



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

DEPARTAMENTO DE POSGRADOS

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN
EN ESTRUCTURAS SISMORRESISTENTES**

**Estimación de la Vulnerabilidad Sísmica en Edificios de
Hormigón Armado considerando Muros Diafragma:
Aplicación Regional del Riesgo Sísmico en la ciudad de
Cuenca, Ecuador**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

**MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS
SISMORRESISTENTES**

Autor:

PAÚL SEBASTIÁN MOREIRA MENDIETA

Director:

ING. PEDRO SALVADOR RAMOS GÓMEZ. M.I.

CUENCA, ECUADOR

2026

DEDICATORIA

Dedico este logro, fruto de mi esfuerzo y dedicación, primeramente, a Dios, fuente de fortaleza y guía en mi camino, cuya presencia ha sido mi sustento en los momentos de mayor desafío. Un agradecimiento profundo a mi familia, en especial a mis padres Daniel y Mónica, por ser el cimiento sobre el que construyo mis sueños y por su apoyo inquebrantable. Finalmente, extendo mi gratitud a todos aquellos —colegas, amigos y mentores— que con su compañía y sabio consejo enriquecieron este trayecto.

PAÚL SEBASTIÁN MOREIRA MENDIETA

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento a Dios, por ser fuente de luz y fortaleza durante este recorrido, brindándome la serenidad y perseverancia necesarias para culminar esta etapa.

A mi familia, especialmente a mis padres Daniel y Mónica, por ser mi fundamento y por su apoyo incondicional, el cual ha sido un pilar fundamental en cada etapa de mi vida académica y personal.

Un agradecimiento muy especial al Ing. Pedro Salvador Ramos Gómez M.I., tutor de esta tesis, cuya guía experta, invaluable paciencia y constante disponibilidad para aclarar mis dudas fueron esenciales para el desarrollo de este trabajo. Su mentoría fue indispensable, ayudándome a ver la luz al final del camino.

Agradezco también al Dr. Andrés Felipe Hernández Estrada, por su desinteresada asesoría y por compartir su profundo conocimiento durante la selección de los registros sísmicos, un aporte técnico de gran valor para esta investigación.

A mis amigos Emilio y Juan Diego, compañeros de viaje durante toda la maestría, por el apoyo fraterno, las palabras de aliento y por haber hecho más llevadero este camino.

A Ana Paula, por ser mi compañía y soporte inagotable, no solo en este proceso de tesis, sino en la vida. Tu confianza en mí y tu ánimo constante fueron un motor que me impulsó siempre hacia adelante.

Y a todos aquellos que, de una u otra forma, contribuyeron a la realización de este sueño, mi eterna gratitud.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvii
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT.....	xx
INTRODUCCIÓN.....	1
PROBLEMÁTICA.....	2
ESTADO DEL ARTE.....	3
OBJETIVO GENERAL.....	5
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
METODOLOGÍA.....	6
MARCO TEÓRICO.....	8
CAPÍTULO 1. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS EN CUENCA.....	10
1.1. Contexto urbano e histórico de la ciudad de Cuenca.....	10
1.1.1. Desarrollo urbanístico.....	10
1.1.2. Evolución de los materiales y normativas de construcción.....	12
1.2. Sistemas estructurales predominantes en Cuenca.....	13
1.2.1. Estructuras de hormigón armado.....	13
1.2.2. Mampostería confinada.....	15
1.3. Muros de mampostería en la respuesta sísmica.....	15

1.3.1.	Comparativa entre mampostería confinada y muros diafragma.....	15
1.3.2.	Influencia de los muros diafragma en la respuesta estructural.....	17

CAPÍTULO 2. MODELADO NUMÉRICO DE ESTRUCTURAS CON Y SIN MUROS DIAFRAGMA 18

2.1.	Selección de casos de estudio	18
2.1.1.	Criterios de selección	18
2.1.1.1.	Número de vanos.....	21
2.1.1.2.	Número de pisos.....	22
2.1.1.3.	Longitud de los vanos	23
2.1.1.4.	Altura de entrepiso	24
2.1.1.5.	Dimensión de vigas	25
2.1.1.6.	Dimensión de columnas	25
2.1.1.7.	Resistencia a la compresión del hormigón.....	26
2.1.1.8.	Relación de carga axial	27
2.1.2.	Prototipos modelados	28
2.1.2.1.	Edificio de 3 pisos (baja altura)	28
2.1.2.2.	Edificio de 5 pisos (altura media)	29
2.1.2.3.	Edificio de 8 pisos (altura alta)	30
2.2.	Análisis y diseño de los modelos de exposición	31
2.2.1.	Consideraciones iniciales para el diseño.....	32
2.2.1.1.	Emplazamiento y tipo de suelo	32
2.2.1.2.	Geometría de las edificaciones.....	32
2.2.1.3.	Materiales utilizados	33
2.2.1.4.	Ocupación	33
2.2.1.5.	Cargas no sísmicas	34

2.2.2. Espectro de diseño	35
2.2.2.1. Factor de zona Z.....	35
2.2.2.2. Tipo de perfil de suelos	36
2.2.2.3. Coeficientes de amplificación de suelo	38
2.2.2.4. Factor η	40
2.2.2.5. Factor r	40
2.2.2.6. Espectro de diseño para la ciudad de Cuenca	41
2.2.2.7. Factor de reducción de resistencia sísmica	42
2.2.3. Modelación de las estructuras	43
2.2.3.1. Propiedades de los materiales	43
2.2.3.2. Definición de las secciones	45
2.2.3.3. Modelación de losas	46
2.2.3.4. Masa	47
2.2.3.5. Casos de carga.....	47
2.2.4. Diseño por serviciabilidad	49
2.2.4.1. Requerimientos	49
2.2.4.2. Control de derivas por piso	51
2.2.5. Diseño por capacidad	53
2.2.5.1. Verificación del diseño de vigas	54
2.2.5.2. Verificación del diseño de columnas	59
2.2.5.3. Verificación de columna fuerte – viga débil	62
2.2.5.4. Resultados globales de las estructuras	64
2.3. Implementación de muros diafragma.....	66
2.3.1. Modelado del puntal equivalente	67
2.3.2. Comportamiento histerético de los muros diafragma	69

2.3.3. Transformación de curvas histeréticas	70
2.3.4. Implementación en el software	71
2.3.5. Visualización de la implementación de los muros diafragma en los modelos	73
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE AMENAZA SÍSMICA	76
3.1. Selección y procesamiento de registros sísmicos	76
3.1.1. Criterios de selección	76
3.1.2. Base de datos utilizada	78
3.1.3. Acelerogramas seleccionados	78
3.1.4. Generación de espectros de respuesta	83
CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD SÍSMICA.....	84
4.1. Análisis estático no lineal (Pushover)	84
4.1.1. Rótulas plásticas	84
4.1.1.1. Implementación de las rótulas plásticas en los modelos	86
4.1.2. Curvas de capacidad	88
4.1.2.1. Obtención de la Curva de Capacidad	90
4.1.3. Punto de desempeño	91
4.1.3.1. Niveles de desempeño	91
4.1.3.2. Determinación del punto de desempeño	92
4.1.4. Comparación con/sin muros diafragma.....	94
4.1.4.1. Curva de capacidad con/sin muros.....	94
4.1.4.2. Punto de desempeño con/sin muros	96
4.2. Análisis dinámico no lineal (Time-History)	99
4.2.1. Definición de acelerogramas en el software.....	99
4.2.2. Procesamiento de resultados.....	102

4.2.2.1. Derivas máximas de entrepiso	102
4.3. Generación de curvas de fragilidad.....	110
4.3.1. Metodología Cloud Analysis.....	110
4.3.1.1. Definición de estados de daño (DS1-DS4)	112
4.3.1.2. Ajuste de la regresión.....	114
4.3.2. Curvas de fragilidad	119
CONCLUSIONES.....	124
RECOMENDACIONES	125
BIBLIOGRAFÍA.....	126
ANEXOS.....	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Traza de la ciudad de Cuenca de 1557.	11
Figura 1.2. Polígonos de intervención territorial urbanos y de expansión urbana....	12
Figura 1.3. Distribución espacial de las estructuras de hormigón armado en la ciudad de Cuenca.	14
Figura 1.4. Comparación entre la mampostería confinada y los pórticos de hormigón con muros de relleno (muros diafragma). (a) Proceso constructivo, (b) Tamaño de los elementos de hormigón, (c) Respuesta sísmica.....	17
Figura 2.1. Frecuencia del número de vanos utilizado en los análisis.	22
Figura 2.2. Frecuencia del número de pisos utilizado en los análisis.	23
Figura 2.3. Frecuencia de la longitud del vano de los diferentes análisis.	23
Figura 2.4. Frecuencia de la altura de entrepiso utilizado en los análisis.	24
Figura 2.5. Frecuencia de la altura del primer piso utilizado en los análisis.	24
Figura 2.6. Frecuencia de la dimensión de las vigas utilizadas en los análisis.	25
Figura 2.7. Frecuencia de la dimensión de columnas utilizados en los análisis.	26
Figura 2.8. Frecuencia de la resistencia a la compresión utilizada en los análisis....	27
Figura 2.9. Frecuencia de las relaciones de carga axial en columnas.	27
Figura 2.10. Modelo estructural del edificio de 3 pisos sin muros diafragma.	29
Figura 2.11. Modelo estructural del edificio de 5 pisos sin muros diafragma.	30
Figura 2.12. Modelo estructural del edificio de 8 pisos sin muros diafragma.	31
Figura 2.13. Vista en elevación de las edificaciones (dirección Y).	32
Figura 2.14. Vista en planta de las edificaciones.	33
Figura 2.15. Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z.	36
Figura 2.16. Espectro de diseño para la ciudad de Cuenca y suelo tipo D.	42
Figura 2.17. Definición de las propiedades del hormigón.	44

Figura 2.18. Definición de las propiedades del acero de refuerzo.....	44
Figura 2.19. Definición de las propiedades de la sección de las columnas.	45
Figura 2.20. Definición de las propiedades de la sección de las vigas.	45
Figura 2.21. Definición del agrietamiento de las secciones de columnas y vigas. ...	46
Figura 2.22. Definición de las propiedades de la losa.	47
Figura 2.23. Definición de las propiedades de la masa.....	47
Figura 2.24. Definición de la excentricidad y factores C y k para la carga sísmica.	49
Figura 2.25. Derivas inelásticas de piso en la dirección Y de cada edificio.....	52
Figura 2.26. Vista en elevación de la viga B8 a analizar.	54
Figura 2.27. Momentos actuantes y momento último de la viga analizada del edificio de 3 pisos.....	55
Figura 2.28. Acero longitudinal de la viga analizada del edificio de 3 pisos, determinado por el software.....	56
Figura 2.29. Acero transversal de la viga analizada del edificio de 3 pisos, determinado por el software.....	58
Figura 2.30. Vista en elevación de la columna C10 a analizar.	59
Figura 2.31. Diagrama de interacción de diseño de la columna C10.....	61
Figura 2.32. Nudo seleccionado para el análisis de columna fuerte – viga débil.	63
Figura 2.33. Resultados del software para momentos que llegan de la viga al nudo analizado.	63
Figura 2.34. Resultados del software para momentos que llegan de la columna al nudo analizado.	64
Figura 2.35. Analogía del puntal equivalente.	68
Figura 2.36. Comportamiento histerético genérico del material uniaxial Pinching4 en OpenSees.....	69
Figura 2.37. Comportamiento histerético del puntal diagonal de un muro diafragma.	70

Figura 2.38. Curvas fuerza-desplazamiento para los puntales equivalentes en los edificios de 3, 5 y 8 pisos.	71
Figura 2.39. Definición de los factores del link y propiedades direccionales.	72
Figura 2.40. Definición de las propiedades no lineales del puntal equivalente utilizado en los modelos.	72
Figura 2.41. Modelo tridimensional del edificio de 3 pisos con muros diafragma. .	73
Figura 2.42. Modelo tridimensional del edificio de 5 pisos con muros diafragma. .	74
Figura 2.43. Modelo tridimensional del edificio de 8 pisos con muros diafragma. .	75
Figura 3.1. Espectros de respuesta elástica de los sismos analizados en comparación con el espectro de la NEC.	83
Figura 4.1. Relación fuerza-deformación generalizada para elementos o componentes de hormigón.	86
Figura 4.2. Gráficas momento-rotación de las vigas de los edificios de 3, 5 y 8 pisos.	87
Figura 4.3. Gráficas momento-rotación de las columnas del primer piso de los 3 edificios.	88
Figura 4.4. Representación de la curva de capacidad.	89
Figura 4.5. Relación fuerza-deformación.	90
Figura 4.6. Curvas de capacidad de los edificios de 3, 5 y 8 pisos en las direcciones X e Y.	91
Figura 4.7. Relación entre la amenaza sísmica y los niveles de desempeño.	92
Figura 4.8. Niveles y puntos de desempeño de los edificios de 3, 5 y 8 pisos en ambas direcciones.	93
Figura 4.9. Comparativa de curvas de capacidad del edificio de 3 pisos en la dirección Y.	94
Figura 4.10. Comparativa de curvas de capacidad del edificio de 5 pisos en la dirección Y.	95

Figura 4.11. Comparativa de curvas de capacidad del edificio de 8 pisos en la dirección Y.....	95
Figura 4.12. Comparativa del punto de desempeño del edificio de 3 pisos en la dirección Y.....	97
Figura 4.13. Comparativa del punto de desempeño del edificio de 5 pisos en la dirección Y.....	97
Figura 4.14. Comparativa del punto de desempeño del edificio de 8 pisos en la dirección Y.....	98
Figura 4.15. Definición de las funciones de tiempo-historia para las componentes X (izquierda) e Y (derecha) del sismo 1.	100
Figura 4.16. Definición de caso de carga no lineal tiempo-historia del sismo 1. ...	101
Figura 4.17. Comparación de las derivas de entrepiso máxima del edificio de 3 pisos con y sin muros diafragma en ambas direcciones.....	103
Figura 4.18. Comparación de las derivas de entrepiso máxima del edificio de 5 pisos con y sin muros diafragma en ambas direcciones.....	104
Figura 4.19. Comparación de las derivas de entrepiso máxima del edificio de 8 pisos con y sin muros diafragma en ambas direcciones.....	105
Figura 4.20. Edificio de 3 pisos: a) nube de puntos en escala lineal sin muros, b) regresión lineal en escala logarítmica sin muros, c) nube de puntos en escala lineal con muros, d) regresión lineal en escala logarítmica con muros.	116
Figura 4.21. Edificio de 5 pisos: a) nube de puntos en escala lineal sin muros, b) regresión lineal en escala logarítmica sin muros, c) nube de puntos en escala lineal con muros, d) regresión lineal en escala logarítmica con muros.	117
Figura 4.22. Edificio de 8 pisos: a) nube de puntos en escala lineal sin muros, b) regresión lineal en escala logarítmica sin muros, c) nube de puntos en escala lineal con muros, d) regresión lineal en escala logarítmica con muros.	118
Figura 4.23. Curvas de fragilidad para el edificio de 3 pisos.....	120
Figura 4.24. Curvas de fragilidad para el edificio de 5 pisos.....	121

Figura 4.25. Curvas de fragilidad para el edificio de 8 pisos.....	122
---	-----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Resumen de las fuentes bibliográficas consultadas sobre modelos de exposición.	21
Tabla 2.2. Tipo de uso, destino e importancia de la estructura.	34
Tabla 2.3. Valores de las cargas muertas para todas las edificaciones.	34
Tabla 2.4. Sobrecargas mínimas uniformemente distribuidas, L_o , y concentradas P_o	35
Tabla 2.5. Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada.	36
Tabla 2.6. Clasificación de los perfiles de suelo.	38
Tabla 2.7. Tipo de suelo y Factores de sitio F_a	38
Tabla 2.8. Tipo de suelo y Factores de sitio F_d	39
Tabla 2.9. Tipo de suelo y Factores de sitio F_s	40
Tabla 2.10. Factores para obtener el espectro de aceleraciones.	41
Tabla 2.11. Factor de reducción R adoptado para este estudio.	43
Tabla 2.12. Determinación del coeficiente k	48
Tabla 2.13. Valores de los factores C y k de acuerdo al número de pisos del edificio.	49
Tabla 2.14. Secciones de los elementos estructurales.	49
Tabla 2.15. Requerimientos para el diseño por serviciabilidad.	51
Tabla 2.16. Periodos calculados de las edificaciones.	51
Tabla 2.17. Valores de ΔM máximos, expresados como fracción de la altura de piso.	51
Tabla 2.18. Derivas inelásticas de piso en la dirección Y de cada edificio.	52
Tabla 2.19. Combinación de carga para el diseño por última resistencia.	53
Tabla 2.20. Propiedades de la viga analizada del edificio de 3 pisos para el diseño a flexión.	55

Tabla 2.21. Resultados del diseño a flexión de la viga analizada del edificio de 3 pisos.	56
Tabla 2.22. Propiedades de la viga analizada del edificio de 3 pisos para el diseño a cortante.	57
Tabla 2.23. Resultados del diseño a cortante de la viga analizada del edificio de 3 pisos.	58
Tabla 2.24. Detalle del refuerzo transversal real de la viga y su espaciamiento.	59
Tabla 2.25. Propiedades de la columna analizada del edificio de 3 pisos para el diseño a flexocompresión y corte.	60
Tabla 2.26. Valores máximos de fuerza axial y momento flector de la columna C10.	60
Tabla 2.27. Detalle del refuerzo transversal real de la columna y su espaciamiento.	62
Tabla 2.28. Comprobación del criterio columna fuerte – viga débil del nudo analizado.	64
Tabla 2.29. Resultados y configuración del refuerzo en vigas de los edificios.	65
Tabla 2.30. Resultados y configuración del refuerzo en columnas de los edificios.	66
Tabla 3.1. Resumen de los 86 registros sísmicos seleccionados para el análisis.	82
Tabla 4.1. Parámetros de modelado y criterios de aceptación numérica para procedimientos no lineales – vigas de hormigón armado.	84
Tabla 4.2. Parámetros de modelado y criterios de aceptación numérica para procedimientos no lineales – columnas de hormigón armado.	85
Tabla 4.3. Valores obtenidos del punto de desempeño con y sin muros diafragma.	98
Tabla 4.4. Comparación de las derivas de entrepiso máxima del edificio de 3 pisos con y sin muros diafragma en ambas direcciones.	103
Tabla 4.5. Comparación de las derivas de entrepiso máxima del edificio de 5 pisos con y sin muros diafragma en ambas direcciones.	104
Tabla 4.6. Comparación de las derivas de entrepiso máxima del edificio de 8 pisos con y sin muros diafragma en ambas direcciones.	105

Tabla 4.7. Comparación de las derivas de entrepiso máxima de los 3 edificios con y sin muros diafragma de todos los sismos.....	109
Tabla 4.8. Resumen de los umbrales de deriva de entrepiso para los estados de daño.	114
Tabla 4.9. Valores de mediana (θ) y desviación estándar (β) para todos los edificios en cada configuración.	119

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Código para determinar las funciones de fragilidad de los edificios de 3, 5 y 8 pisos.	133
---	-----

**ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA EN EDIFICIOS DE
HORMIGÓN ARMADO CONSIDERANDO MUROS DIAFRAGMA:
APLICACIÓN REGIONAL DEL RIESGO SÍSMICO EN LA CIUDAD DE
CUENCA, ECUADOR**

RESUMEN

El presente estudio evalúa la vulnerabilidad sísmica de edificios residenciales de hormigón armado en la ciudad de Cuenca, Ecuador, considerando el efecto de los muros diafragma en la rigidez y resistencia. Ante la alta sismicidad del Ecuador y la construcción de edificios de hormigón en nuestro país, se propone caracterizar las diferentes tipologías estructurales típicas de la ciudad mediante la revisión bibliográfica. Después se realiza la modelación de las edificaciones más representativas mediante un software especializado e implementar el modelo de diagonales equivalentes como muros diafragma. Por consiguiente, se propone analizar las respuestas de los análisis no lineales estáticos (pushover) y dinámicos (tiempo-historia) con acelerogramas seleccionados de bases de datos internacionales y compatibles con las condiciones sísmicas de nuestro país. Por último, se generan curvas de fragilidad comparativas de las edificaciones con y sin muros diafragma. Esta investigación contribuirá al diseño sismorresistente en la ciudad de Cuenca y en zonas con condiciones similares de sismicidad y suelo.

Palabras Clave: Análisis no lineal dinámico, análisis no lineal estático (pushover), curvas de fragilidad, diagonales equivalentes, estructuras de hormigón armado, muros diafragma, vulnerabilidad sísmica.



Ing. Pablo Quinde Martínez. PhD

Coordinador del Programa

Ing. Pedro Salvador Ramos Gómez. M.I

Director de Tesis



Paúl Sebastián Moreira Mendieta

Tesista

**ESTIMATION OF SEISMIC VULNERABILITY IN REINFORCED
CONCRETE BUILDINGS CONSIDERING DIAPHRAGM WALLS:
REGIONAL APPLICATION OF SEISMIC RISK IN THE CITY OF
CUENCA, ECUADOR**

ABSTRACT

This study evaluates the seismic vulnerability of residential reinforced concrete buildings in the city of Cuenca, Ecuador, considering the effect of diaphragm walls on stiffness and resistance. Given Ecuador's high seismicity and the prevalence of concrete construction in the country, this research proposes characterizing the different typical structural typologies of the city through a literature review. Subsequently, the most representative buildings are modeled using specialized software, implementing the equivalent strut model for diaphragm walls. Nonlinear static (pushover) and dynamic (time-history) analyses are then performed using selected accelerograms from international databases, compatible with Ecuador's seismic conditions. Finally, comparative fragility curves are generated for buildings with and without diaphragm walls. This research will contribute to seismic-resistant design in the city of Cuenca and in regions with similar seismic and soil conditions.

Keywords: Nonlinear dynamic analysis, nonlinear static analysis (pushover), fragility curves, equivalent struts, reinforced concrete structures, diaphragm walls, seismic vulnerability.

Ing. Pablo Quinde Martínez. PhD

Coordinador del Programa



Ing. Pedro Salvador Ramos Gómez. M.I

Director de Tesis

A handwritten signature in blue ink, featuring a stylized 'P' and 'M' with a large 'S' at the end.

Paúl Sebastián Moreira Mendieta

Tesista

Translated by:

A handwritten signature in blue ink, featuring a stylized 'P' and 'M' with a large 'S' at the end.

Paúl Moreira