

Artículo de investigación

Comparación estructural del punto de desempeño mediante el método *pushover* para tres sistemas de estructuras diferentes

Josué Ernesto Ulcuango-Cabascango^[1]  Erik Gabriel Villavicencio-Cedeño^[1] 

[1] Universidad Estatal del Sur de Manabí (UNESUM). Facultad de Ciencias Técnicas. Carrera de Ingeniería Civil. Jipijapa, Ecuador

Autor para correspondencia: erik.villavicencio@unesum.edu.ec



Resumen

El objetivo de esta investigación versa en comparar la estructura al punto de desempeño mediante el método *pushover* a tres sistemas de estructuras diseñadas para un edificio de hormigón armado de 8 niveles. Se efectuó mediante una investigación documental, aplicada y descriptiva, haciendo énfasis en la recopilación e indagación de datos teóricos para un análisis estático no lineal de estructuras. Los principales resultados del análisis demostraron que el punto de desempeño y ductilidad de los tres sistemas de estructuras sismorresistentes mediante el análisis *pushover*, deben cumplir con los criterios de aceptabilidad a través de la curva de capacidad estructural del edificio. Se concluye que el ámbito de esta investigación es desarrollado para demostrar el desempeño y ductilidad estructural por el análisis estático no lineal mediante el programa *Etabs*.

Palabras Clave: *sistemas de estructuras, desempeño, ductilidad, sismorresistente, pushover.*

Structural comparison of performance point using pushover method for three different structure systems

Abstract

The objective of this research is to compare the structure at the point of performance using the *pushover* method to three structural systems designed for an 8-story reinforced concrete building. It was carried out through documentary, applied and descriptive research, emphasizing the collection and information of theoretical data for a non-linear static analysis of structures. The main results of the analysis demonstrate that the performance and ductility point of the three seismic structure systems through *pushover* analysis must meet the acceptability criteria through the structural capacity curve of the building. It is concluded that the scope of this research is developed to demonstrate structural performance and ductility by nonlinear static analysis using the *Etabs* program.

Keywords: *structural systems, performance, ductility, earthquake resistance, pushover.*

1. Introducción

La ingeniería estructural es una de las ramas tradicionales de la ingeniería civil caracterizada por emplear aspectos de diseños y cálculos matemáticos en la parte estructural de una edificación u obras civiles, para la implantación en diversos ámbitos constructivos. Un proyecto enmarcado a ver la perspectiva y conocer el comportamiento de los sistemas estructurales en sus diferentes aspectos de diseño y análisis para ser aplicado en la realidad, ayuda a conocer la eficiencia del edificio al momento de estar sujeta a las acciones sísmicas producidas por la naturaleza.

La característica principal de esta investigación es demostrar la importancia de las solicitaciones de diseño y análisis estructural por el método no lineal, conociendo la cuasi realidad de las deformaciones inelásticas en proporción al desplazamiento y nivel de desempeño en el rango no lineal de la estructura.

Considerando que el Ecuador se encuentra ubicado en una de las regiones con mayor actividad sísmica por el movimiento de las placas tectónicas de la Placa de Nazca y, su ubicación sobre el Cinturón de Fuego del Pacífico, las edificaciones implementadas en el país, presentan problemas de diseño y análisis estructural siendo vulnerables ante eventos sísmicos de gran intensidad.

El propósito de esta investigación se efectuó en comparar el punto de desempeño y ductilidad de tres sistemas de estructuras diferentes mediante el análisis no lineal basado por el método *pushover*, en determinación a los desplazamientos adquiridos por las fuerzas cortantes y los criterios de aceptabilidad a través de la curva de capacidad estructural del edificio.

2. Principios teóricos. Peligrosidad sísmica

Sismicidad

Denominado al estudio de una continua deformación de la litosfera o placas tectónicas, que implican establecer los análisis y registros de intensidad, grado y número de sismos por las fallas (sismicidad), en relación a la mecánica de rocas, sismología, geología estructural, entre otras, para determinar la frecuencia de los movimientos producidos en una determinada zona de la región geográfica (Muñoz-Martín & de Vicente, 2010).

Análisis estructural

La función del análisis estructural es evaluar las fuerzas internas y las deformaciones del sistema estructural, estableciendo el cumplimiento de los requisitos de resistencia, funcionamiento y estabilidad en su estructura, de modo que se realizara los procedimientos analíticos para el análisis estructural, debiendo cumplir con la compatibilidad

de deformaciones y el equilibrio de fuerzas (ACI Committee 318, 2014).

Sistema estructural

Consiste en la unificación de miembros, nudos y conexiones, donde cada uno cumple una función específica. Un miembro estructural puede pertenecer a uno o más sistemas estructurales, cumpliendo funciones diferentes en cada sistema y debiendo cumplir con todos los requisitos de detallado de los sistemas estructurales a los que pertenece. Los nudos y conexiones son lugares comunes a los miembros que se interceptan o son elementos utilizados para conectar un miembro a otro, pero la distinción entre miembros, nudos y conexiones puede depender de la forma como se idealice la estructura en su diseño (ACI Committee 318, 2014).

a) Sistema con pórticos especiales resistentes a momento

Son pórticos utilizados con capacidades de resistir combinaciones de fuerza cortante, momento y fuerza axial al instante de que se genere las fuerzas sísmicas de un sismo intenso (Moehle, 2015).

b) Sistema con muros estructurales

Son sistemas especiales que están proporcionados para resistir combinaciones de corte, momento y fuerza axial, sin recibir pérdidas críticas de rigidez, que surgen cuando un edificio se balancea a través de múltiples ciclos de desplazamiento durante un fuerte terremoto o sismo intenso (Moehle, 2015).

c) Sistemas arriostrados concéntricamente

Son arriostramientos con condición de diseño usual para que cualquier estructura reticulada evite los esfuerzos de flexión y corte en los elementos que los integra, por las acciones laterales de viento y sismo que se inducen en la estructura por los esfuerzos axiales de tracción y compresión (Crisafulli, 2018).

No linealidad de los materiales

Es el esfuerzo de deformación del hormigón confinado y no confinado que tienden a mostrar un enfoque unificado de esfuerzo-deformación de armaduras rectangulares y circulares, consistente en la ejecución de cargas a compresión monótona (carga que sigue tendencias muy pronunciadas de subida o de bajada) para una velocidad lenta (cuasi-estática), que determinará la ductilidad del material (Mander et al., 1988).

No linealidad de las secciones

a) Momento curvatura

Las relaciones de momento-curvatura es contemplada en tres zonas de trabajado momento actuante (M), momento cedente (M_y) y momento último (M_u), dado a $M \leq M_y$ es la zona donde el elemento no presenta daño y es elástica, siendo M_y el momento de fluencia, es decir que el elemento empieza a

ceder o a deformarse continuamente durante su desplazamiento, y dado al momento último (M_u) el elemento empieza a perder resistencia a mayor grado, hasta llegar a un punto crítico donde se le es considerado inservible (Aguiar et al., 2015).

b) Momento rotación

El diagrama de momento-rotación mostrada por la nomenclatura de la ASCE-41 es idealizada para hallar las relaciones de momento-rotación, donde el eje horizontal del diagrama hace referencia a una rotación (θ) o desplazamiento (Δ) es decir a una deformación y en el eje vertical a una fuerza (Q/Q_y). En efecto para el caso de flexión Q/Q_y sería M/M_y , y en síntesis el valor para el punto B es la unidad, como tal el momento es el de fluencia M_y que está asociado a una rotación θ_y (Aguiar et al., 2015).

Análisis Estático No Lineal pushover

Un análisis no lineal (NSP) incorporará las características de carga-deformación no lineal de los elementos del edificio que deberá estar sujeto a las cargas laterales que aumentan monótonamente, para determinar el punto de desempeño de la estructura por el sismo de diseño.

La capacidad de una estructura es evaluada a partir de un análisis estático no lineal, denominado análisis *pushover* que representa la susceptibilidad de la estructura a partir de una representación bilineal del espectro de capacidad (Vargas, 2013).

El análisis estático no lineal consiste en una serie de análisis estáticos lineales secuenciales en los que la matriz de rigidez, y el vector de carga, se adaptan para representar los efectos de inicio de daño y la forma de desviación modal de la estructura a medida que la respuesta de carga y deformación aumenten de manera escalonada (National Institute of Standards and Technology, 2017).

Desplazamiento del nodo de control

Mediante los criterios de la ASCE/SEI 41-17 (2017), la relación entre la fuerza cortante y el desplazamiento lateral del nodo de control para la curva de capacidad se establecerá un desplazamiento del nodo de control que oscilan entre 0 y 150% del desplazamiento objetivo, con propósitos de estudiar los comportamientos probables de la estructura, dado que el nodo de control estará sujeta al centro de la masa en el techo del último nivel del edificio y donde el desplazamiento se relacionará para las fuerzas sísmicas especificadas.

Distribución de la carga lateral

La distribución de las cargas laterales se aplicará al modelo en proporción a la distribución de masa en el plano de cada diafragma de piso, es decir la distribución vertical de dichas fuerzas será proporcional a la forma del modo fundamental en la dirección considerada. Además, las cargas

gravitacionales se incluirán en el modelo para su combinación con las fuerzas sísmicas, aplicando su direccionalidad tanto en la dirección positiva como en la dirección negativa, y se utilizarán los efectos sísmicos máximos para el análisis (American Society of Civil Engineers, 2017).

Curva fuerza-desplazamiento idealizada para NSP

La curva idealizada (Figura 1) de fuerza-desplazamiento para el análisis estático no lineal es “la relación que existe entre el corte de la base y el desplazamiento del nodo de control para calcular la rigidez lateral efectiva “ Ke ” y el límite elástico efectivo “ V_y ” del edificio”.

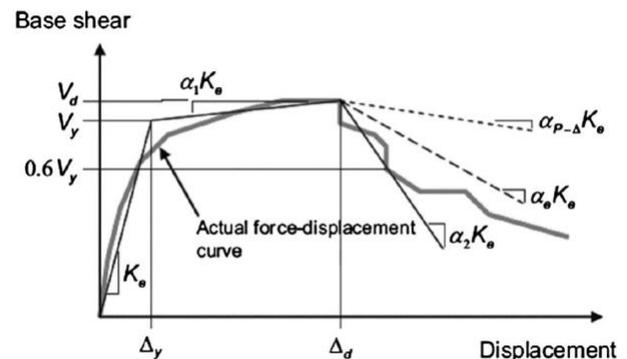


Figura 1: Curva idealizada de Fuerza – Desplazamiento, Obtenido de la norma ASCE/SEI 41-17: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. American Society of Civil Engineers. (2017)

Niveles de rendimiento y criterios de aceptación

Los niveles de rendimiento de una estructura son consideraciones enlazadas al desempeño sísmico que son inducidas a los daños estructurales, que generalmente se aplica en tres niveles de rendimiento. Como criterios de aceptación son aspectos que proporcionan los términos de deformación y las demandas de fuerza en los componentes o miembros estructurales (Deierlein et al., 2010).

Ocupación inmediata: nivel de desempeño donde la estructura (hormigón armado) presenta fisuras o agrietamientos leves en sus elementos primarios y desplazamientos insignificantes.

Seguridad de vida: nivel de desempeño que exterioriza daños significativos en las vigas por flexión, agrietamientos en elementos no dúctiles, daños en columnas cortas, recubrimientos con desprendimientos menores, desplazamiento mayorado con capacidad de causar daños en los elementos no estructurales y formación de rotulas plásticas en los elementos dúctiles.

Prevención de colapso: nivel de desempeño con daños graves en los elementos estructurales, agrietamientos profundos, daños en los nodos, daños en las columnas y

vigas, desprendimiento del hormigón con algunos aceros doblados, formación de rotulas plásticas con mayor intensidad, desplazamiento con suficiente daño estructural y permanente, llegando a ser una estructura inestable.

Los criterios de aceptación son características relacionadas a distintos aspectos, tales como la deriva de piso, y la formación de rótulas plásticas en base a las respuestas específicas e integrales de la estructura (Padilla, 2023).

Evaluación del desempeño estructural

Determina los niveles de capacidad o de diseño para representar la demanda de desempeño a cada etapa de evaluación en consideración a los esfuerzos, deformaciones, distorsiones, aceleraciones, y ductilidades en términos de demandas versus capacidades (Gaxiola-Camacho, 2022).

Ductilidad estructural

La ductilidad es el componente principal para determinar los daños y asegurar la supervivencia de la estructura ante la intensidad de fuerzas que recibe por la acción sísmica. Según el grado de ductilidad se define a una estructura como dúctil o semidúctil aquellas controladas por deformación y frágiles aquellas controladas por fuerza, según a la capacidad de deformarse, redistribuir y disipar energía durante eventos sísmicos, contribuyendo así a una respuesta más resiliente y segura (Cueto, 2024).

3. Metodología

La metodología integrada en esta investigación es de carácter documental, aplicada y explicativa, haciendo énfasis en la recopilación e indagación de datos teóricos y numéricos con respecto a la utilización de fuentes existenciales y confiables para un análisis no lineal de estructuras.

Como enfoque de esta investigación es de tipo cuantitativo, que de acuerdo a Hernández et al. (2014) se “*utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin establecer pautas de comportamiento y probar teorías*”.

Los instrumentos empleados a la recolección de información para este proyecto, son las que se designan a continuación: Guía de observación: empleada mediante cálculos manuales, cálculos digitales, hojas de cálculo personalizado y software “Etabs”.

4. Resultados

4.1. Aspectos generales para el análisis de estructuras

a) Esta investigación es empleada al análisis de tres sistemas de estructuras de hormigón armado, cada una con sus distintas propiedades de miembros estructurales, constituidas en los siguientes sistemas:

- Sistema estructural aporticado de hormigón armado.

- Sistema estructural de hormigón armado con muros de corte.
- Sistema estructural de hormigón armado con diagonales concéntricas.

b) La geometría de diseño es empleada con dimensiones iguales en los tres sistemas, definida en los siguientes aspectos:

- Longitud en el eje X = 20.00 m (cada vano de 5.00 m).
- Longitud en el eje Y = 18.00 m (cada vano de 6.00 m).
- Área de diseño = 360.00 m².
- Altura de entrepiso = 3.20 m.
- Número de pisos = 8 niveles.

c) Los tres sistemas estructurales de hormigón armado están constituidos a optar por una deriva de entre el 1.50% y 1.60%, es decir cada estructura diseñada contemplará de similares derivas.

4.2. Secciones de elementos para los diseños estructurales

Las características de las secciones geométricas de cada elemento estructural fueron empleados de acuerdo a los requerimientos de prediseño que muestra la norma ACI 318, donde cada edificio modelado tendrá una capacidad y una resistencia diferente. La información se presenta en la **Tabla 1**: Sección geométricas de las columnas; **Tabla 2**: secciones geométricas de las vigas; **Tabla 3**: secciones geométricas de los muros estructurales y; **Tabla 4**: secciones geométricas de las riostras.

Tabla 1: Secciones geométricas de las columnas

Cuadro de columnas				
Tipo	Dimensiones		Nivel (m)	
	b (m)	h (m)		
Edificio I				
I	1.05	0.95	Nv. +3.20	Nv. +9.60
II	0.95	0.85	Nv. +12.80	Nv. +19.20
III	0.80	0.70	Nv. +22.40	Nv. +25.60
Edificio II				
I	0.85	0.75	Nv. +3.20	Nv. +9.60
II	0.75	0.65	Nv. +12.80	Nv. +19.20
III	0.65	0.55	Nv. +22.40	Nv. +25.60
Edificio III				
I	0.80	0.70	Nv. +3.20	Nv. +9.60
II	0.70	0.60	Nv. +12.80	Nv. +19.20
III	0.60	0.50	Nv. +22.40	Nv. +25.60
IV	0.90	0.80	Nv. +3.20	Nv. +9.60

Tabla 2: Secciones geométricas de las vigas.

Cuadro de vigas					
Tipo	Dimensiones		Eje	Nivel (m)	
	b (m)	h (m)			
Edificio I					
I	0.50	0.60	X	Nv. +3.20	Nv. +25.60
II	0.50	0.65	Y	Nv. +3.20	Nv. +25.60
Edificio II					
I	0.40	0.60	X	Nv. +3.20	Nv. +25.60
II	0.40	0.50	Y	Nv. +3.20	Nv. +25.60
Edificio III					
I	0.40	0.60	X	Nv. +3.20	Nv. +25.60
II	0.40	0.60	Y	Nv. +3.20	Nv. +25.60

Tabla 3: Secciones geométricas de los muros estructurales

Cuadro de muros					
Tipo	Geometría		Nivel (m)		Sentido
	Lw (m)	t (cm)			
I	5.00	0.40	Nv. +0.00	Nv. +25.60	X
II	6.00	0.40	Nv. +0.00	Nv. +25.60	Y

Tabla 4: Secciones geométricas de las riostras

Cuadro de riostras				
Tipo	Geometría		Nivel (m)	
	D (cm)	t (cm)		
I	21.84	1.59	Nv. +3.20	Nv. +12.80
II	19.05	0.95	Nv. +12.80	Nv. +16.00
III	15.24	0.95	Nv. +16.00	Nv. +19.20
IV	14.22	0.95	Nv. +19.20	Nv. +22.40
V	12.70	0.63	Nv. +22.40	Nv. +25.60

Los edificios modelados mediante a los aspectos generales y la caracterización de los miembros estructurales en dependencia a cada sistema o modelo, son asignados al programa ETABS para los respectivos análisis estáticos lineales y análisis estáticos no lineales (Figura 2).

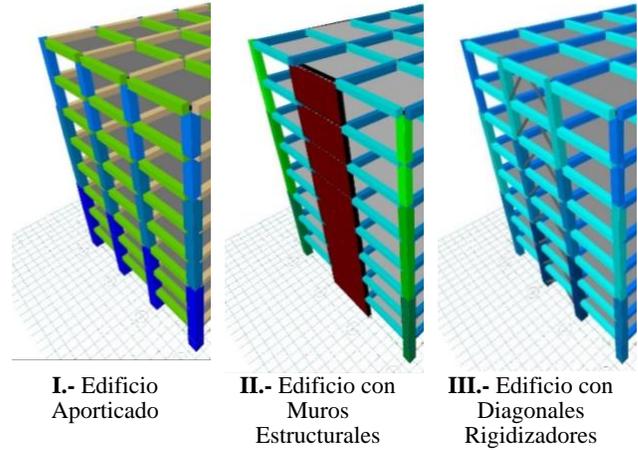


Figura 2: Diseños estructurales de hormigón armado.

4.3. Análisis lineal mediante el peligro sísmico

El análisis lineal ejecutado para los edificios sismorresistentes, son desarrollados mediante el uso de la normativa NEC-15 de Diseño Sismorresistente de Peligro Sísmico, describiendo de tal manera las características para el análisis del sistema estructural.

Zonificación sísmica (Tabla 5)

Tabla 5: Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada. Fuente: Tomado de la Norma Ecuatoriana de la Construcción del Capítulo de peligro sísmico y diseño sismo resistente.

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Tipo de suelo

Para este tipo de análisis estructural se asignó un suelo tipo “D” en dirección a la zonificación seleccionada, en este caso a la provincia de Imbabura, cantón Otavalo, lo cual es una región que contiene perfiles de suelos rígidos.

Factores de sitio al perfil del suelo (Tabla 6)

Tabla 6: Factores de sitio. Fuente: Tomado de la Norma Ecuatoriana de la Construcción del Capítulo de peligro sísmico y diseño sismo resistente (2015).

Tipo de perfil del subsuelo		Zona sísmica y factor Z					
		I	II	III	IV	V	VI
		0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.5
Fa	D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
Fd	D	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
Fs	D	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.40

Factor de importancia

El factor de importancia para estos tipos de diseños estructurales es asignado a un “ $I = 1.0$ ”, dando a conocer que es una estructura de edificación tipo residencial.

Coefficiente de ductilidad

También denominado como factor de reducción de resistencia sísmica, que determina la adaptabilidad o ductilidad del sistema estructural a diseñarse, el cual se optó por los sistemas estructurales con pórticos especiales dado a un coeficiente de “ $R = 8$ ”.

Irregularidad en elevación y en planta

Cada diseño estructural no presenta ninguna irregularidad en elevación y en planta, dado a que el diseño por elevación es constituido simétricamente o constante en su forma vertical y por su diseño en planta todos los niveles son constituidos por un centro de rigidez semejante al centro de masa, por ende, el coeficiente de configuración estructural es asignado a un “ $\Phi P = 1$ y $\Phi E = 1$ ”.

Coefficiente C_t

Estructura con pórticos especiales de hormigón armado
 $C_t = 0.055$

Coefficiente para cálculo del periodo

Coefficientes para estructura con pórticos especiales de hormigón armado

$\alpha = 0.9$ (Edificio I)

$\alpha = 0.75$ (Edificio II, Edificio III)

Factor de coeficiente del suelo

El valor utilizado para el coeficiente del suelo es asignado a un “ $r = 1$ ”, que es vinculado para el diseño espectral elástico y que cuyo factor aplica para el uso de todo tipo de suelos, excepto para un suelo tipo E.

Relación de ampliación espectral

La relación de ampliación espectral es basada en la selección de la sismicidad de la región a la cual la estructura será diseñada, dado a esto la selección se basa a un “ $n = 2.48$ ”, que son determinadas en relación a las provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos.

Periodo límite inferior

Período límite de vibración inferior que representa al espectro sísmico en el sismo de diseño.

$T = 0.127$ seg.

Periodo de vibración estructural

Periodo fundamental de vibración de la estructura definida mediante la utilización de los coeficientes de dependencia del tipo de la estructura y la altura máxima de la edificación.

$T = 1.018$ seg. (Edificio I)

$T = 0.626$ seg. (Edificio II, Edificio III)

Periodo límite superior

Período límite de vibración superior que representa al espectro sísmico en el sismo de diseño.

$T = 0.698$ seg.

Aceleración espectral

Solución del espectro de respuesta elástico de aceleraciones en dependencia al periodo de vibración de la estructura.

$S_a = 0.82$ g (Edificio I)

$S_a = 1.19$ g (Edificio II, Edificio III)

Espectro de diseño (Figura 3)

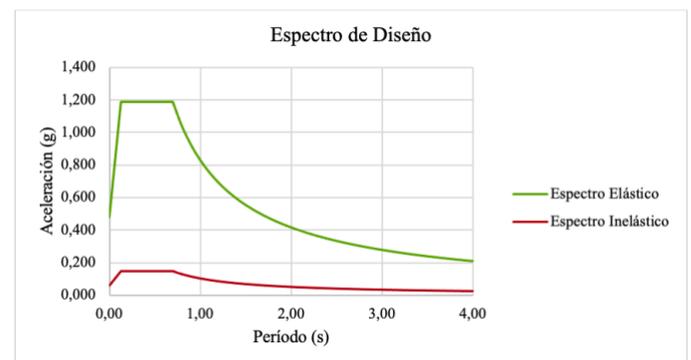


Figura 3: Espectro de diseño para un T de 4s.

Relación de cortantes sísmicos (Tabla 7, Figura 4 y Figura 5).

Tabla 7: Resultados de la relación de los cortantes sísmicos

TABA: Relación de cortantes sísmicos				
Sentido	C. Estático Ve [Ton]	C. Dinámico Vd [Ton]	NEC-SE-DS V _D = 85% Ve [Ton]	Factor de Escala
Edificio aporticado				
X	521.10	408.87	442.94	1.083
Y	521.10	410.13	442.94	1.080
Edificio con muros estructurales				
X	699.78	418.31	594.81	1.422
Y	699.78	426.21	594.81	1.396
Edificio con diagonales rigidizadores				
X	676.43	420.17	574.97	1.368
Y	676.43	423.20	574.97	1.359

Derivas estructurales

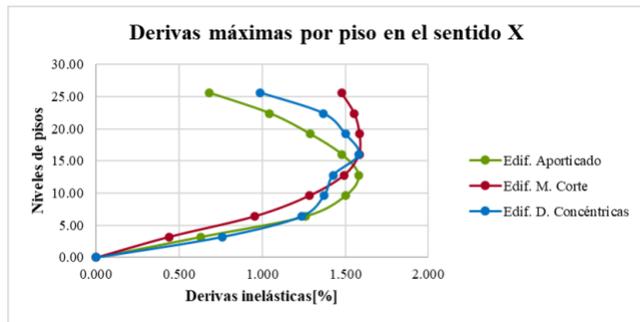


Figura 4: Deriva máxima de la historia en el sentido X estructural

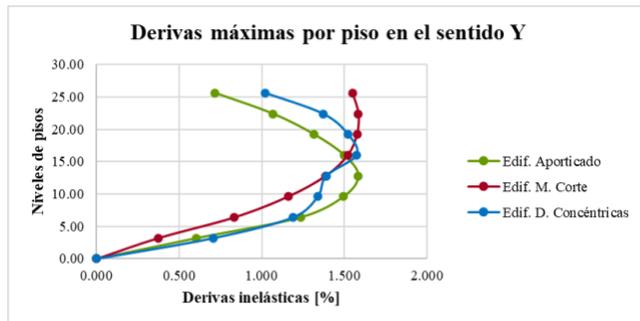


Figura 5: Deriva máxima de la historia en el sentido Y estructural

4.4. Análisis Estático No inel – Pushover

El Análisis Estático No Lineal por el método de *pushover* demuestra en estos estudios la comprobación estructural de

los edificios de hormigón armado, donde se evidencia el comportamiento tanto en los desplazamientos, como en las rotulaciones de los elementos en el rango no lineal para determinar el punto de desempeño.

Con los criterios de desempeño se determinó la aceptabilidad de la estructura ante un evento sísmico, en la que se visualiza el estado de su comportamiento mediante los desplazamientos inducidos por el programa *Etabs* en la estructura.

No linealidad de los materiales

La no linealidad de los materiales dado a este apartado demuestra el estado límite del hormigón no confinado y confinado, donde el hormigón no confinado presenta fragilidad ante solicitaciones de tracción, pero opta una buena resistencia a los esfuerzos de compresión, mientras que el hormigón confinado tiende a mostrar una buena resistencia a los efectos o esfuerzos de tensión.

No linealidad de las secciones

Dado a los elementos estructurales en relación a los diagramas de momento – curvatura y momento – rotación, demuestran las capacidades de comportamiento en el rango no lineal sobre los aspectos de flexión y flexo compresión en las estructuras.

Desempeño estructural

El análisis de desempeño estructural para los tres sistemas de edificios, son aplicados para el sismo de diseño con propósitos de obtener resultados de desplazamiento, fuerza cortante, y ductilidad en relación al grado de libertad de la estructura (Figura 6, Figura 7 y Figura 8).

A) Edificio Aporticado de Hormigón Armado

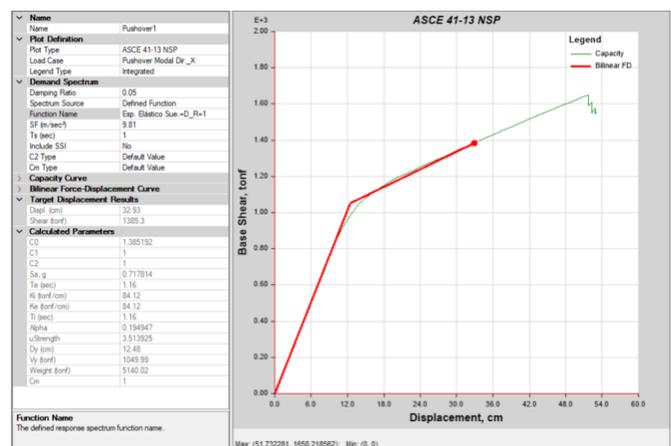


Figura 6: Análisis de la curva Pushover (Sentido X)

B) Edificio de Hormigón Armado con Muros Estructurales

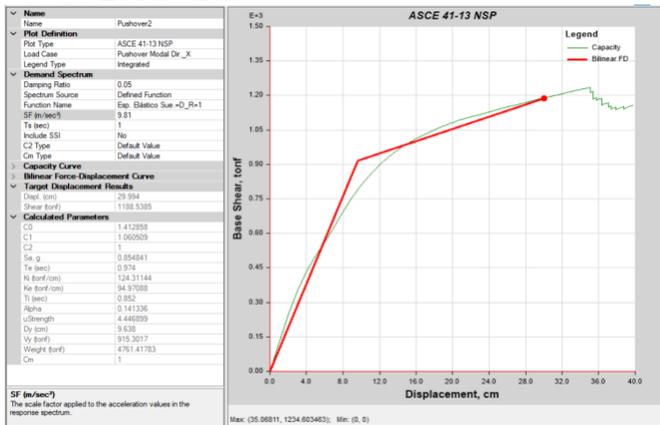


Figura 7: Análisis de la curva Pushover (Sentido X)

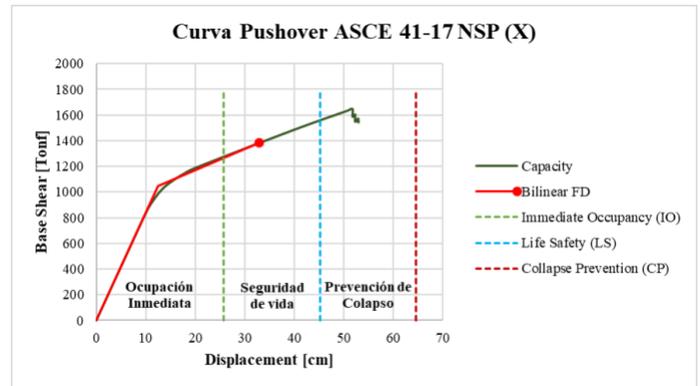


Figura 9: Curva Pushover (Sentido X)

C) Edificio de Hormigón Armado con Diagonales Rigidizadores

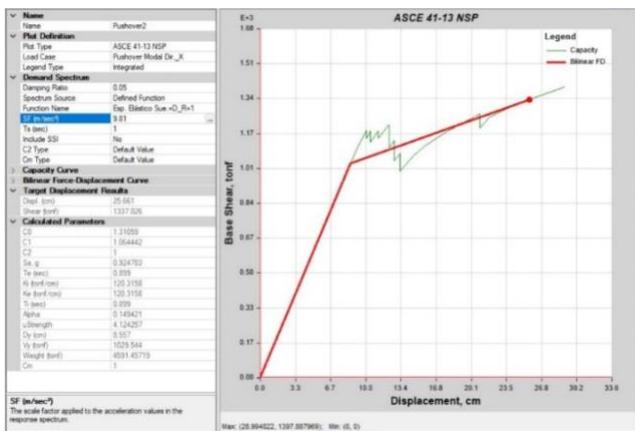


Figura 8: Análisis de la curva Pushover (Sentido X)

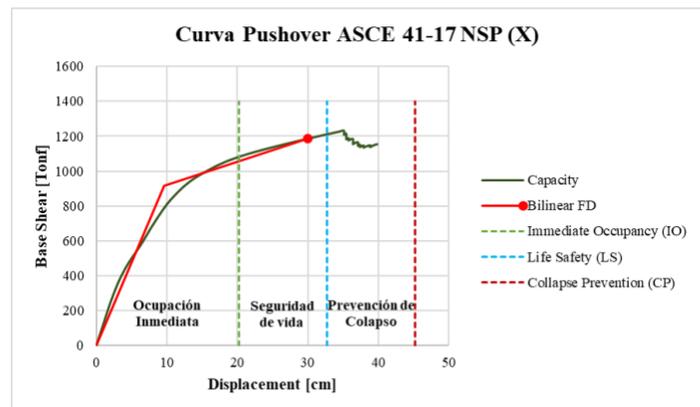


Figura 10: Curva Pushover (Sentido X)

C) Edificio de Hormigón Armado con Diagonales Rigidizadores

Curva Pushover mediante el criterio de aceptabilidad

Con los procesos de análisis se determinaron que los edificios estructurales se encuentran en el rango de Seguridad de Vida, a excepción del edificio de los diagonales rigidizadores que presenta un rango muy cercano al nivel de Prevención de Colapso, la cual son comprobados mediante al punto de desempeño y los criterios de aceptabilidad de la curva *pushover* (Figura 9, Figura 10 y Figura 11).

A) Edificio Aporticado de Hormigón Armado

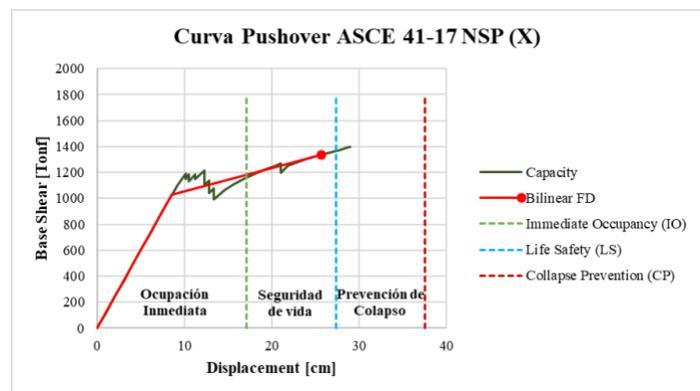


Figura 11: Curva Pushover (Sentido X)

Nivel de desempeño por criterio de aceptabilidad (IO, LS, CP)

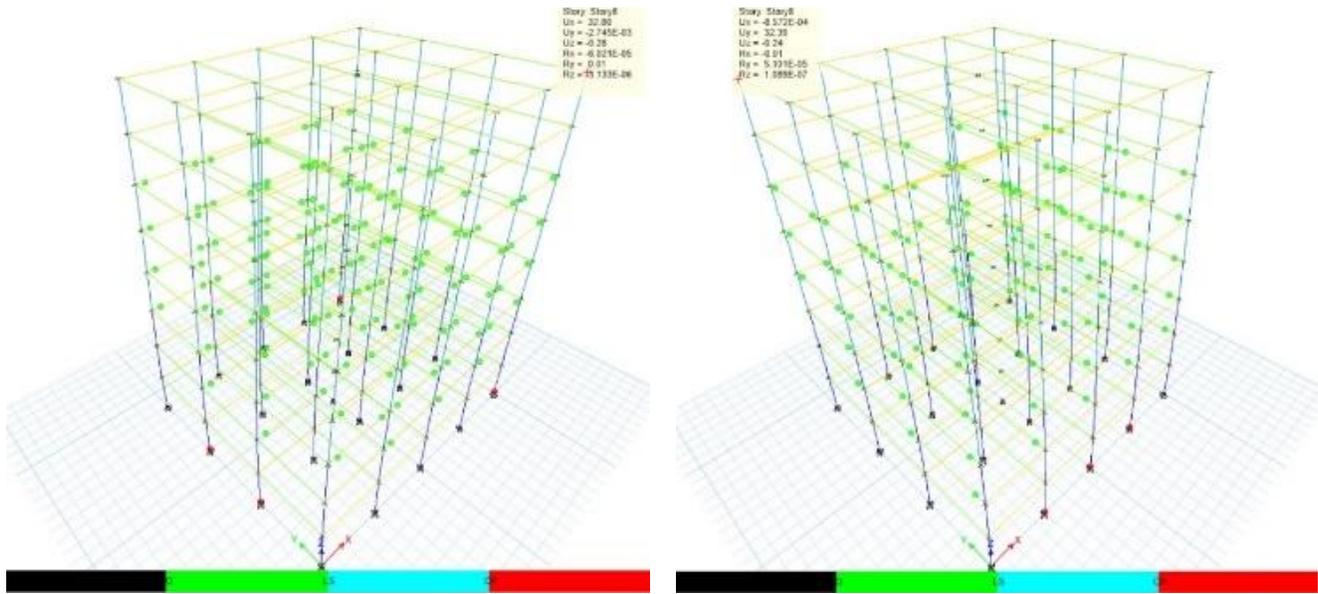
Los niveles de desempeño estructural por el criterio de aceptabilidad tienen las características que se visualiza como Ocupación Inmediata (IO), Seguridad de Vida (LS), y Prevención de Colapso (CP).

En esta investigación las estructuras son analizadas por el criterio de aceptación y aplicadas para un sismo de diseño, donde presentan un nivel de desempeño al estado de “Seguridad de Vida” en relación a las derivas y los desplazamientos adquiridos durante el análisis estructural.

Conjuntamente, las rotulaciones de los elementos estructurales como vigas y columnas se mantienen constantes en su estado de nivel mencionado de acuerdo al grado de libertad.

Para el Edificio Aporticado de Hormigón Armado (**Figura 12, Tabla 8 y Tabla 9**). Para el Edificio de Hormigón Armado con muros estructurales (**Figura 13 y Tabla 10 y Tabla 11**). Para el Edificio de Hormigón Armado con Diagonales Rigidizadores (**Figura 14, Tabla 12 y Tabla 13**).

A) Edificio Aporticado de Hormigón Armado



a) Desempeño estructural en el sentido X.

b) Desempeño estructural en el sentido Y.

Figura 12: Nivel de desempeño estructural del Edificio I

Tabla 8: Resultados del nivel de desempeño estructural del Edificio I

Análisis de la deriva estructural en el sentido X	Análisis de la deriva estructural en el sentido Y
Deriva total de la estructura en el sentido X $\delta_u = \frac{Du}{H_{Edif.}} = \frac{51.73 \text{ cm}}{2560 \text{ cm}} = 0.0202$	Deriva total de la estructura en el sentido Y $\delta_u = \frac{Du}{H_{Edif.}} = \frac{52.12 \text{ cm}}{2560 \text{ cm}} = 0.0204$
Deriva elástica de la estructura en el sentido X $\delta_y = \frac{Dy}{H_{Edif.}} = \frac{12.85 \text{ cm}}{2560 \text{ cm}} = 0.0050$	Deriva elástica de la estructura en el sentido Y $\delta_y = \frac{Dy}{H_{Edif.}} = \frac{13.11 \text{ cm}}{2560 \text{ cm}} = 0.0051$
Deriva inelástica de la estructura en el sentido X $\delta_{inl} = \delta u - \delta y = 0.0202 - 0.0050 = 0.0152$	Deriva inelástica de la estructura en el sentido Y $\delta_{inl} = \delta u - \delta y = 0.0204 - 0.0051 = 0.0153$

Tabla 9: Límites de deformación por derivas máximas. Tomada de la norma ATC-40 (1996). La presente tabla de límites de deformación muestra el rango de las derivas máximas que debe alcanzar una estructura analizada en el rango no lineal.

Table: Deformation Limits (ATC-40 1996)		Performance Level			
Interstory Drift Limite		Immediate Occupancy	Damage Control	Life Safety	Structural Stability
Maximum inelastic drift		0.005	0.005 - 0.015	no limit	no limit

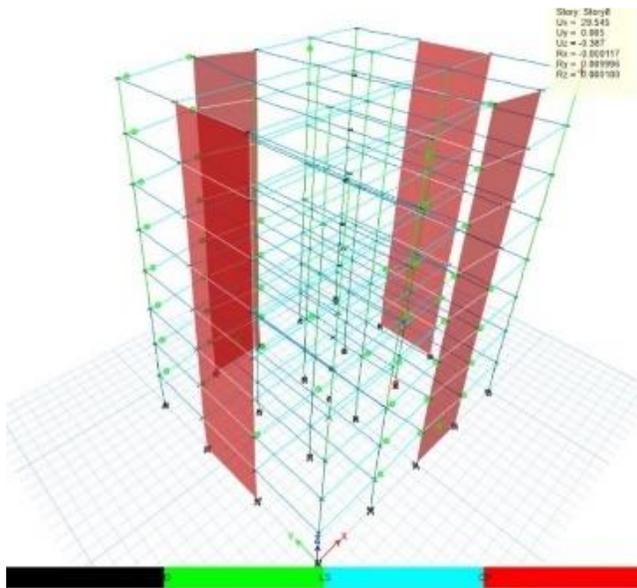
B) Edificio de Hormigón Armado con Muros Estructurales

Tabla 10: Resultados del nivel de desempeño estructural del Edificio II

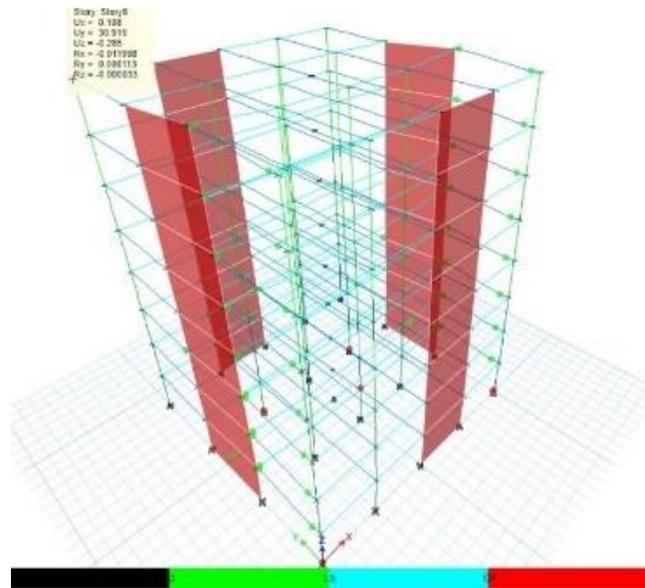
Análisis de la deriva estructural en el sentido X	Análisis de la deriva estructural en el sentido Y
Deriva total de la estructura en el sentido X $\delta_u = \frac{Du}{H_{Edif.}} = \frac{35.07 \text{ cm}}{2560 \text{ cm}} = 0.0137$	Deriva total de la estructura en el sentido Y $\delta_u = \frac{Du}{H_{Edif.}} = \frac{39.01 \text{ cm}}{2560 \text{ cm}} = 0.0152$
Deriva elástica de la estructura en el sentido X $\delta_y = \frac{Dy}{H_{Edif.}} = \frac{10.13 \text{ cm}}{2560 \text{ cm}} = 0.0040$	Deriva elástica de la estructura en el sentido Y $\delta_y = \frac{Dy}{H_{Edif.}} = \frac{11.71 \text{ cm}}{2560 \text{ cm}} = 0.0046$
Deriva inelástica de la estructura en el sentido X $\delta_{inl} = \delta u - \delta y = 0.0137 - 0.0040 = 0.0097$	Deriva inelástica de la estructura en el sentido Y $\delta_{inl} = \delta u - \delta y = 0.0152 - 0.0046 = 0.0106$

Tabla 11: Límites de deformación por derivas máximas. Tomada de la norma ATC-40 (1996). La presente tabla de límites de deformación muestra el rango de las derivas máximas que debe alcanzar una estructura analizada en el rango no lineal.

Interstory Drift Limite	Performance Level			
	Immediate Occupancy	Damage Control	Life Safety	Structural Stability
Maximum total drift	0.01	0.01 - 0.02	0.02	0.33 Vi/Pi
Maximum inelastic drift	0.005	0.005 - 0.015	no limit	no limit



a) Desempeño estructural en el sentido X.



b) Desempeño estructural en el sentido Y.

Figura 13: Nivel de desempeño estructural del Edificio II

C) Edificio de Hormigón Armado con Diagonales Rigidizadores

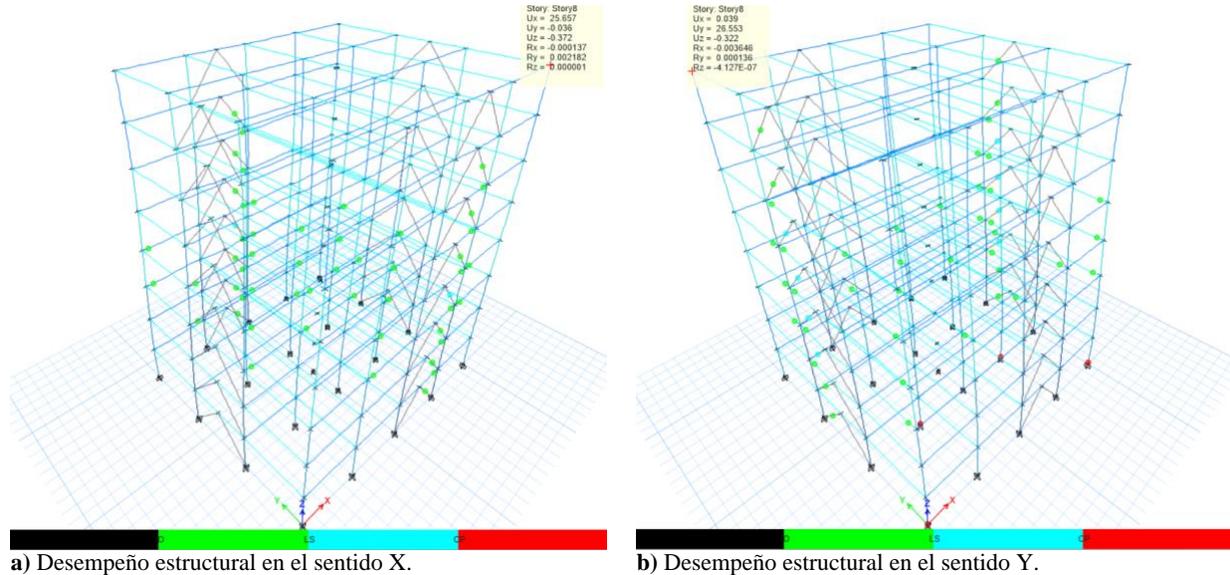


Figura 14: Nivel de desempeño estructural del Edificio III

Tabla 12: Resultados del nivel de desempeño estructural del Edificio III

Análisis de la deriva estructural en el sentido X	Análisis de la deriva estructural en el sentido Y
Deriva total de la estructura en el sentido X $\delta_u = \frac{Du}{H_{Edif.}} = \frac{28.99 \text{ cm}}{2560 \text{ cm}} = 0.0113$	Deriva total de la estructura en el sentido Y $\delta_u = \frac{Du}{H_{Edif.}} = \frac{28.33 \text{ cm}}{2560 \text{ cm}} = 0.0111$
Deriva elástica de la estructura en el sentido X $\delta_y = \frac{Dy}{H_{Edif.}} = \frac{8.55 \text{ cm}}{2560 \text{ cm}} = 0.0033$	Deriva elástica de la estructura en el sentido Y $\delta_y = \frac{Dy}{H_{Edif.}} = \frac{7.33 \text{ cm}}{2560 \text{ cm}} = 0.0029$
Deriva inelástica de la estructura en el sentido X $\delta_{inl} = \delta_u - \delta_y = 0.0113 - 0.0033 = 0.0080$	Deriva inelástica de la estructura en el sentido Y $\delta_{inl} = \delta_u - \delta_y = 0.0111 - 0.0029 = 0.0082$

Tabla 13: Límites de deformación por derivas máximas. Tomada de la norma ATC-40 (1996), La presente tabla de límites de deformación muestra el rango de las derivas máximas que debe alcanzar una estructura analizada en el rango no lineal.

Table: Deformation Limits (ATC-40 1996)					
		Performance Level			
Interstory Drift Limite	Immediate Occupancy	Damage Control	Life Safety	Structural Stability	
Maximum drift	total	0.01	0.01 - 0.02	0.02	0.33 Vi/Pi

Maximum inelastic drift	0.005	0.005 - 0.015	no limit	no limit
-------------------------	-------	---------------	----------	----------

4.5. Comparación estructural al punto de desempeño y ductilidad

La comparación de los resultados de los análisis estructurales demuestra la diferencia del desempeño que lleva a cabo cada edificio o estructura en dependencia al Análisis No Lineal Estático (Figura 15).

Relación de peso estructural



Figura 15: Diferencia de peso estructural

La relación del peso estructural impuesta por su propio peso es considerada de acuerdo a los elementos o miembros

estructurales empleados en la estructura, en este caso cada sistema estructural muestra su diferencia de peso, dando a conocer que la estructura con mayor peso es el edificio aporricado de hormigón armado por ser más robusta en sus elementos estructurales.

Relación de peso sísmico

Conjuntamente al peso de las cargas implementadas en la estructura y al peso de los miembros estructurales se determinó la relación de los pesos sísmicos de cada uno de las estructuras, donde cada peso sísmico tiene su diferencia a su sistema estructural (Figura 17).



Figura 16: Diferencia de pesos sísmicos.

Relación de historias de respuesta estructural

Las siguientes relaciones de historia de respuesta estructural son obtenidas del Análisis Estático No Lineal Pushover (NSP), la cual son consideradas de los análisis de desempeño estructural de cada edificio.

A) Desplazamientos por la acción sísmica de los tres sistemas estructurales

Para este apartado mediante las historias de respuesta nos permiten conocer los desplazamientos adquiridos por cada estructura (Figura 17).

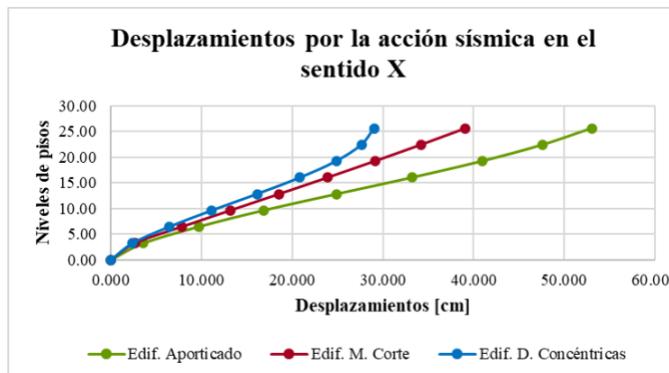


Figura 17: Diferencia de desplazamiento estructural.

B) Derivas máximas por piso de los tres sistemas estructurales

Las siguientes derivas inelásticas son obtenidas del Análisis Pushover, conociendo a su vez que son derivas máximas por piso de la acción sísmica y del análisis no lineal de la estructura (Figura 18).

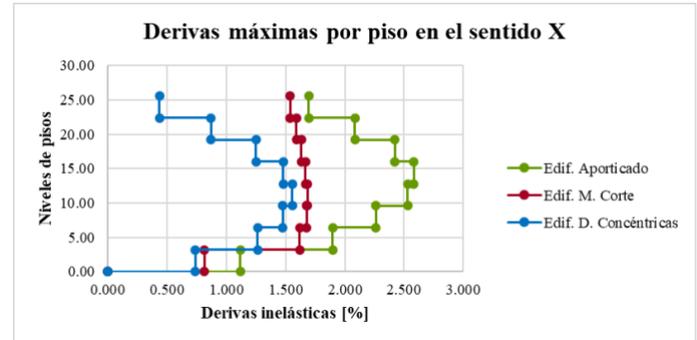


Figura 18: Diferencia de derivas máximas por piso.

C) Distribución de cortantes por piso de los tres sistemas estructurales

La distribución de los cortantes basales de cada estructura nos permite diferenciar las fuerzas laterales por piso, las cuales fueron adquiridos por los efectos de las fuerzas de inercia que son provocadas a un sistema de N-Grados de libertad (Figura 19).

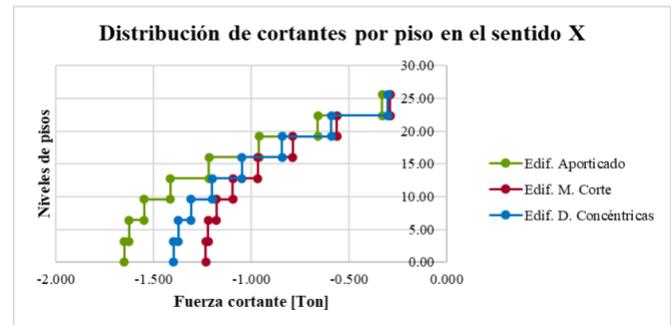


Figura 19: Distribución de cortantes por piso.

D) Momentos de vuelco de los tres sistemas estructurales

Los momentos de vuelco son las acciones sísmicas provocadas por el empuje del suelo en la base de la estructura en relación a la carga lateral y al momento generado por las cargas horizontales desde un punto de la base de la estructura hacia la altura del edificio, induciendo de tal forma al desequilibrio de la estructura (Figura 20).

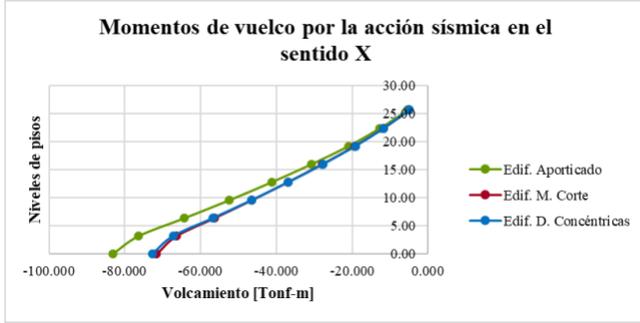


Figura 20: Diferencia de los momentos de vuelco

Punto de desempeño

La determinación del punto de desempeño de cada una de las estructuras analizadas en este apartado nos permite conocer la diferencia de desempeño que tiene cada sistema estructural según al análisis No Lineal (Tabla 14, Figura 21, Tabla 15 y Figura 22)

Tabla 14: Resultados del punto de desempeño estructural (Dir. X)

Edificio Aporticado		Edificio M. Corte		Edificio D. Concéntricas	
TABLE: ASCE 41-17 NSP (Bilinear FD)		TABLE: ASCE 41-17 NSP (Bilinear FD)		TABLE: ASCE 41-17 NSP (Bilinear FD)	
Displacement cm	Base Shear tonf	Displacement cm	Base Shear tonf	Displacement cm	Base Shear tonf
0	0	0	0	0	0
12.48	1049.99	9.64	915.30	8.56	1029.54
32.93	1385.30	29.99	1188.54	25.66	1337.03

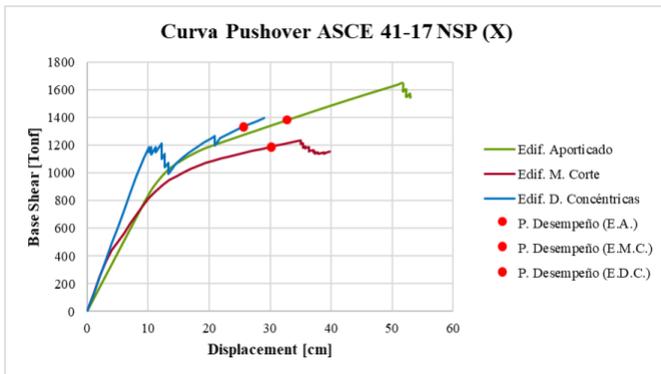


Figura 21: Punto de desempeño estructural mediante la curva Pushover (Dir. X)

Tabla 15: Resultados del punto de desempeño estructural (Dir. Y)

Edificio Aporticado		Edificio M. Corte		Edificio D. Concéntricas	
TABLE: ASCE 41-17 NSP (Bilinear FD)		TABLE: ASCE 41-17 NSP (Bilinear FD)		TABLE: ASCE 41-17 NSP (Bilinear FD)	
Displacement cm	Base Shear tonf	Displacement cm	Base Shear tonf	Displacement cm	Base Shear tonf
0	0	0	0	0	0
12.58	1094.64	10.11	797.05	7.30	912.34
32.24	1457.74	30.05	999.03	26.06	1293.85

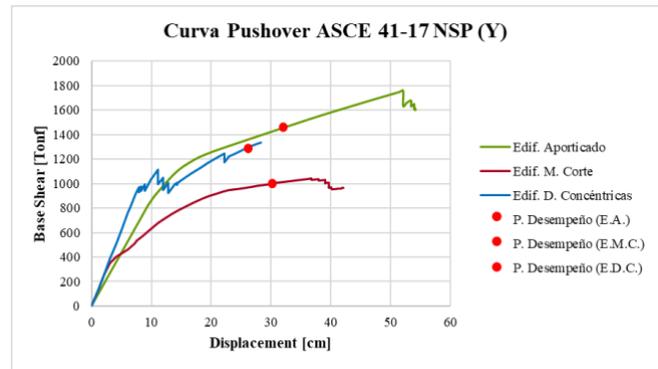


Figura 22: Punto de desempeño estructural mediante la curva Pushover (Dir. Y)

Ductilidad estructural (Figura 23).

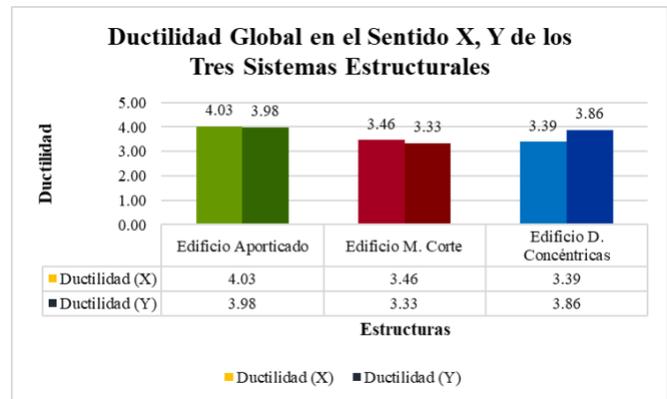


Figura 23: Comparación de los resultados de ductilidad estructural.

Reserva de ductilidad (Figura 24)

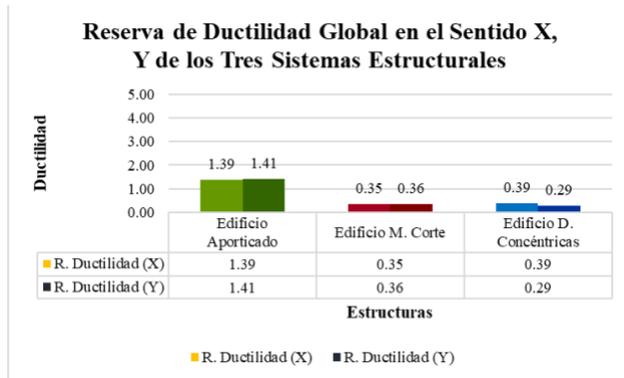


Figura 24: Comparación de los resultados de la reserva de ductilidad

5. Conclusiones

El análisis NSP ejecutado para el edificio aporticado de hormigón armado, presentó de resultados favorables al ser analizado por el desempeño estructural mediante la curva *pushover* y los criterios de aceptación junto a los niveles de desempeño, donde la estructura diseñada con una deriva del 1.58 % adquirió un buen nivel de desempeño estructural mostrándose de su estado a “Seguridad de Vida” al ser aplicado para un sismo de diseño.

El análisis NSP empleado para el edificio de hormigón armado con muros de corte es diseñada a una deriva estructural del 1.58 % e inducido para un sismo de diseño, el cual tiene un punto de desempeño estructural eficiente en relación a los criterios de aceptabilidad ya que la estructura tiende a mostrar un nivel de desempeño a “Seguridad de vida”.

En relación al análisis NSP ejecutado para el edificio aporticado de hormigón armado con las diagonales concéntricas diseñada a una deriva estructural del 1.59 %, se aplicó la evaluación para un sismo de diseño, donde los criterios de aceptabilidad llegan al nivel de Seguridad de Vida, pero con proximidad a llegar a Prevención de Colapso por la deformación crítica de sus 3 a 4 elementos estructurales.

Mediante al análisis ejecutado para los tres sistemas estructurales, el edificio con mayor ductilidad y capacidad de resistencia es el edificio aporticado de hormigón armado manteniéndose en el nivel de Seguridad de Vida para un sismo de diseño.

Referencias

- ACI Committee 318. (2014). ACI 318S-14: Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural. *American Concrete Institute*. 2da Edición. ISBN: 978-0-87031-964-8.
- Aguiar, R., Mora, D., & Rodríguez, M. (2015). Diagrama momento-curvatura y momento-rotación para elementos de hormigón armado y acero con ASCE/SEI 41 y sistema de computación CEINCI-LAB. *Revista CIENCIA* 17(2). <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/ciencia/article/view/520>
- American Society of Civil Engineers. (2017). ASCE/SEI 41-17: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. ISBN 9780784480816. <https://catalog.loc.gov/vwebv/search?searchCode=LCCN&searchArg=2017047777&searchType=1&permalink=y>
- Crisafulli, F. (2018). Diseño sismorresistente de construcciones de acero. 5ta Edición. *Asociación Latinoamericana de Acero (Alacero)*. Mendoza, Argentina.
- Cueto, J. (2024). Caracterización del comportamiento estructural de sistemas combinados de concreto reforzado en Colombia a través de análisis no lineal estático [Tesis de posgrado. Universidad del Norte]. <http://hdl.handle.net/10584/12017>
- Deierlein, G., Reinhorn, A., & Willford, M. (2010). Nonlinear Structural Analysis for Seismic Design. A Guide for Practicing Engineers. *National Institute of Standards and Technology*. Disponible en: <https://www.nehrp.gov/pdf/nistgcr10-917-5.pdf>
- Gaxiola-Camacho, J. (2022). Diseño sísmico basado en desempeño revisión de una filosofía alternativa de diseño. *XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Juriquilla, Querétaro <https://www.researchgate.net/publication/361040717>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. del P. (2014). Metodología de la Investigación. 6ta Edición. *McGraw Hill España*. ISBN: 978-1-4562-2396-0
- Mander, J., Priestley, M., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*. 114(8) [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
- Muñoz-Martín., A & de Vicente, G. (2010). Análisis de esfuerzos tectónicos Fallas y sismos. *Reduca (Geología)*. Serie Tectónica., 2(6). Disponible en: <https://www.revistareduca.es/index.php/reduca-geologia/article/view/173>
- Moehle, J. (2015). Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings. *McGraw-Hill Education* ISBN: 9780071839440.

National Institute of Standards and Technology (NIST). (2017). Recommended modeling parameters and acceptance criteria for nonlinear analysis in support of seismic evaluation, retrofit, and design. *Applied Technology Council*. <https://doi.org/10.6028/NIST.GCR.17-917-45>

Padilla, J. (2023). Evaluación consistente con la amenaza del desempeño sísmico de pórticos intermedios diseñados de acuerdo con ACI 318-19 [Tesis de postgrado. Universidad del Norte]. <http://hdl.handle.net/10584/11366>

Vargas, Y. (2023). Análisis estructural estático y dinámico probabilista de edificios de hormigón armado. Aspectos metodológicos y aplicaciones a la evaluación del daño. [Tesis doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica]. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5821/dissertation-2117-94966>

Contribución de los autores (CRediT)

Ulcungo-Cabascango, J.: Conceptualización, Análisis formal de datos, Metodología, Administración de proyecto, Recursos materiales, Visualización, Redacción – borrador original, Redacción- borrador original. **Villavicencio-Cedeño, E.:** Conceptualización, Análisis formal de datos, Supervisión, Validación, Redacción- revisión y edición. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores han declarado que no existe conflicto de intereses en esta obra.

Nota del Editor

Descargo de responsabilidad: Los datos, declaraciones, opiniones contenidas en el documento son responsabilidad únicamente de los autores y no de la *Revista Científica FINIBUS – Ingeniería, Industria y Arquitectura*. La Revista y sus editores renuncian a toda responsabilidad por daño a persona o propiedad resultante de los métodos, instrucciones, producto o idea mencionado en el contenido.



Derechos de autor 2025. Revista Científica FINIBUS - ISSN: 2737-6451.

Esta obra está bajo una licencia: Internacional Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual .4.0

