

EFFECTOS DE LA IRREGULARIDAD VERTICAL DE PISO BLANDO SOBRE LA RESPUESTA NO-LINEAL DE ESTRUCTURAS APORTICADAS

J. Janampa ⁽¹⁾, Víctor I. Fernández-Dávila ⁽²⁾

RESUMEN

En sismos pasados ocurridos en el Perú y el mundo se ha observado que la irregularidad vertical debido al fenómeno de piso blando en estructuras de edificios representa una grave amenaza para su integridad y estabilidad. Prevenir el colapso para preservar la vida de los ocupantes de una estructura es uno de los objetivos principales en todas las normas de diseño sismorresistentes en el mundo. Por ello, conocer a partir de que alturas existe esta irregularidad constituye un dato crítico para determinar la posibilidad de colapso por piso blando. Este dato es importante tanto para el diseño de nuevas estructuras como para la evaluación y rehabilitación de estructuras existentes. Se revisaron varios códigos para conocer la definición de la irregularidad vertical de piso blando y se presenta un resumen de las especificaciones de estos códigos. Se analizaron modelos de edificios aporticados de tres, cinco, nueve y quince pisos, con dos vanos en ambas direcciones. La luz de los vanos es de 5 m, la altura típica es de 3 m y la altura del primer piso varía desde 3 m hasta 9 m. Tales modelos fueron diseñados de acuerdo a las recomendaciones del Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú [11]. Con fines de comparación, se desarrolla un modelo patrón de tipología regular, tanto en planta como en elevación, y los casos que representan las estructuras irregulares se definen mediante la modificación de la distribución vertical de la rigidez, incrementando la altura del primer piso del modelo patrón hasta identificar los elementos estructurales más débiles que fallen primero.

El objetivo es encontrar el límite de la irregularidad que garantice la estabilidad de la estructura evitando el colapso. De esta manera se asegura que la estructura llegue a formar un mecanismo de colapso escogido durante la etapa de diseño (vigas débiles y columnas fuertes). Evaluando los límites de la distorsión de entrepiso para los diferentes niveles de desempeño (Visión 2000).

En todos los edificios estudiados de tres, cinco, nueve y quince pisos, para la altura del primer piso que varía de tres hasta menos de siete metros la distorsión está comprendida entre el nivel de desempeño de ocupación inmediata (IO) y seguridad de vida (LS). Para la altura del primer piso que varía de siete hasta nueve metros la distorsión está comprendida entre el nivel de desempeño de seguridad de vida (LS) y prevención del colapso (CP). Por consiguiente se puede concluir que la altura máxima en un entrepiso de un edificio aporticado para que no se produzca piso blando y que se considere aceptable debe ser menor de siete metros. Esto quiere decir una relación de altura (altura típica / altura de primer piso) hasta 42%, es un límite aceptable. Esto es mucho menor que el porcentaje que declara la irregularidad debido al piso blando en la norma peruana E.030(2003) 75% y E.030 (2016) 60%, lo que implica que la norma sísmica peruana E.030 es seguro, de alguna manera conservadora.

Palabras clave: Piso blando, estructuras irregulares, límite de la irregularidad, mecanismo de colapso, nivel de desempeño

⁽¹⁾ Ingeniero Investigador. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, jorgecip@hotmail.com

⁽²⁾ Profesor. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, vifdavila@uni.edu.pe

ABSTRACT

In past earthquakes happened in Peru and worldwide it has been observed that vertical irregularity due to the phenomenon of soft story in building structures represents a serious hazard for its integrity and stability. To prevent collapse to preserve occupant lives inside a structure is a main objective in all earthquake resistant design standards in the world. Therefore to know from which first story height this irregularity becomes critical to determine the possibility of collapse due to soft story. This is important for both design of new structures as for assessment and rehabilitation of existing structures. Several worldwide codes were reviewed to learn how this vertical irregularity is defined and a summary is presented. Framed buildings of three, five, nine and fifteen stories, with two spans in both directions were analyzed. Openings span is five meters, typical height is three meters and the first floor height varies from three to nine meters. These models were previously designed according to recommendations of Peruvian Building National Regulations [11]. For comparison, a regular pattern structure, both in plan and elevation model was developed. Cases representing irregular structures were defined by modifying the vertical distribution of stiffness, increasing the height of the first floor model pattern to identify the weakest structural elements to fail first.

The goal was to find the limit of the irregularity to ensure the stability of the structure and prevent collapse. Thus it is ensured that the structure reaches a collapse mechanism chosen during the design stage (weak beams strong columns), evaluating interstory drift limits for various performance levels according to Vision 2000.

In all buildings studied (three, five nine and fifteen stories) for first story height varying from three to under seven meters (6.5m) drift is between immediate occupancy (IO) and life safety (LS) performance level. For first story height varying from seven to nine meters drift lies between life safety (LS) and collapse prevention (CP) performance levels. Therefore it can be concluded that maximum first story height of a framed building, for it not to present soft story and have acceptable performance, must be under seven meters. This means a height ratio (typical height / first floor height) up to 42%, is an acceptable limit. This limit is much lower than percentage that declares soft story in the Peruvian Standards E.030-2003 (75%) and E.030-2016 (60%), which implies that the seismic Peruvian standard E.030 is safe, somehow conservative.

Keywords: Soft story, irregular structures, irregularity limit, collapse mechanism, performance level.

1. INTRODUCCIÓN

Son muchos los sismos que han ocurrido en Perú y en el mundo, dejando gran cantidad de muertes y serios daños en la infraestructura, atribuyéndose gran parte de los daños a la vulnerabilidad de las edificaciones como consecuencia de inadecuadas configuraciones estructurales, baja resistencia de los elementos estructurales, deficientes prácticas constructivas, materiales de baja calidad, entre otros aspectos. Mientras más compleja sea la estructura, más difícil resulta predecir su comportamiento sísmico. Por esta razón, es aconsejable que la estructura posea una concepción simple, de manera que la idealización para realizar el análisis debido a cargas gravitacionales y sísmicas sea altamente predecible del comportamiento que tendrá la estructura real construida. Uno de los problemas estructurales más comunes y altamente peligroso es el llamado piso blando, debido a que concentra el comportamiento inelástico en un nivel de piso lo que ocasiona que el daño en las columnas exceda la capacidad de deformación inelástica (ductilidad) produciéndose la degradación de rigidez, inestabilidad geométrica, y posiblemente al colapso parcial o total del edificio.

El presente artículo parte de una motivación de estudiar éste fenómeno debido a que una de las más grandes causas de daños graves que originan el colapso parcial o total en las edificaciones ha sido el uso de piso blando, que puede presentarse en cualquier nivel del edificio, causando pérdidas humanas y reparaciones complicadas y costosas; y tiene por objetivo estudiar los efectos de la irregularidad vertical de piso blando sobre la respuesta no-lineal de estructuras aporticadas. Las principales conclusiones esbozadas corresponden a determinar el nivel de distorsión

para el cual se produce piso blando y de confirmar el límite de irregularidad que garantice la estabilidad de la estructura evitando el colapso por piso blando mediante un índice que sea función de la altura de entrepiso y el nivel de daño de la estructura. Asimismo, comparar los límites de irregularidad por piso blando obtenidos con normas de diversos países.

2. FENOMENO DE PISO BLANDO

El fenómeno de piso blando es una irregularidad que se presenta en la altura del edificio, lo cual significa que existe un cambio brusco de rigidez lateral de un nivel de piso respecto a los pisos adyacentes de la estructura. Si una estructura tiene un piso lateralmente flexible, entonces experimentará desplazamientos laterales importantes durante la ocurrencia de un evento sísmico severo. La Figura 1 muestra diferentes estructuras con piso blando ubicadas principalmente en el primer piso.



Figura 1 – Piso blando en la primera planta [1]

2.1. Comparación de irregularidad de rigidez-piso blando según normas de diversos países.

El UBC (Uniform Building Code) publicado por la International Conference of Building Officials [4] y el IBC (International Building Code) desarrollado por el International Code Council [5], consideran que para evaluar el tipo de irregularidad en altura denominado piso blando, se debe establecer en función de la rigidez lateral de sus elementos estructurales K_i , a diferencia es que la IBC la clasifican de dos maneras, 1a y 1b, irregularidades de rigidez e irregularidad de rigidez para piso blando extrema respectivamente, siendo este último más crítico, como se muestra en la Figura 2 y como indica en la Tabla 1. Si la rigidez de piso cumple al menos uno de los dos criterios indicados en dicha tabla, la estructura se considera que tiene piso blando.

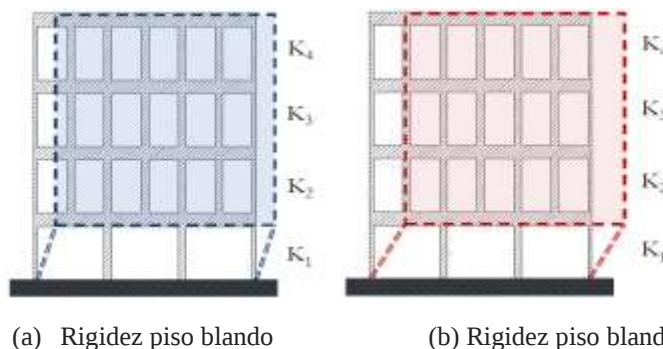


Figura 2 – Irregularidad vertical de piso blando según normas de diversos países.

Tabla 1 – Comparativo de irregularidad por piso blando según normas de diversos países.

Norma	Condición de irregularidad	
	1a.-Irregularidad de rigidez-Piso blando	1b.-Irregularidad de rigidez-Piso blando extrema
Peruana E.030-2003	$\sum A_i < 0.85 \sum A_{i+1} \quad \left(\frac{h_i}{h_d} \right) \sum A_i < 0.85 \sum A_{i+1}$ $\sum A_i < 0.90 \left[\frac{\sum A_{i+1} + \sum A_{i+2} + \sum A_{i+3}}{3} \right]$	---
Peruana E.030-2016	$\frac{\Delta_i}{h_i} > 1.4 \frac{\Delta_{i+1}}{h_{i+1}}$ $\frac{\Delta_i}{h_i} > 1.25 \left[\frac{\frac{\Delta_{i+1}}{h_{i+1}} + \frac{\Delta_{i+2}}{h_{i+2}} + \frac{\Delta_{i+3}}{h_{i+3}}}{3} \right]$	$\frac{\Delta_i}{h_i} > 1.6 \frac{\Delta_{i+1}}{h_{i+1}}$ $\frac{\Delta_i}{h_i} > 1.4 \left[\frac{\frac{\Delta_{i+1}}{h_{i+1}} + \frac{\Delta_{i+2}}{h_{i+2}} + \frac{\Delta_{i+3}}{h_{i+3}}}{3} \right]$
IBC-USA	$K_i < 0.70 K_{i+1}$ $K_i < 0.80 \left[\frac{K_{i+1} + K_{i+2} + K_{i+3}}{3} \right]$	$K_i < 0.60 K_{i+1}$ $K_i < 0.70 \left[\frac{K_{i+1} + K_{i+2} + K_{i+3}}{3} \right]$
México	$K_{i+1} > 1.5 K_i \quad K_i < 0.67 K_{i+1}$	$K_{i+1} > 2 K_i \quad K_i < 0.50 K_{i+1}$
Colombia	$0.60 K_{i+1} \leq K_i < 0.70 K_{i+1}$ $0.70 \left[\frac{K_{i+1} + K_{i+2} + K_{i+3}}{3} \right] \leq K_i < 0.80 \left[\frac{K_{i+1} + K_{i+2} + K_{i+3}}{3} \right]$	$K_i < 0.60 K_{i+1}$ $K_i < 0.70 \left[\frac{K_{i+1} + K_{i+2} + K_{i+3}}{3} \right]$
India	$K_i < 0.70 K_{i+1}$ $K_i < 0.80 \left[\frac{K_{i+1} + K_{i+2} + K_{i+3}}{3} \right]$	$K_i < 0.60 K_{i+1}$ $K_i < 0.70 \left[\frac{K_{i+1} + K_{i+2} + K_{i+3}}{3} \right]$
SEAOC	$0.7 \frac{\Delta_i}{h_i} > \frac{\Delta_{i+1}}{h_{i+1}} \quad 0.80 \frac{\Delta_i}{h_i} > \left[\frac{\Delta_{i+1}}{h_{i+1}} + \frac{\Delta_{i+2}}{h_{i+2}} + \frac{\Delta_{i+3}}{h_{i+3}} \right]$	---
Nueva Zelanda	$K_i < 0.70 K_{i+1} \quad K_i < 0.80 \left[\frac{K_{i+1} + K_{i+2} + K_{i+3}}{3} \right]$	---
Turquía	$\eta_{ki} = \frac{(\Delta_i)_{ort}}{(\Delta_{i+1})_{ort}} > 1.5$	---

(---) No hay dato.

Muchos códigos de todo el mundo definen estructuras para ser irregular si no cumplen con los "límites" de irregularidades establecidas en los códigos. En esta sección se revisan los criterios que tienen los códigos de diseño sísmico para determinar una estructura si es regular o irregular, así como también los límites que imponen a dichas estructuras. Se hace un resumen de los códigos de algunos de los países de importante actividad sísmica a nivel mundial como son de Perú-2003 [10], Perú-2016 [11], EEUU IBC[5], México [14], Colombia [18], Nueva Zelanda [13], India [2], Turquía [12] y SEAOC [22].

Para la comparación de irregularidad de rigidez en las diferentes normas se debe tener en cuenta el término K_i que es la rigidez lateral de piso, Δ_i es la distorsión de entrepiso y $\sum A_i$ suma de las áreas de las secciones transversales de los elementos verticales resistentes al corte en un entrepiso.

La Figura 3 se muestra el comparativo según normas de diversos países y expresaremos dos casos Ec. (1) y Ec. (2):

$$K_i < \gamma_{K1} K_{i+1} \quad (1)$$

$$K_i < \gamma_{K2} \left[\frac{K_{i+1} + K_{i+2} + K_{i+3}}{3} \right] \quad (2)$$

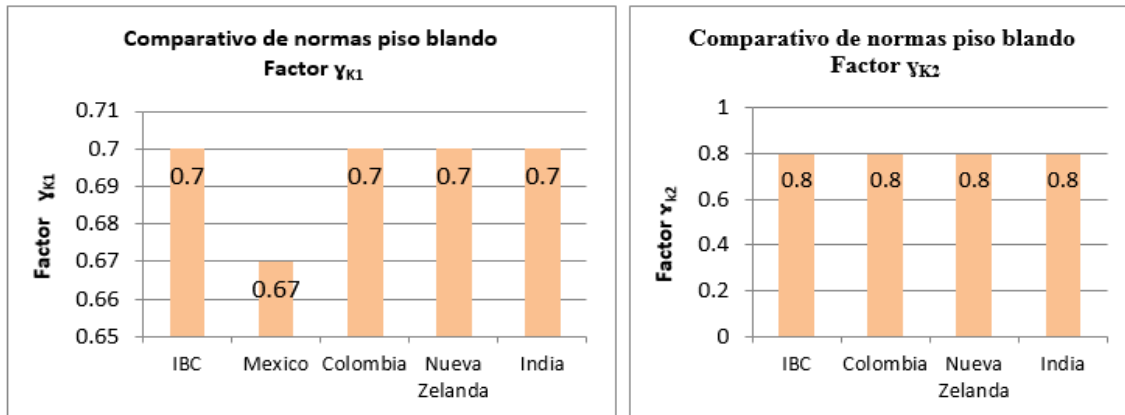


Figura 3 – Comparativo de irregularidad de rigidez por piso blando según normas de diversos países.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS EDIFICIOS POR ANALIZAR Y ANÁLISIS DINÁMICO

3.1. Notación de los casos regulares e irregulares

Para describir los casos irregulares, se definen los siguientes parámetros: El factor de modificación de rigidez KN es un parámetro que representa la variación en la distribución de la rigidez del caso base. La notación usada para identificar los casos irregulares se indica en la Ec. (3).

$$\text{KN-Z} \quad (3)$$

Dónde:

K: Indicador de irregularidad por rigidez,

N: Indica en número de pisos de la estructura,

Z: Representa la altura del primer piso, en metros.

Por ejemplo, si se tiene K9-5, representa una estructura de 9 pisos y una altura en el primer piso de cinco metros.

3.2. Características de los modelos estructurales

Con el fin de realizar un estudio paramétrico para analizar la irregularidad de piso blando, en la Tabla 2 se muestra que la altura del primer piso de los modelos patrón se incrementa; para el análisis lineal se consideraron siete alturas diferentes para el primer piso que son: 3.0m, 3.5m, 4.0m, 4.5m, 5.0m, 7.0m y 9.0m, siendo en total 28 modelos distintos, y para el análisis no lineal se consideraron cuatro alturas diferentes para el primer piso que son: 3.0m, 5.0m, 7.0m y 9.0m, siendo en total 16 modelos distintos; ambos análisis constaron de 4 modelos regulares considerados como patrón (se aprecian en fondo amarillo): K3-1-3, K5-1-3, K9-1-3 y K15-1-3, con la misma altura típica y con una masa constante en cada nivel.

En la Tabla 3 se muestra la relación de rigideces laterales modificadas en comparación a la rigidez lateral de la estructura patrón realizado por el análisis dinámico (KN-Z / KN-3).

Tabla 2 – Características de los modelos analizados para el análisis lineal y análisis no lineal

Edificio	Modelos análisis lineal							Modelos análisis no lineal			
3 pisos	K3-3	K3-3.5	K3-4	K3-4.5	K3-5	K3-7	K3-9	K3-3	K3-5	K3-7	K3-9
5 Pisos	K5-3	K5-3.5	K5-4	K5-4.5	K5-5	K5-7	K5-9	K5-3	K5-5	K5-7	K5-9
9 Pisos	K9-3	K9-3.5	K9-4	K9-4.5	K9-5	K9-7	K9-9	K9-3	K9-5	K9-7	K9-9
15 pisos	K15-3	K15-3.5	K15-4	K15-4.5	K15-5	K15-7	K15-9	K15-3	K15-5	K15-7	K15-9

Tabla 3 – Relación de rigideces modificadas en comparación a la rigidez de la estructura patrón, primer piso.

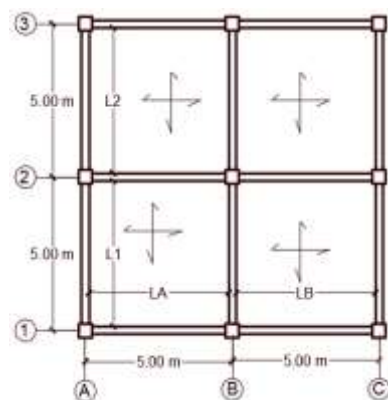
3 pisos				5 pisos				9 pisos				15 pisos			
K3-3	K3-5	K3-7	K3-9	K5-3	K5-5	K5-7	K5-9	K9-3	K9-5	K9-7	K9-9	K15-3	K15-5	K15-7	K15-9
1.0	0.27	0.11	0.05	1.0	0.26	0.1	0.05	1.0	0.29	0.12	0.06	1.0	0.33	0.15	0.08

La Figura 4 muestra la planta típica, la elevación y la distribución de los tipos de columnas y vigas para los modelos patrón de tres, cinco, nueve y quince pisos. Se han considerado que todas las estructuras tienen una losa maciza con espesor de 0.175 m.

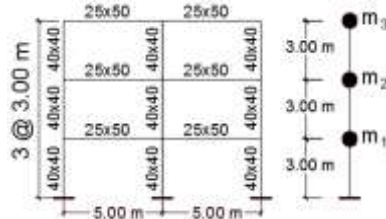
3.3. Distorsiones con el análisis lineal modal espectral

La Figura 5 muestra los edificios analizados linealmente, se realizó la verificación de la distorsión del primer piso, donde la altura varía desde tres hasta nueve metros, para que el modelo sea aceptable de acuerdo al límite para la distorsión de entrepiso para concreto armado que es 0.007 (de acuerdo a lo que indica en la norma sismorresistente E.030). Se puede indicar que para los edificios de tres, cinco, nueve y quince pisos, la altura máxima del primer piso debe ser 4.5, 3.5, 4.5 y 5.0 metros respectivamente.

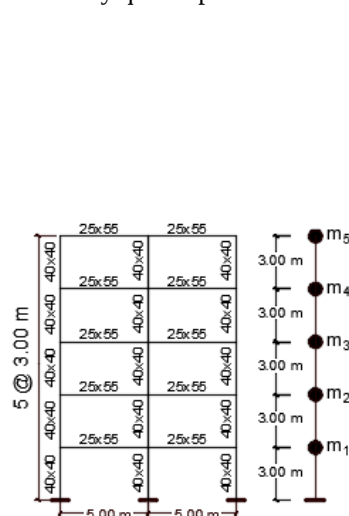
De la Tabla 4 se puede decir que la norma peruana E.030-2016 es menos estricta en comparación a la norma peruana E.030-2003 y según normas de diversos países. Realizando la comparación de las dos condiciones de irregularidad de la norma peruana E.030-2016, y basta que una de ellas no cumpla para ser considerada una estructura irregular, entonces se dice que para las estructuras de tres, cinco, nueve y quince pisos son irregulares a partir de las alturas del primer piso de 5.0, 5.0, 5.0 y 7.0 metros respectivamente.



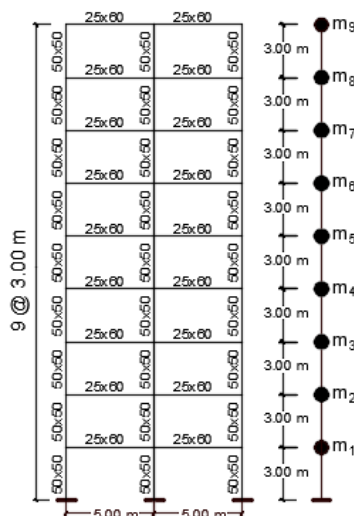
(a) Planta de modelos de tres, cinco, nueve y quince pisos



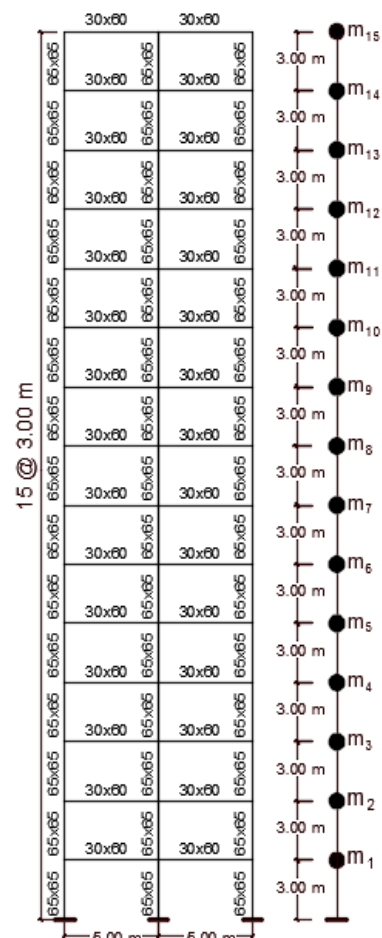
(b) Tres pisos - modelo patrón K3-3



(c) Cinco pisos - modelo patrón K5-3



(d) Nueve pisos - modelo patrón K9-3



(e) Quince pisos - modelo patrón K15-3

Figura 4 – Modelos patrón de tres, cinco, nueve y quince pisos (Estructura regular)

Vista en elevación y dimensiones de vigas-columnas

Tabla 4 – Comparación para las condiciones de irregularidad de rigidez por piso blando.

Norma	Condición de irregularidad	Irregular a partir de altura del primer piso (m)			
		3 pisos	5 pisos	9 pisos	15 pisos
Peruana E.030-2003	$\left(\frac{h_i}{h_d}\right) \sum A_i < 0.85 \sum A_{i+1}$	4.0	4.0	4.0	4.0
Peruana E.030-2016	$\frac{\Delta_i}{h_i} > 1.4 \frac{\Delta_{i+1}}{h_{i+1}}$	5.0	5.0	7.0	9.0
	$\frac{\Delta_i}{h_i} > 1.25 \left[\frac{\frac{\Delta_{i+1}}{h_{i+1}} + \frac{\Delta_{i+2}}{h_{i+2}} + \frac{\Delta_{i+3}}{h_{i+3}}}{3} \right]$	---	5.0	5.0	7.0

(---) No hay dato.

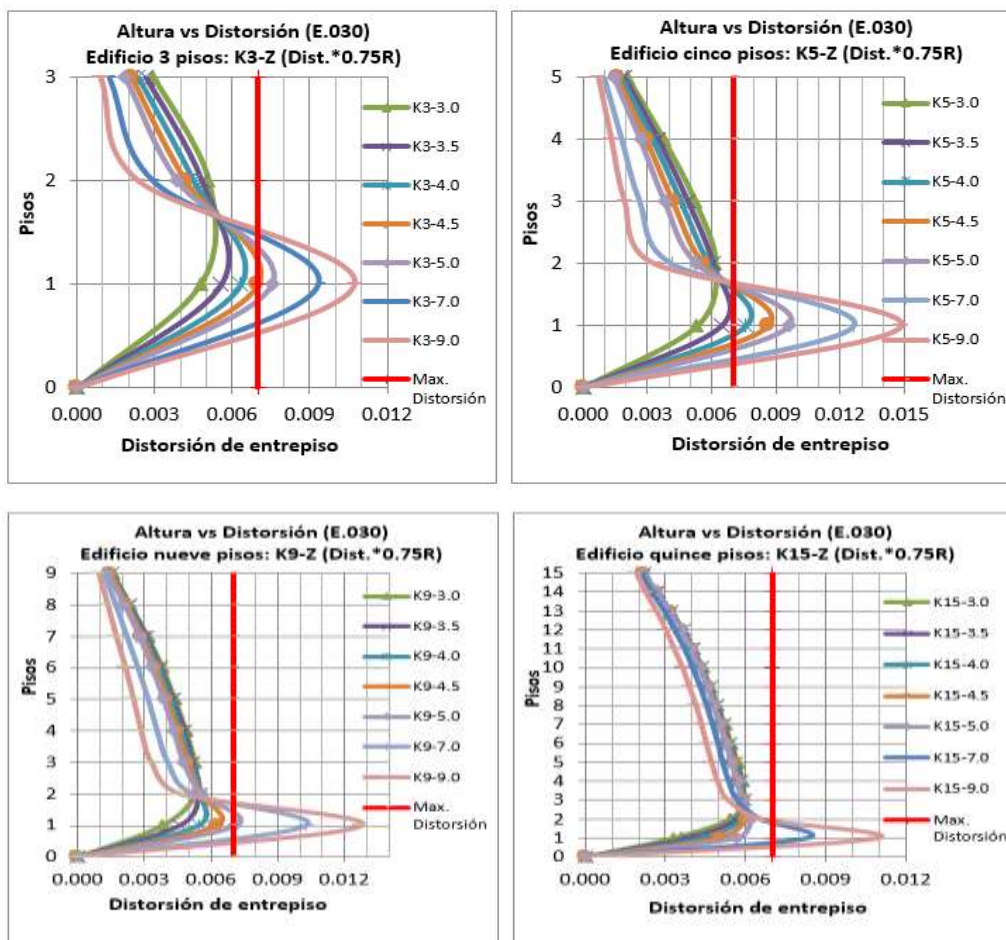


Figura 5 – Verificación de la distorsión de entrepiso análisis lineal, edificio de tres, cinco, nueve y quince pisos.

En la Tabla 5 muestra una comparación de la condición de irregularidad de rigidez por piso blando K_i/K_{i+1} . En este caso para el primer y segundo piso K_1/K_2 , según normas de diversos países (IBC, México, Colombia, Nueva Zelanda e India). Para los edificios de tres, cinco, nueve y quince pisos son irregulares a partir de las alturas del primer piso de 4.5, 4.0, 4.5 y 5.0 m, respectivamente.

4. ANÁLISIS NO LINEAL Y LÍMITES PARA LA IRREGULARIDAD DE PISO BLANDO.

Para el análisis y evaluación de estructuras de concreto armado se emplean relación esfuerzo-deformación idealizada o simplificada, se optó usar para el acero propuesto por Park y Paulay (1975) [16], modelo que divide la curva de esfuerzo deformación del acero de refuerzo en tres zonas: elástica lineal, de fluencia y de endurecimiento por deformación y para el concreto propuesto por Mander et al. [8].

El procedimiento de idealización del diagrama momento – curvatura se realizó utilizando los criterios postulados por Restrepo [19], donde primero se calculan y se ubican los límites de desempeño para el concreto y acero de refuerzo longitudinal, como se muestra en la Figura 6.

Tabla 5 – Verificación de irregularidad de rigidez por piso blando (K_i/K_{i+1}) según norma de diversos países.

Edificio	Modelo	Rigidez lateral 1 ^{er} piso (t/cm)	Rigidez lateral 2 ^{do} piso (t/cm)	Relación de rigidez (K_1/K_2)	Normas de diversos países				
					IBC	Mexico	Colombia	Nueva Zelanda	India
3 Pisos	K3-1-3.0	122.93	92.82	1.32	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular
	K3-1-3.5	84.33	88.13	0.96	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular
	K3-1-4.0	59.91	83.55	0.72	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular
	K3-1-4.5	43.82	79.87	0.55	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular
	K3-1-5.0	33.02	75.94	0.43	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular
	K3-1-7.0	12.92	64.32	0.20	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular
5 Pisos	K5-1-3.0	129.46	101.63	1.27	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular
	K5-1-3.5	88.02	97.80	0.90	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular
	K5-1-4.0	62.07	94.65	0.66	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular
	K5-1-4.5	45.40	91.01	0.50	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular
	K5-1-5.0	34.06	87.89	0.39	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular
	K5-1-7.0	13.26	76.55	0.17	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular
9 Pisos	K9-1-3.0	238.03	164.22	1.45	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular
	K9-1-3.5	167.91	156.96	1.07	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular
	K9-1-4.0	121.95	151.04	0.81	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular
	K9-1-4.5	91.28	145.49	0.63	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular
	K9-1-5.0	70.02	139.37	0.50	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular
	K9-1-7.0	28.72	121.43	0.24	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular
15 Pisos	K15-1-3.0	437.22	258.87	1.69	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular
	K15-1-3.5	319.75	245.23	1.30	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular
	K15-1-4.0	240.25	233.49	1.03	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular
	K15-1-4.5	185.52	222.73	1.03	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular
	K15-1-5.0	145.74	213.14	0.68	Irregular	Regular	Irregular	Irregular	Irregular
	K15-1-7.0	64.80	181.52	0.36	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular

Luego de ser calculados y ubicados los límites de desempeño del concreto y del acero en el diagrama momento – curvatura, se procede con la idealización determinando los puntos de “la primera fluencia”, “resistencia nominal a flexión”, “curvatura de fluencia” y “la resistencia última”. Las Figuras 7 y 8 muestran el diagrama momento-curvatura y su idealización bilineal de la viga de concreto armado de 25x60 cm y la columna de concreto armado de 50x50 cm del edificio de nueve pisos (modelo K9-3).

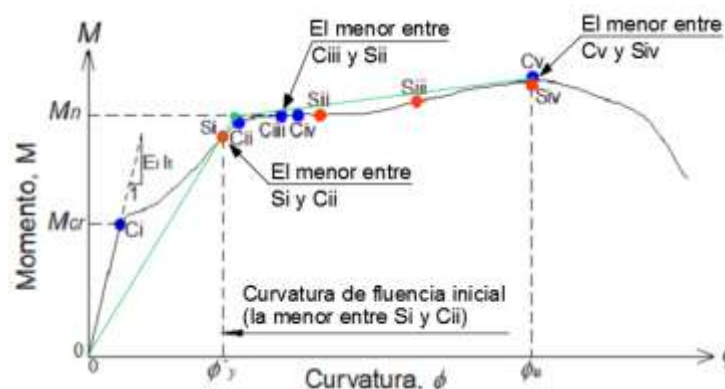


Figura 6 – Ubicación de los límites de desempeño del concreto y acero longitudinal en el diagrama momento – curvatura y aproximación bilineal según Restrepo [19]

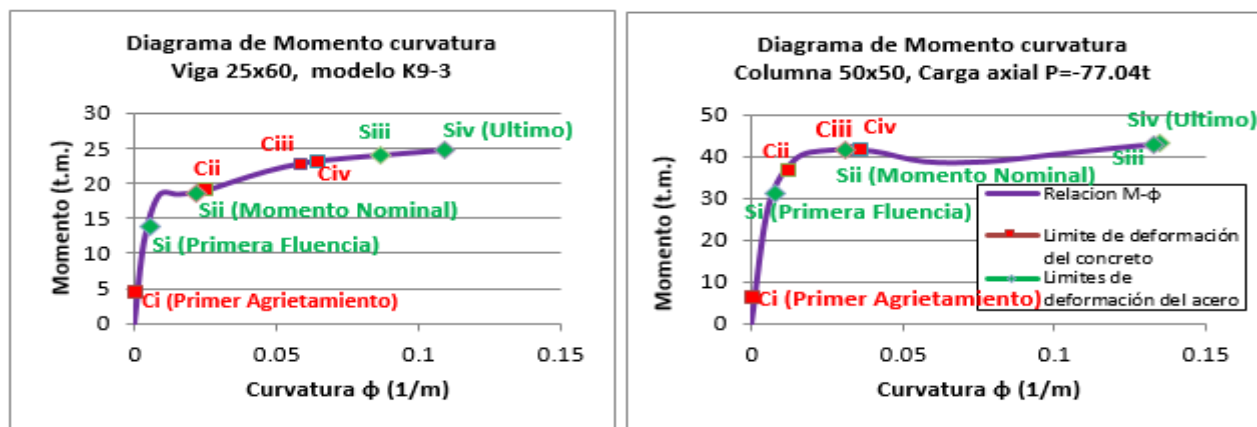


Figura 7 – Relación momento curvatura y estados límite de deformación edificio de nueve pisos:
Modelo K9-3 (viga 25x60 cm y columna 50x50 cm)

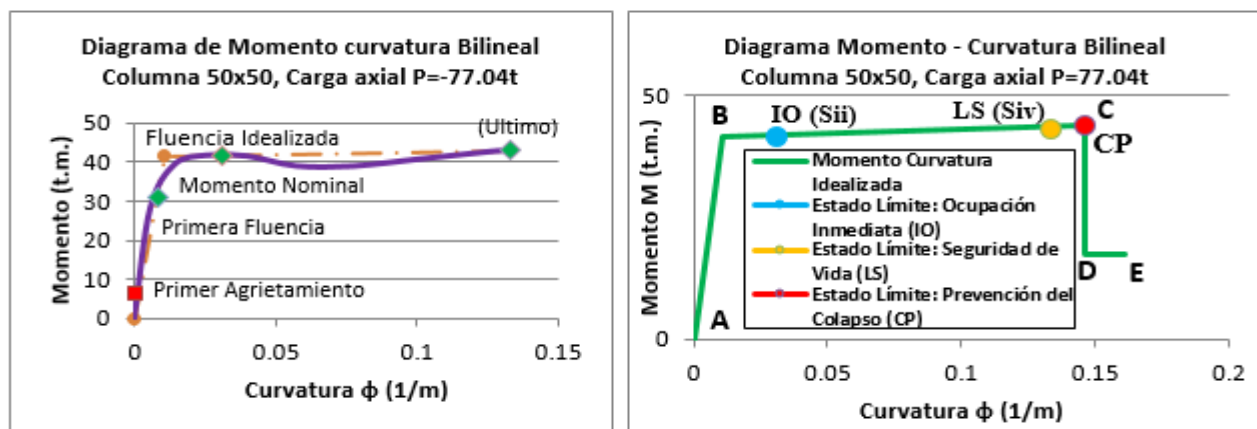


Figura 8 – Idealización bilineal de la relación momento M – curvatura ϕ y ubicación de los puntos del nivel de desempeño, columna 50x50, edificio de nueve pisos: Modelo K9-3

4.1. Mecanismo de progresión de rótulas y colapso

La secuencia de rótulas plásticas permite identificar los siguientes puntos de la curva de capacidad:

- Punto de la primera fluencia de la estructura
- Punto de estado límite “Ocupación inmediata” de la estructura (IO).
- Punto de estado límite “Seguridad de Vida” de la estructura (LS).
- Punto de estado límite “Prevención del Colapso” de la estructura (CP).

Se identifican los puntos A, B, C, D, y E que son usados para definir el comportamiento de los elementos, además de los puntos IO, LS y CP que son usados para definir los criterios de aceptación para la articulación. Los valores que pertenecen a cada uno de estos puntos varían dependiendo del tipo de elemento estructural así como muchos otros parámetros definidos por los criterios de Restrepo. Las articulaciones coloreadas indican el estado de las mismas, es decir, donde se encuentran a largo de su curva fuerza-desplazamiento. La leyenda para los colores de la articulación se incluye en el fondo de la pantalla del Sap 2000. Los puntos B, IO, LS, CP, C, D y E se muestran como niveles de acuerdo al estado de la articulación y van de acuerdo con el nivel de desempeño. Cuando las primeras articulaciones aparecen, quiere decir que la primera fluencia se presenta en uno de los elementos estructurales cuando el momento en ésta alcanza el momento de fluencia nominal, se encuentran en el punto B de la curva fuerza-desplazamiento. Pero cuando una articulación alcanza el punto C en la curva fuerza-desplazamiento, deja de resistir cargas, el momento de la rótula alcanza la capacidad última (rótula color amarillo), los cuales alcanzan su rotación límite en el nivel de prevención del colapso (CP). Luego la fuerza que se aplica en el pushover (cortante basal) se reduce hasta que la fuerza en la articulación sea consecuente con la fuerza al punto D. Como esta fuerza disminuye, todos los elementos dejan de cargar, y el desplazamiento se reduce. Una vez que la articulación ha cedido y alcanza el punto D de nivel de fuerza, la fuerza del pushover (cortante basal) se vuelve a incrementar y el desplazamiento comienza a aumentar otra vez.

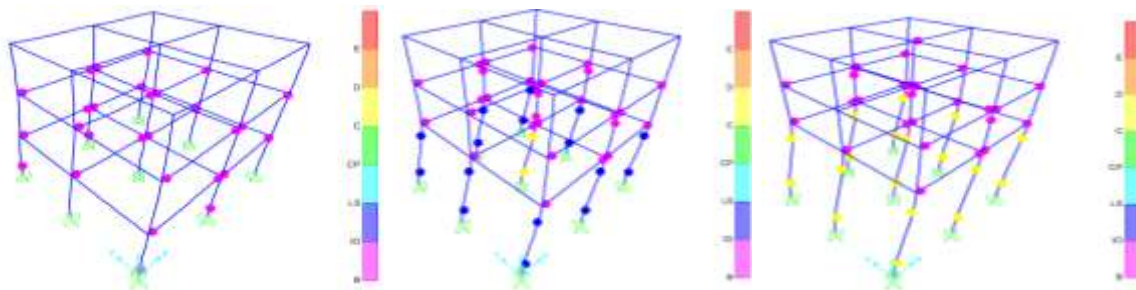


Figura 9 – Secuencia de formación de rótulas plásticas, edificio de tres pisos: Modelo K3-3, K3-5 y K3-7

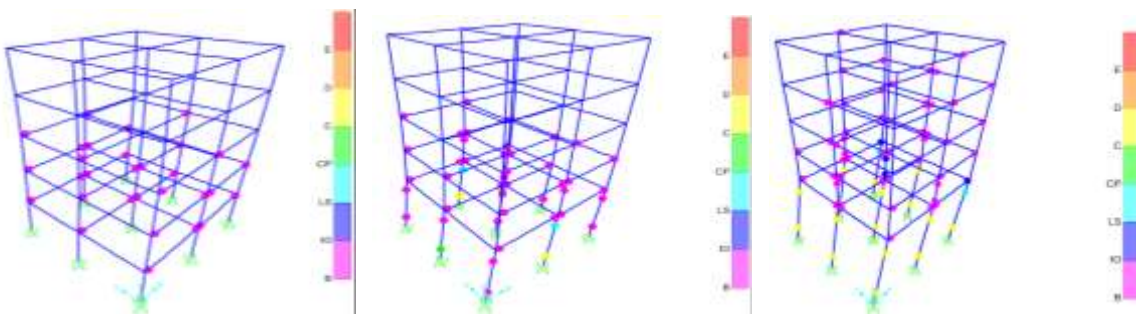


Figura 10 – Secuencia de formación de rótulas plásticas, edificio de cinco pisos: Modelo K5-3, K5-5 y K5-7

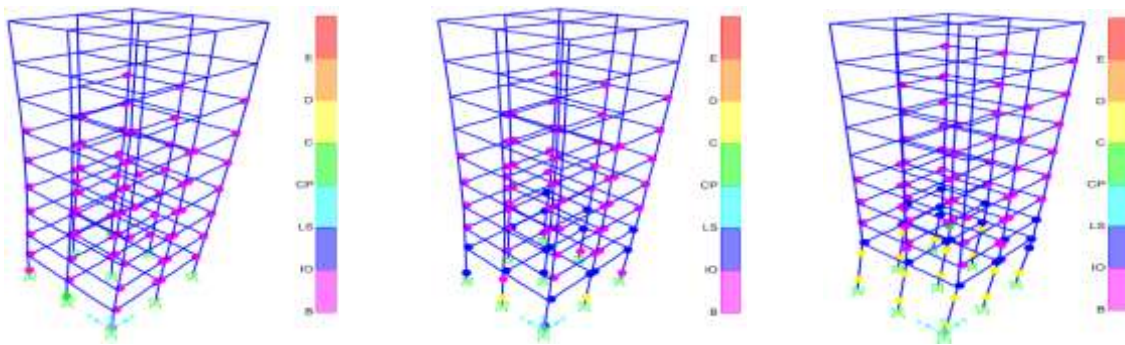


Figura 11 – Secuencia de formación de rótulas plásticas, edificio de nueve pisos: Modelo K9-3, K9-5 y K9-7

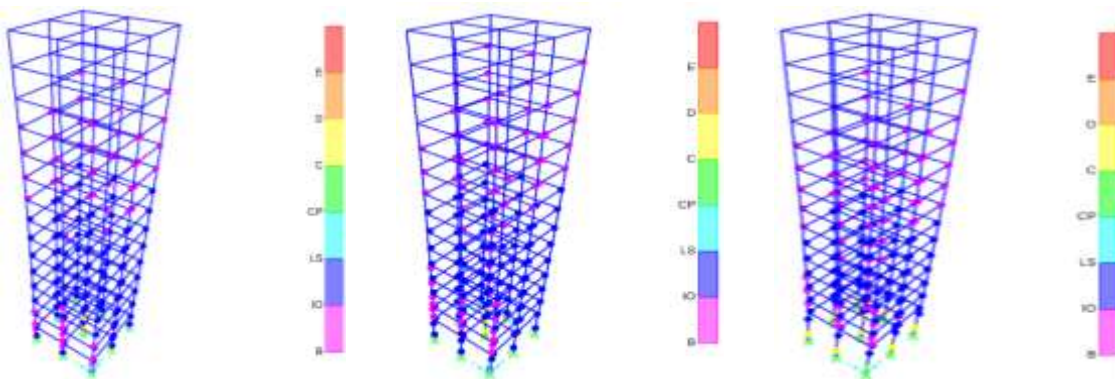
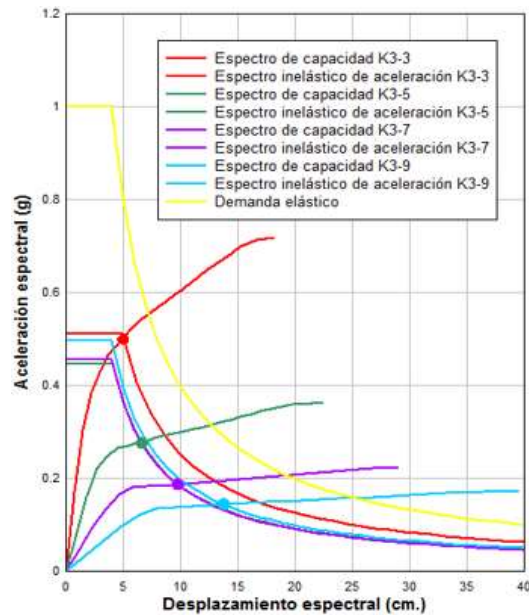


Figura 12 – Secuencia de formación de rótulas plásticas, edificio de quince pisos:
Modelo K15-3, K15-5 y K15-7

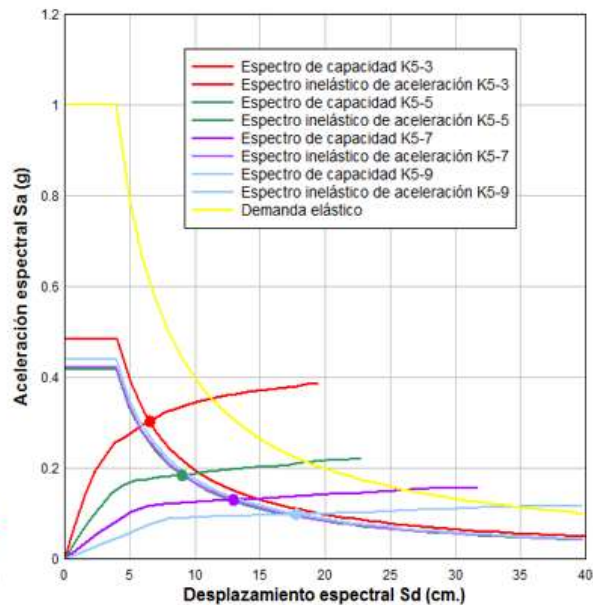
Las Figuras 9 al 12 muestran la secuencia de la formación de rotulas plásticas de los edificios de tres, cinco, nueve y quince pisos, donde podemos observar que a mayor altura de entrepiso del primer piso la formación de rotulas plásticas es más pronunciada formándose un mecanismo de falla.

4.2. Espectro de capacidad y punto de desempeño

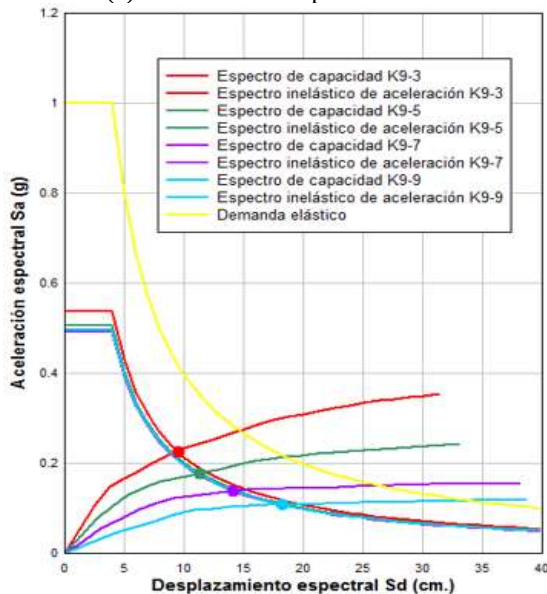
La Figura 13 muestra el comparativo del punto de desempeño para los edificios de tres, cinco, nueve y quince pisos. Se observó que a medida que se va aumentando la altura en el primer piso, la estructura es más flexible por ende el espectro de capacidad y punto de desempeño disminuye.



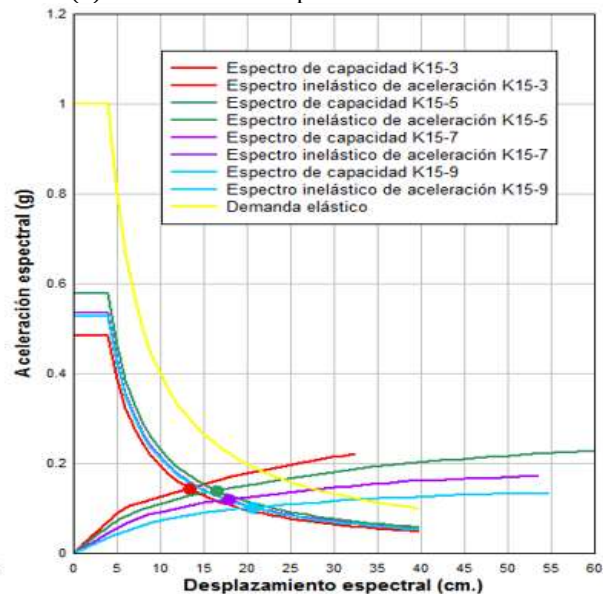
(a) Edifício de três pisos: Modelo K3-Z



(b) Edifício de cinco pisos: Modelo K5-Z



(c) Edifício de nove pisos: Modelo K9-Z



(d) Edifício de quinze pisos: Modelo K15-Z

Figura 13 – Comparativo de curva de capacidade y punto de desempeño (máxima respuesta de la estructura), edificio de tres, cinco, nueve y quince pisos para diferentes alturas del primer piso.

4.3. Evaluación de la demanda global del punto de desempeño

En la actualidad no existe un consenso general que permita establecer una única relación entre un parámetro que represente la respuesta estructural, como por ejemplo la distorsión de entrepiso. En la Tabla 6 se muestra algunos límites de la distorsión o desplazamiento de entrepiso que proponen algunas investigaciones:

Tabla 6 – Límites de la distorsión de entrepiso para los diferentes niveles de desempeño

Nivel de desempeño	ATC-40	FEMA 273	Visión 2000	Bertero
Ocupación inmediata	0.01	0.01	0.002-0.005	0.002-0.005
Seguridad de vida	0.01-0.02	0.01-0.02	0.015	0.01-0.02
Prevención del colapso	0.33Vi/Pi	0.04	0.025	0.02-0.04

Para evaluar el desempeño de los elementos estructurales de la edificación, se ha tomado los criterios de aceptación propuestos por Restrepo [19]. En la evaluación global se toma en cuenta la distorsión del edificio y la distorsión de los entrepisos para el sismo de nivel de diseño. En este trabajo se ha considerado el límite de distorsión de entrepiso según Visión 2000 para los diferentes niveles de desempeño

La Tabla 7 muestra las distorsiones máximas de entrepiso y global de la estructura del punto de desempeño para el sismo de diseño del análisis no lineal estático, se compararon y verificaron si estaban dentro de los límites de los niveles de desempeño establecidos por Visión 2000

Tabla 7 – Valores para la determinación del punto de desempeño y comparativo de la distorsión máxima de entrepiso con el límite de nivel de desempeño según Visión 2000, edificio de tres, cinco, nueve y quince pisos

Edificio	Modelos	Desplaz. espectral S_d (cm)	Aceleración espectral S_a (g)	Dmáx. Techo (cm)	Cortante basal V (t)	Distorsión Global (%)	Máxima Distorsión entrepiso	Nivel de desempeño (Visión 2000)
3 Pisos	K3-1-3	4.995	0.498	6.33	119.70	0.703	0.012	Seguridad de Vida (LS)
	K3-1-5	6.593	0.278	7.57	76.28	0.689	0.013	Seguridad de Vida (LS)
	K3-1-7	9.692	0.187	10.43	53.55	0.803	0.016	Prevención del Colapso (CP)
	K3-1-9	13.732	0.144	14.34	42.17	0.956	0.020	Prevención del Colapso (CP)
5 Pisos	K5-1-3	6.501	0.227	8.33	122.24	0.555	0.0097	Seguridad de Vida (LS)
	K5-1-5	8.955	0.185	10.65	85.35	0.626	0.0137	Seguridad de Vida (LS)
	K5-1-7	12.898	0.130	14.23	62.73	0.749	0.0202	Prevención del Colapso (CP)
	K5-1-7	17.807	0.098	18.86	48.45	0.898	0.0220	Prevención del Colapso (CP)
9 Pisos	K9-1-3	9.450	0.227	12.38	171.53	0.458	0.0094	Seguridad de Vida (LS)
	K9-1-5	11.290	0.178	14.43	151.14	0.497	0.0104	Seguridad de Vida (LS)
	K9-1-7	14.049	0.139	16.94	127.08	0.546	0.0151	Prevención del Colapso (CP)
	K9-1-7	18.210	0.108	20.75	102.81	0.629	0.0195	Prevención del Colapso (CP)
15 Pisos	K15-1-3	13.324	0.145	17.98	202.54	0.400	0.0086	Seguridad de Vida (LS)
	K15-1-5	16.465	0.140	22.16	200.12	0.472	0.0098	Seguridad de Vida (LS)
	K15-1-7	17.822	0.119	23.58	192.70	0.481	0.0158	Prevención del Colapso (CP)
	K15-1-7	20.596	0.102	26.35	174.84	0.517	0.0174	Prevención del Colapso (CP)

Las Figuras 14 y 15 muestran un comparativo de la distorsión de entrepiso del punto de desempeño de los edificios de tres, cinco, nueve y quince pisos para las siguientes alturas en el primer piso:

- Para una altura de tres metros en el primer piso estuvo comprendida entre el nivel de desempeño de ocupación inmediata (IO) y seguridad de vida (LS).
- Para una altura de cinco metros en el primer piso estuvo comprendida entre el nivel de desempeño de ocupación inmediata (IO) y seguridad de vida (LS).
- Para una altura de siete metros en el primer piso estuvo comprendida entre el nivel de desempeño de seguridad de vida (LS) y prevención del colapso (CP).
- Para una altura de nueve metros en el primer piso estuvo comprendida entre el nivel de desempeño de seguridad de vida (LS) y prevención del colapso (CP).

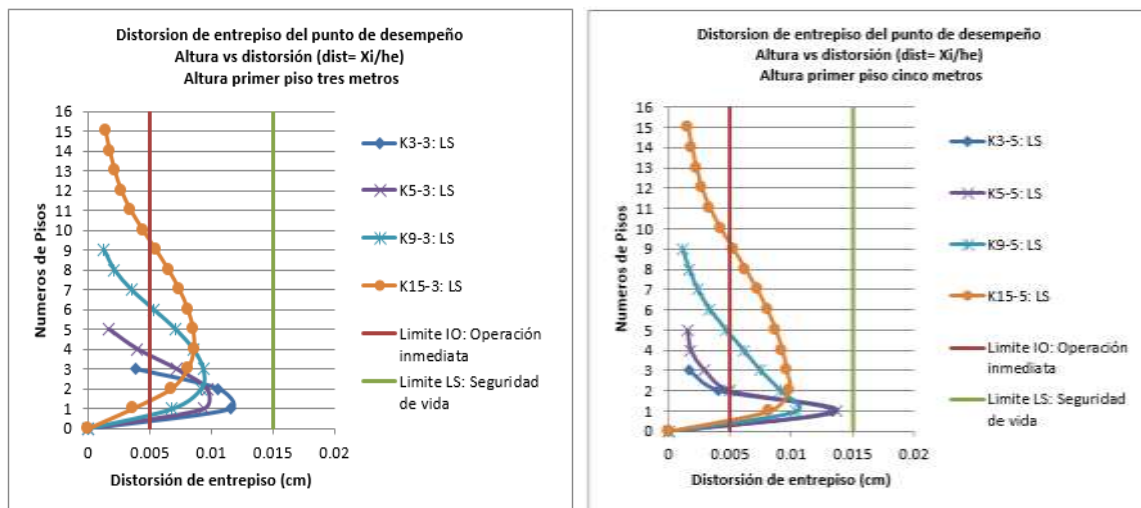


Figura 14 – Comparativo de distorsión del punto de desempeño de los edificios de tres, cinco, nueve y quince pisos para una altura de tres y cinco metros en el primer piso, nivel de desempeño : Seguridad de vida LS

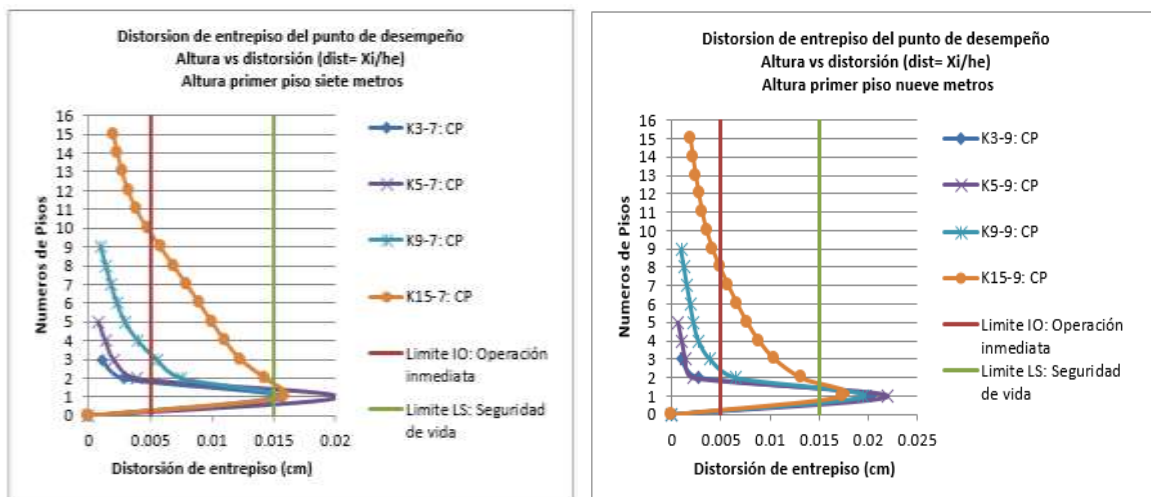


Figura 15 – Comparativo de distorsión del punto de desempeño de los edificios de tres, cinco, nueve y quince pisos para una altura de siete y nueve metros en el primer piso, nivel de desempeño : Prevención del Colapso CP

Evaluando los límites de la distorsión de entrepiso para los diferentes niveles de desempeño se observa que para los edificios analizados de tres, cinco, nueve y quince pisos, para la altura del primer piso que varía de tres hasta menos de siete metros la distorsión está comprendida entre el nivel de desempeño de ocupación inmediata (IO) y seguridad de vida (LS). Para la altura del primer piso que varía de siete hasta nueve metros la distorsión está comprendida entre el nivel de desempeño de seguridad de vida (LS) y prevención del colapso (CP). Por consiguiente se puede concluir que la altura máxima en un entrepiso de un edificio aporticado para que no se produzca piso blando y que la estructura se considere aceptable debe ser menor de siete metros. Comparando con la máxima altura del primer piso para los edificios analizados con análisis lineal al respecto se puede indicar que la norma peruana sismorresistente E.030 es conservadora.

5. CONCLUSIONES

1. Para que los límites de distorsión de entrepiso sean menores al límite de nivel de desempeño de seguridad de vida (LS) y que la estructura se considere aceptable, se concluye que la altura máxima en el primer piso debe ser menor a siete metros.
2. Según norma peruana E.030-2003, $(h_i/h_d)\Sigma A_i < 0.85\Sigma A_{(i+1)}$, se concluye que para los edificios de tres, cinco, nueve y quince pisos fueron irregulares a partir de las alturas del primer piso de 4.0 metros para todos los edificios analizados.
3. Según norma peruana E.030-2016, se concluye para las estructuras de tres, cinco, nueve y quince pisos fueron irregulares a partir de las alturas del primer piso de 5.0, 5.0, 5.0 y 7.0 metros respectivamente.
4. Según normas de diversos países (IBC, México, Colombia, Nueva Zelanda e India), para los edificios de tres, cinco, nueve y quince pisos fueron irregulares a partir de las alturas del primer piso de 4.5, 4.0, 4.5 y 5.0 metros respectivamente.
5. Según normas de diversos países, para la primera condición de irregularidad $K_i < \gamma_{k1}K_{i+1}$, el valor del factor γ_{k1} fue 0.7, 0.67, 0.7, 0.7 y 0.7 para las normas IBC, México, Colombia, Nueva Zelanda e India respectivamente, siendo la norma mexicana la menos estricta.
6. Según normas de diversos países, para la segunda condición de irregularidad $K_i < \gamma_{k2} \left[\frac{K_{i+1} + K_{i+2} + K_{i+3}}{3} \right]$, el valor del factor γ_{k2} fue 0.8, 0.8, 0.8 y 0.8 para las normas IBC, Colombia, Nueva Zelanda e India respectivamente, manteniéndose todos con un mismo valor.
7. Se concluye que el comportamiento no lineal de una edificación mejora cuando se distribuye mejor la rigidez lateral en altura (rigidez constante por entrepiso).
8. Este estudio ha permitido estimar cuantitativamente los efectos de la irregularidad de piso blando en el desempeño de edificio para que se puedan mitigar sus efectos en la fase de diseño inicial.

6. AGRADECIMIENTOS

Es una gran satisfacción para expresar mi más sincero agradecimiento por haberme brindado parte de su tiempo y por las constructivas orientaciones al Dr. Víctor I. Fernández Dávila, quien me alentó para la elaboración de este trabajo.

Asimismo, quisiera expresar mi gratitud y agradecimiento al Dr. Javier Piqué del Pozo, profesor de la Universidad Nacional de Ingeniería (Perú), por contribuir igualmente en este trabajo.

7. REFERENCIAS

- [1] Aguiar, R., Yambay, E., Moreno, W., Espinoza, A., Jácome, A., Salazar, A., Pacheco, V., Mendoza, D. y Paredes, A. (2010), “Aisladores de base elastoméricos en estructuras con piso blando”, artículo *XXI Jornadas Nacionales de Ingeniería Estructural*, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.
- [2] Bureau of Indian Standards (2002), Criteria for earthquake resistant design of structures, IS: 1893 Parte I, New Delhi, India.
- [3] Guevara, L.T. (2012), La planta libre en los edificios: Configuración moderna generadora de irregularidad sísmica, presentado en las XXX jornadas de investigación del IDEC, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- [4] International Conference of Building Officials UBC (1997), Uniform Building Code. Whittier, CA., USA.
- [5] International Building Code IBC (2012), International Code Council, Inc., Illinois, USA.
- [6] Janampa, J. (2016), Estudio de la influencia de la configuración estructural de piso blando en el comportamiento sismorresistente de estructuras aporticadas, Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- [7] Lamb P.B., Londhe R.S. (2012), “Seismic Behaviour of Soft First Storey”. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* Vol. 4, Issue 5, PP 28- 33.
- [8] Mander, J.B., Priestley, M. y Park, R. (1988), “Theoretical Stress – Strain model for confined concrete”, *Journal of the Structural Engineering ASCE* Vol. 114 N° 8 pag. 1804 – 1825.
- [9] Marte, C.J. (2014), Calibración de umbrales de daño sísmico para el análisis de fragilidad sísmica de estructuras de hormigón armado mediante análisis estático no lineal, Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
- [10] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Reglamento Nacional de Edificaciones, Norma Técnica de Edificación E.030 (2003), Diseño Sismorresistente, MVCS, Lima, Perú.
- [11] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Reglamento Nacional de Edificaciones, Norma Técnica de Edificación E.030 (2016), Diseño Sismorresistente, MVCS, Lima, Perú.
- [12] Ministry of public works and settlement government of the republic of Turkey (1998), Specification for Structures to be Built in Disaster Areas, Part III, Earthquake Disaster Prevention, Istanbul, Turquía.
- [13] New Zealand Standard NZS (2004), Code General Design Requirements and Loading on Structures: New Zealand Standards Association, Wellington, New Zealand.
- [14] Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones (2004), Gobierno del Distrito Federal, México D.F.
- [15] Nonika, N. and Gargi D. (2015), Comparative Studies on Seismic Analysis of Regular and Vertical Irregular Multistoried building, *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, Volume 3 Issue VII. Park, R. y Paulay, T. (1983), *Estructuras de Concreto Reforzado*, Editorial Limusa, México D.F.
- [16] Pradnya, V. S. and Shilpa, P. K. (2017), Evaluation of seismic response of a building with soft story, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 8, Issue 3.
- [17] Reglamento Colombiano de Construcciones Sismorresistentes (2010), NSR – 10, Colombia.
- [18] Restrepo, J. y Rodríguez M. (2010), Curso internacional estructuras: Diseño sísmico por desempeño, Instituto de la Construcción y Gerencia, Lima, Perú.
- [19] Sadashiva, V. K. (2010), Quantifying structural irregularity effects for simple seismic design, Tesis de grado de Doctor, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand
- [20] Shamshad, A., Farhan, M., Tanmay, S., Bhushan, K. and Harshala, A. (2017), Analysis of Building with Soft Storey during Earthquake, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Volumen 4, Issue 03.
- [21] SEAOC. (1999), Recommended Lateral Force Requirements and Commentary. Seismology Committee, Structural Engineers Association of California. Seventh Edition, California, USA.

- [22] Soyuluk, A. and Harmankaya, Z.Y. (2012), “Architectural design of irregular buildings in Turkey”, *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS Vol: 12 N° 01*, Rawalpindi, Pakistan.
- [23] Vielma, J.C., Barbat, A.H. y Oller, S. (2011), Confinamiento y ductilidad de los edificios de hormigón armado, Monografía 5, ARCER, Editorial Gráficas Almudena S.L., Madrid, España.