

**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA PARA
UNA ESTRUCTURA DE CONCRETO TIPO PAPR DE MEDIANA ALTURA
UBICADA EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA**

MARCELA CARRASQUILLA SOLIS

LEIDY KARINA GUEVARA RAMIREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2019

**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA PARA
UNA ESTRUCTURA DE CONCRETO TIPO PAPR DE MEDIANA ALTURA
UBICADA EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA**

MARCELA CARRASQUILLA SOLIS

LEIDY KARINA GUEVARA RAMIREZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Director:

OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO

Ph D. en ingeniería civil

Codirector:

JESUS DANIEL VILLALBA MORALES

Ph D. en ingeniería civil

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2019

DEDICATORIA

A la mujer más valiosa, mi mamá, Luz Dary Ramírez Castañeda, quien ha sido el motor de mi vida, este gran triunfo se lo dedico a ella, porque siempre estuvo brindándome su apoyo, creyendo en mí, creyendo que sería capaz de cumplir cada cosa que me propusiera, siempre estuvo dando su voz de aliento, recalcando mis capacidades como persona y como futura profesional. Ella, quien ha hecho todo lo posible porque su hija pudiera ser una profesional, ahora cumpló uno de mis sueños, pero sé que también estoy cumpliendo el suyo.

Leidy Karina Guevara Ramírez.

Sin lugar a dudas, a esa persona que día a día me llenó el alma de esperanza, de fuerza, para culminar con esta etapa de vida. Esto es para tí, para que se convierta en una motivación con tu proyecto de vida, para enseñarte que se puede soñar, y se pueden cumplir los sueños, para mostrarte que no hay nada que nos quede grande, por difícil que parezca. Mantén siempre la confianza en Dios y en tí, juntas llegaremos tan lejos como queramos. Te amo, Geraldine Carrasquilla S.

Marcela Carrasquilla Solís.

AGRADECIMIENTOS

Y hubo un día cualquiera en 2012 donde, sentí en mi corazón que quería estudiar una ingeniería, aún no tenía bien definida cual, pero me aferré a esa idea, y se las di a conocer a ustedes dos, Alexander y Mariela, quienes al verme tan convencida, y sin tener idea alguna de cómo harían a lo largo del camino para brindarme lo necesario para llevar a cabo este proyecto, se montaron a este barco, y quitaron las anclas, llenos de muchas dudas, pero siempre confiados en Dios, y en lo que yo podría llegar a alcanzar. El apoyo incondicional que me han brindado desde el primer momento no tiene precio, esas ganas de ayudarme a cumplir con este sueño que se me metió en la cabeza, sin pensarlo dos veces, me hizo sentir a lo largo del camino que este no era mi sueño, sino que era el sueño de los tres. Gracias por no desfallecer a pesar de las adversidades, gracias por estar siempre ahí, apoyándome en todo momento, gracias por entender que no sólo necesitaba un apoyo económico, sino que necesitaba de uno más importante, y era el apoyo espiritual y moral; gracias por cada una de las palabras de ánimo que necesité muchas veces cuando creía que tal vez no iba a poder llegar hasta aquí, gracias por creer en mí hasta en los instantes en donde yo misma me perdí la confianza. Gracias por tanto amor, que sin duda alguna es el que nos tiene juntos culminando esta etapa. Hoy, agradeciendo a Dios por habernos brindado absolutamente todo para ser felices y triunfar, quiero decíles, lo logramos, llegamos al final de este sueño, lo hicimos realidad. Los amo, y les estaré infinitamente agradecida, porque a ustedes les debo todo lo que tengo, y todo lo que soy.

Marcela Carrasquilla Solís

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	18
1. OBJETIVOS.....	20
1.1 OBJETIVO GENERAL	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
2. MARCO TEÓRICO	21
2.1 COEFICIENTE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA, R	21
2.2 RIOSTRAS DE PANDEO RESTRINGIDO.....	21
2.4 NIVEL DE DESEMPEÑO.....	23
3. METODOLOGÍA.....	25
3.1 ESTABLECIMIENTO DE PARÁMETROS DE ANÁLISIS	25
3.2 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LA ESTRUCTURA	25
3.3 DISEÑO DE REFUERZO PARA VIGAS Y COLUMNAS	26
3.4 DEFINICIÓN DE POSICIONAMIENTO Y CANTIDAD DE RIOSTRAS.....	26
3.5 ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL – PUSHOVER	28

3.6 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA, R.....	28
4. RESULTADOS	30
4.1 MODELO ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO ESTUDIADO.....	30
4.2 SELECCIÓN DE RIOSTRAS EMPLEADAS	31
4.3 DEFINICIÓN DE POSICIONAMIENTO Y CANTIDAD DE RIOSTRAS.....	31
4.4 ANÁLISIS DE CARGAS.....	34
4.5 NIVEL DE DESEMPEÑO: OCUPACIÓN INMEDIATA (IO)	35
4.5.1 Dimensiones de los elementos estructurales.....	35
4.5.2 Masa de la estructura.	36
4.5.3 Análisis FHE y control de derivas.	36
4.5.4 Diseño de vigas y columnas inicial.	37
4.5.5 Análisis estático no lineal – Pushover.....	38
4.5.6 Cálculo del coeficiente de disipación de energía, R.....	40
4.5.7 Verificación del nivel de desempeño.....	41
4.6 NIVEL DE DESEMPEÑO: SEGURIDAD DE VIDA (LS)	47
4.6.1 Dimensiones de los elementos estructurales.....	47
4.6.2 Masa de la estructura.	47
4.6.3 Análisis FHE y control de derivas.	48
4.6.4 Diseño de vigas y columnas inicial.	48

4.6.5 Análisis estático no lineal – Pushover.....	49
4.6.6 Cálculo del coeficiente de disipación de energía, R.....	51
4.6.7 Verificación del nivel de desempeño.....	53
5. CONCLUSIONES	56
6. RECOMENDACIONES.....	57
BIBLIOGRAFÍA.....	58
ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1: Niveles de desempeño (Traducción propia)	24
Tabla 2: Características de las riostras.....	31
Tabla 3: Análisis de BRB en plano XZ	32
Tabla 4: Análisis de BRB en plano YZ	32
Tabla 5: Carga viva sobre la estructura	35
Tabla 6: Carga muerta sobre de la estructura	35
Tabla 7: Masa de la estructura	36
Tabla 8: Análisis FHE	37
Tabla 9: Punto de funcionamiento	39
Tabla 10: Punto elástico máximo	40
Tabla 11: Punto de fluencia	41
Tabla 12: Punto de funcionamiento	43
Tabla 13: Punto de fluencia	44
Tabla 14: Punto de funcionamiento	46
Tabla 15: Nivel de desempeño	46
Tabla 16: Masa de la estructura	47
Tabla 17: Análisis FHE	48

Tabla 18: Punto de funcionamiento	51
Tabla 19: Punto elástico máximo	52
Tabla 20: Punto de fluencia	52
Tabla 21: Punto de funcionamiento	54
Tabla 22: Nivel de desempeño	55

LISTA DE GRÁFICAS

Pág.

Gráfica 1: Curva de rendimiento plano XZ.....	33
Gráfica 2: Curva de rendimiento plano YZ.....	33
Gráfica 3: Representación bilineal	40
Gráfica 4: Representación bilineal	43
Gráfica 5: Representación bilineal	51

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1: Determinación del R	22
Figura 2: Configuraciones de posición de BRB	27
Figura 3: Configuración estructural	30
Figura 4: Modelo seleccionado	34
Figura 5: Sección vigas y columnas	38
Figura 6: Curva de capacidad XZ	38
Figura 7: Curva de capacidad YZ	39
Figura 8: Sección vigas y columnas	42
Figura 9: Curva de capacidad XZ	42
Figura 10: Sección vigas y columnas	45
Figura 11: Curva de capacidad XZ	45
Figura 12: Sección vigas y columnas	49
Figura 13: Curva de capacidad XZ	50
Figura 14: Curva de capacidad XZ	50
Figura 15: Sección vigas y columnas	53
Figura 16: Curva de capacidad	54

LISTA DE ANEXOS

**(Ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos
de la Biblioteca UIS)**

Anexo A. Control de derivas IO

Anexo B. Diseño viga IO R=7

Anexo C. Diseño columna IO R=7

Anexo D. Diseño viga IO R=2.76

Anexo E. Diseño columna IO R=2.76

Anexo F. Diseño viga IO R=1.9

Anexo G. Diseño columna IO R=1.9

Anexo H. Diseño viga LS R=7

Anexo I. Diseño columna LS R=7

Anexo J. Diseño viga LS R=4.06

Anexo K. Diseño columna LS R=4.06

RESUMEN

TÍTULO: Determinación del coeficiente de disipación de energía para una estructura de concreto tipo PAPR de mediana altura ubicada en la ciudad de Bucaramanga*.

AUTORES: Marcela Carrasquilla Solis
Leidy Karina Guevara Ramirez**

PALABRAS CLAVE: Pórtico con arriostramiento con pandeo restringido, riostras de pandeo restringido, coeficiente de disipación de energía, análisis estático no lineal-Pushover, curva de capacidad, punto de funcionamiento, nivel de desempeño.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo, se realiza el procedimiento de cálculo del coeficiente de disipación de energía para una estructura de concreto tipo pórtico con arriostramiento con pandeo restringido (PAPR como lo define el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente NSR-10). La estructura es regular en planta y altura y el análisis se realiza para los niveles de desempeño de Ocupación Inmediata (IO, en inglés) y de Seguridad de Vida (LS, en inglés). Para esto se hace un análisis de rendimiento de las riostras de pandeo restringido (BRB) en el control de desplazamiento de techo en diez (10) configuraciones estructurales diferentes, variando el posicionamiento y la cantidad de riostras para finalmente seleccionar el modelo estructural que presente mayor rendimiento midiendo el control de derivas. Se hace el control de desplazamiento a la estructura seleccionada, chequeando el cumplimiento de deriva máxima de piso (1%) permitida por la NSR-10, posteriormente, se realiza el análisis estático no lineal- Pushover (Monotónico), obteniendo la curva de capacidad para determinar el punto de funcionamiento por el método de linealización equivalente estipulado en FEMA 440 para verificar el nivel de desempeño de la estructura y, finalmente, determinar el coeficiente de disipación de energía (ajustando la curva de capacidad a la curva bilineal idealizada).

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela e Ingeniería Civil. Director: Ph D. Oscar Javier Begambre Carrillo

ABSTRACT

TITLE: Determination of the energy dissipation coefficient for a concrete structure type PAPR of medium height located in the city of Bucaramanga*.

AUTHORS: Marcela Carrasquilla Solis
Leidy Karina Guevara Ramirez**

KEYWORDS: Reinforced concrete frame strengthened with buckling restrained braces, buckling restrained braces, energy dissipation coefficient, non-linear static analysis Pushover, capacity curve, performance point, performance level.

DESCRIPTION:

In this work, the energy dissipation coefficient is determined for a regular reinforced concrete frame strengthened with buckling restrained braces (BRB). The structure is regular in plant and height, and the analysis to levels performance immediate occupation. (IO) and life security (LS) is make. For this, a performance analysis of buckling restrained braces in roof displacement control for a ten (10) different structural configuration is make, varying the positioning and the amount of braces and, finally, the structural modal the have the best performance in story drift control is selected. The displacement control is made to the selected structure, checking the maximum story drift (1%) allowed by NSR-10; Subsequently, the non-linear static analysis Pushover (Monotonic) is performed, obtaining the capacity curve to determine the performance point by the equivalent linearization method of FEMA 440 to verify the level of performance of the structure and, finally, determinate the energy dissipation coefficient adjusting the capacity curve to the idealized bilinear curve.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela e Ingeniería Civil. Director: Ph D. Oscar Javier Begambre Carrillo

INTRODUCCIÓN

El diseño sísmico de estructuras en Colombia se rige por los parámetros establecidos en la NRS-10. Esta normatividad permite diseñar la estructura para una carga sísmica menor a la que actuaría sobre el edificio (fuerza de diseño, E) cuando se presenta un sismo de diseño.

El coeficiente de disipación de energía, R , es el factor de reducción de la fuerza sísmica (F) para obtener la fuerza de diseño (E) y se define como la capacidad que tiene la estructura para disipar energía en el rango inelástico. La NSR-10 define el valor de este coeficiente según el tipo de sistema estructural y el grado de irregularidad de la edificación. Sin embargo, no contempla el uso del R para el diseño sísmico de estructuras tipo pórtico de concreto con arriostramiento con pandeo restringido (PAPR).

Una estructura PAPR es un pórtico de concreto reforzado que cuenta con sistemas de disipación de energía tipo riostras de pandeo restringido (RPR). Estas riostras

mejoran el desempeño estructural, otorgando rigidez y protección adicional al sistema*.

En este trabajo, se presenta un breve marco teórico, haciendo énfasis en el significado y el cálculo del coeficiente de disipación de energía; el diseño y modelamiento de PAPR; el concepto de nivel de desempeño. Posteriormente se hace una breve descripción de la selección del sistema PAPR estudiado y las RPR utilizadas en el diseño; además, se presentan los resultados obtenidos del análisis estático no lineal, la curva de capacidad, el punto de funcionamiento y el coeficiente de disipación de energía, R , para dos niveles de desempeño: Ocupación inmediata (IO, en inglés) y Seguridad de vida (LS, en inglés); por último, se dan las conclusiones y recomendaciones resultantes del proceso de investigación.

*OVIEDO, Juan; DUQUE, María Del Pilar. "Disipadores histeréticos metálicos como técnica de control de respuesta sísmica en edificaciones colombianas" En: Revista EIA No. 11. Julio de 2009. p 51-63

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el coeficiente de disipación de energía para una estructura de concreto tipo pórtico con arriostramiento con pandeo restringido.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar la curva de capacidad de la estructura.

Ajustar el punto de desempeño resultante de la superposición de la curva de capacidad y el espectro de aceleración al nivel de desempeño propuesto.

Determinar el valor de R correspondiente a la estructura en análisis mediante el procedimiento propuesto en el método de representación bilineal.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 COEFICIENTE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA, R

El factor R es una herramienta esencial de diseño sísmico, que define el nivel de inelasticidad esperado en los sistemas estructurales durante un evento sísmico. Refleja la capacidad de la estructura para disipar energía a través de un comportamiento inelástico. El factor R se usa para reducir las fuerzas de diseño en el diseño sismo resistente y considera la amortiguación, la capacidad de disipación de energía y la sobre resistencia.

2.2 RIOSTRAS DE PANDEO RESTRINGIDO

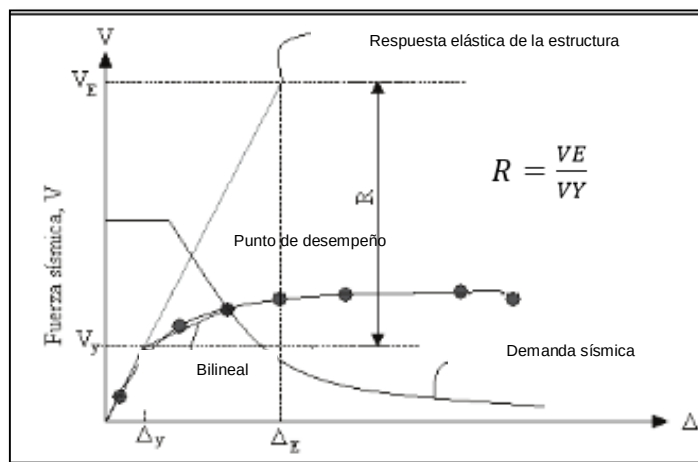
Las riostras de pandeo restringido (RPR o BRB, en inglés) son ampliamente utilizadas en el diseño sísmico y la actualización de edificios, especialmente en los Estados Unidos y Japón. El uso efectivo de riostras de pandeo restringido mejora el rendimiento del sistema estructural bajo terremotos severos.

La riostra con pandeo restringido consiste en una placa central de acero restringida por un tubo lleno de mortero u otro mecanismo que previene el pandeo por flexión general de la placa central.

2.3 EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE R

La evaluación del R se realiza ajustando la curva de capacidad o espectro de capacidad a una curva bilineal idealizada, que tiene en cuenta la demanda (punto de desempeño) como se muestra en la Figura 1.

Figura 1: Determinación del R



Fuente: VALENCIA, Doralba y VALENCIA, Gabriel. "Evaluación del coeficiente de disipación de energía, R, para algunos tipos de estructuras de acero". En: *Revista ingeniería e investigación*. Vol, 28. no, 1, abril de 2008, p. 43

Donde:

VE: Cortante elástica máxima que depende del nivel de amenaza sísmica considerado cuando el sistema se comporta elásticamente.

VY: Cortante elástica en el punto de intersección de la bilineal (cortante de fluencia).

2.4 NIVEL DE DESEMPEÑO

El nivel de desempeño describe un estado límite de daño, el cual representa una condición límite establecida en función de los posibles daños físicos sobre la edificación, la amenaza sobre la seguridad de los ocupantes de la edificación inducidos por estos daños y la funcionalidad de la edificación posterior al terremoto, es una expresión de la máxima extensión de daño, donde se considera tanto la condición de los elementos estructurales como de los elementos no estructurales.

En la Tabla 1, tomada de la norma ATC-40, se describen las características del comportamiento estructural de una edificación en cada nivel de desempeño.

Tabla 1: Niveles de desempeño (Traducción propia)

NIVEL DE DESEMPEÑO	DESCRIPCIÓN DE LOS DAÑOS
SP-1 OCUPACIÓN INMEDIATA	El estado de daño post-terremoto en el que solo ha ocurrido un daño estructural muy limitado. El riesgo de lesiones que pongan en peligro la vida por fallas estructurales es insignificante, y la construcción debe ser segura para una salida, ingreso y ocupación ilimitadas.
SP-2 DAÑOS	Este término en realidad no es un nivel específico, sino un rango de estados de daños posteriores al terremoto que puede variar desde SP-1, ocupación inmediata hasta SP-3, seguridad de la vida.
SP-3 SEGURIDAD DE VIDA	El estado de daño después del terremoto en el que podría haber ocurrido un daño significativo, pero en el cual queda algo de margen contra el colapso estructural o parcial
SP - 4 SEGURIDAD LIMITADA	Este término actualmente no es un nivel específico, pero un rango de estado de daño después del terremoto que es menor que SP-3, Seguridad de vida y mayor que Sp-5 Estabilidad estructural.
SP -5 ESTABILIDAD ESTRUCTURAL	Este nivel es el estado límite de daño estructural después del terremoto en el que los sistemas estructurales de los edificios están al borde de experimentar el colapso parcial o total. Ocurre el daño sustancial de la estructura, incluyendo la degradación potencial en la rigidez y el sistema lateral de resistencia de fuerza.

Fuente: Seismic evaluation and retrofit of concrete building (Applied Technology Council, ATC-40).

3. METODOLOGÍA

3.1 ESTABLECIMIENTO DE PARÁMETROS DE ANÁLISIS

Se definieron los niveles de desempeño bajo los cuales se realizó el cálculo del coeficiente de disipación de energía R , las riostras de pandeo restringido que se utilizaron en la estructura, la configuración estructural del edificio, así como las dimensiones de los miembros estructurales y los materiales utilizados en el análisis.

3.2 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LA ESTRUCTURA

Partiendo de los parámetros establecidos para el análisis, se realizó el cálculo de cargas totales (carga viva y carga muerta) de la edificación. Posteriormente, se estudió el comportamiento sísmico del edificio mediante la aplicación del método de Fuerza Horizontal Equivalente FHE tal como se estipula en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 para tener el control de derivas.

3.3 DISEÑO DE REFUERZO PARA VIGAS Y COLUMNAS

La estructura estudiada está ubicada en la ciudad de Bucaramanga, consta de 7 pisos y es regular en planta y altura. Los análisis realizados en la estructura son tridimensionales.

Para determinar las solicitaciones máximas en vigas y columnas, se utilizó inicialmente el coeficiente de disipación de energía, R , para una estructura de concreto tipo pórtico resistente a momento ($R=7$) en el cálculo de la fuerza sísmica de diseño (E).

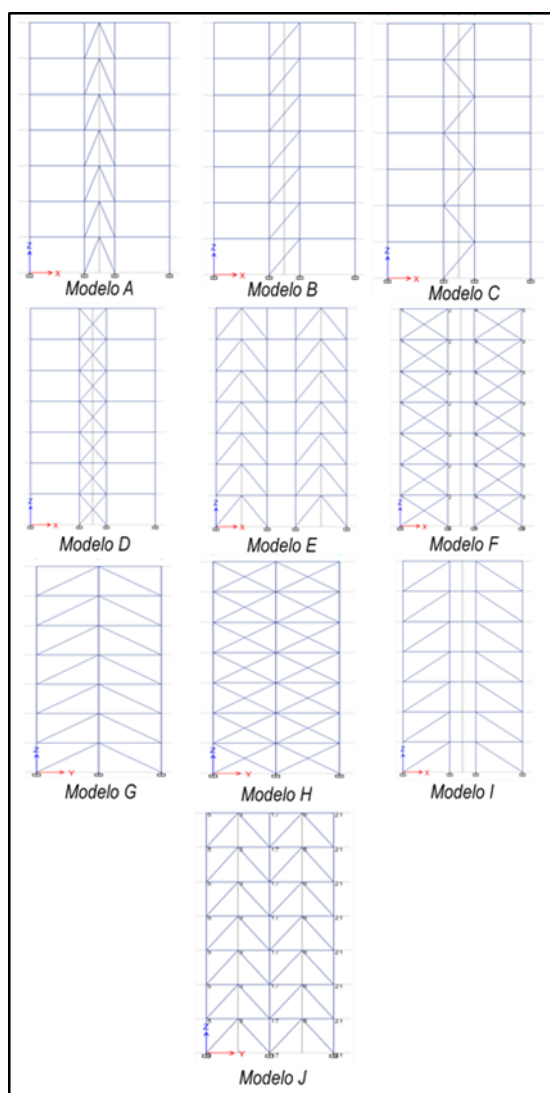
El cálculo del refuerzo requerido por la solicitación máxima de cargas para vigas y columnas, se hizo siguiendo los parámetros de diseño sismo resistentes estipulados en el reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

3.4 DEFINICIÓN DE POSICIONAMIENTO Y CANTIDAD DE RIOSTRAS

Para definir la cantidad de riostras a colocar en la estructura, y el posicionamiento, se realizó un análisis de control de desplazamiento en el último piso para las configuraciones mostradas en la Figura 2.

Las características de las riostras con pandeo restringido se encuentran en la Tabla 2.

Figura 2: Configuraciones de posición de BRB



3.5 ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL – PUSHOVER

Se realizó el análisis estático no lineal – Pushover (monotónico), para obtener la curva de capacidad de la estructura y el punto de funcionamiento (Método de Linealización equivalente) basado en los lineamientos de FEMA 440, ATC-40 y ASCE 41-13.

3.6 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA, R

El coeficiente de disipación de energía se calcula como la relación entre el cortante máximo elástico y el cortante de fluencia, expresado en la Ecuación 1.

$$R=V_E/V_Y \qquad \textbf{Ecuación 1}$$

Donde el cortante de fluencia, se determina a partir de la representación bilineal del comportamiento elástico perfectamente plástico de la estructura, como se mostró en la Figura 1. Esta representación bilineal se construye partiendo del punto de funcionamiento de la estructura, trazando una línea recta desde dicho punto hasta la intersección con la curva elástica, de forma tal que las áreas comprendidas entre

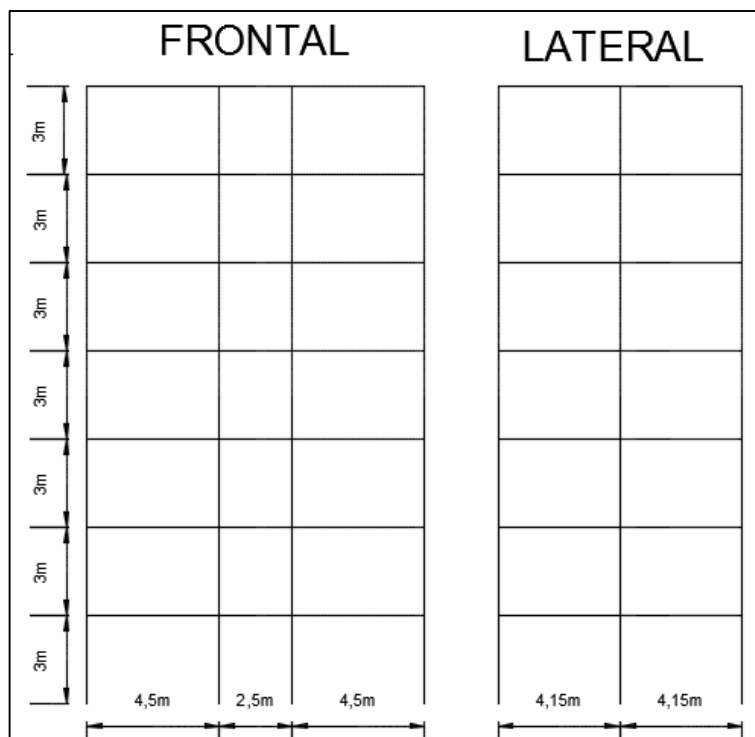
la curva de capacidad y la bilineal sean aproximadamente iguales para que haya equilibrio de energía asociada a la curva de capacidad y la representación bilineal.

4. RESULTADOS

4.1 MODELO ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO ESTUDIADO

La configuración estructural del edificio estudiado se muestra en la Figura 3.

Figura 3: Configuración estructural



4.2 SELECCIÓN DE RIOSTRAS EMPLEADAS

Las riostras empeladas para el análisis de la estructura, se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Características de las riostras

Tipo de BRB	Área del núcleo [cm²]	Rigidez del segmento elástico [kN/m]	Longitud del núcleo de fluencia [m]
StarBRB_4	25.8	794162.58	4.27
StarBRB_4.5	29	978570.45	4.27
StarBRB_5	32.3	1022282.42	4.27

4.3 DEFINICIÓN DE POSICIONAMIENTO Y CANTIDAD DE RIOSTRAS

Se realizó el análisis para las diez (10) configuraciones estructurales mostradas en la Figura 2, manteniendo la regularidad del edificio. Para seleccionar la configuración de riostras adecuada, se tuvo en cuenta el rendimiento (la relación entre el porcentaje de reducción de desplazamiento de techo con la cantidad de riostras en la estructura) de las riostras y la cantidad colocada. Las Tablas 3 y 4 muestran los resultados del análisis.

Tabla 3: Análisis de BRB en plano XZ

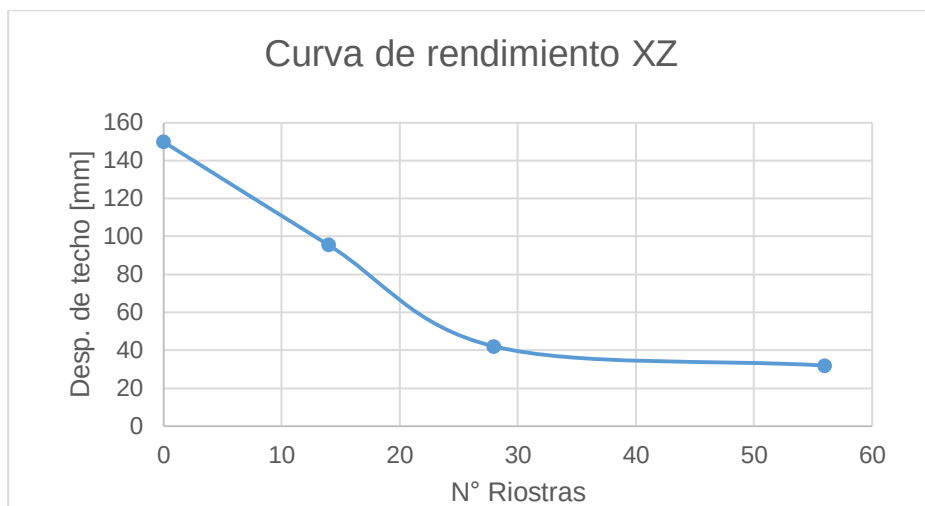
Modelo	N° Riostras	Desplazamiento de techo [mm]	Rendimiento
0	0	149.849	-
C	14	96.237	2.556%
B	14	95.374	2.597%
A	28	92.866	1.358%
D	28	88.01	1.474%
I	28	41.983	2.571%
E	56	33.866	1.382%
F	56	31.846	1.406%

Tabla 4: Análisis de BRB en plano YZ

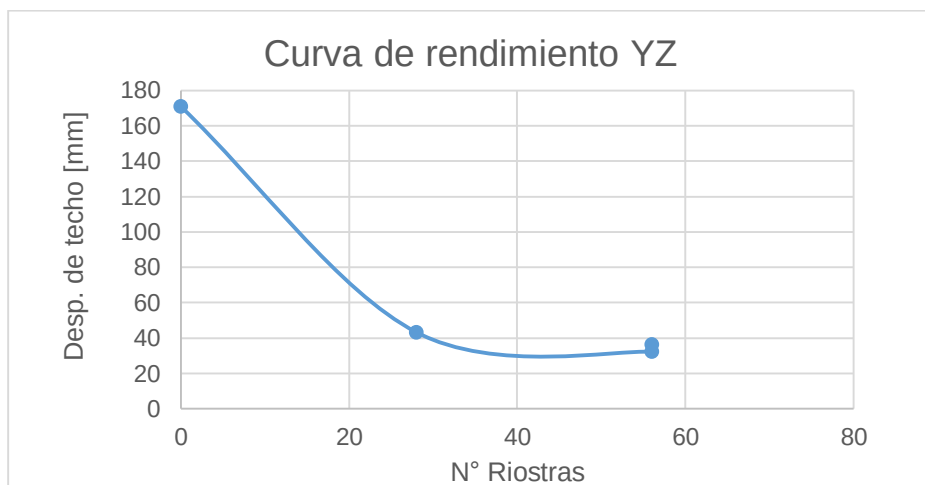
Modelo	N° Riostras	Desplazamiento de techo [mm]	Rendimiento
0	0	170.761	-
G	28	43.285	2.666%
H	56	32.288	1.448%
J	56	36.406	1.405%

En las Gráficas 1 y 2 se puede evidenciar el comportamiento de los rendimientos de cada modelo.

Gráfica 1: Curva de rendimiento plano XZ

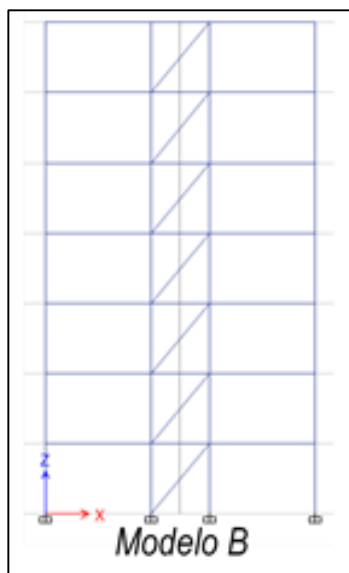


Gráfica 2: Curva de rendimiento plano YZ



Finalmente, se observa que el modelo que presenta mejor relación entre el rendimiento y la cantidad de riostras, es el modelo B, mostrado en la Figura 4.

Figura 4: Modelo seleccionado



4.4 ANÁLISIS DE CARGAS

Los elementos tenidos en cuenta para el cálculo de carga muerta y carga viva actuante en el sistema estructural estudiado, así como su respectivo valor de carga sugerido por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 se muestran en las Tablas 5 y 6.

Tabla 5: Carga viva sobre la estructura

CARGA VIVA		
COMPONENTES	Carga	Unidades
Residencial: Cuartos privados y sus corredores	1.8	kN/m ²
CARGA VIVA TOTAL	1.8	kN/m2

Tabla 6: Carga muerta sobre de la estructura

CARGA MUERTA		
COMPONENTES	Carga	Unidades
Baldosa cerámica (20mm) sobre 25 mm de mortero	0.8	kN/m ²
Membrana impermeable: Bituminosa, superficie lisa	0.1	kN/m ²
Fachada y particiones de mampostería	3	kN/m2
CARGA MUERTA TOTAL	3.9	kN/m2

El peso propio de la estructura es tenido en cuenta al momento de correr el análisis de FHE, así como el análisis estático no lineal en el software.

4.5 NIVEL DE DESEMPEÑO: OCUPACIÓN INMEDIATA (IO)

4.5.1 Dimensiones de los elementos estructurales. Para este nivel de desempeño, la estructura cuenta con las siguientes dimensiones:

- 4.5.1.1 Columnas: 0.4m x 0.5m
- 4.5.1.2 Vigas: 0.4m x 0.4m
- 4.5.1.3 Riostras: 0.2m x 0.25m
- 4.5.1.4 Viguetas: 0.1m x 0.25m
- 4.5.1.5 Loseta: 0.05m
- 4.5.1.6 Separación de nervios: 0.6m

4.5.2 Masa de la estructura. La masa total de la estructura para el nivel de desempeño de ocupación inmediata se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7: Masa de la estructura

MASA DEL EDIFICIO		
COMPONENTES	Masa	Unidades
Masa del sistema estructural	3953.341	KN
Masa por carga muerta	372.255	KN
MASA TOTAL DEL EDIFICIO	4325.596	KN

4.5.3 Análisis FHE y control de derivas. El detalle del análisis FHE realizado a la estructura se muestra en la Tabla 8. se realizó el procedimiento del chequeo de derivas teniendo en cuenta los requerimientos de deriva máxima estipulado en la

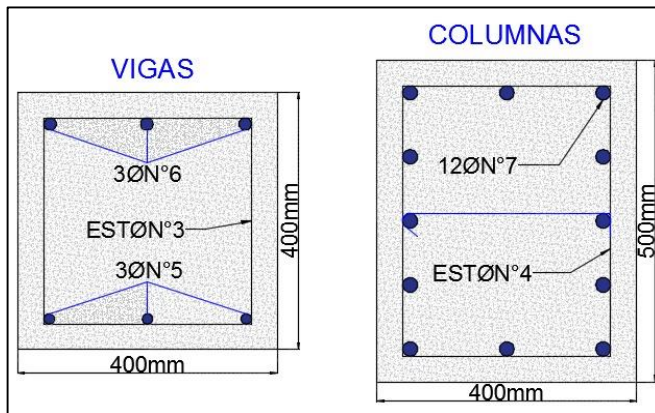
NSR-10. Las derivas de piso obtenidas se encuentran dentro del límite máximo del 1% de la altura de piso (Ver Anexo A).

Tabla 8: Análisis FHE

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Aa	0.25	-
Av	0.25	-
Tipo de suelo	C	-
Fa	1.15	-
Fv	1.55	-
I	1	-
T	0.583	S
Sa	0.7188	
Vs	2841.73	kN
FS ₁	101.49	kN
FS ₂	202.981	kN
FS ₃	304.471	kN
FS ₄	405.962	kN
FS ₅	507.462	kN
FS ₆	608.943	kN
FS ₇	710.433	kN

4.5.4 Diseño de vigas y columnas inicial. Inicialmente se realizó el diseño del refuerzo de vigas y columnas para las solicitaciones máximas obtenidas con una fuerza sísmica de diseño (E) reducida con un $R=7$ (Ver Anexos B y C). Este diseño se verificó posteriormente. Las dimensiones de vigas y columnas, así como su refuerzo se muestran en la Figura 5.

Figura 5: Sección vigas y columnas

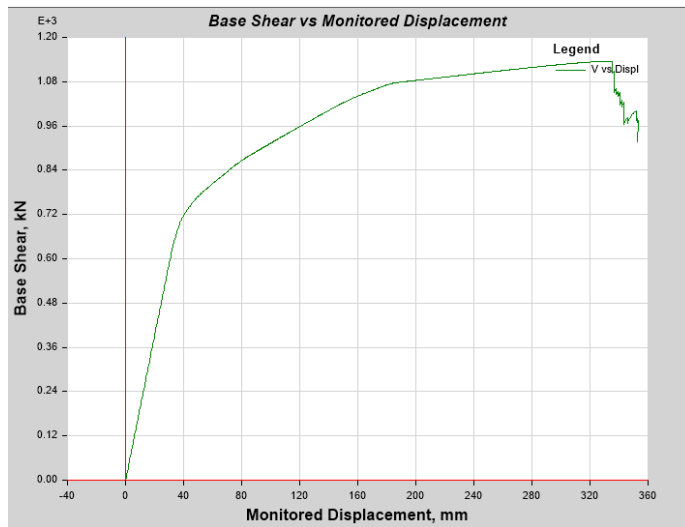


4.5.5 Análisis estático no lineal – Pushover. Se realizó el análisis estático no lineal al modelo estructural seleccionado. Las Figuras 6 y 7 muestran la curva de capacidad obtenida del edificio en el plano XZ y el plano YZ, respectivamente.

Figura 6: Curva de capacidad XZ



Figura 7: Curva de capacidad YZ



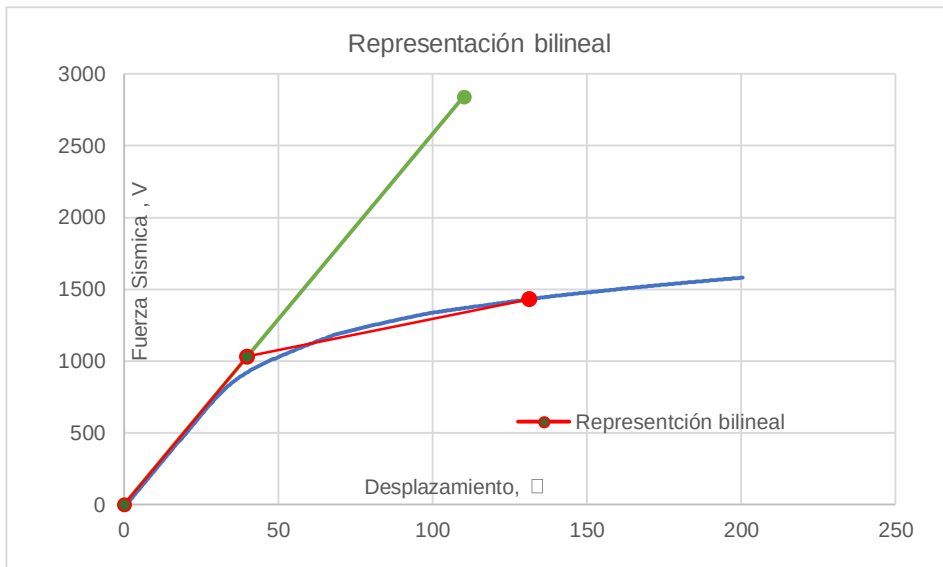
Posteriormente, se revisó el punto de funcionamiento correspondiente a cada curva de capacidad obtenido mediante el software ETABS 2016 empleando el método de linealización equivalente estipulado en el FEMA 440, y se tomó el punto de funcionamiento crítico, es decir, el de menor desplazamiento, que se presentó en la curva de capacidad del plano XZ. Este punto de funcionamiento corresponde al nivel de desempeño LS y se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9: Punto de funcionamiento

Cortante	1430.5095	kN
Desplazamiento	131.201	mm

4.5.6 Cálculo del coeficiente de disipación de energía, R. Se construyó la curva bilineal idealizada a partir de la curva de capacidad, la curva elástica y el punto de funcionamiento de la estructura, como se muestra en la Gráfica 3.

Gráfica 3: Representación bilineal



El cortante elástico máximo corresponde al cortante basal obtenido del análisis de FHE, y se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10: Punto elástico máximo

VE	2841.73	kN
ΔE	110.139	mm

El punto de fluencia obtenido de la representación bilineal se muestra en la Tabla 11.

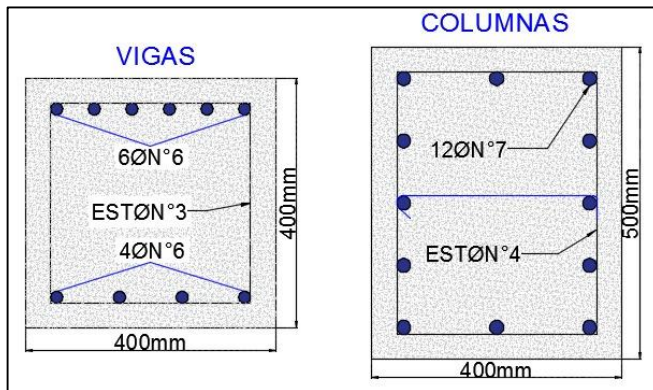
Tabla 11: Punto de fluencia

Cortante de fluencia V_y	1031.0611	kN
Desplazamiento de fluencia D_y	39.9616	mm

Finalmente, se determina el coeficiente de disipación de energía, como se indicó en la Ecuación 1, obteniendo como resultado **$R=2.76$** . Con este valor de R del edificio, se rediseña la estructura y se verifica el nivel de desempeño.

4.5.7 Verificación del nivel de desempeño. Se calculó el refuerzo requerido por vigas y columnas para la fuerza sísmica de diseño (E) reducida con el R obtenido para el edificio, $R=2.76$ (Ver Anexos D y E). Los resultados del diseño se muestran en la Figura 8.

Figura 8: Sección vigas y columnas



Aplicando el análisis no lineal a la estructura con el refuerzo mostrado en la Figura 8, se obtuvo la curva de capacidad XZ que se muestra en la Figura 9, a partir de la cual se determinó el punto de funcionamiento mostrado en la Tabla 12.

Figura 9: Curva de capacidad XZ

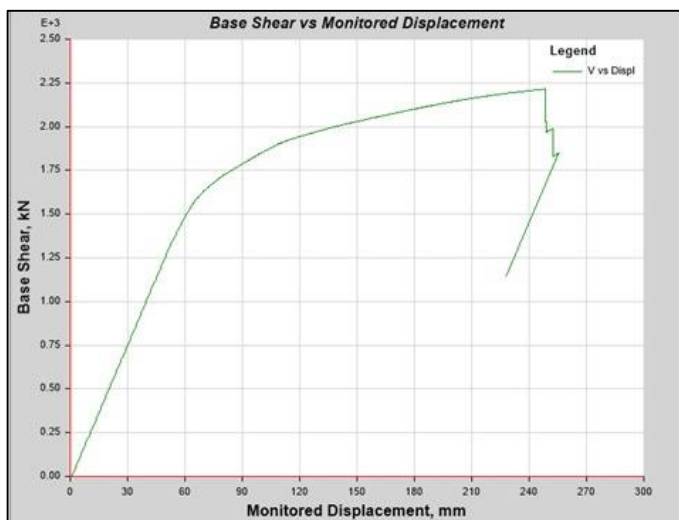


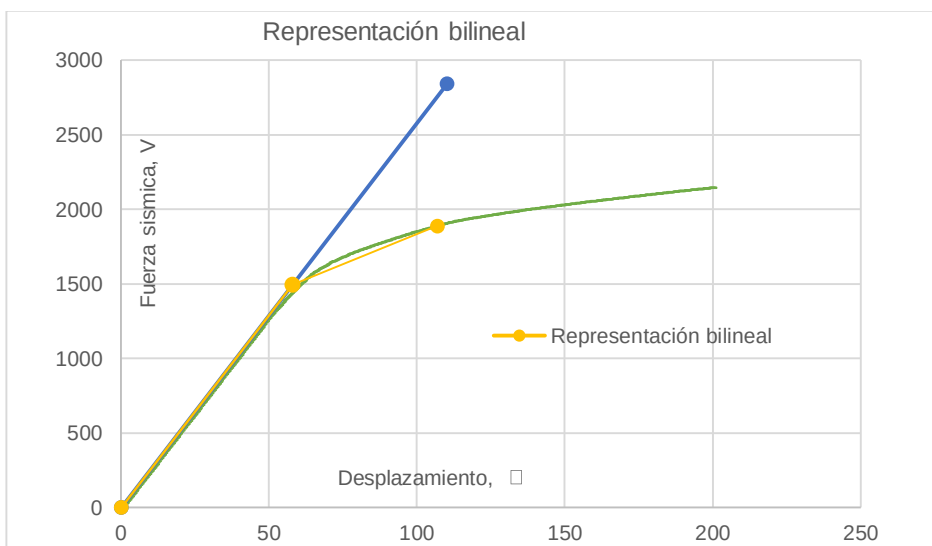
Tabla 12: Punto de funcionamiento

Cortante	1888.9468	kN
Desplazamiento	106.781	mm

Este punto de funcionamiento corresponde al nivel de desempeño IO, por tanto, debido al cambio de nivel de desempeño, se calculó nuevamente el coeficiente de disipación de energía, verificando que éste se mantenga dentro de los rangos del nivel de desempeño IO.

La representación bilineal de la estructura diseñada para el R obtenido de 2.76 se muestra en la Gráfica 4.

Gráfica 4: Representación bilineal



El cortante elástico máximo se mostró en la Tabla 10. El punto de fluencia obtenido de la representación bilineal se muestra en la Tabla 13.

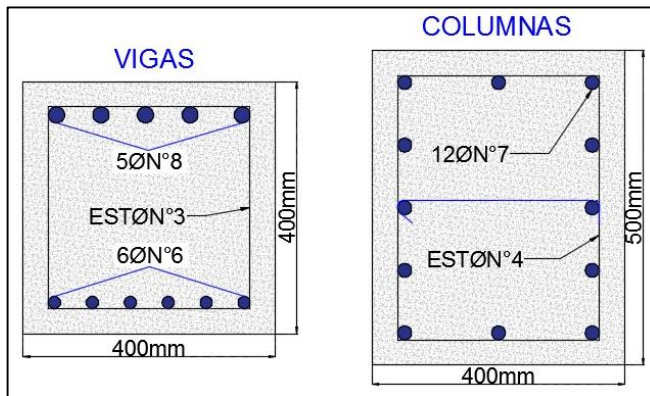
Tabla 13: Punto de fluencia

Cortante de fluencia V_y	1495.59	kN
Desplazamiento de fluencia D_y	57.9657	mm

Con el cortante elástico máximo y el cortante de fluencia indicados en las Tablas 6 y 9 respectivamente, se determinó el coeficiente de disipación de energía aplicando la ecuación 1, obteniendo como resultado **$R=1.9$** .

Con este nuevo valor del coeficiente de disipación de energía se verifica el nivel de desempeño en el que se encuentra la estructura. Para esto se realiza el diseño de refuerzo de vigas y columnas requerido por las solicitaciones obtenidas a partir de una fuerza sísmica de diseño (E) reducida con este último valor de R ($R=1.9$) (Ver Anexos F y G). Este diseño se muestra en la Figura 10.

Figura 10: Sección vigas y columnas



A partir del refuerzo de la estructura mostrado en la Figura 10, se aplicó el análisis estático no lineal obteniendo la curva de capacidad XZ que se muestra en la Figura 11 y el punto de funcionamiento mostrado en la Tabla 14.

Figura 11: Curva de capacidad XZ



Tabla 14: Punto de funcionamiento

Cortante	2363.497	kN
Desplazamiento	112.109	mm

El punto de funcionamiento resultante para la estructura diseñada con el $R=1.9$ está dentro de los rangos de nivel de desempeño de ocupación inmediata.

Finalmente, como se verificó que no hubo un cambio en el nivel de desempeño, tal como se evidencia en la Tabla 15, el coeficiente de disipación de energía del pórtico de concreto con arriostramiento con pandeo restringido analizado en esta investigación, para el nivel de desempeño de ocupación inmediata es, **$R=1.9$** .

Tabla 15: Nivel de desempeño

Monitored Displ	Base Force	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP
mm	kN				
110.278	2350.9029	602	0	0	0
110.698	2353.9324	602	0	0	0
111.118	2356.9106	602	0	0	0
111.538	2359.8035	602	0	0	0
111.958	2362.5192	602	0	0	0
112.378	2365.2352	602	0	0	0
112.798	2367.9511	602	0	0	0
113.218	2370.667	602	0	0	0
113.638	2373.3829	602	0	0	0
114.058	2376.0936	602	0	0	0
114.478	2378.8005	602	0	0	0

4.6 NIVEL DE DESEMPEÑO: SEGURIDAD DE VIDA (LS)

4.6.1 Dimensiones de los elementos estructurales. Para este nivel de desempeño, la estructura cuenta con las siguientes dimensiones:

4.6.1.1 Columnas: 0.45m x 0.55m

4.6.1.2 Vigas: 0.45m x 0.45m

4.6.1.3 Riostras: 0.2m x 0.25m

4.6.1.4 Viguetas: 0.1m x 0.25m

4.6.1.5 Loseta: 0.05m

4.6.1.6 Separación de nervios: 0.6m

4.6.2 Masa de la estructura. La masa total de la estructura para el nivel de desempeño de ocupación inmediata se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16: Masa de la estructura

MASA DEL EDIFICIO		
COMPONENTES	Masa	Unidades
Masa del sistema estructural	4874.62	KN
Masa por carga muerta	372.255	KN
MASA TOTAL DEL EDIFICIO	5246.875	KN

4.6.3 Análisis FHE y control de derivas. El detalle del análisis FHE realizado a la estructura se muestra en la Tabla 17. se realizó el procedimiento del chequeo de derivas teniendo en cuenta los requerimientos de deriva máxima estipulado en la NSR-10. Las derivas de piso obtenidas se encuentran dentro del límite máximo del 1% de la altura de piso.

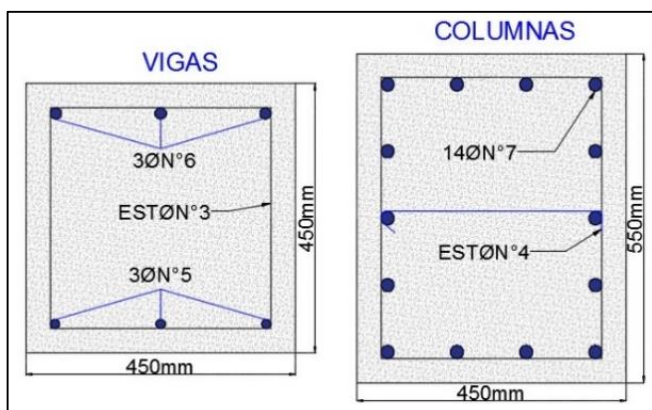
Tabla 17: Análisis FHE

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Aa	0.25	-
Av	0.25	-
Tipo de suelo	C	-
Fa	1.15	-
Fv	1.55	-
I	1	-
T	0.583	S
Sa	0.7188	
Vs	2841.73	kN
Fs ₁	101.49	kN
Fs ₂	202.981	kN
Fs ₃	304.471	kN
Fs ₄	405.962	kN
Fs ₅	507.462	kN
Fs ₆	608.943	kN
Fs ₇	710.433	kN

4.6.4 Diseño de vigas y columnas inicial. Para las solicitaciones máximas del diseño del refuerzo de vigas y columnas, en la fuerza sísmica de diseño (E) se empleó inicialmente un factor de reducción de $R=7$ (Ver Anexos H e I).

Las dimensiones de vigas y columnas, así como su refuerzo se muestran en la Figura 12.

Figura 12: Sección vigas y columnas



4.6.5 Análisis estático no lineal – Pushover. Del análisis estático no lineal – Pushover, se obtuvo la curva de capacidad en el plano XZ y el plano YZ mostradas en la Figura 13 y Figura 14, respectivamente.

Figura 13: Curva de capacidad XZ

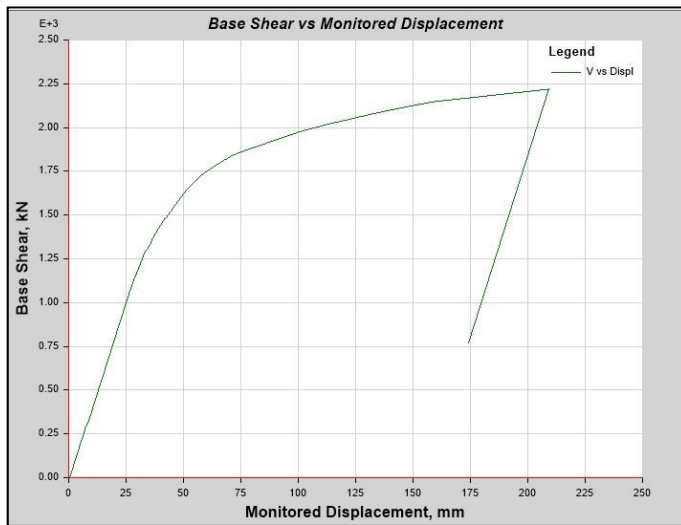
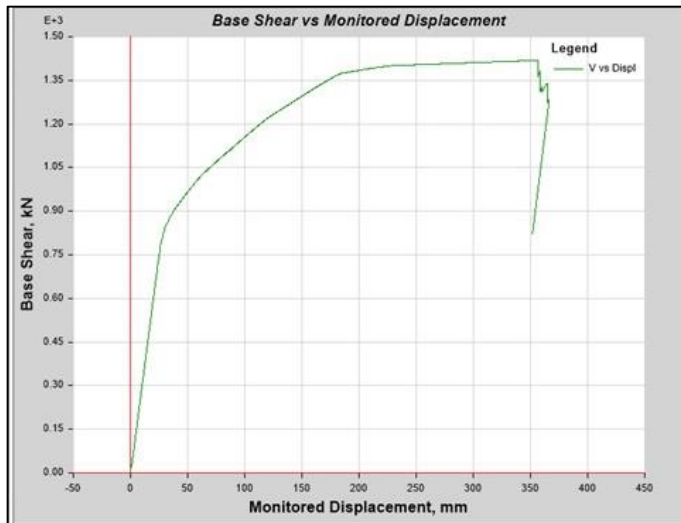


Figura 14: Curva de capacidad XZ



Posteriormente, se revisaron los puntos de desempeño de cada curva de capacidad obtenido mediante el software ETABS empleando el método de linealización

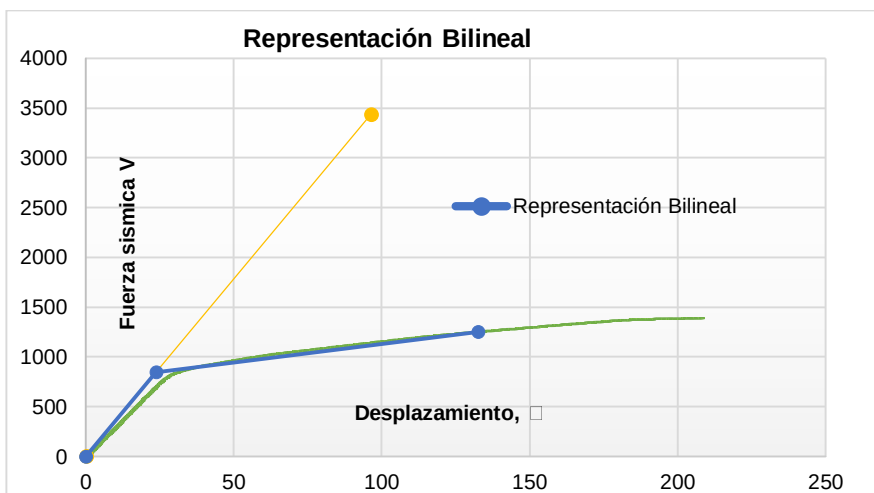
equivalente estipulado en el FEMA 440, seleccionando el punto de desempeño crítico, que en este caso corresponde al punto de funcionamiento de la curva de capacidad YZ, debido a que este se encuentra dentro del nivel de desempeño de seguridad de vida. El Punto de funcionamiento se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18: Punto de funcionamiento

Cortante	1251.626	kN
Desplazamiento	132.516	mm

4.6.6 Cálculo del coeficiente de disipación de energía, R. Se construyó la curva bilineal idealizada a partir de la curva de capacidad, la curva elástica y el punto de funcionamiento de la estructura, como se muestra en la Gráfica 5.

Gráfica 5: Representación bilineal



El cortante elástico máximo corresponde al cortante basal obtenido del análisis de FHE, y se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19: Punto elástico máximo

VE	3437.06	kN
ΔE	96.31	mm

El punto de fluencia obtenido de la representación bilineal se muestra en la Tabla 20.

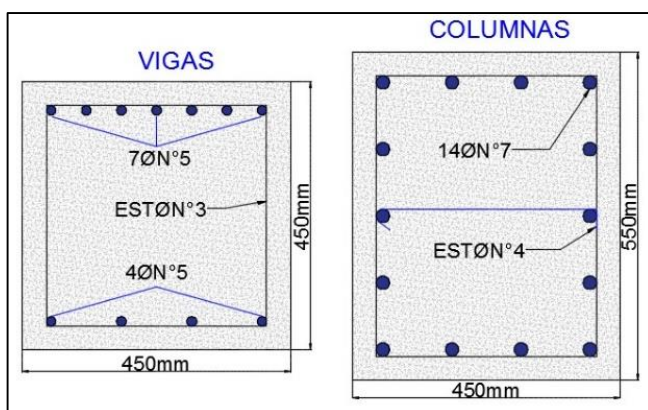
Tabla 20: Punto de fluencia

Cortante de fluencia V_y	846.7533	kN
Desplazamiento de fluencia D_y	23.7269	mm

Finalmente, se determina el coeficiente de disipación de energía, como se indicó en la Ecuación 1, obteniendo como resultado **$R=4.06$** . Con este valor de R del edificio, se rediseña la estructura y se verifica el nivel de desempeño.

4.6.7 Verificación del nivel de desempeño. Se calculó el refuerzo requerido por vigas y columnas para la fuerza sísmica de diseño (E) reducida con el R obtenido para el edificio, $R=4.06$ (Ver Anexos J y K). Los resultados se muestran en la Figura 15.

Figura 15: Sección vigas y columnas



Aplicando el análisis no lineal a la estructura con el refuerzo mostrado en la Figura 15, se obtuvo la curva de capacidad YZ que se muestra en la Figura 16, a partir de la cual se determinó el punto de funcionamiento mostrado en la Tabla 21.

Figura 16: Curva de capacidad

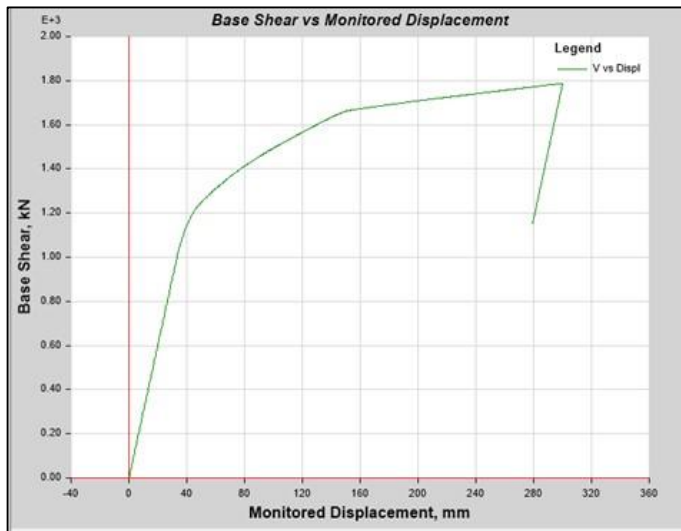


Tabla 21: Punto de funcionamiento

Cortante	1616.494	kN
Desplazamiento	134.672	mm

Este punto de funcionamiento corresponde al nivel de desempeño de seguridad de vida, tal como se evidencia en la Tabla 22; nivel bajo el cual se comportó la estructura inicialmente, por tanto, el valor del coeficiente de disipación de energía para el pórtico con arriostramiento con pandeo restringido analizado en esta investigación, en el nivel de desempeño de seguridad de vida es, **R=4.06**.

Tabla 22: Nivel de desempeño

Monitored Displ	Base Force	A- IO	IO- LS	LS- CP	>CP
mm	kN				
132.658	1609.769	596	6	0	0
133.078	1611.1715	595	7	0	0
133.498	1612.574	595	7	0	0
133.918	1613.9765	593	9	0	0
134.338	1615.3791	593	9	0	0
134.758	1616.7816	592	10	0	0
135.178	1618.1398	591	11	0	0
135.598	1619.4925	591	11	0	0
136.018	1620.8507	590	12	0	0
136.438	1622.2088	589	13	0	0
136.858	1623.567	588	14	0	0

5. CONCLUSIONES

El coeficiente de disipación de energía para el nivel de desempeño de ocupación inmediata y seguridad de vida de la estructura PAPR analizada es, $R=1.9$ y $R=4.06$ respectivamente. Estos valores son menores al coeficiente de disipación de energía para pórticos de concreto resistente a momento ($R=7$) estipulado en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

El aumento de rigidez en la estructura es proporcional a la cantidad de BRB's que se incorporen como disipadores de energía. Cuando se tienen grandes valores de rigidez se aumenta la frecuencia de vibración, causando una mayoración en la aceleración espectral y una mayor demanda sísmica de la estructura. Además, el desplazamiento horizontal en la estructura con BRB's tiende a ser constante a partir de un número determinado de riostras.

Las riostras incorporadas en la edificación funcionan como disipador de energía controlando los desplazamientos horizontales ante la ocurrencia de un evento sísmico, pero no están diseñadas para resistir solicitaciones de momentos.

6. RECOMENDACIONES

se recomienda determinar el coeficiente de disipación de energía adecuado de la estructura para calcular la fuerza sísmica reducida (E) de diseño de vigas y columnas.

Se debe hacer un análisis de posicionamiento y cantidad de BRB's para determinar la configuración óptima de diseño.

Las vigas y columnas deben diseñarse para resistir la totalidad de las reacciones producidas por las combinaciones de cargas sísmicas y gravitacionales estipuladas en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, garantizando un buen desempeño del sistema estructural.

BIBLIOGRAFÍA

ANWAR, Naveed, et al. "Application of Buckling Restrained Braces in a 50- Storey building". En: International Journal of High-Rise Buildings. Vol 3, no 1, marzo 2014, p 81-87.

GUEVARA, Nicolás; OSORIO, Sergio; VARGAS, Edgardo. "Evaluación de la capacidad estructural del edificio de la biblioteca de las ingenierías y arquitectura, utilizando análisis estático no lineal (PUSHOVER)" [Tesis de pregrado]. Universidad de el Salvador, San Salvador, El Salvador. 2006.

Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures (Federal Emergency Management Agency, FEMA 440).

OVIEDO, Juan; DUQUE, María Del Pilar. "Disipadores histeréticos metálicos como técnica de control de respuesta sísmica en edificaciones colombianas". En: Revista EIA. no 11, julio de 2009, p.51-63.

Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10.

Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building (Applied Technology Council, ATC-40).

Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (American Society of Civil Engineers, ASCE 41-13).

T. Takeuchi, et al. "Local buckling restraint condition for core plates in buckling restrained braces". En: Journal of Constructional Steel Research, no. 66, septiembre-2009, p. 139-149.

VALENCIA, Doralba y VALENCIA, Gabriel. "Evaluación del coeficiente de disipación de energía, R, para algunos tipos de estructuras de acero". En: Revista ingeniería e investigación. Vol, 28. no, 1, abril de 2008, p. 41-49.

Zafar A. Response modification factor of reinforced concrete moment resisting frames in developing countries [Tesis de maestría]. University of Illinois at Urbana-Champaign. Urbana, Illinois. 2009.