

Estudio comparativo del desempeño sísmico de sistemas estructurales de acero: PEM, PEAC y PAE.

Andrés Rafael Abril Camino^{1*}, Christian David Medina Robalino²

¹Pontificia Universidad Católica del Ecuador

²Universidad de Chile

*Autor para correspondencia: aabril0402@pucesm.edu.ec

Recibido: 2023/05/15 Aprobado: 2024/04/30

DOI: <https://doi.org/10.26621/ra.v1i30.908>

RESUMEN

El presente trabajo realiza un análisis sísmico por desempeño de tres sistemas estructurales en pórticos en acero: especiales a momento (PEM), especiales arriostrados concéntricamente (PEAC) y arriostrados excéntricos (PAE). El objetivo es definir el sistema que brinda mejores prestaciones en cuanto a seguridad estructural, economía y daño postsismo para una tipología de edificios multifamiliares. Para la modelación se aplicó un software de elementos finitos, y el diseño se realizó acorde con NEC SE DS 15, ASCE/SEI 7/22, AISC 341-16. Se utilizó la conexión tipo viga de sección reducida RBS, precalificada, según AISC 358-16, para la unión viga-columna del PEM. La no linealidad de los elementos se consideró mediante un modelo de plastificación concentrada en sitios que tienen una mayor probabilidad de presentar inelasticidad. Se analizó el desempeño sísmico de cada sistema estructural para un espectro de período de retorno raro (475 años), mediante análisis no lineal estático NSP, y se empleó la metodología de linealización equivalente de FEMA 440. Adicionalmente, se realizó un análisis económico de los elementos estructurales. Los resultados muestran que PEAC es la estructura más ligera y, por ende, la más económica. Por otro lado, la más pesada es PEM, pero debido a la dimensión de sus secciones es el sistema estructural con mejor desempeño, seguido de PEAC y PAE, los cuales presentaron un desempeño estructural similar a menor costo.

Palabras clave: pórticos a momento de acero, desempeño estructural, arriostrados, concéntrico, excéntrico, sísmico

ABSTRACT

In this work, the seismic performance-based analysis of three structural steel frame systems is conducted: special moment frame (SMF), special concentrically braced frame (SCBF), and eccentrically braced frame (EBF). The objective is to define the system that provides the best performance in terms of structural safety, economy, and post-earthquake damage for a multifamily building typology. Finite element software was used for the modeling, and the design was conducted according to NEC SE DS 15, ASCE/SEI 7/22, AISC 341-16. The RBS reduced section beam connection, prequalified according to AISC 358-16, was used for the beam-column connection of the SMF. The nonlinearity of the elements was considered by a concentrated plasticity model at the sites most likely to present inelasticity. The seismic performance of each structural system was analyzed for a rare earthquake spectrum (475 years) by applying a static nonlinear analysis NSP and the equivalent linearization methodology of FEMA 440. The results show that SCBF is the lightest structure and therefore the most economical; on the other hand, the heaviest is SMF, but due to the size of its sections, it is the structural system with the best performance, followed by SCBF and EBF, which present a similar structural performance at a lower cost.

Keywords: steel moment frame, structural performance, braced, concentric, eccentric, seismic

Andrés Rafael Abril Camino  orcid.org/0000-0003-1342-2651

Christian David Medina Robalino  orcid.org/0000-0003-4116-6579



INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción ha incrementado mundialmente el uso del acero en los últimos 30 años; de 715 millones de toneladas métricas en 1980, se incrementó a 1413 millones en 2010. Debido a la facilidad de manipulación de secciones en perfiles, el crecimiento de toneladas métricas se incrementa en un 5.5 % anualmente (Camacho, 2011). El empleo del acero frente a otros materiales toma fuerza debido a su mayor ductilidad, el menor tiempo de construcción y porque, al ser un material sustentable, se puede reutilizar (Cabas, 2011); es el caso de países como Chile, Venezuela, Perú y Colombia, siendo este último el primero en implementar una normativa de estructuras de acero: NSR-98 (Villamil, 2008). El impacto ambiental en estructuras metálicas con relación al concreto es menor, pues se trata de un material más ecológico y con una vida útil similar (Gervasio, 2014).

Actualmente, la mayoría de los países latinoamericanos cuentan con normativa referenciada al AISC (Serrano y Martínez, 2021). El Ecuador posee la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), que cuenta con un capítulo exclusivo acerca del diseño de acero estructural, enfocado en las características fundamentales del mismo (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015).

Al diseñar estructuras en acero existen dos posibilidades: ASD Allowable Stress Design (diseño por esfuerzos admisibles) y LRFD Load and Resistance Factor Design (cargas y factores de resistencia para el diseño); el AISC 360-22 establece que ambas opciones son válidas para diseñar un proyecto en acero estructural (American Institute of Steel Construction, 2022). La presente investigación emplea la metodología LRFD, sin que llegue al rango plástico del material ni provoque ruptura en el elemento estructural, permite desarrollar mayor ductilidad; las estructuras diseñadas por el método ASD son entre un 5 % y un 20 % más livianas (Jiménez, 2016). Empleando la metodología LRFD para tener una opt.

Existen tres sistemas estructurales aceptados y tipificados según la NEC AC 2015; los más empleados en Ecuador y Latinoamérica (Soto, 2018) son los siguientes: pórticos espaciales a momento (PEM), pórticos especiales arriostrados concéntricamente (PEAC) y pórticos arriostrados excéntricos. El objetivo del presente estudio es verificar el desempeño bajo las mismas condiciones de carga y definir el sistema más idóneo para una tipología de edificios residenciales.

Pórticos especiales a momento (PEM)

Las rótulas plásticas se formarán en vigas y de forma controlada en la base de columnas (Figura 1), en elementos tipo panel. Para estas secciones se utilizarán elementos capaces de resistir pandeo local y pandeo lateral torsional.

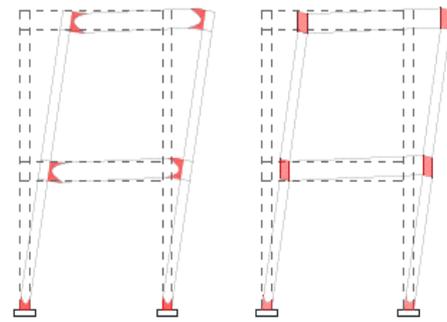


Figura 1. Lugares donde se espera la formación de rótulas inelásticas en PEM. Fuente: (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015)

Los PEM resisten las fuerzas que produce un sismo de diseño. En el diseño prevalece el criterio columna fuerte, viga débil, por lo que se considera lo siguiente:

$$\Sigma M_{pc} / \Sigma M_{pv} > 1$$

ΣM_{pc} , Sumatoria total de momentos plásticos a flexión, que deberán incluir carga axial mayorada de columnas.

ΣM_{pv} , Sumatoria total de momentos plásticos a flexión que intervienen en vigas.

Pórticos especiales arriostrados concéntricos (PEAC)

Son sistemas estructurales donde los centroides de ejes se unen a una junta y en un punto se interceptan para configurar una armadura vertical, resistente a cargas laterales. Tienen la capacidad de soportar deformaciones inelásticas considerables, al estar sujetos a fuerzas resultantes provenientes del sismo de diseño (Kiaokojouri et al., 2020).

Dada su geometría, los PEAC brindan una acción de armadura cuyos miembros permanecen sujetos principalmente a cargas axiales dentro del rango elástico. Se espera que los elementos arriostrados (diagonales o contravientos) y sus conexiones se desenvuelvan en deformaciones inelásticas cíclicas, en tracción y compresión en el sector de post-pandeo.

La Figura 2 muestra dos opciones de arriostramiento.

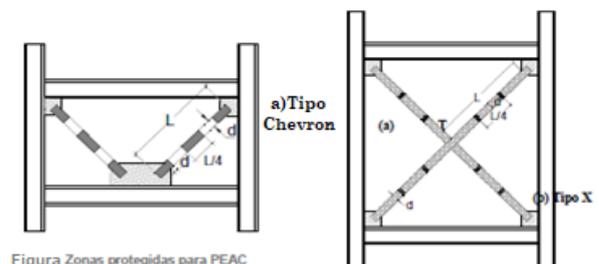


Figura 2. Zonas esperadas de plastificación en PEAC (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015).

Pórticos arriostrados excéntricos (PAE)

Tipología estructural conformada por columnas, vigas y arriostramientos diagonales, que guardan similitud con PEAC. Su diferencia radica en los PAE: al menos uno de los extremos de cada arriostramiento diagonal está conectado a un segmento de viga con el fin de aislarlo, lo cual se denomina vínculo. De esta forma, se produce transmisión al vínculo mediante esfuerzos de corte y flexión por la fuerza de las diagonales. La

finalidad es soportar cargas laterales que empleen una combinación del pórtico y la armadura.

Los conectores de los PAE necesitan la capacidad de soportar deformaciones inelásticas considerables. La Figura 3 indica dos tipos de PAE cuyos conectores se encuentran incursionando el rango inelástico. Las columnas, segmentos de vigas y arriostramientos diagonales deben diseñarse para mantenerse en el rango elástico, permaneciendo dichos elementos en zona de fluencia y de endurecimiento por deformación.

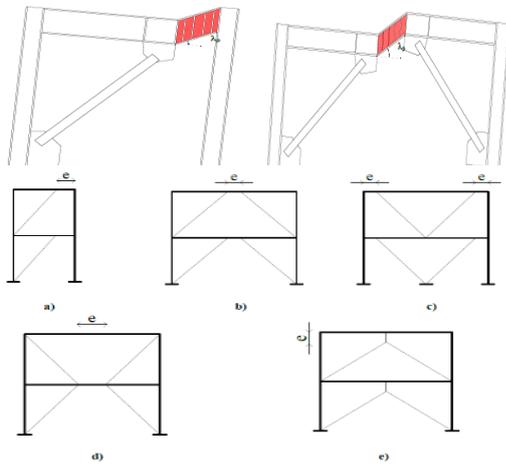


Figura 3. Rótulas esperadas en PAE. (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015)

MÉTODOS

Tipología estructural

Para la determinación de características genéricas de lo que representa un edificio multifamiliar se realizó una visita técnica a edificaciones, en la que se recabó información acerca de las distancias entre ejes, número de pisos y altura de entrepiso.

Con los datos obtenidos se establecieron propiedades geométricas genéricas que representan la tipología estructural de multifamiliares en Ecuador. Las Figuras 4 y 5 muestran vistas en planta y elevación, respectivamente, de la configuración considerada.

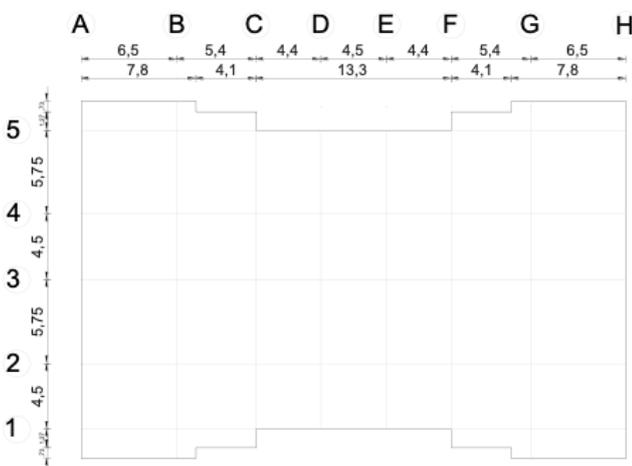


Figura 4. Vista en planta de la edificación modelada.

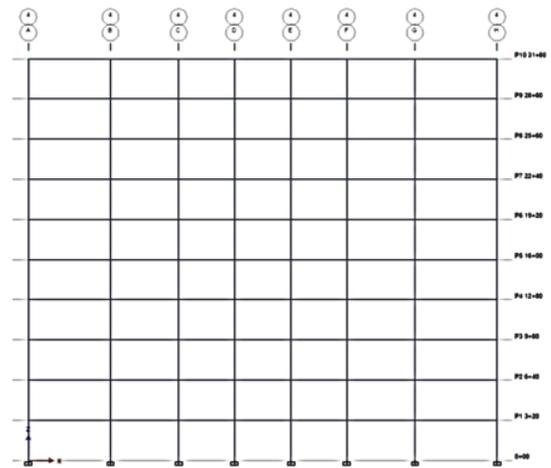


Figura 5. Vista en elevación de la edificación modelada.

La Tabla 1 muestra los datos más relevantes considerados para todos los sistemas.

Tabla 1. Propiedades geométricas y cargas gravitacionales asignadas

Descripción	Valor	Unidad
Número de pisos	10	u
Altura de entrepiso	3.20	m
Carga viva NEC SE CG	200	kg/m ²
Carga pared	425	kg/m ²
Carga de losa	78	kg/m ²
Adicional de carga muerta total	503	kg/m ²

Se estableció una losa colaborante deck; el software toma el peso propio de la losa, la cual tiene un espesor de 10 cm de hormigón simple, con una malla electrosoldada. El peso de 78 kg/m² corresponde al peso de recubrimiento inferior de la losa con planchas de yeso con cartón, adicionado al peso del material sobre la losa (porcelanato, cerámica madera, etc.). Para el cálculo de la carga de pared se consideró el largo, el ancho y el espesor de una pared de bloque macizo de 15 cm; también se contempló la densidad de 19 Kn/m³ en mampostería, según la NEC SE CG (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015).

Cargas sísmicas. - Se elaboraron espectros de diseño según la NEC15 SE DS. Es necesario establecer qué factores cambian para pórticos de acero arriostrados y sin arriostramientos. Se considera que estén asentados en el mismo lugar, con la finalidad de evaluar el desempeño en condiciones similares, en función del período de vibración del sismo y la aceleración espectral del mismo (American Society of Civil Engineers ASCE/SEI 7-22, 2022).

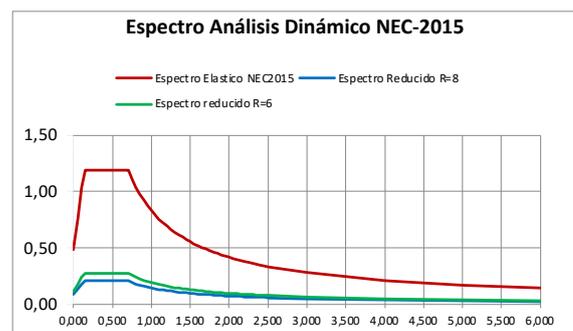


Figura 6. Espectros de amenaza sísmica NEC-SE-DS, 10 % de probabilidad de excedencia en 50 años.

El espectro reducido se emplea para el diseño; sin embargo, en desempeño estructural se ocupó el espectro elástico. PEAC y PAE, al ser sistemas que se esperan sean más rígidos, se diseñan con $R=6$, para PEM, $R=8$. La Figura 6 muestra los espectros obtenidos para una zona sísmica tipo V, suelo D, localizada en la región sierra del Ecuador. Modelo estructural

Se modelaron tres edificaciones mediante un software de elementos finitos, para lo cual se consideraron los sistemas PEM, PEAC y PAE (American Institute of Steel Construction AISC 341, 2016). Dichos sistemas estructurales son los principales sistemas presentes en la norma ecuatoriana de la construcción, en su capítulo de diseño en acero, y los mismos forman parte del texto de diseño sísmico del AISC 341 (McCormac y Csernak, 2013). Se realizó un análisis espectral modal. El diseño cumplió con los estándares de normativas nacionales e internacionales, que incluyen:

- Período $T_a \leq 1.3T_{a1}$.
- Los modos 1 y 2 de desplazamiento de la estructura deben ser traslacionales (Medina Robalino y Medina Robalino, 2017).
- Los modos de vibración deben cumplir el 90 % de la participación de masa (Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento, 2019).
- Validación del estado dinámico.
- Derivas estáticas $< 2\%$
- Derivas dinámicas $< 2\%$
- Pandeo global de la estructura mayor o igual 1 y menor o igual a -1.
- Diseño AISC mediante demanda capacidad.

Los materiales empleados fueron: acero estructural A572 Gr. 50, para la placa deck de acero A653 Gr. 33 (Acero Deck, 2015), y hormigón con resistencia a la compresión de 240 kg/cm².

Para un diseño sismorresistente se consideró lo siguiente: Definición de cargas hipotéticas en dirección X y Y, con un factor de 0.003 que simula imperfecciones iniciales en los elementos de acero; un análisis de segundo orden "P Delta" (Fang et al., 2022), en el que se mayoró 1.2 veces cargas muertas y el cortante basal solamente en una dirección, debido a que al considerar ambas direcciones físicamente no era posible. En el análisis de segundo orden se incluyeron cargas hipotéticas.

Otra consideración fueron los empalmes o cortes; la longitud del acero coloca empalmes a una altura mínima de 1.2 m de la unión viga-columna, lo que garantiza que las rótulas no se formen en nudos (De la Cruz y Roberto, 2021).

Adicionalmente, se consideraron casos de carga con el pandeo global, entre los cuales se contemplaron tres: gravitacional, el cual considera solo cargas gravitacionales; un segundo caso considera también el cortante basal en sentido X, y un tercer caso, el cortante basal en sentido Y. Cada caso incluyó 6 modos de pandeo, con un total de 18, guardando la siguiente relación: cada 4 pisos, 3 modos de pandeo (Rojas et al., 2016).

a. Edificio con PEM

Se empleó una conexión RBS (American Institute of Steel Construction AISC 358, 2016) o viga de sección reducida. La Figura 7 permite visualizar la estructura modelada.

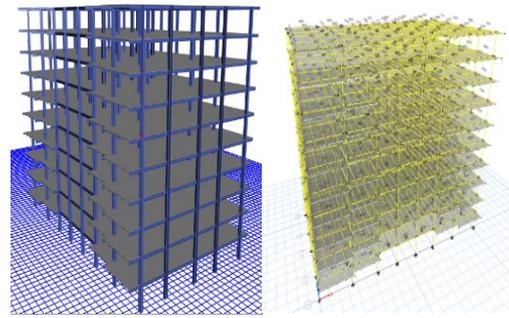


Figura 7. Vista 3D PEM

Se consideró, en la colocación de articulaciones para la formación de rótulas, la tabla del ASCE 41-17, 9-7.1. Para viga y columnas, donde se establecen límites de rotación plástica y criterios de aceptación para los niveles de desempeño: IO (ocupación inmediata), LS (seguridad de vida), CP (próximo al colapso).

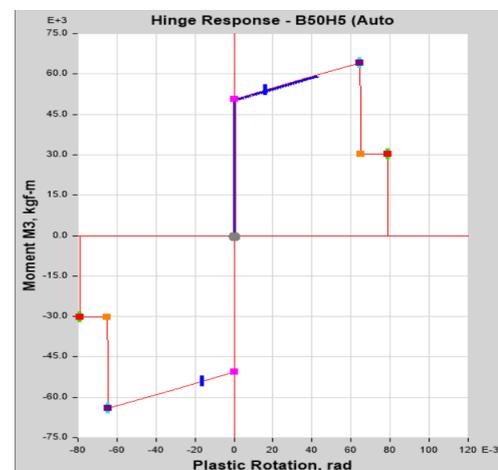


Figura 8. Diagrama momento rotación de una viga de PEM

Las rótulas, en el caso de PEM, estarán ubicadas entre el 10 % y 90 % de longitudes por vano y altura libre para vigas y columnas (Poland et al., 1995).

La Figura 8 muestra el diagrama momento rotación de una viga de acero de PEM.

b. Edificio con PEAC

Se asignaron riostras externas, las cuales trabajarán como PEAC, y la liberación a momento de los POM (pórticos ordinarios a momento) (Fuentes et al., 2018). La Figura 9 muestra la estructura modelada de PEAC.

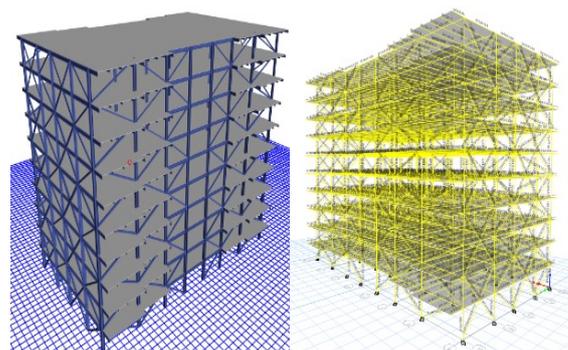


Figura 9. Vista 3D PEAC

Se consideró la colocación de articulaciones para la formación de rótulas en vigas en deformación, en vigas columnas y riostras; las dos últimas según las mismas consideraciones de PEM. Para riostras, se colocará una articulación en la mitad o al 50 % de longitud del elemento estructural, cuyos límites están estipulados en la tabla 9.8 del ASCE 41-17.

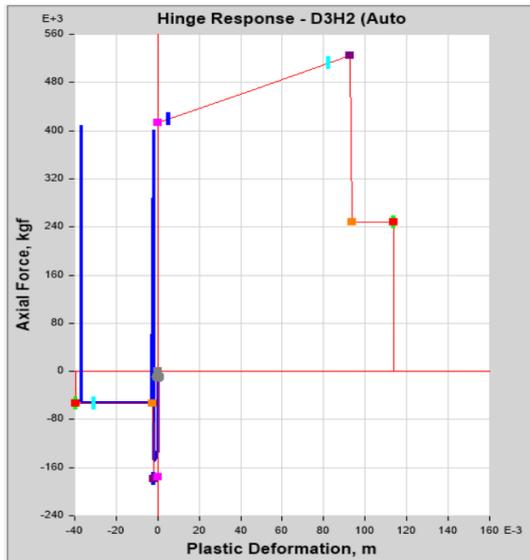


Figura 10. Fuerza deformación de una riostra de PEAC

La Figura 10 muestra el diagrama fuerza deformación de una riostra de acero en PEAC; el comportamiento de la riostra es axial, produciéndose esfuerzos de tensión y compresión.

c. Edificio con PAE

Los pórticos arriostrados se colocan en el exterior, y la excentricidad debe calcularse (Tabla 2) según lo impuesto por el AISC 341-16; será colocada en vigas y la liberación de momentos en POM. La Figura 11 muestra la estructura modelada de PAE.

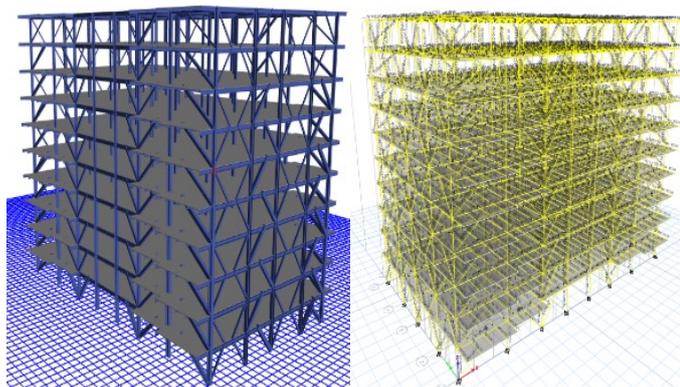


Figura 11. Vista 3D PAE

En la presente investigación se emplean vínculos o links como excentricidades de tipo largo, ya que las rotaciones son menores a 0.02 rad. Se establece que pertenezcan al tipo de vínculos largos calculando excentricidades según la longitud del eje; de acuerdo con la riostra aplicada, cuando la longitud es menor a $5M_p/V_p$ deben proveerse de rigidizadores. La Tabla 2 muestra la longitud de excentricidades a colocar según las riostras tubulares colocadas en la presente investigación.

Tabla 2. Determinación de la longitud de excentricidad en vigas

LONGITUD DE EXCENTRICIDAD			
EJES			
A-B G-H (1)	C-D (1)	B-C (1)	2-3 4-5 (A)
Z (m)	0.0031	0.0031	0.0031
Fy (kg/m ²)	35153481.31	35153481.31	35153481.31
d (m)	0.3632	0.3632	0.3632
tw (m)	0.0133	0.0133	0.0133
tf (m)	0.0218	0.0218	0.0218
Ag (m ²)	0.0206	0.0206	0.0206
Vr (kg)	12492.0700	6343.0800	4356.7700
Pr (axial) kg	7440.9500	4458.9600	22530.1700
Mp (kg/m)	110592.8522	110592.8522	110592.8522
Aw (m ²)	0.0043	0.0043	0.0043
Vp (kg)	89908.479	89908.4791	89908.4791
e1 1,6	1.9681	1.9681	1.9681
e2 2,6	3.1982	3.1982	3.1982
p'	0.5957	0.70296449	5.1713
0.123255928	0.145461221	1.070073663	
OPCIÓN 2	OPCIÓN 2	OPCIÓN 1	
OPCIÓN 1	2.142	2.120170121	1.210306863
OPCIÓN 2	1.968	1.968096505	1.968096505
Py	724161.715	724161.715	724161.715
IGNORAR EFECTOS AXIALES			

Se colocaron articulaciones para la formación de rótulas en vigas y columnas, al igual que en PEM. Para riostras se colocará una articulación en la mitad; para vínculos o elementos link, según lo estipulado en la tabla 9-7.2. referente a PAE (Link Beam), al 10 % y 90 % de la longitud del elemento vínculo.

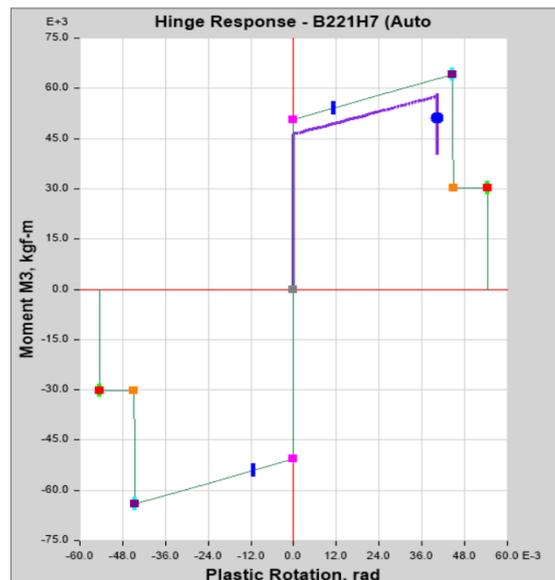


Figura 12. Diagrama momento rotación de vínculo de PAE

La Figura 12 muestra el diagrama momento rotación de un vínculo de PAE.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a. Edificio con PEM

Todos los elementos se diseñan como PEM: vigas y columnas, debido a que las derivas de piso tienen que ser menores al 2 %.

El período de vibración obtenido es: 1.243 (s), que cumple con lo establecido en la NEC, según la cual el período de la estructura debe ser menor a 1.3 veces el período empírico de la mencionada norma. $1,243 \leq 1,498$. Se comprueba que la estructura sea traslacional mediante la siguiente fórmula en los dos primeros modos de vibración:

$$\frac{R_z}{U_{max}(x, y)} \leq 30 \%$$

En el primer modo de vibración se obtiene un valor de $R_z = 0$, U máximo = 0.6644. En el segundo modo de vibración, $R_z = 0.0531$ y U máximo = 0.6772. Dichos valores cumplen con lo requerido. La participación de masa tiene un 90 % en el décimo modo de vibración de 30 modos (3 modos por piso).

Las derivas estáticas y dinámicas deben ser menores al 2 % y calculadas según la siguiente fórmula:

$$\Delta_m = 0.75 * R * \Delta_{ELAST} \leq 2 \%$$

El valor de R se obtendrá del ASCE 7-22 en su tabla 12.2-1. (American Society of Civil Engineers ASCE/SEI 7-22, 2022). El valor de la deriva de piso Δ_{ELAST} . del cortante basal en X: 0.2153 %; cortante basal en Y: 0.2853 %. La deriva espectral en dirección X: 0.2082 %; dirección Y: 0.2716 %.

Analizar los casos de carga del pandeo global de la estructura indica la posibilidad de que la estructura falle por pandeo con una carga establecida; según la carga crítica de Euler (Pomares et al., 2021), si el factor de escala es menor que uno, como número absoluto, la estructura es propensa a pandearse.

Tabla 3. Modos de pandeo global en PEM

Caso	Modo	Factor Escala
Pandeo Gravitacional	1	1.065
	2	1.732
	3	2.067
	4	2.696
	5	2.866
	6	3.755
Pandeo Sx	1	1.989
	2	1.608
	3	1.921
	4	2.317
	5	-3.797
	6	-4.319
Pandeo Sy	1	1.753
	2	1.979
	3	1.98
	4	1.376
	5	1.437
	6	1.506

Se verificaron los factores demanda/capacidad de los elementos de acero según lo dispuesto en el AISC 360-22.

Al verificar la necesidad de placas dobles en las zonas de panel más críticas de la estructura, se obtiene como resultado que no son necesarias, al colocar placas de continuidad con el mismo espesor que los patines de vigas y calcular definitivamente las propiedades RBS (Eliud, 2019).

Tras realizar el cálculo de derivas, el cortante basal en dirección X obtiene: 1.29 %, y el cortante basal en dirección Y: 1.71 %. Los espectros, en dirección X: 1.24 %, y en dirección Y: 1.62, siendo más relevantes en dirección Y.

Análisis no lineal estático

En sentido X (Figura 13), se muestra que la estructura estará en el rango elástico hasta 15 cm. El punto de desempeño se encuentra a 20.04 cm, con una aceleración de 0.54 g. El período secante ($T_{sec.}$) y período efectivo ($T_{eff.}$): 1.2 s; amortiguamiento efectivo $Beff.$ del 0.053, con un radio de ductilidad de 1.23.

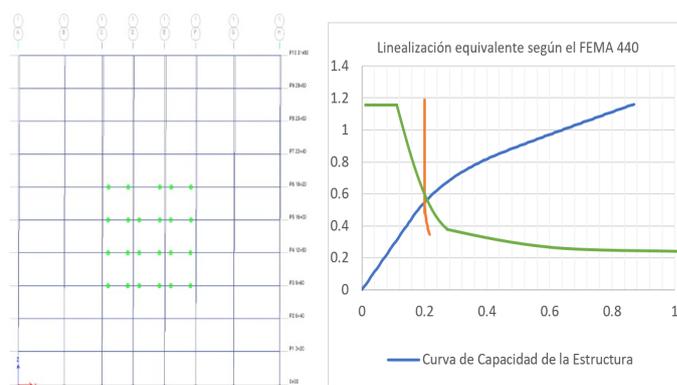


Figura 13. Desempeño PEM 475 años, dirección X.

En dirección X se tiene un nivel de daño de (IO) la formación de rótulas, en zona de endurecimiento post-fluencia, dándose en vigas, siendo lo más esperado en PEM, para el espectro con período de retorno 475 años. Las rótulas se producen en niveles donde tienen mayores derivas. Varios autores relacionan derivas con el nivel de desempeño, pero varían según el tipo de estructura, ocupación, cargas y el espectro de análisis y su período de retorno. Mochamad et al. (2019), basados en el ATC 40, sugieren otros niveles de desempeño, como control de daños entre IO y LS (Federal Emergency Management Agency, 1997), que es donde recaería la estructura analizada con PEM. Según la deriva 0,01-0,02, se establece un control de daños; según los autores, la metodología empleada, basada en el ASCE 41, no hace dicha diferenciación.

En sentido Y (Figura 14), la estructura incursiona en el rango elástico hasta 16 cm. Después, se empezará a incursionar en el rango inelástico, según la curva cortante basal vs desplazamiento. Según la metodología del FEMA 440, el desempeño para el sismo de 475 años indica el punto de desempeño a 23.44 cm y una aceleración de 0.52 de gravedad. ($T_{sec.}$) y ($T_{eff.}$): 1.3 s, y un radio de ductilidad de 1.68.

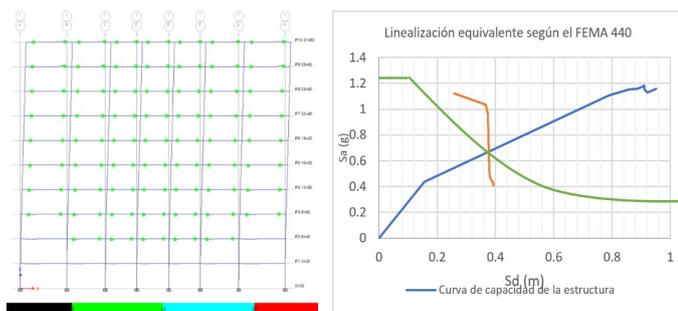


Figura 14. Desempeño PEM 475 años, dirección Y.

En dirección Y se tiene un nivel de daño de (IO) la formación de rótulas, en zona de endurecimiento post-fluencia; la deriva obtenida es de 0.0171 y se muestra la formación de rótulas en todos los pisos, manteniéndose en vigas. A mayor deriva, existe mayor daño estructural, en comparación con el sentido X, donde se mantenía la formulación de rótulas en niveles de entre piso del 3 al 6, exclusivamente.

El desempeño es óptimo según su nivel de desempeño; tanto en sentido X e Y, permanece en IO.

b. Edificio con PEAC

El período de vibración de esta estructura es 0.74 (s), y el calculado según la NEC, 1.277, cumple con el primer requerimiento. En el primer modo de vibración, $R_z = 0.01573$, $U_{x,y} \max = 0.76$; en el segundo modo de vibración, $R_z = 0.0000002$ y $U_{x,y} \max = 0.76$; ambos modos indican que son traslacionales. La participación de la masa supera el 90 % en el noveno modo de vibración. Las derivas de piso para el cortante basal, en X: 0.67 % y en Y: 1.0 %. Las derivas del espectro en dirección X: 0.63 % y en dirección Y: 0.92 %. Respecto al pandeo global, todos los valores están fuera del rango -1 y 1. Finalmente, en el diseño demanda capacidad, las riostras, vigas y columnas están en un rango permitido según el AISC 360-22. La estructura cumple con todos los requerimientos de diseño.

En sentido X (Figura 15), la estructura estará en el rango elástico hasta 10 cm. Después se incursionará en el rango inelástico, según la curva cortante basal vs desplazamiento, el nivel de desempeño estructural de 19.53 cm y 0.88 g. Con un nivel de daño de (IO) la deriva obtenida: 0.0067, se muestra la formación de rótulas en riostras; (T sec.): 0.85 s., (T effec.): 1.348 s. y radio de ductilidad de 3.76.

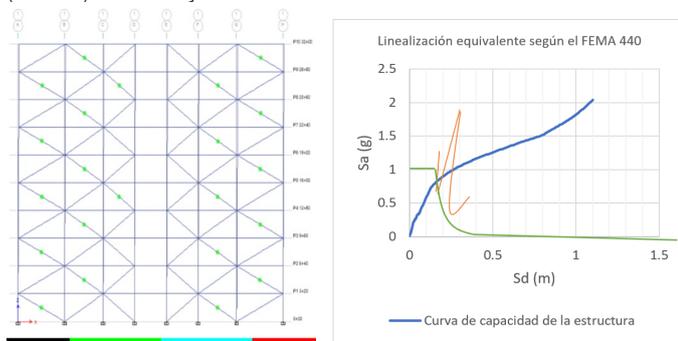


Figura 15. Desempeño PEAC 475 años, dirección X.

En sentido Y (Figura 16), la estructura estará en el rango elástico hasta 4 cm. Posteriormente, se empezará a incursionar en el rango inelástico según la curva cortante basal vs desplazamiento, que indica el punto de desempeño a 10.58 cm y una aceleración de 0.696 de gravedad. (T sec.): 1.08 s. y (T effec.): 1.289 s., un B_{eff} de 0.173 y un radio de ductilidad de 3.89.

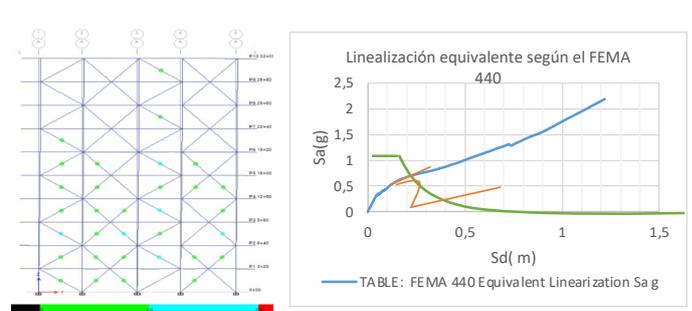


Figura 16. Desempeño PEAC 475 años, dirección Y.

En dirección Y se tiene un nivel de daño de (LS) la deriva obtenida: 0.01, observándose la formación de rótulas en riostras, que es el mecanismo de fluencia esperado. Ghobarah (2001) establece que el nivel de desempeño debe ser seguridad de vida (LS); según el autor, las derivas tienen que ser menores al 1.5 %. En la presente investigación se cumple el postulado, pues se tiene una deriva de 1.00 %, donde el nivel de desempeño para un sismo con un período de retorno 475 de años es de LS, por lo que al realizar un análisis no lineal se verificó lo expuesto con las tablas de Ghobarah.

El desempeño de pórticos PEAC en X es IO, y en dirección Y, es LS. Con posterioridad al sismo requerirá arreglos y refacciones que no comprometan la estructura, pero estos representan un costo significativo; además, los habitantes podrán seguir ocupando la edificación después del sismo, mientras realizan refacciones. Es indispensable realizar un diseño por desempeño, pues este afianza la seguridad de los ocupantes de esta tipología estructural (Zakian y Kaveh, 2023). Debido a que existe una divergencia de criterios entre derivas y el nivel de desempeño estructural, este depende del uso de la estructura, las cargas gravitacionales, el sistema estructural y el tipo de rótulas aplicadas; sin generalizar a través de una tabla pero sí teniendo referencia, es inviable tener una deriva superior al 2 % y obtener un nivel de desempeño de IO.

c. Edificio con PAE

El período de vibración de esta estructura es 1.169 (s) y el propuesto por la NEC, 1.277, por lo que cumple el primer requerimiento. En el primer modo de vibración, $R_z = 0.0002$, $U_{x,y} \max = 0.75$; en el segundo modo de vibración, $R_z = 0.0002$ y $U_{x,y} \max = 0.78$; ambos modos indican que son traslacionales. La participación de masa supera el 90 % en el octavo modo de vibración. Las derivas de piso para el cortante basal en X: 1.207 %, y en Y: 1.57 %. Las derivas del espectro en dirección X, 1.02 %, y en dirección Y, 1.39 %. En el pandeo global, todos los valores están fuera del rango -1 y 1. Finalmente, el diseño demanda capacidad; las riostras, vigas y columnas están en un rango permitido.

En sentido X (Figura 17), la estructura estará en el rango elástico hasta 13.73 cm. Posteriormente, se empezará a incursionar en el rango inelástico. El desempeño para el sismo de la NEC de 475 años se encuentra a 19.59 cm y una aceleración de 0.515 de gravedad. (T sec.): 1.23 s. y (T effec.): 1.13 s., un B_{eff} de 0.065 y un radio de ductilidad de 1.74.

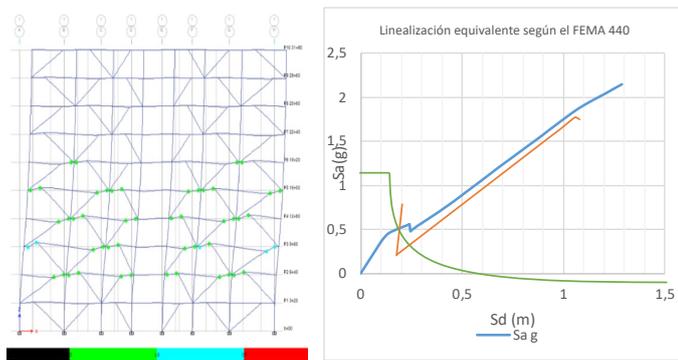


Figura 17. Desempeño PAE 475 años, dirección X.

En dirección X se tiene un nivel de daño (LS) de la formación de rótulas, en zona de endurecimiento post-fluencia, en elementos links, siendo el lugar esperado la deriva obtenida: 0.012, que cumple con la filosofía de diseño establecida en la NEC SE AC y AISC 341.

En sentido Y (Figura 18), la estructura estará en el rango elástico hasta 11.35 cm. Después, se empezará a incursionar en el rango inelástico según la curva cortante basal vs desplazamiento, que indica el punto de desempeño a 28.68 cm y una aceleración de 0.4079 de gravedad. (T sec.): 1.472 s. y (T effec.): 1.37 s., un Beff de 0.098 y un radio de ductilidad de 1.93.

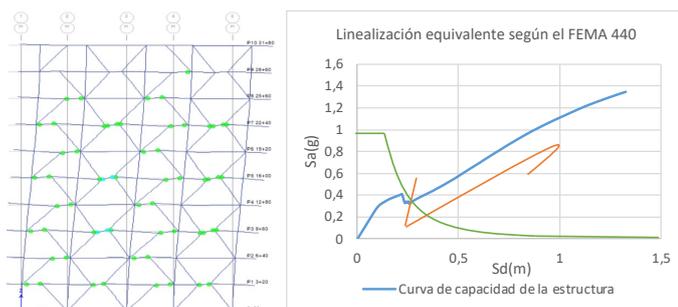


Figura 18. Desempeño PAE 475 años, dirección Y.

En dicho punto, el nivel de desempeño para X e Y es de LS, al igual que en PAE; presenta daños que deben tratarse para ser intervenidos por profesionales de la construcción, y la edificación incursiona en el rango inelástico.

En dirección Y, se tiene un nivel de daño (LS) en la formación de rótulas, en zona de endurecimiento post-fluencia, la deriva obtenida: 0.0157 y muestra la formación de rótulas en elementos link. Pese a ser mayor que en dirección X, se mantiene el mismo nivel de desempeño: LS, aumentando la formación de rótulas (Zaker et al., 2018). Finalmente, al comparar diferentes autores con sistemas estructurales, y la altura de edificios según la deriva, la más representativa es la metodología de Hazus, en la que habla de estructuras de más de 8 pisos e indica que la estructura tendrá un daño extenso: derivas máximas del 1 % y moderado daño al 1 %. Sin embargo, los PEM tienen un nivel de desempeño IO, lo que corrobora que no se puede establecer un nivel de desempeño que parta de las derivas y estimaciones, lo que conlleva necesariamente un análisis no lineal.

Análisis comparativo

Finalmente, se realiza un análisis comparativo de las curvas de capacidad de los tres sistemas estructurales, mostradas en la Tabla 4. La estructura más rígida es la que cuenta con arriostramientos concéntricos, al tener el período de vibración más bajo. Le sigue la estructura de arriostramientos excéntricos, cuyo período de vibración tiende a incrementar a medida que aumenta la longitud del elemento enlace (link). La estructura más flexible es el PEM, cuya rigidez está controlada principalmente por dimensiones de vigas.

En la estructura PEAC, a medida que las riostras se van plastificando, la estructura pierde rigidez, aspecto que se ve reflejado en cambios abruptos en la pendiente de la curva de capacidad. Sin embargo, al ser una estructura redundante (varios arriostramientos), la resistencia es compensada y tiende a aumentar hasta el punto en que la mayoría de las riostras han fluido. De esta forma, se produce la fluencia significativa de la estructura, y así la pérdida de rigidez es notable. Los elementos considerados como secundarios en este sistema (vigas, columnas) empiezan a fluir hasta el colapso de la estructura. Este sistema presenta mayor resistencia, pero es menos dúctil, dado que su capacidad de incursión inelástica depende de la capacidad de deformación axial de riostras, previo al pandeo en compresión.

Por otro lado, la estructura con arriostramientos excéntricos presenta una fluencia significativa más temprana, en comparación con el sistema anterior. Por su mecanismo de agotamiento, concentra plastificación en el elemento link que es parte de las vigas. Se considera que las vigas contribuyen significativamente a la deriva de entrepiso (Bruneau et al., 2011), generándose un cambio de rigidez significativo en la estructura. Con posterioridad a la plastificación de elementos link, se produce un cambio brusco en la resistencia, según lo expuesto en la curva de capacidad. Este es el sistema más dúctil de todos; a pesar de que la plastificación de links es temprana, posee una capacidad de rotación significativa antes de llegar a rotura, lo que permite que los elementos secundarios desarrollen gran inelasticidad.

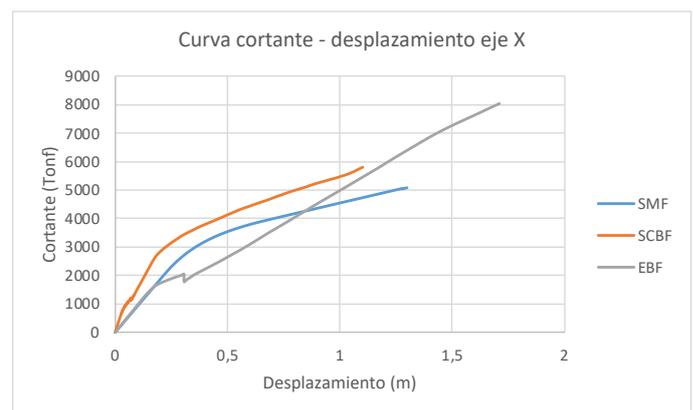


Figura 19. Curva de capacidad en sentido X de PEM, PEAC y PAE

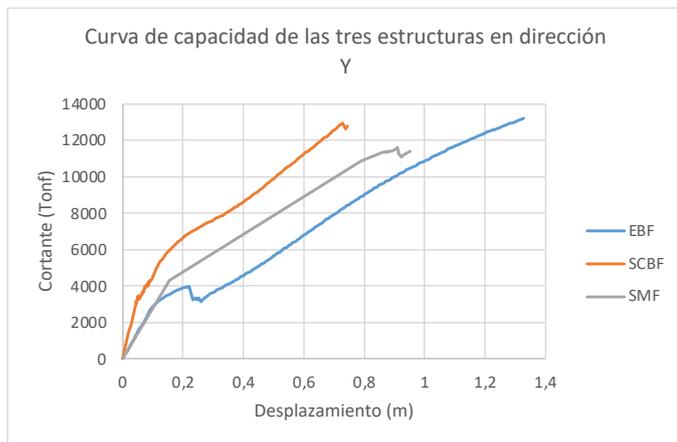


Figura 20. Curva de capacidad en sentido Y de PEM, PEAC y PAE

Tabla 4. Período. Factores de ductilidad, derivas, sobre resistencia y niveles de desempeño

Sistema Estructural	Dirección	Deriva	Nivel de desempeño	T(s)	Ru	R Ω
PEM	X	1.29 %	IO	1.24	3.71	2.02
	Y	1.71 %	IO		4.25	2.04
PEAC	X	0.67 %	LS	0.747	6.76	2.45
	Y	1 %	LS		3.81	3.55
PAE	X	1.20 %	LS	1.168	2.44	4.09
	Y	1.57 %	LS		2.76	3.96

Cada sistema presentó un desempeño diferente, pese a tener las mismas cargas sísmicas, gravitacionales, número de pisos y arquitectura (Tabla 4).

Las secciones empleadas en PEM fueron: vigas IPE 200: 240, 300, 360 y 400; adicionalmente, se empleó el tipo de columnas HEB1000, lo que da un peso en kg de 2'693.171,00.

El sistema PEAC para las diagonales rigizadoras emplea tubos rectangulares de: 140x98x7,1-17,5, 200x140x25; tubos cuadrados: 140x140x8-16; vigas IPE: 200, 240, 270, 300, 400 y 450; y columnas: HEB de 300-800, lo que equivale a un peso de 630.208,8 kg.

En el sistema PAE para las diagonales rigizadoras emplea tubos rectangulares de: 140x98x10, 200x140x12,5; tubos cuadrados de 140x140x8, 140x140x10, 140x140x20, 200x200x12,5x, 200x200x16, 240x240x16, 240x240x25, 300x300x20, 340x340x25, 400x400x25; vigas IPE 200-500 y HEB de 360-800, que equivale a un peso de 632.959,54 kg.

El sistema estructural con mayor rigidez y menores derivas es PEAC; sin embargo, no es el sistema que presenta menor daño: el nivel de desempeño es seguridad de vida (LS) el mismo que PAE, se demostró que, si bien debe existir un límite de deriva para un material estructural, cada uno debe plantearse según su tipología o uso. Asumir un nivel de desempeño, el cual parte de derivas, es un error, pues esto dependerá de diversos factores: el sistema estructural, la ductilidad de secciones y el período de retorno del sismo; si se analiza para 2475 años, el nivel de desempeño cambiará considerablemente. Al ser una estructura no especial ni esencial, se limitó el análisis a 475 años. Los autores recomiendan mantener un nivel de desempeño de LS derivas menores al

1.6 % para pórticos arriostrados, sean estos concéntricos o excéntricos. Por otra parte, podrían mantenerse derivas PEM menores al 2 %, ya que en 1.71 % mantiene un nivel de desempeño de IO, contraponiéndose a la SEAOC 1995, según el comité visión 2000, que en LS tendrá una deriva menor al 1.5 %. No se debe limitar a asociar simplemente la deriva con nivel de daño; es necesario realizar un análisis no lineal. Las Figuras 19 y 20 muestran curvas de capacidad cortante vs desplazamiento de las estructuras resultantes del análisis no lineal estático de los tres sistemas.

Análisis de precios unitarios

Se realizó un análisis de precios unitarios considerando un costo unitario de acero trabajado de 4.34 \$ (Cámara de la Industria de la construcción, 2023), comparativamente con el desempeño de cada estructura (Tabla 5), para llegar a la toma de decisiones por parte del ingeniero estructural.

Tabla 5. Tabla de precios y desempeño estructural

Sistema estructural	PEM	PEAC	PAE
Nivel de desempeño	Ocupación in-mediata	Seguridad de vida	Seguridad de vida
Costo USD	\$11,688,275.3	\$3,008,960.40	\$ 3,111,616.29
Relación costo beneficio	El más costoso, pero más resistente	El más económico y con mejor relación costo beneficio	Costo > SMF y <SCBF, desempeño similar a SCBF
Amortiguamiento efectivo	0.053	0.098	0.065
Radio de ductilidad	1.23	2.15	1.74

CONCLUSIONES

Los PEM muestran un nivel de IO predecible. Tanto los PEAC como los PAE están en un nivel de desempeño de LS posterior al sismo, lo que significa que la estructura sigue siendo funcional, pero requiere reparaciones especializadas. En PEAC, las riostras pueden reemplazarse, mientras que en PAE es común la formación de rótulas en elementos de unión entre riostras y vigas. Este comportamiento es esperado en un sistema estructural arriostrado excéntrico.

La estructura con mejor desempeño para un espectro de diseño de 475 años es PEM; todos sus elementos están en IO, por lo que es el sistema más resistente, pero más costoso.

La estructura más económica, con un costo total de 3,008,960.40 USD, dólares americanos, es PEAC; por tanto, es un sistema funcional y económico.

La estructura que posee una relación mayor costo-beneficio es PEAC, pues el nivel de daño es LS; las rótulas plásticas se generan en riostras, incluso comportándose como fusibles estructurales, al deteriorarse por cargas sísmicas. Con un estudio estructural previo pueden cambiarse, sin comprometer el uso de la edificación.

El diseño de riostras, al conectarse concéntricamente, ya sea en V, V invertida o diagonal, tiene poca influencia en el desempeño de la estructura, y cumple la función de rigidizar lateralmente el pórtico.

El desempeño de una estructura al sobredimensionar las riostras, ya sea en PEAC o PAE, provoca que las rótulas se produzcan en columnas; el factor demanda capacidad del AISC 360 deberá ser mayor de 0.5 y menor que uno para lograr un desempeño óptimo y permitir que las rótulas se formen en diagonales rigidizadores. Por tanto, no es adecuado sobredimensionar las riostras. Las rótulas se producen en vigas en PEM; las rótulas en PEAC se producen en las diagonales rigidizadores o riostras, y en el caso de PAE, en los elementos vínculo o link. La formación de rótulas plásticas es la esperada y deseable en cada sistema estructural, puesto que se ha diseñado con criterios sísmicos y, al producirse en estos elementos, se garantiza el desarrollo de la correcta capacidad de cada elemento del sistema estructural.

Es complejo minimizar derivas al emplear solo PEM en acero, para edificios de media y alta altura; para reducir derivas es común sobredimensionar vigas y columnas, tal y como se ha realizado en el presente estudio, pero representa un mayor costo. En el caso de edificaciones de baja altura y luces con una distancia inferior a 7 metros, puede existir un diseño sin sobredimensionamiento y se pueden lograr consideraciones sismorresistentes con mayor facilidad.

Para evitar sobredimensionamiento en riostras al considerar el diseño por demanda capacidad, deberá ser mayor que 0.5 (subdimensionado) y menor que 1. En el caso de PEM, sería diseñar un sistema estructural mixto que cuente con PEM y PEAC.

Contribución de los autores: Abril-Camino: conceptualización, metodología, análisis formal, investigación, curación de datos, redacción, preparación del borrador original, redacción, revisión, edición y visualización. Medina-Robalino: conceptualización, metodología, revisión, edición y supervisión. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del documento.

Fuente de financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. Los patrocinadores no tuvieron ningún papel en el diseño del estudio, recopilación, análisis o interpretación de datos, redacción del documento o en la decisión de publicar los resultados.

REFERENCIAS

Acero Deck. (2015 de Enero de 2015). *Aceros Procesados S.A.* Obtenido de Aceros Procesados S.A.: acero-deck.com

American Institute of Steel Construction. (2022). *AISC 360-16 Specification for Structural Steel Building*. Washintong: AISC.

American Institute of Steel Construction AISC 341. (2016). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Chicago: AISC.

American Institute of Steel Construction AISC 358. (2016). *Prequalified Connections*. Chicago: AISC.

American Society of Civil Engineers ASCE/SEI 7-22. (2022). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. ASCE.

Bruneau, M., Uang, C.-M. y Sabelli, R. (2011). *Ductile Design of Steel Structures*. McGraw-Hill.

Cabas (2011). Los rascacielos y su evolución tipológica. *Revista Módulo*, 205-214.

Camacho, L. (2011). Reflexión sobre la industria de acero en el mercado globalizado. *Apuntes CEES, XXX(51)*, 165-182.

Camara de la Industria de la construcción. (2023). *Revista Construcción*. CAMICON.

De la Cruz, J. y Roberto, Y. (2021). Análisis comparativo del diseño estructura; de una edificación regular e irregular de ocho niveles en sistema de pórticos aplicando la norma E.030 2003, 2016, 2018; "Diseño sismo resistente en la ciudad de Lima". *Gaceta Técnica*, 48-71.

Eliud, H. (7 de Febrero de 2019). Zigurat Global Institute of Technology. Obtenido de *Zigurat Global Institute of Technology* 2018: <https://www.e-zigurat.com/blog/es/revison-y-aplicacion-zona-panel-porticos-resistentes-momento-acero/>

Fang, C., Wang, W., Qiu, C., Hu, Shuling, M. G. y Eatherton, M. R. (2022). Seismic resilient steel structures: A review of research, practice, challenges and opportunities. *Journal of Constructional Steel Research*, 191. doi:10.1016/j.jcsr.2022.107172.

Federal Emergency Management Agency. (1997). *GUIDELINES FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS*. FEMA.

Fuentes, S., González, L., Calderín, F. y Sánchez, Y. (2018). Consideraciones acerca del diseño sismorresistente de edificios de acero en Cuba. *Ciencia en su PC*, 11-26.

Gervasio, H. (4 de Diciembre de 2014). *Instituto Chileno del Acero*. Obtenido de Instituto Chileno del Acero: <https://www.icha.cl/wp-content/uploads/2014/12/LA-Sustentabilidad-del-Acero-y-Las-Estructuras-Met%C3%A1licas1.pdf>

Ghobarah, A. (2001). Performance-based design in earthquake engineering: state of development. *Engineering Structures*, 23, 878-884.

Jimenez, M. (2016). *Diferencia entre los códigos "ASD" Y "LRFD" adaptándose al IMCA*. Universidad Autónoma de Aguas Calientes.

Kiakojouri, F., De Biagi, F., Chiaia, B. y Reza Sheidaii, M. (2020). Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects. *Engineering Structures*, 206. doi:10.1016

McCormac, J. y Csernak, S. (2013). *Diseño de estructuras de acero*. Alfaomega Grupo Editor.

Medina Robalino, C. D. y Medina Robalino, W. S. (2017). Irregularidad en Planta a partir del Análisis de Torsión en Estructuras Irregulares. *Revista Politécnica*, 51-60.

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *NEC SE AC*. Quito: Presidencia del Ecuador.

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *NEC SE CG*. Quito: Presidencia del Ecuador.

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *NEC SE DS*. Quito: Presidencia del Ecuador.

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *NEC SE VIVIENDA*. Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2019). *Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente*. Lima: Viceministerio de vivienda y urbanismo, Dirección Nacional de Urbanismo.

Mochamad, T., Novia, M. y Fadillawaty, S. (2019). Pushover Analysis of Partially Strengthened Column Structures on an Existing Multi-story Building. *MATEC Web of Conferences* 280, 01003. doi:<https://doi.org/10.1051/mateconf>

Poland, C., Hill, J., Sharpe, R., Soulages, J. y California, S. E. (1995). *Vision 2000: performance based seismic engineering of buildings*. Structural Engineers Association of California.

Pomares, J., Pereiro-Barceló, J., González, A. y Aguilar, R. (2021). Safety Issues in Buckling of Steel Structures by Improving Accuracy of Historical Methods. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 18(12253), 1-21. doi:<https://doi.org/10.3390/ijerph182212253>

- Rojas, P., Barros, J., Aguaguña, M. y Herrera, R. (2016). Análisis, diseño y evaluación sísmica de edificios altos de construcción compuesta y con arriostramientos de pandeo restringido. *Dialnet*, 84-93.
- Serrano, A. y Martínez, J. (2021). Una revisión biográfica y significativa de las estructuras mixtas de hormigón y acero estructural. *Hormigón y Acero*, 7-29.
- Soto, H. (2018). ¿Cuándo construir con acero? *Revista Mexicana de la Construcción No. 633*, 30-35.
- Villamil, S. (2008). Industrias, Puentes y Montajes en América Latina. *LEGIS S.A*, (15), 3.
- Zaker, M., Banazadeh, M., & Huang, Q. (2018). The effect of design drift limit on the seismic performance of RC dual high-rise buildings. *Struct Design Tall Spec Build*, 1-16. doi:<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/tal.1464>
- Zakian, P. y Kaveh, A. (2023). Seismic design optimization of engineering structures: a comprehensive review. *Acta Mech* 234, 1305–1330.