



*Análisis del desempeño de un pórtico de hormigón armado con arriostramiento concéntrico de acero estructural*

*Performance analysis of a reinforced concrete frame with concentric structural steel bracing*

*Análise de desempenho de uma estrutura de concreto armado com contraventamento de aço estrutural concêntrico*

Mónica Lituma-Vicuña <sup>I</sup>  
[monica.litumav@yahoo.com](mailto:monica.litumav@yahoo.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-8301-9158>

Fernando Cañizares-Ortega <sup>II</sup>  
[fer.canizares.ortega@gmail.com](mailto:fer.canizares.ortega@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-3070-8734>

**Correspondencia:** [monica.litumav@yahoo.com](mailto:monica.litumav@yahoo.com)

Ciencias Técnicas y Aplicadas  
Artículo de Investigación

\***Recibido:** 01 de octubre de 2021 \***Aceptado:** 20 Noviembre de 2021 \* **Publicado:** 20 de Diciembre de 2021

- I. Ingeniera Civil, estudiante de la Maestría en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Sismorresistentes, Unidad Académica de Posgrado, Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- II. Docente de la Maestría en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Sismorresistentes, Unidad Académica de Posgrado, Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

## Resumen

Durante años el mundo entero ha experimentado terribles consecuencias ocasionadas por los movimientos telúricos que han provocado grandes pérdidas humanas y materiales, debido a la existencia de infraestructuras construidas con malas técnicas ingenieriles o con normativas obsoletas. Es por ello que se plantea el estudio del comportamiento de un pórtico de hormigón arriostrado concéntricamente PHAC con un elemento de acero estructural, para ser comparado con el comportamiento de un pórtico de hormigón simple PH, con el fin de determinar los desplazamientos y curvas de desempeño; ya que puede ser una alternativa viable para el reforzamiento estructural de edificaciones y/o una técnica que aporte rigidez adicional a la estructura. Para su determinación, se utilizó un software computacional llamado SeismoStruct, el mismo que permite modelar los pórticos para obtener una curva de capacidad (fuerza – desplazamiento) que simule su comportamiento de acuerdo método del Pushover, que realiza un análisis matemático no lineal. A partir de esos resultados se verificó el hecho de que un arriostramiento de acero estructural puede ser usado para mejorar la actuación de una estructura al someterse a un movimiento sísmico, por lo tanto, estos marcos arriostrados pueden ser usados tanto en edificaciones antiguas para desarrollar un mecanismo que se comporte adecuadamente durante un sismo o para estructuras nuevas que buscan mayor resistencia al corte.

**Palabras clave:** Pórtico de hormigón; arriostramiento; Chevron; Pushover; SeismoStruct; curva de capacidad.

## Abstract

For years the whole world has experienced terrible consequences caused by earthquakes that have caused great human and material losses, due to the existence of infrastructures built with bad engineering techniques or with outdated regulations. That is why the study of the behavior of a concentrically braced concrete frame PHAC with a structural steel element is proposed, to be compared with the behavior of a simple concrete frame PH, in order to determine the displacements and performance; since it can be a viable alternative for the structural reinforcement of buildings and/or a technique that provides additional rigidity to structure. For its determination, a computational software known as SeismoStruct was used, the same one that allows modeling the frames to obtain a capacity curve (force - displacement) that simulates their behavior according to Pushover method, which performs a non-linear mathematical analysis.

From these results it was verified that a structural steel bracing can be used to improve the performance of a structure when subjected a seismic, therefore, these braced frames can be used both in old buildings to develop a mechanism that behaves properly during an earthquake or for new structures seeking greater resistance to shear.

**Keywords:** Concrete gantry; bracing; Chevron; Pushover; SeismoStruct; capacity curve.

## Resumo

Durante anos o mundo inteiro sofreu terríveis consequências causadas por terremotos que causaram grandes perdas humanas e materiais, devido à existência de infra-estruturas construídas com péssimas técnicas de engenharia ou com regulamentos desatualizados. Por isso, é proposto o estudo do comportamento de um pórtico de concreto reforçado concêntrico PHAC com um elemento de aço estrutural, para ser comparado com o comportamento de um pórtico de concreto simples PH, para determinar os deslocamentos e curvas de desempenho. uma vez que pode ser uma alternativa viável para o reforço estrutural de edifícios e / ou uma técnica que proporciona rigidez adicional à estrutura. Para a sua determinação, foi utilizado um software computacional denominado SeismoStruct, o mesmo que permite modelar os pórticos para obter uma curva de capacidade (força - deslocamento) que simula o seu comportamento segundo o método Pushover, que realiza uma análise matemática não linear. A partir desses resultados verificou-se o fato de que um contraventamento de aço estrutural pode ser utilizado para melhorar o desempenho de uma estrutura quando submetida a movimento sísmico, portanto, esses pórticos contraventados podem ser utilizados tanto em edifícios antigos para desenvolver um mecanismo que se comporte adequadamente durante um terremoto ou para novas estruturas que buscam maior resistência ao corte.

**Palavras-chave:** Pórtico de concreto; órtese; Chevron; Pushover; SeismoStruct; curva de capacidade.

## Introducción

Los terremotos son los desastres naturales que causan más pérdidas humanas y materiales alrededor del mundo, cada año muere una gran cantidad de personas y la pérdida económica es de miles de millones de dólares (Burak et al., 2017). En América Latina, región especialmente

expuesta a terremotos por su ubicación cerca de las placas tectónicas en movimiento, uno de los países que ha sufrido las graves consecuencias de un terremoto es Chile. El 27 de febrero de 2010 un terremoto que duró cerca de 4 minutos y tuvo una magnitud de 8.8 grados sacudió el centro-sur de Chile, registrándose más de 500 víctimas mortales, dos millones de personas damnificadas y destrozos en medio millón de viviendas fue el saldo que dejó la peor tragedia natural vivida en Chile desde 1960.

En Ecuador, la cifra de muertos del terremoto del 16 de abril de 2016 supera al sismo de Perú en 2007 y “lo convierte en el más mortal de Sudamérica desde el sucedido en Colombia en 1999, que mató a más de 1000 personas” (Redacción BBC Mundo, 2016). La afectación se calculó alrededor del 49% en el sector productivo con pérdidas de al menos \$860 millones, según datos del Ministerio de Industrias y Productividad. En cuanto a las infraestructuras, un año después del sismo se registraron en total 69335 edificaciones afectadas, de las cuales 22015 necesitaban reconstruirse por lo que se destinó aproximadamente 1712 millones de dólares para reconstrucción; la entrega de este recurso se centró en la reparación, recuperación y reconstrucción de infraestructuras colapsadas (CNN Latioamérica, 2017).

Las afectaciones sísmicas no dependen únicamente de la magnitud del sismo, sino también de las condiciones geológicas de la zona y de las técnicas constructivas. Lamentablemente en el Ecuador existe una gran cantidad de construcciones informales que elevan el nivel de vulnerabilidad de las estructuras, de hecho, dos de cada tres viviendas que se edifican en el Ecuador se hacen informalmente (Guzmán, 2008). En Cuenca no existe una ordenanza que garantice que las edificaciones y otras estructuras se construyan conforme lo requiere la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15), por lo que el Colegio de Arquitectos del Azuay (CAA) y la Cámara de Construcción de Cuenca (CCC), propusieron en el 2019 el análisis y ejecución de un reglamento que controle las técnicas constructivas en la ciudad ante el Concejo Cantonal de Cuenca (El Mercurio, 2019); sin embargo, hasta la fecha no existe una ordenanza que regule esta actividad.

Los movimientos telúricos se basan en la teoría de las placas tectónicas que data del año 1960, la cual explica que la tierra está conformada por un conjunto de placas (litosfera y astenosfera); que flotan sobre un entorno viscoso llamado manto (Filiatrault et al., 2013). Cuando dos placas tectónicas colisionan, una se coloca debajo de la otra a lo largo de la litosfera, formando una fosa oceánica profunda conocida como zona de subducción en su unión (Hu et al., 1996). La misma

que acumula gran energía y la libera súbitamente durante un sismo. El Ecuador, está situado en el denominado “Cinturón de Fuego del Pacífico”, por su posición en la costa oriental, por lo que es muy susceptible a experimentar terremotos y erupciones volcánicas (Lara et al., 2020). Además, existe una zona de subducción producida por la interacción entre la Placa Sudamericana y la Placa de Nazca. Es por eso que, históricamente se han evidenciado varios terremotos en prácticamente todo el territorio (Quezada et al., 2019).

Durante un evento sísmico, las estructuras tienden a sufrir daños leves o graves cuando pierden su capacidad de deformación permisible, es decir que la estructura ha perdido su resistencia y rigidez, sea local o global ante la sollicitación externa, como es el caso de un sismo. En el Ecuador, el hormigón armado es el material predominante en el ámbito de la ingeniería civil, ya que además de los beneficios económicos frente a otros sistemas constructivos también sus propiedades técnicas ofrecen grandes ventajas (Córdova, 2014). Estructuras conformadas por pórticos arriostrados concéntricamente tienden a funcionar mejor, reduciendo la vulnerabilidad de la edificación mediante la disipación de la energía, por lo que el daño durante un sismo se concentra en el elemento diagonal que puede ser reemplazado fácilmente en caso de que la afección del miembro sea permanente o haya alcanzado la rotura (Saatcioglu, 2013). Entonces, si bien los terremotos no se pueden evitar ni predecir lo que se puede hacer es proyectar construcciones sismorresistentes y la adecuación sísmica de las existentes con el fin de precautelar las vidas y disminuir las pérdidas económicas que puede sufrir un país.

Los pórticos de hormigón armado han sido ampliamente utilizados como sistema estructural, debido a que poseen una gran capacidad de deformación y disipación de energía, bajo la acción de fuerzas gravitacionales y laterales (Titiksh & Gupta, 2015). En 1970 la Universidad de Illinois utilizó un simulador de sismo para analizar la rigidez y energía absorbida de un marco de hormigón reforzado, someténdolo a movimientos dinámicos en la base para discutir las respuestas espectrales de este sistema estructural. Concluyeron que este tipo de pórticos diseñados a momento tienen una gran capacidad de absorción de energía (Takeda et al., 1970), por lo que su uso en la ingeniería abarca un amplio campo. Es por ello, que se plantea el análisis del desempeño de un pórtico de hormigón diseñado para resistir a momento (PH), para comparar su comportamiento al agregar un elemento disipador de energía, es decir evaluar un pórtico de hormigón con arriostramiento concéntrico de acero (PHAC).

Sin embargo, varios análisis han mostrado también que pueden ser susceptibles a grandes daños

estructurales, y en ocasiones la ruptura o falla de sus miembros ha desencadenado colapsos estructurales ante la acción de un sismo (Michael et al., 2014; Nakashima et al., 1998). Entonces, la incorporación de arriostramientos diagonales en estos pórticos, surge como un mecanismo que permite la disipación de energía del marco a través de las conexiones, lo cual posibilita el control de la deriva de piso y la prevención de colapsos (Badoux & Jirsa, 1990). Además, algunos investigadores se enfocaron en el uso de riostras como elementos de rehabilitación en edificios de hormigón armado que sufrieron afecciones debido a los movimientos telúricos ocurridos (Higashi et al., 1981; Sugano & Endo, 1983). Sin embargo, las diagonales rigidizadoras también se utilizan como elementos resistentes al corte en el diseño sísmico de nuevos miembros estructurales (M. R. Maheri & Akbari, 2003).

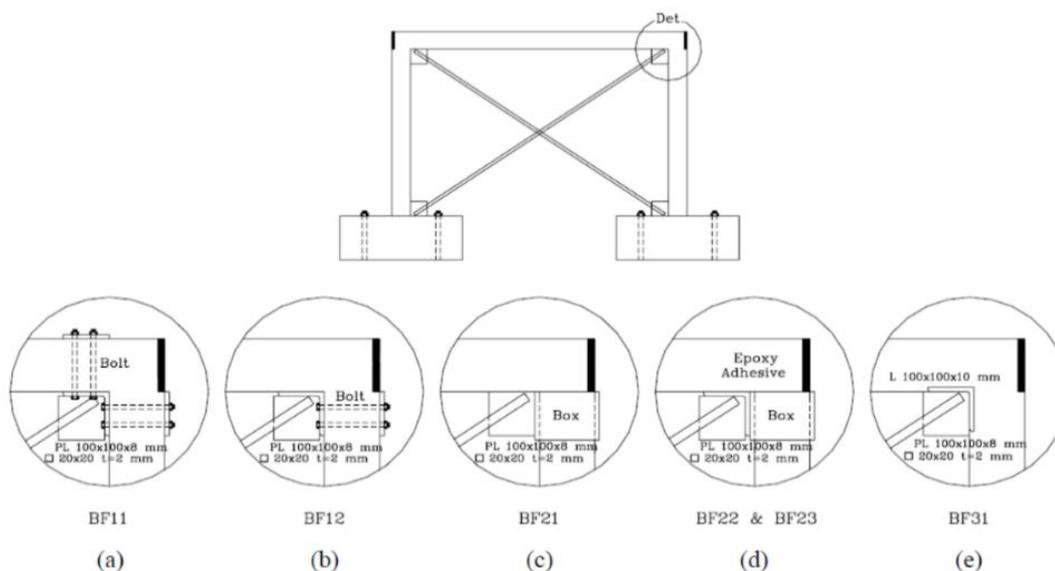
Entonces, los sistemas de pórticos arriostrados están compuestos por diagonales concéntricas (Godínez-Domínguez & Tena-Colunga, 2019) o excéntricas (Setyowulan et al., 2020), adecuadamente dispuestas para resistir fuerzas sísmicas. Es decir que, se requiere que se coloquen lo más simétricamente posibles para que las acciones laterales de viento y sismo produzcan esfuerzos axiales en las barras del pórtico arriostrado (Aristizabal-Ochoa, 1986), cualidad importante frente a otros sistemas estructurales. Además, poseen una alta rigidez lateral que permite controlar adecuadamente los desplazamientos que pudiera sufrir una estructura. Con lo cual satisface el requerimiento de máximo desplazamiento lateral detallado en las normativas que buscan diseños de edificaciones sismorresistentes (Bruneau et al., 2011).

En este campo, la literatura señala algunos estudios importantes. Sin embargo, es frecuente el uso de pórticos y diagonales de acero (Sen et al., 2016), pero no se puede decir lo mismo sobre el uso de diagonales de acero en pórticos de hormigón; ya que se ha demostrado recientemente ser una alternativa estructural y económicamente factible, que reemplaza el método de rigidización por muros de corte (M. Maheri et al., 2003). En este caso, en 1985 se estudió por primera vez el comportamiento de marcos de hormigón con diagonales de acero tipo X y K (actualmente conocida como V invertida), ante la acción de una carga lateral. Concluyendo que la respuesta inelástica es mucho mejor con diagonales en X. A pesar de que ambos presentaron un buen desempeño inelástico (Jain, 1985). Luego de varios años, se simuló el rendimiento de un edificio de 3, 5, 8 y 10 pisos, vinculados con elementos de acero tipo W200x200x47.1; con una disposición en A y X. Dando lugar a una deformación lateral menor, y una mejor actuación de la

diagonal tipo A, mostrando ser una opción viable para edificios de mediana altura (Sukrawa, 2017).

Asimismo, se manifiesta el uso de este sistema para reforzar estructuras existentes, pero sísmicamente ineficientes. Es por ello que, al incorporar diversas configuraciones de rigidizadores sometidas a ciclos de carga y descarga, las diagonales excéntricas presentaron mejor comportamiento en base al análisis de la ductilidad. Pero desde el punto de vista de la rigidez, resistencia y el control de agrietamiento, el comportamiento de diagonales concéntricas es más deseable (TahamouliRoudsari et al., 2017). En cuanto a la influencia de la reducción de desplazamientos, con respecto a la altura del edificio; se demostró teóricamente que la deriva es menor en el de 8 pisos, seguido por el de 4 pisos y luego el de 12 pisos, sin embargo, la ductilidad se reduce a medida que aumenta la elevación (Rahimi & Maheri, 2020). A pesar de ello, exponen una actuación eficaz para fortalecer y rigidizar dichas edificaciones (Badoux & Jirsa, 1990; Safarizki et al., 2013).

Mientras tanto, un estudio experimental dedujo que la resistencia se incrementaba considerablemente, no obstante, se expuso que las fallas en las estructuras pueden generarse en la zona de las conexiones por un inadecuado proceso de soldadura (Bush et al., 1991). Incluso, en una investigación realizada en el año 2013, se sugiere prestar especial atención a la conexión, a pesar de obtener resultados prometedores en cuanto a sus propiedades mecánicas (Massumi & Absalan, 2013). Por lo que, con el objetivo de estudiar la efectividad de las conexiones, se analizaron diversas alternativas (**Figura 1**), a través de un estudio experimental que recreó el prototipo en un laboratorio. El cual, luego de ser sometido a cargas cíclicas, y una vez analizados los resultados obtenidos, recomendaron la conexión que encapsula a la columna de hormigón con placas de acero y epóxico debido a que dio paso a una mayor absorción de energía. Sin embargo, la conexión tipo (a) también mostró un incremento en la rigidez y resistencia del marco (Massumi & Tasnimi, 2008).

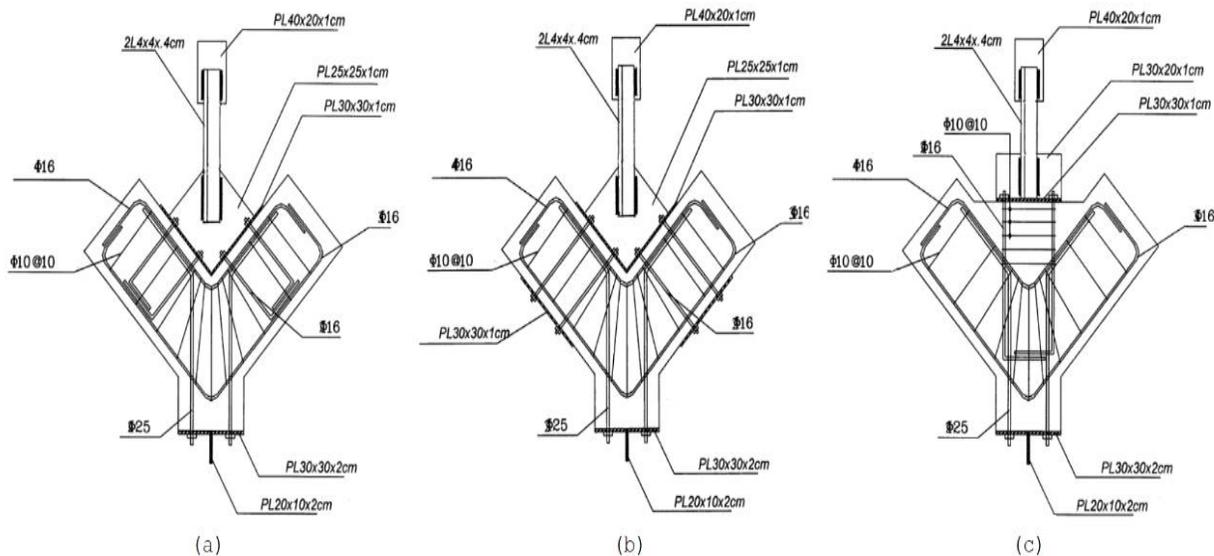
**Figura 1** Conexiones tipo entre pórticos de hormigón y diagonales de acero, (Massumi & Tasnimi, 2008)

En caso de que el encapsulamiento se vuelva una práctica complicada, existen procedimientos de anclaje más sencillos, pero funcionalmente eficientes. Es así que, en marcos concéntricos en X se evaluó la colocación de pernos sujetos con tuercas y arandelas, que atraviesan las columnas y vigas, además de otras disposiciones. Cuyos resultados computacionales evidenciaron un comportamiento dúctil y el incremento de la resistencia a corte del marco de hormigón, al utilizar estos pernos (M. R. Maheri & Sahebi, 1997).

Investigaciones recientes corroboran este estudio, ya que si bien no utilizaron exactamente iguales características físicas y mecánicas de los elementos como se muestra en la figura 2; la conclusión fue la misma. Tal como se puede observar, la diferencia entre estos tipos de conexión radica principalmente en el anclaje de los pernos, por ejemplo, en la figura 2a el perno no atraviesa completamente la viga de hormigón sino se dispone como una J, en cambio en la figura 2b se introduce completamente el perno y se emplean tuercas en los extremos; pero en ambos casos para la sujeción de los rigidizadores se utilizaron placas. Sin embargo, en la figura 2c no se emplearon pernos anclados sino varillas corrugadas con su propia armadura. Por lo que concluyeron que se obtiene una conexión más robusta al colocar los pernos asegurados completamente en los componentes estructurales. La conexión tipo (c), únicamente se recomendaría cuando se necesitan requerimientos especiales de ductilidad (M. R. Maheri & Hadjipour, 2003).

En cuanto a la distribución de los arriostramientos por piso, se demostró analíticamente que la colocación de estos elementos en los primeros niveles puede no aportar significativamente con el rendimiento sismorresistente de las construcciones. Por el contrario, se obtendrán mejores resultados al arriostrar los pisos superiores. Incluso se propone reducir las secciones de los elementos a medida que la altura incrementa (Abou-Elfath & Ghobarah, 2011). Por lo expuesto anteriormente, los marcos de hormigón reforzados con diagonales en V invertida o tipo Chevron tienen la capacidad de actuar a tensión y compresión. Es decir, una de las diagonales resiste a la carga lateral en tensión y la otra a compresión, lo que permite que compartan la carga lateral por igual antes del pandeo, es decir durante el rango elástico. Lo que le convierte en un mecanismo eficaz para proporcionar resistencia lateral y rigidez al marco (Ozcelik et al., 2012).

Figura 2 Tipos de conexiones objeto de estudio, (M. R. Maheri & Hadjipour, 2003)



En el Ecuador no existe información relevante que haga énfasis en el estudio de PHAC, ya que la mayoría de investigaciones se han encaminado en el estudio de pórticos de acero a los cuales han incluido arriostramientos, más no en el comportamiento de pórticos de hormigón con riostras de acero. Por lo cual, con esta investigación se pretende aportar con información que permita obtener sistemas eficaces, pero sísmicamente funcionales. Para el análisis *Pushover*, se utilizará el software de elementos finitos SeismoStruct ya que es capaz de predecir el comportamiento de

la estructura al aplicar tanto cargas gravitacionales como laterales producto de la simulación del efecto que tendría un sismo sobre la edificación.

### Metodología

La metodología utilizada para la simulación matemática del pórtico propuesto parte de la siguiente información:

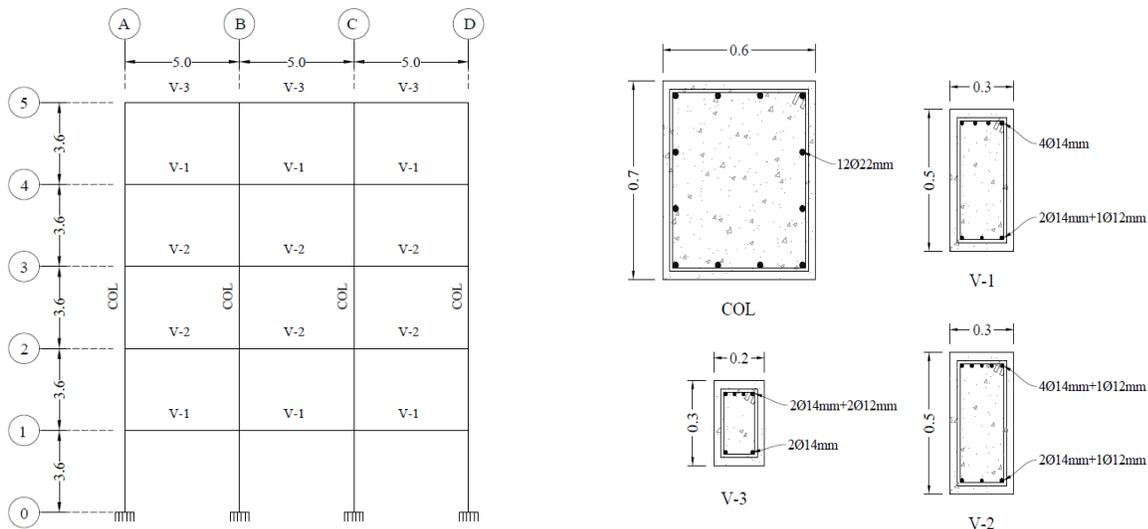
### Materiales

Tabla 1 Materiales, (Autor)

Material	Valor (kg/cm <sup>2</sup> )	Valor (kPa)
Acero Estructural ASTM A36	F <sub>y</sub> =2536 kg/cm <sup>2</sup>	248696.6 kPa
	F <sub>u</sub> =4077 kg/cm <sup>2</sup>	399817. kPa
Acero de refuerzo	F <sub>y</sub> =4200 kg/cm <sup>2</sup>	411879.3 kPa
Módulo de Elasticidad del Acero	E=2.1 10 <sup>6</sup> kg/cm <sup>2</sup>	205939654 kPa
Módulo de Poisson Acero	μ=0.3	0.3
Resistencia a la compresión simple Hormigón	f'c=240 kg/cm <sup>2</sup>	23535.96 kPa
Módulo de Elasticidad del Hormigón	E=216887.1 kg/cm <sup>2</sup>	21269356 kPa
Módulo de Poisson Hormigón	μ=0.2	0.2

### Geometría del Pórtico

Figura 3 Disposición estructural y secciones del PH, (M. R. Maheri & Hadjipour, 2003) Autor



### Cargas de Diseño

A continuación, se muestran las cargas según un pre-diseño realizado.

**Tabla 2** Cargas de diseño, sobrecargas de gravedad

	Carga (KN/m)
<b>Entrepiso</b>	
Carga Muerta	19.07
Carga Viva	6.60
<b>Cubierta</b>	
Carga Muerta	13.67
Carga Viva	2.75

### Normas Utilizadas

ACI318

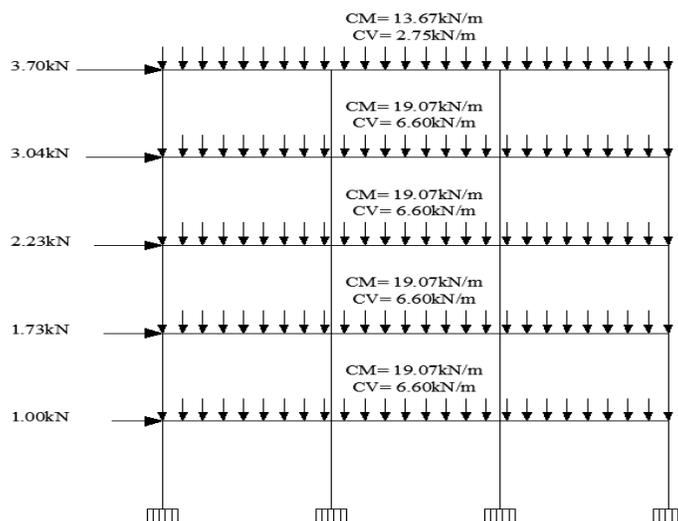
ACSE 07-2016

ASCE 41-17

NEC15

Entonces, para el diseño de los elementos que forman parte del pórtico (PH) se utilizó el **Método del Diseño Basado en Fuerzas (DBF)**, dentro del cual el primer paso fue determinar el espectro de diseño elástico que depende del lugar de emplazamiento (zona sísmica) y del tipo de suelo.

**Figura 4** Configuración de Cargas, (M. R. Maheri & Hadjipour, 2003) Autor)



Para el análisis se consideró un pórtico de 5 niveles, con una altura de entrepiso de  $3.6m$  y 3 tramos de  $5m$ ; la resistencia del hormigón armado  $f'_c = 240 \text{ kg/cm}^2$ , y el elemento de acero estructural que trabajó como diagonal arriostrada fue del tipo A36. El sistema estructural consistió en un pórtico especial a momento de concreto reforzado formado por vigas y columnas, las cuales fueron diseñadas para resistir correctamente tanto las cargas verticales debido al peso de la estructura y a su uso, así como cargas laterales debido a la acción sísmica; cumpliendo con las especificaciones de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15), y las del American Concrete Institute (ACI 318-19).

En el pre-dimensionamiento, para la determinación de las cargas verticales se tomó en cuenta el peso de los elementos que constituyen el pórtico, mamposterías, enlucidos, recubrimientos e instalaciones para la carga muerta y el valor de la carga viva está definida de acuerdo a su ocupación, pero estableciendo un valor diferenciado para el entrepiso y la cubierta.

### **Características Dinámicas del Pórtico y Sitio**

Siguiendo los lineamientos que se establecen en la normativa se toma los siguientes datos del sitio.

**Tabla 3** Consideraciones para análisis sísmico

Zona	Cuenca
Aceleración máxima en roca (Z)	0.25g
Tipo de suelo	D
Fa	1.4
Fd	1.45
Fs	1.06
r	1
$\eta$	2.48

Coefficientes de perfil de suelo tomados de la NEC-15

El periodo de vibración de la estructura, de acuerdo al Método 1 se determinó de manera aproximada mediante la expresión:

$$T = C_t h_n^\alpha$$

Con lo cual, del espectro de diseño elástico se obtuvo el espectro de diseño en aceleración, y en base a coeficientes de configuración del pórtico, uso (oficinas), coeficiente de importancia ( $I = 1$ ), factor de reducción de resistencia sísmica ( $R = 8$ ), se halló el cortante basal de diseño  $V$ .

$$V = \frac{IS_a(T_a)}{R\phi_p\phi_E}W$$

En lo que se refiere a las cargas laterales, su distribución fue triangular de acuerdo a la altura de la estructura y similar al modo fundamental de vibración, pero dependiente del periodo fundamental de vibración  $T_a$  y está definido así:

$$F_x = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} V$$

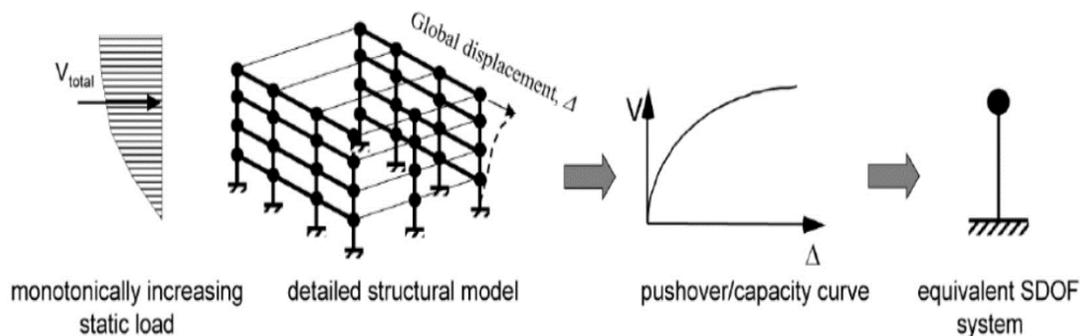
La configuración definitiva del PH se concretó al modelar su comportamiento en el software ETABS con las combinaciones de carga especificadas en la norma, además de la verificación del cortante basal dinámico y el control de la deriva inelástica de piso de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\Delta M = 0.75R\Delta E$$

Por lo que sus secciones finales y la distribución de la armadura de acero corrugado con  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ , se muestran en la Figura 3. Para la evaluación del pórtico arriostrado se incorporó un elemento tipo “tubo hueco” de sección igual a 150x150x5mm de acero estructural A36, distribuido en cada nivel del pórtico en forma concéntrica y de V invertida.

### **Método de Cálculo**

La evaluación del desempeño se realizó mediante la técnica del *Pushover*, que es un método bastante popular, y se fundamenta básicamente en que la respuesta de la estructura se asemeja a la de un sistema equivalente de un grado de libertad (SDOF), lo cual implica que la respuesta es controlada por un modo único (Yang & Wang, 2000).

**Figura 5** Equivalencia al sistema SDOF, a partir de la curva pushover, (Department of Homeland Security, 2005).

Entonces, para la obtención de la curva *pushover*, se aplicó una carga lateral creciente al modelo y a través de un análisis estático lineal, que es el responsable de la carga estática del sismo en la edificación; se observó que a medida que la fuerza lateral se incrementaba, la deformación también lo hacía y por ende su rigidez disminuía. La curva de capacidad se construyó para representar la respuesta del primer modo de vibración la estructura, ya que corresponde a la respuesta predominante.

Por lo tanto, la fuerza cortante en la base (conocida como cortante basal) producida por las fuerzas del rango elástico y plástico, se graficó con su respectivo desplazamiento; con lo cual se obtuvo la curva de capacidad y finalmente su equivalencia al SDOF. A través de este procedimiento, fue posible detallar los resultados obtenidos.

En lo referente a la modelación en el software SeismoStruct2021, el ingreso del tipo de material, secciones y armaduras se hizo de acuerdo a los resultados obtenidos del prediseño. Las columnas y vigas de hormigón armado se consideraron como elementos de marco inelástico de rótula plástica con formulación basada en fuerza (*infrmFB*), ya que los resultados son más precisos debido a que capturan el comportamiento inelástico a lo largo de toda la longitud del miembro estructural; pero el arriostre se consideró como un elemento tipo *truss* pues es la clase correspondiente al componente que actúa como diagonal rigidizador. Por otro lado, todo el pórtico se plasmó como un diafragma rígido de modo que todos los nodos del mismo nivel se desplazaron por igual, pero con un desplazamiento máximo en la cima de 0.2m. Finalmente, las condiciones de carga se estudiaron para la totalidad de la carga muerta pero únicamente el 25%

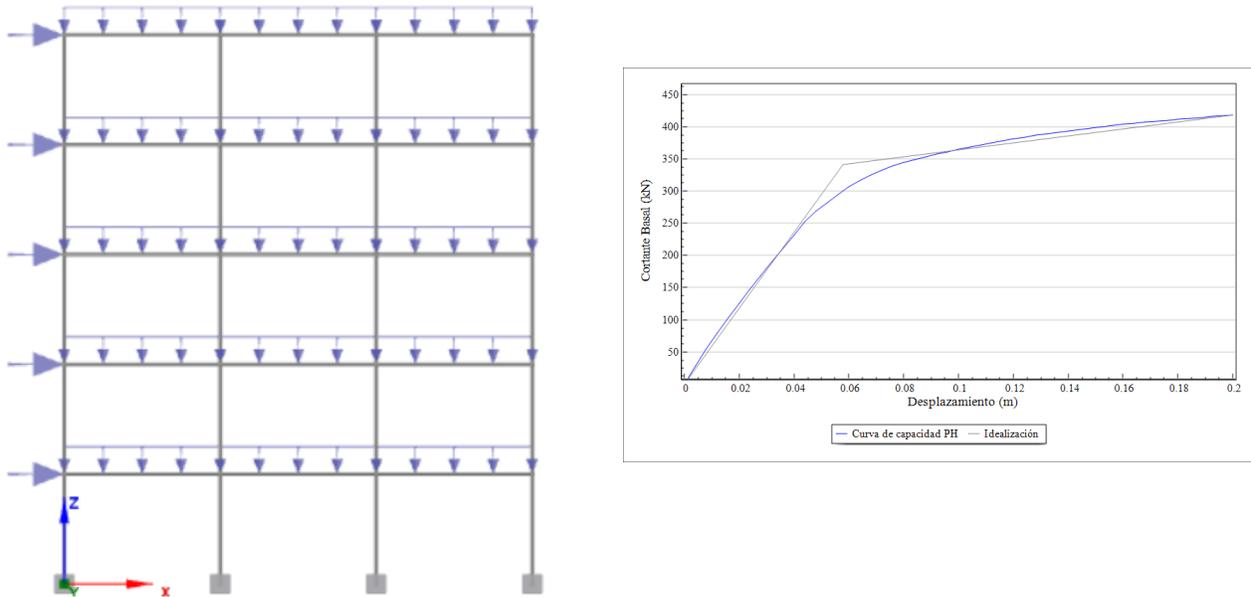
de la carga viva como lo recomienda una investigación realizada en el 2018 en la Universidad de Massachusetts (Taghinezhad et al., 2018).

## Resultados y discusión

El PH y el PHAC fueron modelados tanto en SEISMOSTRUCT2021 como en SAP2000V22 con el fin de calibrar el ensayo y exponer conclusiones apropiadas de la investigación, ya que al tratarse de un software de poco uso en el medio un incorrecto proceder podría haber conllevado a desenlaces erróneos. Sin embargo, los resultados que se exponen corresponden a los obtenidos directamente del software SeismoStruct2021.

Por otro lado, al ejecutar el modelo del PH de modo que simule los efectos producidos por un sismo en la ciudad de Cuenca en un suelo tipo D y que muestre la capacidad del pórtico de acuerdo a un patrón de distribución de cargas laterales representado en la forma del primer modo de vibración, tal como lo especifica la normativa ecuatoriana vigente, la curva de cortante basal – desplazamiento es la siguiente:

**Figura 6** Idealización del PH y curva de capacidad, (Autor).

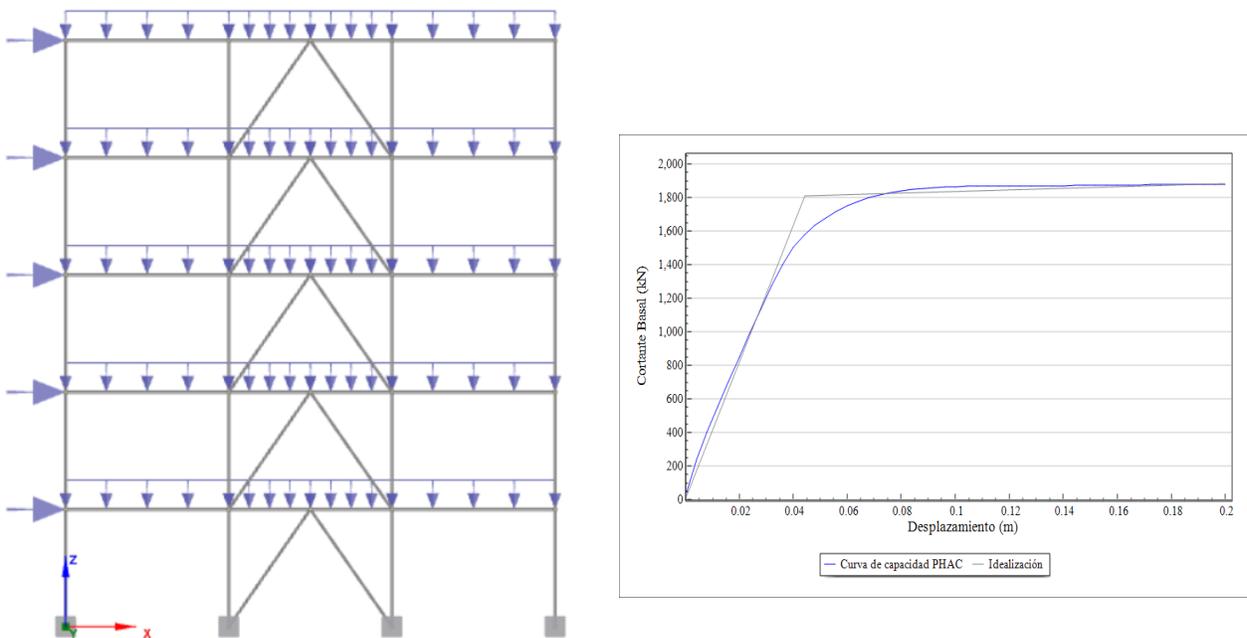


En la cual, en el eje de las abscisas se tiene el desplazamiento lateral del marco medido en el nodo de control que se encuentra ubicado en el último piso y en el eje de las ordenadas se muestran valores del cortante en la base. Además, el área bajo la curva corresponde a la cantidad de energía que es capaz de disipar el pórtico durante la acción de un sismo.

Inicialmente, la curva muestra una tendencia lineal que pertenece a la sección elástica que aún no experimenta ninguna pérdida de rigidez. Posteriormente, la edificación incursiona en el rango no lineal en donde puede haber degradación de la rigidez, sin embargo, dentro de la condición impuesta para el análisis que es 20cm de desplazamiento lateral máximo a analizar (por las características geométricas y sus propiedades), no se observa que el marco sufra una pérdida importante de resistencia que haga que el marco falle leve, moderada o severamente.

Por otro lado, al incorporar un elemento estructural A36 al marco y modelarlo en las mismas características físicas y geométricas que el pórtico simple, se obtuvo la siguiente curva de capacidad:

**Figura 7** Idealización del PHAC y curva de capacidad, (Autor).



La curva obtenida del pórtico con arriostramiento se distingue por el hecho de que presenta una gráfica lineal dentro del rango elástico (comportamiento esperado y semejante al del pórtico simple), pero una vez que ha pasado ese límite tiene se observa una tendencia lineal sin mayores cambios, a diferencia del PH que experimenta un incremento leve en su curvatura, es decir que su idealización es ligeramente estable.

Adicionalmente, es notable que ambos modelos poseen un umbral elástico que concluye en el mismo desplazamiento lateral del último piso, de aproximadamente 4cm. No obstante, al contrastar los resultados entre los dos marcos se puede mencionar que el PHAC presenta un cortante en la base de 1502kN aproximadamente, mientras que el pórtico simple 232kN, es decir que existe un incremento importante en la resistencia lateral del marco arriostrado, de alrededor de 6 veces más en el pórtico que posee el arriostramiento. Cifra importante a considerar para el reforzamiento de edificaciones que presentan fallas estructurales ocasionados por fenómenos sísmicos ocurridos anteriormente o para construcciones nuevas que buscan la eficiencia en los miembros que lo conforman.

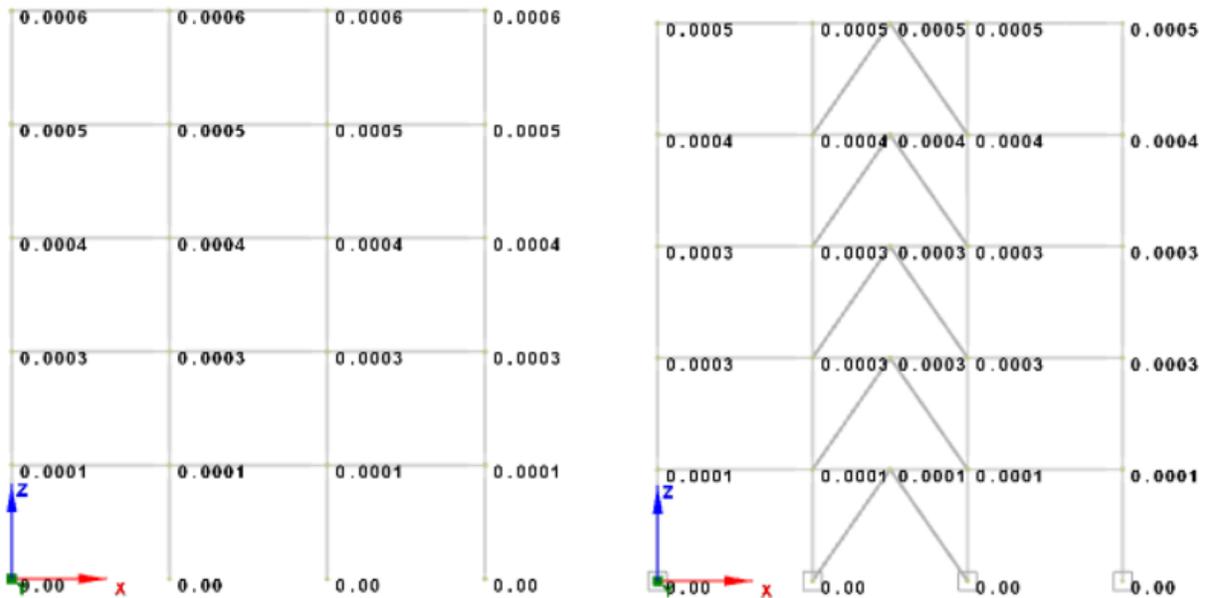
En lo que respecta a la cantidad de energía que liberan los marcos durante un evento sísmico, se determinaron los valores correspondientes aproximados de acuerdo al método de los trapecios. Es así que, el pórtico con arriostramiento concéntrico disipa 5 veces más energía que el pórtico sencillo, es decir que se reduce considerablemente los esfuerzos y deformaciones en el marco arriostrado, disminuyendo así su daño ya que su incursión en el rango inelástico se ve limitada.

Entonces, se puede observar claramente que el marco arriostrado posee una curva de capacidad cuya respuesta máxima de la estructura ante la acción sísmica es mucho mayor que la del marco simple; es decir que la capacidad de absorción de los efectos que producen las cargas laterales que simulan la acción de un sismo es altamente eficiente. Este hecho concuerda con los resultados obtenidos por Maheri & Sahebi en 1997 (M. R. Maheri & Sahebi, 1997), ya que ellos comprobaron que existe un incremento en la resistencia al corte de hasta tres veces más al usar diagonales en X; claro que, si bien en este estudio no se están incorporando secciones o configuraciones de las riostras parecidas o iguales, el resultado como se puede notar, sigue una misma tendencia.

En cuanto a los límites permisibles de las derivas inelásticas de pisos, en la NEC2015 – Peligro Sísmico literal 4.2.2 consta que el límite permisible de la deriva de piso para una estructura de

hormigón armado es el 2% de la altura de piso. Con este antecedente, los resultados de desplazamientos fueron los siguientes:

**Figura 8** Desplazamiento por piso del PH y del PHAC, (Autor)



*Dimensiones en (m)*

A partir de estos resultados se puede definir la deriva de entrepiso como la diferencia del desplazamiento entre el piso superior y el inmediato inferior. Es así que, de acuerdo a la norma y con referencia a la altura de entrepiso del marco de 3.6m, la deriva máxima por piso debería ser de 7.2cm. No obstante, en los modelos estudiados no se presentan valores superiores de las derivas ya que el pórtico simple fue diseñado a momento para resistir la carga sísmica y por ende la deriva no debe ser superior a la restricción. Sin embargo, el desplazamiento en el marco sin arriostrar es sutilmente menor comparado con el pórtico arriostrado. Este resultado se ajusta a lo detectado en (Sukrawa, 2017), pues refiere que el uso de diagonales proporciona deformaciones más pequeñas al aplicar carga por sismo, lo cual está directamente relacionado con el desplazamiento lateral de la estructura.

## Conclusiones

De los resultados obtenidos se verifica el hecho de que existe un considerable incremento de la capacidad del pórtico de hormigón con arriostramiento de acero, ya que el PH por sí solo posee un cortante basal mucho menor que el PHAC al ser analizado en el mismo desplazamiento, tal como lo manifiestan investigaciones anteriores (Bush et al., 1991; M. Maheri et al., 2003; M. R. Maheri & Sahebi, 1997).

Por otro lado, en cuanto al desplazamiento por piso se observó que en los dos primeros pisos ambos pórticos se desplazan por igual, pero a partir del tercer nivel el PH tiene un ligero crecimiento comparado con el pórtico arriostrado; sin embargo, ambos poseen una deriva aceptable de acuerdo a los parámetros establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC15. Esto concuerda con una investigación realizada en el 2016, en donde el uso de diagonales en edificios existentes de hormigón armado proporcionó desplazamientos significativamente más pequeños (Sukrawa, 2017).

Con esto, se verifica también el hecho de que un arriostramiento en los primeros niveles no aporta significativamente como lo hace en los pisos superiores (Abou-Elfath & Ghobarah, 2011). En cuanto al software utilizado (SEISMOSTRUCT), es una herramienta computacional con una interfaz amigable que logra resultados veraces, ajustados al comportamiento real que experimenta una estructura al someterse a efectos sísmicos. El inconveniente que se tuvo fue la escasa información existente sobre el manejo y manual de funcionamiento del programa, pero al comparar los resultados de la modelación con un software más común como lo es SAP2000 se puede validar la veracidad del sistema, por lo que su uso se muestra como una alternativa viable para el análisis del comportamiento de una estructura.

En lo referente a la conexión, se consideró una junta a momento sin mayor detallamiento ya que el programa no permite efectuar un estudio demasiado profundo en este ámbito. Por lo que, si se desea obtener conclusiones más minuciosas se deberá trabajar con un software diferente, que tenga la capacidad de realizar ese tipo de análisis.

## Agradecimientos:

Mi más sincero agradecimiento al Ing. Fernando Cañizares, tutor de este trabajo, por su apoyo, esfuerzo y tiempo dedicado a esta investigación. A mis padres, hermanos y a mi futuro esposo por el gran amor que siempre me dan, que me impulsa a superarme y ser mejor persona.

## Referencias

1. Abou-Elfath, H., & Ghobarah, A. (2011). Behaviour of reinforced concrete frames rehabilitated with concentric steel bracing. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27, 433–444. <https://doi.org/10.1139/cjce-27-3-433>
2. Aristizabal-Ochoa, J. D. (1986). Disposable Knee Bracing: Improvement in Seismic Design of Steel Frames. *Journal of Structural Engineering*, 112(7), 1544–1552. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1986\)112:7\(1544\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1986)112:7(1544))
3. Badoux, M., & Jirsa, J. (1990). Steel Bracing of RC Frames for Seismic Retrofitting. *Journal of Structural Engineering*, 116(1), 55–74. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1990\)116:1\(55\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:1(55))
4. Bruneau, M., Uang, C.-Ming., & Sabelli, Rafael. (2011). *Ductile design of steel structures*. McGraw-Hill, New York, United States, ISBN: 9780071623957.
5. Burak, Y., Erkut, S., & Onur, O. (2017). *Earthquakes and Structural Damages*. INTECH. <https://doi.org/10.5772/65425>
6. Bush, T. D., Jones, E. A., & Jirsa, J. O. (1991). Behavior of RC frame strengthened using structural steel bracing. *Journal of Structural Engineering (United States)*, 117(4), 1115–1126. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:4\(1115\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:4(1115))
7. CNN Latioamérica. (2017). A un año de la tragedia que sacudió Ecuador: ¿qué ha pasado desde el terremoto?
8. Córdova, F. (2014). *Estudio Comparativo del Sistema Constructivo en Hormigón y Acero, en un edificio*. Universidad de Cuenca.
9. Department of Homeland Security, F. E. M. A. (2005). *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures* (pp. 2–4). Washington, DC.
10. El Mercurio. (2019). Constructores propondrán ordenanza para vigilar calidad en sismorresistencia.
11. Filiatrault, A., Tremblay, R., Christopoulos, C., Folz, B., & Pettinga, D. (2013). *Elements of Earthquake Engineering and Structural Dynamics (Third edit)*. Presses internationales Polytechniques, Montréal, Canadá, ISBN: 9782553016493.
12. Godínez-Domínguez, E. A., & Tena-Colunga, A. (2019). Behavior of ductile steel X-braced RC frames in seismic zones. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 18(4), 845–869. <https://doi.org/10.1007/s11803-019-0539-0>

13. Guzmán, A. (2008). Políticas de Vivienda en el Ecuador y su Evolución. *Revista de Arquitectura: Vivienda Social y Desarrollo*, 13–17.
14. Higashi, Y., Endo, T., & Shimizu, Y. (1981). Experimental studies on retrofitting of reinforced concrete structural members (pp. 126–155). National Science Foundation.
15. Hu, Y. X., Liu, S. C., & Dong, W. (1996). *Earthquake Engineering (First edit)*. E & FN Spon, London, Great Britain, ISBN: 041920590X.
16. Jain, A. K. (1985). Seismic response of RC frames with steel brace. *Journal of Structural Engineering*, 111(10), 2138–2148. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:10\(2138\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:10(2138))
17. Lara, R., Rodriguez, M., & Larco, J. (2020). A real-time microearthquakes-detector based on voice activity detection and endpoint detection: An approach to Cotopaxi Volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 400, 106867. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106867>
18. Maheri, M., Kousari, R., & Razazan, M. (2003). Pushover tests on steel X-braced and knee-braced RC frames. *Engineering Structures*, 25, 1697–1705. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00150-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00150-0)
19. Maheri, M. R., & Akbari, R. (2003). Seismic behaviour factor, R, for steel X-braced and knee-braced RC buildings. *Engineering Structures*, 25(12), 1505–1513. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00117-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00117-2)
20. Maheri, M. R., & Hadjipour, A. (2003). Experimental investigation and design of steel brace connection to RC frame. *Engineering Structures*, 25, 1707–1714. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00162-7](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00162-7)
21. Maheri, M. R., & Sahebi, A. (1997). Use of steel bracing in reinforced concrete frames. *Engineering Structures*, 19(12), 1018–1024. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00041-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00041-2)
22. Massumi, A., & Absalan, M. (2013). Interaction between bracing system and moment resisting frame in braced RC frames. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 13(2), 260–268. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.01.004>
23. Massumi, A., & Tasnimi, A. A. (2008). Strengthening of low ductile reinforced concrete frames using steel x-bracings with different details. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China*.

24. Michael, N., Shen, S., Mohta, K., Kumar, V., Nagatani, K., Okada, Y., Kiribayashi, S., Otake, K., Yoshida, K., Ohno, K., Takeuchi, E., & Tadokoro, S. (2014). Collaborative Mapping of an Earthquake Damaged Building via Ground and Aerial Robots. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 92, 33–47. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-40686-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-40686-7_3)
25. Nakashima, M., Inoue, K., & Tada, M. (1998). Classification of damage to steel buildings observed in the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake. *Engineering Structures*, 20(4), 271–281. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00019-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00019-9)
26. Ozelik, R., Binici, B., & Kurç, O. (2012). Pseudo Dynamic Testing of an RC Frame Retrofitted with Chevron Braces. *Journal of Earthquake Engineering*, 16(4), 515–539. <https://doi.org/10.1080/13632469.2011.653297>
27. Quezada, R., Aguilar, E., & García, H. (2019). Macro-modeling of Adobe Piers for Seismic Analysis of Adobe Dwellings in Cuenca, Ecuador: An Interdisciplinary Approach. In *RILEM Bookseries* (pp. 1328–1336). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3\\_142](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3_142)
28. Rahimi, A., & Maheri, M. (2020). The effects of steel X-brace retrofitting of RC frames on the seismic performance of frames and their elements. *Engineering Structures*, 206, 110149. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110149>
29. Redacción BBC Mundo. (2016). Terremoto de magnitud 7,8 en la zona costera de Ecuador deja más de 600 muertos.
30. Saatcioglu, M. (2013). Structural damage caused by earthquakes. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, 947–959.
31. Safarizki, H. A., Kristiawan, S. A., & Basuki, A. (2013). Evaluation of the Use of Steel Bracing to Improve Seismic Performance of Reinforced Concrete Building. *Procedia Engineering*, 54, 447–456. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.040>
32. Sen, A. D., Roeder, C. W., Berman, J. W., Lehman, D. E., Li, C.-H., Wu, A.-C., & Tsai, K.-C. (2016). Experimental Investigation of Chevron Concentrically Braced Frames with Yielding Beams. *Journal of Structural Engineering*, 142(12), 4016123. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001597](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001597)
33. Setyowulan, D., Susanti, L., & Wijaya, M. N. (2020). Study on the behavior of a one way eccentric braced frame under lateral load. *Asian Journal of Civil Engineering*, 21(4), 733–739. <https://doi.org/10.1007/s42107-020-00234-2>

34. Sugano, S., & Endo, T. (1983). Seismic strengthening of reinforced concrete buildings in Japan (pp. 371–378). *Int. Assoc. for Bridge and Struct. Engrg. IABSE*.
35. Sukrawa, M. (2017). Staged Analysis of RC Frame Retrofitted with Steel Braces in Low and Medium-rise Buildings. *Procedia Engineering*, 171, 1002–1009. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.433>
36. Taghinezhad, R., Taghinezhad, A., MahdaviFar, V., & Soltangharaei, V. (2018). Evaluation of Story Drift under Pushover Analysis in Reinforced Concrete Moment Frames. *International Journal of Research and Engineering*, 5, 296–302.
37. TahamouliRoudsari, M., Entezari, A., Hadidi, M., & Gandomian, O. (2017). Experimental Assessment of Retrofitted RC Frames With Different Steel Braces. *Structures*, 11, 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2017.06.003>
38. Takeda, Toshikazu., Sozen, M. A., & Nielsen, N. Norby. (1970). Reinforced concrete response to simulated earthquakes. *American Society of Civil Engineers*.
39. Titiksh, A., & Gupta, M. (2015). A Study of the Various Structural Framing Systems Subjected to Seismic Loads. *SSRG International Journal of Civil Engineering*, 2(4), 23–30. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2167.1127>
40. Yang, P., & Wang, Y. (2000). A study on improvement of pushover analysis.