Aprobó el programa “Mejora y difusión de tecnología sismorresistente para edificios en países de América Latina en el Instituto Internacional de Sismología e Ingeniería Sísmica Building Research Institute- Japón, fue Coordinador del proceso de Actualización de los Capítulos del Eje de Seguridad Estructural de la Norma Ecuatoriana de la Construcción. Actualmente es docente en el Instituto Superior de la Cruz Roja Ecuatoriana en la cátedra de Vulnerabilidad Estructural y Sismo resistencia.
ORCID: 0009-0008-8277-5331

A.G. Haro-Báez, obtuvo su título de PhD. en Ingeniería Civil de la North Carolina State University en los Estados Unidos, donde le confirieron el premio Thomas G. Coffey. En Ecuador, obtuvo su Maestría en Estructuras de la Escuela Politécnica Nacional, y su título de Ingeniera Civil de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Es académica en su alma máter, la ESPE, y en la Universidad San Francisco de Quito. Gabriela es Coordinadora del Grupo de Investigación en Estructuras y Construcciones y Coordinadora de la Maestría de Investigación en Estructuras de la ESPE. Además, es autora de varias publicaciones científicas y participa en proyectos de investigación nacionales e internacionales. Su área de interés se centra en el diseño y evaluación sísmicos basados en desempeño y resiliencia.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6415-4653>