



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

INGENIERO CIVIL

TRABAJO DE TITULACIÓN

Comparación de los valores del Factor de Reducción de Resistencia Sísmica “R” aplicando la Norma Ecuatoriana de la Construcción y los obtenidos con Análisis No-Lineal Pushover para estructuras de cinco plantas

Autor: Lanche Luzuriaga, Cristian Vinicio

Director: Maza, Bolívar Hernán

LOJA - ECUADOR
2021



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2021

Aprobación del director del Trabajo de Titulación

Loja, 11 de octubre de 2021

Magíster

Belizario Amador Zárate Torres

Coordinador de Titulación

Ciudad. -

De mi consideración:

El presente Trabajo de Titulación denominado: Comparación de los valores del Factor de Reducción de Resistencia Sísmica "R" aplicando la Norma Ecuatoriana de la Construcción y los obtenidos con Análisis No-Lineal Pushover para estructuras de cinco plantas realizado por Cristian Vinicio Lanche Luzuriaga, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo. Así mismo, doy fe que dicho Trabajo de Titulación ha sido revisado por la herramienta antiplagio institucional.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

Bolívar Hernán Maza, MsC.

Director del TFT

C.I.: 1102295761

Declaración de autoría y cesión de derechos

Yo, Cristian Vinicio Lanche Luzuriaga, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente:

- Ser autor del Trabajo de Titulación denominado: Comparación de los valores del Factor de Reducción de Resistencia Sísmica “R” aplicando la Norma Ecuatoriana de la Construcción y los obtenidos con Análisis No-Lineal Pushover para estructuras de cinco plantas, de la Titulación Ingeniería Civil, específicamente de los contenidos comprendidos en: Introducción, Capítulo 1. Estado del arte, Capítulo 2. Metodología, Capítulo 3. Resultados y discusión, Conclusiones y Recomendaciones, siendo Bolívar Hernán Maza, director del presente trabajo; y, en tal virtud, eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones judiciales o administrativas, en relación a la propiedad intelectual. Además, ratifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo son de mi exclusiva responsabilidad.
- Que mi obra, producto de mis actividades académicas y de investigación, forma parte del patrimonio de la Universidad Técnica Particular de Loja, de conformidad con el artículo 20, literal j), de la Ley Orgánica de Educación Superior; y, artículo 91 del Estatuto Orgánico de la UTPL, que establece: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.
- Autorizo a la Universidad Técnica Particular de Loja para que pueda hacer uso de mi obra con fines netamente académicos, ya sea de forma impresa, digital y/o electrónica o por cualquier medio conocido o por conocerse, sirviendo el presente instrumento como la fe de mi completo consentimiento; y, para que sea ingresada al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, en cumplimiento del artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

Autor: Cristian Vinicio Lanche Luzuriaga

C.I.: 1105716102

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, hermanas, amigos y maestros que con sus conversaciones aportaron de forma directa e indirecta, sustanciales ideas para el desarrollo de este trabajo.

Agradecimiento

Luego de elaborar esta breve investigación y tan cerca de este nuevo punto de inflexión en mi crecimiento personal y profesional quiero agradecer a mis padres que con su apoyo personal y económico me han permitido desarrollar mis estudios con completa concentración en ella. También agradezco a la UTPL por el apoyo económico que me brindó en forma de beca, acción que alivió la carga económica hacia mi familia. A mi director de Trabajo de Titulación que con su orientación y conocimiento me apoyó en las diferentes etapas del desarrollo de este trabajo.

Índice de Contenido

Carátula	I
Aprobación del director del Trabajo de Titulación	II
Declaración de autoría y cesión de derechos	III
Dedicatoria.....	V
Agradecimiento	VI
Índice de Contenido	VII
Resumen.....	1
Abstract.....	2
Introducción	3
Capítulo uno.....	5
Estado del arte.....	5
1.1 Factor de reducción de resistencia sísmica (R)	5
1.1.1 Curva de capacidad	5
1.1.2 Factor de resistencia por ductilidad.....	6
1.1.3 Factor de sobre resistencia	6
1.1.4 Factor de redundancia	6
1.2 Análisis estático no-lineal	7
1.2.1 Distribución de fuerzas.....	7
1.3 Plasticidad Concentrada	8
1.4 Punto de Desempeño.....	8
1.4.1 Método de coeficientes de desplazamiento	8
1.4.2 Método del espectro de capacidad.....	9
1.4.3 Niveles de desempeño.....	9
Capítulo dos.....	11
Metodología	11
2.1 Diseño de los arquetipos estructurales	11
2.1.1 Definición geométrica.....	11
2.1.2 Cargas gravitacionales.....	11
2.1.3 Demanda sísmica.....	12
2.1.4 Análisis modal espectral.....	13
2.1.5 Derivas y cortante basal.....	14
2.1.6 Estructuración	14
2.2 Análisis Pushover.....	17
2.2.1 Comprobación de cortantes entre modos de vibración elásticos	17
2.2.2 Distribución de cargas laterales	18
2.2.3 Rótulas en vigas.....	18
2.2.4 Rótulas en columnas.....	18
2.3 Puntos de desempeño	19
2.3.1 Factores de Reducción de Resistencia Sísmica	19
Capítulo tres.....	20

Resultados y discusión	20
3.1 Curva de capacidad y puntos de desempeño del arquetipo A1	20
3.2 Curvas de capacidad y puntos de desempeño del arquetipo A2	21
3.3 Discusión de los resultados.....	23
Conclusiones	25
Recomendaciones	26
Referencias.....	27
Apéndice	31

Índice de Tablas

Tabla 1. Borradores de los Factores de Redundancia.....	7
Tabla 2. Componentes de la carga muerta distribuida.....	12
Tabla 3. Relaciones de participación de masa modal.....	13
Tabla 4. Variables de resultado del análisis modal espectral.....	14
Tabla 5. Cortante en planta de los modos traslacionales de A1 y su relación.....	17
Tabla 6. Cortante en planta de los modos traslaciones de A2 y su relación.....	17
Tabla 7. Fuerzas laterales distribuidas en planta para cada dirección de análisis.....	18
Tabla 8. Puntos de Desempeño para A1	21
Tabla 9. Puntos de Desempeño para A2	22
Tabla 10. Componentes y factores R calculados.....	24

Índice de Figuras

Figura 1. Curva de Capacidad. (Autor: Building Seismic Council, 2020)	5
Figura 2. Geometría global de los arquetipos estructurales.....	11
Figura 3. Espectros de respuesta elástico e inelásticos	13
Figura 4. Esquema en elevación de la estructuración en la dirección X de A1.....	15
Figura 5. Esquema en elevación de la estructuración en la dirección Y de A1.....	15
Figura 6. Esquema en elevación de la estructuración en la dirección X de A2.....	16
Figura 7. Esquema en elevación de la estructuración en la dirección Y de A2.....	16
Figura 8. Espectros de Respuesta para 10% y 5% de probabilidad de excedencia en 50 años	19
Figura 9. Curva de Capacidad normalizada y puntos de desempeño para A1	20
Figura 10. Curva de Capacidad normalizada y puntos de desempeño para A2	22

Resumen

En el diseño de estructuras convencionales se utiliza el factor R para reducir la sollicitación sísmica por la capacidad de disipación de energía que provee el diseño por capacidad de secciones dúctiles. Aunque los investigadores enuncian que la magnitud de este factor depende de varias variables como ductilidad, sobrerresistencia, redundancia, amortiguamiento y estructuración, en la NEC esta se simplifica a una tabla cuya única variable es la tipología estructural pudiendo resultar en un sub o sobredimensionamiento de las nuevas edificaciones. Por lo que en este trabajo se planteó comprobar la magnitud de 8 aplicando análisis pushover a dos pórticos especiales de hormigón armado con vigas descolgadas y analizando las variables de ductilidad, curva de capacidad y desempeño para las sollicitaciones sísmicas de 10% y 5% de probabilidad de excedencia en 50 años para la ciudad de Loja y suelo tipo C. Se concluyó que la magnitud de 8 para el Factor R sobrestima la capacidad de desarrollo no lineal de este tipo de estructuras y que existe una relación entre el número de ejes resistentes y el nivel de desempeño.

Palabras claves: Factor R, No-lineal, Pushover.

Abstract

In the design of conventional structures, the R factor is used to reduce seismic stress due to the energy dissipation capacity provided by the capacity design of ductile sections. Although the researchers state that the magnitude of this factor depends on several variables such as ductility, overresistance, redundancy, damping and structuring, in the NEC this is simplified to a table whose only variable is the structural typology and can result in a sub or oversizing of the new buildings. Therefore, in this work it was proposed to check the magnitude of 8 by applying pushover analysis to two special reinforced concrete frames with hanging beams and analyzing the variables of ductility, capacity curve and performance for seismic demand of 10% and 5% probability of excess in 50 years for the city of Loja and soil type C. It was concluded that the magnitude of 8 for Factor R overestimates the nonlinear development capacity of this type of structures and that there is a link between the number of resistant axes and the level of performance.

Keywords: R Factor, Nonlinear, Pushover.

Introducción

En Ecuador el estado actual de la práctica en el diseño estructural sismorresistente produce estructuras subdimensionadas o sobredimensionadas por las restricciones normativas de la NEC 2015 y falta de conocimiento sobre lo que involucra el uso del factor de reducción de fuerza sísmica R . La filosofía de diseño sismorresistente actual plantea que ante eventos sísmicos de baja intensidad o de ocurrencia frecuente la estructura no presente daños. Para sismos severos de ocurrencia rara la estructura incurse en el rango inelástico con daño en los elementos estructurales sin rebasar ningún estado límite de falla (ASCE, 2017b; MIDUVI, 2015b). El espectro elástico de diseño representa la demanda sísmica de ocurrencia rara cuya probabilidad de excedencia es 10% en 50 años. La baja probabilidad de ocurrencia durante la vida útil de la edificación, permite que los elementos estructurales se analicen y diseñen en función del espectro substancialmente reducido, al dividir sus ordenadas por el factor de reducción de resistencia sísmica R (ASCE, 2017b; Mahmoudi & Zaree, 2013; MIDUVI, 2015a; Reza Salimbahrami & Gholhaki, 2019). Convirtiendo al factor R en una variable de sustancial importancia al reducir las fuerzas laterales de diseño. (Aliakbari & Shariatmadar, 2019; MIDUVI, 2015b; Motiani et al., 2018; Reza Salimbahrami & Gholhaki, 2019).

En la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS, 2015) la magnitud del factor R se presenta definida según el grupo estructural, generalizando variables como el periodo de vibración, ductilidad, sobrerresistencia, redundancia y amortiguamiento global y local de los elementos que conforman la superestructura. La inobservancia de las variables descritas produce incertidumbre, (Se pregunta) no es clara la percepción sobre si las restricciones normativas de diseño son suficientes para asegurar el correcto desarrollo en el campo inelástico por la generalización del factor R (Aguiar, 2007; Alvarado, 2015; Paredes Culcay, 2013; Pinoargote Rovello, 2014). La mejor forma para determinar el factor R es analizando las estructuras con métodos no-lineales (Masoudi et al., 2012; Moehle, 2014; Salem et al., 2018). Una de las técnicas de análisis no-lineal es el Pushover monotónico, con

la que es posible obtener la curva de capacidad sísmica de la estructura, y a partir de esta determinar el factor de reducción de resistencia sísmica en base a las relaciones tratadas por Aguiar (2007) para pórticos de hormigón armado (Aguiar et al., 2020; Mahoney & Hanson, 2018; Mandal & Shendkar, 2020).

En este contexto se plantea comparar los valores de los factores de reducción de fuerza sísmica R de los resultados de análisis no-lineal Pushover y los utilizados para su diseño basado en la NEC-SE-DS 2015. El análisis se realizará en cuatro arquetipos estructurales de cinco plantas con dos diferentes configuraciones geométricas y estructurales. En la primera etapa del proyecto se define las dimensiones y patrones de carga, luego se realiza el diseño gravitacional y dinámico de las estructuras, verificando que se cumplan los requerimientos de la NEC. Con estos resultado se definen las cuantías y distribución real de acero en vigas y columnas, con ello las características mecánicas de los puntos de plasticidad concentrada según ASCE/SEI 41-17. La curva de capacidad se determina a través de las fuerzas verticales correspondientes al modo de vibración fundamental utilizando la metodología Pushover. El modelo matemático y análisis se realiza utilizando el software ETABS versión estudiantil. El alcance de esta investigación es válida para estructuras de baja altura y distribución en planta regular, en las que su comportamiento dinámico se encuentra regido principalmente por su forma modal fundamental (ASCE, 2017a).

¿Las magnitudes de los factores R utilizados para el diseño de las estructuras según la NEC 2015 y los determinados por las relaciones entre los desplazamientos y cortantes de desempeño obtenidos del análisis no-lineal difieren substancialmente?

Para ciertas estructuraciones las edificaciones pueden ser subdimensionadas por la generalización que la NEC plantea.

Capítulo uno

Estado del arte

1.1 Factor de reducción de resistencia sísmica (R)

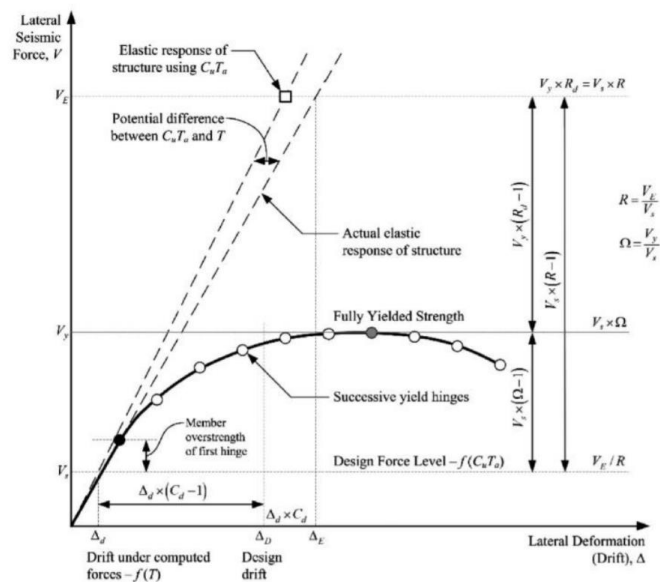
En el diseño sísmico basado en fuerzas el factor de reducción de resistencia sísmica se utiliza para reducir el espectro elástico de respuesta a uno inelástico debido a la capacidad de disipación de energía. Aguiar (2007), Mahmoudi & Zaree (2013) y el Building Seismic Safety Council (2020) coinciden en que el factor R se define como el producto de varias variables que cuantifican la capacidad de desempeño en el rango no lineal de la estructura y que las principales a considerar son las de ductilidad, sobre resistencia, redundancia y amortiguamiento. En el caso particular del análisis no-lineal Pushover, por su naturaleza estática no es posible considerar de forma directa el componente de amortiguamiento.

$$R = R\mu R_{\Omega} R_R$$

1.1.1 Curva de capacidad

Figura 1

Curva de Capacidad. (Autor: Building Seismic Council, 2020)



La curva de capacidad es la representación gráfica del cortante en la base en función del desplazamiento. Aguiar (2007) y el Building Seismic Safety Council (2020) describen

varios puntos y relaciones notables, siendo el primero el que marca una plastificación considerable producida por la formación de la primera rótula plástica de la estructura. Por diferentes circunstancias como las características geométricas de los materiales utilizados o las condiciones mínimas sugeridas por los códigos de diseño o criterios de sismorresistencia los elementos estructurales son más resistentes que las solicitaciones obtenidas en el análisis por lo que se espera que la primera rótula se forme luego de superar el cortante de diseño. Con el incremento de la carga lateral surgen más rótulas plásticas y con ello una reducción de la rigidez hasta alcanzar un esfuerzo último que representa la plastificación completa del sistema.

1.1.2 Factor de resistencia por ductilidad

Abdi et al. (2019) y Aguiar (2007) definen el factor de resistencia por ductilidad como la relación entre el cortante basal del sistema perfectamente elástico V_e y el cortante último V_U del análisis no-lineal.

$$R_u = \frac{V_e}{V_U}$$

1.1.3 Factor de sobre resistencia

Según Aguiar (2007) y Mahmoudi & Zaree (2013) el factor de sobre resistencia busca cuantificar los efectos de la fracción de resistencia sobre la requerida que los elementos diseñados poseen. Y se define como la relación entre el cortante último V_U correspondiente al punto de desempeño y el cortante de diseño V_D .

$$R_\Omega = \frac{V_U}{V_D}$$

1.1.4 Factor de redundancia

Abdi et al. (2019) y Aguiar (2007) definen la redundancia como la capacidad de la estructura de redistribuir las demandas a diferentes ejes resistentes a esta incursionar en el rango no-lineal. Este se determina como la relación entre el cortante último V_U y el cortante al formarse la primera rótula plástica V_1 .

$$R_R = \frac{V_U}{V_1}$$

También en el ATC 19 se sugiere que las estructuraciones con menos de cuatro líneas de resistencia sísmica en su dirección principal deberían de penalizarse con mayores fuerzas laterales de diseño. Proponiendo los borradores de los valores del Factor de Redundancia, aunque sin intención de ser aplicado en las normativas, sino más bien de promover la investigación sobre estos.

Tabla 1

Borradores de los Factores de Redundancia

Líneas Verticales de Marcos Sísmicos	Factor de Redundancia
2	0.71
3	0.86
4	1.00

Nota. Adaptado desde la tabla 4.3 del ATC (1995)

1.2 Análisis estático no-lineal

El análisis estático no-lineal o análisis pushover ha ganado popularidad como una herramienta adecuada para el diseño sísmico de nuevas edificaciones por su simplicidad y facilidad de aplicación. Consiste en aplicar fuerzas equivalentes a las inerciales inducidas por el movimiento del suelo durante un evento sísmico, estas aplicadas en diferentes intervalos crecientes en los que la rigidez para el intervalo siguiente cambia por efecto de la demanda del anterior al cambiar el estado mecánico de los elementos estructurales (ASCE, 2017a; Salem et al., 2018). Las investigaciones desarrolladas por Martino et al. (2004) y Daei & Poursha (2021) concluyen que el análisis pushover permite estimar satisfactoriamente el comportamiento sísmico e identificar debilidades estructurales de edificaciones cuyos modos de vibración diferentes al fundamental no tengan contribuciones significativas.

1.2.1 Distribución de fuerzas

La distribución de las fuerzas laterales determina las magnitudes relativas de cortantes, momentos y deformaciones de la estructura. Debido a que la distribución de estas fuerzas varía continuamente durante un evento sísmico se solía realizar los análisis con varias distribuciones pero las investigaciones descritas en FEMA 440 (2005) demostraron que las

múltiples distribuciones de fuerzas tienen poca relevancia en la precisión del análisis Pushover.

En el ASCE41-17 se recomienda utilizar una distribución basado en la primera forma modal. Para utilizar esta distribución se debe determinar que los modos superiores de vibración no son significativos, esto se cumple si ninguno de los cortantes de las plantas considerando los modos para obtener un 90% de la participación de masa exceda 130% de los cortantes de planta correspondientes al considerar el modo fundamental.

1.3 Plasticidad Concentrada

Tal como concluyen Dides y de la Llera (2005) los modelos de plasticidad concentrada (PC) son una herramienta útil y eficiente para estimar el comportamiento dinámico de las estructuras. Deierlein et al. (2010) agrega que los modelos de PC pueden ser más adecuados para capturar el comportamiento no-lineal de degradación que otros más sofisticados, debido a que estos se calibran utilizando datos experimentales de pruebas de momento-rotación y curvas de histéresis, especialmente para elementos con baja interacción con carga axial. Ejemplo de esto son los modelos presentados en ASCE 41-17 que cuentan con un gran respaldo de ensayos experimentales.

1.4 Punto de Desempeño

Son dos los principales métodos para determinar el punto de desempeño en base a la curva de capacidad, el del Coeficiente de Desplazamiento (MCD) y el Espectro de Capacidad (MEC). Como trata Lin et al. (2004) el MCD en FEMA 273 sobreestima el desplazamiento objetivo en un 28% y el MEC de la ATC 40 subestima el desplazamiento en un 20%. Por este apreciable error se han presentado nuevas propuestas para la estimación del punto de desempeño como en FEMA 440 y ASCE 41-17 para los MCD y MEC respectivamente.

1.4.1 Método de coeficientes de desplazamiento

El Método de Coeficiente de Desplazamiento (MCD) hace una aproximación al problema modificando la respuesta lineal elástica del sistema de un grado de libertad

equivalente multiplicando este por una serie de coeficientes, en el caso de la modificación que se realizó en la ASCE 41-17 basados en las recomendaciones del FEMA 440, los coeficientes van de C_0 a C_2 .

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

1.4.2 Método del espectro de capacidad

El Método del Espectro de Capacidad busca la intersección entre las curvas de capacidad y espectro de respuesta elástico transformadas a coordenadas espectrales usando las características dinámicas del modo fundamental. Esta nueva forma del espectro elástico se reduce por medio de un amortiguamiento histérico equivalente obtenido de un proceso iterativo en que se estima el punto de desempeño hasta coincidir el punto estimado con la intersección del espectro inelástico (ATC, 1996; Hakim et al., 2014).

1.4.3 Niveles de desempeño

El comportamiento sísmico de las estructuras, habitualmente se relaciona con el nivel de daño ocasionado a los elementos estructurales y no estructurales. Aunque este desempeño es un continuo, por practicidad se definen o identifican niveles de desempeño discretos para los componentes estructurales. De forma general se describen tres niveles de desempeño (Deierlein et al., 2010):

- Ocupación inmediata (IO), los elementos de desarrollan esencialmente en el rango elástico.
- Seguridad de vida (LS), limita el daño en los componentes estructurales y no estructurales para reducir el riesgo de lesiones en los ocupantes.
- Prevención de colapso (CP), busca reducir el riesgo del colapso total o parcial, limitando las deformaciones y fuerzas en la zona de degradación significativa de la resistencia y rigidez.

Documentos como el ASCE 41 proporcionan criterios de aceptación en base a las deformaciones y fuerzas demandantes de forma individual en los componentes estructurales.

En el caso ecuatoriano en literal a del acápite 4.2.1 de la NEC-SE-DS se enuncia que se permite comprobar el nivel de desempeño de seguridad de vida ante un evento con una probabilidad de excedencia en 50 años del 10%, equivalente a un periodo de retorno de 475 años. En contraste en la ASCE 41-17 para estructuras convencionales se plantea como objetivo básico el desempeño de prevención de colapso para un sismo con 5% de probabilidad de excedencia en 50 años, lo que es equivalente a un periodo de retorno de 970 años.

Capítulo dos

Metodología

2.1 Diseño de los arquetipos estructurales

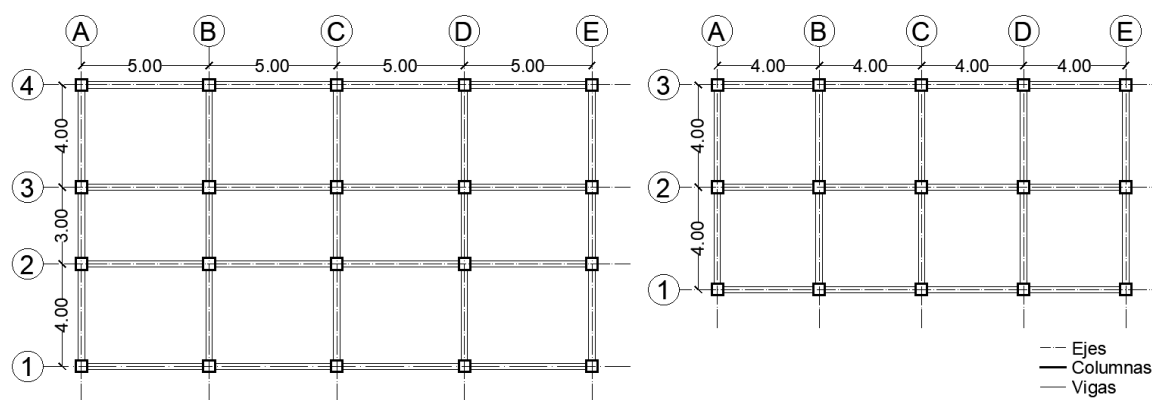
Los elementos estructurales resistentes a las fuerzas laterales (vigas y columnas) se diseñaron con los parámetros de las NEC 2015 y ACI 318-14, para las solicitaciones gravitacionales derivadas de las cargas mínimas definidas en la NEC-SE-CG, las solicitaciones sísmicas derivadas de análisis modal espectral proyectadas para el Espectro de Respuesta propuesto en la NEC-SE-DS para la ciudad de Loja y suelo tipo C, sin considerar la rigidez aportada por la losa.

2.1.1 Definición geométrica

Fueron dos los arquetipos analizados el primer arquetipo (A1) formado por cuatro vanos continuos de 5m y en la dirección perpendicular tres vanos de 4, 3 y 4m. El segundo arquetipo (A2) compuesto por vanos uniformes de 4m, cuatro en una dirección y dos en la otra, como se muestra en Figura 2. Su distribución en altura se conforma por una primera planta de 3.50m y cuatro entrepisos de 2.70m, concibiendo una altura total de 14.30m.

Figura 2

Geometría global de los arquetipos estructurales



Nota. Distribución esquemática en planta de columnas y vigas para los arquetipos A1 (izquierda) y A2 (derecha).

2.1.2 Cargas gravitacionales

Las cargas gravitacionales permanentes consideradas fueron: pared de

mampostería de ladrillo artesanal revestidas de mortero (Apéndice 1), bloque alivianante, contrapiso de hormigón ligero, piso cerámico y mortero de revestimiento (

Tabla 2). La carga lineal que representa a las paredes se aplicó en todas las vigas y las cargas distribuidas se aplicaron uniformemente en todas las plantas correspondientes.

Tabla 2

Componentes de la carga muerta distribuida

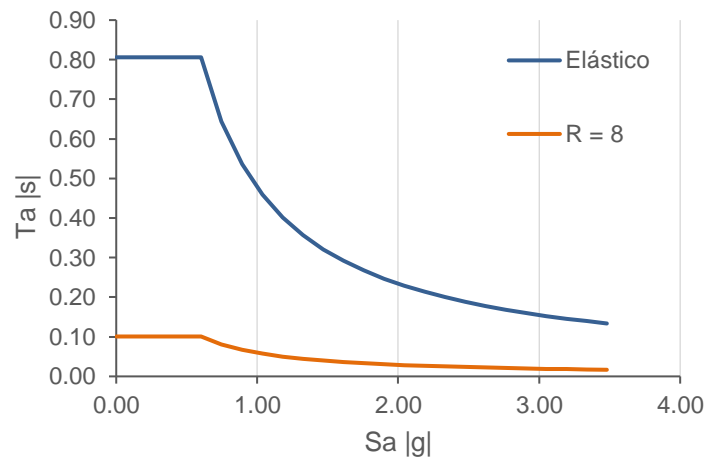
Componente	Volumen [m ³ /m ²]	Peso Específico [kN/m ³]	Carga [kN/m ²]
Bloque alivianante 40x20x20 cm	0.128	8.50	1.09
Mortero de revestimiento 1.5 cm	0.015	20.00	0.30
Contrapiso hormigón ligero 2 cm	0.020	22.00	0.44
Piso cerámico	0.007	18.00	0.13
		Total	1.95

Nota. La carga permanente sobre la losa representa la configuración más típica en la ciudad de Loja, conformada por losa alivianada con bloques ligeros no recuperables, en techo revestida con mortero y en piso recubierta por un contrapiso de hormigón ligero y baldosa cerámica.

Las cargas gravitacionales de uso o sobrecargas son las correspondientes a una edificación de uso multifamiliar definidas en la NEC 2015, 2.00 kN/m² para el área residencial y 4.80 kN/m² para la cubierta destinada como patio de reunión.

2.1.3 Demanda sísmica

La demanda sísmica se definió según la NEC-SE-DS para los parámetros correspondientes a estructuras regulares en la ciudad de Loja, sobre suelo tipo C. Factor R de 8 adoptado de la tabla 16 de la misma norma.

Figura 3*Espectros de respuesta elástico e inelásticos*

Nota. Las variables de caracterización utilizadas para el modelamiento del espectro de respuesta son: aceleración máxima en roca (Z) 0.25, razón entre aceleración espectral y en roca (η) 2.48, factor de decremento (r) 1, coeficientes de suelo (Fa) 1.30, (Fd) 1.28, (Fs) 0.94, periodo límite de la zona de aceleración constante (T_c) 0.51s y periodo de vibración límite (T_L) de 3.07s.

2.1.4 Análisis modal espectral

El análisis modal espectral ejecutado en el programa mostró que ambos arquetipos no poseen problemas torsionales al ser sus dos primeros modos traslacionales con una participación modal mayor al 80%. La participación de la masa modal mínima del 90% se consiguió con los cinco primeros modos para ambos arquetipos.

Tabla 3*Relaciones de participación de masa modal*

Modo	A1			A2				
	Periodo [s]	X	Y	RZ	Periodo [s]	X	Y	RZ
1	1.339	0.8351	0	0	1.181	0	0.8325	0
2	1.321	0	0.8354	0	1.104	0.8400	0	0
3	1.118	0	0.0008	0.8248	0.911	0	0	0.8402
4	0.373	0.1116	0	0	0.339	0	0.1143	0
5	0.369	0	0.1110	0	0.321	0.1097	0	0
Total		0.9467	0.9472	0.8248		0.9497	0.9468	0.8402

- Los arquetipos por sus periodos fundamentales elevados describen estructuras flexibles que desarrollan su demanda sísmica en la zona de velocidad constante del espectro de diseño.

- Al ser los dos modos fundamentales traslacionales y sus factores de participación de masa modal correspondientes mayores a 0.80 se proyecta un comportamiento dinámico predecible y una correcta estimación de la demanda elástica.

2.1.5 Derivas y cortante basal

En la Tabla 3 se resumen las variables del análisis dinámico sujetas a comprobación en la NEC: derivas de piso inelástica menor a 0.02 y relación entre cortante basal dinámico y cortante basal estático mayor a 80%. Las comprobaciones de torsión y distorsión de piso no se enuncian ya que las estructuras son regulares en la distribución de masa y rigidez.

Tabla 4

Variables de resultado del análisis modal espectral

	A1		A2	
	X	Y	X	Y
Carga reactiva kN	14523.63		5751.21	
Deriva máxima de piso	0.0021	0.0024	0.0020	0.0021
Deriva de piso inelástica	0.0126	0.0144	0.0117	0.0124
Cortante dinámico kN	497.31	503.16	264.96	246.17
Cortante estático kN	556.26	563.52	267.17	249.75
Dinámico/Estático %	89.40	89.29	99.17	98.56

Nota. Ambos arquetipos, aunque flexibles no presentan problemas para aprobar las condiciones normativas de:

- Derivas inelásticas de piso, por la baja aceleración espectral de diseño.
- Cortante dinámico mínimo, por sus elevados factores de participación de masa modal en los modos fundamentales.

2.1.6 Estructuración

Los arquetipos se conforman por una sola sección característica en las columnas con recubrimiento efectivo de 4.0cm, las secciones de las vigas en cada extremo son iguales y tienen un recubrimiento efectivo de 2.5cm. El diseño se realizó con diámetros de varillas corrugadas disponibles en el Ecuador y para representar esta información de forma concisa se la muestra con una nomenclatura compuesta por las dimensiones (ancho x peralte), cuantía superior e inferior en las figuras Figura 4, Figura 5, Figura 6 y Figura 7.

2.1.6.1 Arquetipo 1. El Arquetipo A1 se conforma por columnas de 45x45cm y cuantía de 1.20% conformada por cinco varillas de 14mm en cada cara de la sección. Los pórticos tipo en la dirección de análisis X son dos: el primero para los ejes 1 y 4, y el segundo para los ejes centrales 2 y 3.

Figura 4.

Esquema en elevación de la estructuración en la dirección X de A1

	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	30x35 0.91/0.47	30x35 0.91/0.47	30x35 0.91/0.47	30x35 0.91/0.47
45x45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	30x35 0.85/0.43	30x35 0.85/0.43	30x35 0.85/0.43	30x35 0.85/0.43
45x45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	30x35 0.85/0.43	30x35 0.85/0.43	30x35 0.85/0.43	30x35 0.85/0.43
45x45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	30x35 0.91/0.47	30x35 0.91/0.47	30x35 0.91/0.47	30x35 0.91/0.47
45x45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	30x35 0.85/0.43	30x35 0.85/0.43	30x35 0.85/0.43	30x35 0.85/0.43
45x45	45x45	45x45	45x45	45x45	45x45	45x45	45x45	45x45

Nota. El refuerzo de las secciones de vigas se detalla de forma específica en Apéndice 2

Para la dirección Y los pórticos modelo son tres. El primero para los ejes extremos A y E, el segundo para los ejes B y D y el último para el eje central E.

Figura 5

Esquema en elevación de la estructuración en la dirección Y de A1

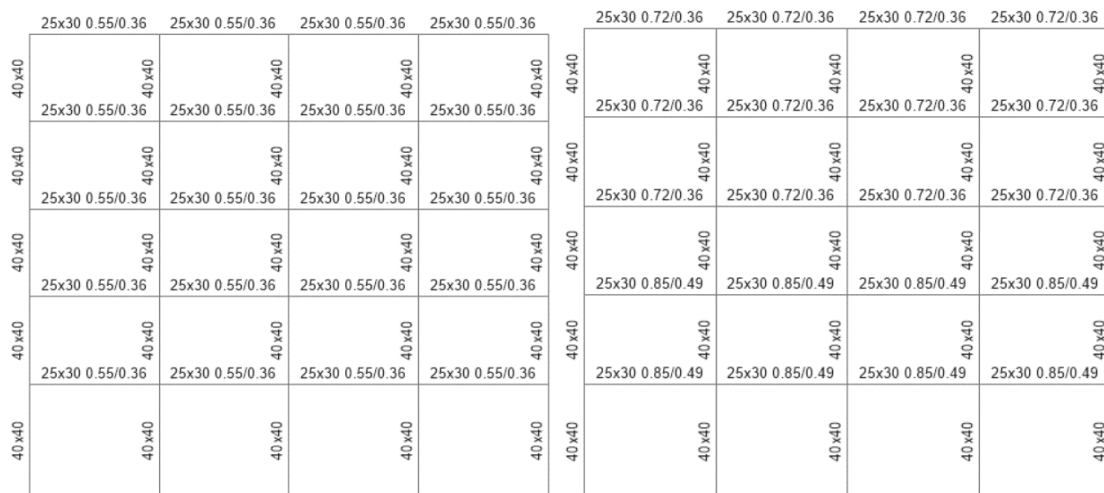
	25x30 0.61/0.36	25x30 0.61/0.36	25x30 0.61/0.36	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45
45x45	25x30 0.61/0.36	25x30 0.61/0.36	25x30 0.61/0.36	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45
45x45	25x30 0.72/0.36	25x30 0.72/0.36	25x30 0.72/0.36	25x32 0.91/0.45	25x32 0.91/0.45	25x32 0.91/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45
45x45	25x30 0.72/0.36	25x30 0.72/0.36	25x30 0.72/0.36	25x32 0.91/0.45	25x32 0.91/0.45	25x32 0.91/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45
45x45	25x30 0.72/0.36	25x30 0.72/0.36	25x30 0.72/0.36	25x32 0.91/0.45	25x32 0.91/0.45	25x32 0.91/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45	25x32 0.79/0.45
45x45	45x45	45x45	45x45	45x45	45x45	45x45	45x45	45x45	45x45

Nota. El refuerzo de las secciones de vigas se detalla de forma específica en Apéndice 2

2.1.6.2 Arquetipo 2. A2 se estructuró con columnas de 40x40cm y cuantía de 1.15% conformada por cuatro varillas de 14mm en cada cara. En la dirección X cuenta con dos estructuraciones características, la primera para el eje 1 y 3, y la segunda para el eje 2.

Figura 6

Esquema en elevación de la estructuración en la dirección X de A2

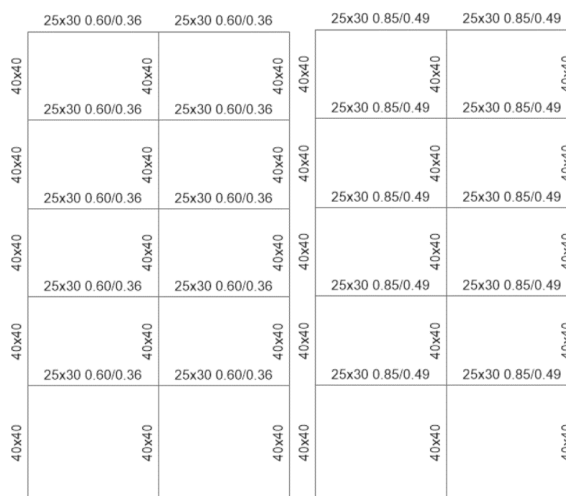


Nota. El refuerzo de las secciones de vigas se detalla de forma específica en Apéndice 2

En la dirección Y se establecieron dos pórticos característicos, el primero para los ejes A y E, y para los ejes B, C y D el segundo.

Figura 7

Esquema en elevación de la estructuración en la dirección Y de A2



Nota. El refuerzo de las secciones de vigas se detalla de forma específica en Apéndice 2

2.2 Análisis Pushover

Con el diseño de las secciones obtenidas se desarrolló el análisis Pushover controlado por deformaciones, utilizando la distribución de fuerzas laterales correspondiente al primer modo de vibración. Para cada dirección de análisis se desarrolló un modelo matemático idéntico con la única diferencia de que los estados de sollicitación ante carga laterales para el cálculo de los diagramas de momento-rotación fueron las sollicitaciones de sismo de diseño correspondientes a cada dirección correspondiente.

2.2.1 Comprobación de cortantes entre modos de vibración elásticos

Según lo sugerido en el acápite 7.3.2.1 numeral 2 de la ASCE 41-17 para que en el análisis pushover se pueda desprestigiar los efectos de los modos de vibración diferentes al fundamental en ninguna planta el cortante correspondiente a estos modos debe ser mayor al 130% que su equivalente en el modo fundamental. En las Tabla 5 y Tabla 6 se muestran dichos cortantes y su relación en todos los casos es menor al 130%.

Tabla 5

Cortante en planta de los modos traslacionales de A1 y su relación

Planta	Modos de Vibración				Relación de Cortante	
	1	2	4	5	X	Y
5	163.74	165.71	133.88	133.64	81.76	80.65
4	281.67	285.16	133.25	133.59	47.31	46.85
3	375.49	380.33	43.52	44.64	11.59	11.74
2	437.24	443.10	-80.57	-80.04	18.43	18.06
1	465.44	471.88	-161.58	-161.28	34.72	34.18

Nota. La relación de cortante para la dirección X de análisis es la correspondiente a los modos 1 y 4. Para la dirección Y la de los modos 2 y 5.

Tabla 6

Cortante en planta de los modos traslaciones de A2 y su relación

Planta	Modo de Vibración				Relación de Cortante	
	1	2	4	5	X	Y
5	69.55	72.38	-49.82	-49.53	68.43	71.63
4	129.78	135.49	-55.18	-56.43	41.65	42.52
3	177.07	185.44	-19.28	-22.81	12.30	10.89
2	208.11	218.59	32.19	32.46	14.85	15.47
1	222.35	234.06	66.03	66.28	28.32	29.70

Nota. La relación de cortante para la dirección X de análisis es la correspondiente a los modos 2 y 5. Para la dirección Y la de los modos 1 y 4.

2.2.2 Distribución de cargas laterales

Las distribuciones de cargas laterales que se usaron son las mostradas en la Tabla 7 correspondientes a los modos fundamentales de vibración para cada arquetipo y dirección de análisis.

Tabla 7

Fuerzas laterales distribuidas en planta para cada dirección de análisis

Planta	Dirección X		Dirección Y	
	A1	A2	A1	A2
5	163.74	72.38	165.71	69.55
4	117.92	63.11	119.46	60.23
3	93.82	49.95	95.16	47.29
2	61.75	33.15	62.77	31.04
1	28.21	15.47	28.79	14.24
Σ	465.44	234.06	471.88	222.35

2.2.3 Rótulas en vigas

Las rótulas plásticas en las vigas fueron de tipo momento-rotación en el eje horizontal, definidas próximas a la cara de las columnas. Utilizando los parámetros de modelamiento para el momento-rotación de fluencia automáticas del programa definiendo el cortante de análisis de la combinación de servicio más cada sismo en la dirección de análisis correspondiente y los demás parámetros de modelamiento y criterios de aceptación de la Tabla 10-7 de la ASCE 41-17.

2.2.4 Rótulas en columnas

Para las columnas se definieron rótulas del tipo P-M-M para considerar los efectos de flexo compresión. Ubicadas próximas a las caras inferiores de las vigas y en la base. Los parámetros de modelamiento referentes a carga axial, momentos y rotación de fluencia fueron calculados de forma automática por el programa para la combinación de carga gravitacional de servicio y para la carga lateral la sísmica de cada dirección correspondiente. Para los parámetros de comportamiento no-lineal y criterios de aceptación se seleccionaron los

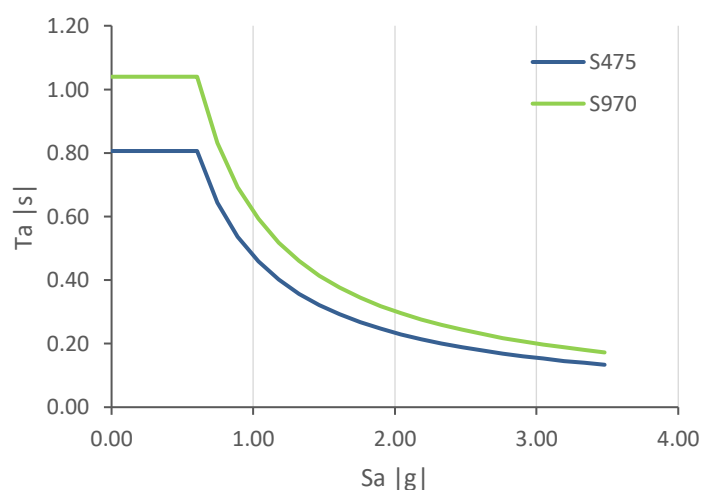
parámetros de la Tabla 10-8 de la ASCE 41-17.

2.3 Puntos de desempeño

Los puntos de desempeño se determinaron con el algoritmo del programa. La entrada de la demanda fueron los espectros de respuesta correspondientes a un periodo de retorno de 475 años o 10% de probabilidad de excedencia en 50 años (S475) y a un periodo de retorno de 970 años o 5% de probabilidad de excedencia (S970). El espectro S475 es el espectro elástico definido en el diseño de los arquetipos y el espectro S970 es S475 escalado por un factor de 1.3, determinado según la relación entre PGA de las curvas de peligro sísmico mostrada en la NEC-SE-DS para Loja y las tasas anuales de excedencia de $1/475$ y $1/970$.

Figura 8

Espectros de Respuesta para 10% y 5% de probabilidad de excedencia en 50 años



Nota. La demanda S970 al ser un estiramiento a las ordenadas del espectro de diseño (S475) incrementa de forma considerable en la zona de aceleración constante y este disminuye de forma proporcional al aumentar el periodo.

2.3.1 Factores de Reducción de Resistencia Sísmica

Los Factores R para cada arquetipo y caso analizado fueron calculados considerando las componentes de ductilidad (R_μ), sobrerresistencia (R_Ω) y redundancia (R_R). Estas variables R_μ y R_Ω se cuantificaron con las relaciones de fuerza tratadas en el Estado del Arte. Mientras que para R_R se analizaron dos casos, el primero con la relación de fuerzas y el segundo con los valores propuestos en el ATC-19 representado por el símbolo R_R^* .

Capítulo tres

Resultados y discusión

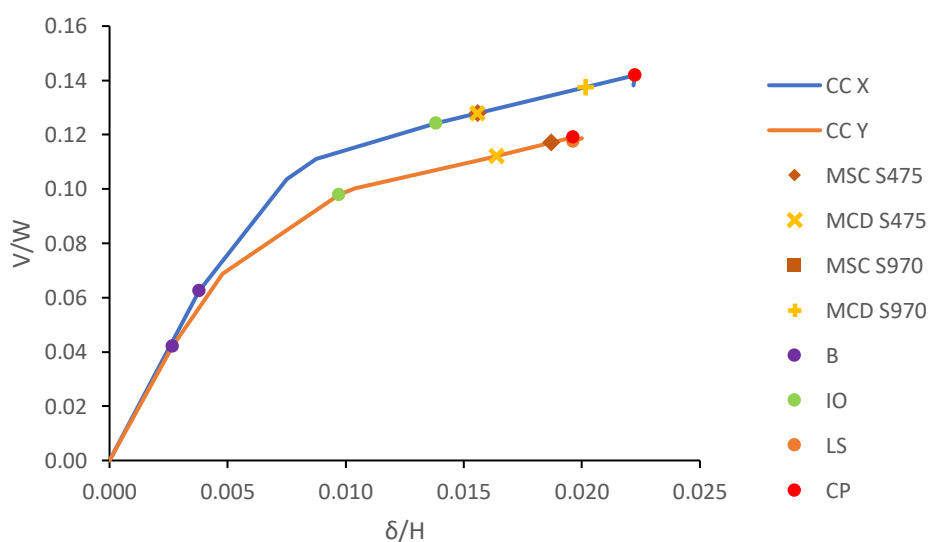
Posterior al diseño de los arquetipos, ejecución del análisis pushover, obtención de las curvas de capacidad, puntos de desempeño y cálculo de las relaciones para los componentes del Factor de Reducción de Resistencia Sísmica. En este capítulo se exponen el comportamiento no-lineal de los arquetipos y se discuten los factores R obtenidos.

3.1 Curva de capacidad y puntos de desempeño del arquetipo A1

En la dirección X con mayor cantidad de pórticos resistentes se logra el desempeño para S475 en puntos alrededor del 70% del desplazamiento último. Para S970 solamente se encuentra un punto de desempeño satisfactorio para el MCD al 90% del desplazamiento último siendo insatisfactorio para este nivel de demanda. En la dirección Y, con tres pórticos resistentes se logra el desempeño para S475, a un 95% para MSC y 83% para MCD del desplazamiento último. Los valores explícitos de estos puntos de desempeño se encuentran en Tabla 8.

Figura 9

Curva de Capacidad normalizada y puntos de desempeño para A1



Nota. Los puntos B, IO, LS, CP representan la primera rótula que entró en los estados de plastificación, ocupación inmediata, seguridad de vida y prevención de colapso respectivamente.

- La plastificación significativa se desarrolló en 0.004H y 0.063W en la dirección X, y para la dirección Y en 0.003H y 0.042W. Teniendo una relación con la demanda de diseño de 1.80 y 1.21 veces las características de diseño.
- La rigidez previa a la fluencia significativa es 0.86 veces la elástica en la dirección X y 0.81 para la dirección Y. En los desplazamientos la relación inelástica/elástica en esta zona son 2.13 y 1.50 para la dirección X e Y respectivamente.
- En la dirección X la inestabilidad del modelo se produjo al entrar las bases de las columnas de los ejes 2 y 3 al estado de CP. Mientras que en la dirección Y se produce sobrepasar el estado de CP las bases de las columnas en los ejes 1 y 2.

Tabla 8*Puntos de Desempeño para A1*

	S475			S970	
	Último	MSC	MCD	MSC	MCD
Dirección X					
du cm	31.83	22.30	22.26	-	28.83
Vu kN	2060.68	1856.85	1855.99	-	1996.43
Dirección Y					
du cm	28.08	26.74	23.44	-	-
Vu kN	1729.26	1700.19	1628.87	-	-

Nota.

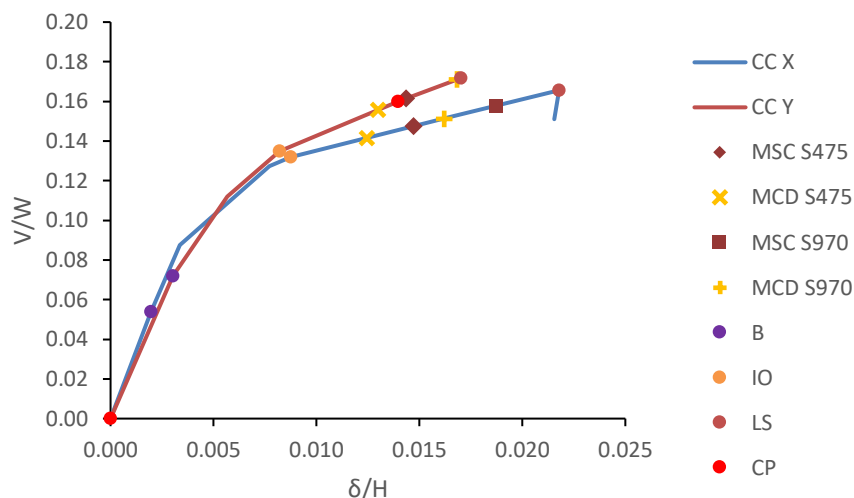
- El desempeño en la dirección X se dieron en puntos con un desplazamiento igual a 1.04 veces el desplazamiento elástico correspondiente a S475 y S970. Relación de cortante elástico/inelástico de 0.42 para S475 y 0.34 para S970.
- El punto de desempeño para S475 en la dirección Y se ubica en 1.10 y 1.25 veces el desplazamiento elástico correspondiente. Y la relación de cortante elástico e inelástico de 0.38 y 0.37.

3.2 Curvas de capacidad y puntos de desempeño del arquetipo A2

Los niveles de desempeño obtenidos para el análisis en la dirección X fueron satisfactorios para ambos niveles de demanda. Para S475 el desempeño se consiguió al 68% y 58%, para S970 al 87% y 75% dejando a la estructura aún con rigidez lateral, asegurando el nivel de seguridad de vida ante el sismo de diseño. En la dirección X con menor cantidad de pórticos resistentes el desempeño para S970 es completamente insatisfactorio al solamente alcanzarse el punto por el MCD al 100% del desplazamiento último, para el S475 el desempeño se ubica al 84% y 76%.

Figura 10

Curva de Capacidad normalizada y puntos de desempeño para A2



Nota. Los puntos B, IO, LS, CP representan la primera rótula que entró en los estados de plastificación, ocupación inmediata, seguridad de vida y prevención de colapso respectivamente.

- La fluencia significativa de los modelos se desarrolló para la dirección X en 0.002H y 0.0540W, y en 0.003H y 0.0718W en la dirección Y. Siendo su relación con la demanda de diseño 1.34 y 1.75 respectivamente.
- La rigidez del modelo inelástico previo a la fluencia en el punto B para la dirección X la rigidez es 1.15 veces la elástica y 1.17 para los desplazamientos. Para la dirección Y la relación de rigideces es 1.01 y la de desplazamientos 1.73.
- La inestabilidad en los modelos se produjo para la dirección X posterior a la entrada de todas las rótulas en vigas en la zona de plastificación y a la zona de LS en la base de las columnas de los ejes 1 y 3. En la dirección Y en el instante en que la base de las columnas del eje 3 entrón en la zona de CP.

Tabla 9

Puntos de Desempeño para A2

	S475			S970	
	Último	MSC	MCD	MSC	MCD
Dirección X					
du cm	31.15	21.05	17.81	26.78	23.16
Vu kN	964	859	824	919	881
Dirección Y					
du cm	24.34	20.52	18.58	-	24.05
Vu kN	1001	940	907	-	996

Nota.

- La relación de desplazamiento inelástico/elástico para S475 en la dirección X es 1.09 y 0.93, y la relación de cortantes 0.46 y 0.44 para MSC y MCD respectivamente. Para S970 es 1.07 y 0.93 para los desplazamientos, 0.38 y 0.36 para los cortantes correspondientes.
- En la dirección Y de análisis para S475 la relación de desplazamientos es 1.03 y 0.93, de cortante es de 0.49 y 0.48 para MSC y MCD respectivamente. Para S970 por MCD la relación de desplazamientos es de 0.93 y de cortante es 0.40.

3.3 Discusión de los resultados

Las magnitudes obtenidas para el factor R utilizando las relaciones de fuerzas de la curva de capacidad tratadas en el estado del arte fueron insatisfactorias siendo casi tres veces los valores utilizados para el diseño y no correlacionándose con los niveles de desempeño determinados por los métodos MSC y MCD. Aunque al reemplazar el componente de redundancia por los valores sugeridos en ATC (1995) los Factores R obtenidos tienen mejor relación con las magnitudes determinadas para estructuras de hormigón reforzado en otros trabajos como en Aguiar (2007) y Motiani et al. (2018) con magnitud de 6, y en Pinoargote Rovello (2014) con valor de 7.

Esta perspectiva contrasta con el desempeño de seguridad de vida para la demanda de diseño (S475) mencionado como objetivo en la NEC, debido a que este nivel se logra de forma satisfactoria en la dirección X desde 0.57 a 0.70 del desplazamiento último en el que los modelos matemáticos pierden rigidez y se vuelven inestables, mientras que para la dirección Y con menor número de ejes resistentes se vuelve más ajustado con una relación desde 0.76 a 0.95 del desplazamiento último. Siendo satisfactoria la magnitud de 8 para el factor R, coincidiendo con lo concluido en ATC (2009).

Saliendo de ese objetivo planteado por la NEC a otro como el de prevención de colapso mencionado como objetivo en investigaciones y normativas más cercanas al estado del arte como Deierlein et al. (2010), Hakim et al. (2014) y ASCE (2017a) el desempeño no se logra para ambos arquetipos analizados excepto para el caso específico del análisis en la dirección X de A2. En este caso el valor de R utilizado en el diseño sobrestima la capacidad de desarrollo no-lineal de los arquetipos, mostrando que esta magnitud sugerida en la NEC

(2015) debería de reducirse o modificarse con otros factores además de los de irregularidad en planta y elevación.

En este trabajo se observa un mejor desempeño no-lineal en los análisis en las direcciones con mayor número de ejes resistentes coincidiendo con lo tratado sobre la redundancia en ATC (1995). Por lo que se podría llegar a desarrollar en futuras investigaciones un nuevo coeficiente de modificación que implique el número de ejes resistentes proyectados en las nuevas estructuras.

Tabla 10

Componentes y factores R calculados

Variable	A1					A2				
	S475		S970			S475		S970		
	Último	FEMA	ASCE	FEMA	ASCE	Último	FEMA	ASCE	FEMA	ASCE
Dirección X										
μ	5.86	4.11	4.10	-	5.31	11.10	7.50	6.35	9.54	8.25
$R\mu$	2.17	2.40	2.40	-	2.91	1.95	2.19	2.28	2.66	2.77
$R\Omega$	4.14	3.73	3.73	-	4.01	4.11	3.66	3.51	3.92	3.75
RR	2.27	2.05	2.04	-	2.20	3.07	2.73	2.62	2.92	2.80
RR*	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$R\mu R\Omega RR$	20.36	18.35	18.34	-	25.64	24.55	21.86	20.99	30.41	29.15
$R\mu R\Omega RR^*$	8.97	8.97	8.97	-	11.66	8.00	8.00	8.00	10.40	10.40
Dirección Y										
μ	7.34	6.99	6.12	-	-	5.62	4.74	4.29	-	5.55
$R\mu$	2.58	2.62	2.74	-	-	1.91	2.03	2.10	-	2.49
$R\Omega$	3.44	3.38	3.24	-	-	4.20	3.94	3.80	-	4.18
RR	2.83	2.79	2.67	-	-	2.39	2.25	2.17	-	2.38
RR*	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
$R\mu R\Omega RR$	25.14	24.72	23.68	-	-	19.14	17.99	17.35	-	24.77
$R\mu R\Omega RR^*$	7.63	7.63	7.63	-	-	5.68	5.68	5.68	-	7.38

Nota. RR* representa al valor correspondiente al factor de redundancia según el número de pórticos resistentes propuestos en el ATC-19.

- Los valores obtenidos para el factor de sobre resistencia se relacionan con los expuestos para pórticos especiales a momento de hormigón armado de entre 3 y 4 expuestos en ATC (2009) y ASCE (2017b).

Conclusiones

La metodología para la cuantificación del factor R utilizando las relaciones de fuerza de los puntos notables de la Curva de Capacidad tratados por Aguiar (2007) no logran cuantificar la magnitud del Factor de Reducción de Resistencia Sísmica R. En contraste al reemplazar el Factor de Redundancia por los sugerido en el ATC-19 las magnitudes de R tienen mejor correlación con el desempeño no-lineal mostrando que este factor no podría cuantificarse por medio de las relaciones de fuerza de la curva de capacidad.

El factor R igual a 8 utilizado para el diseño y sugerido en la NEC-SE-DS sobrestimó de forma considerable el desempeño no-lineal de la estructura en tres de los cuatro escenarios analizados al analizar el desempeño para el sismo con probabilidad de excedencia de 5% en 50 años. El único escenario en que fue satisfactorio, las columnas en el diseño tenían una relación demanda/capacidad a flexo compresión de alrededor del 50%. El peor desempeño se produjo en las direcciones de análisis con menor cantidad de pórticos, además de ser la dirección de análisis con el menor desarrollo de la plastificación en las vigas mostrando la importancia de la redundancia estructural para lograr un correcto comportamiento inelástico.

Referente a los puntos de desempeño, los desplazamientos inelásticos en todos los casos analizados variaron con alrededor de $\pm 10\%$ respecto a sus correspondientes del análisis elástico. Siendo que estos arquetipos con periodos de vibración fundamentales de alrededor de 1.2s cumplen con la hipótesis de igual desplazamiento y no igual energía.

Recomendaciones

En base a la investigación realizada y a los resultados obtenidos, se plantean las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones alrededor del tema.

Realizar el diseño de los arquetipos por diferentes personas u obtenerlas de una base de datos pública para evitar que los propios vicios del diseñador interfieran en los resultados.

Expandir el análisis a estructuras irregulares para evaluar si la magnitud de los coeficientes de penalización por irregularidad en planta y altura son suficientes para asegurar el desempeño no-lineal.

Identificar las variables que influyen en la redundancia del sistema para tratarlas de forma explícita en una posible caracterización de los arquetipos a estudiarse.

Controlar la magnitud de la sobre resistencia local para buscar relaciones entre estas variables y el desempeño no-lineal de los arquetipos.

Referencias

- Abdi, H., Hejazi, F., & Jaafar, M. S. (2019). Response modification factor - Review paper. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 357(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/357/1/012003>
- Aguiar, R. (2007). *Factor de reducción de las fuerzas sísmicas en edificios de hormigón armado sin muros de corte*. CIMNE.
https://www.researchgate.net/publication/277666744_Factor_de_reduccion_de_las_fuerzas_sismicas_en_edificios_de_hormigon_armado_sin_muros_de_corte
- Aguiar, R., Pilatasig, J., & Cagua, B. (2020). *Pushover con Acoplamiento de CEINCI-LAB y OpenSees*. CIMNE.
https://www.researchgate.net/publication/343106104_Pushover_con_Acoplamiento_de_CEINCI-LAB_y_OpenSees
- Aliakbari, F., & Shariatmadar, H. (2019). Seismic response modification factor for steel slit panel-frames. *Engineering Structures*, 181, 427–436.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.027>
- Alvarado, J. (2015). *ESTUDIO DE LOS COEFICIENTES DE REDUCCIÓN DE RESPUESTA ESTRUCTURAL “R” DE LA NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN* [Universidad de Cuenca].
<https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/22233/1/Tesis.pdf>
- Applied Technology Council. (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. En *FEMA 440, Federal Emergency Management Agency, Washington DC*.
- ASCE. (2017a). ASCE standard, ASCE/SEI 41-17, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. En *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. ASCE.
- ASCE. (2017b). *Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-16)*. ASCE.

- ATC. (1995). *ATC 19: Structural Response Modification Factors*.
- ATC. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings (Volume 1)*.
- ATC. (2009). Quantification of building seismic performance factors. *Fema P695, June*, 421.
- Building Seismic Safety Council. (2020). *NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA P-2082-1)*.
https://www.wbdg.org/FFC/DHS/fema_p_2082_1_vol_1_pt_1_prov_pt_2_comm_2020.pdf
- Daei, A., & Poursha, M. (2021). On the accuracy of enhanced pushover procedures for seismic performance evaluation of code-conforming RC moment-resisting frame buildings subjected to pulse-like and non-pulse-like excitations. *Structures*, 32, 929–945.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.035>
- Deierlein, G. G., Reinhorn, A. M., & Willford, M. R. (2010). Nonlinear Structural Analysis For Seismic Design. *NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 4*, 4, 1–32.
- Dides, M. A., & de la Llera, J. C. (2005). A comparative study of concentrated plasticity models in dynamic analysis of building structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34(8), 1005–1026. <https://doi.org/10.1002/eqe.468>
- Hakim, R. A., Alama, M. S., & Ashour, S. A. (2014). Seismic Assessment of RC Building According to ATC 40, FEMA 356 and FEMA 440. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(11), 7691–7699. <https://doi.org/10.1007/S13369-014-1395-X>
- Lin, Y. Y., Chang, K. C., & Wang, Y. L. (2004). Comparison of displacement coefficient method and capacity spectrum method with experimental results of RC columns. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33(1), 35–48. <https://doi.org/10.1002/eqe.336>
- Mahmoudi, M., & Zaree, M. (2013). Determination the Response Modification Factors of Buckling Restrained Braced Frames. *Procedia Engineering*, 54, 222–231.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.020>

- Mahoney, M., & Hanson, R. D. (2018). *Seismic Performance Assessment of Buildings Volume 1-Methodology* (2th ed.). FEMA. https://www.fema.gov/media-library-data/1557508320921-d67f745e88e04e54a1f40f8e94835042/FEMA_P-58-1-SE_Volume1_Methodology.pdf
- Mandal, S., & Shendkar, M. (2020). *EVALUATION OF RESPONSE REDUCTION FACTOR OF RC-INFILLED FRAMES*. https://www.researchgate.net/publication/344362770_EVALUATION_OF_RESPONSE_REDUCTION_FACTOR_OF_RC-INFILLED_FRAMES
- Martino, R., Spacone, E., & Kingsley, G. (2004). Nonlinear pushover analysis of RC structures. *Structures Congress 2000: Advanced Technology in Structural Engineering*, 103, 1–8. [https://doi.org/10.1061/40492\(2000\)38](https://doi.org/10.1061/40492(2000)38)
- Masoudi, M., Eshghi, S., & Ghafory-Ashtiany, M. (2012). Evaluation of response modification factor (R) of elevated concrete tanks. *Engineering Structures*, 39, 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.02.015>
- MIDUVI. (2015a). *Norma Ecuatoriana de la Construcción, Cargas No Sísmicas (NEC - SE - CG)*. MIDUVI. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/08/NEC-SE-CG.pdf>
- MIDUVI. (2015b). *Norma Ecuatoriana de la Construcción, Cargas Sísmicas, Diseño Sismo Resistente (NEC-SE-DS)*. MIDUVI. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/02/NEC-SE-DS-Peligro-Sísmico-parte-1.pdf>
- Moehle, J. (2014). *Seismic Design of Reinforced Concrete Building*. McGraw-Hill.
- Motiani, R., Kunal, J. R., Gahrana, S., Nambiar, A., & Desai, M. (2018). Evaluation of response reduction factor by pushover analysis. *International Journal of Structural Engineering*, 9(2), 116–129. <https://doi.org/10.1504/IJSTRUCTE.2018.092999>
- Paredes Culcay, W. R. (2013). *Incidencia del factor de reducción de la fuerza sísmica “R” de la norma ecuatoriana de la construcción 2011 (NEC-2011) en el cálculo estructural del*

edificio de estructura mixta de 3 pisos de la Iglesia Cristiana Gran Campaña de Fe de la ciudad de Ambato [Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Civil].
<https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/6130>

Pinoargote Rovello, V. A. (2014). *Verificación del factor de reducción sísmico R, para el análisis inelástico de estructuras de hormigón armado de acuerdo al NEC-11* [Universidad Católica de Santiago de Guayaquil].
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/1332>

Reza Salimbahrami, S., & Gholhaki, M. (2019). Effects of Higher Modes and Degrees of Freedom (DOF) on Strength Reduction Factor in Reinforced Concrete Frames Equipped With Steel Plate Shear Wall. *Structures*, 19, 234–247.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.01.015>

Salem, Y. S., Lomiento, G., & Khan, J. (2018). *Assessment of Response Modification Factor of Reinforced Concrete Table Top Frames Structures Subjected to Seismic Loads* (pp. 55–71). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61914-9_5

Apéndice

Apéndice 1:

Componentes de la carga lineal equivalente de las paredes

Componente	Volumen m ³ /m ²	Peso Específico kN/m ³	Carga kN/m
Ladrillo rústico 26x13x7 cm	0.054	16.00	2.14
Mortero en junta de 2.5 cm	0.016	20.00	0.82
Mortero de revestimiento 1.5 cm	0.030	20.00	1.50
		Total	4.46

Apéndice 2:

Tabla del detalle de refuerzo de las secciones de vigas utilizadas en los arquetipos estructurales

Marca	Superior		Inferior	
	Detalle	Área cm ²	Detalle	Área cm ²
30x35 0.91/0.47	4ø14 + 1ø16	8.168	2ø14 + 1ø10	4.210
30x35 0.85/0.43	5ø14	7.697	2ø14 + 1ø10	3.864
25x30 0.85/0.49	2ø12 + 2ø14	5.341	2ø12 + 1ø12	3.047
25x30 0.72/0.36	4ø12	4.524	2ø12	2.262
25x30 0.61/0.36	2ø12 + 1ø14	3.801	2ø12	2.262
25x30 0.60/0.36	2ø12 + 2ø12	3.833	2ø12	2.262
25x30 0.54/0.36	3ø12	3.393	2ø12	2.262
25x32 0.91/0.45	4ø14	6.158	2ø14	3.079
25x32 0.79/0.45	2ø12 + 2ø14	5.341	2ø12 + 1ø10	3.047

Apéndice 3:

VARIABLES DE LA CURVA DE CAPACIDAD DE A1 EN LA DIRECCIÓN X

d cm	V kN	d/H	V/W	B	IO	LS	CP
0	0	0.000	0.0000	0	0	0	0
5.430379	907.9208	0.004	0.063	4	0	0	0
10.73554	1504.994	0.008	0.1036	106	0	0	0
12.50541	1611.281	0.009	0.1109	148	0	0	0
19.77315	1802.825	0.014	0.1241	166	66	0	0
31.83166	2060.675	0.022	0.1419	177	156	2	6
31.73522	2007.111	0.022	0.1382	176	153	5	6

Apéndice 4:*Variables de la curva de capacidad de A1 en la dirección Y*

d cm	V kN	d/H	V/W	B	IO	LS	CP
0	0	0.000	0.0000	0	0	0	0
3.827734	610.0336	0.003	0.0420	2	0	0	0
6.845739	999.7269	0.005	0.0688	83	0	0	0
13.87885	1420.47	0.010	0.0978	155	19	0	0
14.8546	1456.211	0.010	0.1003	167	31	0	0
22.71101	1613.085	0.016	0.1111	170	148	0	0
28.08385	1729.259	0.020	0.1191	168	161	0	3
28.0842	1706.462	0.020	0.1175	168	156	2	6
28.60162	1722.617	0.020	0.1186	168	156	2	6

Apéndice 5:*Variables de la curva de capacidad de A2 en la dirección X*

d cm	V kN	d/H	V/W	B	IO	LS	CP
0	0	0.000	0.0000	0	0	0	0
2.806	314.2347	0.002	0.0540	1	0	0	0
4.805	509.5033	0.003	0.0875	50	0	0	0
11.052	740.7905	0.008	0.1272	116	0	0	0
12.525	768.6479	0.009	0.1320	131	4	0	0
23.7	886.4875	0.017	0.1522	135	115	0	0
31.149	964.3683	0.022	0.1656	126	124	11	0
30.814	879.0087	0.022	0.1509	126	115	20	0

Apéndice 6:*Variables de la curva de capacidad de A2 en la dirección Y*

d cm	V kN	d/H	V/W	B	IO	LS	CP
0	0	0.000	0.0000	0	0	0	0
4.333	418.2348	0.003	0.0718	4	0	0	0
8.096	651.5172	0.006	0.1119	58	0	0	0
11.727	786.0378	0.008	0.1350	85	4	0	0
19.949	931.2403	0.014	0.1599	89	58	0	3
24.325	1000.632	0.017	0.1718	101	70	0	3
24.325	1000.637	0.017	0.1718	101	70	0	3
24.325	1000.669	0.017	0.1718	101	70	0	3
24.335	1000.825	0.017	0.1719	101	70	0	3
24.336	999.2952	0.017	0.1716	101	68	2	3
24.39	987.9199	0.017	0.1697	100	68	2	3
24.39	987.923	0.017	0.1697	100	68	2	3
24.421	988.5289	0.017	0.1698	99	68	2	3