

STRUCTURAL ANALYSIS CONSIDERING TIME-ACCUMULATED SEISMIC DAMAGE

J. Ricardo Vera ⁽¹⁾, Roberto Aguiar Falconí ⁽²⁾

⁽¹⁾ Facultad de Postgrado. Universidad Técnica de Manabí. Portoviejo, Ecuador rvera0131@utm.edu.ec

⁽²⁾ Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Valle de los Chillos, Ecuador. roberto.aguiar.falconi@gmail.com

Received: October 2023. Accepted: November 2024. Published: December 2024

ABSTRACT

Over time, structures experience changes in the mechanical properties of their elements due to environmental factors and cyclic loading. During an earthquake, this degradation can occur suddenly, impacting stiffness and strength due to the plastic deformations generated. Moreover, the damage is not limited to a single event but accumulates with aftershocks or future earthquakes. However, traditional structural analysis methods do not account for this accumulated damage. This article presents an approach to evaluate accumulated damage using damage indices applied to a reinforced concrete building located in Portoviejo, Ecuador. A nonlinear analysis with seismic sequences is performed, highlighting the importance of incorporating damage accumulation in structural design.

Keywords: Cumulative damage, non-linear analysis, stiffness, damage indices, reinforced concrete structures

ANÁLISIS ESTRUCTURAL CONSIDERANDO DAÑO SÍSMICO ACUMULADO EN EL TIEMPO

RESUMEN

A lo largo del tiempo, las estructuras experimentan cambios en las propiedades mecánicas de sus elementos debido a la acción de factores ambientales y cargas cíclicas. Durante un sismo, esta degradación puede ser súbita, afectando la rigidez y la resistencia debido a las deformaciones plásticas generadas. Además, el daño no se limita a un único evento, sino que se acumula con las réplicas o futuros sismos. Sin embargo, los métodos tradicionales de análisis estructural no consideran este daño acumulado. En este artículo, se presenta un enfoque para evaluar el daño acumulado mediante índices de daño aplicados a un edificio de hormigón armado ubicado en Portoviejo, Ecuador. Se realiza un análisis no lineal con secuencias sísmicas, demostrando la importancia de incorporar la acumulación de daño en el diseño estructural.

Palabras clave: Daño acumulado, análisis no lineal, rigidez, índices de daño, estructuras de hormigón armado.

1. INTRODUCCIÓN

Con el tiempo, las estructuras experimentan cambios en sus propiedades mecánicas, generalmente degradándose. Por ejemplo, una estructura de hormigón armado ubicada en un ambiente salino es propensa a sufrir daños tanto en el concreto como en el acero de refuerzo, dependiendo de si se han seguido las recomendaciones normativas y las buenas prácticas de construcción, tales como la calidad del hormigón y los recubrimientos de las armaduras. Incluso con un buen diseño y una correcta construcción, la falta de mantenimiento puede provocar estos deterioros, que tienden a manifestarse después de varios años.

Por otro lado, cuando una estructura es sometida a un evento sísmico de gran magnitud, las deformaciones por los ciclos de carga impuestos durante la excitación pueden degradar súbitamente propiedades como la rigidez y la resistencia. En estos casos, la energía sísmica se puede disipar a través del daño en los elementos resistentes, acumulándose en cada incursión plástica, tanto durante el evento principal como en futuros sismos a lo largo de la vida útil de la estructura. Como resultado, la estructura puede fallar antes de alcanzar los valores máximos de respuesta descritos en las normativas, como los desplazamientos o derivas máximas.

Los códigos de diseño sísmico tradicionales no evalúan el daño acumulado ni la demanda inducida por los ciclos de carga durante la excitación sísmica, ni consideran los efectos de réplicas u otros sismos posteriores. Por ejemplo, el análisis modal espectral —ampliamente utilizado— no contempla la secuencia completa del registro sísmico ni las incursiones inelásticas acumuladas en los elementos estructurales. En cambio, evalúa solo los valores máximos instantáneos de espectros de respuestas, generalmente mediante enfoques basados en fuerzas

Investigaciones recientes han mostrado la importancia del daño acumulado en secuencias sísmicas. Por ejemplo, Wen (2017) destaca que eventos como el de Tohoku, Japón (2011) demostraron que las réplicas, aunque menos intensas, agravaron los daños en edificios ya comprometidos, el corto periodo de tiempo entre el sismo principal y las réplicas no permiten que las estructuras dañadas sean reparadas.

En el caso de México, Rodríguez (2019) menciona que el número de colapsos durante el terremoto de 2017 ocurrió mayoritariamente en edificaciones con menos de 10 niveles que ya habían soportado el terremoto del 19 de septiembre de 1985, es decir la falta de reforzamientos luego de los sismos incrementa la probabilidad de colapsos por efecto del daño acumulado

En Ecuador, Aguiar y Vera (2024) exponen que eventos como los sismos de Bahía de Caráquez (1998) y Pedernales (2016) evidenciaron esta problemática en ciudades como Portoviejo, Manta y Bahía de Caraquez, donde varios edificios colapsaron o debieron ser demolidos debido a la falta de reforzamientos y rehabilitaciones adecuadas.

Estas referencias muestran la importancia de incluir en los análisis estructurales el daño acumulado, esto se logra considerando la degradación de las propiedades estructurales debido a los ciclos de carga mediante el uso de índices

de daño. Un índice de daño es una función matemática que relaciona las demandas experimentadas por un sistema con sus capacidades, con el objetivo de determinar su nivel de deterioro ante una determinada historia de carga (Arrollo & Ordaz, 2006).

El objetivo de este estudio es evaluar el daño acumulado en un edificio de hormigón armado utilizando un índice de daño propuesto por Rodríguez (2015), que considera la energía disipada por el sismo, el período de vibración de la estructura, la altura total del edificio (relación H/T) y la deriva global. Se pretende demostrar la necesidad de incorporar este tipo de análisis para mejorar la seguridad de las edificaciones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción del caso de estudio

El edificio analizado se encuentra en Portoviejo, Ecuador. Es una estructura de seis niveles con un sistema de pórticos de hormigón armado. Las secciones de las columnas cambian según el nivel: las columnas de la planta baja presentan la mayor sección (60 cm x 35 cm). La mayoría de los pisos se destinan a oficinas, excepto el último nivel, que se utilizaba como archivo (PLANPROCONS, 2016). Para el análisis se considera el pórtico 3, las dimensiones mostradas son en cm.

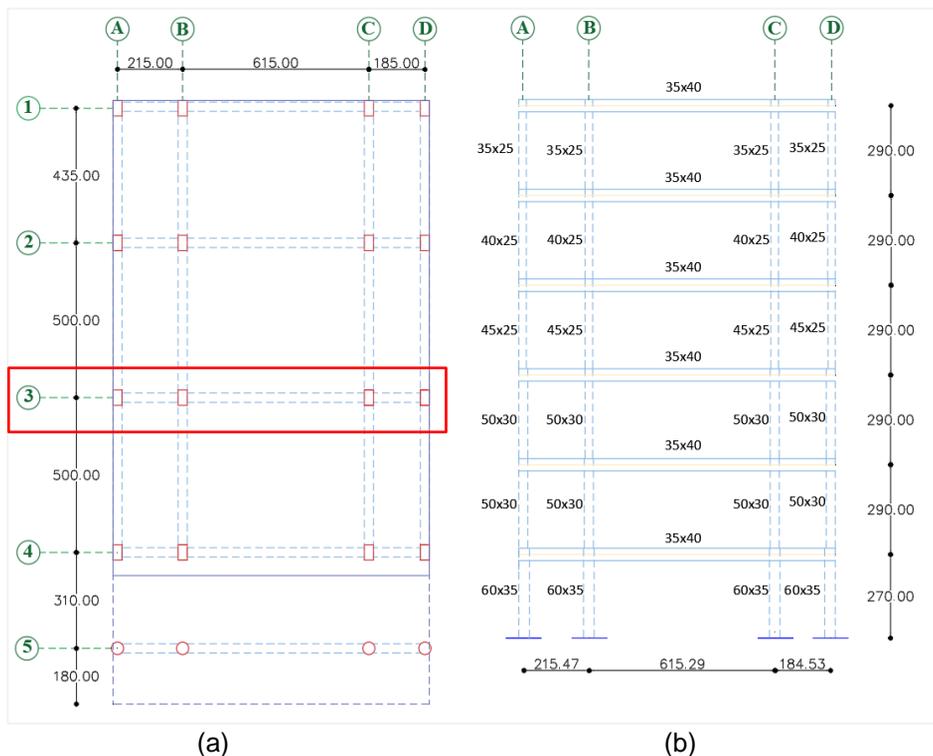


Figura 1 Edificio Ministerio de Educación Zonal 4, (a) Planta, identificación del pórtico 3; (b) Elevación pórtico 3.

2.2 Evaluación de daño estructural y curva de capacidad

Se utilizó el método de FEMA 306 para clasificar el daño estructural, el cual considera cinco niveles de daño: insignificante, leve, moderado, fuerte y extremo (Figura 2). Para evaluar la pérdida de capacidad del pórtico se consideraron los coeficientes de degradación de rigidez (Figura 3) de los elementos en función de la calificación del daño por el sismo de Pedernales de 2016.

El coeficiente λ_k que fue estimado en 0.85 para los elementos vigas y columnas del piso 1, 2 y 3, y en 0.90 para los elementos vigas y columnas del piso 4, 5 y 6.

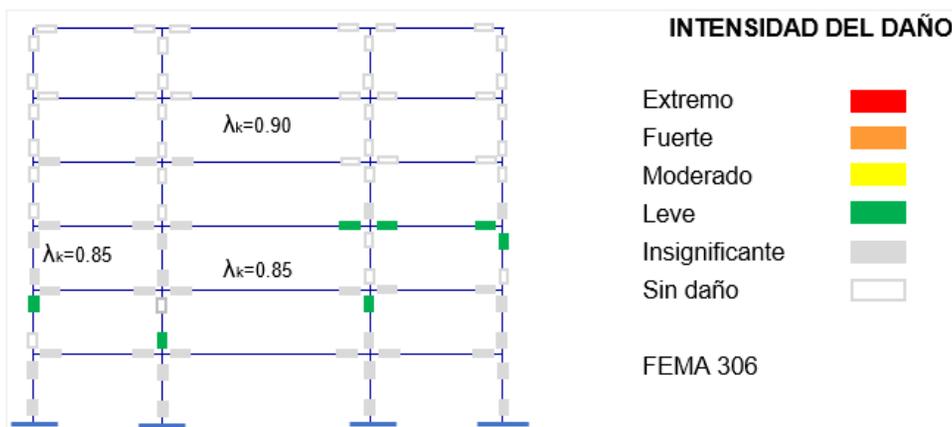


Figura 2, Daños en pórtico 3 evaluados con FEMA 306

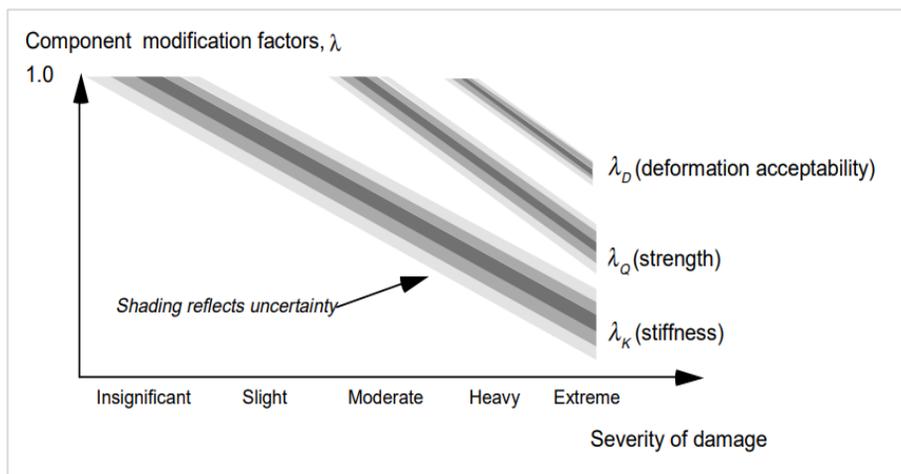


Figura 3, Factores de modificación de propiedades de los elementos. FEMA 306

Se realizó el análisis no lineal estático con el programa de CEINCI LAB Structure_Geom_2D_v1. y se obtuvo la curva de capacidad (Fuerza vs Desplazamiento) y el modelo bilineal del pórtico sin daño y considerando el daño (Figura 4).

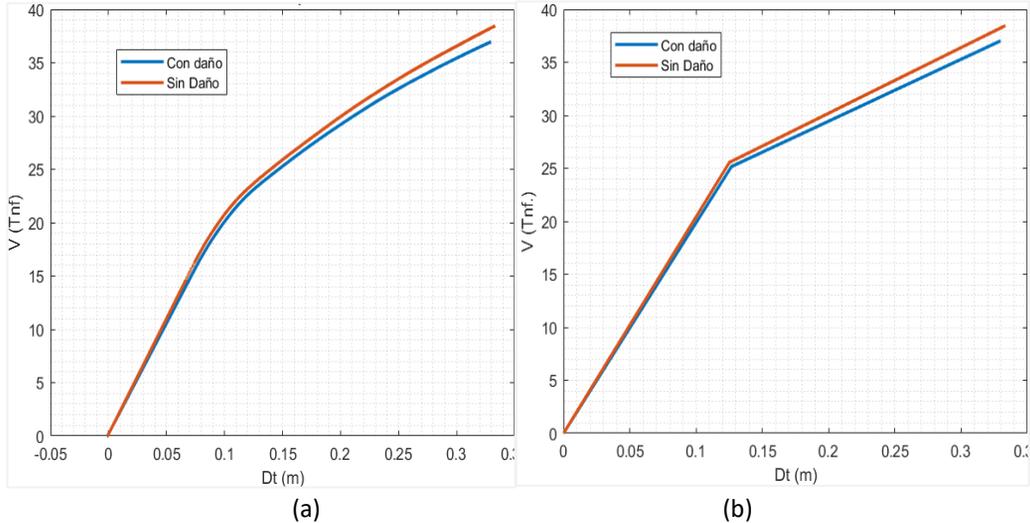


Figura 4 Análisis estático no lineal (a) Curva Pushover; (b) Modelo bilineal

En la tabla 1 se muestra el resumen del análisis estático no lineal (Curva de capacidad).

Tabla 1 Valores obtenidos del análisis estático no lineal

ESTADO	Dy (m)	Vy (tnf)	Du (m)	Vu (tnf)	μ	Rigidez (tnf/m)	Area Pushover (tnfm)
SIN DAÑO	0.13	25.56	0.33	38.46	2.66	204.22	8.26
CON DAÑO	0.12	25.16	0.33	37.03	2.60	198.60	7.89

Dy: Desplazamiento de fluencia; Du: Desplazamiento ultimo; Vy: Cortante de fluencia; Vu: Cortante ultimo; μ : Ductilidad

2.3 Análisis estructural con daño acumulado

Se analizaron las respuestas ante secuencia sísmica del componente nort-sur del sismo de Pedernales 2016, las réplicas principales (movimientos a los cuales ya estuvo sometida la estructura) y el sismo de Ica (2007), el cual es un sismo de larga duración con un numero de ciclos mayor que el de Pedernales del 2016. (Figura 5).

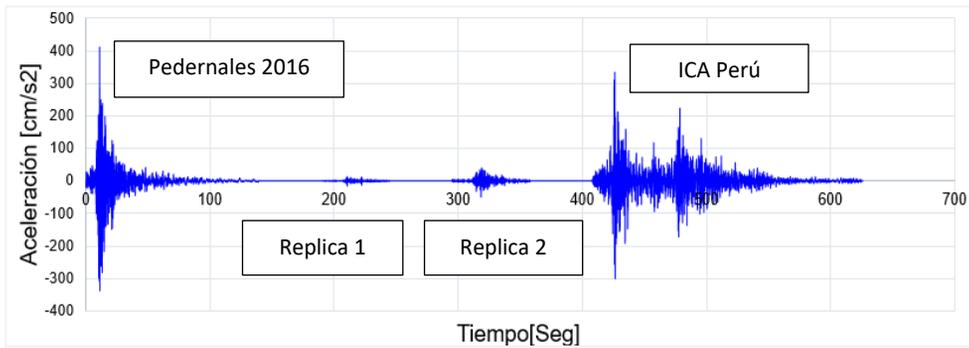


Figura 5 Secuencia sísmica para el análisis del índice de daño acumulado

Los programas utilizados fueron `elastoplasto_nolinealv3` y `beta_newmark_sismo_1gdl` de la librería de CEINCI LAB para el análisis no lineal y lineal, estos programas resuelven la ecuación del movimiento para sistemas de 1 grado de libertad usando el método de Newmark (Figura 6).

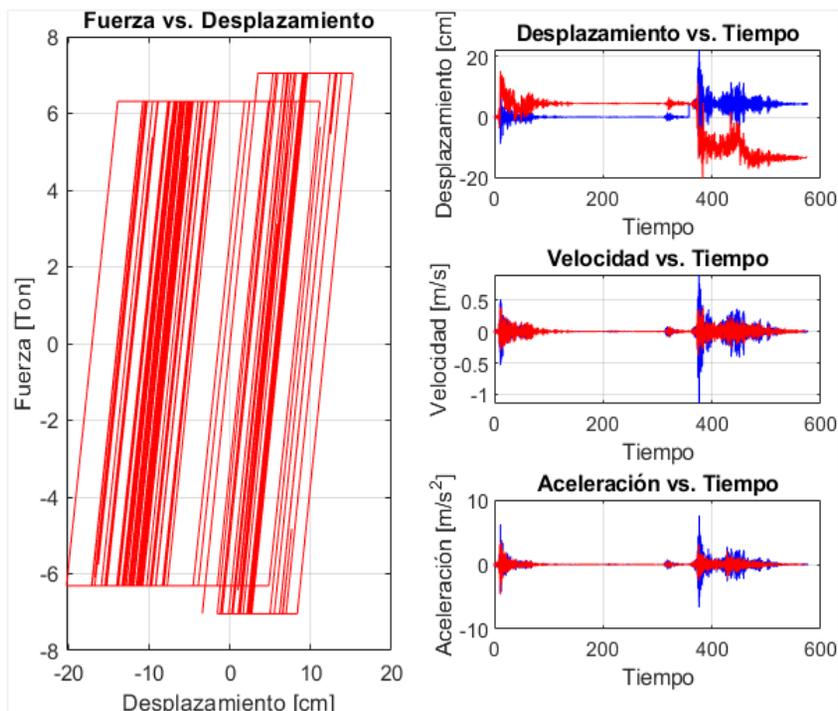


Figura 6 Respuesta a una secuencia sísmica en el sistema equivalente de 1gdl para una secuencia sísmica

La sumatoria del área de cada ciclo de histéresis del diagrama (Fuerza vs Desplazamiento, figura 6) corresponde a la energía disipada por daño en el pórtico.

Previamente es necesario pasar del sistema de múltiples grados de libertad al sistema de un grado de libertad equivalente a través del factor de participación

modal y con el procedimiento inverso se obtiene la respuesta en el sistema de múltiples grados de libertad (Figura 7).

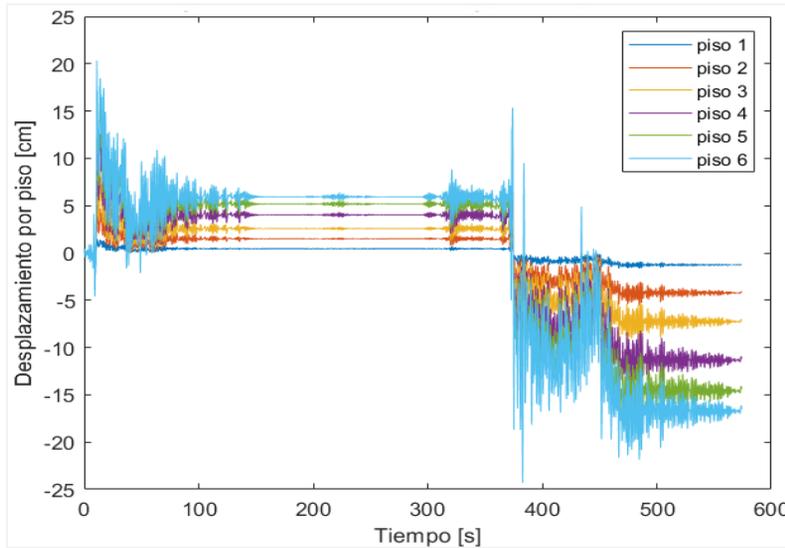


Figura 7 Desplazamiento en cada instante de tiempo por piso

Las derivas o distorsiones de piso son índices de daño no acumulativos ampliamente usados para evaluar el daño en los edificios (Figura 8), la deriva instantánea llega a alrededor de 2% para el análisis no lineal, en el límite del normativo del 2%, para el análisis lineal la deriva máxima es del 2.5%.

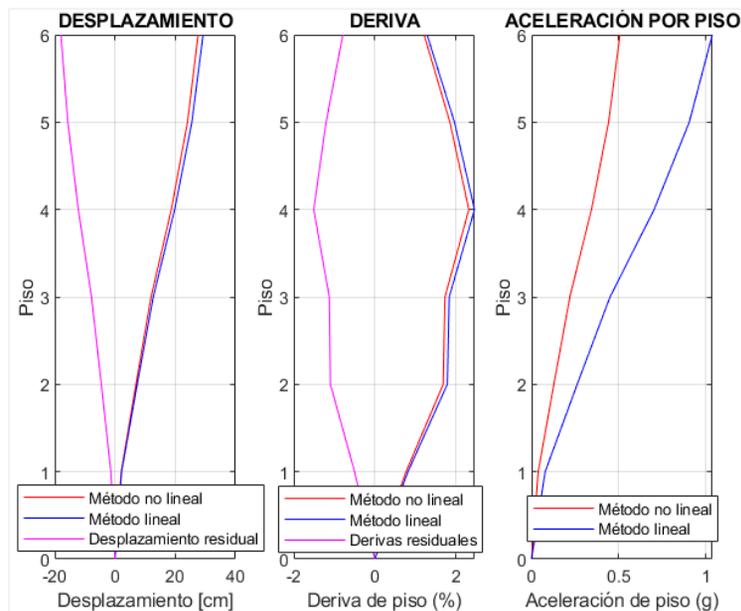


Figura 8 Respuestas máximas de desplazamiento, derivas y aceleración

Se obtiene el índice de daño (Figura 9) propuesto por Rodríguez (2015):

$$I_d = \frac{\Gamma^2 E_H}{\left(2\pi \frac{H}{T} D_{rc}\right)^2}$$

Donde Γ es el factor de participación modal, E_H es la energía histerética disipada por deformación para el sistema equivalente de un grado de libertad normalizada para la masa y D_{rc} es el coeficiente de deriva del techo en el nivel de colapso potencial del edificio, Rodríguez (2015) recomienda un valor de 0,025 para edificios de concreto armado y H/T es un indicador de rigidez lateral ampliamente usado en Chile para evaluar la vulnerabilidad de edificios, donde H es la altura y T el periodo fundamental.

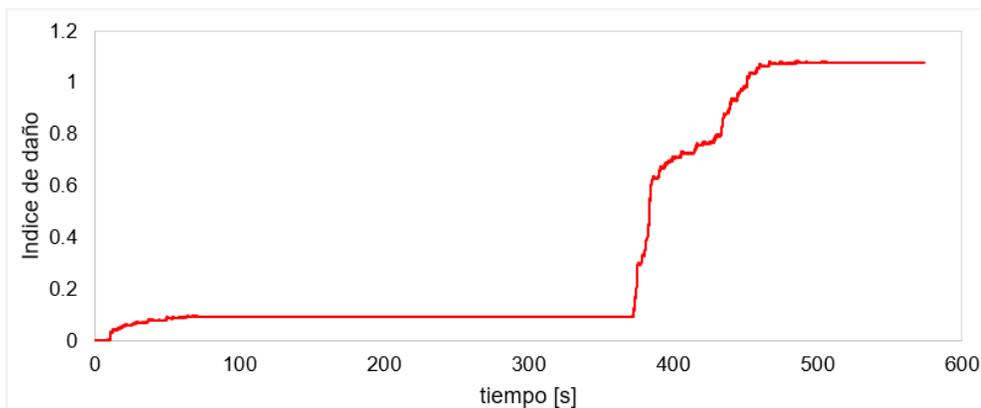


Figura 9 Índice de daño acumulado, Rodríguez (2015)

3. RESULTADOS

3.1 Calificación del daño y curvas de Capacidad

La calificación del daño para el pórtico se evalúa entre insignificante y leve, es decir, el daño no afecta significativamente las propiedades estructurales a pesar de una pérdida de rigidez.

El área bajo la curva de capacidad considerando la estructura sin daño es de 8.26 tnf*m y luego del daño se reduce a 7.89 tonf*m, lo que representa una pérdida de capacidad del 4.2%, por lo que la estructura no tiene la capacidad inicial para disipar energía.

3.2 Evaluación del Índice de Daño Acumulado

El análisis revela que, tras el sismo de Pedernales, el índice de daño fue de alrededor de 0.10 sin embargo, al considerar un evento prolongado como el de Ica, el índice supera el límite de 1 (Figura 9), indicando un riesgo de colapso en futuros eventos, entre mayor sea la duración del sismo mayor número de ciclos

de deformación debe soportar la estructura y por ende el daño se agranda y se acumula hasta el próximo evento.

4. DISCUSIÓN

Los resultados confirman la necesidad de considerar el daño acumulado en el diseño estructural. Aunque el daño tras el sismo de 2016 fue calificado como leve, la estructura sigue en riesgo debido a la acumulación de ciclos inelásticos. Esto sugiere que en los análisis estructurales se deben incorporar índices de daño acumulado como el de Rodríguez (2015) para lo cual se requiere hacer análisis no lineales como se mostró en el presente artículo. Por lo dicho es imperioso reforzar el edificio estudiado y los que se encuentren en situación similar en la ciudad de Portoviejo y la provincia de Manabí en general.

5. CONCLUSIONES

La capacidad estructural disminuye luego del sismo de Pedernales (2016), aunque no de manera significativa, sin embargo, la acumulación de ciclos inelásticos puede provocar daños irreparables o colapso para un sismo de larga duración o el sismo de diseño normativo.

Para evaluar los efectos de las secuencias sísmicas se requiere hacer análisis no lineal, ya que captura mejor las respuestas en comparación con los métodos lineales tradicionales como el método modal de respuesta espectral.

Es esencial incorporar índices de daño acumulado en los análisis estructurales en la etapa de diseño para mejorar la seguridad de las edificaciones, lo cual puede significar para el caso de edificios convencionales el uso de sistemas resistentes a carga lateral más rígidos como muros de corte, por ejemplo, en vez de únicamente pórticos.

Es necesario reforzar los edificios, se ha mostrado que el daño acumulado puede provocar daños estructurales aun cumpliendo con los límites normativos como las derivas o desplazamientos.

6. REFERENCIAS

- Arroyo, D., & Ordaz, M. (2006). Demandas de energía histerética en osciladores elastoplásticos sujetos a ruido blanco gaussiano. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (74), 103-138. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61807404>
- Falconí, R. A., & Vera, J. R. (2024). ESTUDIOS POST TERREMOTO DE ESTRUCTURAS AFECTADAS POR EL SISMO DE 2016. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 29(1), 75-141. Disponible en <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/riie/article/view/3405>
- FEMA. (1999). Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings: Basic Procedures Manual (FEMA 306). Federal Emergency Management Agency.

- Planprocons. (2016). Análisis, estudio y determinación de las soluciones más idóneas para el reforzamiento estructural de las edificaciones públicas afectadas por el terremoto del 16 de abril del 2016 en el cantón Portoviejo, provincia de Manabí, grupo N. 1. Informe técnico de consultoría.
- Rodriguez, M. (2015). Evaluación de una propuesta de índice de daño para un conjunto de sismos. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 44(8), 1255-1270. <https://doi.org/10.1002/eqe.2512>
- Rodríguez, Mario E.. (2019). Interpretación de los daños y colapsos en edificaciones observados en la Ciudad de México en el terremoto del 19 de septiembre 2017. *Ingeniería sísmica*, (101), 1-18. Epub 30 de abril de 2020. <https://doi.org/10.18867/ris.101.528>
- Wen, W., & C. Z. (2017). Marco para la evaluación de la vulnerabilidad de la estructura bajo secuencias de sismo principal-réplica. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 101, 41-52.