



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v8i3>

Ciencias de la Educación
Artículo de Investigación

*Análisis no lineal por el método Pushover del edificio de docentes n°1 de la
Universidad Técnica de Manabí*

*Non-linear analysis by the Pushover method of the No. 1 teaching building of the
Technical University of Manabí*

*Análise não linear pelo método Pushover do prédio de ensino n° 1 da Universidade
Técnica de Manabí*

Angélica Selená Mendoza-Intriago^I
selenam96@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0568-7473>

Dayan Gil Moreira-Manrique^{II}
dmoreira0131@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-1819-9690>

Lincoln Javier García-Vinces^{III}
lincoln.garcia@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8659-3190>

Correspondencia: selenam96@hotmail.com

***Recibido:** 29 de agosto del 2022 ***Aceptado:** 12 de septiembre de 2022 * **Publicado:** 24 de octubre de 2022

- I. Ingeniero Civil, Investigador Independiente, Portoviejo, Ecuador.
- II. Ingeniero Civil, Investigador Independiente, Portoviejo, Ecuador.
- III. MgsC, Docente investigador de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

Resumen

El análisis Pushover es la metodología tradicional de análisis no lineal de tipo estático con una metodología factible para analizar la resistencia - deformación de una estructura; este método incursiona la estructura en un rango inelástico, donde mediante el incremento de fuerzas laterales se muestra el máximo desplazamiento que experimentará la edificación antes de llegar al fallo de sus elementos estructurales, de esta manera identificaremos los puntos donde se puede disipar la energía del sismo. Es por esto que se planteó la aplicación del método Pushover en la evaluación no lineal del edificio de docentes n°1 de la Universidad Técnica de Manabí, con la finalidad de determinar y comparar el desempeño de dicha estructura como se encuentra construida actualmente, con sistema de pórticos sismorresistentes de hormigón y con la implementación de muros estructurales mediante el análisis de los desplazamientos, rótulas plásticas y curvas de capacidad. Para el desarrollo de la investigación se utilizó modelos numéricos realizados en el software Etabs, basados en la configuración estructural y materiales de la edificación; se aplicó una metodología descriptiva de tipo experimental, ya que se evaluaron las variables en el análisis con la ausencia e inclusión de los muros y, en base a los resultados obtenidos, se comprobó que la edificación es vulnerable a problemas de colapso ante sismos severos, y que la inclusión de muros reduce significativamente esta problemática debido al gran aporte de rigidez que provee este tipo de reforzamiento.

Palabras clave: Curva de capacidad; Desempeño sísmico; Pushover; Rótulas plásticas; Reforzamiento estructural.

Abstract

Pushover analysis is the traditional non-linear analysis methodology of the static type with a feasible methodology to analyze the resistance - deformation of a structure; This method enters the structure in an inelastic range, where by increasing lateral forces the maximum displacement that the building will experience before reaching the failure of its structural elements is shown, in this way we will identify the points where the energy of the earthquake can be dissipated. That is why the application of the Pushover method was proposed in the non-linear evaluation of the teachers' building No. 1 of the Technical University of Manabí, in order to determine and compare the performance of said structure as it is currently built, with a system of earthquake-resistant concrete

frames and with the implementation of structural walls through the analysis of displacements, plastic hinges and capacity curves. For the development of the research, numerical models made in the Etabs software were used, based on the structural configuration and materials of the building; a descriptive methodology of an experimental type was applied, since the variables in the analysis were evaluated with the absence and inclusion of the walls and, based on the results obtained, it was found that the building is vulnerable to problems of collapse in the event of severe earthquakes. and that the inclusion of walls significantly reduces this problem due to the great contribution of rigidity provided by this type of reinforcement.

Keywords: Capacity curve; seismic performance; Pushover; plastic ball joints; Structural reinforcement.

Resumo

A análise pushover é a metodologia tradicional de análise não linear do tipo estática com uma metodologia viável para analisar a resistência - deformação de uma estrutura; Este método entra na estrutura em uma faixa inelástica, onde ao aumentar as forças laterais é mostrado o deslocamento máximo que o edifício sofrerá antes de atingir a falha de seus elementos estruturais, desta forma identificaremos os pontos onde a energia do terremoto pode ser dissipado. Por isso, foi proposta a aplicação do método Pushover na avaliação não linear do prédio dos professores nº 1 da Universidade Técnica de Manabí, a fim de determinar e comparar o desempenho dessa estrutura tal como é construída atualmente, com um sistema de pórticos de betão sísmicos e com a execução de paredes estruturais através da análise de deslocamentos, rótulas plásticas e curvas de capacidade. Para o desenvolvimento da pesquisa, foram utilizados modelos numéricos feitos no software Etabs, baseados na configuração estrutural e materiais da edificação; foi aplicada uma metodologia descritiva do tipo experimental, uma vez que as variáveis em análise foram avaliadas com a ausência e inclusão das paredes e, com base nos resultados obtidos, verificou-se que a edificação é vulnerável a problemas de colapso em caso de sismos severos e que a inclusão de paredes reduz significativamente este problema devido à grande contribuição de rigidez proporcionada por este tipo de armadura.

Palavras-chave: Curva de capacidade; desempenho sísmico; Empurrão; juntas esféricas de plástico; Reforço estrutural.

Introducción

El Ecuador se encuentra en la zona de mayor peligrosidad sísmica del mundo, es decir, es un país vulnerable a eventos telúricos de diferentes magnitudes. Debido a ello, los profesionales expertos encargados del diseño estructural de las edificaciones consideran la acción sísmica en la planificación y cálculo de las estructuras mediante guías técnicas y normativas, tales como las *American Concrete Institute* ACI 318-19 (2019) y a nivel local la NEC-2015 (Norma Ecuatoriana de la Construcción) en su capítulo de peligrosidad sísmica, entre otros (Quizanga, Viera, & Andino, 2020).

Las limitaciones de los análisis que comprende la norma vigente de Ecuador, se basan fundamentalmente en que las estructuras por lo general son diseñadas mediante métodos estáticos y dinámicos de tipo lineal, lo cual deja en desconocimiento las características del comportamiento sismorresistente posterior a la etapa de diseño, resultados que son posibles de determinar mediante la aplicación de un análisis sísmico de tipo no lineal (Aguar, 2003).

Se realizará un análisis no lineal *Pushover* con el fin de dar a conocer como se desempeñará el diseño estructural que no pueda ser justificado con el método de diseño estático o lineal espectral, de manera que utilizando el método no lineal se pueda conocer el nivel de daño que puede ocurrir, especialmente en la edificación analizada en este trabajo de investigación.

El análisis no lineal estático *Pushover* es muy utilizado para evaluar la capacidad sísmica resistente de las estructuras, así como la evaluación de los posibles mecanismos de falla de la estructura ante un sismo. La denominación *Pushover* se traduce como Hacer Caer, lo cual se entiende como el proceso que lleva a la estructura al colapso y determina las condiciones en las que eventualmente podría ocurrir (Zabala, 2017).

De forma general la metodología *Pushover* es un análisis estático no lineal, que básicamente consiste en identificar posibles mecanismos de falla en una estructura nueva o existente, y representar estos mecanismos asignando rotulas plásticas en los extremos de elementos como vigas y columnas, generados por el incremento de las cargas laterales en la estructura durante un sismo (Toledo, 2011).

Análisis no lineal por el método Pushover del edificio de docentes nº1 de la Universidad Técnica de Manabí

La metodología *Modal Pushover Analysis* (MPA), fue desarrollada por los investigadores A. K. Chopra y R. K. Goel (2001), y permite estimar la demanda sísmica y verificar el desempeño de una estructura para sismos severos. Está basado en un análisis estático no-lineal, de tipo *Push Over* o de empujón, con distribuciones de fuerzas laterales equivalentes invariantes en la altura, que incluye las contribuciones de los modos de vibración del comportamiento elástico y emplea de manera aproximada la teoría clásica de la dinámica de estructuras. A partir de esto, se determina la capacidad resistente de la estructura e información del comportamiento no-lineal, como, por ejemplo, la secuencia en que las secciones van ingresando al rango no-lineal, los desplazamientos laterales en cada incremento de carga, derivas de entrepisos, ductilidades, fallas de elementos por flexión y corte, esfuerzos, etc.

La capacidad de una estructura está relacionada con la resistencia y deformación máxima de sus componentes individuales. Para determinar este parámetro, posterior al límite elástico, es necesario utilizar algún tipo de análisis no lineal, como, por ejemplo, el análisis estático no lineal *Pushover*. Este proceso usa una serie de análisis secuenciales elásticos, que se superponen de manera que se aproximan a un diagrama conocido con el nombre de curva de capacidad. Esta curva relaciona las fuerzas en la base (cortante basal V) y los desplazamientos (D) en el nivel superior de la estructura como se indica en la Figura 1.

Fuente: Núñez, 2017.

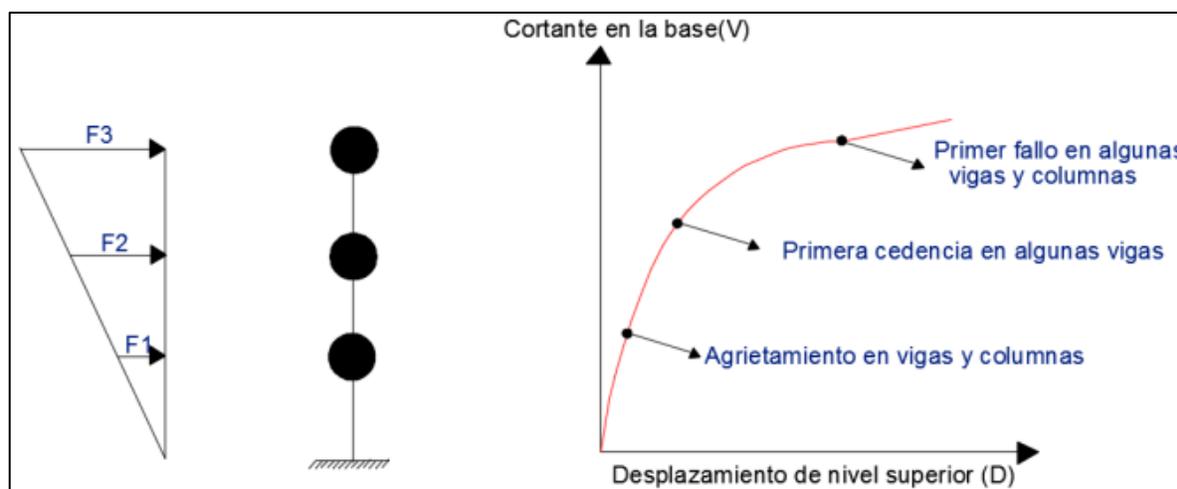


Figura 1: Esquema del método *Pushover*, en donde se muestran los límites de daños en la edificación.

Análisis no lineal por el método Pushover del edificio de docentes nº1 de la Universidad Técnica de Manabí

El modelo matemático de la estructura se modifica para tener en cuenta la reducción de resistencia de los elementos que ceden. De esta manera, se aplica una serie de fuerzas horizontales, las cuales se incrementan hasta que la estructura desarrolla su capacidad máxima.

A través de la técnica *Pushover* se obtendrá la respuesta no lineal de la estructura, lo cual se representa en la curva de capacidad (como se indica en la figura 2). Dicha curva se obtiene al someter la estructura a un estado de desplazamiento lateral monótonamente creciente. La curva refleja los umbrales de desplazamiento lateral asociados a tres estados límites que plantea las recomendaciones de la FEMA, que significa *The Federal Emergency Management Agency* (Krawinkler & Seneviratna, 1998). La curva de capacidad se constituye por lo general, para representar la respuesta del primer modo de la estructura, basado en la hipótesis según la cual el modo fundamental de vibración se corresponde con la respuesta predominante. Esto es generalmente válido para estructuras con periodos propios menores que 1s. Para estructuras de mayor flexibilidad, el análisis debe considerar la influencia de los modos más altos de vibración.

Fuente: FEMA 440, 2005.

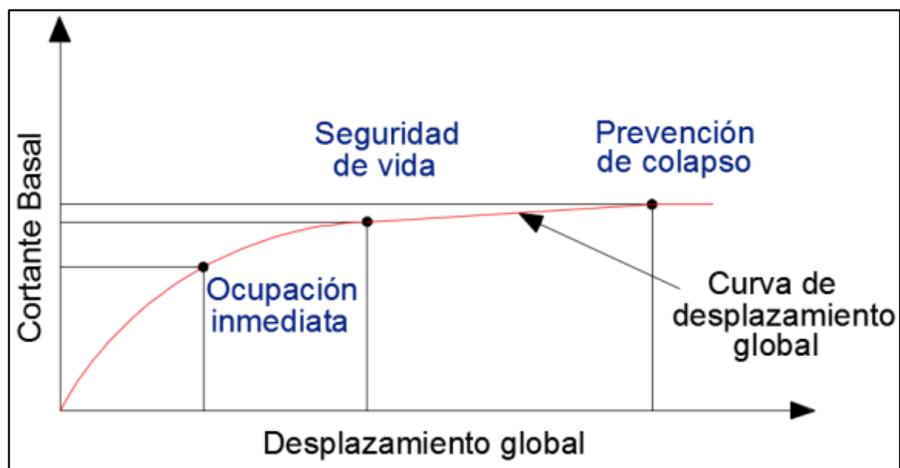


Figura 2: Curva de cortante basal vs desplazamiento global con límites de desempeño.

Según la SEAOC (*Structural Engineers Assn. of California*, 1995), los niveles de operatividad o también llamados niveles de desempeño describen un estado límite de daño discreto. Representa una condición límite o tolerable establecida en función a tres aspectos fundamentales como ocupación inmediata, seguridad de vida y prevención de colapso.

Análisis no lineal por el método Pushover del edificio de docentes nº1 de la Universidad Técnica de Manabí

La ocupación inmediata (IO) es el nivel de desempeño estructural S-1, definido como el estado de daño posterior al sismo, en donde aún se cuenta con seguridad para usar la estructura y se cuenta con rigidez y resistencia sísmica, según el diseño de la misma. La seguridad de vida (LS), el nivel de desempeño estructural S-3, definido como el estado de daño posterior al sismo, en el cual se presenta daño en los componentes estructurales, pero se cuenta con cierto margen de estabilidad y resistencia antes de incursionar en un escenario de colapso (parcial o total). La prevención de colapso (CP), es el nivel de desempeño estructural S-5, definido como el estado de daño posterior al sismo, en el cual se presenta daño en los componentes estructurales, posee capacidad de soportar cargas gravitacionales, pero ya no cuenta con estabilidad y resistencia para evitar el colapso.

Por otro lado, el método de los coeficientes de desplazamiento proporciona un proceso numérico directo para calcular la demanda de desplazamiento. No requiere convertir la curva de capacidad en coordenadas espectrales. El método está basado en el análisis estadístico de los resultados de análisis tiempo-historia realizados en modelos de un grado de libertad de distintas tipologías. La demanda de desplazamiento calculada mediante el método de los coeficientes, es llamada el desplazamiento objetivo o *target displacement*, lo que es equivalente al punto de desempeño. El método fue introducido en el FEMA 273 (1997), para luego ser redefinido en el FEMA 356 (2000). Al igual que para el método del espectro de capacidad, en el FEMA 440 (2005) se definió un procedimiento mejorado llamado *Improved Procedures for Displacements Modification* en su capítulo 5. Otra diferencia respecto al método de los espectros es el procedimiento de la linealización o idealización de la curva de capacidad obtenida del análisis estático no lineal. El código ASCE 41-13 (American Society of Civil Engineers) (2014) establece este método como procedimiento para determinar el desempeño sísmico.

Para edificaciones con diafragmas rígidos, el desplazamiento objetivo δ_t debe calcularse a partir de

la siguiente ecuación (
$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$
):

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (1)$$

C_0 es un factor modificador que convierte el desplazamiento espectral de sistema de 1 gdl al sistema de n gdl.

C_1 es un factor modificador que relaciona el máximo desplazamiento inelástico con el desplazamiento elástico en el sistema de 1 gdl.

C_2 es un factor modificador que representa el efecto de la histéresis.

Análisis no lineal por el método Pushover del edificio de docentes nº1 de la Universidad Técnica de Manabí

C_3 es un factor modificador que incrementa los desplazamientos debido a los efectos $P - \Delta$. En donde se tiene un desplazamiento lineal muy grande que debe ser reducido por los coeficientes que presenta la fórmula y se proyecta de manera gráfica en el modelo bilineal de la curva de capacidad (Fajfar, 1999) como se indica a continuación en la Fuente: FEMA 356, 2000.

Fuente: FEMA 356, 2000.

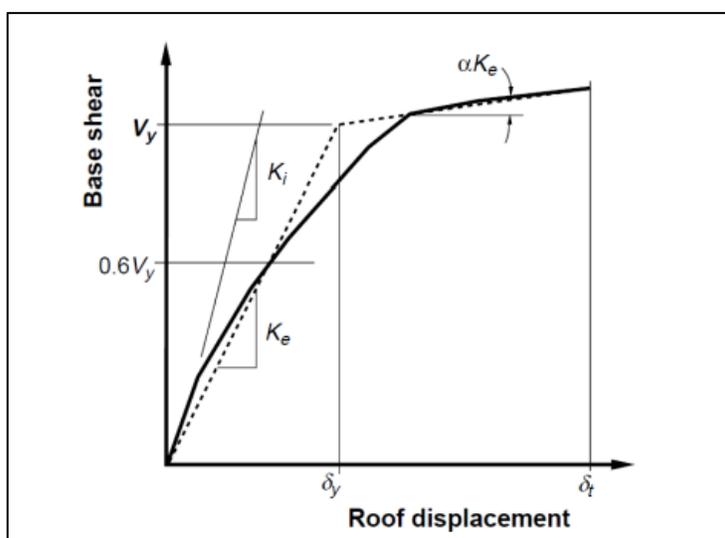


Figura 3: Modelo bilineal de la curva de capacidad para el Método del Coeficiente de Desplazamiento.

Metodología

El tipo de investigación, por relacionarse con la estimación de la demanda sísmica en edificaciones de concreto armado mediante el uso de programas como ETABS, se enmarca dentro de una investigación transversal, ya que los resultados difieren del paso del tiempo; es de diseño experimental ya que se manipularán variables, que en este caso son la ausencia e inclusión de muros estructurales como medida de reforzamiento.

Se realizará un análisis estructural estático no lineal, por lo que se necesita conocer las dimensiones en planta y alzado, las secciones, las propiedades mecánicas de los materiales, además de conocer la acción sísmica a la que se someterán el edificio (espectros de respuesta, fuerzas gravitacionales no lineales).

Geometría de la edificación

Los modelos de los dos edificios fueron realizados en Etabs. En la y 5 se muestra una vista tridimensional y las dimensiones geométricas de los primordiales elementos estructurales estimados en los modelos; la información disponible se obtuvo de los planos estructurales del edificio a analizar. Concerniente a la modelación en el software Etabs 2020, los datos de tipo de material, secciones y armaduras, fueron tomados del trabajo de titulación llamado Análisis de Reforzamiento Sísmico del Edificio de Docentes N° 1 de la Universidad Técnica de Manabí (García *et al.*, 2021). Respecto a columnas y vigas de hormigón armado, se añadieron como elementos de marco inelástico de rotula plástica con representación en las fuerzas, ya que dichos resultados son más exactos conforme toman dichas conductas inelásticas en toda la extensión de la estructura analizada.

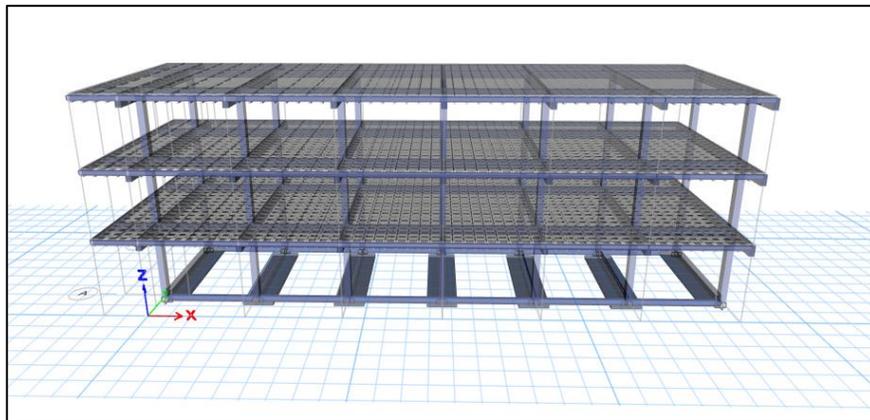


Figura 4: Estructura en vista 3D con pórticos estructurales.



Figura 5: Estructura en vista en planta, piso 1 con pórticos estructurales.

Secciones utilizadas

En la figura 6 se muestran las secciones.

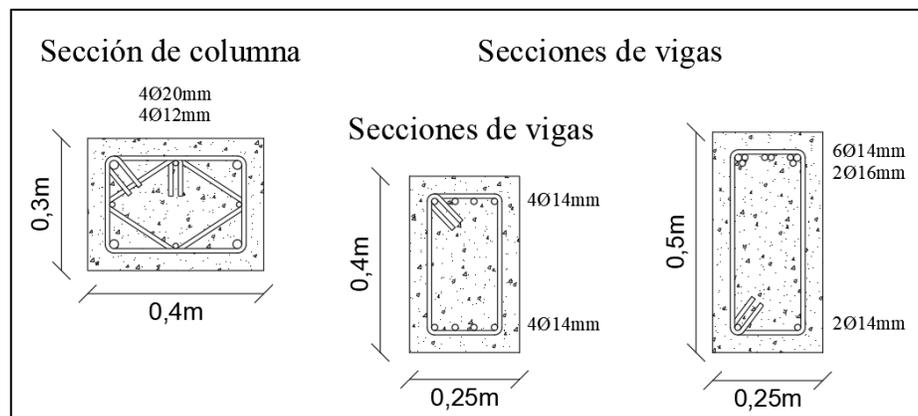


Figura 6: Secciones de vigas y columnas utilizadas.

Cargas de diseño gravitacionales

Las cargas de gravedad, clasificadas en cargas permanentes y no permanentes, fueron utilizadas como se indica en la tabla 1, 2 y 3:

Tabla 1: Cargas gravitacionales de entrepiso.

Tipo	kN/m ²
Permanente	2,942
No permanente	2,4

Tabla 2: Cargas gravitacionales de volados.

Tipo	kN/m ²
Permanente	0,932
No permanente	4,8

Tabla 3: Cargas gravitacionales de cubierta.

Tipo	kN/m ²
Permanente	0,196
No permanente	0,196

Cargas de diseño sísmico

Las disposiciones especificadas en la norma vigente (MIDUVI, 2015), establecen los parámetros para implementar la respectiva carga de sismo al modelo en función de parámetros que están relacionados con el tipo de estructuración y el lugar de emplazamiento de la edificación, además se basa en un espectro de diseño de aceleraciones, tal como se muestra a continuación en la figura 7:

Fuente: MIDUVI, 2015a.

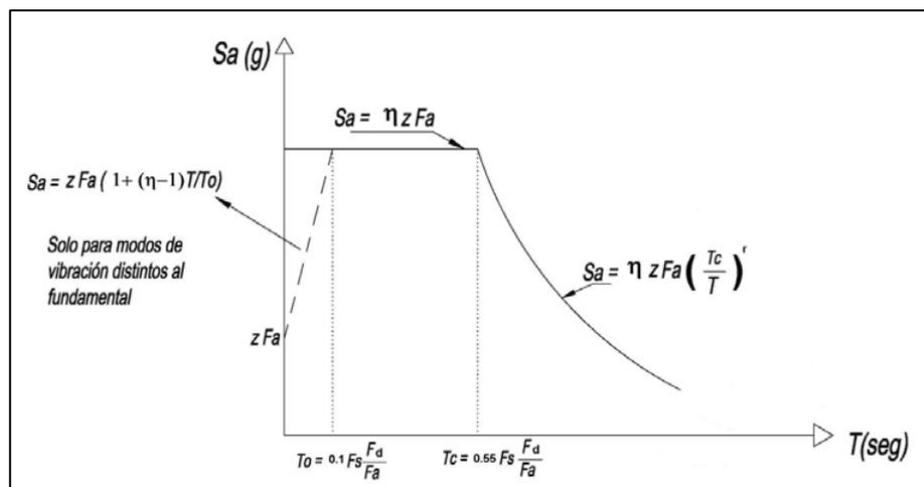


Figura 7: Espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones.

Análisis no lineal por el método Pushover del edificio de docentes nº1 de la Universidad Técnica de Manabí

La norma, señala que la fuerza de corte en la base, más conocida como cortante basal debe calcularse mediante la siguiente ecuación $V = \frac{I Sa(Ta)}{R \phi_P \phi_e} W$ (2):

$$V = \frac{I Sa(Ta)}{R \phi_P \phi_e} W \quad (2)$$

Dónde:

Sa(Ta) Espectro de diseño en aceleración (en función de Ta)

ϕ_P y ϕ_E Coeficientes de configuración en planta y elevación

I Coeficiente de importancia

R Factor de reducción de resistencia sísmica

W Carga sísmica reactiva (Para este caso es determinada por el software)

Ta Periodo de vibración

Los factores utilizados para la determinación de la carga sísmica fueron los presentados a continuación en la tabla 4.

Tabla 4: Parámetros para cálculo de carga sísmica (ubicación Portoviejo).

Aceleración máxima en toca (z)	0.5g
Tipo de suelo	D
Fa	1.12
Fd	1.11
Fs	1.4
r	1
η	1.8
I	1.3
R	1
ϕ_e	1
ϕ_P	1

Rótulas plásticas

Para la creación de las rótulas plásticas, fue necesario basarse en la curva de la no linealidad o diagrama de momento-curvatura, donde se muestran varios puntos representados con letras, de los cuales, entre A y B se encuentra la rotación y el momento de curvatura, luego de B a C se encuentra la rotación y momento último, luego entra en una fase de remanencia que se encuentra entre los

Análisis no lineal por el método Pushover del edificio de docentes nº1 de la Universidad Técnica de Manabí

puntos C y D, y finalmente la etapa final denominada residual entre los puntos D y E, tal como se muestra a continuación en la figura 8.

Fuente: ASCE 41-13, 2014.

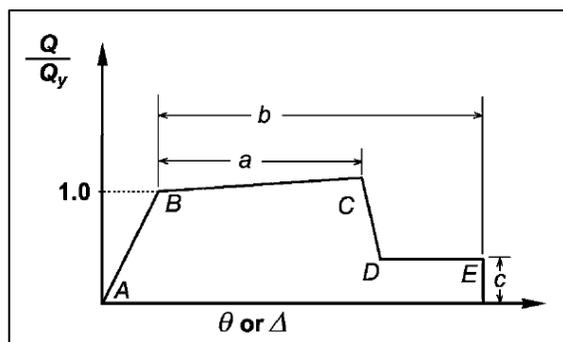


Figura 8: Diagrama de No Linealidad.

Rótulas plásticas en vigas

Para definir la rótula plástica de las vigas, fue necesario la revisión de varios parámetros indicados en la tabla 10-7 del ASCE 41-13 (2014), referente a los procedimientos no lineales en vigas de hormigón armado, donde se indican parámetros como la relación entre las cuantías de acero, la determinación de la condición de acero conforme y no conforme, y los valores correspondientes tanto para las rótulas plásticas como para los criterios de aceptación tal como se muestra en la tabla 5:

Análisis no lineal por el método Pushover del edificio de docentes nº1 de la Universidad Técnica de Manabí

Tabla 5: Parámetros de modelado y criterios de aceptación numéricos para procedimientos no lineales: vigas de hormigón armado.

Conditions			Modeling Parameters ^a			Acceptance Criteria ^a		
			Plastic Rotations Angle (radians)		Residual Strength Ratio	Plastic Rotations Angle (radians)		
			a	b		Performance Level		
					IO	LS	CP	
Condition i. Beams controlled by flexure ^b								
$\rho - \rho'$	Transverse reinforcement ^c	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$ ^d						
ρ_{bal}								
≤0.0	C	≤3 (0.25)	0.025	0.05	0.2	0.010	0.025	0.05
≤0.0	C	≥6 (0.5)	0.02	0.04	0.2	0.005	0.02	0.04
≥0.5	C	≤3 (0.25)	0.02	0.03	0.2	0.005	0.02	0.03
≥0.5	C	≥6 (0.5)	0.015	0.02	0.2	0.005	0.015	0.02
≤0.0	NC	≤3 (0.25)	0.02	0.03	0.2	0.005	0.02	0.03
≤0.0	NC	≥6 (0.5)	0.01	0.015	0.2	0.0015	0.01	0.015
≥0.5	NC	≤3 (0.25)	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.015
≥0.5	NC	≥6 (0.5)	0.005	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.01
Condition ii. Beams controlled by shear ^b								
Stirrup spacing ≤ d/2			0.0030	0.02	0.2	0.0015	0.01	0.02
Stirrup spacing > d/2			0.0030	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.01
Condition iii. Beams controlled by inadequate development or splicing along the span ^b								
Stirrup spacing ≤ d/2			0.0030	0.02	0.0	0.0015	0.01	0.02
Stirrup spacing > d/2			0.0030	0.01	0.0	0.0015	0.005	0.01
Condition iv. Beams controlled by inadequate embedment into beam-column joint ^b								
			0.015	0.03	0.2	0.01	0.02	0.03

Fuente: ASCE 41-13, 2014.

Rótulas plásticas en columnas

Para el caso de las rótulas plásticas de las columnas, también se tiene su respectiva tabla con valores para definir el diagrama de la rótula y los criterios de aceptación, pero además, están unos nuevos parámetros como la selección de la condición, en la cual se eligió la condición 2, debido a que las columnas de la edificación trabajan a flexocompresión y corte; se tiene las relaciones o radios para los parámetros de axial, flexión y corte con los valores que se deben cumplir en base al nivel de ductilidad de la columna en función a sus dimensiones y armado (ver la tabla 6 donde está la definición de rótulas plásticas en columnas).

Análisis no lineal por el método Pushover del edificio de docentes nº1 de la Universidad Técnica de Manabí

Tabla 6: Parámetros de modelado y criterios de aceptación numéricos para procedimientos no lineales: columnas de hormigón armado.

Table 10-8. Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Columns								
Conditions		Modeling Parameters ^a			Acceptance Criteria ^a			
		Plastic Rotations Angle (radians)		Residual Strength Ratio	Plastic Rotations Angle (radians)			
		a	b		Performance Level			
				c	IO	LS	CP	
Condition i. ^b								
$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$							
≤ 0.1	≥ 0.006	0.035	0.060	0.2	0.005	0.045	0.060	
≥ 0.6	≥ 0.006	0.010	0.010	0.0	0.003	0.009	0.010	
≤ 0.1	$= 0.002$	0.027	0.034	0.2	0.005	0.027	0.034	
≥ 0.6	$= 0.002$	0.005	0.005	0.0	0.002	0.004	0.005	
Condition ii. ^b								
$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$						
≤ 0.1	≥ 0.006	$\leq 3 (0.25)$	0.032	0.060	0.2	0.005	0.045	0.060
≤ 0.1	≥ 0.006	$\geq 6 (0.5)$	0.025	0.060	0.2	0.005	0.045	0.060
≥ 0.6	≥ 0.006	$\leq 3 (0.25)$	0.010	0.010	0.0	0.003	0.009	0.010
≥ 0.6	≥ 0.006	$\geq 6 (0.5)$	0.008	0.008	0.0	0.003	0.007	0.008
≤ 0.1	≤ 0.0005	$\leq 3 (0.25)$	0.012	0.012	0.2	0.005	0.010	0.012
≤ 0.1	≤ 0.0005	$\geq 6 (0.5)$	0.006	0.006	0.2	0.004	0.005	0.006
≥ 0.6	≤ 0.0005	$\leq 3 (0.25)$	0.004	0.004	0.0	0.002	0.003	0.004
≥ 0.6	≤ 0.0005	$\geq 6 (0.5)$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Condition iii. ^b								
$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$							
≤ 0.1	≥ 0.006		0.0	0.060	0.0	0.0	0.045	0.060
≥ 0.6	≥ 0.006		0.0	0.008	0.0	0.0	0.007	0.008
≤ 0.1	≤ 0.0005		0.0	0.006	0.0	0.0	0.005	0.006
≥ 0.6	≤ 0.0005		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Condition iv. Columns controlled by inadequate development or splicing along the clear height ^b								
$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$							
≤ 0.1	≥ 0.006		0.0	0.060	0.4	0.0	0.045	0.060
≥ 0.6	≥ 0.006		0.0	0.008	0.4	0.0	0.007	0.008
≤ 0.1	≤ 0.0005		0.0	0.006	0.2	0.0	0.005	0.006
≥ 0.6	≤ 0.0005		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: ASCE 41-13, 2014.

Carga no lineal

El estado de carga no lineal gravitacional es la respuesta de la edificación frente a las cargas laterales que están sujetas de las cargas gravitatorias concurrentes al momento de actuación de las cargas laterales.

Para la obtención de la curva del análisis no lineal *pushover*, se empleó la carga lateral aumentada al modelo sometido al análisis estático, que es el encargado de la carga estática del sismo en la estructura; se pudo observar una vez que la fuerza lateral se aumentaba, de igual modo la deformación y por ende la rigidez se reducía.

La curva de capacidad se realizó para personificar la respuesta del primer modo de vibración de la estructura, ya que pertenece a la respuesta predominante. Mientras tanto, la fuerza cortante en la

Análisis no lineal por el método Pushover del edificio de docentes nº1 de la Universidad Técnica de Manabí

base, nombrada como cortante basal, ocasionada por las fuerzas elásticas y plásticas, se representó con su correspondiente desplazamiento; por lo tanto, se obtuvo la curva de capacidad y además la curva bilineal en base a la norma ASCE 41-13 (2014).

Resultados y discusión

En la figura 9 se puede evidenciar que el desempeño de la estructura alcanza una mayor capacidad en el sentido X, ya que logra un mayor desplazamiento, lo que es viable debido a que en ese sentido presenta mayor redundancia de columnas.

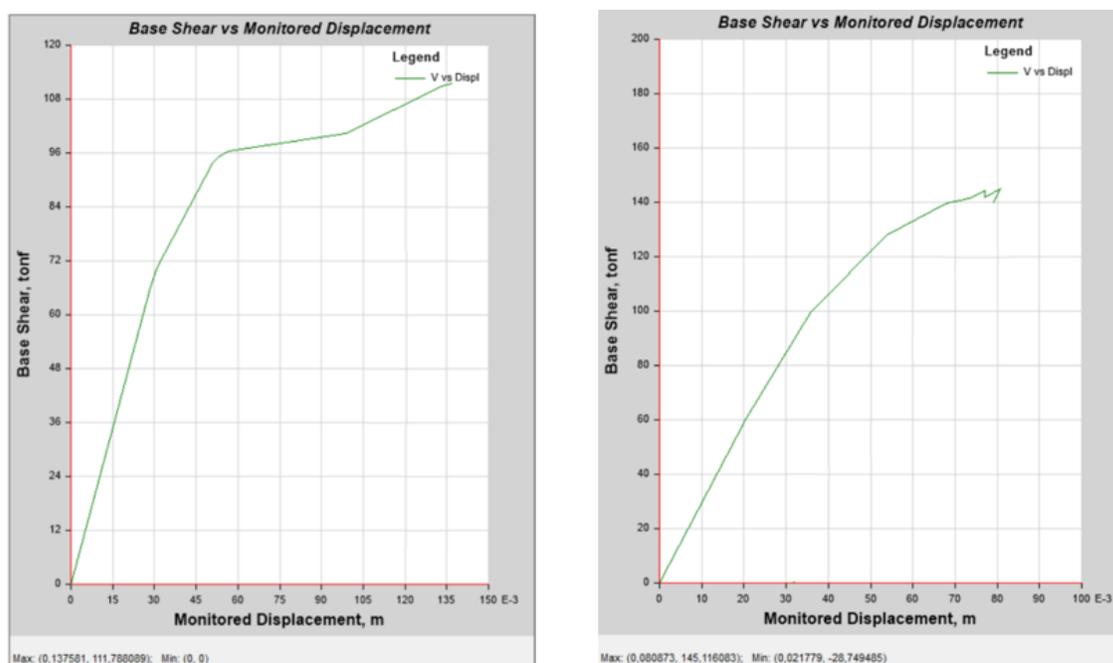


Figura 9: Curvas de Cortante basal vs Desplazamiento para sentido X (izquierda) y sentido Y (derecha) para la edificación sin muros.

Análisis no lineal por el método Pushover del edificio de docentes nº1 de la Universidad Técnica de Manabí

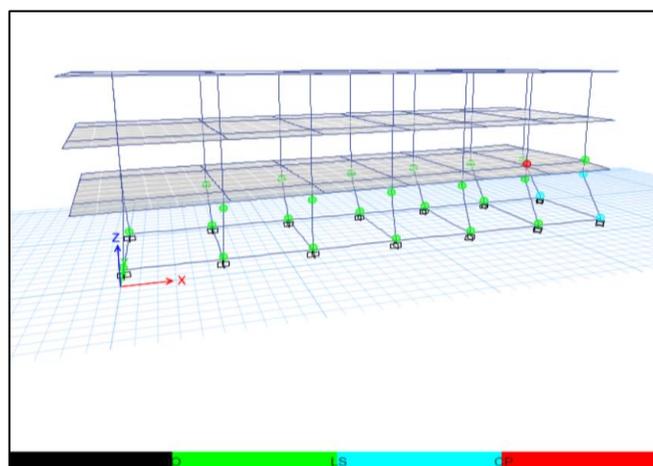


Figura 10: Rótulas plásticas y escala de colores en base a los niveles de aceptación y operatividad.

La presencia de rótulas plásticas en columnas, algunas de ellas de color lila que indican que se encuentran en la zona de Prevención de Colapso, indican que la edificación presentará daño elevado a tal punto que no podrá ser utilizada hasta que sea intervenida para reparaciones debido a las grandes deformaciones de los elementos soportantes que generarán fallas en los mismos (ver figura 10).

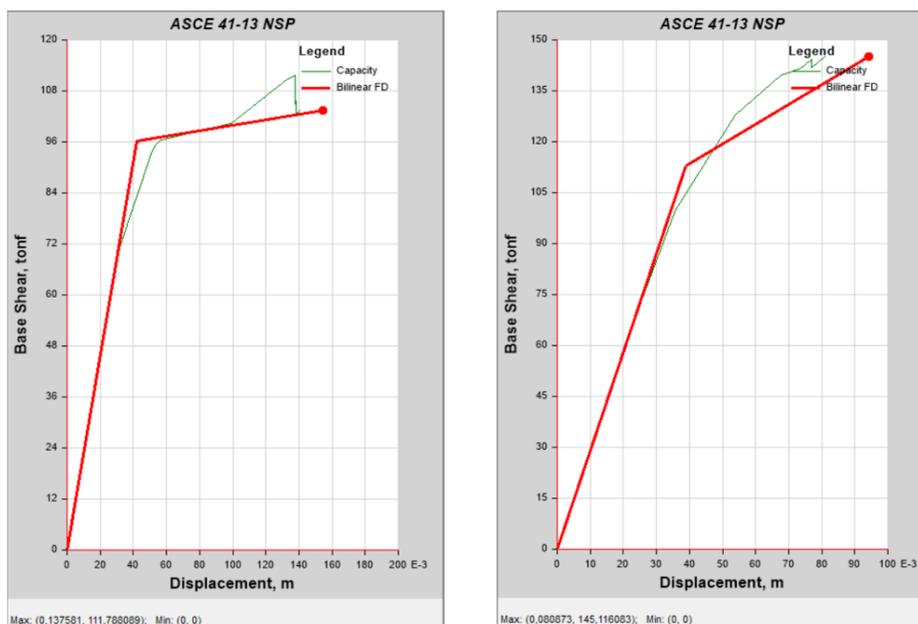


Figura 11: Curvas de capacidad simplificada o de bilinealidad.

Análisis no lineal por el método Pushover del edificio de docentes nº1 de la Universidad Técnica de Manabí

Con la curva de capacidad bilineal, se tiene una representación de manera simplificada de la capacidad o desempeño de la edificación, que está relacionado con la curva presentada previamente donde también se indica el punto de desempeño de la estructura.

Para el caso de la edificación con muros estructurales, se tienen los siguientes resultados (ver figura 11).

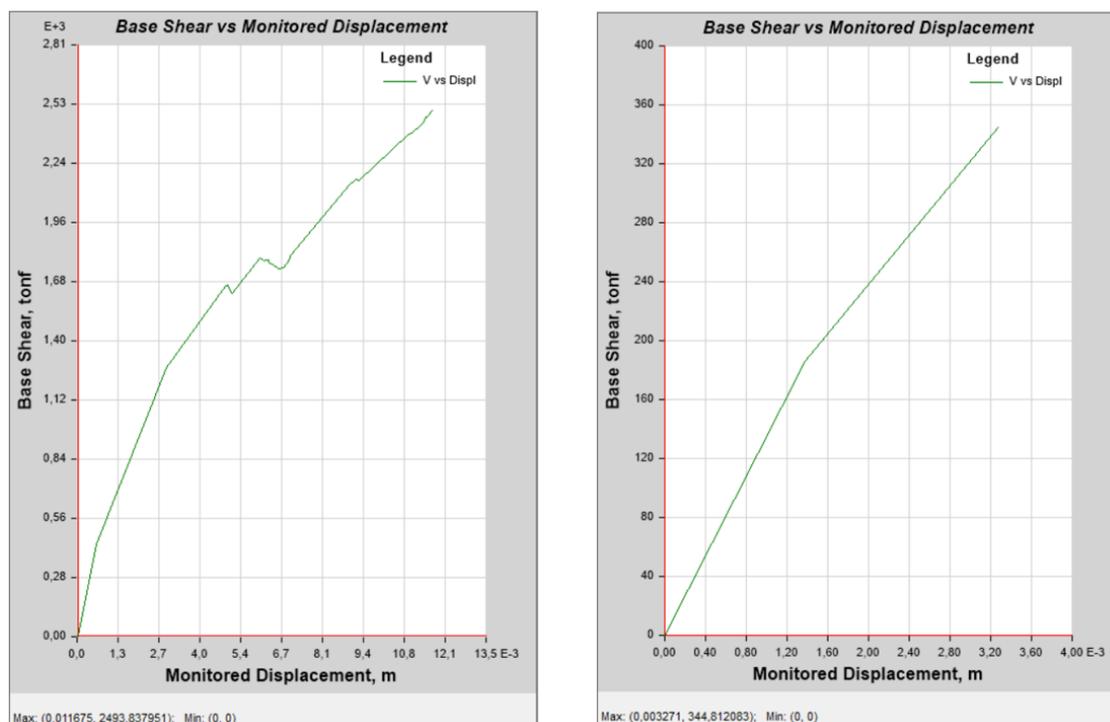


Figura 12: Curvas de Cortante basal vs Desplazamiento para sentido X (izquierda) y sentido Y (derecha) para la edificación con muros.

Con la inclusión de los muros estructurales ubicados en puntos estratégicos, mejoró significativamente la capacidad de la edificación, demostrándose en la fuerza cortante que es capaz de lograr para un desplazamiento relativamente bajo, también producido en el sentido X de la edificación por el aporte de los muros y además de las columnas en esa dirección (ver figura 12).

Análisis no lineal por el método Pushover del edificio de docentes nº1 de la Universidad Técnica de Manabí

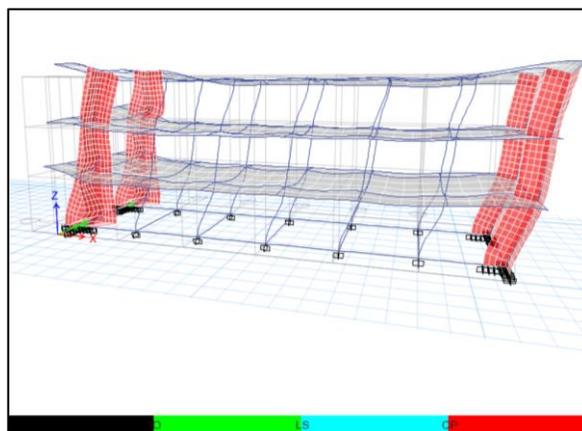


Figura 13: Rótulas plásticas y escala de colores en base a los niveles de aceptación para edificación con muros.

Para el mayor nivel de deformación de la estructura, se presenta una leve cantidad de rótulas plásticas, de manera específica, en las columnas del primer nivel, que se encuentran en el nivel de Ocupación Inmediata, lo que denota que los elementos estructurales se encontrarán con daños menores y requerirá una intervención mínima (ver figura 13).

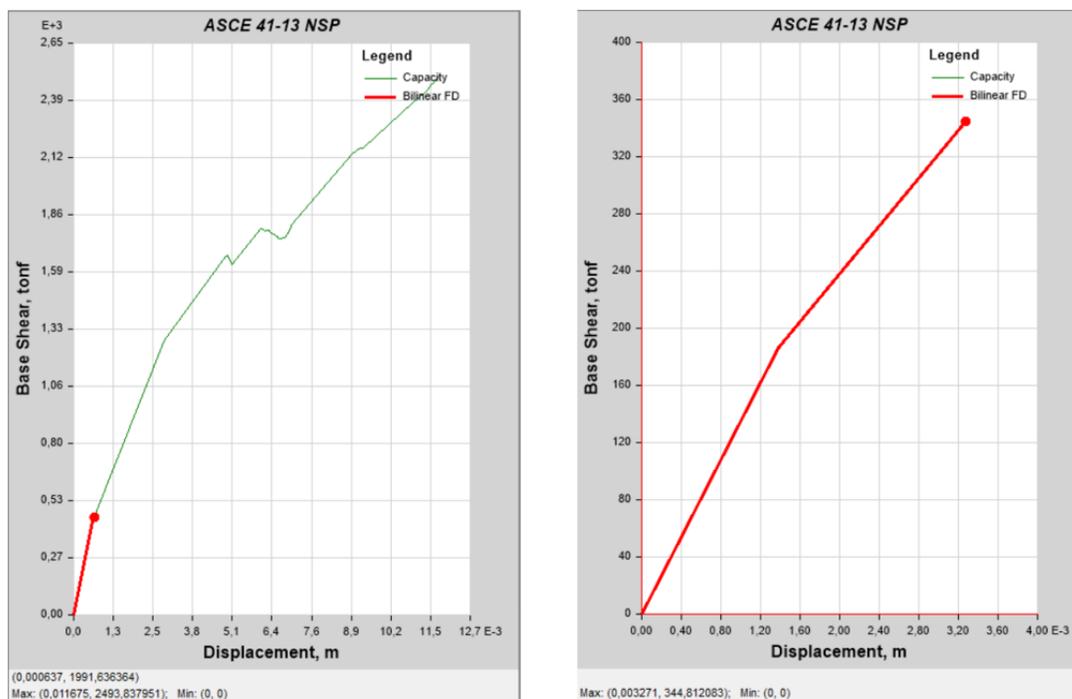


Figura 14: Curva de capacidad simplificada o de bilinealidad para ambos sentidos de análisis.

Análisis no lineal por el método Pushover del edificio de docentes nº1 de la Universidad Técnica de Manabí

De igual manera que el caso anterior de la edificación con pórticos a momento, se presentan las curvas bilineales que presentan la capacidad de la edificación, que detalla la mayor capacidad de la estructura, sobre todo en el sentido con mayor rigidez. (ver figura 14).

Conclusiones

Al finalizar la investigación se concluye que:

- El método de análisis estático no lineal *Pushover* permite comprobar lo que un análisis lineal no logra por las limitaciones que comprende el mismo. Esta metodología permite revisar la capacidad o desempeño de la estructura y en caso de reforzamiento, determinar cuáles elementos necesitan ser intervenidos.
- El modelo de la edificación sin la inclusión de muros, es decir, basado en cómo se encuentra en la realidad, cuyo sistema estructural está conformado por pórticos especiales sismorresistentes a momento, presentó rótulas en columnas y vigas que evidenciaban que, ante la ocurrencia de un sismo, presentarán problemas y probables fallas estructurales que podrían conllevar al cese de actividades en el edificio por ser inseguro desde el punto de vista estructural.
- El modelo de la edificación con el aporte de los muros, presentó una pequeña cantidad de rótulas en columnas que se encontraban en el nivel de Ocupación Inmediata, lo que demuestra que la inclusión de los muros estructurales aumenta en gran manera la capacidad resistente de la edificación, resultado que se pudo evidenciar también en las curvas de Cortante vs Desplazamiento y la curva de bilinealización.

Referencias

1. ACI 318-19. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete*. Farmington Hills. https://www.usb.ac.ir/FileStaff/5526_2020-1-25-11-12-7.pdf
2. Aguiar R. (2003). *Análisis Sísmico por Desempeño*. Ecuador: Edispe. https://www.researchgate.net/publication/280627456_Analisis_Sismico_por_Desempeno
3. ASCE 41-13. (2014). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, 2013*. <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/15247/ASCE%2041-13.pdf>

4. Chopra, A. & Goel, R. (2002). A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 31(3), 561-582. <https://doi.org/10.1002/eqe.144>
5. FEMA 273. (1997). *NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*. <https://www.scinc.co.jp/nanken/pdf/fema273.pdf>
6. FEMA 356. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. <https://www.nehrp.gov/pdf/fema356.pdf>
7. FEMA 440. (2005). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. Estados Unidos: ATC. <https://mitigation.eeri.org/wp-content/uploads/fema-440.pdf>
8. García, L.; Palacios, J.; Mendoza, A. & Rodríguez, J. (2021). Análisis de Reforzamiento Sísmico del Edificio de Docentes N°1 de la Universidad Técnica de Manabí. *RIEMAT*, 6(1), 36-44. <https://doi.org/10.33936/riemat.v6i1.3688>
9. Krawinkler, H. & Seneviratna, G. (1998). Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation. *Engineering Structures*, 20, 452-464. <https://pdfslide.net/documents/pros-and-cons-of-pushover-analysis.html?page=6>
10. MIDUVI. (2015). *Cargas no sísmicas - Norma Ecuatoriana de la Construcción*. https://cicp-ec.com/documentos/NEC_2015/NEC_SE_CG_Cargas_Sismicas.pdf
11. Núñez, A. (2017). *Diseño por Desempeño de un edificio de hormigón armado utilizando el método de análisis Tiempo-Historia* (Tesis de grado). Universidad Técnica de Ambato, Ecuador. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/27236>
12. P. Fajfar. (1999). Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 979-993. <https://ingenieriasismica.utpl.edu.ec/sites/default/files/publicaciones/UCG-ES-00143.pdf>
13. Quizanga, D.; Viera, L. & Andino, J. (2020). Análisis estático no lineal de edificios aporticados de hormigón armado aplicando normativa ecuatoriana, colombiana y peruana. *FIGEMPA*, 1(1), 72-78. <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG/article/view/2186/2416>
14. SEAOC. (1995). *Performance based seismic engineering of buildings*. Berkeley. <https://www.hsd.org/?view&did=788527>

15. Toledo, V. (2011). *Pushover-Análisis No lineal Estático en Edificios de Concreto Aemado, Ingeniería Sísmica*. Perú: PBEE. <https://www.udocz.com/apuntes/15377/pushover-analisis-estatico-no-lineal-edificio-concreto-armado-pbee-vlacev-toledo-espinoza>
16. Zabala, A. (2017). *Modelado y análisis Pushover de la respuesta sísmica de estructuras de acero* (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia. <https://repositorio.upct.es/xmlui/bitstream/handle/10317/6092/tfm-zab-mod.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

©2022 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).