

Comparativo técnico económico entre pórticos especiales a momento de hormigón armado y acero estructural empleando las normativas ACI 318 19, AISC 341 16, AISC 360 22 Y NEC SE DS 2015

Andrés Rafael Abril Camino¹

aabril0402@pucesm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1342-2651>

Pontificia Universidad Católica del Ecuador,
Universidad San Francisco de Quito,
Universidad Técnica de Ambato
Ambato, Quito - Ecuador

Daniel Eduardo Abril Camino

dabrilc@estud.usfq.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0008-7453-7501>

Pontificia Universidad Católica del Ecuador,
Universidad San Francisco de Quito, Universidad
Técnica de Ambato
Ambato, Quito - Ecuador

Clara Estefanía Cadena Naranjo

ecadena@paloalto.com.ec

<https://orcid.org/0009-0005-1591-1637>

Pontificia Universidad Católica del Ecuador,
Universidad San Francisco de Quito,
Universidad Técnica de Ambato
Ambato, Quito - Ecuador

Ruth Lorena Pérez Maldonado

rlperez@uta.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0003-2317-3529>

Pontificia Universidad Católica del Ecuador,
Universidad San Francisco de Quito, Universidad
Técnica de Ambato
Ambato, Quito - Ecuador

RESUMEN

La interrogante frente a que material estructural es más económico hormigón armado o acero, es un cuestionamiento que ha estado en de discusión durante años por diversos ingenieros civiles, el presente artículo considera un sistema estructural (Pórticos Especiales a Momento) y los analiza en 18 arquetipos, 9 en acero y 9 en hormigón armado, variando alturas, números de niveles y distancia entre ejes (crújías). Buscando solventar la interrogante para el sistema estructural planteado. Se analiza mediante un enfoque sismo resistente considerando las especificaciones de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, American Concrete Institute, y American Institute of Steel Construction. Donde los 18 arquetipos son estructuras dúctiles, sismos resistentes y cumplen con lo dispuesto en la normativa. Partiendo del diseño sismo resistente se analiza el costo constructivo de los elementos estructurales, tras culminar la presente investigación se ha determinado qué material es más económico en edificios de mediana y baja altura.

Palabras clave: pórticos especiales a momento; acero estructural; hormigón; análisis de precios.

¹ Autor Principal

Technical-economic comparison between special frames at moment of reinforced concrete and structural steel using the ACI 318 19, AISC 341 16, AISC 360 22 and NEC SE DS 2015 standards

ABSTRACT

The question about which material is more economic between reinforced concrete or steel, is an inquiry that have been o discussion for many civil engineers. The current research considers Special Moment Frames as a structural system and analyses 18 architypes, 9 in steel and 9 in reinforced concrete, varying heights, story levels and axes distance. Looking for answering the question for the structural system analyzed. It analyses using an earthquake resistant approach considering the specifications stipulated on Ecuadorian Construction Norm, American Concrete Institute, y American Institute of Steel Construction. American Concrete Institute, y American Institute of Steel Construction. By the way the 18 architypes are ductile structures, earthquake resistant and achieve the regulations claimed on de codes. Finally, staring off seism design the structural frames cost is analyzed, after finishing the current research it has determined which material is cheaper in medium height buildings and low height buildings.

Keywords: special moment frames; structural steel; concrete; cost analysis.

Artículo recibido 01 abril 2023

Aceptado para publicación: 15 abril 2023

INTRODUCCIÓN

Los países que se encuentran en el cinturón de fuego del pacífico deben requerir un diseño sismo resistente, por lo que pórticos gravitacionales, como los pórticos ordinarios a momento no deben ser utilizados en sistemas dúctiles. En ciertos casos se pueden utilizar sistemas estructurales mixtos como con pórticos ordinarios a momento, los cuales son capaces de disipar energía sísmica en los nodos y producir la formación de rótulas plásticas por la acción de fuerzas laterales (sísmicas y de viento) en las vigas y columnas.

Se ha planteado usar pórticos especiales a momento en todo el plano tanto en acero como en hormigón armado para el presente caso de estudio, no se emplearán riostras ni muros o placas, por lo que las estructuras analizadas consideran solo vigas y columnas como elementos estructurales. Para la consideración y validación de los elementos estructurales se ha empleado normativas vigentes en toda la región como son el (American Concrete Institute) ACI 318 para hormigón armado, el AISC 360 como consideraciones de diseño fundamentales para elementos acero y el AISC 341 como recomendaciones de diseño sísmico. Todas en sus versiones más actuales. Dentro de las consideraciones sísmicas se emplean las establecidas en la Norma Ecuatoriana de la construcción, en el capítulo de diseño sismorresistente. El cuestionamiento sobre si es más económico una estructura en acero u hormigón armado es un tema que se ha planteado a lo largo de los años y la respuesta depende de muchos factores como el factor, geográfico, sistema estructural, tipo de cargas, pues no es lo mismo diseñar una estructura bajo cargas gravitacionales que bajo cargas sísmicas, la presente investigación considera un sistema estructural sismo resistente, para lo cual se analizan consideraciones de aceptación técnicas establecidas en normativas sismorresistentes, por lo que ambos sistemas serán capaces de disipar energía sísmica con derivas inelásticas menores al límite permisible, períodos de vibración aceptables, fuerzas cortantes, participaciones de masa, piso blando, piso débil y otras consideraciones sismo resistentes.

Una vez cumplidos con los requerimientos estructurales se da por válido el modelo y posterior a este hallazgo se realiza un análisis de precios unitarios de la estructura desde el nivel 0+00, considerando vigas y columnas, para el caso de losa se diferencia una en base a precios del mercado en Ecuador, el presente año de la investigación en dólares norte americanos. Escoger un determinado material

estructural es un cuestionamiento que tanto el diseñador como el contratante y el contratista se plantea en la fase previa del proyecto, dicha interrogante se genera como la prerrogativa a resolver en la presente investigación para pórticos especiales a momento tanto de acero estructural como de hormigón armado. Pese a ello la selección de un sistema estructural, no puede ir solamente al aspecto económico, puesto que el tiempo de construcción en acero es considerablemente más corto que otros sistemas estructurales. (Soto, 2018) Por lo que la decisión final deberá estar dado bajo un análisis global del contratante de un proyecto.

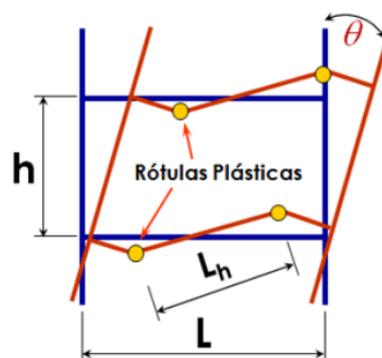
La limitación de la presente investigación es el sistema estructural planteado ya que, al emplear otro sistema estructural, PEAC (Pórticos Especiales Arriostrados Concéntricamente), PIM (Pórticos Intermedios a Momento) u otro sistema estructural requeriría su propio análisis siendo esta la base de una investigación más extensa para comparar y encontrar un sistema estructural más que puede tener una mejor optimización costo beneficio.

Pórticos Especiales a momento

Sistema estructural constituido por vigas y columnas el cual busca tener la característica de columna fuerte, viga débil y nudo rígido (Gosh & Taylor, 2021), es capaz de resistir esfuerzos a tensión, cortante, flexión, compresión y torsión. Tiene la capacidad de disipar fuerzas laterales producidas por sismos y viento. Para la formación de rótulas plásticas (deformaciones inelásticas) se busca que se de en vigas y columnas a una distancia de los extremos del nudo.

Figura 1:

Formación de rótulas plásticas en PEM



Fuente: (Eliud, 2019)

Análisis Lineal Modal Espectral

Analiza la respuesta de una estructura bajo un espectro de respuesta o de diseño, a partir de los modos de vibración de la estructura, partiendo de las formas modales de vibrar de la estructura, donde se obtienen frecuencias naturales y formas de vibrar propias de la estructura, posterior calcula la respuesta de la estructura a cargas laterales, finalmente combina la respuesta estructural por cada modo de vibración a través de la participación modal. (Ferrer Espinola & Mantilla Urcia, 2021) El análisis lineal teóricamente no supera el rango elástico, es decir su deformación se mantiene proporcional a su esfuerzo.

Consideraciones Sísmicas

La zona sísmica del Oeste del pacífico de América se encuentra en el cinturón de fuego del pacífico donde placas tectónicas se encuentran chocan entre sí, lo que origina actividad sísmica y volcánica. La extensión del anillo de fuego comprende desde la costa oeste de América del Norte hasta la costa este de Asia, pasando por América Central, Sudamérica, Nueva Zelanda y la región del Pacífico occidental. Por la fricción de las placas tectónicas, la acumulación y necesidad de que la misma sea disipada provoca en el suelo exprese como movimientos telúricos denominados sismos. Por lo que en dicha zona se han producido mayoría de los terremotos y erupciones volcánicas más poderosos en la historia.

La presente investigación ocupa consideraciones sísmicas a través del espectro de diseño concebido en la NEC SE DS y la verificación sísmica se dará además de en las fuerzas de diseño. En las derivas que provoquen el espectro deber ser menores al 2% para que el sistema se considere como sismo resistente. Adicionalmente se considera la fuerza lateral producida por el cortante basal la cual deberá ser calibrada en función del período modal de la estructura y las fuerzas laterales del espectro deberán ser más del 80% de la fuerza producida por el cortante basal las mismas también deberán ser menores al 2% en sus derivas inelásticas

Espectro de la NEC SE DS

Se analiza el factor de importancia según el tipo de estructura para estas estructuras se trata de estructuras de importancia igual a 1, la zona sísmica dependerá de la ubicación, el tipo de suelo según la velocidad ondas de corte, el tipo de estructura, y la relación de amplificación espectral según la NEC

SE DS. (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015). El resto de factores se toma de tablas o calcula mediante ecuaciones lineales establecidas en dicha normativa.

Tabla 1:

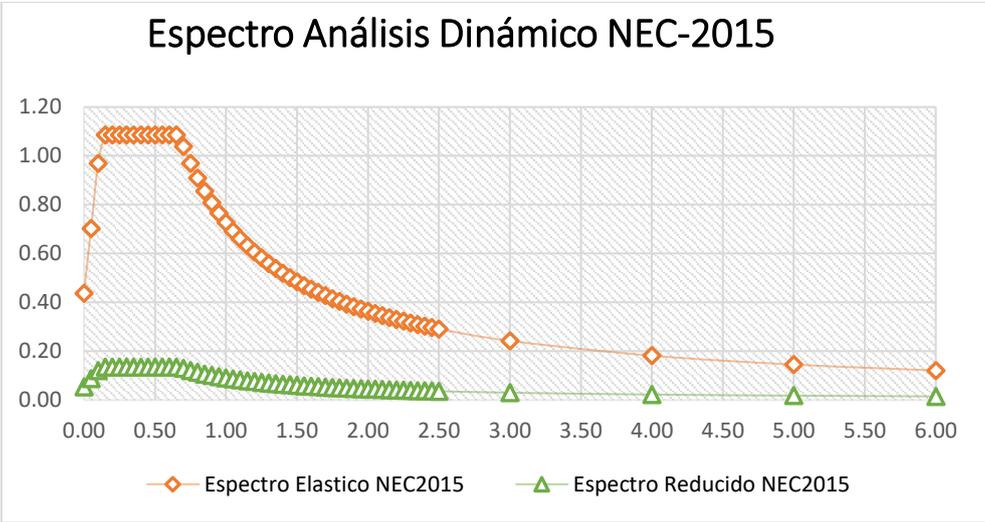
Parámetros para definir el espectro de diseño según la NEC SE DS 2015

PARÁMETROS PARA EL ESPECTRO DE DISEÑO DE LA NEC SE DS 2015		
Factor de importancia	I=	1.000
Categoría Sísmica	Zona Sísmica=	IV
Valor de factor Z	Z=	0.350
Perfil del Suelo	Suelo Tipo=	D
Coef. Amplificación del suelo en la zona de periodo corto	Fa=	1.250
Coef. Amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca	Fd=	1.280
Comportamiento no lineal de los suelos	Fs=	1.190
Factor usado en el espectro de diseño elástico	r=	1.000
relación de amplificación espectral	η =	2.480
Altura de la edificación en metros	hn=	7.000
Tipo Estructura	Pórticos Espaciales de H.A. sin rigidizadores	
Coeficiente que depende del tipo de edificio	Ct=	0.055
	α =	0.900
Periodo de Vibración Método 1	Ta CODIGO=	0.317
Periodo de Vibración Método 2	1.3 * Ta Código	0.412
Periodo Límite de Vibración	To=	0.122
Periodo de Vibración	Ta=	0.317
Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño	Tc=	0.670
Coeficiente relacionado con el período de vibración de la estructura T	k=	1.000
Aceleración Espectral	Sa(Ta)=	1.085
Coeficiente de Reducción de Respuesta Estructural	R=	8
Irregularidad en planta	Φ_P =	1.000
Irregularidad en elevación	Φ_E =	1.000
	V=	0.136

Fuente: Elaboración propia

El espectro está dado en función del tiempo y la aceleración en el eje de las X y en el eje de las Y la aceleración pseudo espectral, el mismo depende netamente de la zona sísmica, factores de suelo y ubicación, por lo que se mantiene como espectro base para todos los sistemas estructurales analizados.

Figura 2: Espectro Elástico y reducido de la NEC SE DS, empleados en el diseño sísmico



Fuente: Elaboración propia

Cada sistema estructural a sido calibrado en función de su altura y tipología estructural para la introducción de los factores de cortante basal propios de software, siendo estos pórticos de hormigón armado sin rigidizadores y pórticos de acero sin rigidizadores.

Tabla 2: Calibración del cortante basal según el período fundamental de la estructura

Cortante Basal Período NEC		Cortante Basal Período Máximo		Cortante Basal Período Software	
T	0.31692093	Tmax (1.3T)	0.411997213	Tmodal (s)	0.462
Sa (T)	1.085	Sa (Tmax)	1.085	Sa (Tmodal)	1.085
V	1.085	V (Tmax)	0.135625	V (Tmodal)	0.135625
k	1	k(max)	1	k(modal)	1
Wr	913.3	V min	99.09305		

Fuente: Elaboración propia

Análisis de precios unitarios

Se inicia de costos directos es decir los costos que toma en construir dicho rubro, un rubro es una tarea a un medible con una unidad cuantificable y medible, un rubro involucra materiales, equipos/materiales, la mano de obra, transporte y todo lo que involucre para lograr consolidar ese elemento (Castaño de la

Rosa, Solís-Guzman, Marrero, & Mercader-Moncayo, 2017) por ejemplo el hormigón se mide en m³ (metros cúbicos), el acero estructural en kg (kilogramos) y se determinará el costo por metro cúbico, en una construcción existirán decenas de m³, para este rubro necesitamos en materiales agua cemento, hormigón, ripio arena, relacionado con materiales; la mano de obra del personal trabajador y el costo hora que significa por m³, para determinar el costo de la mano de obra está en función de la legislación local así como en rendimiento (tiempo que conlleva realizar una tarea labora), en el caso de los equipos se necesitará concretera, dosificador, pala, manguera, baldes, parihuelas y concretera, se puede considerar e costo de llevar los materiales a la obra como transporte. Todos estos elementos representan el costo directo adicionalmente, se debe considerar los costos administrativos y de ganancia para el contratista denominados como costos indirectos. La suma de ambos costos se denomina como precio unitario (Cardona & Lopez, 2018).

Antecedentes

En la investigación denominada: “Análisis, diseño y evaluación sísmica de edificios altos de construcción compuesta y con arriostramientos de pandeo restringido” donde analizan Pórticos Resistentes a Momento Compuestos se establece tras un análisis no lineal tiempo historia y no lineal estático que en ambos casos los sistemas son capaces de disipar energía sísmica y tiene un adecuado desempeño sísmico en edificaciones de mediana y alta altura (Rojas, Barros, Aguaguña, & Herrera, 2016).

Dicha investigación da una visión sobre la factibilidad de diseño al haber analizado el desempeño estructural en pórticos especiales a momento lo que es una premisa de valor para el desarrollo de la presente investigación.

Al diseñar en acero se deben considerar una adecuada respuesta sísmica del sistema estructural dentro de las propiedades de la materia el límite de fluencia, propiedades mecánicas de las secciones resistencia a la tracción, dureza, tenacidad y resistencia última. Debido a los pocos sistemas estructurales de acero construidos en Cuba, se han establecido consideraciones y recomendaciones de diseño según el AISC con la metodología LRFD (Fuentes, González, Calderín, & Sánchez, 2018).

Un enfoque previo de la realidad latinoamericana es necesario ya que esto permite visualizar un contexto de como puede aportar a nivel latinoamericano, la presente investigación, considerando metodologías

de diseño, puesto que el AISC 360, permite.

La revista hormigón ya cero presenta un artículo donde se revisa construcciones en estructuras mixtas de acero y hormigón tanto en edificaciones como en puentes, mostrando opciones que pueden mejorar el comportamiento estructural de los mismos, así como el proceso constructivo. (Serrano & Martinez, 2021). El enfoque de dicha investigación sustenta la factibilidad de estructuras mixtas aportando las consideraciones mecánicas de cada material y es un punto de partida para continuar con un mayor análisis.

La búsqueda de una optimización estructural representa un desafío que se han planteado diversos calculistas y constructores, dependerá en gran parte del material y sistema estructural planteado establecer un sistema estructural único y definitivo no es posible este dependerá del requerimiento del usuario, ubicación geográfica, diseño arquitectónico, tiempo y plazos de construcción, entre otros factores necesarios para determinar cual es el sistema estructural más adecuado para ese proyecto en específico. Sin embargo, ciertos parámetros de optimización tal como lo estipula la investigación: Seismic design optimization of engineering structures: a comprehensive review estableciendo métodos útiles para la optimización y reducción de costos en sistemas estructurales. En la presente investigación se busca tener un enfoque práctico de una visión de formas ingenieriles prácticas (Zakian & Kaveh, 2023).

Antecedentes históricos

Uno de los materiales más estudiados en el desarrollo de estructuras en Ecuador es el material hormigón armado, sin embargo, existe gran intemperismo en el curado del material y la mano de obra suele trabajar muchas veces en lugares con contacto salino que pueden merar la calidad y durabilidad del hormigón armado en lugares costaneros. (Guerra, Puig, Castañeda, & Baque, 2023).

Ecuador predominante ha tenido marcados materiales de construcción a lo largo de los años sin embargo los materiales más relevantes son: hormigón, madera y adobe estructural. (Paez, Zabala, & Rodriguez, 2017).

El presente estudio hace referencia a los materiales de mayor demanda en Ecuador, debido a su alto grado de utilización y comercialización en el país latinoamericano.

En Ecuador existen 5 tipologías estructurales predominantes, según la clasificación de la metodología del FEMA P154 una de ellas es el de pórticos de concretos resistentes a momento. (Cunalata & Caiza, 2022) Por lo que su análisis en el ámbito local debe ser profundizado.

La sustentabilidad del acero es muy viable ya que existe formas de ser reutilizado, en ámbitos constructivos, existen formas de desmantelar las construcciones de acero y el mismo puede ser empleado en otras obras. Un estimado indica que la ponderación económica constructiva en hormigón es mayor que en acero. (Gervasio, 2014)

De la apreciación en este antecedente se puede decir que es un estimado referente a la aplicación en costos sin embargo no es recomendable partir de un estimado se deben trabajar con datos concretos.

Cabas García, muestra el desarrollo y las diversas posibilidades de construcción en sistemas estructurales y materiales siendo los más predominantes en la actualidad a nivel mundial el acero y el hormigón, así como la evolución y cambios que han acontecido como el paso del tiempo, el autor concluye que para el desarrollo económico de la ciudad se debería tener al menos un rasca cielos. (Cabas, 2011)

Hipótesis

Los pórticos especiales a momento de acero y de hormigón armado pueden tener un diseño sismo resistente capaz de disipar energía sísmica en estructuras de media y baja altura, sin embargo, uno de los dos sistemas estructurales representa un costo menor para el constructor.

Objetivos

- Comparar técnico económicamente entre pórticos especiales a momento de hormigón armado y acero estructural empleando las normativas ACI 318 19, AISC 341 16, AISC 360 22 Y NEC SE DS 2015.
- Realizar arquetipos que varían altura, distancia entre ejes, sismos resistentes que permitan que permitan comparar ambos materiales.
- Determinar que sistema estructural resulta más económico, al realizar un análisis de precios unitarios.
- Determinar características y propiedades geométricas que pueden afectar e influir en la selección de un sistema estructural.

METODOLOGÍA

Se trata de una investigación cuantitativa, los datos empleados se pueden determinar de manera numérica y contable, exploratoria buscando resolver el problema planteado en la investigación: ¿Cuál material: acero estructural u hormigón armado empleando el sistema estructural en pórticos especiales a momentos es más económico para un entorno Latinoamericano? empleando un diseño experimental, puesto que se tomarán partiendo de las muestras para resolver el problema analizando técnica y económicamente los datos, es decir como fuente de investigación.

La investigación considera mediante una muestra de 18 estructuras diseñadas, empleando las siguientes variaciones: número de pisos, sistema estructural y longitud de crujías, se han establecido: 3 vanos en dirección X y 4 vanos en dirección Y. Como se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 3: *Arquetipos empleados en el desarrollo del presente trabajo*

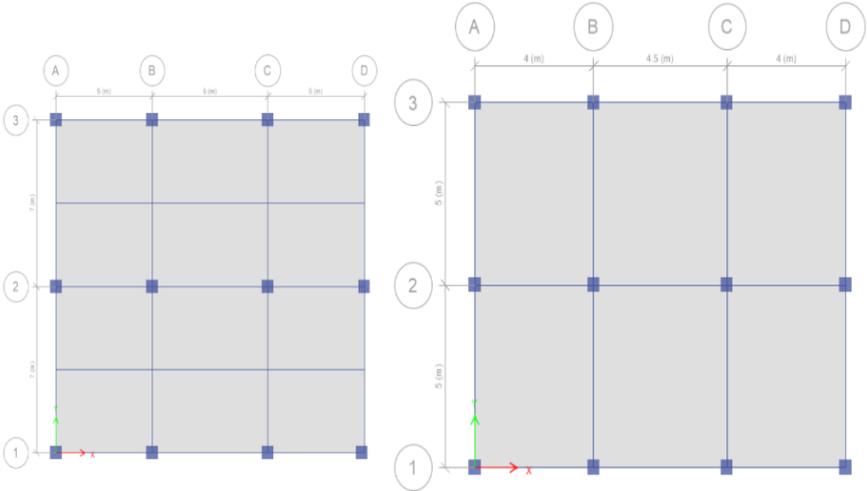
Arquetipos de pórticos especiales a momento				Grupos
Número de Pisos	N.	Sistema Estructural	Longitud de Vanos	
3 Pisos	1	H.A.	4-5 (mts)	G1
	2	Acero Estructural		
	3	H.A.	5-7 (mts)	G2
	4	Acero Estructural		
	5	H.A.	7-9 (mts)	G3
	6	Acero Estructural		
8 Pisos	7	H.A.	4-5 (mts)	G1
	8	Acero Estructural		
	9	H.A.	5-7 (mts)	G2
	10	Acero Estructural		
	11	H.A.	7-9 (mts)	G3
	12	Acero Estructural		
12 Pisos	13	H.A.	4-5 (mts)	G1
	14	Acero Estructural		
	15	H.A.	5-7 (mts)	G2
	16	Acero Estructural		
	17	H.A.	7-9 (mts)	G3
	18	Acero Estructural		

Fuente: Elaboración propia

Las estructuras han sido propuestas y diseñadas por los autores, como arquetipos para su análisis. Un diseño estructural empleando netamente un sistema de pórticos especiales a momento se pueden emplear en edificios de baja y mediana altura puesto que al superar los 15 pisos para buscar una optimización de costos es recomendable colocar riostras, o diafragmas verticales o rigidizadores diagonales.

Figura 3:

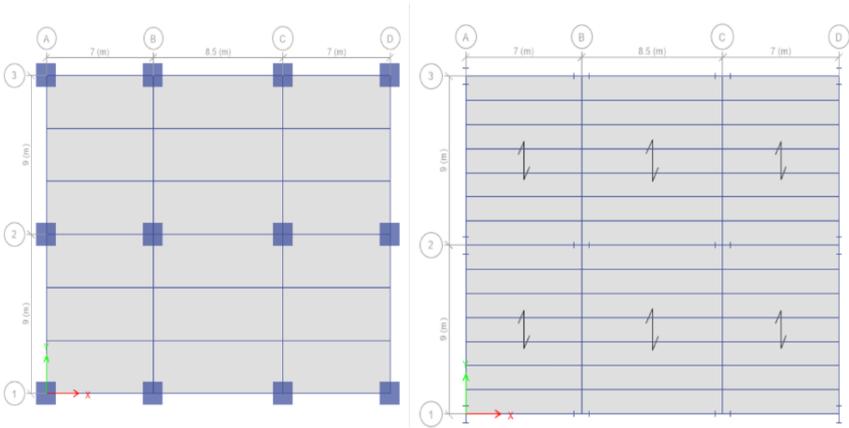
Configuración estructural en planta de las estructuras de 4 a 5 m. y de 5 a 7 m.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4:

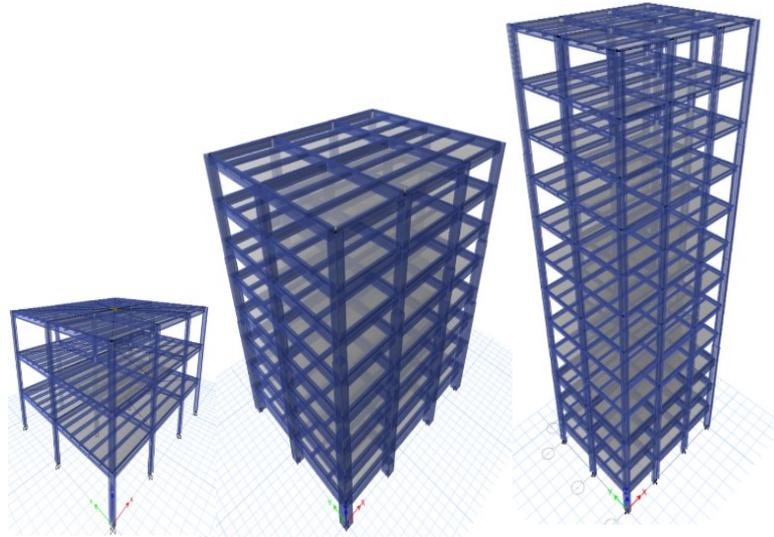
Configuración estructural en planta de las estructuras de hormigón armado y acero estructural de 7 a 9 m.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5:

Modelos estructurales de 3 niveles (acero), 8 (hormigón) y 12 pisos (acero)



Fuente: Elaboración propia

En la figura 5 se muestra los tres niveles empleados y ambos materiales: acero estructural y hormigón armado para edificios de baja y media altura en, por cada piso se han variado la distancia entre ejes en tres arquetipos por piso en tres alturas diferentes con dos materiales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis Técnico

Se ha realizado un análisis modal dinámico espectral lineal. Donde se han empleado 3 grados de libertad por piso mediante un análisis modal tipo eigel para garantizar una masa reactiva superior al 90%.

Se ha asignado cargas distribuidas de 200 kg/m^2 , para cargas de pared, y acabados de piso conocida como ACM (Adicional de Carga Muerta), Salvo al último piso que se prevé como losa inaccesible y de carga viva 200 kg/m^2 , en todos los pisos menos en el último piso, en la cual se ha asignado una carga viva de cubierta de 70 kg/m^2 . Esto según la normativa NEC SE CG 2015.

Para que el análisis espectral sea válido las fuerzas cortantes son mayores al 80% mínimo según lo estipulado en la Norma Ecuatoriana de la construcción.

Períodos

La norma ecuatoriana de la construcción define al período bajo la ecuación $T = C_t * h^n$, donde n es la relación espectral en función del estado, C_t depende del tipo de estructura y h es la altura del edificio en función de estos parámetros se han establecido 5 períodos admisibles para los 18 arquetipos. La altura del Grupo tres es mayor debido a la altura del peralte de las vigas, a mayor distancia ejes se establece un mayor peralte de vigas.

Tabla 4:

Períodos de vibración establecidos y períodos máximos por la NEC SE DS 2015

Altura (m)	N. Pisos	H.A		Acero		Grupos
		Ta (s)	T max (s)	Ta (s)	T max (s)	
9	3	0.397	0.517	0.417	0.543	G1&G2
10.5	3	0.456	0.593	0.472	0.614	G3
24	8	0.96	1.249	0.92	1.19	G1&G2
28	8	1.1	1.435	1.04	1.346	G3
36	12	1.38	1.799	1.27	1.646	G1&G2
42	12	1.59	2.066	1.43	1.862	G3

Fuente: Elaboración propia

Posterior a la modelación un parámetro sismo resistente intrínseco a la estructura es el período de vibración la NEC SE DS 2015, establece que el máximo permisible es $1,3 * C_t * h^n$. Adicionalmente se verifica que los dos primeros modos de vibración de la estructura se desplacen trasnacionalmente, para ello se aplica $R_z / \text{Max}(U_x, U_y) < 0.3$ (Medina Robalino & Medina Robalino, 2017). Esto se verifica para Acero estructural y hormigón armado

Tabla 5: *Período modal fundamental y segundo período modal de los arquetipos en H.A.*

Hormigón Armado						
Estructura	Mode	Period sec	UX	UY	RZ	Trasla/Rotac.
3P-G1	1	0.511	0	0.8405	0	Traslacional
	2	0.488	0.851	0	0	Traslacional
3P-G2	1	0.498	8E-06	0.8027	0.007	Traslacional
	2	0.412	0.823	4E-05	0.001	Traslacional
3P-G3	1	0.57	0	0.8074	1E-05	Traslacional
	2	0.507	0.822	0	1E-04	Traslacional
8P-G1	1	1.178	0	0.7234	0	Traslacional
	2	1.049	0.733	0	0	Traslacional
8P-G2	1	1.142	0	0.7059	6E-07	Traslacional
	2	0.963	0.716	0	0	Traslacional
8P-G3	1	1.218	0	0.6812	2E-06	Traslacional
	2	1.064	0.694	0	2E-05	Traslacional
12P-G1	1	1.413	0	0.6789	0	Traslacional
	2	1.24	0.687	0	0	Traslacional
12P-G2	1	1.275	0	0.6347	0	Traslacional
	2	1.064	0.642	0	3E-06	Traslacional
12P-G3	1	1.657	0	0.6561	2E-06	Traslacional
	2	1.4	0.664	0	2E-05	Traslacional

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6: Período modal fundamental y segundo período modal de los arquetipos en Acero.

Acero Estructural						
Estructura	Mode	Period	UX	UY	RZ	Trasla/Rotac.
		sec				
3P-G1	1	0.36	0	0.8438	0	Traslacional
	2	0.341	0.853	0	0.015	Traslacional
3P-G2	1	0.493	0	0.8207	0	Traslacional
	2	0.431	0.84	0	0	Traslacional
3P-G3	1	0.591	0	0.8193	3E-06	Traslacional
	2	0.515	0.821	0	1E-04	Traslacional
8P-G1	1	0.884	0	0.7445	0	Traslacional
	2	0.77	0.755	0	0	Traslacional
8P-G2	1	1.187	0	0.7043	1E-04	Traslacional
	2	0.988	0.71	0	0.002	Traslacional
8P-G3	1	1.218	0	0.6812	2E-06	Traslacional
	2	1.064	0.694	0	2E-05	Traslacional
12P-G1	1	1.359	0	0.5771	0	Traslacional
	2	1.165	0.58	0	0	Traslacional
12P-G2	1	1.445	0	0.6752	1E-06	Traslacional
	2	1.213	0.688	0	0.002	Traslacional
12P-G3	1	1.96	0	0.6972	3E-06	Traslacional
	2	1.675	0.708	0	1E-04	Traslacional

Fuente: Elaboración propia

Derivas.

La obtención de derivas elásticas se ha determinado mediante un software estructural, cotejando con el cortante basal y el espectro de diseño para el cálculo de derivas inelásticas a partir de las derivas elásticas se aplica la siguiente ecuación:

$$\Delta_I = 0.75 * R * \Delta_E$$

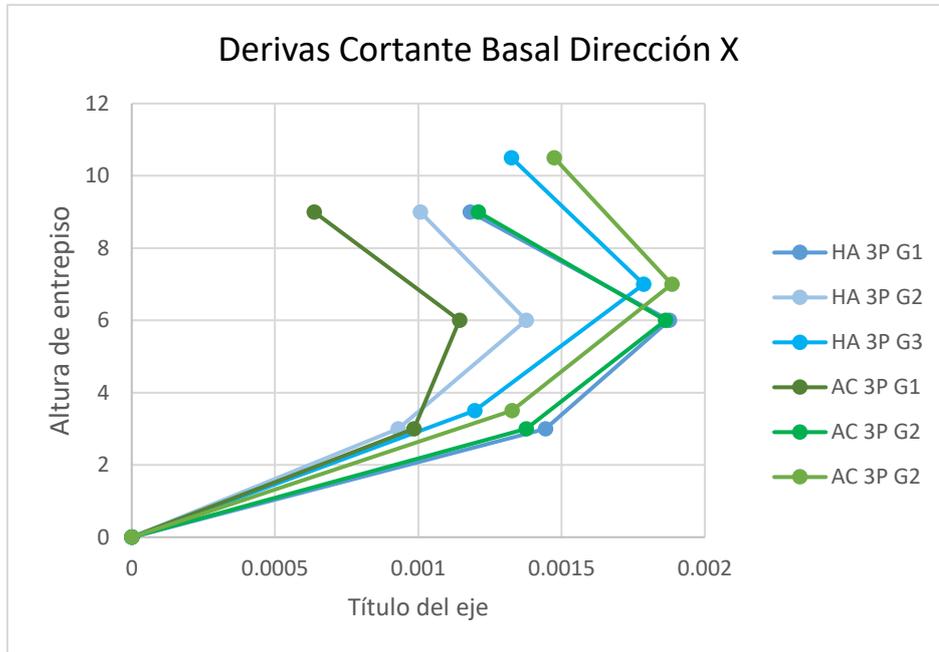
Donde Δ_E Es la deriva elástica y R es el factor de respuesta estructural

Se analizará la deriva inelástica máxima por piso de los 18 arquetipos considerando el sentido X, Y, del cortante basal, y el espectro de diseño bidireccional. Las derivas inelásticas para hormigón armado y acero estructural deben ser menor al 2%.

3 Pisos

Figura 7:

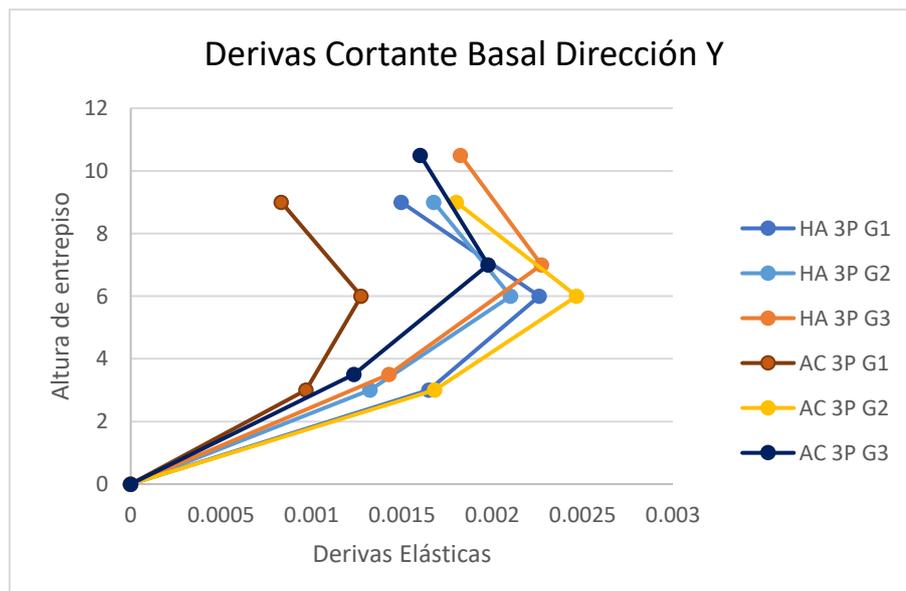
Derivas producidas por el cortante Basal X de arquetipos de H.A. y Acero en 3 niveles.



Fuente: Elaboración propia

Figura 8:

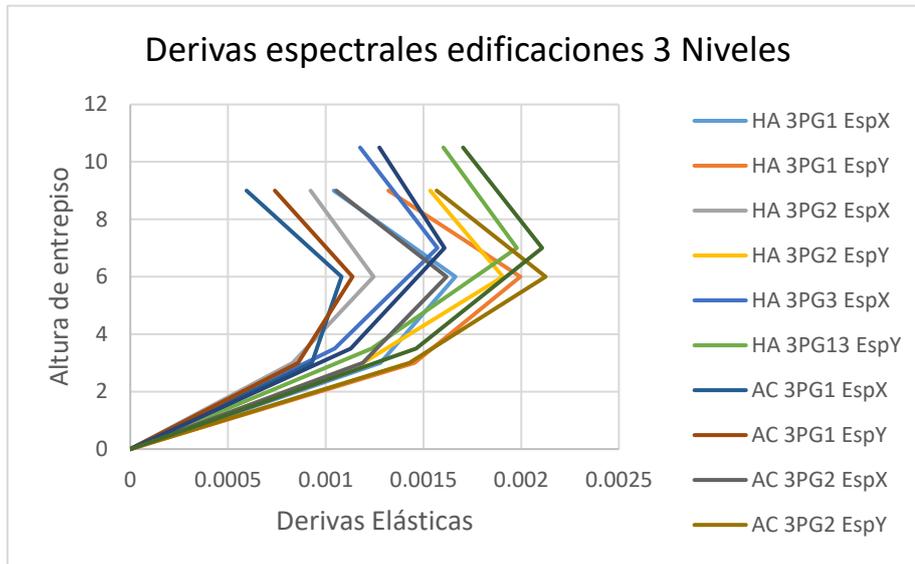
Derivas producidas por el cortante Basal X de arquetipos de H.A. y Acero en 3 niveles.



Fuente: Elaboración propia

Figura 9:

Derivas producidas por el Espectro (X,Y) de arquetipos de H.A. y Acero en 3 niveles.



Fuente: Elaboración propia

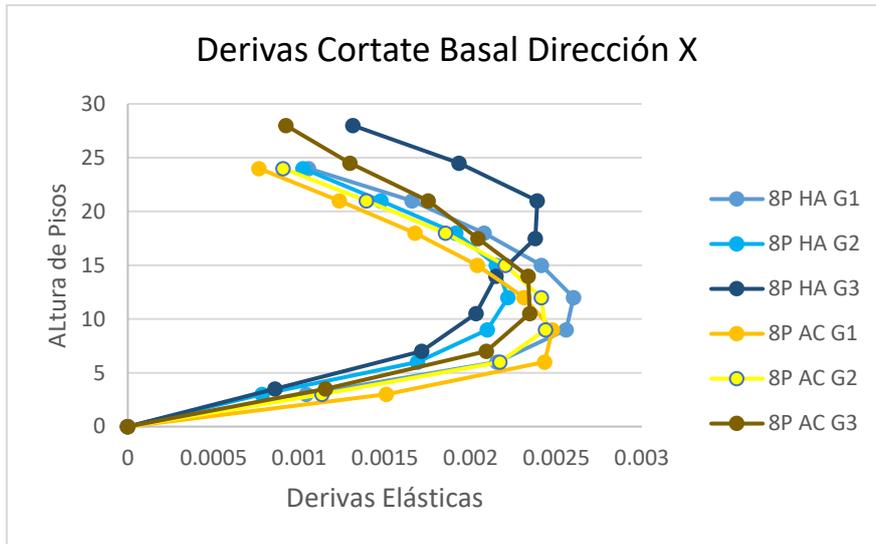
Tabla 8: *Derivas elásticas e inelásticas máximas en 3 niveles en arquetipos de Acero y Hormigón Armado.*

3 Niveles								
Grupo	Altura	Der. Inelástica	Der. Elástica		Grupo	Altura	Der. Inelástica	Der. Elástica
HA Sx					AC Sx			
G1	6	0.00187576	1.13%		G1	6	0.001143699	0.69%
G2	6	0.00137645	0.83%		G2	6	0.001862939	1.12%
G3	7	0.00178659	1.07%		G3	7	0.001884596	1.13%
HA Sy					AC Sy			
G1	6	0.0022607	1.36%		G1	6	0.001275462	0.77%
G2	6	0.0021025	1.26%		G2	6	0.002467504	1.48%
G3	7	0.00227249	1.36%		G3	7	0.001977834	1.19%
H.A. Espect X					Acero Espect X			
G1	6	0.00166354	1.00%		G1	6	0.001081099	0.65%
G2	6	0.00124481	0.75%		G2	6	0.001618174	0.97%
G3	7	0.00157165	0.94%		G3	7	0.001607721	0.96%
H.A. Espect Y					Acero Espect Y			
G1	6	0.00199595	1.20%		G1	6	0.001137139	0.68%
G2	6	0.00190678	1.14%		G2	6	0.00212511	1.28%
G3	7	0.00197783	1.19%		G3	7	0.002107305	1.26%

Fuente: Elaboración propia

8 Niveles

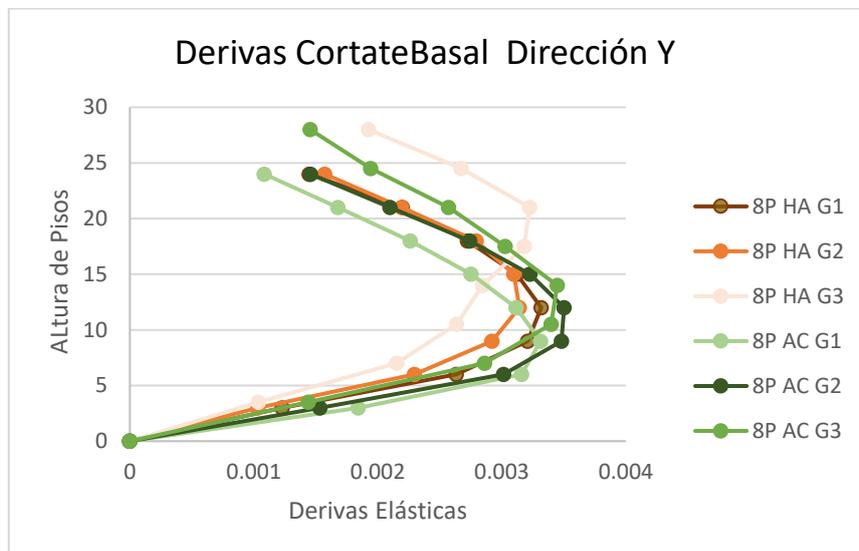
Figura 10: Derivas producidas por el cortante Basal X de arquetipos de H.A. y Acero en 8 niveles.



Fuente: Elaboración propia

Figura 11:

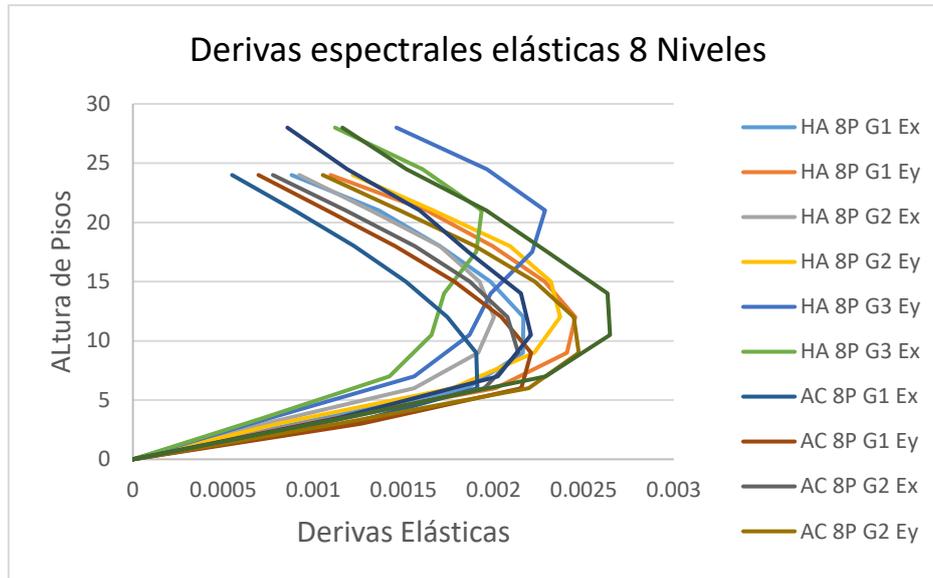
Derivas producidas por el cortante Basal Y de arquetipos de H.A. y Acero en 8 niveles.



Fuente: Elaboración propia

Figura 12:

Derivas producidas por el Espectro (X,Y) de arquetipos de H.A. y Acero en 8 niveles.



Fuente: Elaboración propia

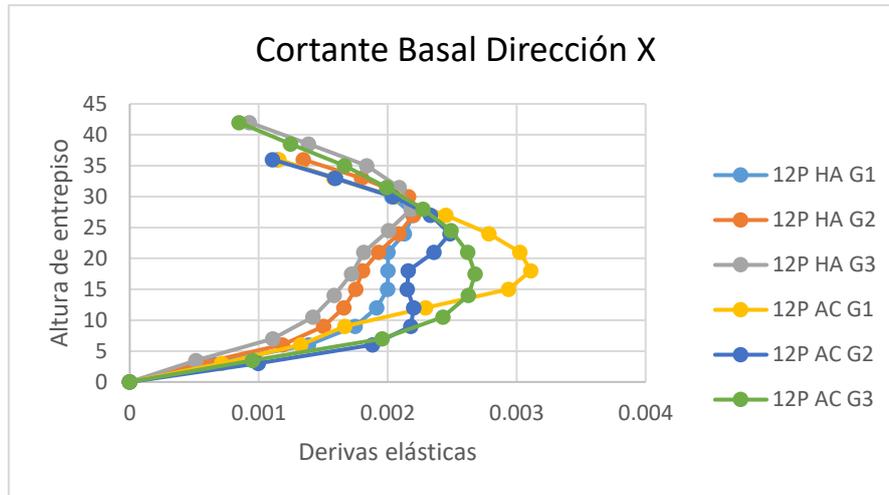
Tabla 9: *Derivas elásticas e inelásticas máximas en 8 niveles en arquetipos de Acero y Hormigón Armado.*

8 Niveles								
Grupo	Altura	Der. Inelástica	Der. Elástica		Grupo	Altura	Der. Inelástica	Der. Elástica
HA Sx					AC Sx			
Grupo	Altura	Der. Inelástica	Der. Elástica		Grupo	Altura	Der. Inelástica	Der. Elástica
G1	12	0.00260112	1.56%		G1	9	0.002478091	1.49%
G2	12	0.00221889	1.33%		G2	9	0.002438283	1.46%
G3	21	0.00239021	1.434%		G3	10.5	0.002346064	1.41%
HA Sy					AC Sy			
G1	12	0.00331816	1.99%		G1	9	0.003312401	1.99%
G2	12	0.00314224	1.89%		G2	12	0.00350252	1.58%
G3	21	0.00322574	1.94%		G3	14	0.003446664	1.55%
H.A. Espect X					Acero Espect X			
G1	12	0.00216587	1.30%		G1	9	0.001904267	1.14%
G2	12	0.00200269	1.20%		G2	9	0.002136935	1.28%
G3	17.5	0.00190353	1.14%		G3	10.5	0.002207545	1.32%
H.A. Espect Y					Acero Espect Y			
G1	12	0.00245372	1.47%		G1	9	0.002208643	1.33%
G2	12	0.00236979	1.42%		G2	9	0.002472866	1.48%
G3	17.5	0.0022153	1.33%		G3	10.5	0.002646255	1.59%

Fuente: Elaboración propia

12 niveles

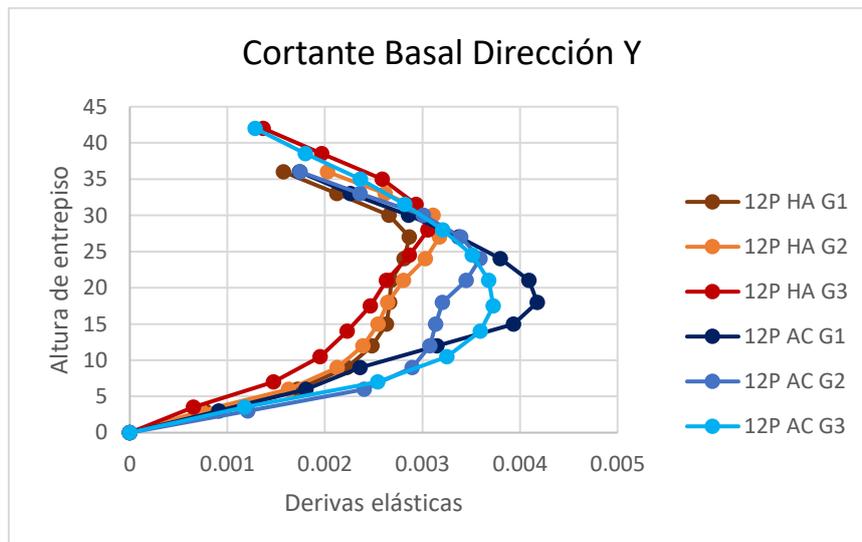
Figura 13: Derivas producidas por el cortante Basal X de arquetipos de H.A. y Acero en 12 niveles.



Fuente: Elaboración propia

Figura 14:

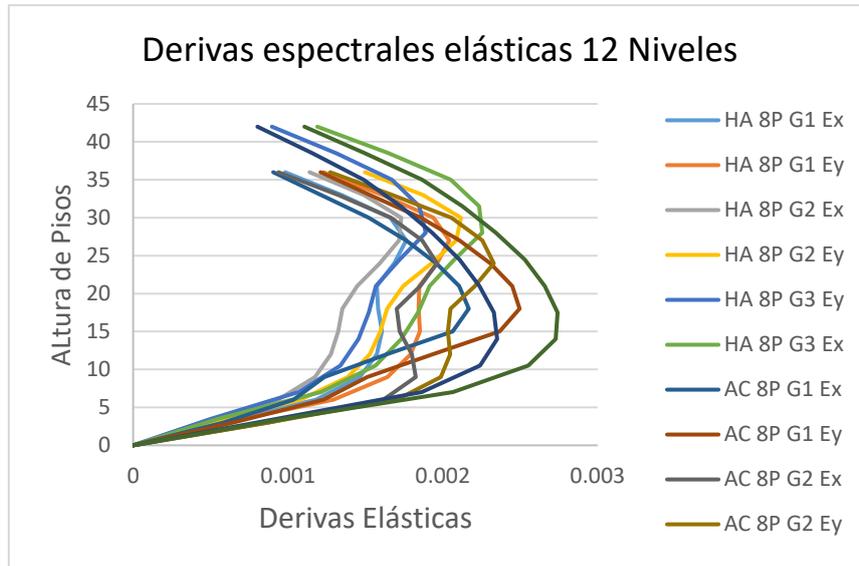
Derivas producidas por el cortante Basal Y de arquetipos de H.A. y Acero en 12 niveles.



Fuente: Elaboración propia

Figura 15:

Derivas producidas por el Espectro (X,Y) de arquetipos de H.A. y Acero en 12 niveles.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 10:

Derivas elásticas e inelásticas máximas en 12 niveles en arquetipos de Acero y Hormigón Armado.

12 Niveles								
Grupo	Altura	Der. Inelástica	Der. Elástica		Grupo	Altura	Der. Inelástica	Der. Elástica
HA Sx					AC Sx			
G1	27	0.0021975	1.32%		G1	18	0.003109679	1.87%
G2	27	0.00219856	1.32%		G2	24	0.002483108	1.49%
G3	28	0.00218167	1.31%		G3	17.5	0.002679161	1.61%
HA Sy					AC Sy			
G1	24	0.00281137	1.69%		G1	18	0.004176936	1.88%
G2	30	0.00310833	1.86%		G2	24	0.003591442	1.62%
G3	28	0.00305822	1.83%		G3	17.5	0.003726131	1.68%
G1	27	0.00176345	1.058%		G1	24	0.001958794	1.175%
G2	27	0.00171751	1.031%		G2	24	0.001962675	1.178%
G3	28	0.00189004	1.134%		G3	17.5	0.002330908	1.399%
G1	27	0.00204189	1.225%		G1	24	0.002306952	1.384%
G2	27	0.00208696	1.252%		G2	24	0.002329495	1.398%
G3	28	0.00225503	1.353%		G3	17.5	0.002741492	1.645%

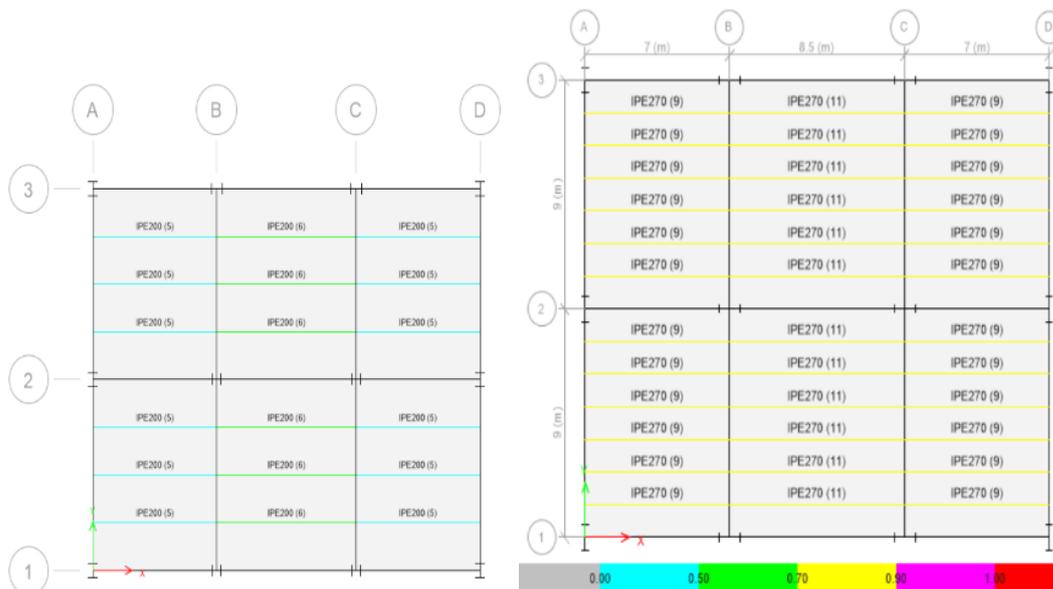
Fuente: Elaboración propia

Todos los elementos de los 18 arquetipos planteados cumplen con las combinaciones de diseño planteadas.

Adicionalmente sea considerado el diseño de las vigas secundarias de acero estructural tal como se visualiza en la figura 16.

Figura 17:

Análisis de vigas secundarias en estructura de acero.



Fuente: Elaboración propia

Una desventaja del hormigón armado es la dimensión de las secciones, la cual en 12 pisos llega a ser $1.3 \times 1.3 \text{ m}^2$. Existiendo doce columnas lo que llega a tener un área de 20.28 m^2 Y quita del área útil de 423 m^2 , un área útil del 4.29% en el caso del acero no resta área útil. Ya que la longitud de las alas máxima es de 300 mm. Y el alma se pierde completamente en la mampostería.

Análisis de precios unitarios.

Se ha obtenido el peso de cada estructura de acero diseñada, cumpliendo parámetros sísmicos y se ha establecido un costo referencial en Ecuador de la revista de la cámara de la construcción (Camara de la Industria de la construcción, 2023), estos parámetros en acero estructural constan de montaje, costo de

soldador calificado y materiales, se ha analizado por rubro: materiales, mano de obra, equipos/herramientas y costos de transporte se a analizado los costos directos netamente.

Tabla 11:

Rubros en arquetipos en acero estructural.

ACERO ESTRUCTURAL				
PISOS	GRUPO	kg	Costo/kg	Costo Total
3	1	31464.83	4.34	\$ 136,557.36
3	2	44264.23	4.34	\$ 192,106.76
3	3	80939.06	4.34	\$ 351,275.52
8	1	878.2104524	4.34	\$ 374,347.79
8	2	123061.1	4.34	\$ 534,085.17
8	3	259834.2	4.34	\$ 1,127,680.43
12	1	231231.38	4.34	\$ 1,003,544.19
12	2	219780.87	4.34	\$ 953,848.98
12	3	398739.32	4.34	\$ 1,730,528.65

Fuente: Elaboración propia

Para el hormigón armado se ha considerado tres rubros, encofrado, acero de refuerzo y hormigón simple de 240 kg/cm².

Para se ha considerado el costo de vigas columnas y vigas secundarias en caso de que se han colocado.

Tabla 12:

Rubros en arquetipos en hormigón armado.

HORMIGÓN ARMADO SIN PREESFORZAR				
PISOS	GRUPO	kg As ref.	m3 H.S. 240 Mpa	Costo Total
3	1	6659.514631	53.74652381	\$ 28,336.69
3	2	11710.94172	133.6411905	\$ 58,719.49
3	3	30139.92685	263.0964143	\$ 120,717.18
8	1	16015.14463	207.221719	\$ 73,749.08
8	2	64730.96483	445.1073619	\$ 207,354.52
8	3	106717.4543	878.2104524	\$ 404,785.76
12	1	55612.49319	435.8864476	\$ 197,812.53
12	2	121742.1585	968.5039667	\$ 435,674.39
12	3	222848.4248	1693.746662	\$ 794,001.77

Fuente: Elaboración propia

En ambos sistemas existe algunas deducciones, la principal es que pese a ser la misma área, distancia entre ejes, cargas y sistema estructural (Pórticos Especiales a Momento) el hormigón armado es considerablemente más económico que el acero, sin embargo las luces óptimas para mantener un sistema estructural óptimo es de 4 a 5 metros en hormigón armado y en acero estructural no existe una diferenciación tan alta entre luces de 4 a 5 y de 5 a 7, sin embargo al aumentar esta distancia en ambos sistemas estructurales existe un aumento de casi el doble del costo en relación a luces de 5 a 7 por lo que no es óptimo en una relación costo beneficio. Sin embargo, como se mencionó anteriormente una de las ventajas del acero estructural es menor tiempo es la construcción de estructuras. Por lo que el proyectista, constructor y contratante deberá decidir la mejor opción en función a su requerimiento.

Cabe destacar que existen otros sistemas estructurales tanto en hormigón armado como en acero estructural y se invita a la comunidad investigadora a compararlos y arrojar conclusiones como epílogo de la presente investigación.

CONCLUSIONES

- Se han diseñado y analizado 18 estructuras sismorresistentes, dúctiles con pórticos especiales a momento, en acero y hormigón armado capaces de disipar energía sísmica superior a 1.2g.
- Ambos sistemas estructurales se pueden diseñar bajo consideraciones sismorresistentes.
- Posterior a un análisis de 18 arquetipos (9 en Hormigón armado y 9 en Acero estructural) variando el número de pisos y distancia entre ejes (crujías) se determinó que el sistema estructural de pórticos especiales resistentes a momento más económico es el de hormigón armado.
- Las grandes secciones de columnas de hormigón armado reducen el área útil de la estructura mientras que el acero no presenta una reducción de área útil tan significativa.
- Las ventajas de la construcción en acero estructural son: tiempo de construcción es mucho menor al construir con que el hormigón armado, se puede reutilizar es decir es un material reutilizable y reciclable a diferencia del hormigón armado
- Se puede comparar el costo de otros sistemas estructurales en acero como PEAC (Pórticos Arriostrados Concéntricamente) o PAE (Pórticos arriostrados excéntricamente), versus pórticos

especiales a momento de hormigón armado en dicha comparativa el sistema estructural podría cambiar.

- La presente investigación realiza un análisis desde un piso sobre las cimentaciones, es decir no considera el tipo ni analiza cimentaciones para cada arquetipo por lo que se podría continuar una nueva investigación como punto de partida la presente para el análisis de cimentaciones.

LISTA DE REFERENCIAS

American Concrete Institute. (2019). *ACI 318*. Washintong: ACI.

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 Institute of Steel Construction AISC 360. (2022). *Specifications for Structural Steel Buildings*. Chicago: AISC.

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

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

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

Cardona, M. J., & Lopez, Y. U. (2018). Technical-Economic Electrification Models Rural with Renewable Energies: Systematic Review of Literature. *2018 IEEE ANDESCON*, 1-7.

Castaño de la Rosa, R., Solís-Guzman, J., Marrero, M., & Mercader-Moncayo, P. (2017). Módulo de inversiones para la rehabilitación energética de edificios de viviendas: Revisión y aplicación al indicador de pobreza energética. *Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Ecoeficientes*, 355-375.

Cunalata, F., & Caiza, P. (2022). Estado del Arte de Estudios de Vulnerabilidad Sísmica en Ecuador. *Revista Politécnica*, 55-64.

- 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/revision-y-aplicacion-zona-panel-porticos-resistentes-momento-acero/>
- Ferrer Espinola, C. J., & Mantilla Urcia, K. G. (2021). *Comportamiento sísmico en las estructuras de concreto reforzado para edificaciones urbanas. Una revisión sistemática 2009-2019*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Fuentes, S., González, L., Calderín, F., & 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>
- Gosh, S., & Taylor, A. (2021). Cambios en los Requisitos en el ACI 318 para las Estructuras Sismo Resistentes, Parte 1. *Concreto Latinoamérica*, 7-14.
- Guerra, J., Puig, R., Castañeda, A., & Baque, B. (2023). ESTADO DEL ARTE SOBRE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN PERFILES COSTEROS. *Revista Científica "INGENIAR": Ingeniería, Tecnología e Investigación.*, 2-20.
- Medina Robalino, C. D., & 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 HM*. Quito: Presidencia del Ecuador.
- Paez, D., Zabala, J., & Rodriguez, Y. (2017). PISO BLANDO, UNA FALLA COMÚN EN EL TERREMOTO DE PEDERNALES. *Ciencia*, 59-75.
- Rojas, P., Barros, J., Aguaguña, M., & 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., & Martinez, 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.
- Zakian, P., & Kaveh, A. (2023). Seismic design optimization of engineering structures: a comprehensive review. *Acta Mech* 234, 1305–1330.