

# Influence of the p-delta effect and the irregular mass in the structural behavior of a medium-height structure

Cristopher Torres, Egresado<sup>1</sup>, Darwin Zavala, Egresado<sup>2</sup>, and Javier Moreno, Msc Profesor<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201516680@upc.edu.pe, u201403828@upc.edu.pe, pccijmor@upc.edu.pe

*Abstract– In the present investigation, the influence of the irregularity of the mass and the PA effect on the structural behavior of a 15-story building is analyzed. The case of a regular 15-story building, 4 cases of buildings with the presence of mass irregularity in an established floor and 4 cases of irregular buildings with PA effect is presented.*

*First, through linear dynamic analysis, the structural response is determined in terms of drifts, basal shear force and moment. Subsequently, the non-linear static analysis (Push over) is performed and the capacity curve of the structure is constructed. The ultimate and creep displacements are obtained from the capacity curve, and the overall ductility is estimated. Then, the seismic performance is determined for the different levels of earthquake. Finally, a comparative analysis of the structural response and the seismic performance of the cases is carried out. When analyzing the moments of the irregular structures with the PA effect, a variation of up to 5.60% was obtained with respect to the regular building, so that there is a greater increase in the moments when in the structural analysis of a structure with irregularity of the mass the PA effect is considered. An increase in the variation of the stiffness has been generated in case 1 when the PA effect is considered, in the x-x direction a variation of up to 73.06% and 77.76% in the y-y direction was obtained.*

*Keywords-- Push Over Analysis, P-delta effect, Mass irregularity, Seismic performance, ductility.*

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.416>  
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

# Influencia del efecto p-delta y la irregularidad en masa en el comportamiento estructural de una estructura de mediana altura

Cristopher Torres, Egresado<sup>1</sup>, Darwin Zavala, Egresado<sup>2</sup>, and Javier Moreno, Msc Profesor<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201516680@upc.edu.pe, u201403828@upc.edu.pe, pccijmor@upc.edu.pe

*Abstract— In the present investigation, the influence of the irregularity of the mass and the PA effect on the structural behavior of a 15-story building is analyzed. The case of a regular 15-story building, 4 cases of buildings with the presence of mass irregularity in an established floor and 4 cases of irregular buildings with PA effect is presented.*

*First, through linear dynamic analysis, the structural response is determined in terms of drifts, basal shear force and moment. Subsequently, the non-linear static analysis (Push over) is performed and the capacity curve of the structure is constructed. The ultimate and creep displacements are obtained from the capacity curve, and the overall ductility is estimated. Then, the seismic performance is determined for the different levels of earthquake. Finally, a comparative analysis of the structural response and the seismic performance of the cases is carried out. When analyzing the moments of the irregular structures with the PA effect, a variation of up to 5.60% was obtained with respect to the regular building, so that there is a greater increase in the moments when in the structural analysis of a structure with irregularity of the mass the PA effect is considered. An increase in the variation of the stiffness has been generated in case 1 when the PA effect is considered, in the x-x direction a variation of up to 73.06% and 77.76% in the y-y direction was obtained.*

**Keywords-- Push Over Analysis, P-delta effect, Mass irregularity, Seismic performance, ductility.**

## I. INTRODUCTION

En el presente artículo se pretende estimar la influencia de la irregularidad en la masa con el efecto P-delta (segundo orden) en edificaciones de mediana altura en su comportamiento estructural. Se define 4 modelos de estructuras que presentan irregularidad de la masa en determinados niveles y un caso adicional de una estructura regular. Se realizan procedimientos de análisis dinámico lineal, análisis estático no lineal, y el desempeño sísmico correspondiente. Posteriormente se realiza un análisis comparativo entre todos los casos para determinar la variación del comportamiento estructural.

Los edificios son propensos a deformarse lateralmente desde la posición original con una excentricidad durante un terremoto, cuando la construcción de estructuras se somete a cargas sísmicas haciendo que la estructura se deforme, la excentricidad resultante de la carga total gravedad debido a ejes inclinados de la estructura hace ejercer los momentos adicionales en la base [1].

Lopez, Otmara, & Fundora [2], mencionan que el efecto P-delta se trata de un efecto no lineal o de segundo orden que se produce en toda estructura en la que los elementos estén sometidos a cargas axiales.

La importancia de este efecto puede ser insignificante cuando la estructura responde elásticamente, pero es muy importante cuando la estructura responde inelásticamente. El efecto P- $\Delta$  por lo general aumenta la respuesta de desplazamiento de las estructuras. Incluso puede causar inestabilidad dinámica cuando la estructura es sometida a severos movimientos sísmicos [3].

Con respecto a la irregularidad de la masa; Zhao, Hu y Long [4] mencionan que la irregularidad vertical o altura de una estructura se introduce por cambios abruptos o discontinuidades en la configuración (como la dimensión, la masa del suelo, la rigidez, la resistencia o su combinación) a lo largo de su dirección vertical. Como consecuencia de ello, pueden producirse grandes tensiones o concentraciones de deformación plástica en la debilidad local y propagarse a los daños globales o incluso al colapso.

En el contexto del análisis del efecto P-Delta, Shehu, Angjeliu y Bilgin [5] en su investigación realizan el análisis Push Over para estimar la ductilidad de una estructura metálica, que considera de manera simultánea los efectos de P- $\Delta$  y las deformaciones plásticas.

En este contexto, no solo está referido al efecto P – Delta, también consiste evaluar que este efecto puede incrementarse por la presencia de una irregularidad en altura de la estructura. Los efectos P- Delta, suelen ser un problema en estructuras de mayor periodo, y con un coeficiente de estabilidad mayor a 0.1 y no menor que 0.25 (Euro código 8), es por ello que es esencial tomar en cuenta en el diseño para estructuras que cumplan ciertas características, ya que ocasiona variaciones en los espectros de respuesta, periodo fundamental, y fuerzas en la base [6].

## II. METODOLOGIA

Nuestro estudio será válido para estructuras de irregularidad en masa, de acuerdo a la norma ASCE/SEI 41-13 donde se identifica este tipo de configuración. mediante (1) que compara los pesos entre pisos adyacentes ( $P_i$ ).

$$P_{i+1}/P_i > 1.50 \quad (1)$$

Este estudio consiste en la modelación de la estructura de 15 pisos con presencia de irregularidad en altura de tipo masa, con el programa ETABS.

Luego se realiza el análisis dinámico lineal que incluye el efecto P-delta, se evalúa el índice de estabilidad (Q) planteado en (2) según el Eurocodigo/ASCE, en los modelos para desarrollar un análisis comparativo de la respuesta estructural en términos de desplazamiento, cortante basal y momentos.

$$0.1 < Q < 0.25 \quad (2)$$

Posteriormente se realiza el análisis estático no lineal en los modelos para obtener la curva de capacidad, se evalúa el desempeño sísmico con el Método de Coeficientes según ASCE/SEI 41-13, y finalmente se compara la ductilidad y rigidez. La rigidez lateral de la estructura se determina mediante (3), que relaciona el cortante de cedencia ( $V_y$ ) y el desplazamiento ( $D_{0.60}$ ). Se plantea (4) para estimar la ductilidad global de la estructura ( $\mu_\delta$ ), que relaciona el desplazamiento último ( $\delta_u$ ) y el desplazamiento de cedencia ( $\delta_y$ ).

$$K_e = 0.60V_y/D_{0.60} \quad (3)$$

$$\mu_\delta = \delta_u/\delta_y \quad (4)$$

### III. RESULTADOS Y DISCUSION

#### A. Clasificación de las Estructuras

Para la confirmación de nuestro método, se eligió cinco edificaciones, una edificación regular y cuatro edificaciones con presencia de irregularidad en altura de tipo masa que considera el tipo de uso de oficinas.

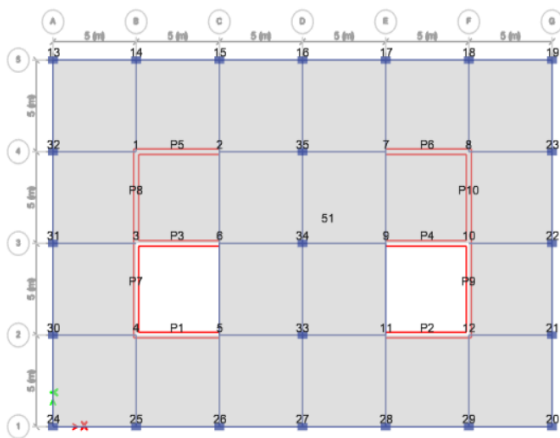


Fig. 1: Planta de Analisis

En la Fig. 2, se presentan los siguientes casos de estudio:

- Caso1 – Irregularidad de la masa en el piso 3
- Caso2 – Irregularidad de la masa en el piso 6
- Caso3 – Irregularidad de la masa en el piso 9
- Caso4 – Irregularidad de la masa en el piso 12

Sobrecargas para los diferentes Niveles					
Tipo de Carga	Niveles	Sobrecarga	Carga		
Live	S/c 1° =	Exceptuando salas de archivo y computación.	250 kg/m <sup>2</sup>	Según norma	
	S/c 2° =	Exceptuando salas de archivo y computación.	250 kg/m <sup>2</sup>	Según norma	
	S/c 3° =	Salas de archivo	500 kg/m <sup>2</sup>	Según norma	CASO 1
	S/c 4° =	Exceptuando salas de archivo y computación.	250 kg/m <sup>2</sup>	Según norma	
	S/c 5° =	Exceptuando salas de archivo y computación.	250 kg/m <sup>2</sup>	Según norma	
	S/c 6° =	Salas de archivo	500 kg/m <sup>2</sup>	Según norma	CASO 2
	S/c 7° =	Exceptuando salas de archivo y computación.	250 kg/m <sup>2</sup>	Según norma	
	S/c 8° =	Exceptuando salas de archivo y computación.	250 kg/m <sup>2</sup>	Según norma	
	S/c 9° =	Salas de archivo	500 kg/m <sup>2</sup>	Según norma	CASO 3
	S/c 10° =	Exceptuando salas de archivo y computación.	250 kg/m <sup>2</sup>	Según norma	
	S/c 11° =	Exceptuando salas de archivo y computación.	250 kg/m <sup>2</sup>	Según norma	
	S/c 12° =	Salas de archivo	500 kg/m <sup>2</sup>	Según norma	CASO 4
	S/c 13° =	Exceptuando salas de archivo y computación.	250 kg/m <sup>2</sup>	Según norma	
	S/c 14° =	Exceptuando salas de archivo y computación.	250 kg/m <sup>2</sup>	Según norma	
Live Up	S/c Ultimo Nivel =	Azoteo	100 kg/m <sup>2</sup>	Según norma	

Fig. 2: Casos de Estructuras

En la tabla 1, se muestra la verificación de la irregularidad de la masa para el caso 2, en la dirección x-x.

Tabla 1 : Verificación de Irregularidad

Story	Dirección de Analisis x - x		VERIFICACIÓN		
	UX tonf-s <sup>2</sup> /m	PESO Tonf	1.5		
Piso 15	22.76	223.2112200			
Piso 14	58.64	575.0421466	1.00	REGULAR	
Piso 13	58.64	575.0421466	1.00	REGULAR	1.0000000
Piso 12	58.64	575.0421466	1.00	REGULAR	1.0000000
Piso 11	58.64	575.0421466	1.00	REGULAR	1.0000000
Piso 10	58.64	575.0421466	1.00	REGULAR	1.0000000
Piso 9	58.64	575.0421466	1.00	REGULAR	1.0000000
Piso 8	58.64	575.0421466	1.00	REGULAR	1.0000000
Piso 7	58.64	575.0421466	1.00	REGULAR	1.0000000
Piso 6	86.50	868.3136413	1.51	IRREGULAR	1.5100000
Piso 5	58.64	575.0421466	1.00	REGULAR	0.6622517
Piso 4	58.64	575.0421466	1.00	REGULAR	1.0000000
Piso 3	58.64	575.0421466	1.00	REGULAR	1.0000000
Piso 2	58.64	575.0421466	1.00	REGULAR	1.0000000
Piso 1	58.64	575.0421466			1.0000000
SUMA		8567.0727667			

Se calculó los índices de Estabilidad para todos los casos, como se muestra en la Fig. 3; donde se muestra que para todos los casos de irregulares en masa si es necesario la aplicación del efecto P-Delta, debido a que su índice de estabilidad supera el 0.10, establecido por el ASCE.

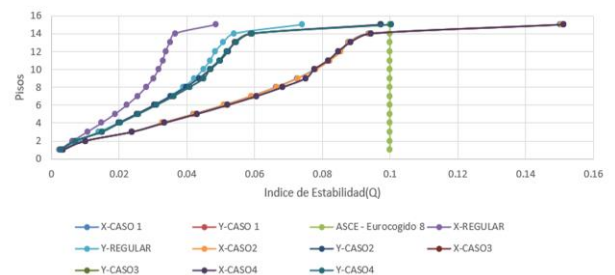


Fig. 3: Índice de Estabilidad

### B. Aplicación del Efecto P-Delta en el análisis Dinámico Lineal

Se realizó una comparación de la respuesta estructural en términos de derivas, fuerza cortante y momentos por piso; de los modelos iniciales y modelos que incluyen el efecto P-delta.

Los porcentajes de variación de derivas del Regular son de 1.40%, del Caso 1, son de 4.50%; del Caso 2, 5.4%; el Caso 3 es de 4.4% del Caso 4, es de 4.60%; como se evidencia en la Fig. 4; por lo tanto, se puede decir que en los diferentes casos, el caso más crítico es el piso 12, debido a que genera mayor porcentaje de derivas; además se ve un aumento considerable con respecto al modelo regular, al momento de añadir en diferentes pisos la irregularidad de masa.

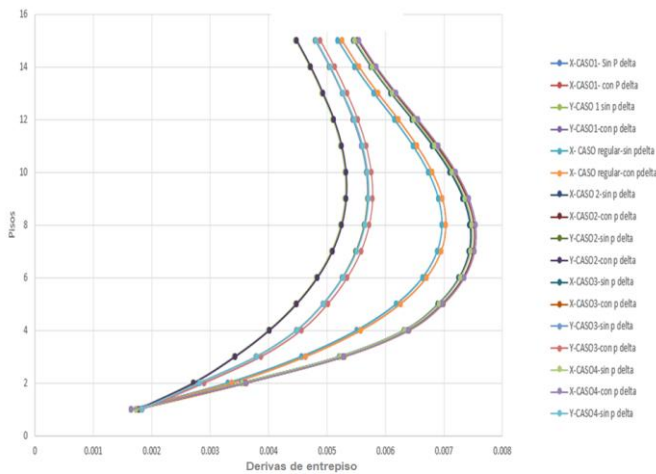


Fig. 4: Derivas por piso

Los porcentajes de variación de Cortante por piso, del Regular son de 2.50%, del Caso 1, son de 5.0%; del Caso 2, 2.4%; el Caso 3 es de 3.8% del Caso 4, es de 3.60%, como se evidencia en la Fig. 5; por lo tanto, se puede decir que en los diferentes casos, el caso más crítico es el piso 3, debido a que genera mayor porcentaje de fuerza cortante en la base; además se ve un aumento considerable con respecto al modelo regular, al momento de añadir en diferentes pisos la irregularidad de masa.

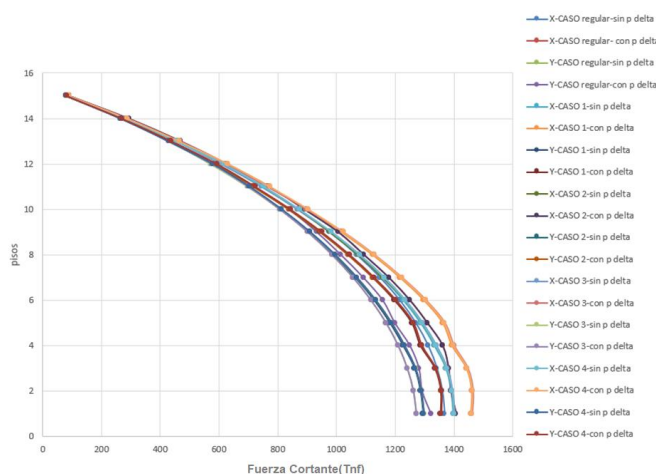


Fig. 5: Cortantes por piso

Los porcentajes de variación de Momento por piso, del Regular son de 2.60%, del Caso 1, son de 2.0%; del Caso 2, 2.5%; el Caso 3 es de 5.0% del Caso 4, es de 4.86%, como se evidencia en la Fig. 6; por lo tanto, se puede decir que en los casos diferentes el caso más crítico es el piso 9, debido a que genera mayor porcentaje de momentos; además se ve un aumento considerable con respecto al modelo regular, al momento de añadir en diferentes pisos la irregularidad de masa.

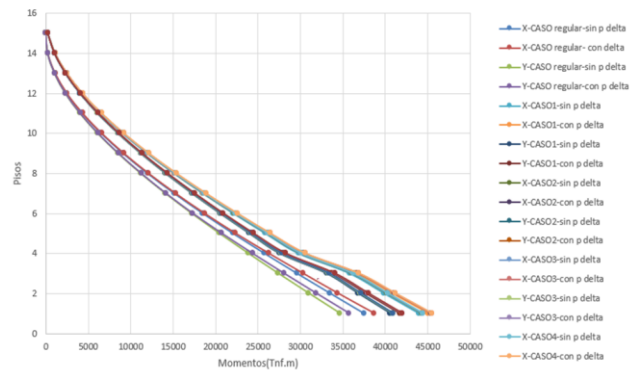


Fig. 6: Momentos por piso

Luego se realizó el análisis estático no lineal Push – Over, en el modelo regular y los 4 casos, con el efecto P-Delta vs sin Efecto P-Delta, para obtener la Curva de Capacidad.

### C. Aplicación del Analisis Estático No Lineal (Push Over)

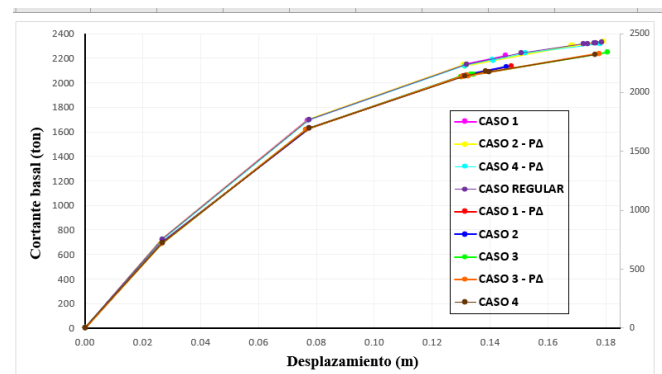


Fig. 7: Curva de Capacidad en la dirección X-X

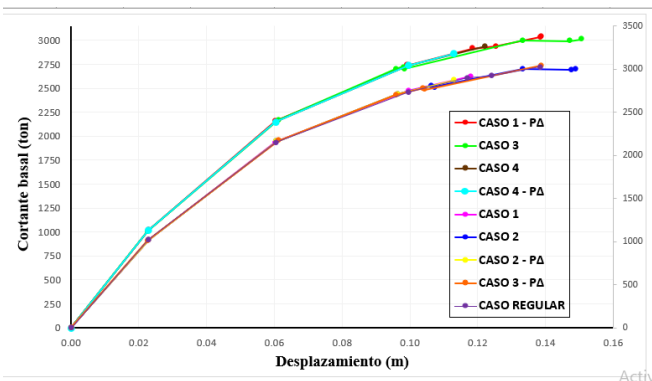


Fig. 8: Curva de Capacidad en la dirección Y-Y

En la dirección x-x, para los casos 1 y 2 se cuenta con un desplazamiento ultimo de 0.1456 metros y 0.1458 metros respectivamente, y están por debajo del desplazamiento ultimo  $D_u = 0.1785$  metros de la estructura regular. En cuanto a los casos 3 y 4 los desplazamientos últimos son 0.1803 metros y 0.1764 metros respectivamente, ambos valores son cercanos al desplazamiento último del caso regular.

En la dirección y-y, para los casos 1 y 4 se tienen desplazamientos ultimo de 0.1179 metros y 0.1222 metros respectivamente, los cuales son menores al desplazamiento ultimo  $D_u = 0.1383$  metros de la estructura regular. En cambio, en los casos 2 y 3 se cuentan con desplazamientos ultimo de 0.1489 metros y 0.1504 metros respectivamente, en ambos casos superan el desplazamiento ultimo  $D_u = 0.1383$  metros de la estructura regular.

En la dirección X-X, las curvas de capacidad en los casos 2 - PΔ, 3 - PΔ, 4 - PΔ y regular resultaron ser muy similares, así como también los valores de desplazamiento último que no tienen variación significativa. En cambio, en el caso 1 - PΔ, si bien se tiene una curva de capacidad similar a los demás casos mencionados, se cuenta con un desplazamiento ultimo de 0.1475 metros, este resultado es el menor de todos los casos.

En la dirección Y-Y, las curvas de capacidad en los casos 1 - PΔ, 3- PΔ, y regular resultaron ser muy similares, así como también los valores de desplazamiento último que no tienen variación significativa. En cambio, en los casos 2 - PΔ y 4 - PΔ, si bien tienen una curva de capacidad similar a los demás casos mencionados, cuentan con desplazamientos ultimo diferentes al caso regular, en el caso 2 - PΔ su desplazamiento último es de 0.1129 metros y en el caso 4 - PΔ, 0.1128 metros.

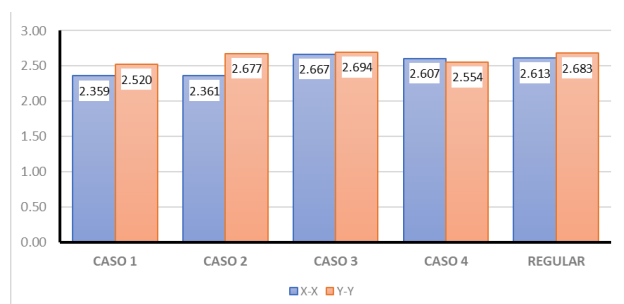


Fig. 9: Ductilidad global de la estructura – Sin considerar efecto p-delta

La ductilidad de la estructura regular es  $\mu = 2.613$  en la dirección x-x, en los casos 1 y 2 se han tenido valores de ductilidad por debajo de la ductilidad del caso regular, esto quiere decir que la irregularidad en masa ha influido en menor magnitud en la ductilidad global. Y para los casos 3 y 4 se ha anotado valores de ductilidad cercanos al caso regular, la irregularidad de la masa no ha tenido un impacto significativo en la ductilidad.

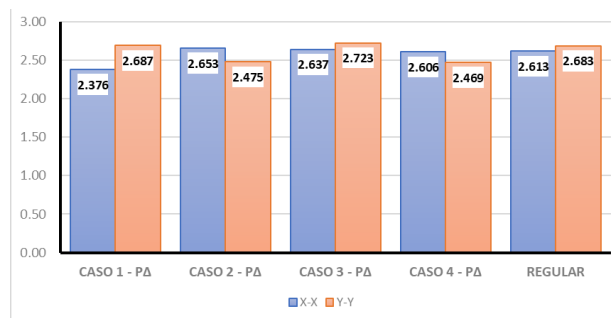


Fig. 10: Ductilidad global de la estructura – Considerando el efecto p-delta

#### Dirección X-X:

En cuanto a la ductilidad global de la estructura, los casos 2 - PΔ, 3 - PΔ y 4 - PΔ no presentan variación en la ductilidad global con respecto al caso regular, en cambio en el caso 1 su ductilidad de  $\mu = 2.376$  es la que más variación cuenta que los demás casos con respecto al caso regular.

#### Dirección Y-Y:

En cuanto a la ductilidad global de la estructura, en los casos 1 y 3 no presentan variación considerable en la ductilidad global con respecto al caso regular, en cambio en los casos 2 y 4 se tiene una mayor diferencia de la ductilidad en comparación con los casos 1 y 3 con respecto a la ductilidad del caso regular. La ductilidad calculada en el caso 2 es  $\mu = 2.475$ , y  $\mu = 2.469$  en el caso 4.

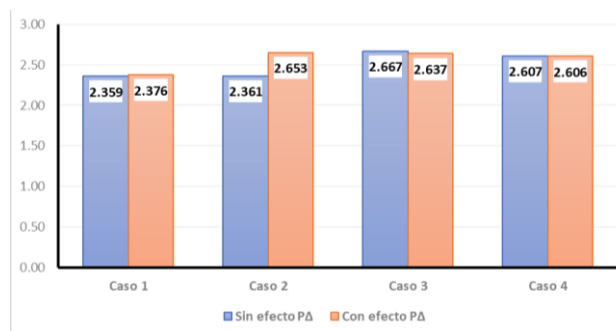


Fig. 11: Ductilidad de casos sin efecto PΔ vs con efecto PΔ – dirección x-x

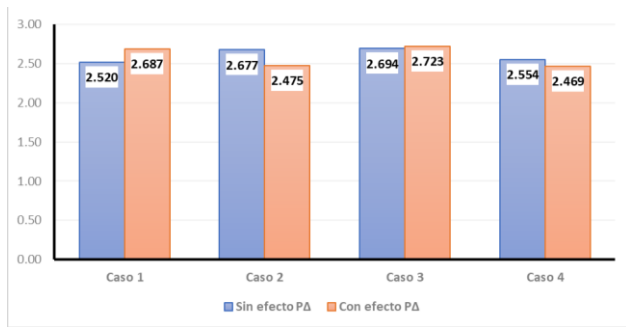


Fig. 12 : Ductilidad de casos sin efecto PA vs con efecto PA – dirección y-y

Tabla 2: Rigidez lateral efectivo

Rigidez Lateral Efectiva $K_e$ (ton/m)					
Dirección	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Regular
X-X	26167.53	26171.08	25765.42	25711.05	25761.45
Y-Y	43360.953	42148.664	42011.946	43056.213	42562.743

La rigidez lateral efectiva para el caso regular es  $K_e = 25761.45$  tonelada fuerza por metro en la dirección x-x y  $K_e = 42562.743$  tonelada fuerza por metro en la dirección y-y. La estructura del caso 1 es apenas más rígido que la estructura del caso regular, porque tiene una rigidez lateral efectiva  $K_e = 26167.53$  tonelada fuerza por metro en la dirección x-x y  $k_e = 43360.95$  tonelada fuerza por metro en la dirección y-y. El caso 2 es ligeramente más rígido que el caso regular pero solo en dirección x-x, y el caso 4 es ligeramente más rígido solo en dirección y-y que la estructura regular.

Según los resultados de la tabla 3, se presenta en el caso regular una mayor reducción de su rigidez lateral  $K_p = 5198.26$  tonelada fuerza por metro en la dirección x-x. En la dirección y-y, el caso 3 tiene mayor degradación de la rigidez lateral  $K_p = 7021.86$  tonelada fuerza por metro.

Tabla 3: Rigidez post-elastica – sin efecto PA

SIN EFECTO PA					
Rigidez post-elastica $K_p$ (ton/m)					
Dirección	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso Regular
X-X	7179.977	7168.065	5319.126	5361.348	5198.257
Y-Y	12421.301	7065.669	7021.859	11732.798	9618.602

Tabla 4: Rigidez post-elastica – con efecto PA

CON EFECTO PA					
Rigidez post-elastica $K_p$ (ton/m)					
Dirección	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso Regular
X-X	7049.08	5294.38	5369.99	5175.38	5198.26
Y-Y	9644.01	13158.95	9862.87	13088.12	9618.60

En la dirección x-x, el caso 4 tiene más reducción de la rigidez lateral de  $K_p = 5175.38$  tonelada fuerza por metro.

Tabla 5: Variación de la rigidez global de la estructura – sin efecto PA

SIN EFECTO PA					
Variación de la rigidez global					
Dirección	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso Regular
X-X	72.56%	72.61%	79.36%	79.15%	79.82%
Y-Y	71.35%	83.24%	83.29%	72.75%	77.40%

En la dirección y-y, en los casos 2 y 3 se produjeron mayor variación de la rigidez lateral con respecto al caso regular. En el caso 2 la rigidez lateral ha variado en un 83.24% y 83.29% en el caso 3.

Tabla 6: Variación de la rigidez global de la estructura – con efecto PA

CON EFECTO PA					
Variación de la rigidez global					
Dirección	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso Regular
X-X	73.06%	79.77%	79.16%	79.87%	79.82%
Y-Y	77.76%	68.78%	76.52%	69.60%	77.40%

Cuando se considera el efecto PA, se tiene un incremento en la variación de la rigidez en la dirección x-x para los casos 1, 2 y 4. Asimismo, en la dirección y-y se tiene el mismo comportamiento de incremento de la variación de la rigidez en el caso 1.

#### D. Desempeño Sísmico – Metodo de Coeficientes

En la tabla 7, se muestra los puntos de desempeño del caso regular para cada nivel de amenaza sísmica. El punto de desempeño está conformado por el desplazamiento objetivo ( $D_p$ ) y el cortante basal ( $V$ ). En el caso regular se ha tenido mayor desplazamiento objetivo en la dirección x-x para cada nivel de sismo.

Tabla 7: Puntos de Desempeño por el Método de Coeficientes – Caso Regular

Dirección	Sismo	$D_p$ (m)	$V$ (tonf)
X-X	Frecuente	0.1046	1940
	Servicio	0.1268	2050
	Diseño	0.2525	-
	Maximo	0.3281	-
Y-Y	Frecuente	0.0656	2320
	Servicio	0.0800	2460
	Diseño	0.1629	-
	Maximo	0.2181	-

En la tabla 8, se muestra a detalle el resultado de punto de desempeño de los casos 1, 2, 3 y 4 para cada nivel de sismo cuando no se considera el efecto PA. En todos los casos, el desplazamiento objetivo resulto ser mayor en la dirección x.

Tabla 8: Puntos de Desempeño por el Método de Coeficientes – Sin efecto PA

		Sin efecto PA			
		Direccion	Sismo	Dp (m)	V (tonf)
CASO 1	X-X	Frecuente	0.1044	1910	
		Servicio	0.1268	2070	
		Diseño	0.2544	-	
		Maximo	0.3312	-	
CASO 2	Y-Y	Frecuente	0.0656	2250	
		Servicio	0.0799	2430	
		Diseño	0.1652	-	
		Maximo	0.2226	-	
CASO 3	X-X	Frecuente	0.1044	1910	
		Servicio	0.1268	2075	
		Diseño	0.2544	-	
		Maximo	0.3312	-	
CASO 4	Y-Y	Frecuente	0.0655	2390	
		Servicio	0.0801	2510	
		Diseño	0.1612	-	
		Maximo	0.2150	-	
CASO 3	X-X	Frecuente	0.1045	1920	
		Servicio	0.1268	2040	
		Diseño	0.2527	-	
		Maximo	0.3285	-	
CASO 4	Y-Y	Frecuente	0.0655	2400	
		Servicio	0.0800	2510	
		Diseño	0.1612	-	
		Maximo	0.2149	-	
CASO 3	X-X	Frecuente	0.1045	1930	
		Servicio	0.1268	2040	
		Diseño	0.2528	-	
		Maximo	0.3286	-	
CASO 4	Y-Y	Frecuente	0.0656	2260	
		Servicio	0.0800	2430	
		Diseño	0.1648	-	
		Maximo	0.2218	-	

En la tabla 9, se muestra a detalle el resultado de punto de desempeño de los casos 1, 2, 3 y 4 para cada nivel de sismo, que consideran el efecto PA. En todos los casos, el desplazamiento objetivo resulto ser mayor en la dirección x.

Tabla 9: Puntos de Desempeño por el Método de Coeficientes – Con efecto PA

		Con efecto PA			
		Direccion	Sismo	Dp (m)	V (tonf)
CASO 1	X-X	Frecuente	0.1044	1920	
		Servicio	0.1269	2070	
		Diseño	0.2543	-	
		Maximo	0.3310	-	
CASO 2	Y-Y	Frecuente	0.0656	2320	
		Servicio	0.0801	2460	
		Diseño	0.1629	-	
		Maximo	0.2182	-	
CASO 2	X-X	Frecuente	0.1045	1930	
		Servicio	0.1269	2040	
		Diseño	0.2528	-	
		Maximo	0.3286	-	
CASO 3	Y-Y	Frecuente	0.0655	2230	
		Servicio	0.0801	2425	
		Diseño	0.1659	-	
		Maximo	0.2239	-	
CASO 3	X-X	Frecuente	0.1046	1930	
		Servicio	0.1268	2050	
		Diseño	0.2528	-	
		Maximo	0.3286	-	
CASO 4	Y-Y	Frecuente	0.0656	2300	
		Servicio	0.0801	2440	
		Diseño	0.1633	-	
		Maximo	0.2189	-	
CASO 4	X-X	Frecuente	0.1046	1930	
		Servicio	0.1269	2040	
		Diseño	0.2527	-	
		Maximo	0.3284	-	
CASO 4	Y-Y	Frecuente	0.0656	2230	
		Servicio	0.0800	2420	
		Diseño	0.1660	-	
		Maximo	0.2240	-	

Tabla 10: Evaluación del Desempeño Sísmico – Caso Regular

Evaluación del Desempeño Sísmico - Caso Regular					
Direccion	Sismo	Totalmente Operacional	Operacional	Seguridad de Vida	Prevencion de Colapso
X-X	Frecuente				
	Servicio				
Y-Y	Frecuente				
	Servicio				

En la dirección X-X, en los sismos frecuente y de servicio (ocasional) el edificio alcanza un estado o un límite de daño del nivel Seguridad de Vida, como los dos primeros puntos de desempeño se encuentran en el rango Seguridad de Vida, la estructura puede presentar daños moderados en algunos de sus elementos, mayormente los elementos no estructurales, pero estos pueden ser reparados o reforzados si la estructura permanece temporalmente cerrada.

En la dirección Y-Y, en sismo frecuente el edificio alcanza un estado o un límite de daño del nivel Operacional, se producen agrietamientos en los elementos estructurales, los cuales pueden ser fácilmente reparados. En el sismo de servicio (ocasional) el edificio alcanza un estado o un límite de daño del nivel Seguridad de Vida.

De acuerdo a los resultados que se muestran en la tabla 11, para todos los casos de estudio se tiene el mismo desempeño sísmico en las direcciones X y Y.

Tabla 11: Evaluación del Desempeño Sísmico – Sin efecto PA

Evaluación del Desempeño Sísmico - Sin efecto PA						
	Dirección	Sismo	Totalmente Operacional	Operacional	Seguridad de Vida	Prevención de Colapso
CASO 1	X-X	Frecuente				
		Servicio				
	Y-Y	Frecuente				
		Servicio				
CASO 2	X-X	Frecuente				
		Servicio				
	Y-Y	Frecuente				
		Servicio				
CASO 3	X-X	Frecuente				
		Servicio				
	Y-Y	Frecuente				
		Servicio				
CASO 4	X-X	Frecuente				
		Servicio				
	Y-Y	Frecuente				
		Servicio				

En la dirección x-x, se tienen resultados similares de desempeño sísmico en todos los casos. En cambio, en la dirección y-y, se tiene una variación del desempeño sísmico en los casos de estudio. Por ejemplo, en los casos 2 y 3 se tiene un adecuado desempeño sísmico de la estructura ante el sismo de servicio (ocasional), mientras que en los casos 1 y 4, ante la ocurrencia de un sismo de servicio no se cumple con el objetivo de desempeño.

Tabla 12: Evaluación del Desempeño Sísmico – Con efecto PA

Evaluación del Desempeño Sísmico - Con efecto PA						
	Dirección	Sismo	Totalmente Operacional	Operacional	Seguridad de Vida	Prevención de Colapso
CASO 1	X-X	Frecuente				
		Servicio				
	Y-Y	Frecuente				
		Servicio				
CASO 2	X-X	Frecuente				
		Servicio				
	Y-Y	Frecuente				
		Servicio				
CASO 3	X-X	Frecuente				
		Servicio				
	Y-Y	Frecuente				
		Servicio				
CASO 4	X-X	Frecuente				
		Servicio				
	Y-Y	Frecuente				
		Servicio				

### E. Conclusiones

- Según la Eurocodigo 8, el edificio de 15 pisos no debería tener en consideración el Efecto P-Delta, debido a que índice de estabilidad es menor que 0.1, pero se debe considerar el efecto para los casos de irregularidad de tipo masa, debido a que sus porcentajes de variación más críticos, son de 4.50%, 3.60%, 4.86%, de derivas, fuerza cortante, y momentos por piso; los cuales son considerables.
- El caso más crítico que presento mayores problemas en el eje Y-Y, es el caso 4, donde la irregularidad de masa se dio en el piso 12, debido a que los momentos en la base, variaban hasta el 5.60%, cuando se consideró el efecto P-Delta.

- Los cambios de desplazamientos de derivas, fuerza cortante y momentos por piso, del caso regular vs el caso 4 con p delta, la variación es de 25%, por lo cual es significativo, lo cual modificaría totalmente el diseño de la estructura, lo cual se recomienda hacer un nuevo diseño considerando la irregularidad en masa y el efecto p delta.
- Con respecto a la rigidez global de una estructura, se ha demostrado en base a los resultados de la tabla 5 que mientras esta presente la irregularidad de la masa en pisos superiores, se tiene una mayor de reducción de la rigidez lateral. En la dirección x-x, en el caso 3 se produce una mayor variación de la rigidez en 79.36%, pero para el caso 4 en donde el peso del piso 12 es 1.5 veces el peso del piso adyacente, se tiene una variación del 79.15%. En la dirección y-y, en el caso 3 se calcula una mayor variación de la rigidez en 83.29%, pero cuando se analiza el caso 4 la variación de la rigidez se reduce a 72.75%. Con estos resultados se concluye en que la irregularidad de la masa si influye en la degradación de la rigidez de la estructura, pero cuando la irregularidad se presenta en los pisos superiores no tan cerca al techo. Cuando se considera el efecto PΔ, el caso 1 resulta ser el más crítico porque se incrementa la variación de la rigidez en ambas direcciones de análisis, en la dirección x-x la variación de la rigidez llega hasta 73.06% y 77.76% en la dirección y-y. A partir de este resultado, se confirma que el efecto PΔ influye directamente en la rigidez de la estructura cuando se tiene un caso de irregularidad de la masa dentro en los primeros niveles o pisos.
- De acuerdo a los resultados de la tabla 9, 10 y 11, en determinados casos la irregularidad en masa influye en menor medida en el desempeño sísmico de una estructura. Tenemos los casos 2 y 3 en la dirección y-y, que resultaron con un nivel de desempeño Operacional cuando la estructura esta sujeta a un sismo de servicio, por el contrario los casos 1 y 4 obtuvieron un nivel de desempeño Seguridad de Vida ante un sismo de servicio. Entonces cuando se comparan los resultados del desempeño sísmico del caso regular con los casos que presentan irregularidad en masa, se puede afirmar que la irregularidad de la masa no influye considerablemente en la respuesta del desempeño sísmico cuando el peso de un piso es igual a 1.50 veces el piso adyacente. Se recomienda analizar el desempeño sísmico de estructuras que presenten irregularidad de la masa pero con relación del peso entre pisos mayor a 1.50.

### REFERENCIAS

- [1] A. N. PATTAR y S. M. MURANAL, «P-Delta effect on multi-storey



- buildings.» *i-manager's Journal on Structural Engineering*, vol. 6, n° 3, pp. 1-11, 2017.
- [2] A. Lopez Litvinovich, J. Otmara Martinez y T. Fundora Davalos, «Influencia del Efecto P-Delta en la respuesta estructural de una edificación alta de 95 m de altura ante cargas laterales,» de *II Convención Científica Internacional UCLV*, Villa Clara, 2019.
- [3] N. Pourali, H. Khosravi y M. Dehestani, «An investigation of P-delta effect in conventional seismic design and direct displacement-based design using elasto-plastic SDOF systems,» *Bulletin of Earthquake Engineering*, pp. 1-24, 2018.
- [4] W. Zhao, X. Hu y Z. Long, «Seismic Ductility Reduction of Flexural-type Structures with Vertical Irregularities,» *The Open Civil Engineering Journal*, vol. 10, pp. 1-11, 2016.
- [5] R. Shehu, G. Angjeliu y H. Bilgin, «A Simple Approach for the Design of Ductile Earthquake-Resisting Frame Structures Counting for P-Delta Effect,» *Buildings*, vol. 9, n° 10, pp. 1-16, 2019.
- [6] S. M. Fard Mousavi y S. Sensoy, «Direct estimation of the P-delta effect through the “stability-coefficient-response-spectra” by introducing the “first-storey-single-degree-of-freedom” system,» *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 17, n° 6, p. 3495–3516, 2019.