

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA
ESTRUCTURAL UTILIZANDO CURVAS DE FRAGILIDAD
EN COLEGIOS DEL DISTRITO DE LA MOLINA**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Civil que
presenta:

Daniela Nicole Velazco Guerrero

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil que
presenta:

Mario Alejandro Rodriguez Olivares

Asesor:

Christian Alberto Asmat Garaycochea


Lima, 2024

INFORME DE SIMILITUD

Yo, **Christian Alberto Asmat Garaycochea**, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada **“ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA ESTRUCTURAL UTILIZANDO CURVAS DE FRAGILIDAD EN COLEGIOS DEL DISTRITO DE LA MOLINA”**, de los autores **Daniela Nicole Velazco Guerrero** y **Mario Alejandro Rodriguez Olivares**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 20 %. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 23/10/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte junto al documento, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 23 de octubre del 2024

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Apellidos y nombres del asesor: <u>Asmat Garaycochea, Christian Alberto</u> | |
| DNI: 45650009 | Firma:  |
| ORCID: 0000-0003-3893-4573 | |

RESUMEN

Ante la posible llegada de un sismo severo a la capital se debe tener la certeza de que las estructuras esenciales estén preparadas para cumplir con el desempeño con las que fueron diseñadas. La tesis propuesta busca identificar el estado actual de la vulnerabilidad sísmica con base en la tipología común de los colegios situados en La Molina. Se utiliza como herramienta las curvas de fragilidad, las cuales se generan en base al análisis estático no lineal utilizando el software SAP2000. Los estados límites para identificar la vulnerabilidad se obtienen a partir del manual técnico de Hazus MR4.

Para la metodología se visitan cinco colegios del distrito de La Molina ubicado en la ciudad de Lima en Perú y se identifica que existen dos tipologías estructurales típicas donde una presenta 5 ejes estructurales en dirección transversal y la otra 7 ejes. En estas tipologías se manifiesta el fenómeno de columnas cortas, al igual que en la mayoría de colegios que se han visitado.

Se obtienen las curvas de fragilidad en función de la probabilidad de daño y el pseudo-desplazamiento espectral. Los resultados obtenidos demuestran que las dos tipologías presentan una gran probabilidad de tener un desempeño de daño completo ante la llegada de un sismo raro en dirección X y una gran probabilidad de que ocurra un estado de daño moderado para la dirección Y. Se realiza un análisis dinámico lineal utilizando el espectro de la norma peruana E0.30 en ambas tipologías y para ambas direcciones, con el objetivo de determinar su respectivo desplazamiento espectral en función al sismo de diseño. Se concluye que el estado actual de la vulnerabilidad sísmica en los colegios de La Molina presentan un daño estructural moderado a completo ante la sollicitación del sismo de diseño denominado sismo raro.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|-----------------------------------------------------------|----|
| CAPÍTULO 1: ASPECTOS GENERALES | 1 |
| 1.1.Introducción..... | 1 |
| 1.2.Objetivos de la Investigación | 2 |
| 1.3.Hipótesis..... | 2 |
| 1.4.Justificación..... | 2 |
| 1.5.Alcances y limitaciones..... | 3 |
| 1.6.Metodología..... | 3 |
| CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE | 5 |
| 2.1.Antecedentes | 5 |
| 2.2.Tipologías de colegios en Perú..... | 6 |
| 2.2.1. Colegio 780 pre..... | 7 |
| 2.2.2. Colegio 780 post. | 8 |
| CAPÍTULO 3: MARCO CONCEPTUAL..... | 10 |
| 3.1.Definiciones fundamentales..... | 10 |
| 3.2.Contexto sísmico en el ámbito de estudio..... | 11 |
| 3.2.1 Contexto sísmico en el Perú..... | 11 |
| 3.2.2 Contexto sísmico en La Molina. | 12 |
| 3.3.Vulnerabilidad sísmica..... | 13 |
| 3.3.1. Métodos subjetivos | 14 |
| 3.3.2. Métodos analíticos. | 15 |
| 3.4. Desempeño sismorresistente | 15 |
| 3.5.Análisis Sísmico Lineal y no Lineal..... | 16 |
| 3.5.1. Métodos Lineales según Muñoz (2020)..... | 16 |
| 3.5.2. Métodos no lineales según el ASCE (2017). | 16 |
| 3.6.Curvas de fragilidad..... | 17 |
| 3.7. Modelos no lineales de la Albañilería Confinada..... | 18 |
| 3.7.1. Modelo de la Columna Ancha | 18 |
| CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA..... | 20 |
| 4.1. Descripción de los colegios estudiados | 20 |
| 4.1.1. Colegio A. | 20 |
| 4.1.2. Colegio B. | 21 |
| 4.1.3. Colegio C. | 22 |
| 4.1.4. Colegio D | 23 |
| 4.1.5. Colegio E. | 24 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2. Descripción de las tipologías estudiadas | 25 |
| 4.2.1. Tipología con 5 ejes. | 25 |
| 4.2.2. Tipología con 7 ejes. | 27 |
| 4.3. Modelo Estructural en SAP 2000 | 29 |
| 4.3.1. Tipología con 5 ejes. | 30 |
| 4.3.2. Tipología con 7 ejes. | 32 |
| 4.4. Análisis modal espectral | 34 |
| 4.4.1. Tipología con 5 ejes | 34 |
| 4.4.2. Tipología con 7 ejes | 36 |
| 4.5. Diseño de los elementos estructurales | 38 |
| 4.5.1. Tipología con 5 ejes | 38 |
| 4.5.2. Tipología con 7 ejes | 40 |
| 4.6. Análisis estático no lineal..... | 42 |
| 4.6.1. Determinación de diagrama momento - curvatura..... | 42 |
| 4.6.2. Rótulas de corte para albañilería confinada. | 44 |
| 4.6.3. Determinación de rótulas plásticas de elementos de concreto armado. | 47 |
| 4.6.4. Obtención de curvas de capacidad. | 52 |
| 4.6.5. Obtención del espectro de capacidad | 55 |
| 4.6.6. Consideración de la variabilidad en los resultados | 56 |
| CAPÍTULO 5: CURVAS DE FRAGILIDAD | 58 |
| 5.1. Parámetros y estados de daño | 58 |
| 5.2. Curvas de fragilidad..... | 59 |
| 5.3. Nivel de desempeño de las tipologías | 65 |
| CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 71 |
| 6.1. Evaluación de modelo sin columna corta..... | 71 |
| 6.2. Evaluación de objetivos | 79 |
| CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 81 |
| 7.1. Conclusiones | 81 |
| 7.2. Recomendaciones..... | 82 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 83 |
| ANEXOS..... | 89 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1. Tipología de infraestructuras escolares..... | 6 |
| Figura 2.2. Sistema Estructural Convencional en Planta del Colegio 780 pre | 8 |
| Figura 2.3. Sistema Estructural Convencional en Planta del Colegio 780 post..... | 9 |
| Figura 3.1. Fenómeno de subducción entre Placa Nazca y Placa Sudamericana | 11 |
| Figura 3.2. Mapa de microzonificación sísmica del distrito de La Molina..... | 13 |
| Figura 3.3. Nivel de desempeño esperado para edificaciones de diferentes usos..... | 15 |
| Figura 3.4. Ejemplo del Modelo de Columna Ancha y Sección Transformada | 19 |
| Figura 4.1. Planta del Pabellón elegido del Colegio A..... | 21 |
| Figura 4.2. Planta del Pabellón elegido del Colegio B | 22 |
| Figura 4.3. Planta del Pabellón elegido del Colegio C..... | 23 |
| Figura 4.4. Planta del Pabellón elegido del Colegio D | 24 |
| Figura 4.5. Planta del Pabellón elegido del Colegio E..... | 25 |
| Figura 4.6. Planta de la Primera Tipología con 5 ejes..... | 26 |
| Figura 4.7. Elevación de la Primera Tipología..... | 27 |
| Figura 4.8. Planta de Segunda Tipología | 28 |
| Figura 4.9. Elevación de Segunda Tipología | 29 |
| Figura 4.10. Ejemplo de Transformación de Secciones para la Tipología 2 | 30 |
| Figura 4.11. Vista frontal del eje de la fachada delantera..... | 31 |
| Figura 4.12. Vista frontal del eje de la fachada posterior..... | 31 |
| Figura 4.13. Vista en 3D de la primera tipología con enfoque hacia la fachada delantera... | 32 |
| Figura 4.14. Vista frontal del eje de la fachada delantera..... | 33 |
| Figura 4.15. Vista frontal del eje de la fachada posterior..... | 33 |
| Figura 4.16. Vista en 3D de la segunda tipología con enfoque hacia la fachada delantera. | 34 |
| Figura 4.17. Parámetros sísmicos de las tipologías y espectro de la norma E.030 | 34 |
| Figura 4.18. Sección del diseño de acero de VT-01, VT-02, VT-03 y VT-04. | 39 |
| Figura 4.19. Vista frontal del diseño de acero de VT-01, VT-02, VT-03 y VT-04. | 39 |
| Figura 4.20. Sección del diseño de acero de las columnas C1, C2 y C3..... | 40 |
| Figura 4.21. Sección del diseño de acero de VT-XX, VT-Y1 y VT-Y2. | 40 |
| Figura 4.22. Vista frontal del diseño de acero de VT-XX, VT-Y1 y VT-Y2. | 41 |
| Figura 4.23. Secciones de las columnas de la tipología 2..... | 41 |
| Figura 4.24. Diagrama esfuerzo deformación asumidos | 42 |
| Figura 4.25. Deformaciones y Fuerzas internas del punto de rotura en la viga VT-XX..... | 42 |
| Figura 4.26. Diagrama momento curvatura de la viga VT-XX en el extremo A | 43 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.27. Diagrama momento curvatura de la columna C1 | 43 |
| Figura 4.28. Curva de Capacidad Cortante vs Deriva de Albañilería Confinada | 45 |
| Figura 4.29. Curva de Capacidad Cortante vs Desplazamiento de Albañilería Confinada ... | 46 |
| Figura 4.30. Propiedades de las rótulas de corte para un muro de albañilería confinada | 46 |
| Figura 4.31. Ecuaciones aproximadas para obtener las longitudes de rótulas plásticas..... | 47 |
| Figura 4.32. Determinación de longitud de rótulas plásticas para la columna 25x65..... | 48 |
| Figura 4.33. Tabla de valores a ingresar para el diagrama momento curvatura en vigas. ... | 48 |
| Figura 4.34. Criterios de aceptación utilizados para vigas..... | 48 |
| Figura 4.35. Propiedades de las rótulas plásticas para vigas. | 49 |
| Figura 4.36. Valores a ingresar para el diagrama momento curvatura en columnas y muros. | 50 |
| Figura 4.37. Criterios de aceptación utilizados para columnas y muros. | 50 |
| Figura 4.38. Asignación propiedades de rótulas plásticas para columnas y muros. | 50 |
| Figura 4.39. Asignación de rótulas plásticas para columnas y vigas. | 51 |
| Figura 4.40. Asignación propiedades de rótulas plásticas para muros. | 51 |
| Figura 4.41. Caso de Carga “Pushover” para distribución uniforme en dirección Y | 52 |
| Figura 4.42. Última deformación considerando cargas incrementales con distribución uniforme en sentido X. | 53 |
| Figura 4.43. Curva de Capacidad considerando cargas incrementales con distribución uniforme en eje Y | 54 |
| Figura 4.44. Curva de Capacidad considerando cargas incrementales con distribución ascendente en eje Y | 54 |
| Figura 4.45. Idealización bilineal del espectro de capacidad para el pushover uniforme en X de la tipología de 5 ejes. | 56 |
| Figura 4.46. Espectro de capacidad con 3 casos para el pushover uniforme en X de la tipología de 5 ejes. | 57 |
| Figura 5.1. Curvas de Fragilidad considerando cargas laterales incrementales en dirección X de asignación uniforme para la tipología de 5 ejes..... | 61 |
| Figura 5.2. Curvas de Fragilidad considerando cargas laterales incrementales en dirección Y de asignación uniforme para la tipología de 5 ejes..... | 61 |
| Figura 5.3. Curvas de Fragilidad considerando cargas laterales incrementales en dirección X de asignación ascendente para la tipología de 5 ejes | 62 |
| Figura 5.4. Curvas de Fragilidad considerando cargas laterales incrementales en dirección Y de asignación ascendente para la tipología de 5 ejes | 62 |
| Figura 5.5. Curvas de Fragilidad considerando cargas laterales incrementales en dirección X de asignación uniforme para la tipología de 7 ejes..... | 63 |
| Figura 5.6. Curvas de Fragilidad considerando cargas laterales incrementales en dirección Y de asignación uniforme para la tipología de 7 ejes..... | 63 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 5.7. Curvas de Fragilidad considerando cargas laterales incrementales en dirección X de asignación ascendente para la tipología de 7 ejes | 64 |
| Figura 5.8. Curvas de Fragilidad considerando cargas laterales incrementales en dirección Y de asignación ascendente para la tipología de 7.ejes | 64 |
| Figura 5.9. Desempeño de un sismo raro para la distribución de carga uniforme en dirección X para.la tipología de 5 ejes..... | 65 |
| Figura 5.10. Desempeño de un sismo raro para la distribución de carga uniforme en dirección Y para.la tipología de 5 .ejes..... | 65 |
| Figura 5.11. Desempeño de un sismo raro para la distribución de carga ascendente en dirección X para la tipología de 5 .ejes..... | 66 |
| Figura 5.12. Desempeño de un sismo raro para la distribución de carga ascendente en dirección Y para la tipología de 5 .ejes..... | 66 |
| Figura 5.13. Desempeño de un sismo raro para la distribución de carga uniforme en dirección X para la tipología de 7 .ejes..... | 67 |
| Figura 5.14. Desempeño de un sismo raro para la distribución de carga uniforme en dirección Y para la tipología de 7 ejes..... | 67 |
| Figura 5.15. Desempeño de un sismo raro para la distribución de carga ascendente en dirección X para la tipología de 7 ejes..... | 68 |
| Figura 5.16. Desempeño de un sismo raro para la distribución de carga ascendente en dirección Y para la tipología de 7 ejes..... | 68 |
| Figura 6.1. Comparación de curva de capacidad para la distribución de carga uniforme en dirección X.para la tipología de 5 .ejes..... | 71 |
| Figura 6.2. Comparación de curva de capacidad para la distribución de carga ascendente en dirección X de la tipología de 5 ejes..... | 72 |
| Figura 6.3. Comparación de curva de fragilidad para la distribución de carga uniforme en dirección X.del modelo de 5 ejes con tabiques y sin columna corta. | 72 |
| Figura 6.4. Comparación de curva de fragilidad para la distribución de carga ascendente en dirección X.del modelo de 5 ejes con tabiques y sin columna corta. | 73 |
| Figura 6.5. Comparación de curva de fragilidad para la distribución de carga uniforme en dirección Y.del modelo de 5 ejes con tabiques y sin columna corta. | 73 |
| Figura 6.6. Comparación de curva de fragilidad para la distribución de carga ascendente en dirección Y.del modelo de 5 ejes con tabiques y sin columna corta. | 74 |
| Figura 6.7. Comparación de curva de capacidad para la distribución de carga uniforme en dirección Y para la tipología de 7 ejes..... | 75 |
| Nota. Fuente propia. | 75 |
| Figura 6.8. Comparación de curva de capacidad para la distribución de carga ascendente en dirección.Y de la tipología de 7 .ejes..... | 76 |
| Figura 6.9. Comparación de curva de fragilidad para la distribución de carga uniforme en dirección Y del modelo de 7 ejes con tabiques y sin columna corta. | 76 |
| Figura 6.10. Comparación de curva de fragilidad para la distribución de carga ascendente en dirección Y del modelo de 7 ejes con tabiques y sin columna corta. | 77 |

Figura 6.11. Comparación de curva de fragilidad para la distribución de carga uniforme en dirección Y del modelo de 7 ejes con tabiques y sin columna corta. 77

Figura 6.12. Comparación de curva de fragilidad para la distribución de carga ascendente en dirección Y del modelo de 7 ejes con tabiques y sin columna corta. 78



ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 4.1. Parámetros sísmicos de la tipología con 5 ejes | 35 |
| Tabla 4.2. Fuerza Cortante en la base según el análisis lineal dinámico y estático para la tipología de 5 ejes | 35 |
| Tabla 4.3. Desplazamientos por el caso de sismo en X y Y multiplicado por 0.75R | 36 |
| Tabla 4.4. Verificación del agrietamiento y diseño de muros ante fuerzas cortantes para la tipología de 5 ejes | 36 |
| Tabla 4.5. Parámetros sísmicos de la tipología con 7 ejes | 37 |
| Tabla 4.6. Fuerza Cortante en la base según el análisis lineal dinámico y estático para la tipología de 7 ejes | 37 |
| Tabla 4.7. Desplazamientos por el caso de sismo en X y Y multiplicado por 0.75R | 37 |
| Tabla 4.8. Verificación del agrietamiento y diseño de muros ante fuerzas cortantes para la tipología de 7 ejes | 38 |
| Tabla 4.9. Porcentaje de derivas para las curvas de capacidad de los muros | 45 |
| Tabla 4.10. Parámetros aleatorios considerados en el espectro de capacidad | 57 |
| Tabla 5.1. Desplazamientos espectrales y parámetros para la distribución uniforme y sismo en X de la tipología de 7 ejes | 60 |
| Tabla 5.2. Secuencia para determinar la probabilidad de excedencia para un desempeño completo en caso de distribución uniforme y sismo en X de la tipología de 7 ejes | 60 |
| Tabla 5.3. Probabilidad de cada desempeño en base a las curvas de fragilidad para un sismo en dirección X de la tipología de 5 ejes | 69 |
| Tabla 5.4. Probabilidad de cada desempeño en base a las curvas de fragilidad para un sismo en dirección Y de la tipología de 5 ejes | 69 |
| Tabla 5.5. Probabilidad de cada desempeño en base a las curvas de fragilidad para un sismo en dirección X de la tipología de 7 ejes | 70 |
| Tabla 5.6. Probabilidad de cada desempeño en base a las curvas de fragilidad para un sismo en dirección Y de la tipología de 7 ejes | 70 |
| Tabla 6.1. Probabilidad de cada desempeño en base a las curvas de fragilidad para un sismo en dirección X de la tipología de 5 ejes sin tabiques | 74 |
| Tabla 6.2. Probabilidad de cada desempeño en base a las curvas de fragilidad para un sismo en dirección Y de la tipología de 5 ejes sin tabiques | 75 |
| Tabla 6.3. Probabilidad de cada desempeño en base a las curvas de fragilidad para un sismo en dirección X de la tipología de 7 ejes sin tabiques | 78 |
| Tabla 6.4. Probabilidad de cada desempeño en base a las curvas de fragilidad para un sismo en dirección Y de la tipología de 7 ejes sin tabiques | 79 |

CAPÍTULO 1: ASPECTOS GENERALES

1.1.Introducción

El peligro sísmico en el Perú proviene de su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico, donde además las placas tectónicas se extienden en una zona de subducción. Esta zona es conformada por la placa Sudamericana y la placa oceánica de Nazca, por lo que las ciudades costeras están expuestas a un permanente peligro de sismos y tsunamis. En específico, en la zona de la capital - Lima - no ha ocurrido un terremoto severo según su historia sísmica desde el año 1746 y actualmente esta región cuenta con un silencio sísmico (Tavera, 2014).

El silencio sísmico genera un bajo nivel de concientización ante las consecuencias de la actividad sísmica en el sector de la construcción; además, la vulnerabilidad urbana y social ha ido aumentando con el tiempo. Como consecuencia, de repetirse un evento sísmico de igual magnitud al de 1746 (Mw 8.8) se pueden generar daños cuantiosos debido al crecimiento desorganizado en Lima. Se estima que el 38% de las viviendas serán destruidas y el 63% serán inhabitadas (Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI], 2017). Considerando las cifras estimadas de daño, es de suma importancia analizar y estudiar la vulnerabilidad sísmica de las estructuras con el objetivo de reducir las pérdidas materiales y humanas.

En particular, se debe asegurar que las estructuras esenciales no lleguen al colapso y cumplan con su desempeño proyectado. Dentro de estas se encuentran los colegios, que son instalaciones utilizadas por varios grupos vulnerables. Las consecuencias que conlleva la pérdida total de las instalaciones escolares están relacionadas a pérdidas de espacios de recreación, programas de alimentación, programas educativos y de salud (Fondo de las Naciones Unidas para los Niños [UNICEF], 2013).

De manera más específica, los colegios que se encuentran en el distrito de La Molina presentan un alto peligro sísmico debido a su clasificación de suelo y características geomorfológicas. Adicionalmente, teniendo en cuenta la posible

problemática de estabilidad y compatibilidad de suelos del distrito es crucial estudiar la vulnerabilidad de los colegios en La Molina (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2010).

La presente tesis busca identificar el estado actual de la vulnerabilidad encontrada en la tipología común de una muestra de colegios en La Molina, respondiendo a la pregunta ¿Cuál es el estado actual de la vulnerabilidad sísmica de la tipología común de los colegios de La Molina? Con este fin, se realiza un análisis de vulnerabilidad empleando curvas de fragilidad, que permiten medir el riesgo sísmico de la estructura frente a sismos de diversas intensidades.

1.2. Objetivos de la Investigación

Identificar el estado actual de la vulnerabilidad sísmica haciendo uso de las curvas de fragilidad con base en la tipología común de las instituciones educativas primarias y secundarias del distrito de La Molina.

1.3. Hipótesis

Los niveles de vulnerabilidad se ven afectados por la antigüedad y las características de la tipología estructural. Considerando el caso de una o más tipologías en común de los colegios de La Molina, se espera que queden en estado operativo luego de un sismo severo con 475 años de periodo de retorno.

1.4. Justificación

Los centros educativos en el distrito de La Molina están expuestos a un elevado riesgo sísmico por las condiciones del suelo con la que fueron construidos. Además, debido al silencio sísmico y al bajo nivel de concientización los estándares de calidad y diseño estructural no siempre cumplen con los requisitos de la norma durante la construcción (MVCS, 2010). Por ello, ante la posible llegada de un sismo severo a la capital se debe tener la certeza de que las estructuras esenciales estén preparadas para cumplir con el desempeño con las que fueron diseñadas.

De esta manera, la presente tesis busca determinar si la tipología común actual de los colegios cumple con el desempeño sísmico operativo, según la norma E.030, ante la llegada de un sismo severo. Adicionalmente, a través de los estudios realizados se da paso a que otros profesionales puedan evaluar el estado actual de la vulnerabilidad sísmica de los colegios en La Molina.

1.5. Alcances y limitaciones

En cuanto a los alcances, el presente trabajo está enfocado en evaluar la vulnerabilidad sísmica de dos tipologías representativas de colegios ubicados en el distrito de La Molina en base a lo observado en los estudios de campo. Además, debido a la diversidad de estructuras no se toma en consideración la evaluación de tipologías no comunes como viviendas adaptadas a centros educativos. Adicionalmente, la tipología común se determina realizando un levantamiento en campo con las dimensiones de la arquitectura, por lo que se asumirán datos como el espesor del tarrajeo para obtener las dimensiones del casco estructural. Las dimensiones finales se obtienen realizando una media estadística del replanteo en campo.

En cuanto a las limitaciones, los resultados obtenidos al usar métodos determinísticos no toman en cuenta la variación probabilística de los parámetros sísmicos ni estructurales. También, al utilizar el programa SAP2000 la precisión y exactitud de los resultados dependen de las simplificaciones que se realizan en el modelado. Asimismo, como las tipologías presentan parapetos no aislados de los elementos estructurales estos no se están considerando como parte de la secuencia de fallas para el análisis no lineal y solo se considera que están empotrando a las columnas para formar columnas cortas. También se desprecia la interacción suelo-estructura como parte del análisis pushover y se asumirá que los apoyos al suelo son empotrados.

1.6. Metodología

La presente investigación es una tesis de ingeniería aplicada que busca identificar el estado actual de la vulnerabilidad sísmica de dos tipologías en común de colegios en el distrito de La Molina utilizando como herramienta las curvas de fragilidad. Se utiliza para el diseño el reglamento nacional de edificaciones peruano y para el análisis se lleva a cabo un procedimiento push over determinista.

Primero, se realiza un levantamiento de campo y se obtiene información sobre la historia y condiciones de la infraestructura ante eventos sísmicos pasados. Luego, con la información recopilada se elaboran dos tipologías utilizando el promedio de las dimensiones y características estructurales en común y se realiza un modelado en el programa SAP2000. Se realizan análisis sísmicos estático lineal, espectral modal y

análisis de cargas laterales incrementales para obtener la curva y espectro de capacidad. Asimismo, se definen los límites de estados de daño propuestos por el manual técnico del Hazus MR4 y se obtienen las curvas de fragilidad.

Finalmente, mediante los gráficos obtenidos, se estima el porcentaje de la probabilidad que el parámetro de comportamiento estructural supere al parámetro de capacidad estructural para diferentes eventos sísmicos. También se calificará el desempeño sismorresistente de las dos tipologías típicas con los límites de daño.



CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

En el capítulo 2 se muestran estudios previos realizados sobre las curvas de fragilidad y la vulnerabilidad estructural. También se identifican las tipologías estructurales de colegios que se utilizan comúnmente en el Perú.

2.1. Antecedentes

Velásquez (2006) presenta una metodología con enfoque probabilístico que permite estimar el riesgo sísmico y predecir las pérdidas por sismos en edificios peruanos para una tipología estructural típica. Estas pérdidas se asocian con los costos de reparación que se pueden expresar en términos monetarios. Asimismo, elabora curvas de fragilidad analíticas mediante una simulación estocástica para cuantificar el riesgo sísmico. Se demuestra que la vulnerabilidad sísmica en los colegios se puede representar de manera adecuada y razonable con las curvas de fragilidad respectivas. Adicionalmente, el autor recomienda aplicar la metodología en grupos masivos de edificios con características similares para mejorar la precisión de los datos. Se recomienda analizar señales de sismos reales y considerar los estados de daño y parámetros estructurales a manera de obtener curvas más precisas.

Por otro lado, Maldonado (2019) propone disminuir y analizar la vulnerabilidad sísmica con la que cuentan edificios de tipologías comunes utilizando herramientas de simulación probabilística. Para ello, se generan funciones de vulnerabilidad que permiten observar si la estructura presenta una ductilidad adecuada cuando cuenta con porcentajes bajos de vulnerabilidad. Adicionalmente, haciendo uso de esta herramienta, es posible calcular el costo de reparación para una edificación en un contexto sísmico específico. Además, el autor recomienda considerar la incertidumbre en la capacidad estructural variando de manera aleatoria los parámetros básicos como las propiedades geométricas y resistencia del material.

La Municipalidad de Lima con la colaboración del Instituto Geofísico del Perú (2021) desarrollan el “Plan de contingencia ante Sismo de gran magnitud seguido de tsunami de la Provincia de Lima 2021-2023” con el objetivo de realizar la gestión de

riesgo de desastres y establecer procedimientos de movilización y respuesta para toda la población peruana. Dentro de la sección de análisis de vulnerabilidad sísmica, se determina que las instituciones educativas antiguas pueden resultar afectadas por un sismo de Mw 8.8 si presentan fallas estructurales y/o hacinamiento. Además, se determinan los niveles de riesgo sísmico por distrito de la provincia de Lima metropolitana considerando los sistemas de información geográfica. Según el mapa de Microzonificación Sísmica desarrollado, las zonas que presentaron una exposición alta y muy alta son los distritos Rímac, Punta Hermosa, Magdalena del Mar, San Juan de Miraflores, Barranco, San Miguel, Miraflores y San Isidro.

2.2. Tipologías de colegios en Perú

Durante las últimas épocas la infraestructura de los colegios en el Perú ha ido cambiando junto con las normas y exigencias del diseño sismorresistente. Debido a estos cambios las instituciones cuentan con diferentes características y formas estructurales que permiten clasificarlas en tipologías típicas. Según Chacón y Paz (2016), se pudo identificar cinco edificaciones observadas en la figura 2.1. que representan las instituciones escolares a nivel nacional: Edificio de Adobe, Edificio Gran Unidad Escolar, Edificio de educación superior pre NDRS 1997, Edificio 780 pre NDRS - 1997 y Edificio 780 post 97.



Figura 2.1. Tipología de infraestructuras escolares

Tomado del seminario de promoción de la normatividad para el diseño y construcción de edificaciones seguras (p.9), por Silva, 2012.

Es importante mencionar que las edificaciones presentan modificaciones dependiendo su ubicación en la costa, sierra o selva; no obstante, esta investigación se enfocará en los modelos de la costa. Adicionalmente, las tipologías Edificio 780 pre NDRS - 1997 y Edificio 780 post 97 son las más recientes y las de mayor importancia para la presente investigación.

2.2.1. Colegio 780 pre.

Las edificaciones 780 pre NDRS -1997 fueron diseñadas y construidas entre los años 1977 – 1997. Estas siguen los requerimientos de la norma sísmica del año 1977, misma que debido al cálculo errado de deformaciones laterales fue muy permisiva con los desplazamientos laterales máximos (Blanco, 2005). La base arquitectónica consta de bloques con forma de rectángulo de hasta tres pisos y cada piso incluye un rango de dos a tres aulas. Estas cuentan con dos fachadas longitudinales: una delantera y una posterior; ambas contienen ventanas, alféizares altos y bajos, dependiendo de su ubicación, y una puerta en la fachada que enfrenta al corredor.

En cuanto a la estructuración, la dirección transversal consta de un sistema combinado de muros de con tabiques de albañilería confinada y pórticos de concreto armado mientras que, de manera longitudinal, se utilizan únicamente pórticos de concreto armado (Huerta y Uribe, 2006). En la figura 2.2 se aprecian las dimensiones de una planta representativa con 7.8 m de largo y un corredor longitudinal de aproximadamente 2.1m de ancho. La losa cuenta con un sistema aligerado convencional de espesor de 0.17 o 0.2 m reforzada en la dirección longitudinal.



Figura 2.2. Sistema Estructural Convencional en Planta del Colegio 780 pre
Tomado de Evaluación experimental de una propuesta de reforzamiento estructural para las edificaciones escolares construidas antes de 1997 (p.7), por Ramirez, 2017.

En la presente tipología estructural el entrepiso tiene una altura de 3.15 m y de los alfeizares son 2 m, en caso de ser altos, y 1.3m cuando son bajos. Los alfeizares se separan de las columnas por juntas sísmicas de $\frac{1}{2}$ " a 1" (Ramirez, 2017). Los muros que separan las aulas son portantes de albañilería confinada y las columnas son rectangulares de dimensiones variables según el eje.

Los colegios 780 pre tuvieron problemas en cuanto al comportamiento sísmico debido a que la norma exigió una resistencia sin tomar en cuenta una correcta rigidez lateral, problema que afectó a las edificaciones en la dirección longitudinal. Además, las juntas sísmicas eran deficientes debido a que no eran de un tamaño correcto o fueron realizadas de manera descuidada. En consecuencia, en 2014 se inició un proyecto de reforzamiento para los colegios 780 pre (Maldonado, 2019).

2.2.2. Colegio 780 post.

Las edificaciones 780 post, también denominadas colegios 780 moderno o actual, se construyen en base a la norma sismorresistente de 1997, la cual presenta cambios importantes con respecto a su versión preliminar. Se modificaron las estimaciones de los desplazamientos laterales relativos y se ajustó el factor R, por lo que se obtienen resultados 2.5 veces mayores a su versión previa (Blanco, 2005). Con ello se tuvo que realizar cambios en la estructura previa (780 pre) con la finalidad de otorgar rigidez lateral.

Las secciones de las columnas se incrementaron y algunas cambiaron a sección en forma de T, lo que otorgaría rigidez en la dirección longitudinal. Por otra parte, se redujeron las dimensiones de las ventanas y se ampliaron las juntas sísmicas de los alfeizares a una dimensión de 1" con el objetivo de controlar el fenómeno de columna corta.

En cuanto a la arquitectura, los colegios 780 post son similares a su versión preliminar (figura 2.3). La estructura consta de bloques rectangulares de dos a tres aulas que mantienen las dimensiones anteriores de longitud (7.8 m a 8 m) y ancho de corredor (2.1m) (Chacón y Paz, 2016). Por otro lado, en la estructura transversal se mantuvieron los muros de albañilería confinada de espesor de 0.25 m, encargados de la separación entre aulas. De la misma manera, se conservan las vigas y la losa aligerada de 0.17 o 0.2 m armada en dirección longitudinal y que forma parte del corredor en volado sustentado por la prolongación de las vigas.

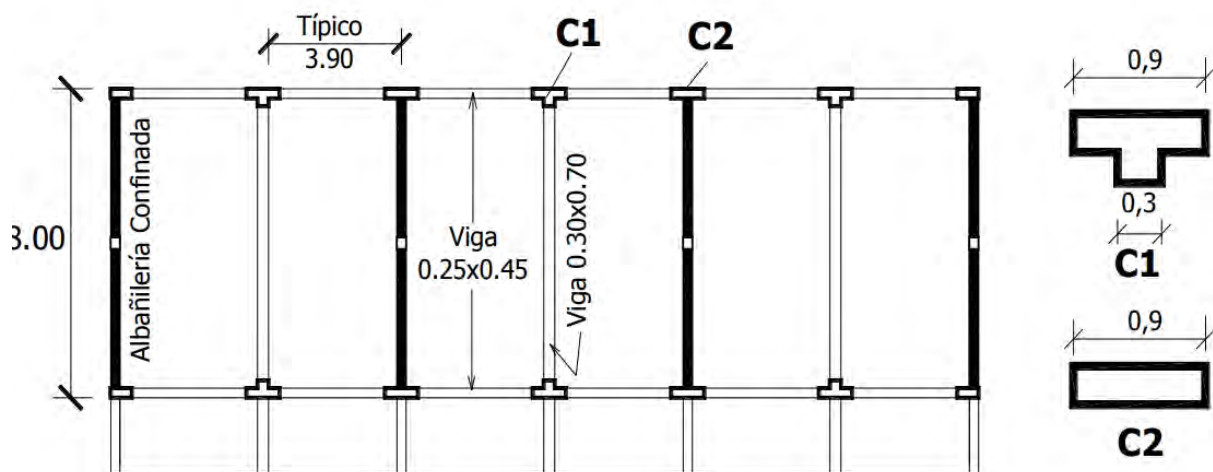


Figura 2.3. Sistema Estructural Convencional en Planta del Colegio 780 post
Tomado de *Criterios Técnicos para la Construcción de Edificaciones Sismorresistentes*, por Silva, 2012.

Finalmente, con el cambio de la norma sismorresistente, se clasificó a los colegios como estructuras esenciales que no debían detener su funcionamiento después de un evento sísmico (Blanco, 2005).

CAPÍTULO 3: MARCO CONCEPTUAL

En el capítulo 3 se resume el marco conceptual utilizado para la elaboración de la tesis y se evidencia el contexto sísmico de la Molina. Asimismo, se definen conceptos relacionados con el enfoque utilizado para generar las curvas de fragilidad determinísticas.

3.1. Definiciones fundamentales

Algunos conceptos de alta relevancia para la presente investigación son el peligro sísmico, la vulnerabilidad sísmica y el riesgo sísmico. El Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (2016) define peligro sísmico como la intensidad sísmica a la que se someterán las estructuras de un emplazamiento determinado. Asimismo, en el ámbito de la ingeniería, se suele expresar en términos del valor máximo de un parámetro indicador de severidad (Muñoz, s.f.) y depende de la sismicidad del emplazamiento y las condiciones de la zona: características de suelo, geografía y topología del lugar.

Por otro lado, la vulnerabilidad sísmica evalúa el efecto estructural que tiene una sollicitación sísmica, tomando en consideración únicamente las propiedades estructurales internas (González y Mases, 2003). Este parámetro es específico para cada edificación y no está determinado por la ubicación geográfica. La vulnerabilidad depende de factores como el diseño arquitectónico, los materiales empleados, la calidad de la construcción y la antigüedad del edificio. Por ejemplo, las construcciones más antiguas, que no siguen los estándares modernos de resistencia sísmica, suelen ser más susceptibles a daños graves en caso de un sismo. Además, realizar un análisis de vulnerabilidad sísmica es crucial para identificar las áreas que necesitan refuerzo o adaptación, lo que permite una planificación urbana más segura y eficiente. Esto es especialmente importante en regiones propensas a sismos, debido a que una evaluación adecuada de la vulnerabilidad puede ser fundamental para proteger vidas y propiedades, así como para establecer estrategias de respuesta ante emergencias.

En contraste, el riesgo sísmico representa el daño en una estructura tomando en cuenta su vulnerabilidad y la peligrosidad del lugar. Es importante notar que el único parámetro que puede disminuir el riesgo total de una estructura es la

vulnerabilidad sísmica (Muñoz, s.f.). González y Mases (2003) también incluyen en su definición de riesgo sísmico las pérdidas económicas ocasionadas por el sismo, las cuales pueden ser directas, cuando abarca los elementos de la edificación afectada; e indirectas, si toma en cuenta víctimas humanas, contenido de la edificación y la interrupción de los servicios.

3.2.Contexto sísmico en el ámbito de estudio

3.2.1 Contexto Sísmico en el Perú.

En Perú, los sismos son provocados por la interacción entre la placa de oceánica y la placa continental en un proceso conocido como subducción. Como se muestra en la figura 3.1. este fenómeno tiene lugar frente a la costa, donde la Placa de Nazca se desplaza bajo la placa Sudamericana. Como resultado, gran parte de la costa peruana experimenta sismos de foco superficial, los cuales se originan a poca profundidad y suelen tener un impacto más fuerte en la superficie. El movimiento del suelo y la propagación de las ondas sísmicas son consecuencia del desplazamiento relativo entre ambas placas (Velásquez, 2006). Este proceso no solo contribuye a la actividad sísmica, sino que también modela la geografía y los ecosistemas costeros de la región. La subducción también es responsable de la formación de cadenas montañosas y volcanes, lo que añade complejidad a la sismicidad en el país.

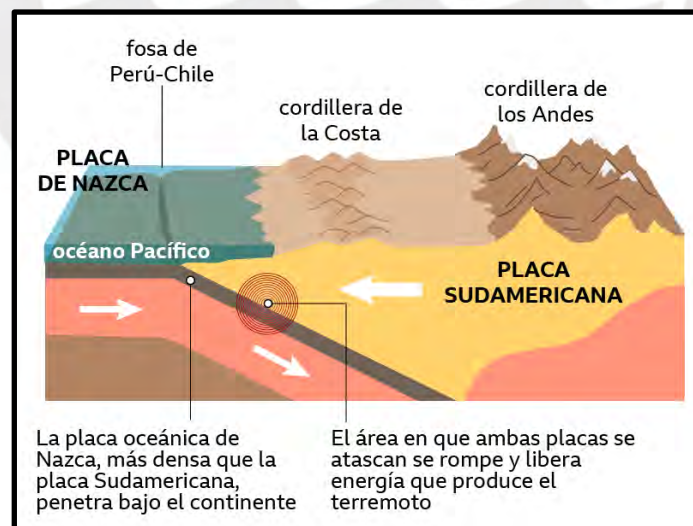


Figura 3.1. Fenómeno de subducción entre Placa Nazca y Placa Sudamericana Tomado de Cómo se produce un terremoto en una zona de subducción, por BBC News

Mundo, 2020.

La actividad tectónica constante subraya la importancia de estar preparados para desastres y de implementar medidas de mitigación. Dado que Perú se localiza en una de las zonas más sísmicamente activas del mundo, es vital que tanto las autoridades como la población comprendan los riesgos asociados a esta actividad. Dentro de los mayores terremotos que se han podido documentar en la costa peruana, se destaca el de 1746 con epicentro en la ciudad de Lima. La magnitud fue de 8.8 Mw y tuvo una intensidad de X en escala la de Mercalli Modificada. Se reportaron 1300 muertos en Lima; mientras que en El Callao se reportaron 3800 muertos debido a que el sismo fue seguido de un tsunami con olas de hasta 25 metros (Carcelén, Morán y Amador, 2020). Por otro lado, el último terremoto con epicentro en Lima ocurrió en 1974 con magnitud registrada de 8.8 Mw e intensidades entre VII - VIII, dejando 252 muertos (PREDES, 2010).

3.2.2 Contexto Sísmico en La Molina.

El distrito de La Molina, ubicado al sureste de Lima, presenta unas características geomorfológicas y tipos de suelos que lo dotan de un comportamiento sísmico particular. Es catalogado como zona sísmica de grado 4 según la norma E0.30. Durante terremotos pasados, se registraron en este distrito intensidades sísmicas superiores de uno a dos grados en comparación con otras áreas de la capital. (MVCS, 2010). Además, según el Centro de Estudios y Prevención de Desastres PREDES el terremoto de 1974 evidenció que en el distrito de La Molina pueden surgir problemas de estabilidad o compactación del suelo, fenómenos que podrían explicar la elevada intensidad registrada en esta zona durante los sismos (2010). Esta información deja claro que el peligro sísmico en este distrito es significativamente mayor debido a las condiciones locales del área.

En la figura 3.2 se identifican las zonas donde podría haber un mayor daño en las infraestructuras debido a un sismo muy raro. En la Zona IV es donde se presenta el mayor daño esperado, mientras que en la Zona I es donde se esperan menores pérdidas de vulnerabilidad. Cabe señalar que se percibirán mayores intensidades de sismos en las zonas IV y III debido a las características de vibración del terreno y capacidad portante.

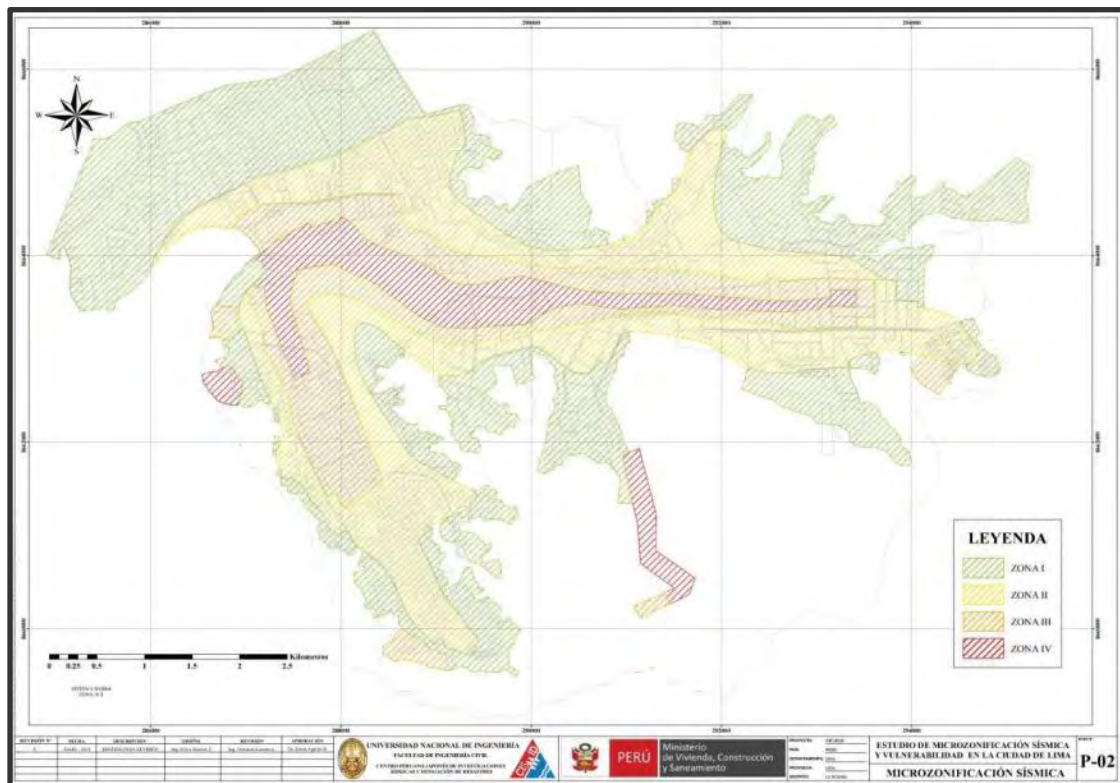


Figura 3.2. Mapa de microzonificación sísmica del distrito de La Molina.

Tomado de *Estudio de microzonificación sísmica y vulnerabilidad en el distrito de La Molina*, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2011.

La Zona I se caracteriza por tener suelos gravosos coluviales y estratos que contienen depósitos moderados de arena mal gradada por lo que se prevé un peligro sísmico moderado. Por otro lado, en la zona II se presentan estratos gravosos de origen coluvial con poco espesor y con buena capacidad portante donde también se espera un moderado peligro sísmico. En la zona III se presentan estratos de suelos finos y arenosos por lo que se espera un comportamiento desfavorable y un alto peligro sísmico. Por último, en la zona IV se presentan suelos finos, arenosos y poca cantidad de relleno sanitario con baja capacidad portante del terreno, donde se espera una mayor exposición a un comportamiento sísmico más desfavorable y daños por sismo (USMP 2015).

3.3. Vulnerabilidad sísmica

Se define como la respuesta anticipada de una estructura frente a la ocurrencia de un evento sísmico. Asimismo, debido a que se basa únicamente en las propiedades estructurales de cada edificación, es una propiedad única de cada estructura. Según González y Mases (2003), la característica principal para clasificar

la vulnerabilidad es la estructura de la construcción; no obstante, puede ser modificada por diferentes parámetros tales como la antigüedad, calidad de material, altura, o regularidad de la edificación. Por otro lado, se puede expresar la vulnerabilidad de una estructura para diferentes intensidades de eventos sísmicos en una función gráfica denominada función de vulnerabilidad.

Según Caicedo et al. (1994) la importancia de obtener la función de vulnerabilidad de una estructura radica principalmente en obtener el riesgo sísmico de la edificación; adicionalmente, es posible utilizarla como una herramienta en los planes de mitigación de desastres para anticipar consecuencias y resultados negativos. De la misma manera, se puede emplear para realizar un análisis de costos y determinar si es conveniente reforzar una estructura o repararla luego de un evento sísmico.

Debido a su alta relevancia existen múltiples métodos para la determinación de la vulnerabilidad; no obstante, no existe una estandarización ni un consenso general para la obtención de la función. Los métodos se diferencian en precisión y gastos, y se seleccionan de acuerdo con la facilidad para recopilar información de campo, tecnología y objetivos de la evaluación (Quiroz, 2017). Caicedo et al. (1994) clasifica y define los diversos métodos en Subjetivos y Analíticos.

3.3.1. Métodos subjetivos

Son aquellos métodos en los que el cálculo de la vulnerabilidad es rápido, poco costoso y poco preciso; debido a ello, suele ser aplicado en el estudio de múltiples edificaciones con el objetivo de tener una idea preliminar del comportamiento y vulnerabilidad de las edificaciones. Estos métodos suelen utilizar parámetros subjetivos, mediante encuestas o formularios, que dependen del criterio de algún experto o evaluador.

Algunos métodos mencionados por Quiroz (2017) son: la opinión de expertos, que recopila el juicio de diversos expertos y profesionales referentes a las estructuras determinadas; asignación de puntaje, utilizando múltiples criterios se califica la estructura y dependiendo del puntaje se clasifica como vulnerable; y observación de vulnerabilidad, este método determina la vulnerabilidad mediante observación de daños y análisis estadístico.

3.3.2. Métodos analíticos.

El cálculo de la vulnerabilidad se realiza de manera más precisa, costosa y toma más tiempo ejecutarlos por lo que se utilizan evaluaciones especializadas y detalladas de edificaciones específicas. Se diferencian por los modelos refinados utilizados para representar de manera adecuada la estructura y los indicadores utilizados para cuantificar el daño y degradación de la estructura y sus elementos.

3.4. Desempeño sismorresistente

El desempeño sismorresistente es representado con un estado límite de daño que depende del sismo de diseño y el tipo de edificación, mostrado en la figura 3.3. Los cuatro niveles de desempeño propuestos por el SEAOC son completamente operativo, operativo, resguardo de la vida y cerca al colapso. En un estado de daño cercano al colapso, se anticipa un daño significativo, fallas en los elementos no estructurales y un compromiso en la seguridad de las personas debido a esos daños. Además, se espera que ninguna estructura diseñada con buenas prácticas de ingeniería sismorresistente llegue al colapso (SEAOC, 1999).

| | | Nivel de desempeño | | | |
|-----------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------|
| | | Completamente operativo | Operativo | Resguardo de la vida | Cerca al colapso |
| Sismo de diseño | Sismo frecuente (45 años) | Edificación común | | | |
| | Sismo ocasional (75 años) | Edificación esencial | Edificación común | | |
| | Sismo raro (475 años) | Edif. de seguridad crítica | Edificación esencial | Edificación común | |
| | Sismo muy raro (970 años) | Edif. de seguridad crítica | Edif. de seguridad crítica | Edificación esencial | Edificación común |

Figura 3.3. Nivel de desempeño esperado para edificaciones de diferentes usos.

Nota. Tomado de *Diseño de hospitales con la norma peruana de aislamiento sísmico E.030*, por Muñoz, A., 2018.

Para realizar un diseño estructural orientado al desempeño sísmico este se realiza en base a la clasificación de la edificación. En edificaciones esenciales el desempeño para un sismo frecuente con periodo de retorno de 45 y 75 años debería ser completamente operativo; para ello, el comportamiento estructural debería de ser perfectamente elástico. Para sismos raros con periodo de retorno de 475 y 975 años las estructuras esenciales deberían de presentar importantes incursiones inelásticas

que representan pérdida de resistencia y rigidez; sin embargo, podría ser reparable (Muñoz, s.f.).

3.5. Análisis Sísmico Lineal y no Lineal

El análisis sísmico se realiza con el objetivo de, ante una sollicitación sísmica específica, determinar la respuesta e impacto que tiene una estructura. De manera directa, del análisis se obtienen las fuerzas y deformaciones que se inducen en la edificación y sus componentes durante el sismo. Actualmente existen múltiples métodos de análisis sísmico disponibles. El American Society of Civil Engineers (ASCE) (2017) los clasifica como lineales y no lineales, dependiendo si se considera o no las características no lineales de una edificación; y estáticos y dinámicos, según la representación de las sollicitudes sísmicas. En general existen cuatro principales procedimientos de análisis, los análisis estáticos y dinámicos que se dividen considerando la linealidad y no linealidad de la estructura.

3.5.1. Métodos Lineales según Muñoz (2020).

En el procedimiento del análisis estático lineal (AEL), se representan las sollicitudes sísmicas mediante fuerzas laterales, con las cuales se obtienen las fuerzas internas y los desplazamientos de las estructuras. Estas fuerzas se distribuyen en el centro de masa de cada nivel junto con un momento torsor de piso y se realiza el análisis para las direcciones principales de manera independiente. Por otro lado, el procedimiento dinámico lineal (ADL) representa las sollicitudes sísmicas mediante un espectro de demanda. Se debe modelar la estructura representando de manera adecuada la distribución de rigidez y determinar como mínimo los tres primeros modos de vibración, cuyas masas efectivas deben sumar el 90% de la masa total. Considerando las respuestas de los modos se calculan las fuerzas internas y desplazamientos de la edificación mediante los métodos de combinación modal "Complete Quadratic Combination" (CQC) o el ponderado de la suma de valores absolutos y la raíz cuadrada de la suma de cuadrados.

3.5.2. Métodos no lineales según el ASCE (2017).

Los métodos no lineales son esenciales para evaluar cómo las estructuras reaccionan durante los sismos, ya que consideran las características no lineales de los materiales. El análisis estático no lineal (AENL) aplica cargas de manera incremental al modelo, lo que permite detectar debilidades y prever posibles fallas en

elementos no estructurales. Por otro lado, el análisis dinámico no lineal (ADNL) simula la acción sísmica mediante registros de aceleración a lo largo del tiempo, brindando una comprensión más precisa de cómo las fuerzas afectan a la estructura en distintos momentos. La combinación de ambos enfoques permite optimizar el diseño y la rehabilitación de edificaciones, aumentando su resistencia y flexibilidad. (Muñoz, 2020).

Considerando la magnitud de los sismos de diseño y el comportamiento real de las estructuras es evidente que se producirán incursiones inelásticas ante un evento sísmico grande. Esto implica que al utilizar un análisis lineal, el cual implica realizar fuertes simplificaciones, es necesario ser conservadores al determinar la demanda (Scaletti, 2014). A pesar de ello el análisis lineal es importante debido a que determina la capacidad elástica y el comienzo de la fluencia; mientras que el análisis no lineal muestra cómo se comporta la estructura y el colapso progresivo (Applied Technology Council (ATC), 1996).

La norma establece que las edificaciones en las que es posible realizar únicamente un análisis estático son edificaciones regulares con altura total menor a 30m y estructuras de muros portantes con altura total menor a 15m (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2018).

3.6. Curvas de fragilidad

En el estudio de Velazquez (2006), se señala que las curvas de fragilidad muestran la probabilidad con que la estructura en cuestión alcanza un estado de desempeño, cuantificado en un parámetro de respuesta sísmica, como puede ser el pseudo desplazamiento. Permiten representar el funcionamiento de los sistemas estructurales en la evaluación del riesgo sísmico para luego mejorar el desempeño ante sismos, tanto en sistemas estructurales como en sistemas no estructurales. Los métodos para elaborar estas curvas son los siguientes: observaciones de campo, opinión de expertos, métodos experimentales, y analíticos. La diferencia de los métodos se encuentra en los datos de entrada y en el enfoque utilizado para calcular las probabilidades de cada estado de daño (Bonnet, 2003).

Se tiene como objetivo determinar el comportamiento de un grupo de estructuras frente a diversos niveles de sollicitaciones sísmica. Para poder lograr este objetivo se debe tener en consideración la demanda sísmica, las propiedades

estructurales y sus variaciones y un parámetro (PID) que indique los diversos estados de daño que se pueden alcanzar. Las probabilidades de los estados de daño alcanzados se obtienen finalmente luego de realizar el ADNL (Bonnet, 2003).

3.7. Modelos no lineales de la Albañilería Confinada

El proceso de análisis no lineal implica poder representar la estructura y los elementos que la componen mediante un modelo matemático que pueda reproducir su comportamiento real ante diversas solicitudes. En el caso del análisis de estructuras de albañilería existen diversos modelos de análisis propuestos con diferentes grados de precisión y refinamiento. Entre ellos, los métodos más conocidos y empleados son el método simplificado, el método de elementos finitos y el método de columna ancha y el (Taveras, 2008).

3.7.1. Modelo de la Columna Ancha

Existen varias maneras de determinar la incursión en el rango inelástico en elementos de albañilería no confinada. Uno de estos métodos es denominado método de columna ancha el cual es un macro modelo que consiste en idealizar al muro de albañilería confinada mediante un elemento frame colocado en el centroide del muro y que incorpore sus propiedades cortantes y de flexión (Rangwani & Brzev, 2016). Se toman en cuenta las propiedades de la sección transversal del muro utilizando una sección transformada con propiedades equivalentes (área, inercia, factor cortante, entre otros) tal como se indican en las ecuaciones 3.1 a 3.3 (Rangwani & Brzev, 2016).

$$n = \frac{E_c}{E_m} \quad (3.1)$$

$$A_{Total} = A_m + 2nA_c \quad (3.2)$$

$$I_{Total} = I_m + 2n(I_c + A_c d^2) \quad (3.3)$$

Donde:

- n = Factor de relación
- E_c = Módulo de elasticidad del concreto
- A_{Total} = Área total de la sección transformada
- A_c = Área de las columnas de concreto

- I_{Total} = Inercia total de la sección transformada
- I_m = Inercia del muro de albañilería
- I_c = Inercia de las columnas de concreto
- d = Distancia entre los centroides de gravedad.
- E_m = Módulo de elasticidad del muro de albañilería
- A_m = Área del muro de albañilería

Adicionalmente, se idealizan las vigas que quedan dentro del muro y sobre el elemento frame con elementos con rigidez infinita, ver figura 3.4. (Gonzales, Aguilar y Huaco, 2020)

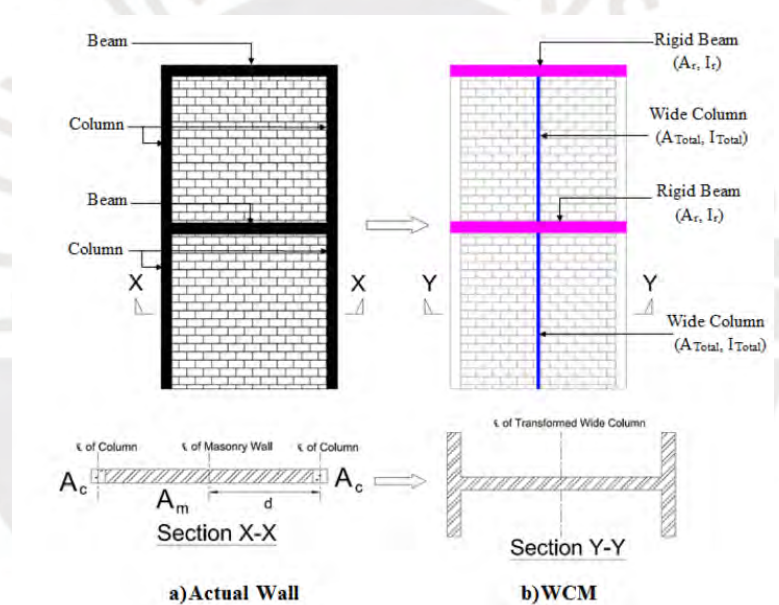


Figura 3.4. Ejemplo del Modelo de Columna Ancha y Sección Transformada
Tomado de *Seismic Analysis of Confined Masonry Shear Walls Using the Wide Column Model*, por Rangwani, K. & Brzev, S., 2016.

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

Se detalla el procedimiento para generar las curvas de fragilidad de forma determinística, hasta llegar a generar espectros de capacidad. También se muestran resultados del levantamiento en campo y las consideraciones que se realizan para el modelado en el programa SAP2000.

4.1. Descripción de los colegios estudiados

Con el fin de identificar una tipología estructural de los colegios de La Molina, se realizaron visitas a cinco colegios ubicados en distintas áreas del distrito. En la visita se entrevistó al personal del plantel utilizando el formato de preguntas adjunto en el Anexo 2 y se obtuvo información de la historia y modificaciones en la infraestructura. Asimismo, se seleccionó un pabellón representativo y de preferencia similar a la tipología peruana 780 para obtener sus propiedades, historia y dimensiones en plantas. Las mediciones se realizaron utilizando un dispositivo de medición láser, una cinta métrica y el formato adjunto en el Anexo 3. Cabe mencionar que las mediciones se realizaron con las dimensiones de la arquitectura, por lo que se asumirán datos como el espesor del tarrajeo para obtener las dimensiones del casco estructural.

4.1.1. Colegio A.

El colegio A se localiza dentro de la zona II en la clasificación de suelos de La Molina por lo que se espera un adecuado comportamiento dinámico y capacidad portante (INDECI, 2015). El pabellón escogido tiene 47 años de antigüedad y contaba inicialmente con dos pisos, años más adelante se realizó una ampliación construyendo un tercer nivel. No se han visto daños estructurales y no se presentaron fallas estructurales debido al sismo del 2007 en Lima.

Se observa en la figura 4.1. que el pabellón tiene forma de bloque rectangular y cuenta con cuatro aulas y dos baños que forman parte del bloque del pabellón. Cada aula cuenta con tres ejes de vigas en la dirección transversal y se encuentran separadas por un muro de albañilería confinada. En cuanto al casco estructural, todas las columnas presentan forma rectangular formando un sistema estructural de

pórticos. También los pasadizos del segundo piso y tercer piso están sostenidos por columnas por lo que no funciona como un volado. La escalera cuenta con una junta sísmica de 5 cm que la separa del bloque del pabellón; además, se observa que existe una junta sísmica que separa los tabiques de la fachada con las columnas del casco estructural, de manera que trabajan de forma independiente.

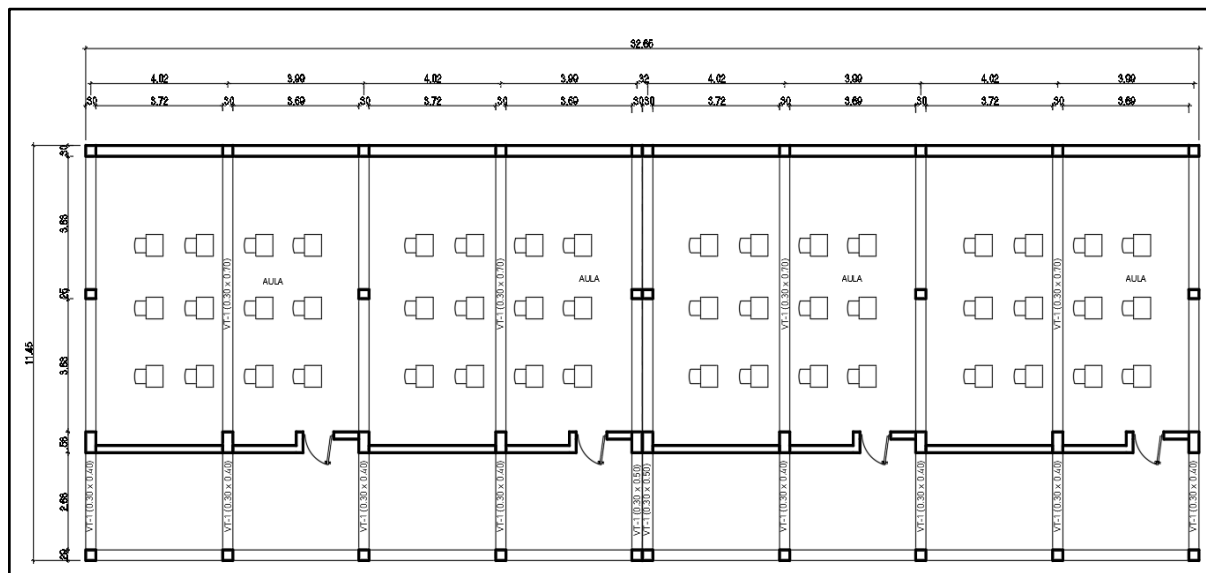


Figura 4.1. Planta del Pabellón elegido del Colegio A
Nota. Fuente Propia

4.1.2. Colegio B.

El colegio B se localiza dentro de la zona II en la clasificación de suelos de La Molina, zona que cuenta con un suelo de buena capacidad portante y comportamiento dinámico (INDECI, 2015). El pabellón analizado fue construido en el año 2019 y cuenta con una forma en L de dos bloques rectangulares independientes con dos niveles cada uno. Cada bloque cuenta con una caja de escaleras y baños sin juntas sísmicas por lo que trabajan estructuralmente en conjunto. Para el desarrollo de la investigación solo se consideró uno de los bloques, cuya función en el primer nivel es de aulas y laboratorios de cómputo y en el segundo nivel únicamente de aulas.

El bloque presentado en la figura 4.2. cuenta con tres aulas por nivel las cuales cuentan con un sistema de muros de albañilería confinada y pórticos, ambas con columnas rectangulares. Adicionalmente el bloque cuenta con un corredor con barandas metálicas que se encuentra sostenido por columnas circulares.

En cuanto a la historia del pabellón, no ha recibido modificaciones estructurales ni arquitectónicas desde su construcción y al tener 5 años de antigüedad no ha sido sometido a movimientos sísmicos importantes. Por otra parte, no se observaron grietas ni fallas importantes.

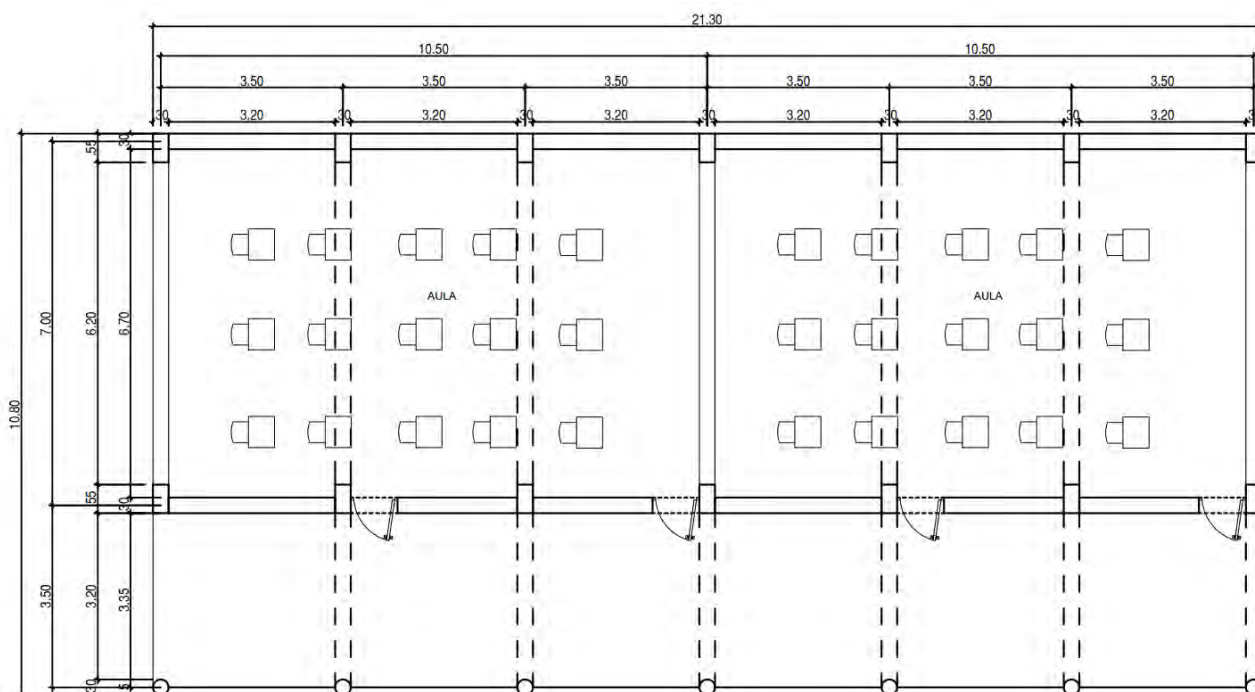


Figura 4.2. Planta del Pabellón elegido del Colegio B

Nota. Fuente Propia

4.1.3. Colegio C.

El colegio C se localiza dentro de la zona II en la clasificación de suelos de La Molina por lo que se espera un adecuado comportamiento dinámico y capacidad portante (INDECI, 2015). El pabellón estudiado cuenta con más de 23 años de antigüedad y consta de cuatro bloques de diferentes formas no convencionales: tres bloques de dos niveles y uno de un solo nivel. Todos los bloques trabajan de manera independiente e incluyen, los que requieren, de una caja de escaleras sin juntas sísmicas. Para el desarrollo de la investigación solo se consideró el bloque central de dos pisos, al cual se le otorgó un uso de aulas y laboratorios en el primer nivel y aulas exclusivamente en el segundo nivel.

Todas las aulas presentadas en la figura 4.3. cuentan con un sistema estructural de pórticos de columnas rectangulares y muros de concreto armado, no obstante; las aulas en el primer nivel cuentan con un pórtico adicional. Asimismo, el

bloque cuenta con un corredor en volado, el cual presenta parapetos de concreto armado y barandas metálicas en su extremo.

Según la historia estructural del pabellón no ha recibido modificaciones ni reforzamiento desde su construcción, asimismo; no ha sufrido de daños significativos por movimientos sísmicos importantes como el registrado en el 2007. En la visita a las instalaciones no se observaron fallas ni grietas importantes.

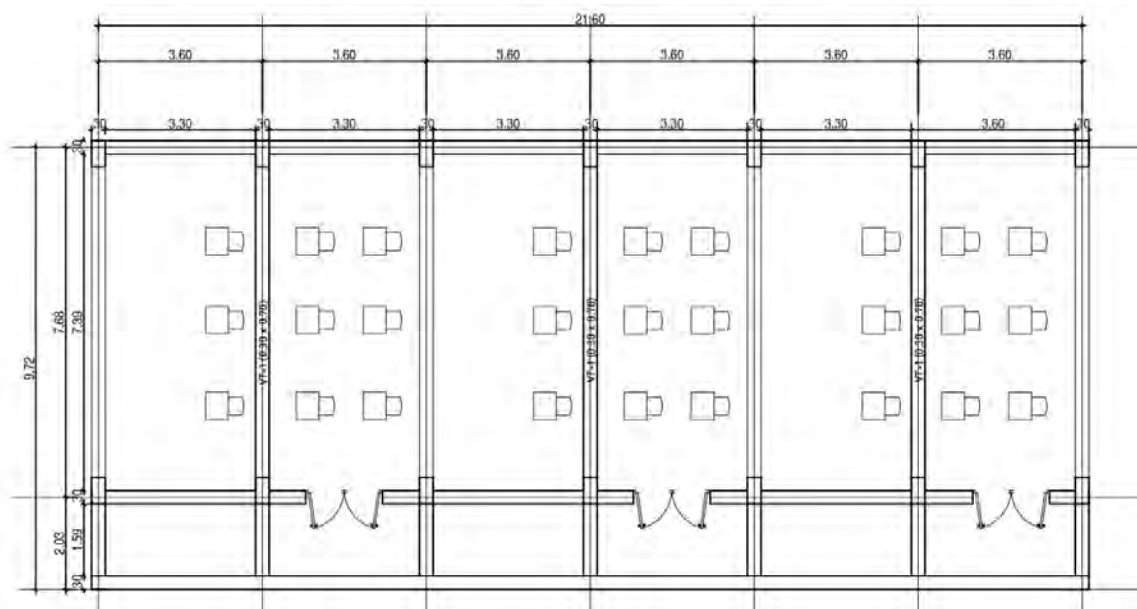


Figura 4.3. Planta del Pabellón elegido del Colegio C
Nota. Fuente Propia

4.1.4. Colegio D

El Colegio D se encuentra dentro de la zona II en la clasificación de suelos de La Molina por lo que se espera un adecuado comportamiento dinámico y capacidad portante (INDECI, 2015). La figura 4.4 presenta la estructuración con columnas rectangulares más esbeltas en la fachada trasera que en la fachada delantera frente al pasadizo. El segundo piso cuenta con barandas metálicas en el volado del pasadizo.

La escalera se encontraba separada del pabellón por junta sísmica. No se han visto daños ni se presentaron fallas estructurales debido al sismo del 2007 en Lima; sin embargo, se mostraron grietas en el tarrajeo las cuales ya fueron reparadas.

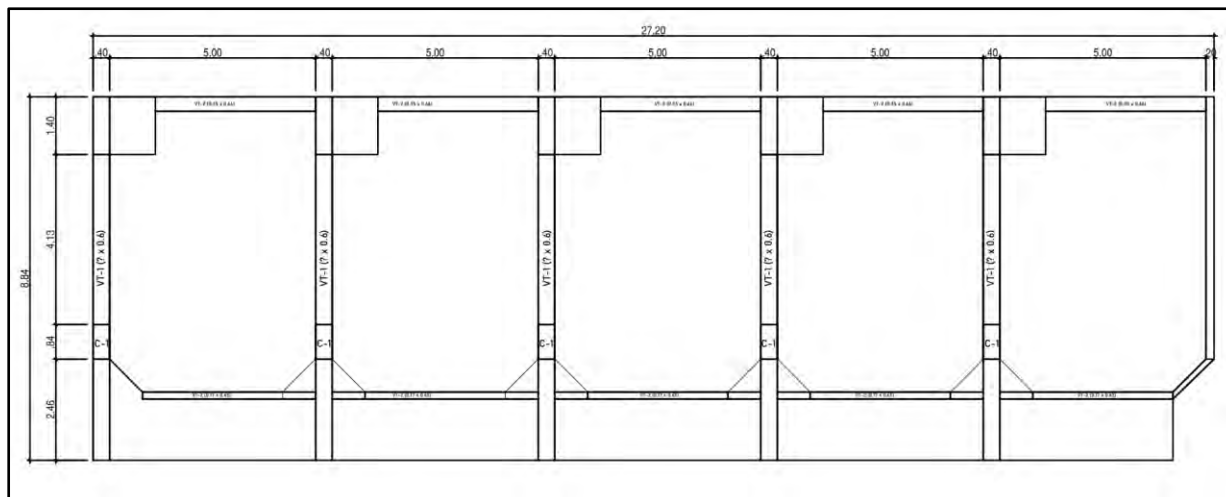


Figura 4.4. Planta del Pabellón elegido del Colegio D

Nota. Fuente Propia

4.1.5. Colegio E.

El colegio E se encuentra en la zona III, la cual cuenta con comportamiento de suelo desfavorable y se anticipa un incremento en el nivel de peligro sísmico (INDECI, 2015). El pabellón estudiado cuenta con una antigüedad mayor a 20 años. Asimismo, como se observa en la figura 4.5. cuenta con único bloque rectangular de tres niveles y tres cajas de escaleras: una de concreto armado que conduce hasta el tercer nivel y trabaja de manera independiente al bloque; y dos escaleras de acero empotradas al edificio en el segundo nivel. El uso del bloque en los dos últimos niveles es exclusivamente de aulas (4 aulas) y en el primer nivel cuenta con 3 aulas y dos baños.

En cuanto a la historia del pabellón, este ha recibido reparaciones en las escaleras: en el año 2000, se presencié una inclinación de 2 cm por lo que se realizaron reparaciones de manera preventiva, asimismo; debido al movimiento sísmico del 2007 se demolieron y reconstruyeron por a los daños generado. En la actualidad no se observaron fallas ni grietas importantes.

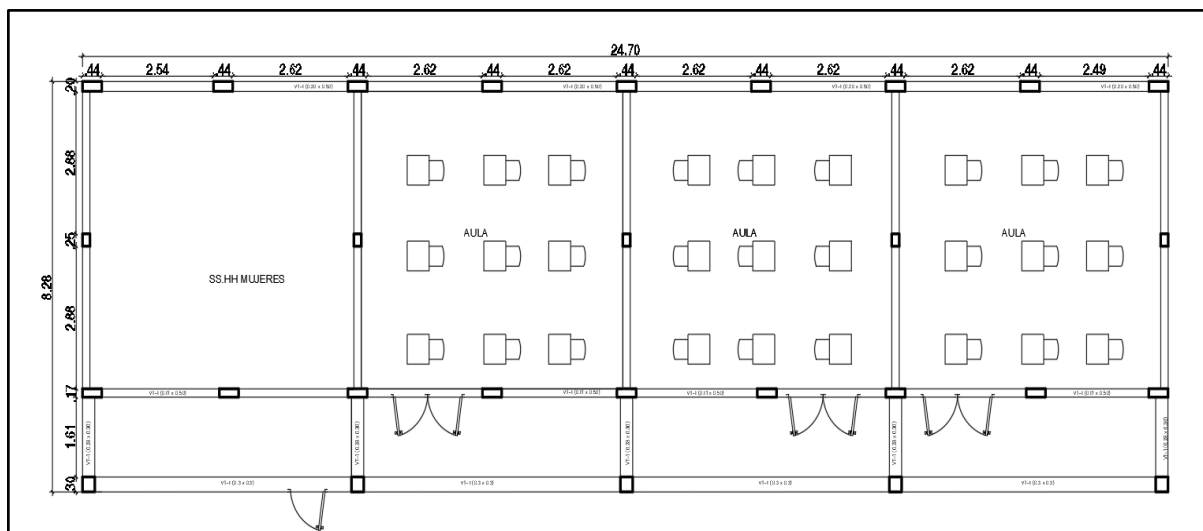


Figura 4.5. Planta del Pabellón elegido del Colegio E
Nota. Fuente Propia

4.2. Descripción de las tipologías estudiadas

Al recopilar y evaluar las propiedades y dimensiones relevantes de los cinco pabellones seleccionados se deduce que existen dos tipologías comunes para el distrito de La Molina. La primera tipología cuenta con 5 ejes verticales cada dos aulas y la segunda con 7 ejes verticales cada dos aulas. Para ello se clasificaron los colegios y se realizaron simplificaciones y asunciones en cada pabellón.

Para determinar las dimensiones de la tipología se recopiló las dimensiones de la estructura de los colegios en el programa excel visibles en el Anexo 4 tales como columnas, vigas, losa, altura de entrepiso, entre otros; con el objetivo de realizar un promedio. Por otro lado, se aproximó las dimensiones a múltiplos de 5 cm y se restó un tarrajeo asumido de 2.5 cm por cada lado de dimensión a las columnas y vigas. Finalmente se creó un modelo en el programa AutoCAD y Sap2000.

4.2.1. Tipología con 5 ejes.

En cuanto a la primera tipología se consideró los datos únicamente de los dos primeros niveles del colegio A, el segundo nivel del colegio C, el colegio D y el colegio E debido a que cuentan con 3 ejes verticales en cada aula. Asimismo, se realizaron simplificaciones en los pabellones tales como la separación del bloque de aulas con las escaleras y baños. Además, se asumió que los muros confinados cuentan con una columna central tal como las tipologías típicas mostradas en las figuras 2.3 y 2.4.

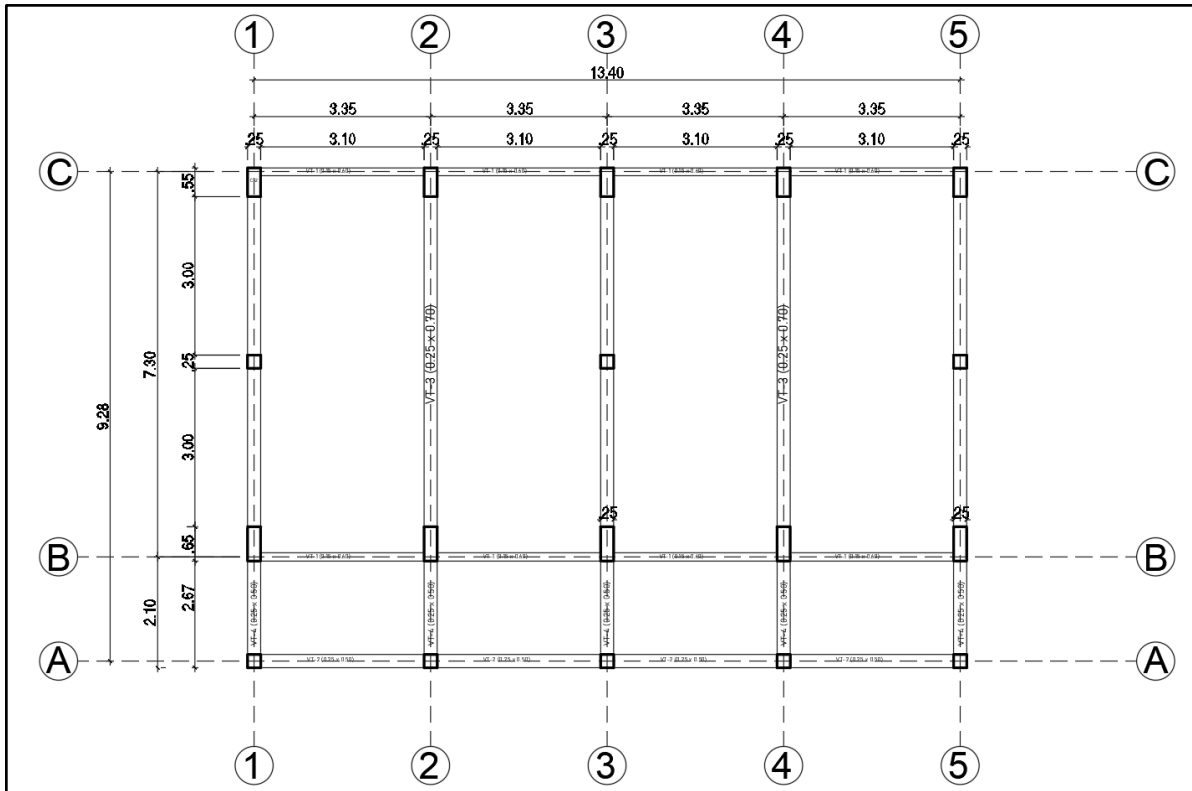


Figura 4.6. Planta de la Primera Tipología con 5 ejes.

Nota. Fuente Propia

La tipología en planta presentada en la figura 4.6, consiste en un bloque rectangular de dos niveles con cinco ejes en dirección vertical (eje Y) y tres ejes en dirección horizontal (eje X). Cuenta con dos aulas de (6.7x7.3) m y un corredor de 2.1 m de ancho, conformados por un sistema de pórticos perpendiculares a la dirección X y en dirección Y cuenta con un sistema de muros de albañilería confinada con una columna intermediaria de (25x25)cm. El corredor del segundo nivel se encuentra apoyado en columnas en el eje C con dimensiones de (25x25) cm. Además, las columnas en el eje A son de dimensión (25x55) cm y las columnas en el eje B son de dimensión (25x65) cm. Las vigas peraltadas en el eje 2 y 4 presentan dimensiones de (25x70) cm, por otro lado; la losa se asume como aligerada de 30 cm de espesor.

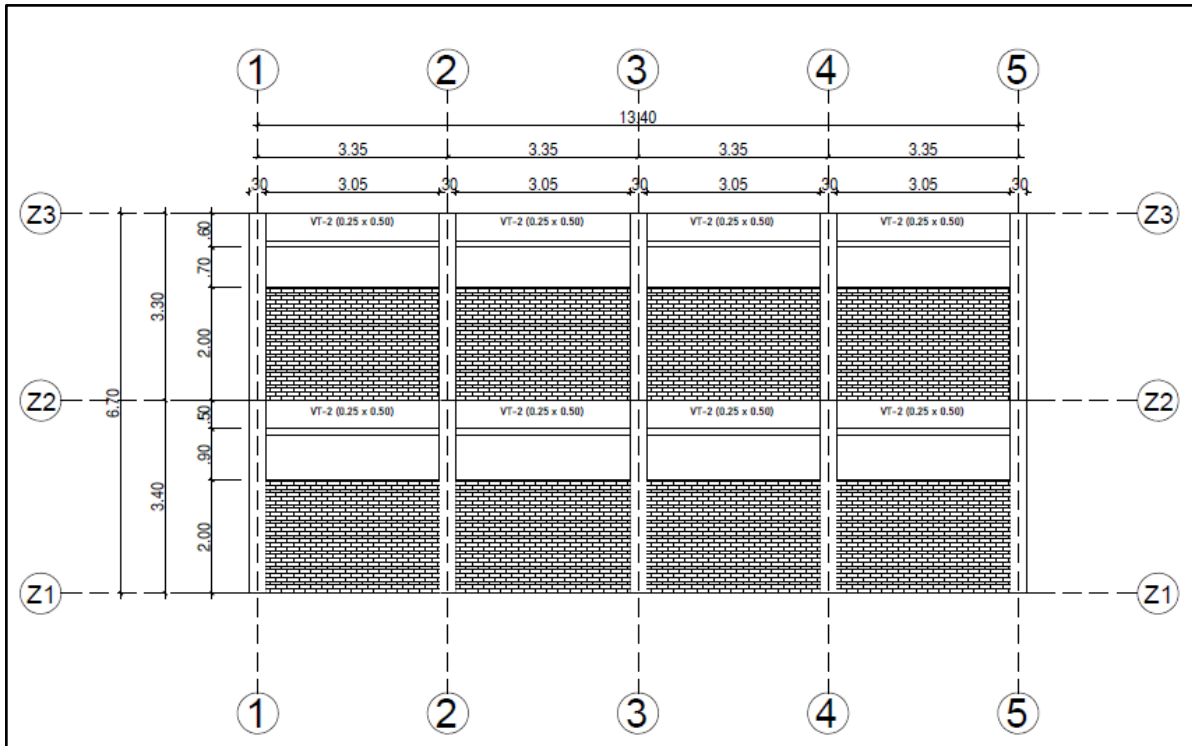


Figura 4.7. Elevación de la Primera Tipología

Nota. Fuente Propia

La elevación mostrada en la figura 4.7 cuenta con un entrepiso de 3.4 m en el primer nivel y de 3.3 m en el segundo. También cuenta con muros de albañilería sin confinar en la fachada delantera de 2 m y en la fachada posterior de 1.3 m que no se encuentran separados del casco estructural.

4.2.2. Tipología con 7 ejes.

En cuanto a la segunda tipología se consideró los datos únicamente de los dos niveles del colegio B y el primer nivel del colegio C, debido a que ambos cuentan con 4 ejes verticales en cada aula. Asimismo, se realizaron simplificaciones en los pabellones para ambos colegios y se separó el bloque de aulas de las escaleras y baños. Por otra parte, en el colegio C solo se consideró las dimensiones de las aulas ubicadas en el primer nivel.

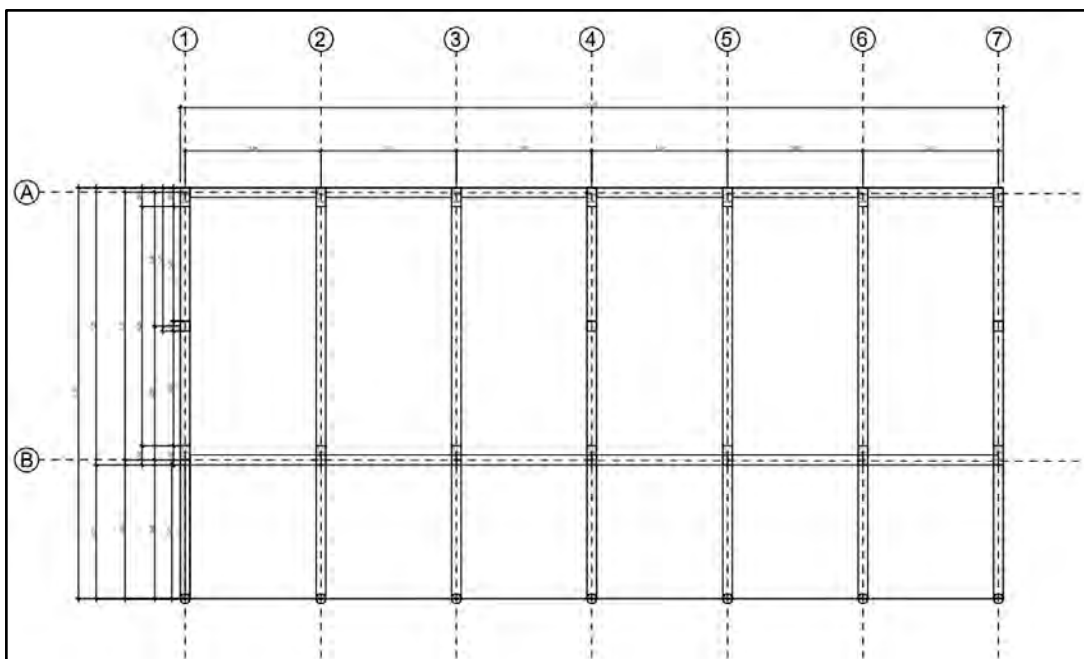


Figura 4.8. Planta de Segunda Tipología
Nota. Fuente Propia

La tipología en planta presentada en la figura 4.8, consiste en un bloque rectangular de dos niveles con siete ejes en dirección vertical (eje Y) y tres ejes en dirección horizontal (eje X). Cuenta con dos aulas de (7 x 10.6) m y un corredor de 3.5 m de ancho apoyado en columnas circulares. Está conformado por un sistema de pórticos perpendiculares a la dirección X y muros de albañilería confinada en dirección Y. Se asume que los muros de albañilería confinada cuentan con una columna intermedia de (25x25)cm tal como las tipologías típicas mostradas en las figuras 2.3 y 2.4. Las columnas de los pórticos de concreto armado son de dimensión (25 x 50) cm y 25 cm de diámetro y las vigas de (25 x 65) cm, por otro lado; la losa se asume como aligerada de 30 cm de espesor.

La elevación presentada en la figura 4.9 cuenta con un entrepiso de 3.2 m y dos alfeizares en cada aula de 20 cm de ancho: el primero ubicado en el lado posterior del aula con una altura de 1.2 m y el segundo en lado del corredor con una altura de 2.15 m. Ninguno de los alfeizares cuenta con juntas sísmicas por lo que forman parte del casco estructural.

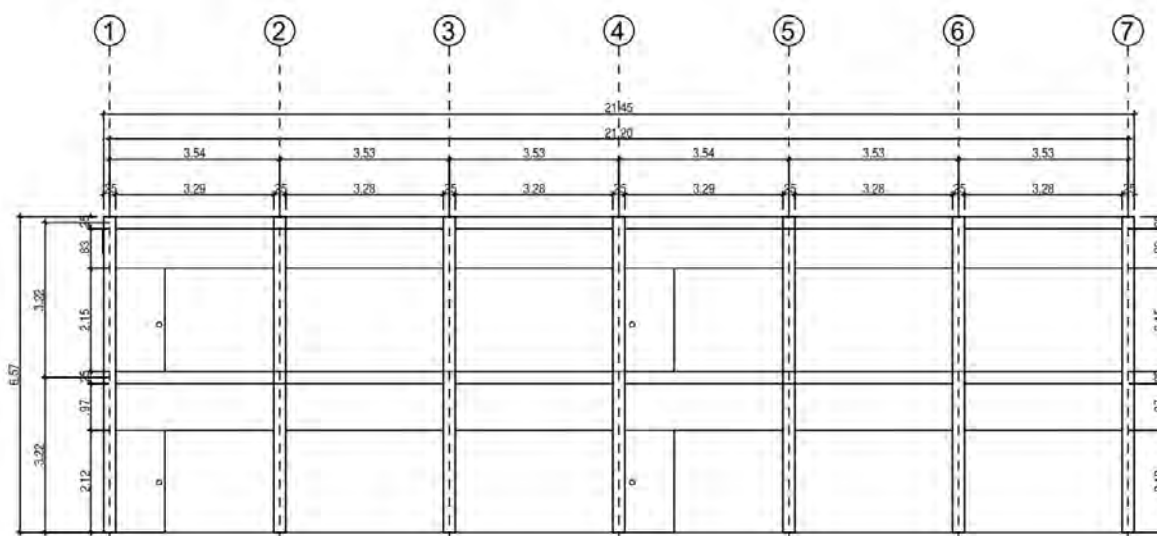


Figura 4.9. Elevación de Segunda Tipología

Nota. Fuente Propia

4.3. Modelo Estructural en SAP 2000

Con la finalidad de realizar el análisis sísmico de cada tipología se crearon dos modelos utilizando el programa Sap2000. Para ello se utilizó las dimensiones previamente establecidas y se realizó simplificaciones tomando como referencia las normas de edificación peruanas E.020, E.060 y E.070. Además, se modeló la interacción suelo estructura como apoyos empotrados en las columnas y apoyos simples en los tabiques discretizados en la base.

En cuanto a las columnas y vigas se modelaron como elementos tipo frame, asimismo los tabiques fueron discretizados en elementos de 0.75×0.75 m y modelados como elementos de área *shell thin*. Las losas también fueron modeladas como elementos *shell thin* pero sin discretizar. Por otro lado, la albañilería confinada se modela como elementos frames apoyados en brazos rígidos modelados con material sin peso, representando sus propiedades no lineales con el método de columna ancha y una rótula de corte en el centro. También se utilizó una sección transformada ejemplificada en la figura 4.10. donde se convirtió la sección original compuesta por albañilería y concreto a una sección de concreto armado, luego se creó una sección rectangular equivalente con ancho y largo tal que las inercias sean iguales. Adicionalmente, para conectar los tabiques de la fachada en los ejes donde existe un muro de albañilería se modela una columna de material rígido con la altura

del muro y espesor del ladrillo de tabiquería y se conecta con los brazos rígidos. Cabe mencionar que para la albañilería se está despreciando cualquier falla por corte prematura a la deflexión.

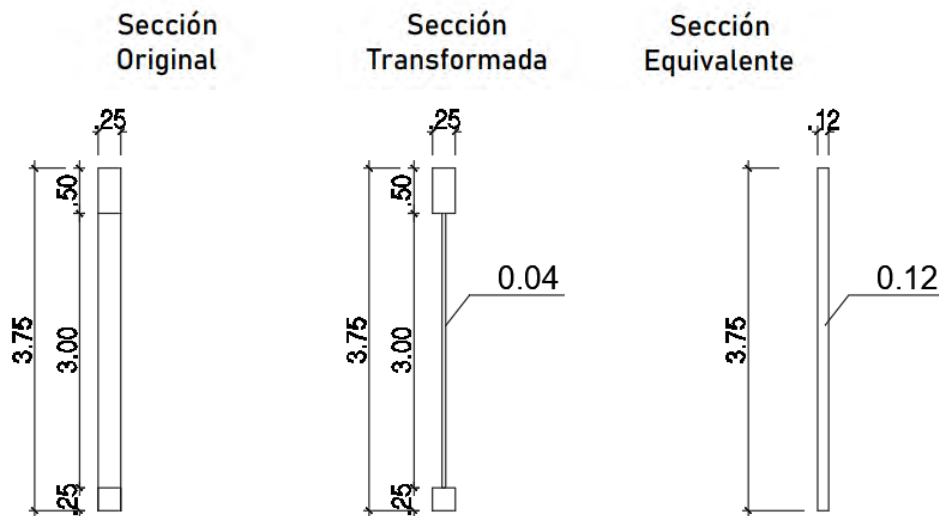


Figura 4.10. Ejemplo de Transformación de Secciones para la Tipología 2

Nota. Fuente Propia

Se asumen los siguientes materiales para las diversas secciones definidas: concreto de resistencia $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y peso específico 2.4 ton/m^3 , acero de refuerzo A615 grado 60, material de albañilería con peso específico de 1.8 ton/m^3 , $f'_m = 65 \text{ kg/cm}^2$ y material rígido sin peso con un alto módulo de elasticidad. Por otra parte se asignan las cargas siguiendo la Norma E.020 donde se considera un peso de losa de 0.42 ton/m^2 y en las cargas vivas se considera 0.25 ton/m^2 en las aulas y 0.4 ton/m^2 en el corredor. Por último, se asume una cimentación rígida que permite empotrar las columnas y apoyar los alfeizares posterior y frontal.

4.3.1. Tipología con 5 ejes.

Las figuras 4.11. al 4.13. presentan las vistas principales del modelo de la primera tipología realizado con el programa SAP2000.

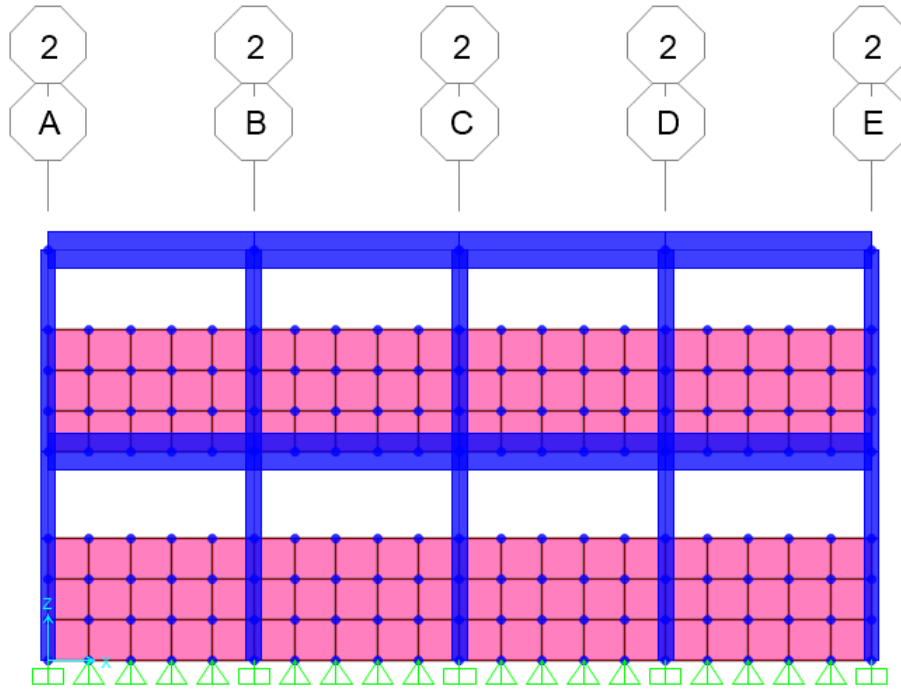


Figura 4.11. Vista frontal del eje de la fachada delantera

Nota. Fuente Propia

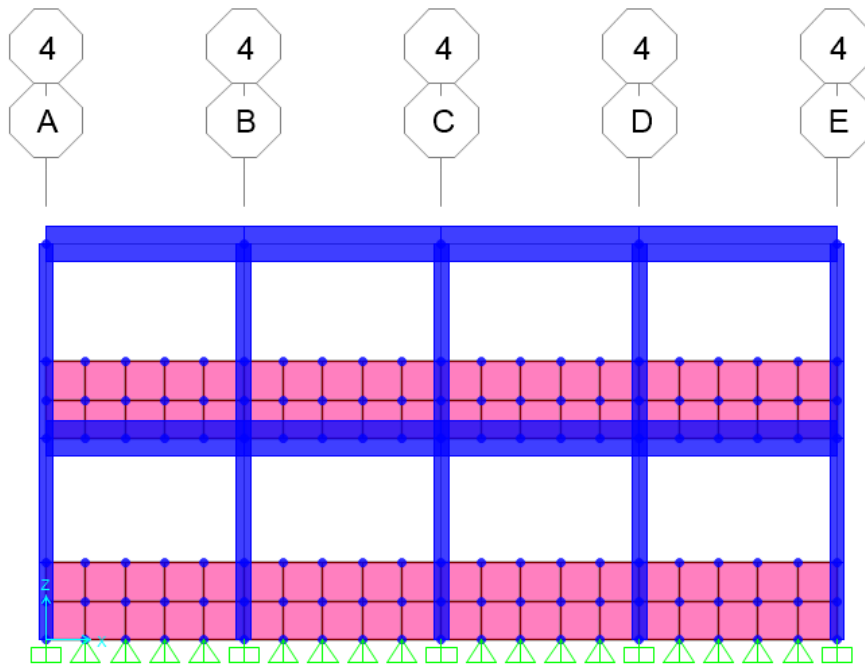


Figura 4.12. Vista frontal del eje de la fachada posterior

Nota. Fuente Propia

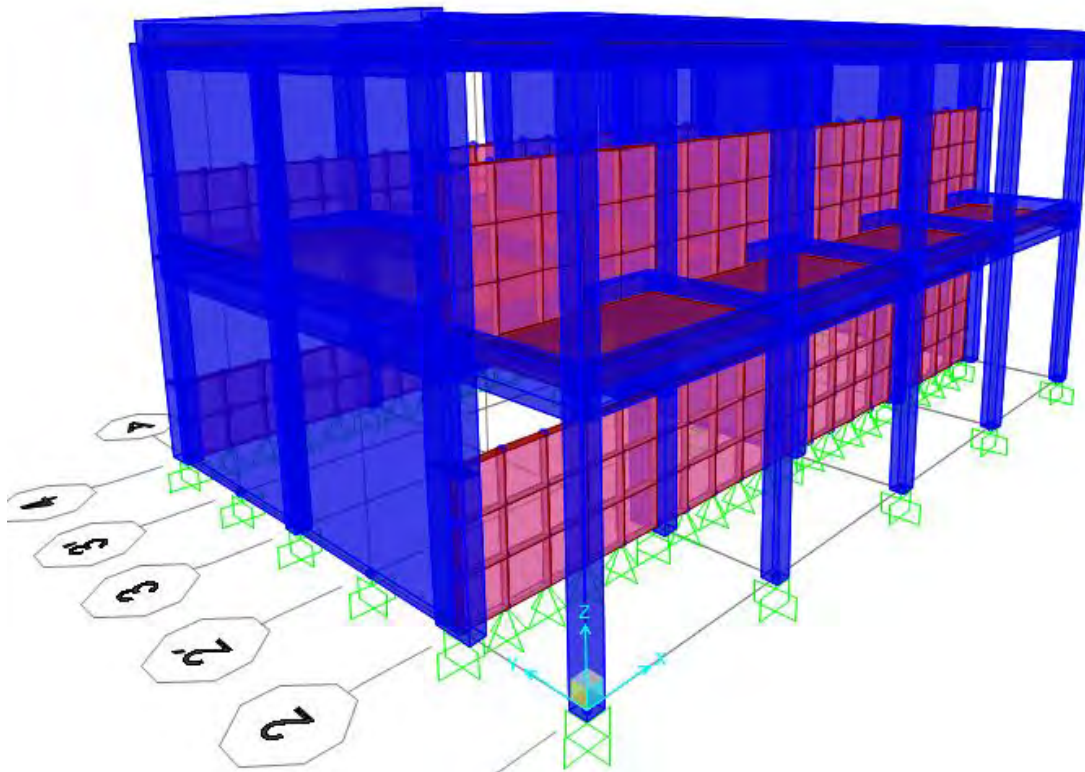


Figura 4.13. Vista en 3D de la primera tipología con enfoque hacia la fachada delantera.

Nota. Fuente Propia

4.3.2. Tipología con 7 ejes.

Por otro lado, Las figuras 4.14. al 4.16. presentan las vistas principales del modelo que contemplan elevación frontal y posterior de la segunda tipología realizado con el programa SAP2000.

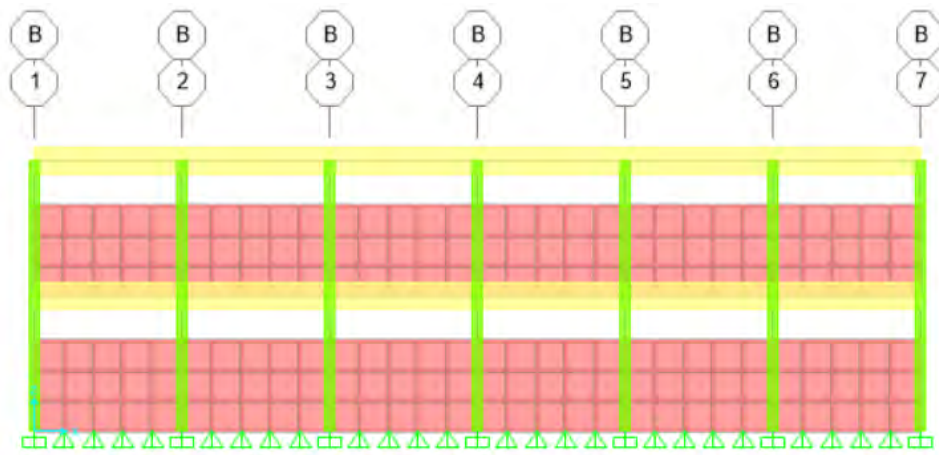


Figura 4.14. Vista frontal del eje de la fachada delantera

Nota. Fuente Propia

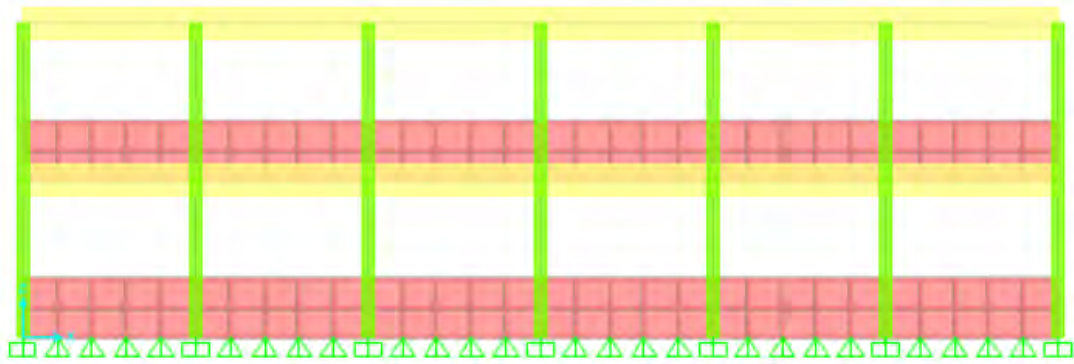


Figura 4.15. Vista frontal del eje de la fachada posterior

Nota. Fuente Propia

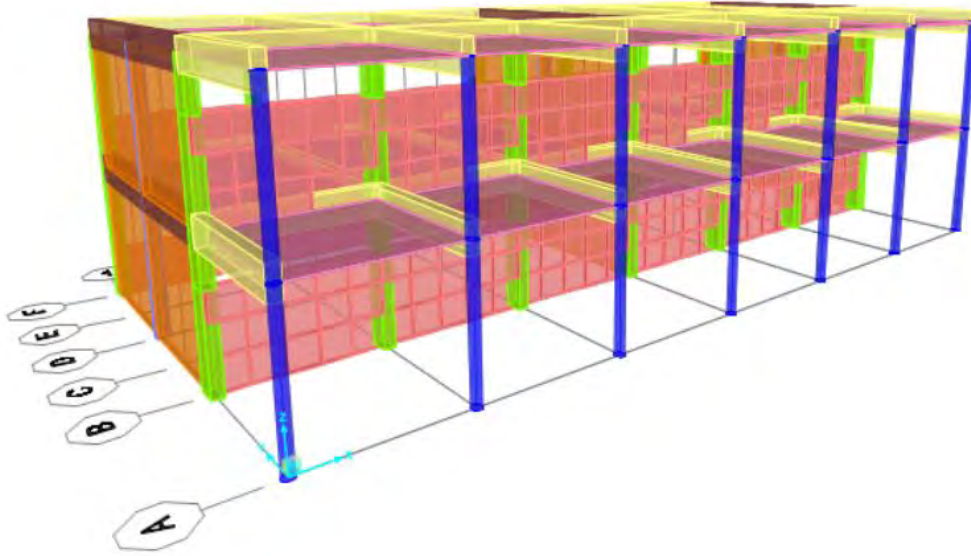
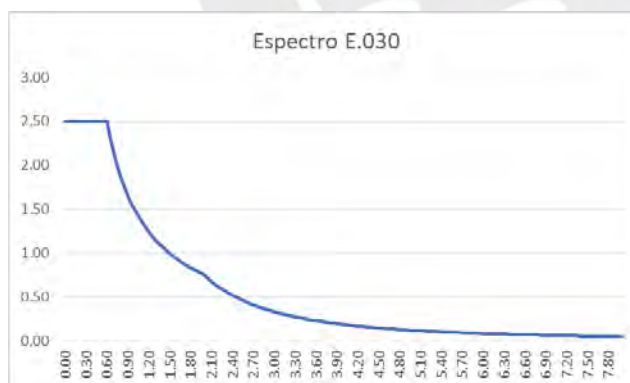


Figura 4.16. Vista en 3D de la segunda tipología con enfoque hacia la fachada delantera.

Nota. Fuente Propia

4.4. Análisis modal espectral

Se realiza el proceso de análisis utilizando el espectro de la figura 4.17. El objetivo es obtener la cortante basal de cada tipología, así como sus desplazamientos y derivas para ambos casos de sismo.



| | |
|---------------------|------|
| Zona (Z) = Z4 | 0.45 |
| Perfil de Suelo | S2 |
| Factor de Suelo "S" | 1.05 |
| Tp | 0.6 |
| Tl | 2 |
| Factor de Uso "U" | 1.5 |

Figura 4.17. Parámetros sísmicos de las tipologías y espectro de la norma E.030

Nota. Fuente Propia

4.4.1. Tipología con 5 ejes

Se muestran los parámetros sísmicos utilizados en la tabla 4.1, mientras que los hallazgos de estos análisis se pueden ver en la tabla 4.2.. Al ser una estructura regular el factor de reducción de fuerzas R_x se mantiene en 8; mientras que en la

dirección Ry se mantiene en 3. En la tabla 4.3 se observan los resultados de desplazamientos y derivas.

Tabla 4.1.

Parámetros sísmicos de la tipología con 5 ejes

| PARÁMETROS SÍSMICOS | |
|--------------------------------------------|--------------|
| Factor | Valor |
| <i>Factor de zona, Z4</i> | 0.45 |
| <i>Factor de suelo, S2</i> | 1.05 |
| <i>Periodo Tp</i> | 0.6 |
| <i>Periodo Tl</i> | 2 |
| <i>Factor de Uso "U"</i> | 1.5 |
| <i>Factor de amplificación sísmica, Cx</i> | 2.5 |
| <i>Factor de amplificación sísmica, Cy</i> | 2.5 |
| <i>Factor de reducción de fuerzas, Rx</i> | 8 |
| <i>Factor de reducción de fuerzas, Ry</i> | 3 |
| <i>Peso total, P (ton)</i> | 277.35 |

Nota. Fuente Propia.

Tabla 4.2.

Fuerza Cortante en la base según el análisis lineal dinámico y estático para la tipología de 5 ejes

| Resultados del análisis modal espectral | | | | | | |
|------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------|--------------|
| SENTIDO | V estática (ton) | 80%V estática (ton) | V dinámica (ton) | V diseño (ton) | Factor | %Peso |
| X | 61.43 | 49.14 | 57.49 | 57.49 | 1.00 | 20.73% |
| Y | 163.81 | 131.05 | 10.86 | 163.81 | 12.07 | 47.25% |

Nota. Fuente Propia.

Tabla 4.3.

Desplazamientos por el caso de sismo en X y Y multiplicado por 0.75R.

| Desplazamientos y Derivas | | | | | |
|---------------------------|-------|----------------------|----------|----------------------|----------|
| PISO | h (m) | Sismo X | | Sismo Y | |
| | | Desplazamiento X (m) | Deriva X | Desplazamiento Y (m) | Deriva Y |
| 1 | 3.22 | 1.80E-02 | 5.29E-03 | 6.75E-04 | 1.99E-04 |
| 2 | 6.44 | 2.70E-02 | 2.73E-03 | 9.00E-04 | 6.82E-05 |

Nota. Fuente Propia.

Finalmente, la tabla 4.4 presenta la verificación de la resistencia a la fuerza cortante para cada muro y de forma global. Además, se lleva a cabo la verificación de la posible aparición de agrietamiento ante un sismo moderado ($V_e \leq 0.55V_m$).

Tabla 4.4.

Verificación del agrietamiento y diseño de muros ante fuerzas cortantes para la tipología de 5 ejes.

| PISO | Muro | v'm (ton/m ²) | t (m) | L (m) | Pg (ton) | M _{Severo} (ton.m) | V _{Severo} (ton) | α | V _m (ton) | V _m > V _{Severo} | 0.55V _m > V _{Moderado} |
|------|------|---------------------------|-------|-------|----------|-----------------------------|---------------------------|----------|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|
| 2 | M1 | 81.00 | 0.25 | 3.85 | 10.63 | 20.30 | 10.30 | 1 | 41.43 | Cumple | Cumple |
| 2 | M2 | 81.00 | 0.25 | 3.85 | 16.11 | 18.06 | 8.90 | 1 | 42.69 | Cumple | Cumple |
| 2 | M3 | 81.00 | 0.25 | 3.85 | 9.91 | 17.18 | 9.00 | 1 | 41.27 | Cumple | Cumple |
| 2 | M4 | 81.00 | 0.25 | 3.85 | 6.73 | 19.31 | 10.14 | 1 | 40.53 | Cumple | Cumple |
| 1 | M1 | 81.00 | 0.25 | 3.85 | 22.98 | 44.95 | 23.09 | 1 | 44.27 | Cumple | Cumple |
| 1 | M2 | 81.00 | 0.25 | 3.85 | 35.90 | 40.67 | 20.66 | 1 | 47.24 | Cumple | Cumple |
| 1 | M3 | 81.00 | 0.25 | 3.85 | 22.50 | 38.06 | 20.03 | 1 | 44.16 | Cumple | Cumple |
| 1 | M4 | 81.00 | 0.25 | 3.85 | 14.72 | 42.24 | 22.19 | 1 | 42.37 | Cumple | Cumple |

Nota. Fuente Propia.

4.4.2. Tipología con 7 ejes

Similar a la tipología de 5 ejes, se muestran los parámetros sísmicos utilizados en la tabla 4.4 y los resultados son exhibidos en la tabla 4.5. También al ser una estructura regular el factor de reducción de fuerzas R_x se mantiene en 8; y en la dirección R_y se mantiene en 3. En la tabla 4.7 se observan los resultados de desplazamientos y derivas.

Tabla 4.5.

Parámetros sísmicos de la tipología con 7 ejes

| PARÁMETROS SÍSMICOS | |
|--------------------------------------------|--------|
| Factor | Valor |
| <i>Factor de zona, Z4</i> | 0.45 |
| <i>Factor de suelo, S2</i> | 1.05 |
| <i>Periodo Tp</i> | 0.6 |
| <i>Periodo Tl</i> | 2 |
| <i>Factor de Uso "U"</i> | 1.5 |
| <i>Factor de amplificación sísmica, Cx</i> | 2.5 |
| <i>Factor de amplificación sísmica, Cy</i> | 2.5 |
| <i>Factor de reducción de fuerzas, Rx</i> | 8 |
| <i>Factor de reducción de fuerzas, Ry</i> | 3 |
| <i>Peso total, P (ton)</i> | 470.10 |

Nota. Fuente Propia.

Tabla 4.6.

Fuerza Cortante en la base según el análisis lineal dinámico y estático para la tipología de 7 ejes

| Resultados del análisis modal espectral | | | | | | |
|-----------------------------------------|------------------|---------------------|------------------|----------------|--------|--------|
| SENTIDO | V estática (ton) | 80%V estática (ton) | V dinámica (ton) | V diseño (ton) | Factor | %Peso |
| X | 104.12 | 83.29 | 91.84 | 91.84 | 1.00 | 19.54% |
| Y | 277.65 | 222.12 | 220.42 | 222.12 | 1.01 | 47.25% |

Nota. Fuente Propia.

Tabla 4.7.

Desplazamientos por el caso de sismo en X y Y multiplicado por 0.75R.

| Desplazamientos y Derivas | | | | | |
|---------------------------|-------|----------------------|----------|----------------------|----------|
| PISO | h (m) | Sismo X | | Sismo Y | |
| | | Desplazamiento X (m) | Deriva X | Desplazamiento Y (m) | Deriva Y |
| 1 | 3.22 | 1.68E-02 | 5.22E-03 | 9.00E-04 | 2.80E-04 |
| 2 | 6.44 | 2.52E-02 | 2.61E-03 | 1.58E-03 | 2.10E-04 |

Nota. Fuente Propia.

Finalmente, la tabla 4.8 presenta la verificación de la resistencia a la fuerza cortante para cada muro y de forma global. Además, se lleva a cabo la verificación de la posible aparición de agrietamiento ante un sismo moderado ($V_e \leq 0.55V_m$).

Tabla 4.8.

Verificación del agrietamiento y diseño de muros ante fuerzas cortantes para la tipología de 7 ejes.

| PISO | Muro | $v'm$ (ton/m ²) | t (m) | L (m) | Pg (ton) | M _{Severo} (ton.m) | V _{Severo} (ton) | α | V _m (ton) | $V_m > V_{Severo}$ | $0.55V_m > V_{Moderado}$ |
|------|------|--------------------------------|-------|----------|-------------|--------------------------------|------------------------------|----------|-------------------------|--------------------|--------------------------|
| 2 | 1C | 90.547 | 0.25 | 3.75 | 13.9 | 39.52 | 22.94 | 1 | 45.64 | Cumple | Cumple |
| 2 | 1E | 90.547 | 0.25 | 3.75 | 13.05 | 39.75 | 22.98 | 1 | 45.45 | Cumple | Cumple |
| 2 | 4C | 90.547 | 0.25 | 3.75 | 17.7 | 35.25 | 20.54 | 1 | 46.52 | Cumple | Cumple |
| 2 | 4E | 90.547 | 0.25 | 3.75 | 16.52 | 35.71 | 20.63 | 1 | 46.24 | Cumple | Cumple |
| 2 | 7C | 90.547 | 0.25 | 3.75 | 13.89 | 39.55 | 22.96 | 1 | 45.64 | Cumple | Cumple |
| 2 | 7E | 90.547 | 0.25 | 3.75 | 13.04 | 39.78 | 22.99 | 1 | 45.44 | Cumple | Cumple |
| 1 | 1C | 90.547 | 0.25 | 3.75 | 25.42 | 68.96 | 39.35 | 1 | 48.29 | Cumple | Cumple |
| 1 | 1E | 90.547 | 0.25 | 3.75 | 25.53 | 68.97 | 39.34 | 1 | 48.32 | Cumple | Cumple |
| 1 | 4C | 90.547 | 0.25 | 3.75 | 32.82 | 61.70 | 35.20 | 1 | 49.99 | Cumple | Cumple |
| 1 | 4E | 90.547 | 0.25 | 3.75 | 33.70 | 61.71 | 35.18 | 1 | 50.20 | Cumple | Cumple |
| 1 | 7C | 90.547 | 0.25 | 3.75 | 25.35 | 68.60 | 39.15 | 1 | 48.27 | Cumple | Cumple |
| 1 | 7E | 90.547 | 0.25 | 3.75 | 25.50 | 69.02 | 39.37 | 1 | 48.31 | Cumple | Cumple |

Nota. Fuente Propia.

4.5. Diseño de los elementos estructurales

Los componentes estructurales fueron diseñados con la finalidad de establecer la cantidad óptima de cuantía de acero transversal y longitudinal. Para ello, se siguieron las directrices de la norma E.060 y se empleó la envolvente de los momentos y fuerzas cortantes obtenidos del análisis espectral en el elemento más exigido. Es relevante señalar que el modelo no pretende cumplir estrictamente con la norma en términos de diseño, sino que busca reflejar el refuerzo que podrían tener los colegios. Asimismo se realizan estas asunciones en las cuantías de acero debido a que no es parte del alcance de la investigación realizar el escaneo real del acero real de la distribución de las barras longitudinales y estribos en los colegios estudiados.

4.5.1. Tipología con 5 ejes

Se diseñaron cuatro diferentes vigas según su dirección utilizando la envolvente de momentos flectores obtenidas del programa SAP2000. Se presenta el diseño de las secciones en la figura 4.18 y 4.19.

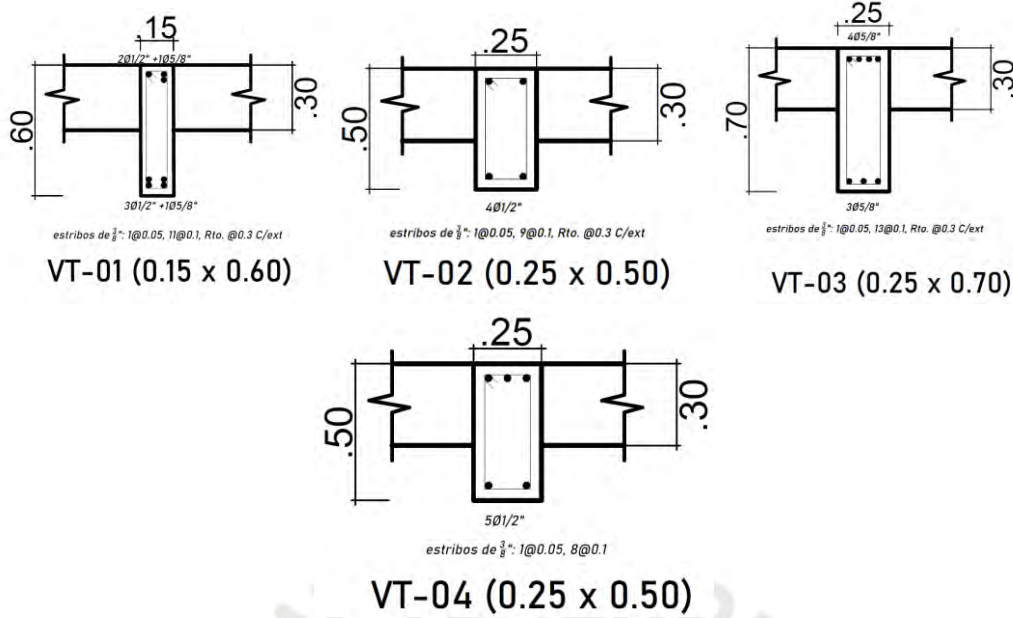


Figura 4.18. Sección del diseño de acero de VT-01, VT-02, VT-03 y VT-04.

Nota. Fuente Propia.

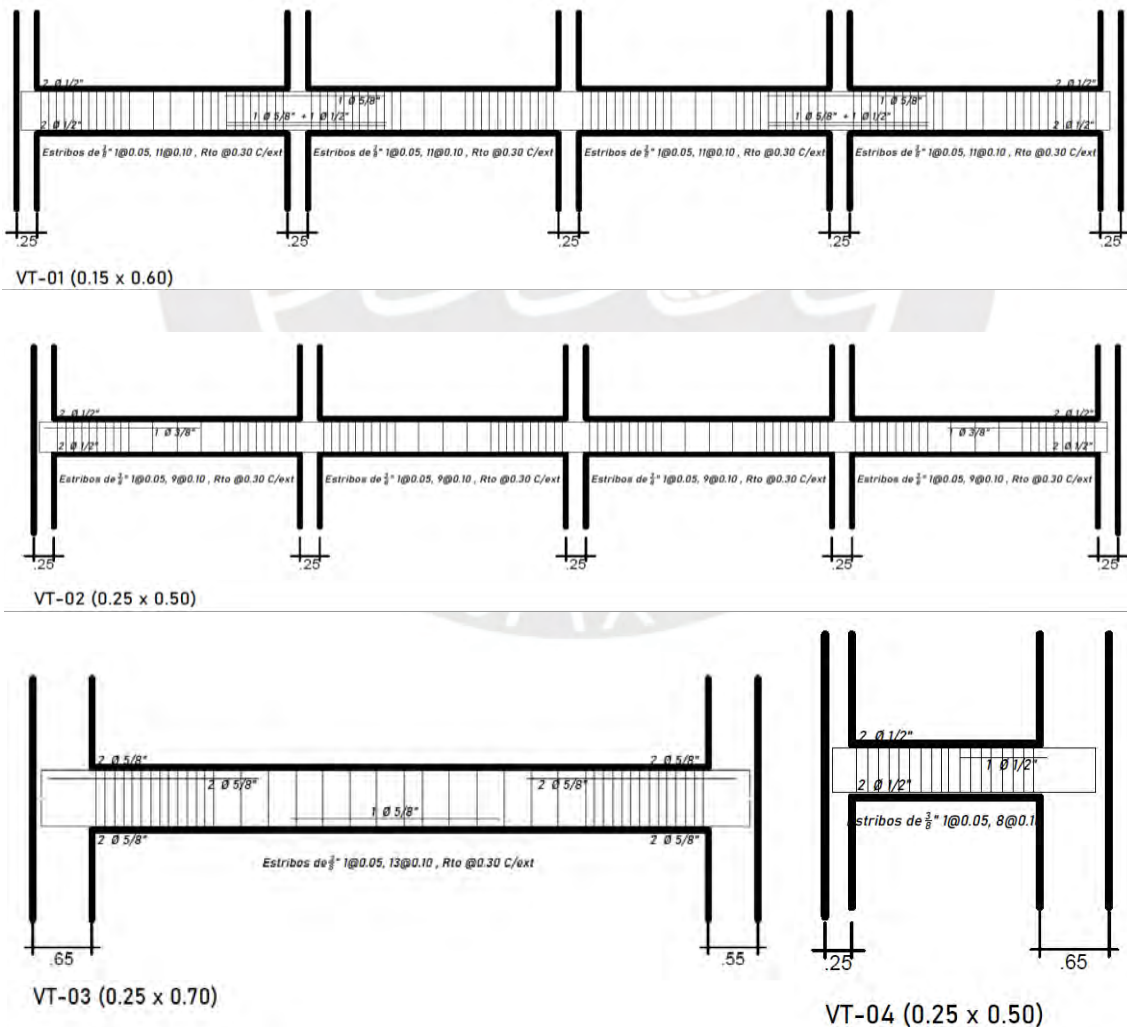


Figura 4.19. Vista frontal del diseño de acero de VT-01, VT-02, VT-03 y VT-04.

Nota. Fuente Propia.

A continuación, el diseño de columnas se observa en la figura 4.20. En las tres columnas se dimensiona con el acero mínimo por la demanda de fuerza axial que soporta cada una. Además, los estribos también cumplen con los requisitos mínimos del reglamento E.060.

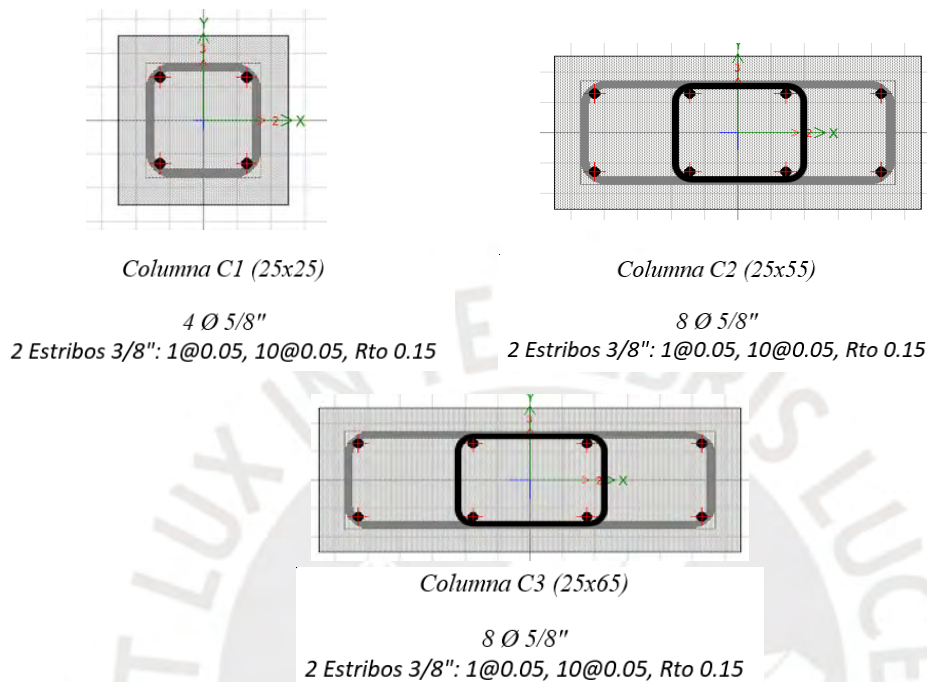


Figura 4.20. Sección del diseño de acero de las columnas C1, C2 y C3.

Nota. Fuente Propia.

4.5.2. Tipología con 7 ejes

En cuanto a las vigas se diseñan tres diferentes elementos según su dirección; en la dirección "X" sólo se diseña una única viga para ambos niveles denominada "VT-XX". En la dirección "Y" se diseñan las vigas "VT-Y1" ubicada en los ejes 2, 3, 5 y 6 y la viga "VT-Y2" ubicada en los ejes 1, 4 y 7. Se presenta el diseño de las secciones en la figura 4.21 y 4.22.

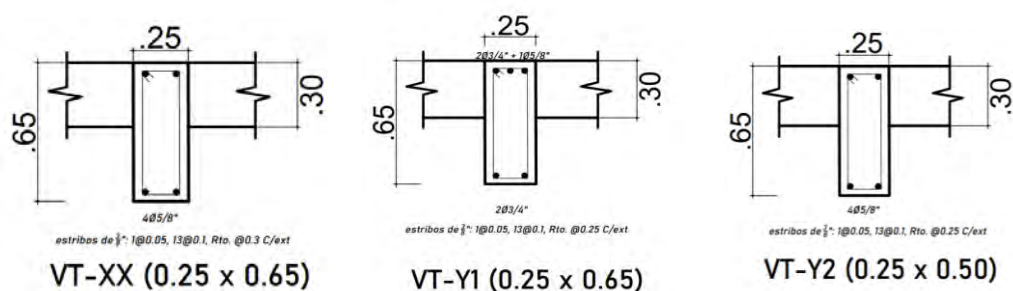


Figura 4.21. Sección del diseño de acero de VT-XX, VT-Y1 y VT-Y2.

Nota. Fuente Propia.

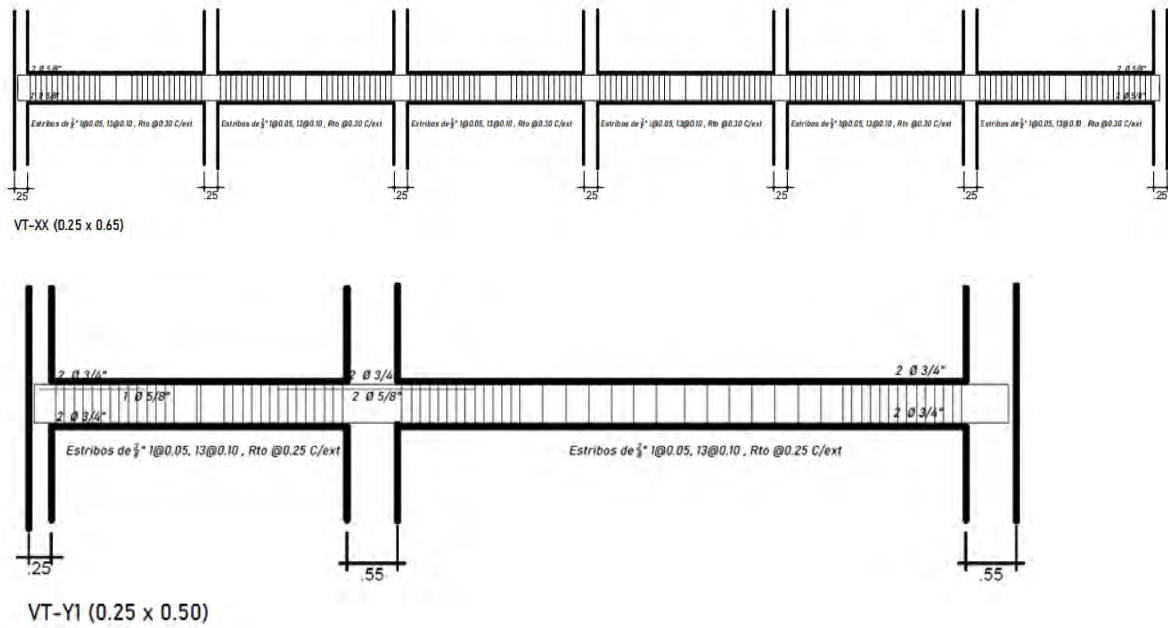


Figura 4.22. Vista frontal del diseño de acero de VT-XX, VT-Y1 y VT-Y2.

Nota. Fuente Propia

En el caso de las columnas se diseñaron tres diferentes elementos según su sección, la columna 01 de sección rectangular, la columna 02 de sección circular y la columna 03 de sección cuadrada. Se presenta el diseño de las secciones en la figura 4.23.

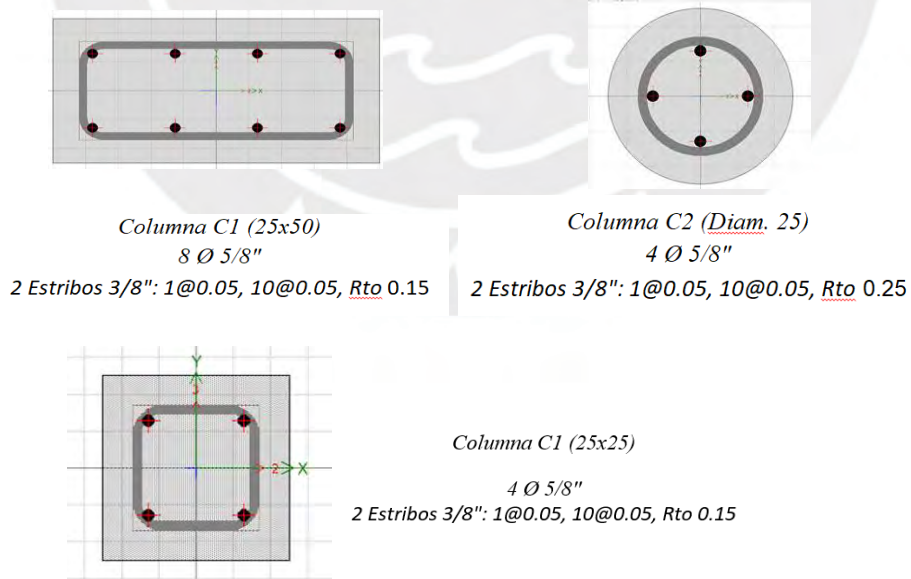


Figura 4.23. Secciones de las columnas de la tipología 2

Nota. Fuente Propia

4.6. Análisis estático no lineal

4.6.1. Determinación de diagrama momento - curvatura.

Se determinan las propiedades estructurales de los elementos de cada tipología en base a diagramas momento curvatura, para ello se consideran únicamente los puntos de fluencia y rotura en cada sección. Se asume un comportamiento elastoplástico perfecto para el acero durante todo el diagrama y hace uso del modelo de Hognestad en el punto de fluencia del concreto y el bloque de compresiones para la rotura. Se observa el diagrama esfuerzo - deformación para cada material y modelo en la figura 4.24.

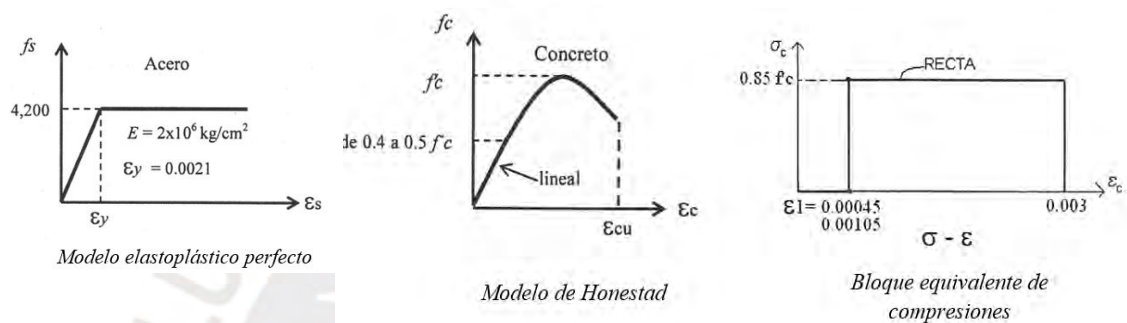


Figura 4.24. Diagrama esfuerzo deformación asumidos

Nota. Modificado de *Apuntes del Curso Concreto Armado 1*, por Ottazi, G., 2016

Para las vigas se determina un diagrama momento curvatura en los extremos del tramo de la sección en caso se cuente con diferentes arreglos de refuerzo de acero. Se determina el momento y la curvatura de ambos puntos usando equilibrio de la sección, leyes constitutivas y ecuaciones de compatibilidad considerando el acero en compresión. Se muestra un ejemplo del diagrama momento curvatura en la figura 4.26 y las deformaciones y fuerzas internas del punto de rotura en la figura 4.25 para la viga "VT-Y1" de la segunda tipología en el eje "A".

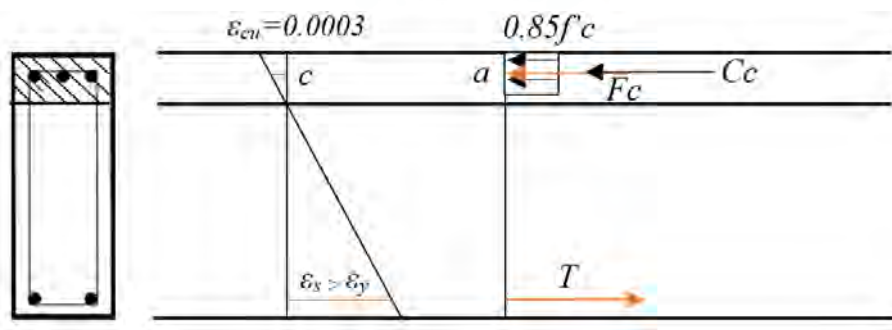


Figura 4.25. Deformaciones y Fuerzas internas del punto de rotura en la viga VT-XX

Nota. Fuente Propia

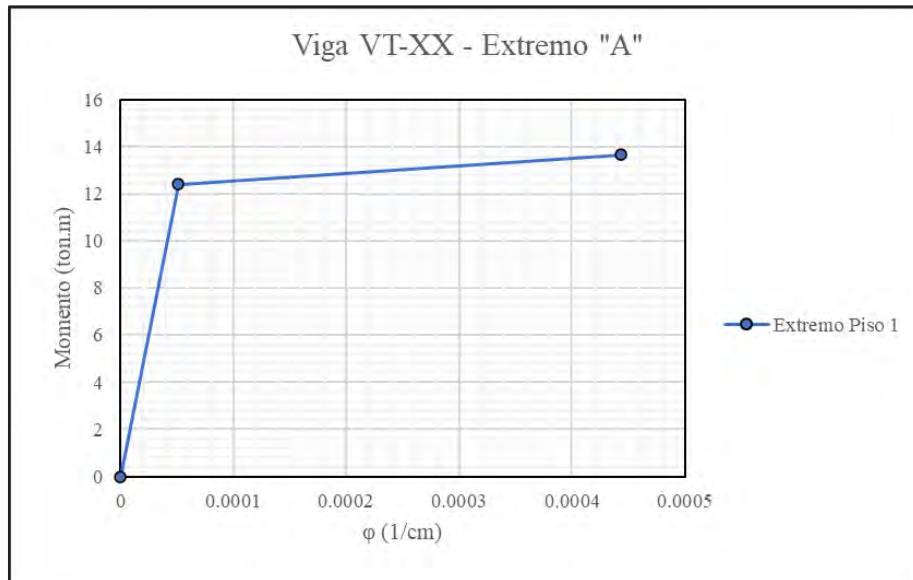


Figura 4.26. Diagrama momento curvatura de la viga VT-XX en el extremo A
Nota. Fuente Propia

De la misma manera para las columnas se determinan los diagramas momento curvatura, sin embargo se debe crear un diagrama para 7 diferentes cargas axiales obtenidas de los diagramas de interacción. Para la fluencia y la rotura se determinan los momentos y curvaturas de la misma manera que las vigas incluyendo la carga axial en el equilibrio. En el caso de las cargas superiores a la falla balanceada, cuyo acero en tracción no fluye se asume que el punto de fluencia y rotura son iguales. Se presenta en la figura 4.27 un ejemplo de 7 diagramas de momento curvatura para diferentes cargas axiales de la columna C1 de la segunda tipología en dirección X-X.

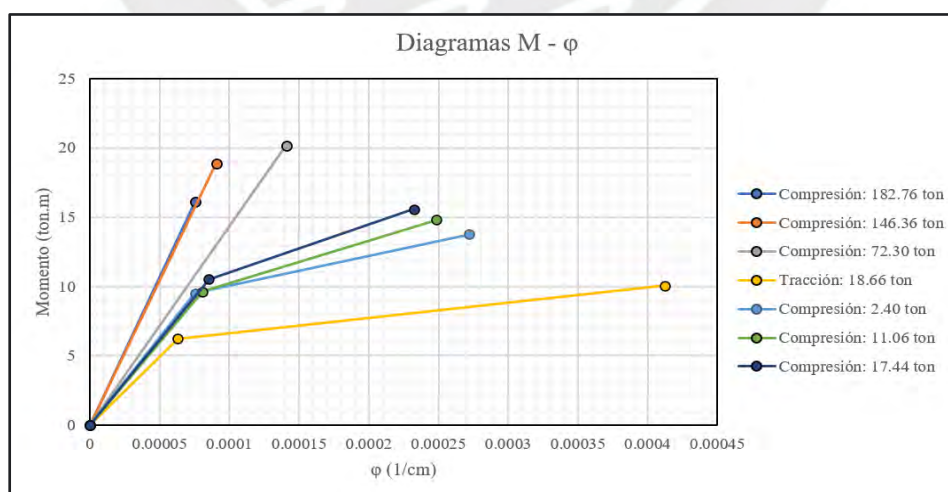


Figura 4.27. Diagrama momento curvatura de la columna C1
Nota. Fuente Propia

4.6.2. Rótulas de corte para albañilería confinada.

Las rótulas de corte para elementos de albañilería confinada pueden ser halladas en base a la curva de capacidad de los elementos en cuestión. Para ello se aplican las ecuaciones (4.1.), (4.2.), (4.3.), (4.4.) y (4.5.) de las estimaciones extraídas de los autores Riahi, Z.; Elwood K; Alcocer, S. (2009) exclusivamente para tabiques o muros de albañilería confinada. Cabe mencionar que para la presente investigación la resistencia máxima del muro se asumirá como la resistencia al corte del muro.

$$V_{cr} = 0.424 * V_m + 0.374 \sigma_v \quad (4.1.)$$

$$V_{max} = 0.21 * V_m + 0.363 \sigma_v + 0.0141 \sqrt{\rho_y * f_y * f'_c} \quad (4.2.)$$

$$V_{max} = V_m \quad (4.3.)$$

$$V_{ult} = 0.8V_{max} \quad (4.4.)$$

$$D_i = \Delta_i(\%) * h \quad (4.5.)$$

Donde:

- $V_{cr} =$ Cortante agrietada al corte $\left(\frac{kg}{m^2}\right)$
- $V_m =$ Resistencia al corte del muro de albañilería $\left(\frac{kg}{m^2}\right)$
- $V_{max} =$ Resistencia máxima del muro $\left(\frac{kg}{m^2}\right)$
- $\rho_y =$ Cuantía de la columna de confinamiento (%)
- $f_y =$ Fluencia del acero de la columna confinada $\left(\frac{kg}{cm^2}\right)$
- $f'_c =$ Resistencia a la compresión del concreto $\left(\frac{kg}{cm^2}\right)$
- $\sigma_v =$ Carga gravitacional en el muro $(CM + 0.25 CV) \left(\frac{kg}{m^2}\right)$
- $D_i =$ Desplazamiento del muro para el punto de control (m)
- $h =$ Altura de entrepiso del muro de albañilería confinada (m)

Asimismo, los puntos de control de desplazamientos se pueden obtener mediante la propuesta de Lovon (2017) obtenida de ensayos cíclicos, mostrados en la tabla 4.9. Esto permite generar las curvas de capacidad que se muestran en las figuras 4.28 y 4.29.

Tabla 4.9.

Porcentaje de derivas para las curvas de capacidad de los muros.

| Puntos de control | Deriva (%) |
|-------------------|------------|
| 1 | 0.14 |
| 2 | 0.62 |
| 3 | 0.86 |

Tomado de "Development of fragility curves for confined masonry buildings of Lima, calibrated with cyclic test" por Lovon y Tarque (2016).

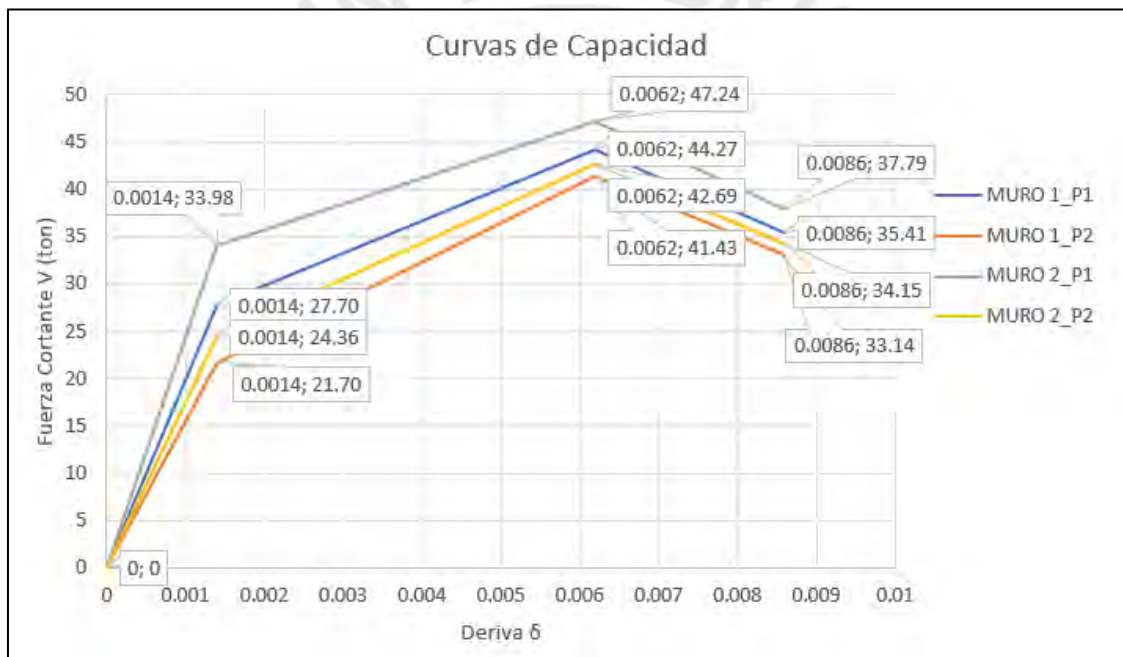


Figura 4.28. Curva de Capacidad Cortante vs Deriva de Albañilería Confinada
Nota. Fuente Propia

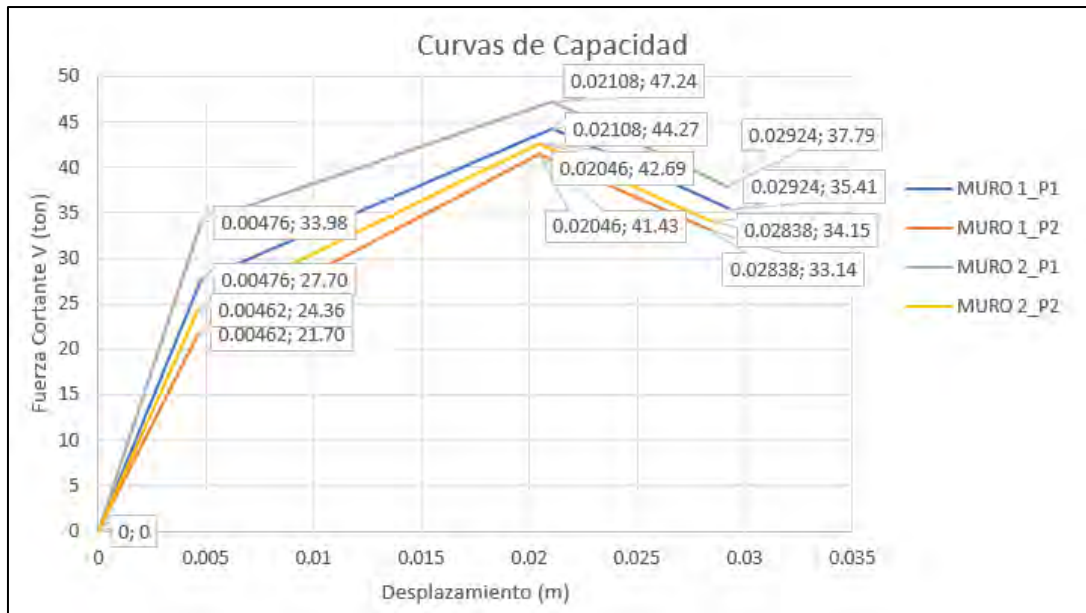


Figura 4.29. Curva de Capacidad Cortante vs Desplazamiento de Albañilería Confinada

Nota. Fuente Propia

Luego, en el programa SAP2000 asignan las propiedades de la rótula de corte tipo Shear V2 obtenidas de la curva de capacidad. Para los factores de seguridad “SF” en fuerza se utiliza el valor de las V_m (ton) y en desplazamiento se asigna la altura del entrepiso del muro de albañilería confinada (m) dividido entre 10^3 así como se muestra en la figura 4.30.

Frame Hinge Property Data for MURO1_P1 - Shear V2

Edit

Displacement Control Parameters

| Point | Force/SF | Disp/SF |
|-------|----------|---------|
| E- | -0.8 | -8.6 |
| D- | -0.8 | -8.6 |
| C- | -1 | -6.2 |
| B- | -0.6257 | 0 |
| A | 0 | 0 |
| B | 0.6257 | 0 |
| C | 1 | 6.2 |
| D | 0.8 | 8.6 |
| E | 0.8 | 8.6 |

Load Carrying Capacity Beyond Point E

Drops To Zero

Is Extrapolated

Scaling for Force and Disp

Use Yield Force Force SF 44.27

Use Yield Disp Disp SF 3.400E-03

Acceptance Criteria (Plastic Disp/SF)

Immediate Occupancy 3.000E-03

Life Safety 0.012

Collapse Prevention 0.015

Show Acceptance Criteria on Plot

Type

Force - Displacement

Stress - Strain

Hinge Length

Relative Length

Hysteresis Type And Parameters

Hysteresis Type Pivot

α_1 10.

α_2 10.

β_1 0.7

β_2 0.7

η 0.

Symmetric

OK Cancel

Figura 4.30. Propiedades de las rótulas de corte para un muro de albañilería confinada

Nota. Fuente Propia

Por último, es importante resaltar las características que deben seguir los muros de albañilería para poder aplicar las ecuaciones (4.1.), (4.2.), (4.4.) y (4.5.) y los puntos de control propuestos por Lovon (2017) mencionados en la Tabla 4.9. Según Riahi, Z.; Elwood K y Alcocer, S. (2009) los muros deben tener las siguientes características:

- Dos columnas de amarre, una en cada lado del muro de albañilería.
- Múltiples refuerzos longitudinales por cada elemento de confinamiento.
- No tener refuerzo horizontal.
- No tener aberturas en los muros de albañilería.
- Ratio Altura y Longitud (H/L) entre 0.7 y 1.2.
- Muros gobernados por deformación de corte.

4.6.3. Determinación de rótulas plásticas de elementos de concreto armado.

Las propiedades de las rótulas plásticas se asignan a partir de los diagramas momento curvatura obtenidos. Además, para los diferentes elementos se obtienen las longitudes de rótulas plásticas aproximadas con las ecuaciones presentadas en la figura 4.31. El “z” representa la distancia desde la ubicación de máximo momento hasta el cambio de concavidad del diagrama de momentos flectores de cada elemento y “d” es el peralte efectivo. Para el modelo, se tomará el promedio de “z”. En la figura 4.32 se tiene un ejemplo para la columna 25x65 de la tipología de 5 ejes donde se encuentran los valores promedio de “z” y se obtiene la longitud de la rótula plástica. Es importante señalar que no es indispensable que los valores determinados con la ecuación aproximada formen parte del rango de valores aproximados de la figura 4.31. (Asmat, 2016)

| ELEMENTO | ECUACIÓN APROXIMADA | RANGO DE VALORES APROXIMADOS |
|--------------|----------------------------------|------------------------------|
| VIGAS | $(0.25 + 0.1 \cdot z/d) \cdot d$ | $[0.50 \sim 0.75] \cdot d$ |
| COLUMNAS | $(0.35 + 0.1 \cdot z/d) \cdot d$ | $[0.60 \sim 0.85] \cdot d$ |
| MUROS | $(0.15 + 0.1 \cdot z/d) \cdot d$ | $[0.60 \sim 1.00] \cdot d$ |
| MUROS LARGOS | $(0.25 + 0.1 \cdot z/d) \cdot d$ | $[0.45 \sim 0.70] \cdot d$ |

Figura 4.31. Ecuaciones aproximadas para obtener las longitudes de rótulas plásticas

Tomado de “Disposiciones sísmicas de diseño y análisis en base a desempeño aplicables a edificaciones de concreto armado”, por Asmat, C, 2016.

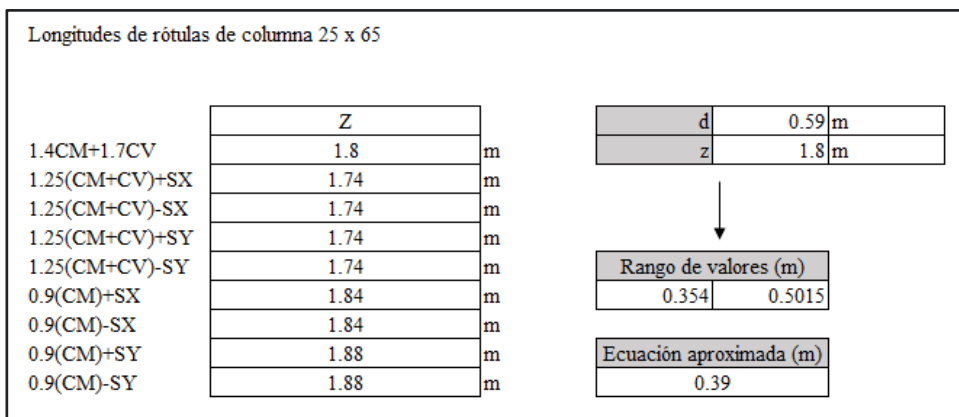


Figura 4.32. Determinación de longitud de rótulas plásticas para la columna 25x65.
 Nota.Fuente propia.

Para asignar las rótulas al programa SAP2000 se debe diferenciar por elemento y se tendrán en cuenta algunas consideraciones adicionales. Para las vigas, se asume que estos elementos actúan en flexión pura y formarán una rótula dúctil. Se define como rótula tipo Momento M3 y se asigna el diagrama momento curvatura siguiendo los criterios propuestos en la figura 4.33 para el rango inelástico. Además, se deben ingresar dos factores de escala “SF” correspondientes al momento y la curvatura y se recomienda que sean los valores en fluencia del momento y la curvatura. También se determina el criterio de desempeño siguiendo la figura 4.34 utilizando el factor de escala “SF” correspondiente a la curvatura en la fluencia.

| Punto | M / My | Curvatura / SF |
|-------|---------|-----------------------|
| A | 0 | 0 |
| B | 1 | 0 |
| C | Mn / My | ϕ_u / ϕ_y |
| D | 0.2 | ϕ_u / ϕ_y |
| E | 0.2 | $\gg \phi_u / \phi_y$ |

Figura 4.33. Tabla de valores a ingresar para el diagrama momento curvatura en vigas.

Tomado de “Disposiciones sísmicas de diseño y análisis en base a desempeño aplicables a edificaciones de concreto armado”, por Asmat, C, 2016.

| Criterio | Curvatura / SF |
|-------------------|-------------------------|
| Operacional | $0.3 \cdot \phi_u / SF$ |
| Resguardo de vida | $0.6 \cdot \phi_u / SF$ |
| Cerca del colapso | $0.8 \cdot \phi_u / SF$ |

Figura 4.34. Criterios de aceptación utilizados para vigas.

Tomado de “Disposiciones sísmicas de diseño y análisis en base a desempeño aplicables a edificaciones de concreto armado”, por Asmat, C, 2016.

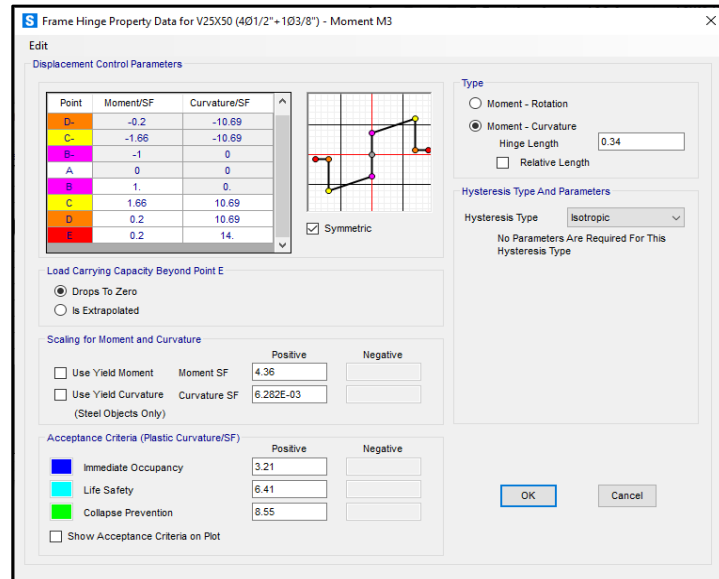


Figura 4.35. Propiedades de las rótulas plásticas para vigas.
Nota. Fuente propia.

En la figura 4.35 se muestra el caso de la viga de 25x50 en la tipología de 5 ejes. Se ingresa la longitud de la rótula de manera absoluta y se asume que hay un comportamiento simétrico para los momentos en ambos sentidos. Por otro lado, los muros y columnas se ingresan con el diagrama de interacción de los mismos. Además, al contar con varios diagramas momento curvatura para diferentes fuerzas axiales se prefiere utilizar estos mismos valores con el fin de elaborar el diagrama de interacción y lograr resultados más precisos. El tipo de rótula asignado al programa será de tipo Interacting P-M2-M3 con comportamiento dúctil. También, se utiliza un factor de escala "SF" fijo de 0.01 cuando se trabaja en metros como unidades globales del modelo. En la figura 4.36 y 4.37 se muestran los valores a ingresar del diagrama momento curvatura de cada fuerza axial y los criterios de aceptación usando el SF fijo. Adicionalmente, en la figura 4.38 se muestra el caso de columna 25x65 cm para la tipología de 5 ejes.

| Punto | M / My | Curvatura / SF |
|-------|-----------|------------------------------|
| A | 0 | 0 |
| B | 1 | 0 |
| C | Mn / My | $(\phi_u - \phi_y) / SF$ |
| D | 0.2 | $(\phi_u - \phi_y) / SF$ |
| E | 0.2 | $\gg (\phi_u - \phi_y) / SF$ |

Figura 4.36. Valores a ingresar para el diagrama momento curvatura en columnas y muros.

Tomado de “Disposiciones sísmicas de diseño y análisis en base a desempeño aplicables a edificaciones de concreto armado”, por Asmat, C, 2016.

| Criterio | Curvatura / SF |
|-------------------|------------------------------------|
| Operacional | $0.3 \cdot (\phi_u - \phi_y) / SF$ |
| Resguardo de vida | $0.6 \cdot (\phi_u - \phi_y) / SF$ |
| Cerca del colapso | $0.8 \cdot (\phi_u - \phi_y) / SF$ |

Figura 4.37. Criterios de aceptación utilizados para columnas y muros.

Tomado de “Disposiciones sísmicas de diseño y análisis en base a desempeño aplicables a edificaciones de concreto armado”, por Asmat, C, 2016.

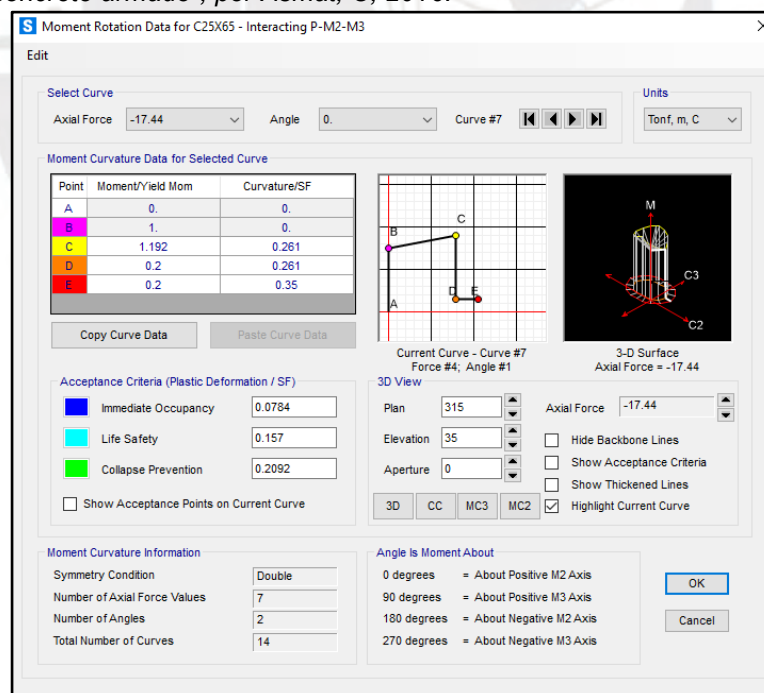


Figura 4.38. Asignación propiedades de rótulas plásticas para columnas y muros.
Nota. Fuente propia.

Finalmente, en la figura 4.39 y 4.40 se aprecia la secuencia para la distribución de rótulas plásticas en el modelo de la tipología de 5 ejes en el eje 1 y eje 2'. En las vigas y columnas estas se ubican a $h/2$, mientras que en el muro de albañilería se ubica una rótula a la mitad del entrepiso. Las rótulas se asignan dependiendo de la distribución de acero según el diseño propuesto.

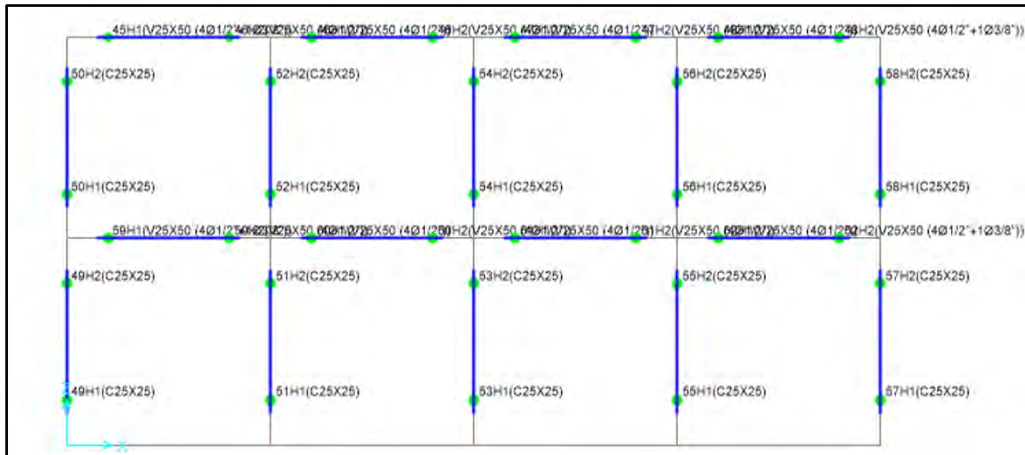


Figura 4.39. Asignación de rótulas plásticas para columnas y vigas.

Nota. Fuente propia.

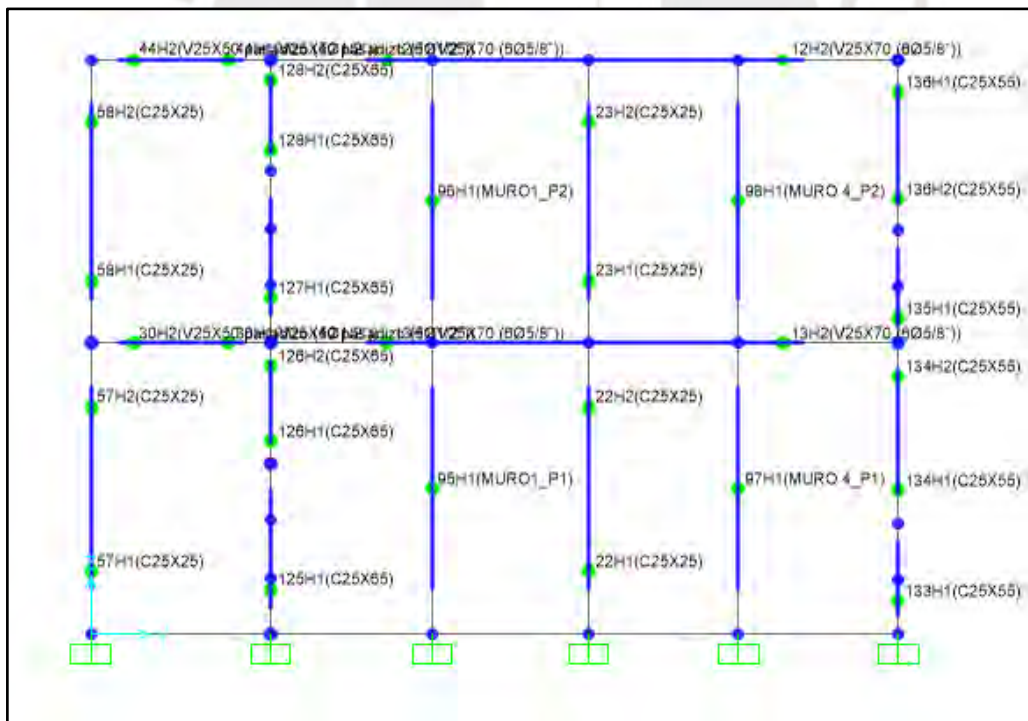


Figura 4.40. Asignación propiedades de rótulas plásticas para muros.

Nota. Fuente propia.

4.6.4. Obtención de curvas de capacidad.

Una vez definidas las la secuencia de rótulas en cada elemento y sus propiedades no lineales se realiza el AENL. Luego de ello se obtiene la curva de capacidad que permite determinar las propiedades relevantes de cada estructura como resistencia, ductilidad, rigidez y el compartamiento elástico e inelástico de cada estructura (Asmat, 2016).

Se inicia el análisis con la asignación del caso de carga estático no lineal que considere las cargas por gravedad. Luego se definen patrones de carga tipo sismo denominadas “Pushover”, donde se introducen las cargas estáticas al modelo. Debido a que la forma de distribución de cargas estáticas es de alta relevancia en el análisis y se recomienda aproximarse a la forma del modo 1 se decidió utilizar dos distribuciones de manera paralela. En primer lugar, se define una distribución uniforme y se colocan fuerzas de 10 ton en el centro de masa de ambos pisos. Por otro lado, se define una distribución ascendente y se colocan fuerzas de 10 ton en el techo del primer piso y de 20 ton en techo del segundo piso. Ambas cargas se deben ubicar en el centro de masa del piso respectivo.

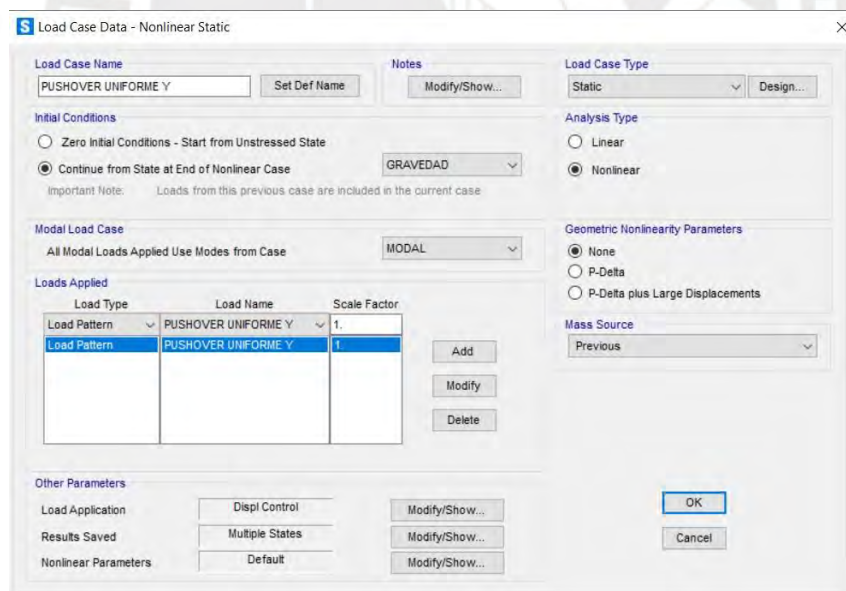


Figura 4.41. Caso de Carga “Pushover” para distribución uniforme en dirección Y
Nota. Fuente propia.

En la figura 4.41 se muestra el caso de carga “Pushover” creado para para cada dirección considerando como condición previa el caso de gravedad. El análisis se define con un control por desplazamientos, se incrementan las cargas hasta alcanzar un desplazamiento máximo definido mediante iteraciones hasta determinar

el punto en el que se formen rótulas con condición de colapso (C) , ver figura 4.42. Asimismo, se define un punto de articulación de la azotea en el que se controle el desplazamiento.

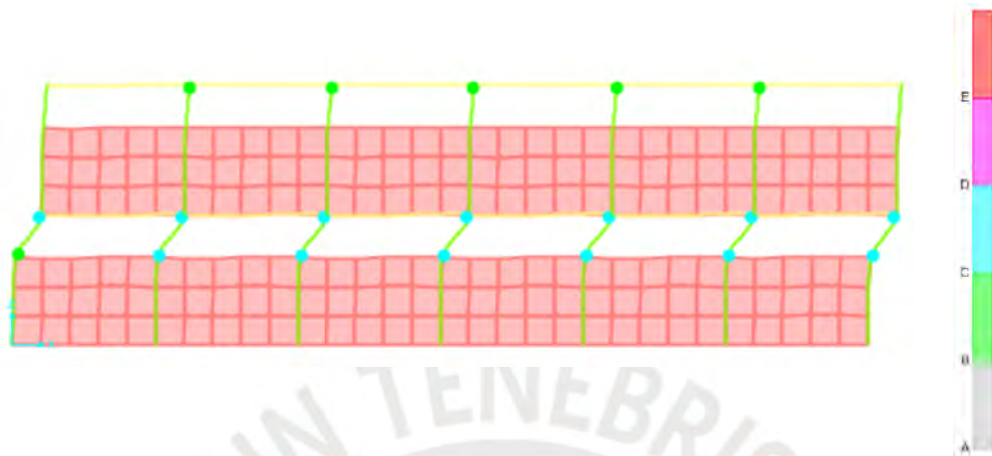


Figura 4.42. Última deformación considerando cargas incrementales con distribución uniforme en sentido X.

Nota. Fuente propia.

Finalmente se obtienen las cuatro curvas de capacidad mediante el AENL para cada sismo en X y Y, y en cada caso de distribución uniforme y ascendente. Se presenta en la figura 4.43 y 4.44 un ejemplo de curva de capacidad para la segunda tipología para una distribución uniforme y ascendente en dirección Y. Por otro lado, en el Anexo 5 se presentan todas las curvas de capacidad.

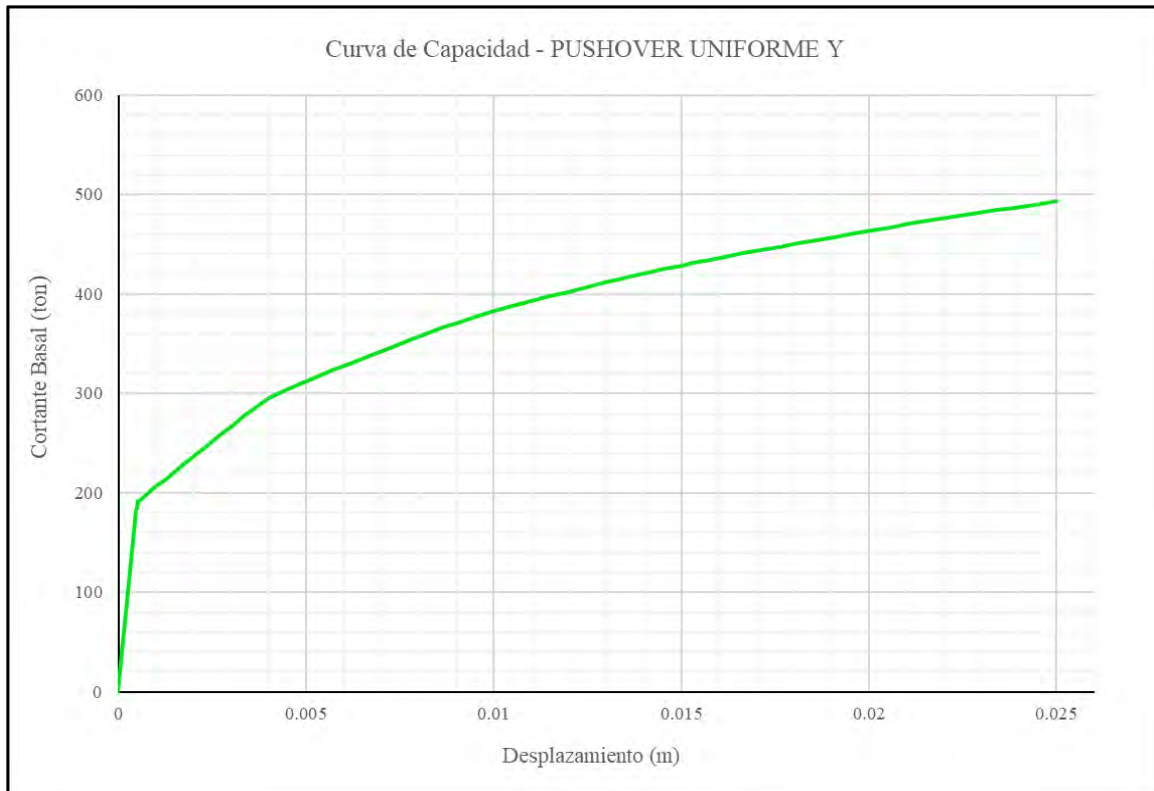


Figura 4.43. Curva de Capacidad considerando cargas incrementales con distribución uniforme en eje Y
Nota. Fuente propia.

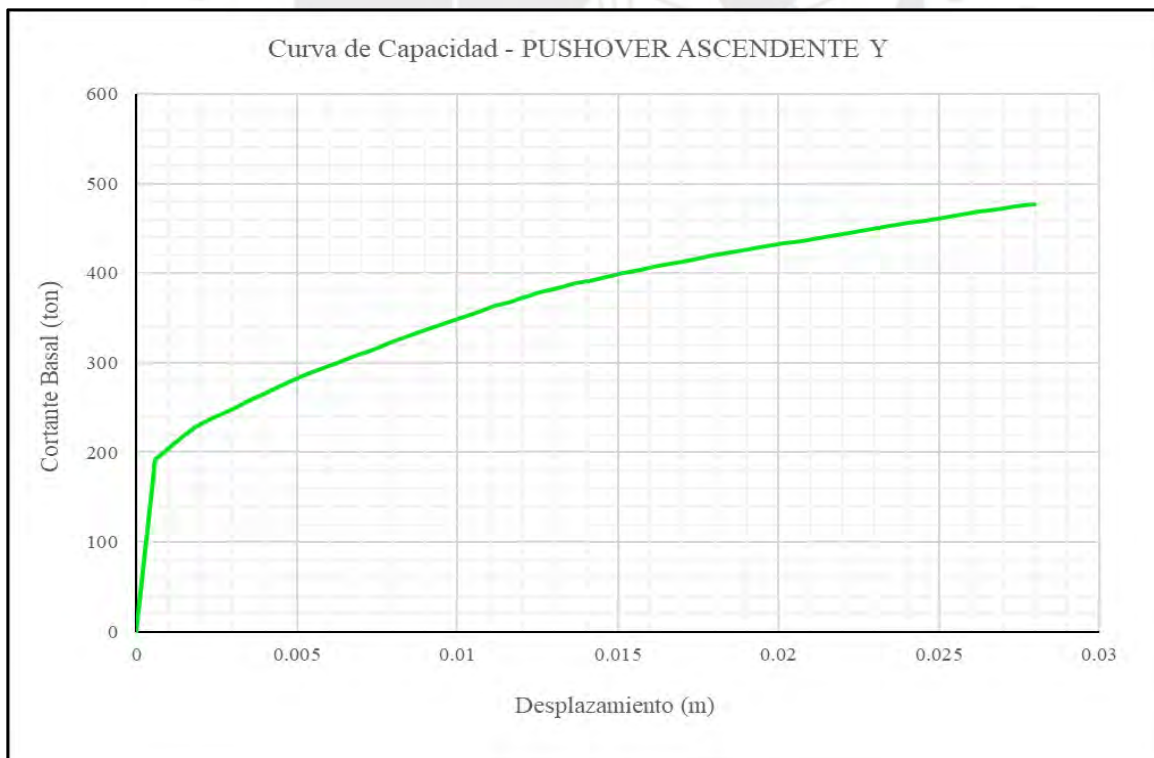


Figura 4.44. Curva de Capacidad considerando cargas incrementales con distribución ascendente en eje Y
Nota. Fuente propia.

4.6.5. Obtención del espectro de capacidad

Se siguen las ecuaciones propuestas por la norma ATC-40, las cuales determinan los espectros de capacidad en base a las curvas de capacidad. Para ello se quiere del coeficiente de masa efectiva (α_1) y el factor de participación modal del modo fundamental (PF1) obtenidas con las ecuaciones (4.6) y (4.7). Luego para cada valor de cortante basal (V) y desplazamiento del techo (Δ_{techo}) en las curvas de capacidad se obtiene el desplazamiento espectral (Sd) y aceleración espectral (Sa) con las ecuaciones (4.8) y (4.9). En el Anexo 6 se muestran los resultados de los espectros de capacidad para ambas tipologías se muestran. (ATC-40, 1996)

$$PF_1 = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{W_i \Phi_{i1}}{g}}{\sum_{i=1}^N \frac{W_i \Phi_{i1}^2}{g}} \quad (4.6)$$

$$\alpha_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N \frac{W_i \Phi_{i1}}{g} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^N \frac{W_i}{g} \right] \left[\sum_{i=1}^N \frac{W_i \Phi_{i1}^2}{g} \right]} \quad (4.7)$$

$$S_{ai} = \frac{V_i/w}{\alpha_1} \quad (4.8)$$

$$S_{di} = \frac{\Delta_{techo}}{PF_1 \Phi_{techo,i}} \quad (4.9)$$

Donde:

PF_1 = Factor de participación modal del modo fundamental

W_i/g = Masa asignada al nivel i

w = Peso del edificio

Φ_{i1} = Amplitud del modo fundamental en el nivel i

N = Nivel de techo

S_{ai} = Aceleración espectral para la cortante basal i

S_{di} = Desplazamiento espectral i

α_1 = Coeficiente de masa efectiva en el modo fundamental

V_i = Cortante basal i obtenida de la curva de capacidad

Es importante mencionar que estos espectros se representan de manera bilineal. Para ello se prolonga una recta a partir de la tangente de los primeros y últimos valores de S_d del espectro de manera iterativa hasta conseguir igualar las áreas A_1 y A_2 , ver figura 4.45, y el punto de fluencia D_y se determina interceptando la proyección de las rectas obtenida de igualar las áreas.

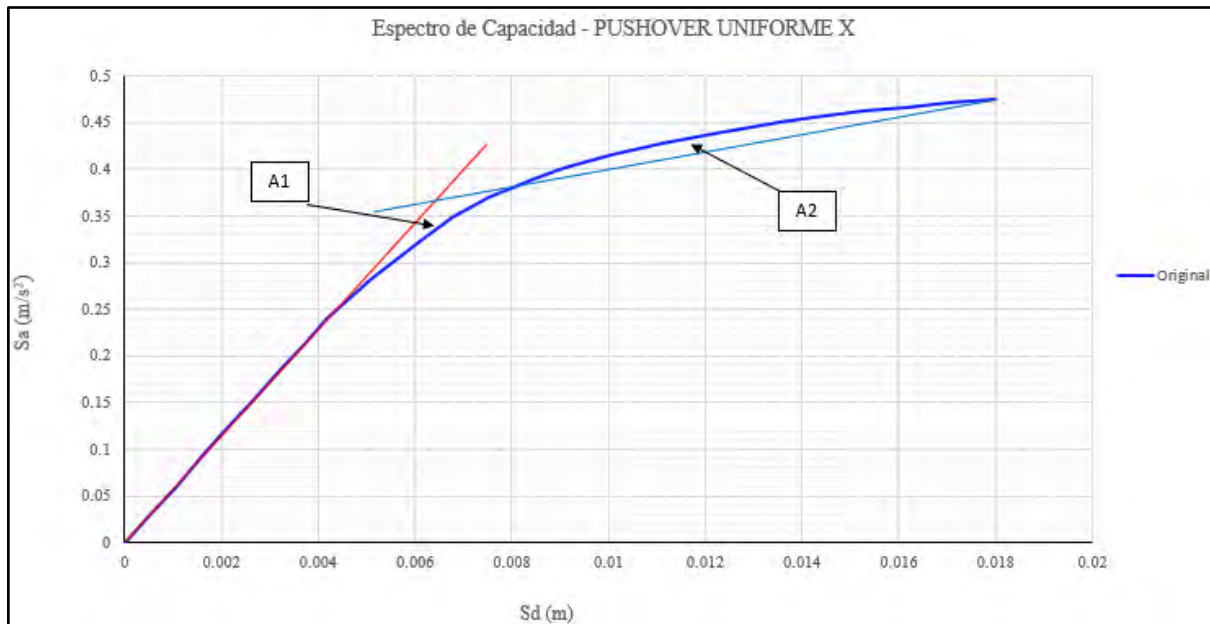


Figura 4.45. Idealización bilineal del espectro de capacidad para el pushover uniforme en X de la tipología de 5 ejes.

Nota. Fuente propia.

4.6.6. Consideración de la variabilidad en los resultados

Es relevante considerar que los parámetros que afectan la vulnerabilidad de una estructura son de naturaleza aleatoria, lo cual genera una variación e incertidumbre en los resultados de los análisis sísmicos.

Tal como menciona (Negulescu y Gehl, 2013) se debe definir dos fuentes de incertidumbres en los estudios de la vulnerabilidad: aquellos vinculados a la demanda sísmica (no considerados en este estudio) y los que están relacionados con los parámetros estructurales. Según indican Xiaohui, Dagang y Bing (2016), las curvas de capacidad para concreto armado dependen, entre otros factores, de la resistencia de los materiales, la data geométrica y la capacidad de cada elemento para deformarse. Considerando lo mencionado, se definen en la tabla 4.7 los parámetros considerados aleatorios y que influyen en los resultados.

Tabla 4.10.

Parámetros aleatorios considerados en el espectro de capacidad

| | |
|---------------------|----------------------------------------|
| Concreto | Módulo de Elasticidad (E) |
| | Resistencia a la compresión (f_c) |
| | Deformación última (ϵ_{cu}) |
| Acero | Resistencia a la fluencia (f_y) |
| Carga muerta | Densidad de los materiales (ρ) |
| | Volumen de las secciones (V_i) |

Nota. Fuente Propia.

Se considera una variación general de $\pm 5\%$ sobre la respuesta obtenida con los parámetros promedio, generando 3 espectros de capacidad. Se muestra un ejemplo de espectro de capacidad con los 3 casos para la primera tipología con una distribución uniforme en dirección X en la figura 4.46.

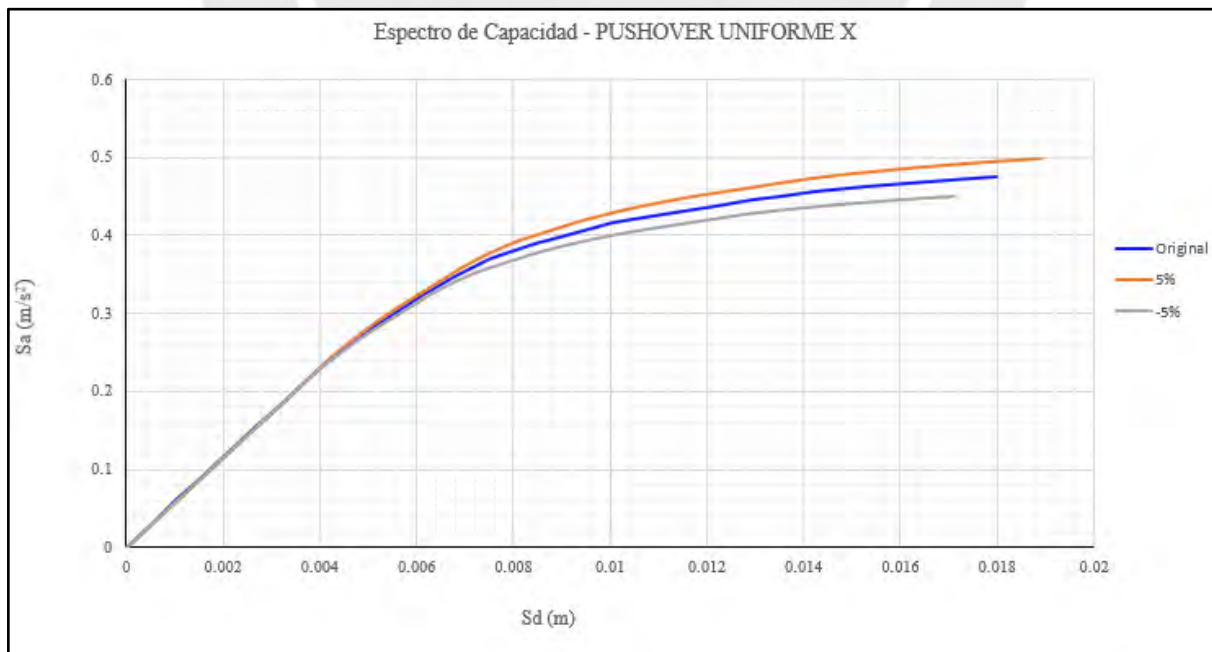


Figura 4.46. Espectro de capacidad con 3 casos para el pushover uniforme en X de la tipología de 5 ejes.

Nota. Fuente propia.

CAPÍTULO 5: CURVAS DE FRAGILIDAD

Se detallan los parámetros y estados de daño utilizados en la elaboración de las curvas de fragilidad. Posteriormente, se detalla el procedimiento para su obtención y se exhiben los resultados finales correspondientes a los cuatros casos de análisis estático no lineal de ambas tipologías.

5.1. Parámetros y estados de daño

Los parámetros relevantes en la realización de las curvas de fragilidad son “ λ ”, correspondiente a la mediana de cada estado de desempeño definido “ ds_i ”, y “ β ”, que corresponde a la desviación estándar del logaritmo natural con respecto a los estados de desempeño. El manual técnico HAZUS MR4 en 2003 define cuatro estados de daño “ ds_i ” los cuales son leve, moderado, extensivo y completo. Se interpreta el estado leve como la aparición de las primeras fisuras debido a momentos o por cortante y el estado completo como el colapso inminente. Con las ecuaciones (5.1), (5.2), (5.3) y (5.4) se obtienen los estados de daño partiendo de los valores de desplazamiento en fluencia y último extraídos del espectro bilineal. (Vargas, Pujades, Barbat y Hurtado, 2011)

$$ds_1 = 0.7Dy \quad (5.1)$$

$$ds_2 = Dy \quad (5.2)$$

$$ds_3 = Dy + 0.25(Du - Dy) \quad (5.3)$$

$$ds_4 = Du \quad (5.4)$$

Donde:

| | |
|--------|--------------------------------------------------------------------|
| ds_1 | = Mediana (λ) utilizada para el estado de daño leve |
| ds_2 | = Mediana (λ) utilizada para el estado de daño moderado |
| ds_3 | = Mediana (λ) utilizada para el estado de daño extensivo |
| ds_4 | = Mediana (λ) utilizada para el estado de daño completo |
| Dy | = Desplazamiento espectral en la fluencia |
| Du | = Desplazamiento espectral último |

Por otro lado, el manual técnico Hazus define los valores de “ β ” según la clasificación de tipología estructural y de la exigencia del código nacional. En el Anexo 7 se observan las tablas utilizadas con las cuales se clasifican ambas tipologías como C1L y se utilizan los valores de “ β ” para códigos sísmicos moderados. Para los estados de daño leve y completo se utilizan 0.89” y para los estados moderado y extensivo 0.9”.

5.2. Curvas de fragilidad

Se obtienen las curvas de fragilidad a partir de los espectros de capacidad y siguiendo los parámetros presentados en el punto 5.1, junto con la ecuación (5.5) obtenida del manual técnico HAZUS MR4 del FEMA.

$$P \left[\frac{dsi}{Sd} \right] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{Sd}{dsi} \right) \right] \quad (5.5)$$

Donde:

| | | |
|--------------|---|-----------------------------------------------------------|
| Sd | = | Desplazamiento espectral |
| dsi | = | Desplazamiento espectral para un estado de daño |
| $P[dsi/Sd]$ | = | Probabilidad que el parámetro Sd exceda el límite dsi |
| Φ | = | Función de distribución acumulada normal estándar |
| β_{ds} | = | Desviación estándar del logaritmo natural de ds |

Para cada espectro de capacidad se define la mediana (λ) del desplazamiento espectral en el que la estructura alcanza los estados de daño (dsi) y la desviación estándar (β), para ello se siguen los límites descritos en el punto 5.1. Se presenta en la tabla 5.1 un ejemplo para el caso de distribución de fuerzas “uniforme” para sismo en X de la segunda tipología.

Tabla 5.1.

Desplazamientos espectrales y parámetros para la distribución uniforme y sismo en X de la tipología de 7 ejes.

| DESPLAZAMIENTOS ESPECTRALES | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <i>Despl. Fluencia (Dy) (mm)</i> | | 6.40 |
| <i>Despl. Último (Du) (mm)</i> | | 17.78 |
| MEDIANA Y DESVIACIÓN ESTANDAR | | |
| Estados de daño | Mediana (λ) (mm) | Desviación estándar (β) |
| <i>Daño Leve (SD) - ds1</i> | 4.48 | 0.89 |
| <i>Daño Moderado (MD) - ds2</i> | 6.40 | 0.9 |
| <i>Daño Extensivo (ED) - ds3</i> | 9.24 | 0.9 |
| <i>Daño Completo (CD) - ds4</i> | 17.78 | 0.89 |

Nota. Fuente Propia.

Luego se determina la probabilidad de excedencia para los cuatro estados de daño con la ecuación (5.5) con diferentes rangos de espectro de desplazamiento (sd); se presenta en la tabla 5.2 el procedimiento seguido para el mismo caso que la tabla 5.1.

Tabla 5.2.

Secuencia para determinar la probabilidad de excedencia para un desempeño completo en caso de distribución uniforme y sismo en X de la tipología de 7 ejes.

| Probabilidad de Excedencia para Daño Completo (ds4) | | | | |
|------------------------------------------------------------|---------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Desplazamiento Espectral (sd) | Ln(Sd) | Ln(λ) | (Ln(Sd) - Ln(λ))/β | $\Phi [(Ln(Sd) - Ln(\lambda))/\beta]$ |
| 0.18 | -1.73 | 2.88 | -5.174 | 0.00% |
| 5.33 | 1.67 | 2.88 | -1.353 | 8.81% |
| 16.00 | 2.77 | 2.88 | -0.118 | 45.29% |
| 33.77 | 3.52 | 2.88 | 0.721 | 76.46% |
| 79.99 | 4.38 | 2.88 | 1.690 | 95.45% |
| 168.86 | 5.13 | 2.88 | 2.530 | 99.43% |

Nota. Fuente Propia.

La probabilidad de excedencia para diferentes estados de desempeño conforma las curvas de fragilidad, la cual se determina para cada caso de distribución de cargas y sentido de sismo en ambas tipologías. Asimismo, se consideran los casos de variabilidad +5% y -5% en las respuestas del espectro de capacidad mencionado en el numeral 4.6.5, generando tres curvas de fragilidad por cada estado límite: +5%, promedio y -5%. Se muestran en las figuras 5.1 a 5.8 las curvas de fragilidad para los cuatro casos de distribución de cada tipología.

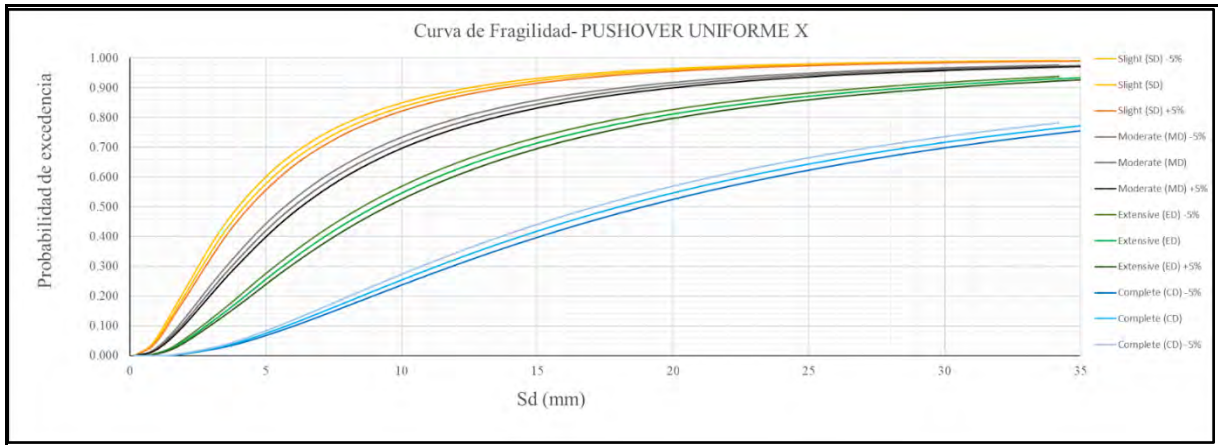


Figura 5.1. Curvas de Fragilidad considerando cargas laterales incrementales en dirección X de asignación uniforme para la tipología de 5 ejes
Nota. Fuente propia.

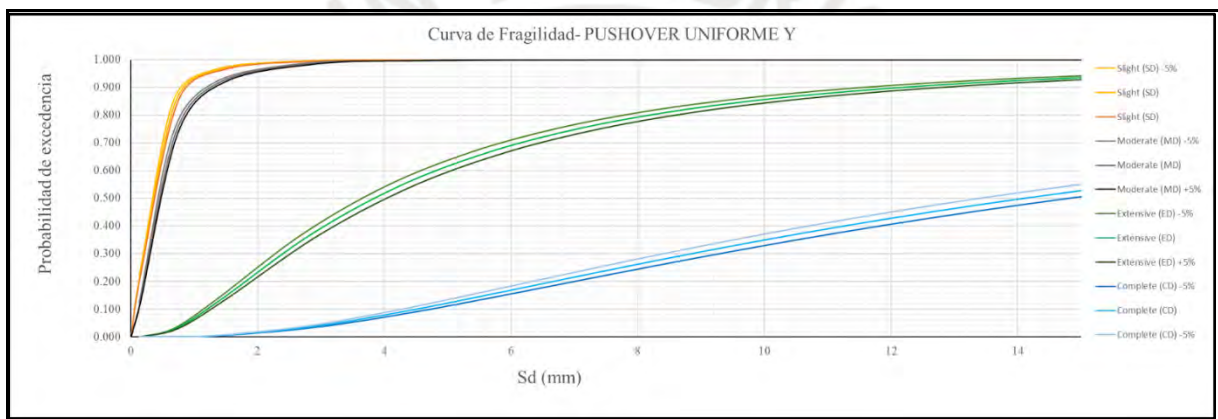


Figura 5.2. Curvas de Fragilidad considerando cargas laterales incrementales en dirección Y de asignación uniforme para la tipología de 5 ejes
Nota. Fuente propia.

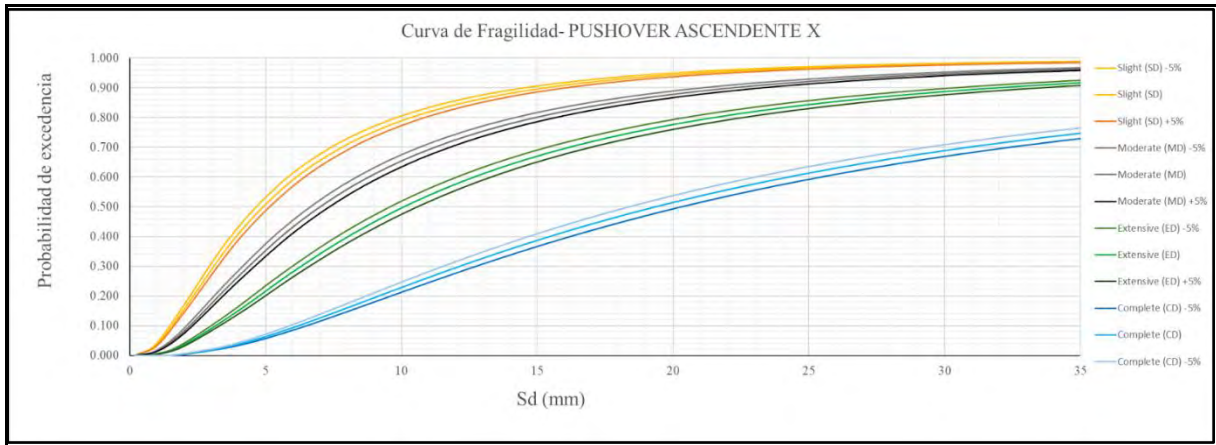


Figura 5.3. Curvas de Fragilidad considerando cargas laterales incrementales en dirección X de asignación ascendente para la tipología de 5 ejes
Nota. Fuente propia.

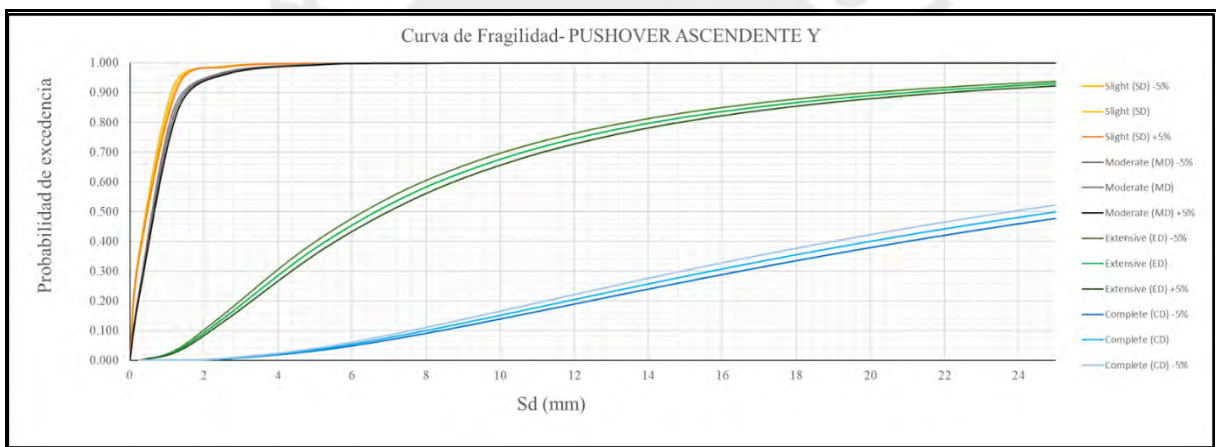


Figura 5.4. Curvas de Fragilidad considerando cargas laterales incrementales en dirección Y de asignación ascendente para la tipología de 5 ejes
Nota. Fuente propia.

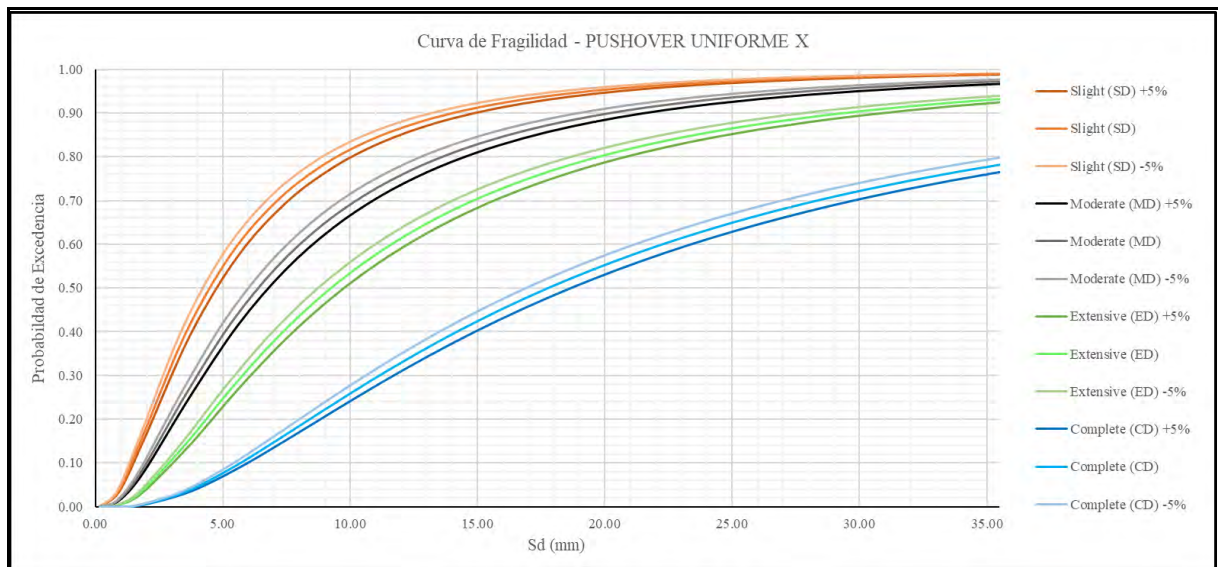


Figura 5.5. Curvas de Fragilidad considerando cargas laterales incrementales en dirección X de asignación uniforme para la tipología de 7 ejes
Nota. Fuente propia.

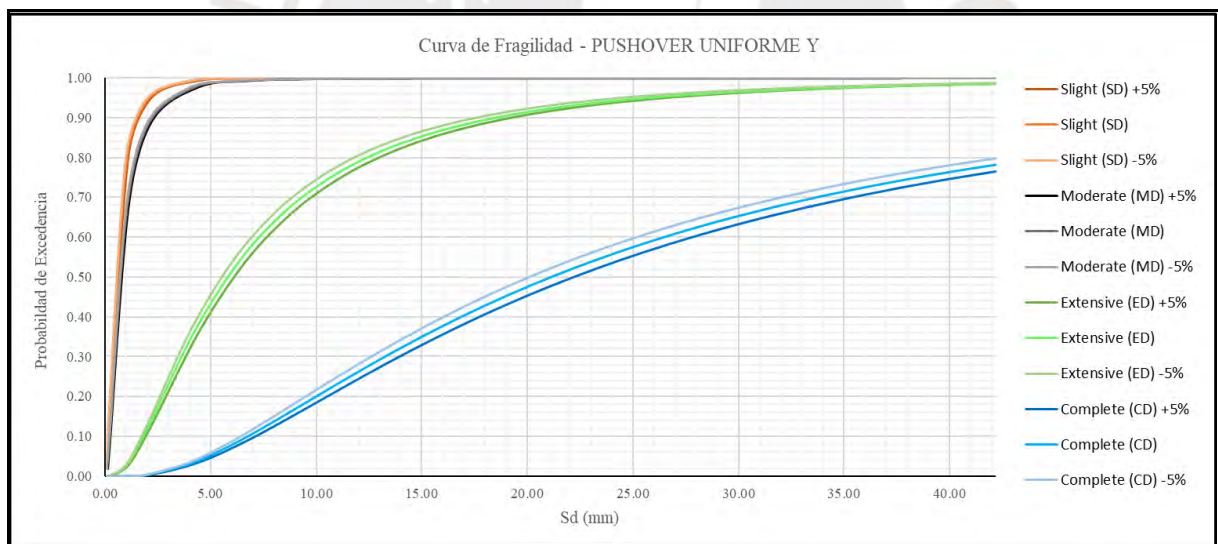


Figura 5.6. Curvas de Fragilidad considerando cargas laterales incrementales en dirección Y de asignación uniforme para la tipología de 7 ejes
Nota. Fuente propia.

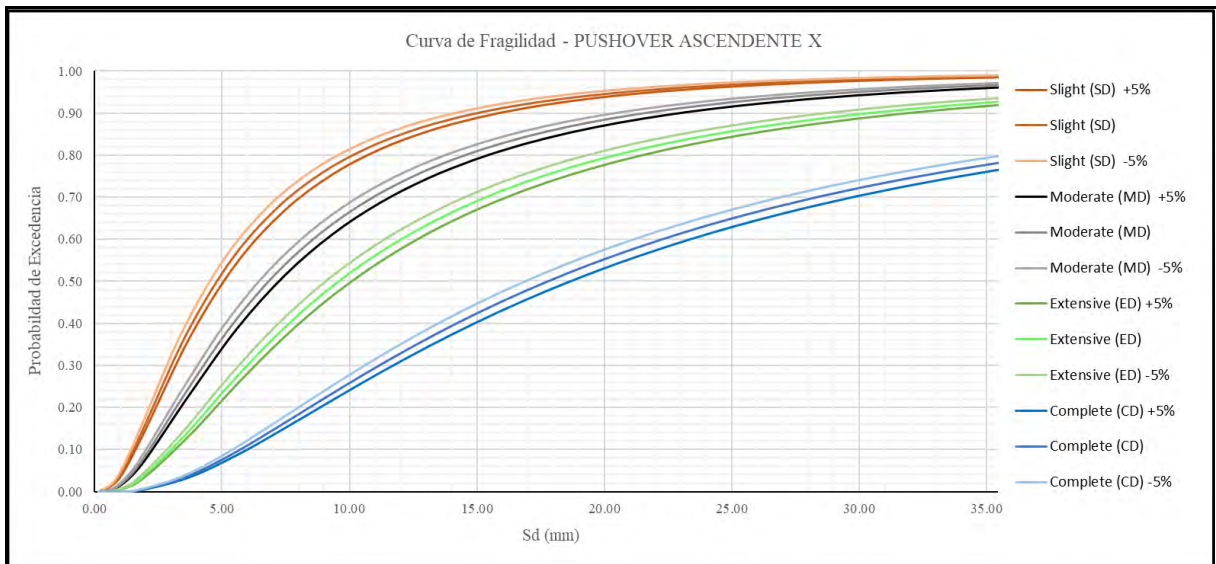


Figura 5.7. Curvas de Fragilidad considerando cargas laterales incrementales en dirección X de asignación ascendente para la tipología de 7 ejes
Nota. Fuente propia.

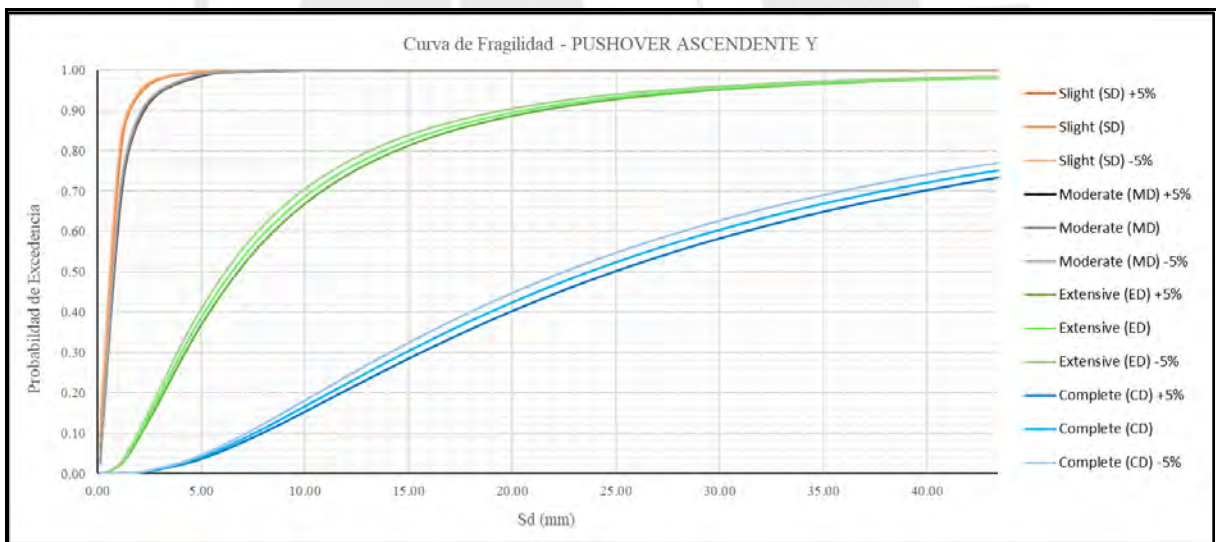


Figura 5.8. Curvas de Fragilidad considerando cargas laterales incrementales en dirección Y de asignación ascendente para la tipología de 7 ejes
Nota. Fuente propia.

5.3. Nivel de desempeño de las tipologías

Para obtener el nivel de desempeño de las tipologías se utiliza el pseudo desplazamiento espectral correspondiente al caso de análisis modal espectral de la tabla 4.3 y tabla 4.6. Se ingresa el valor en la gráfica de las curvas de fragilidad en la dirección correspondiente y se obtienen los resultados de los estados de daño. Se espera que el desempeño operacional tenga un estado de daño moderado. En las figuras 5.9 a la 5.16 se aprecian las curvas de fragilidad para ambas tipologías estructurales.

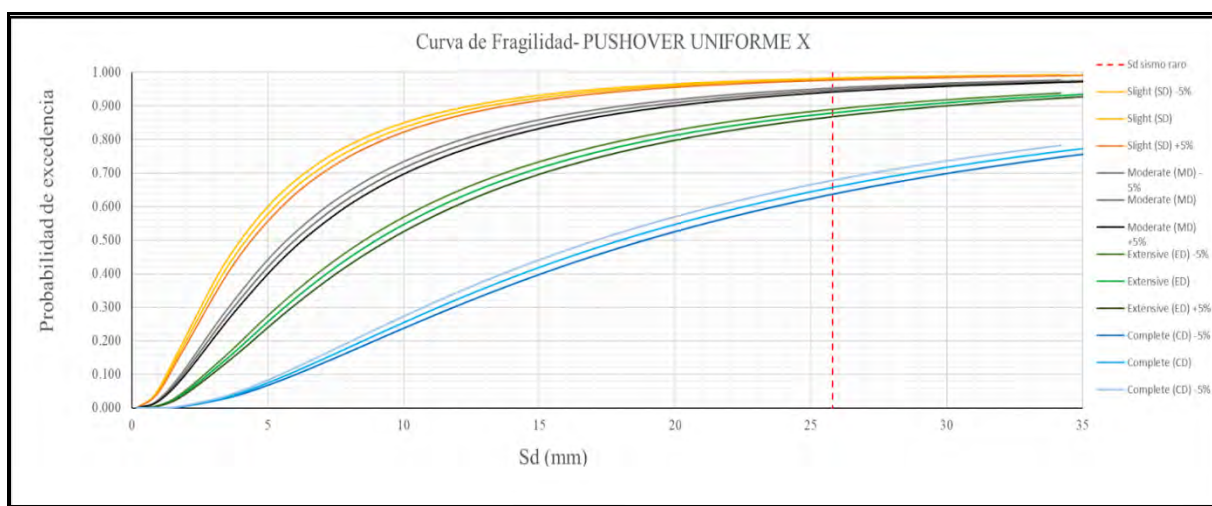


Figura 5.9. Desempeño de un sismo raro para la distribución de carga uniforme en dirección X para la tipología de 5 ejes

Nota. Fuente propia.

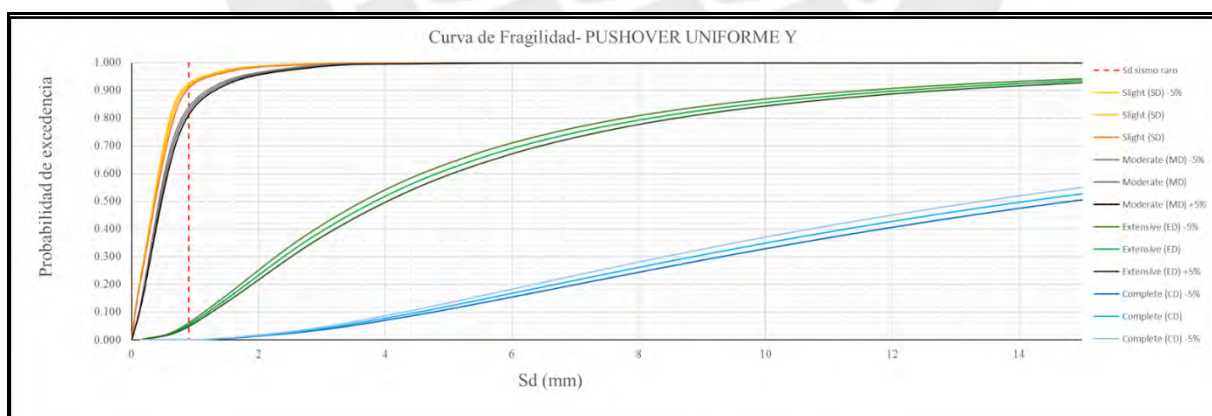


Figura 5.10. Desempeño de un sismo raro para la distribución de carga uniforme en dirección Y para la tipología de 5 ejes

Nota. Fuente propia.

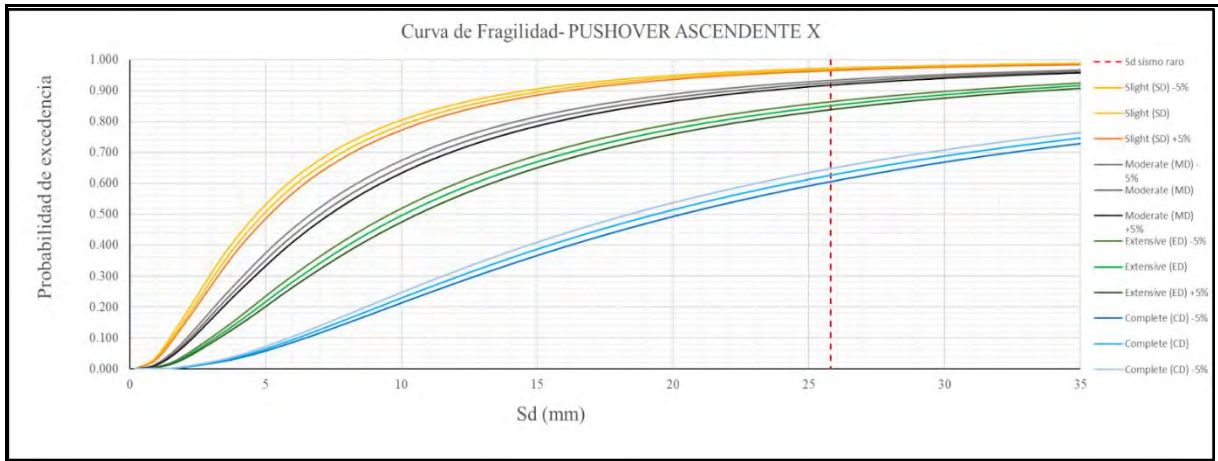


Figura 5.11. Desempeño de un sismo raro para la distribución de carga ascendente en dirección X para la tipología de 5 ejes
Nota. Fuente propia

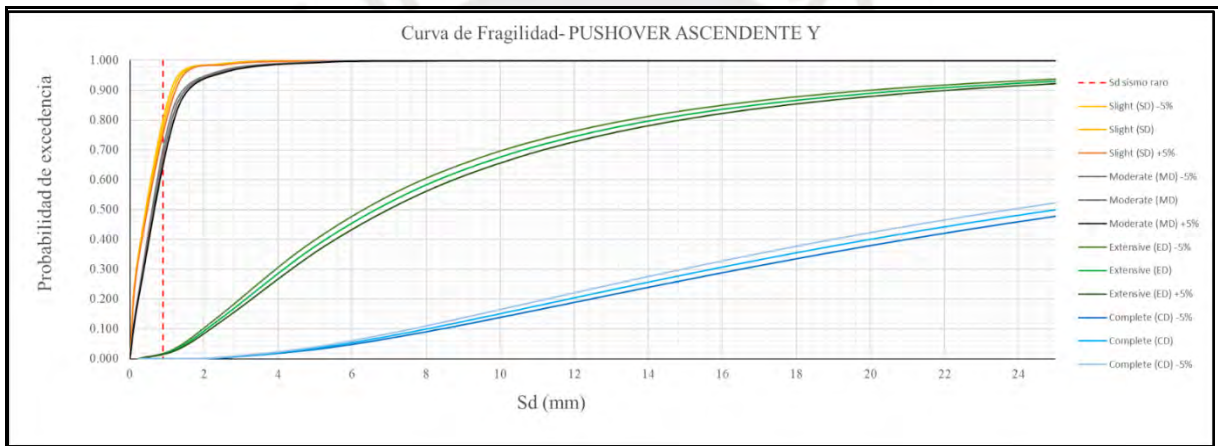


Figura 5.12. Desempeño de un sismo raro para la distribución de carga ascendente en dirección Y para la tipología de 5 ejes
Nota. Fuente propia.

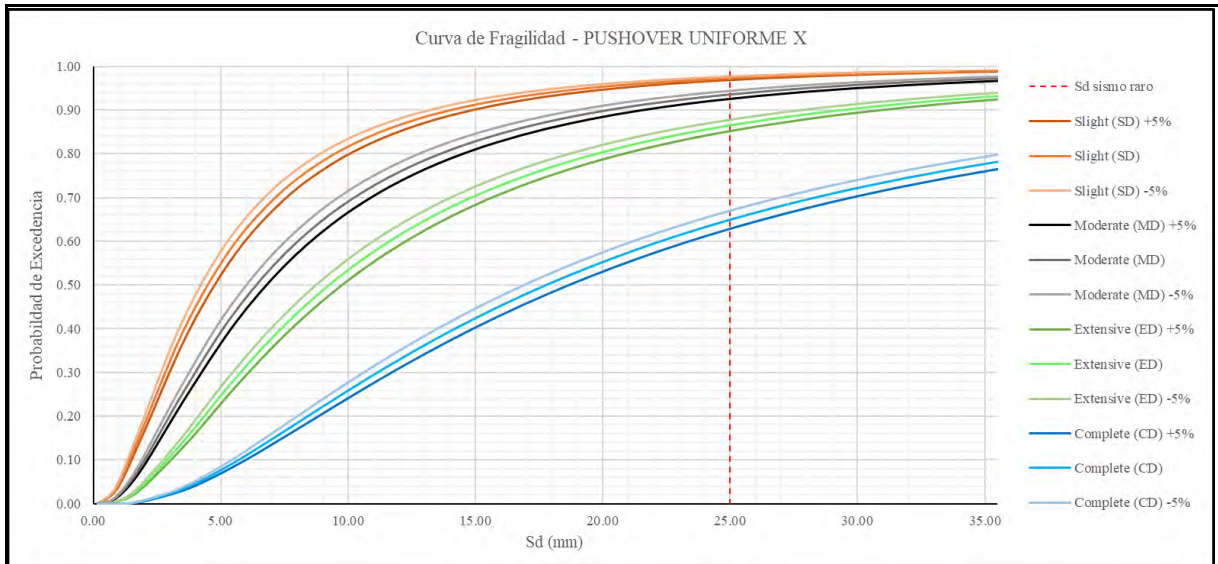


Figura 5.13. Desempeño de un sismo raro para la distribución de carga uniforme en dirección X para la tipología de 7 ejes
Nota. Fuente propia.

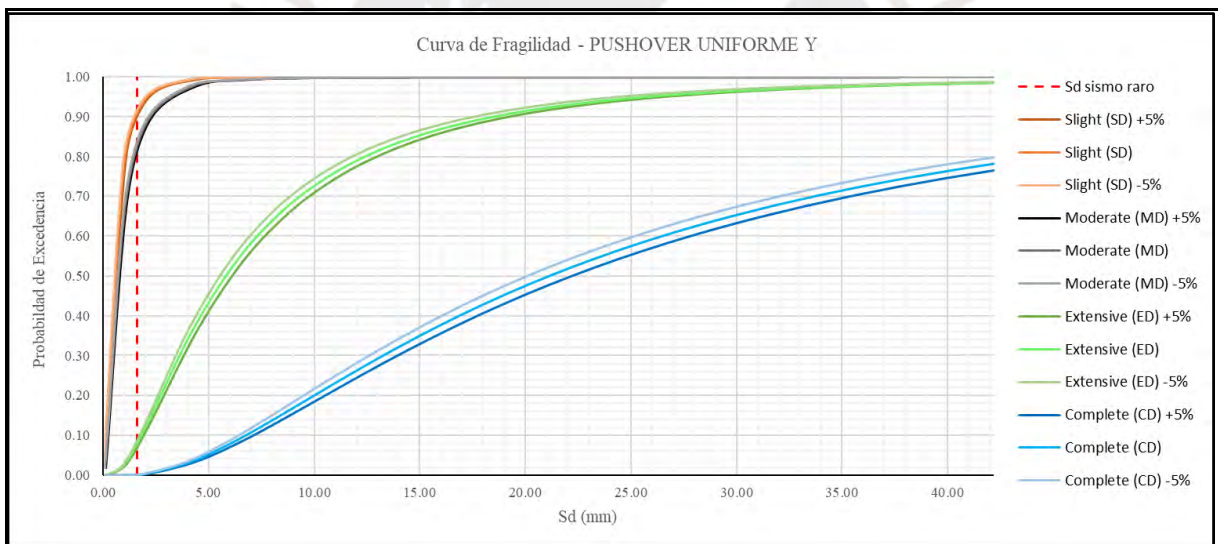


Figura 5.14. Desempeño de un sismo raro para la distribución de carga uniforme en dirección Y para la tipología de 7 ejes
Nota. Fuente propia.

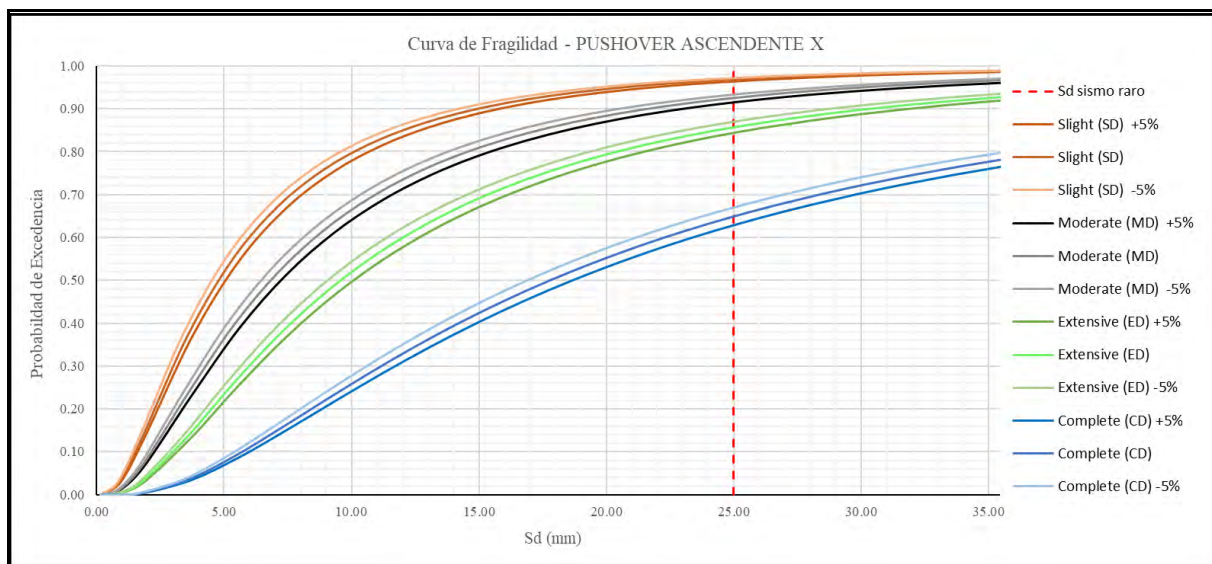


Figura 5.15. Desempeño de un sismo raro para la distribución de carga ascendente en dirección X para la tipología de 7 ejes
Nota. Fuente propia.

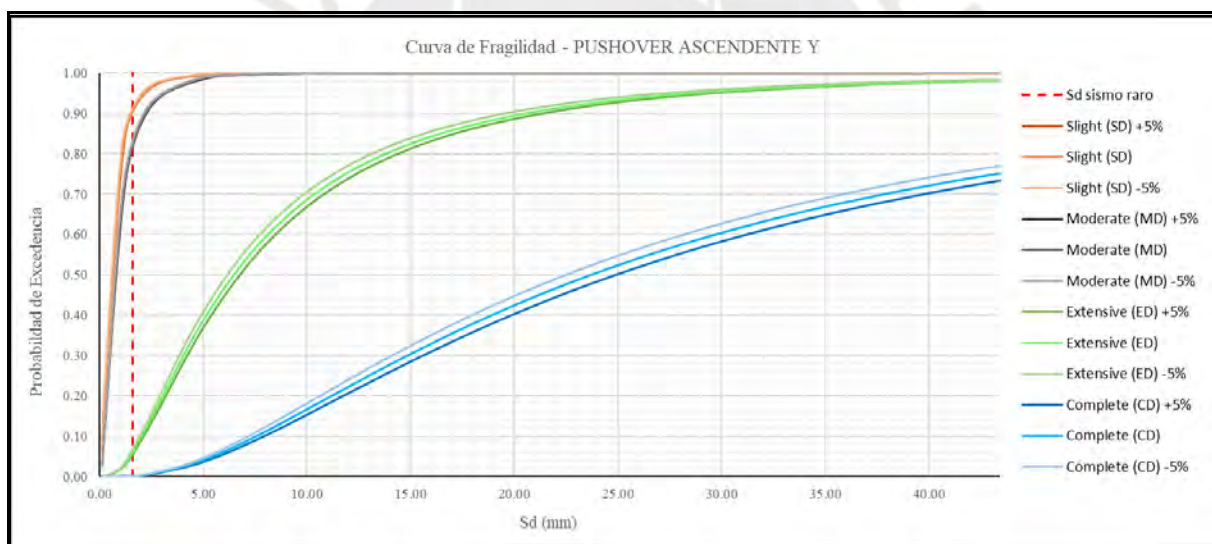


Figura 5.16. Desempeño de un sismo raro para la distribución de carga ascendente en dirección Y para la tipología de 7 ejes
Nota. Fuente propia.

Para la tipología de 5 ejes, se detallan las probabilidades de daño en las tablas en la tabla 5.3 y tabla 5.4. Se observa un 60.6%-67.8% de probabilidad de que ocurra un estado de daño completo para un sismo raro en dirección X; mientras que para la dirección Y se observa un 71.4%-77.1% de probabilidad de que ocurra un estado de estado de daño moderado.

Tabla 5.3.

Probabilidad de cada desempeño en base a las curvas de fragilidad para un sismo en dirección X de la tipología de 5 ejes.

| SISMO X | | | | | | |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-------|-------------------|-----------------|-------|
| Estados de daño | UNIFORME | | | ASCENDENTE | | |
| | +5% | <i>Promedio</i> | -5% | +5% | <i>Promedio</i> | -5% |
| <i>Sin Daño</i> | 2.4% | 2.1% | 1.8% | 3.5% | 3.1% | 2.7% |
| <i>Daño Leve (SD)</i> | 3.5% | 3.2% | 2.9% | 4.6% | 4.3% | 3.9% |
| <i>Daño Moderado (MD)</i> | 7.4% | 6.8% | 6.3% | 8.0% | 7.5% | 7.0% |
| <i>Daño Extensivo (ED)</i> | 23.1% | 22.2% | 21.2% | 23.3% | 22.5% | 21.6% |
| <i>Daño Completo (CD)</i> | 63.7% | 65.7% | 67.8% | 60.6% | 62.7% | 64.8% |

Nota. Fuente Propia.

Tabla 5.4.

Probabilidad de cada desempeño en base a las curvas de fragilidad para un sismo en dirección Y de la tipología de 5 ejes.

| SISMO Y | | | | | | |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-------|-------------------|-----------------|-------|
| Estados de daño | UNIFORME | | | ASCENDENTE | | |
| | +5% | <i>Promedio</i> | -5% | +5% | <i>Promedio</i> | -5% |
| <i>Sin Daño</i> | 10.4% | 9.5% | 8.5% | 15.7% | 14.4% | 13.2% |
| <i>Daño Leve (SD)</i> | 9.4% | 8.9% | 8.4% | 11.8% | 11.3% | 10.7% |
| <i>Daño Moderado (MD)</i> | 75.3% | 76.3% | 77.1% | 71.4% | 73.0% | 74.6% |
| <i>Daño Extensivo (ED)</i> | 4.7% | 5.3% | 5.9% | 1.1% | 1.3% | 1.5% |
| <i>Daño Completo (CD)</i> | 0.1% | 0.1% | 0.1% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |

Nota. Fuente Propia.

En cuanto a la tipología de 7 ejes, se detallan las probabilidades de daño en las tablas 5.5 y 5.6. Ante la llegada de un sismo raro existe una probabilidad de 62.5%-66.9% de que ocurra un estado de daño completo en dirección X; mientras que para la dirección Y se observa un 74.6%-76.9% de probabilidad de que ocurra un estado de estado de daño moderado.

Tabla 5.5.

Probabilidad de cada desempeño en base a las curvas de fragilidad para un sismo en dirección X de la tipología de 7 ejes.

| SISMO X | | | | | | |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-------|-------------------|-----------------|-------|
| Estados de daño | UNIFORME | | | ASCENDENTE | | |
| | +5% | <i>Promedio</i> | -5% | +5% | <i>Promedio</i> | -5% |
| <i>Sin Daño</i> | 3.0% | 2.5% | 2.2% | 3.9% | 3.3% | 2.7% |
| <i>Daño Leve (SD)</i> | 4.6% | 3.7% | 3.5% | 4.4% | 4.4% | 3.8% |
| <i>Daño Moderado (MD)</i> | 7.2% | 7.6% | 6.3% | 7.4% | 6.5% | 6.5% |
| <i>Daño Extensivo (ED)</i> | 22.4% | 21.4% | 21.2% | 21.8% | 21.3% | 20.1% |
| <i>Daño Completo (CD)</i> | 62.8% | 64.8% | 66.8% | 62.5% | 64.5% | 66.9% |

Nota. Fuente Propia.

Tabla 5.6.

Probabilidad de cada desempeño en base a las curvas de fragilidad para un sismo en dirección Y de la tipología de 7 ejes.

| SISMO Y | | | | | | |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-------|-------------------|-----------------|-------|
| Estados de daño | UNIFORME | | | ASCENDENTE | | |
| | +5% | <i>Promedio</i> | -5% | +5% | <i>Promedio</i> | -5% |
| <i>Sin Daño</i> | 11.0% | 10.0% | 8.6% | 9.3% | 9.1% | 8.0% |
| <i>Daño Leve (SD)</i> | 8.0% | 7.9% | 7.5% | 8.7% | 8.7% | 9.0% |
| <i>Daño Moderado (MD)</i> | 74.6% | 74.9% | 75.9% | 76.9% | 76.4% | 76.6% |
| <i>Daño Extensivo (ED)</i> | 6.4% | 7.2% | 8.0% | 5.1% | 5.8% | 6.4% |
| <i>Daño Completo (CD)</i> | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |

Nota. Fuente Propia.

Los resultados obtenidos indican que la hipótesis formulada se valida en la dirección Y, dado que se evidencia una mayor probabilidad de lograr un desempeño moderado. sin embargo, no se cumple en la dirección X debido a que hay mayor probabilidad de que ocurra un desempeño con daño completo. En consecuencia, las tipologías de 5 y 7 ejes no alcanzan el desempeño esperado para una edificación esencial ante la llegada de un sismo raro.

CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se evalúan los resultados del capítulo anterior frente a un modelo hipotético sin el problema de columna corta. Se comparan las curvas de capacidad y las curvas de fragilidad para todos los casos de análisis estático no lineal de ambas tipologías. Finalmente, se verifican los objetivos que se plantearon en el capítulo 1.

6.1. Evaluación de modelo sin columna corta

Se presenta el caso hipotético en el cual las tipologías comunes no presentan el problema de columna corta. Para el modelado se eliminan los tabiques en las fachadas delanteras y traseras y se reemplazan por cargas distribuidas que corresponden al peso de la tabiquería de espesor 13 cm. En las figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 y 6.6 se estudia la tipología de 5 ejes estructurales para los casos de cargas en dirección X.

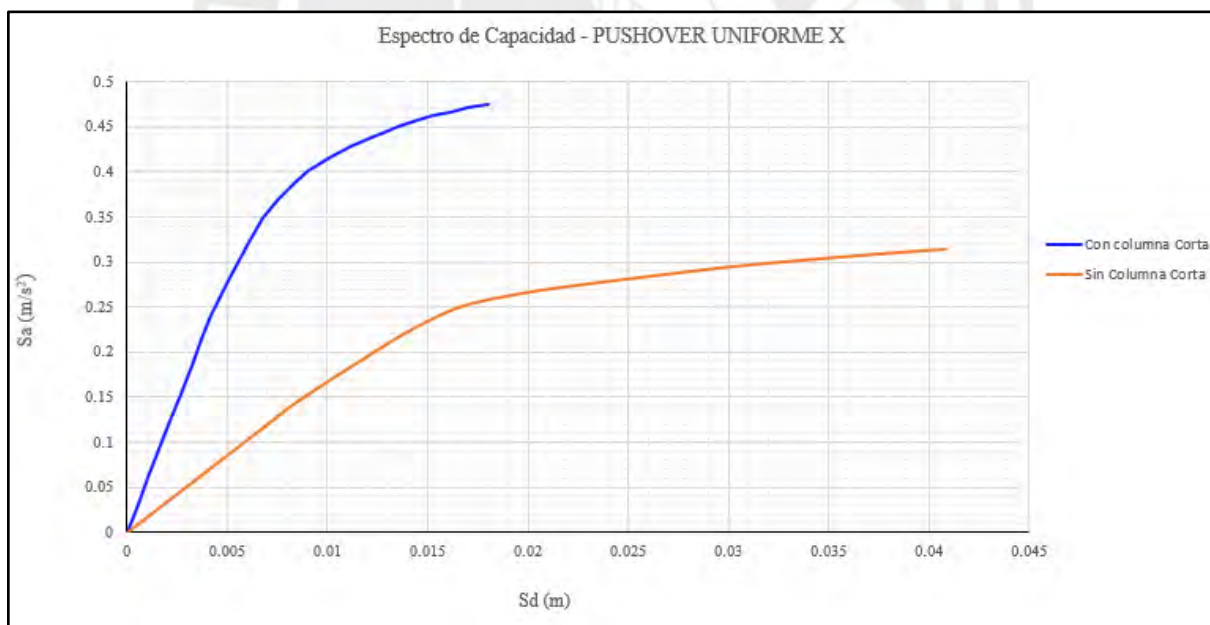


Figura 6.1. Comparación de curva de capacidad para la distribución de carga uniforme en dirección X para la tipología de 5 ejes.

Nota. Fuente propia.

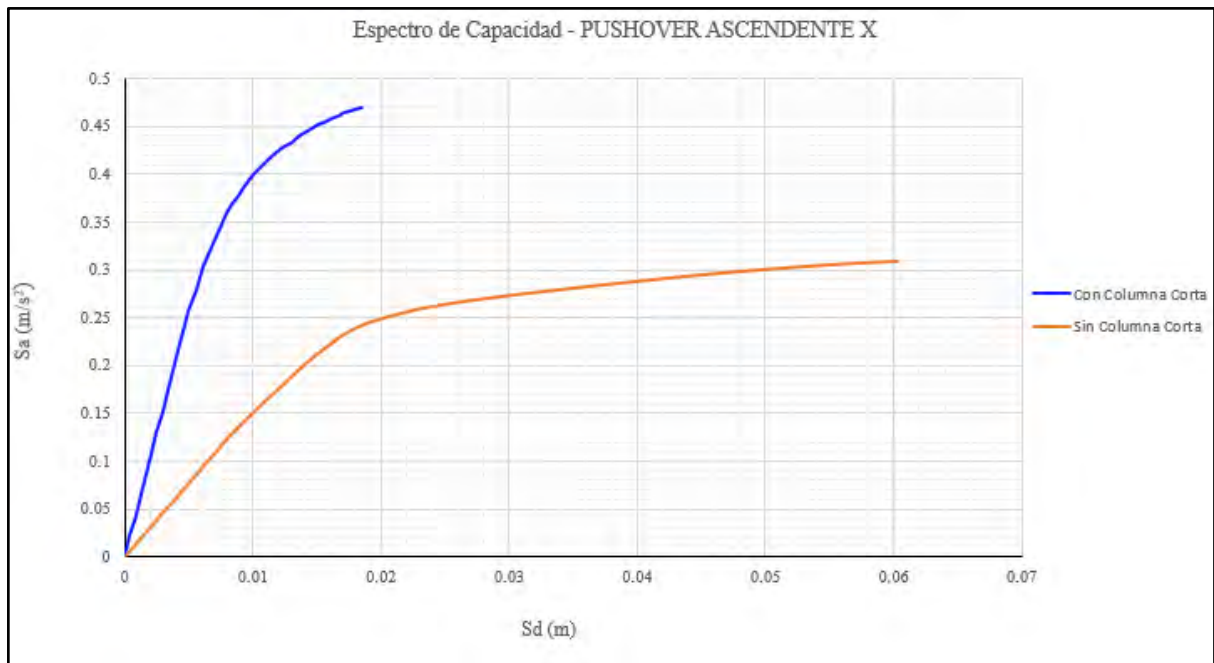


Figura 6.2. Comparación de curva de capacidad para la distribución de carga ascendente en dirección X de la tipología de 5 ejes
Nota. Fuente propia.

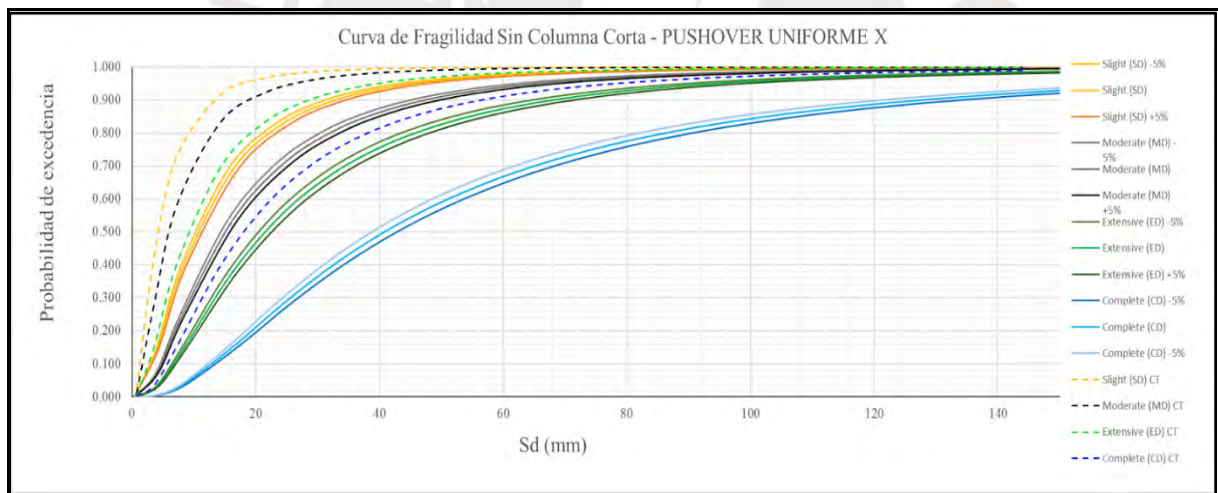


Figura 6.3. Comparación de curva de fragilidad para la distribución de carga uniforme en dirección X del modelo de 5 ejes con tabiques y sin columna corta.
Nota. Fuente propia.

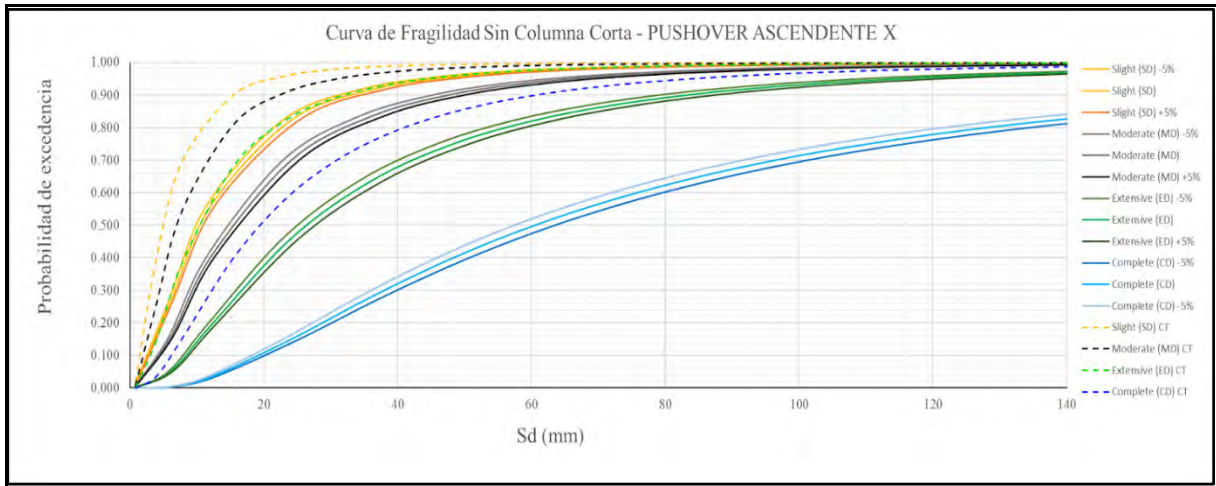


Figura 6.4. Comparación de curva de fragilidad para la distribución de carga ascendente en dirección X del modelo de 5 ejes con tabiques y sin columna corta.
Nota. Fuente propia.

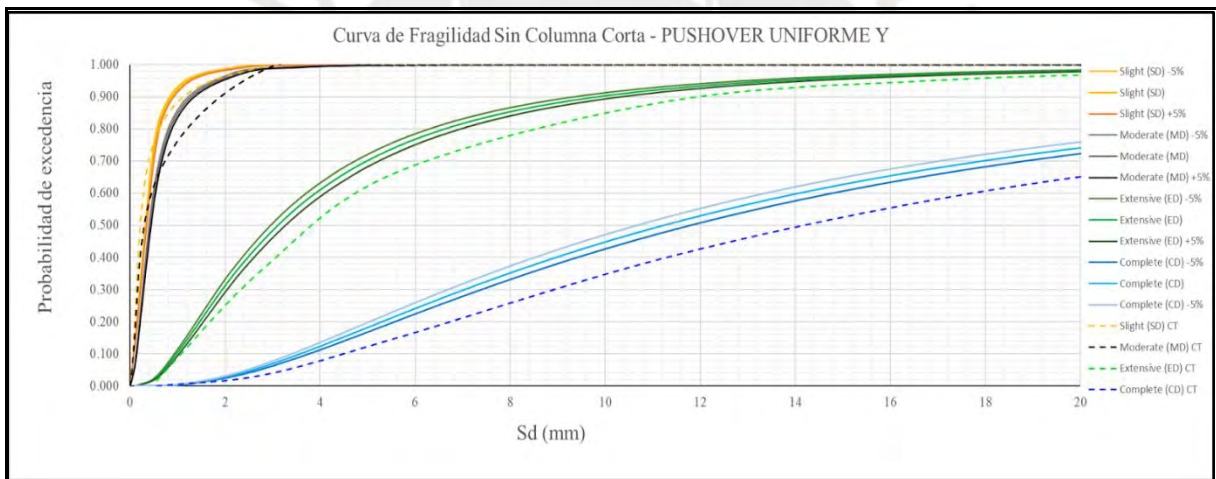


Figura 6.5. Comparación de curva de fragilidad para la distribución de carga uniforme en dirección Y del modelo de 5 ejes con tabiques y sin columna corta.
Nota: Fuente propia.

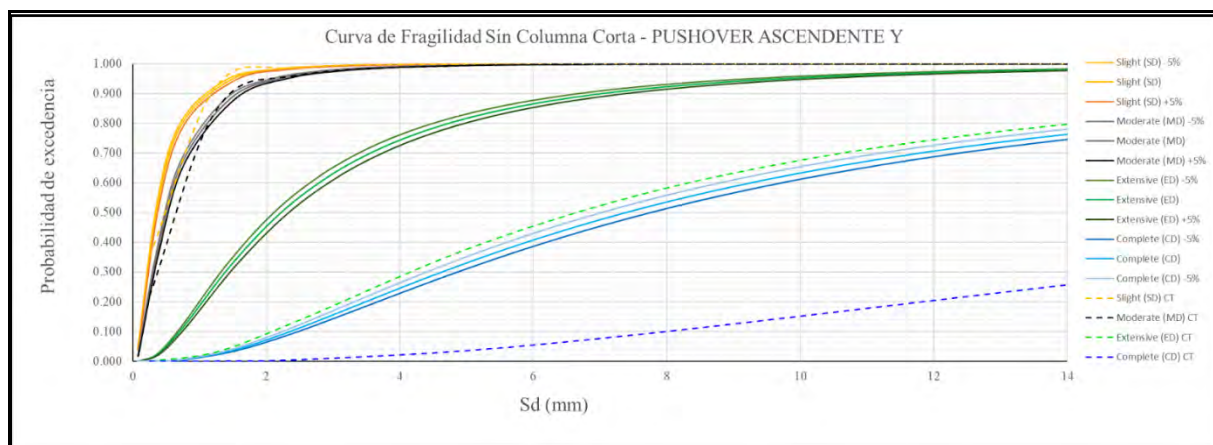


Figura 6.6. Comparación de curva de fragilidad para la distribución de carga ascendente en dirección Y del modelo de 5 ejes con tabiques y sin columna corta.
Nota: Fuente propia.

Se observa que el modelo sin problemas de columna corta presenta mayor ductilidad y menor cortante basal que el modelo original. En las tablas 6.1. y 6.2. se exhiben los resultados de las curvas de fragilidad, donde el modelo sin columna corta muestra la misma incidencia de comportamiento con daño completo; sin embargo, podemos resaltar que la probabilidad es mayor llegando hasta un 85% en la dirección X a comparación del modelo con columna corta. Por otro lado, en la dirección Y se aprecia una mayor probabilidad de un desempeño moderado llegando hasta un 74.5%.

Tabla 6.1.

Probabilidad de cada desempeño en base a las curvas de fragilidad para un sismo en dirección X de la tipología de 5 ejes sin tabiques.

| Estados de daño | SISMO X | | | | | |
|----------------------------|----------|----------|-------|------------|----------|-------|
| | UNIFORME | | | ASCENDENTE | | |
| | +5% | Promedio | -5% | +5% | Promedio | -5% |
| <i>Sin Daño</i> | 0.7% | 0.6% | 0.5% | 0.7% | 0.6% | 0.5% |
| <i>Daño Leve (SD)</i> | 1.4% | 1.3% | 1.1% | 1.4% | 1.3% | 1.1% |
| <i>Daño Moderado (MD)</i> | 3.0% | 2.7% | 2.5% | 5.9% | 5.4% | 4.9% |
| <i>Daño Extensivo (ED)</i> | 12.6% | 11.7% | 10.9% | 23.3% | 22.1% | 20.9% |
| <i>Daño Completo (CD)</i> | 82.3% | 83.7% | 85.1% | 68.7% | 70.6% | 72.6% |

Nota. Fuente Propia.

Tabla 6.2.

Probabilidad de cada desempeño en base a las curvas de fragilidad para un sismo en dirección Y de la tipología de 5 ejes sin tabiques.

| Estados de daño | SISMO Y | | | | | |
|----------------------------|----------|----------|-------|------------|----------|-------|
| | UNIFORME | | | ASCENDENTE | | |
| | +5% | Promedio | -5% | +5% | Promedio | -5% |
| <i>Sin Daño</i> | 6.6% | 5.9% | 5.3% | 10.4% | 9.5% | 8.5% |
| <i>Daño Leve (SD)</i> | 7.1% | 6.6% | 6.1% | 9.4% | 8.9% | 8.4% |
| <i>Daño Moderado (MD)</i> | 74.5% | 74.5% | 74.4% | 59.2% | 59.1% | 58.9% |
| <i>Daño Extensivo (ED)</i> | 11.4% | 12.5% | 13.6% | 19.4% | 20.8% | 22.2% |
| <i>Daño Completo (CD)</i> | 0.4% | 0.5% | 0.6% | 1.5% | 1.7% | 2.0% |

Nota. Fuente Propia.

Para la tipología de 7 ejes estructurales se observan en las figuras 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11 y 6.12 los resultados de la comparación con un modelo complementario sin problemas de columna corta.

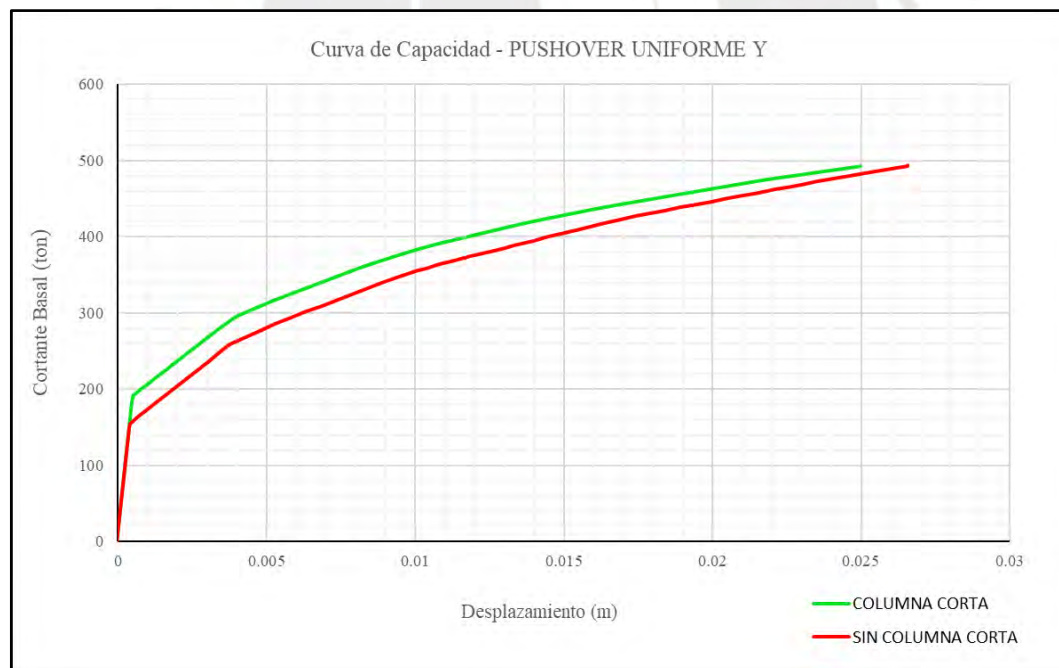


Figura 6.7. Comparación de curva de capacidad para la distribución de carga uniforme en dirección Y para la tipología de 7 ejes.

Nota. Fuente propia.

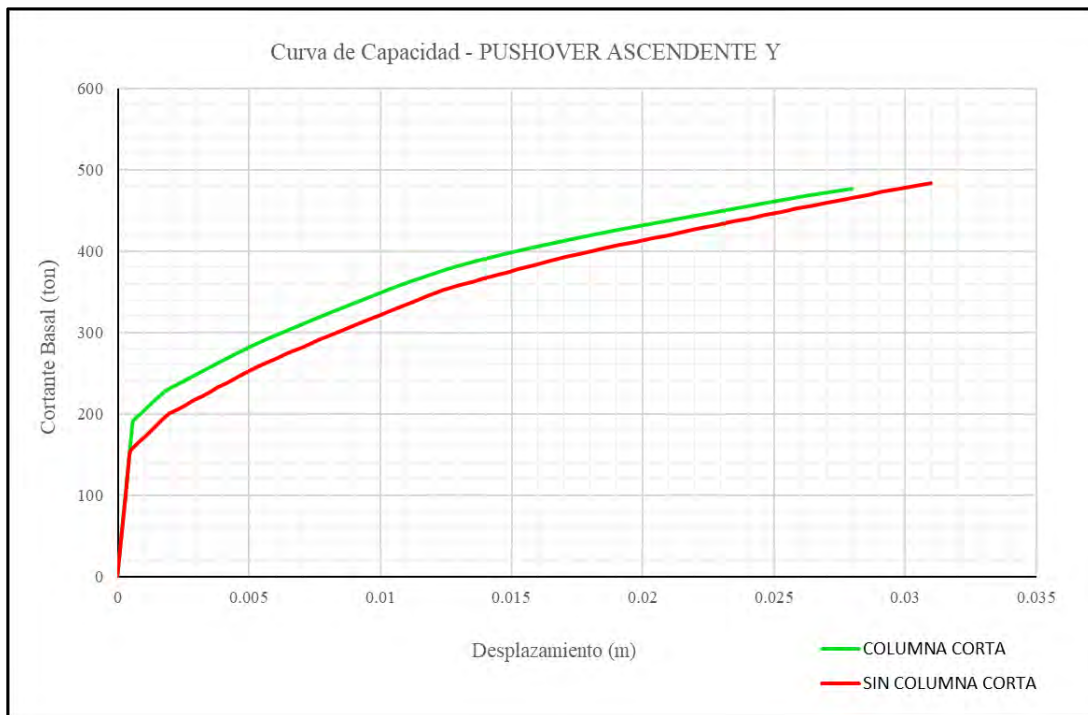


Figura 6.8. Comparación de curva de capacidad para la distribución de carga ascendente en dirección Y de la tipología de 7 ejes.

Nota. Fuente propia.

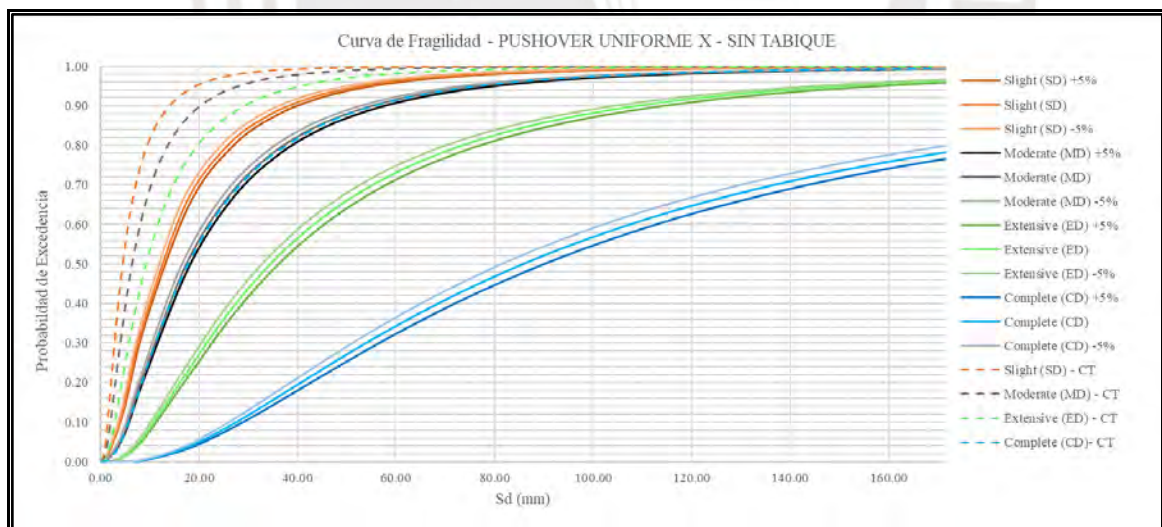


Figura 6.9. Comparación de curva de fragilidad para la distribución de carga uniforme en dirección Y del modelo de 7 ejes con tabiques y sin columna corta.

Nota. Fuente propia.

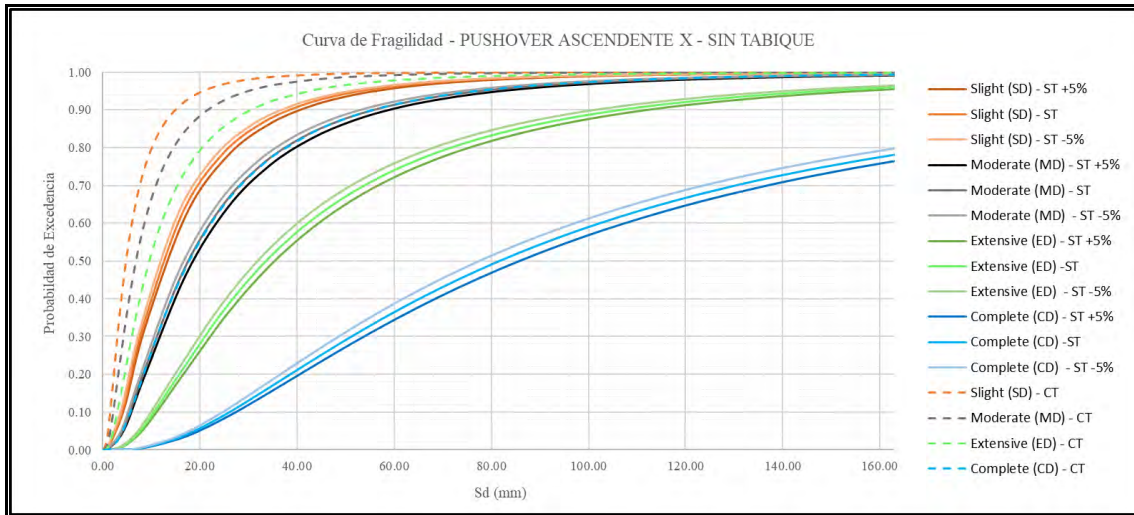


Figura 6.10. Comparación de curva de fragilidad para la distribución de carga ascendente en dirección Y del modelo de 7 ejes con tabiques y sin columna corta.
Nota. Fuente propia.

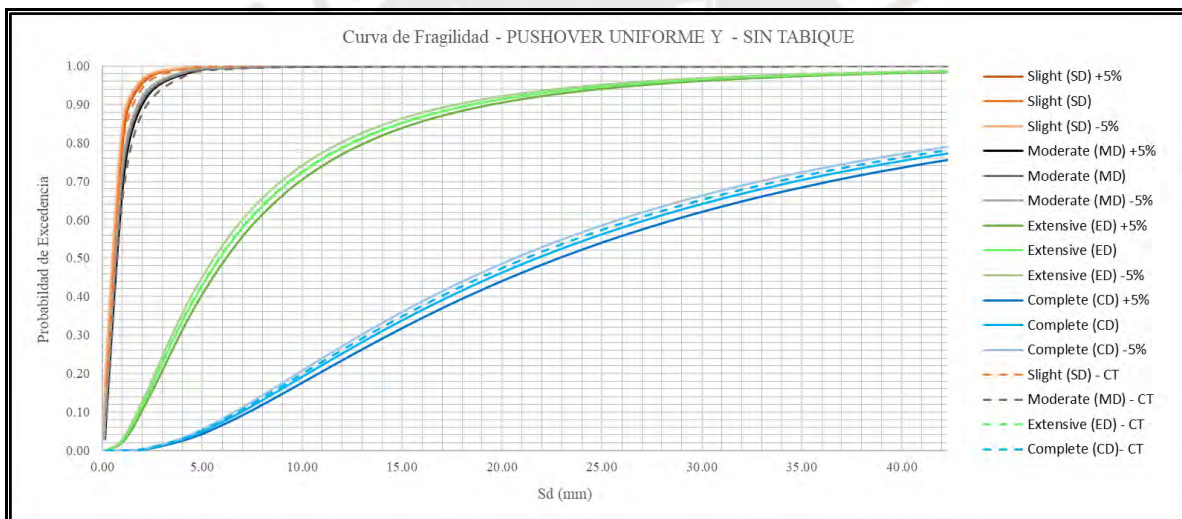


Figura 6.11. Comparación de curva de fragilidad para la distribución de carga uniforme en dirección Y del modelo de 7 ejes con tabiques y sin columna corta.
Nota. Fuente propia.

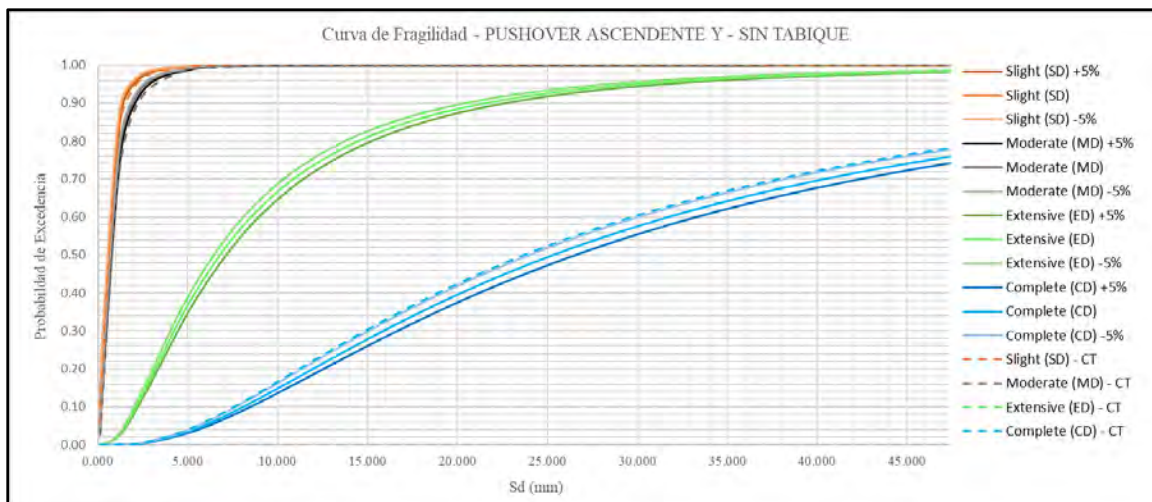


Figura 6.12. Comparación de curva de fragilidad para la distribución de carga ascendente en dirección Y del modelo de 7 ejes con tabiques y sin columna corta.
Nota. Fuente propia.

En las tablas 6.3. y 6.4. se exhiben los resultados de las curvas de fragilidad, donde se observa que el modelo sin problemas de columna corta también muestran la misma incidencia de comportamiento con daño completo; sin embargo podemos resaltar que la probabilidad es mayor llegando hasta un 68.9% en la dirección X a comparación del modelo con columna corta. Por otro lado, en la dirección Y se aprecia una mayor probabilidad de un desempeño moderado llegando hasta un 82.2%.

Tabla 6.3.

Probabilidad de cada desempeño en base a las curvas de fragilidad para un sismo en dirección X de la tipología de 7 ejes sin tabiques.

| SISMO X | | | | | | |
|----------------------------|----------|----------|-------|------------|----------|-------|
| Estados de daño | UNIFORME | | | ASCENDENTE | | |
| | +5% | Promedio | -5% | +5% | Promedio | -5% |
| <i>Sin Daño</i> | 0.2% | 0.2% | 0.2% | 0.1% | 0.1% | 0.1% |
| <i>Daño Leve (SD)</i> | 1.8% | 1.6% | 1.4% | 1.9% | 1.8% | 1.8% |
| <i>Daño Moderado (MD)</i> | 7.5% | 6.5% | 6.0% | 7.0% | 6.1% | 5.1% |
| <i>Daño Extensivo (ED)</i> | 27.2% | 27.3% | 25.6% | 26.6% | 25.2% | 24.1% |
| <i>Daño Completo (CD)</i> | 63.3% | 64.4% | 66.8% | 64.4% | 66.8% | 68.9% |

Nota. Fuente Propia.

Tabla 6.4.

Probabilidad de cada desempeño en base a las curvas de fragilidad para un sismo en dirección Y de la tipología de 7 ejes sin tabiques.

| Estados de daño | SISMO Y | | | | | |
|----------------------------|----------|----------|-------|------------|----------|-------|
| | UNIFORME | | | ASCENDENTE | | |
| | +5% | Promedio | -5% | +5% | Promedio | -5% |
| <i>Sin Daño</i> | 6.0% | 5.1% | 4.3% | 6.0% | 5.8% | 5.0% |
| <i>Daño Leve (SD)</i> | 6.2% | 6.0% | 5.7% | 6.3% | 5.9% | 5.4% |
| <i>Daño Moderado (MD)</i> | 79.7% | 79.8% | 79.6% | 81.7% | 81.4% | 82.2% |
| <i>Daño Extensivo (ED)</i> | 8.1% | 9.1% | 10.4% | 6.0% | 6.9% | 7.4% |
| <i>Daño Completo (CD)</i> | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |

Nota. Fuente Propia.

6.2. Evaluación de objetivos

Se identifica que el estado actual de la vulnerabilidad sísmica de las tipologías comunes de 5 y 7 ejes estructurales presentan una probabilidad entre 60.6%-67.8% de presentar un daño completo ante la llegada de un sismo raro en dirección X y una probabilidad entre 71.4%-77.1% de presentar un daño moderado en dirección Y. Cabe la posibilidad de que los niveles de vulnerabilidad hayan sido afectados por la antigüedad y las características de la tipología estructural.

Además, la hipótesis presentada en el capítulo 1 no se cumple, dado que los colegios de La Molina no logran mantener una alta probabilidad de experimentar daños moderados después de un sismo severo con un período de retorno de 475 años en ambas direcciones. Sin embargo, existen incertidumbres por la muestra pequeña de colegios estudiados por lo que no es un resultado definitivo que represente a todos los colegios de la Molina. Además, es muy probable que en la realidad los colegios tengan un mejor desempeño debido a las altas exigencias de los diseños para instituciones educativas.

También se debe mencionar que al dejar de presentarse el problema de columna corta en los modelos estructurales la estructura falla de forma dúctil en la dirección X por lo que mejora la tolerancia al desplazamiento modal espectral, por lo que sí es recomendable como proceso constructivo para mejorar la vulnerabilidad estructural

aislar los tabiques de los elementos estructurales. Sin embargo, no es suficiente con aislar los tabiques en la dirección X para que pueda desempeñarse adecuadamente ante sismos raros por la falta de rigidez del aporte de las columnas en aquella dirección. Por ello, para mejorar la vulnerabilidad se deben construir columnas en forma de T como lo plantea la tipología 780 post en la dirección longitudinal.



CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuros estudios. Estas reflexiones buscan sintetizar los hallazgos más importantes y orientar posibles líneas de investigación.

7.1. Conclusiones

Del estudio de campo se determina que existen dos tipologías comunes en los colegios del distrito de la Molina, una tipología con 5 ejes estructurales transversales y otra con 7 ejes estructurales transversales. Se evidencia la ausencia de juntas sísmicas en la mayoría de los colegios que separe los tabiques de las columnas en la fachada delantera y trasera por lo que se presentan problemas de columna corta. Además, no se identifican tipologías estructurales parecidas a la de colegios 780 post debido a que las columnas son rectangulares sin rigidez adicional en la dirección longitudinal. También, la tipología de 5 ejes presenta vigas que trabajan por sismo con ancho de 15 cm, lo cual no es aceptable según la norma E.030.

Las curvas de fragilidad obtenidas para las tipologías de 5 y 7 ejes muestran que existe una probabilidad de entre 60.6% y 67.8% de que en la dirección X la estructura tenga un estado de daño completo luego de experimentar un sismo raro. Por lo tanto, se contradice la hipótesis planteada de que estas tipologías tengan un estado de daño moderado en ambas direcciones frente la presencia de este sismo. Además, se ha observado que incluso al resolver el problema de las columnas cortas persiste una mayor probabilidad de que ocurra un estado de daño completo en la dirección X, sin cumplir con el desempeño moderado esperado.

Al comparar el desempeño de las tipologías en respuesta a sismos en las direcciones X y Y, se evidencia que la dirección Y presenta un rendimiento superior. Esto se debe a que cuenta con un sistema de muros que proporciona un mayor control sobre el desplazamiento y una mejor resistencia, en contraste con el sistema aporticado que predomina en la dirección X. Adicionalmente, se pudo observar un comportamiento más desfavorable en la dirección del sismo X debido a que los

pórticos no cuentan con la debida rigidez, además, tienen el problema de la columna corta que resta capacidad de desplazamiento.

Asimismo, la tipología con 7 ejes presenta un mejor desempeño ante un sismo en dirección X a comparación de la tipología de 5 ejes, por lo que a mayor cantidad de ejes de pórticos mejora el desempeño en esa dirección.

Cabe resaltar que los colegios pueden tener un mejor desempeño debido a las limitaciones de la presente investigación y a que los métodos de ingeniería presentan varias simplificaciones para asegurar un mejor comportamiento sismorresistente.

7.2. Recomendaciones

Para el proceso constructivo de nuevos colegios en el distrito de la Molina se recomienda añadir una junta mínima de 3 cm en los tabiques de las aulas en las fachadas delanteras y posteriores para evitar el efecto por columna corta y mejorar el comportamiento ante sismos de la tipología estructural. Además, las secciones de las vigas sísmicas deben tener como mínimo de ancho 25 cm para asegurar un adecuado comportamiento y las columnas en dirección longitudinal deben tener la forma T según la tipología 780 post.

La metodología para implementar las curvas de fragilidad deterministas presenta simplificaciones que pueden ser mejoradas en un futuro para obtener curvas más precisas. Para ello, se recomienda obtener las curvas de fragilidad considerando un enfoque probabilístico y tomando en consideración los parámetros aleatorios que influyen en los resultados sísmicos, debido a que se evidenció en la investigación una variación en los resultados de las curvas.

Además, se recomienda utilizar una muestra más amplia de colegios y tener un modelo estructural en SAP2000 insertando la mayor cantidad de información que se le puede brindar al programa. Adicionalmente, también se pueden crear curvas de fragilidad utilizando como parámetro la pseudo aceleración espectral en vez del pseudo desplazamiento espectral.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society of Civil Engineers. (2017). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. Structural Engineering Institute
- Applied Technology Council. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC-40)*. California Seismic Safety Commission
- Asmat, C. (2016). *Disposiciones sísmicas de diseño y análisis en base a desempeño aplicables a edificaciones de concreto armado* [Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú].
- Barbart, A; Pujades, L; Nieves, L. (2011). Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: Application to Barcelona. https://www.researchgate.net/publication/223307803_Seismic_damage_evaluation_in_urban_areas_using_the_capacity_spectrum_method_Application_to_Barcelona
- Blanco, J. (2005). *Las Estructuras de los Centros Educativos (Colegios) en el Siglo XX en el Perú Diversos Proyectos de Reforzamiento y Ejemplos de Estructuración de Edificaciones de la Universidad Católica del Perú* [Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/7628>
- Bonett, R. (2003). *Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*. [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona].
- Caicedo, C; Barbat, A; Canas, J y Aguiar, R. (1994). *Vulnerabilidad Sísmica de Edificios*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/27020>
- Carcelén, C; Morán, D; & Amador, L. (2020). *El terremoto de 1746 y su impacto en la salud en la ciudad de Lima*. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica, 37(1), 164-168. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-46342020000100164&script=sci_arttext

Centro de Estudios y Prevención de Desastres. PREDES (2010). *Terremotos en Lima*.
Perú

Chacón, R y Paz, I. (2016). *Análisis de desempeño sísmico de los edificios escolares típicos 780 post 97 de la costa peruana* [Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/6891>

Federal Emergency Management Agency [FEMA] (2015). *Rapid Visual Screening of Building for Potential Seismic Hazards: A Handbook*. 3era ed. Redwood City: FEMA

Federal Emergency Management Agency [FEMA] 366 (2000). *HAZUS 99 Estimated Annualized Earthquake Losses for the United States*. Washington DC, USA.

Federal Emergency Management Agency [FEMA] (2003). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model HAZUS®MH MR4 Technical Manual*. Washington DC, USA.

Fondo de las Naciones Unidas para los Niños . (2013). *Protocolos Escolares de Emergencia La comunidad escolar en movimiento: Preparación y respuesta educativa*.

<https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Protocolos%20escolares%20de%20emergencia.pdf>

Gonzales, G., Aguilar, A., Huaco, G. (2020). Análisis Dinámico Incremental de un Hospital de 60 Años de Antigüedad con Muros de Albañilería Artesanal. LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology, 1-6. <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.375>

González, M y Mases, M. (2003). Riesgo Sísmico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 11 (1), 44-53.

Huerta, Y y Uribe, C. (2006). *Desempeño Sísmico de un Tipo de Edificio Educativo Peruano Diseñado Antes de 1997* [Tesis de titulación, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/1067>

Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI]. (2015). *Municipalidad de la Molina presenta Plano de Riesgo de La Molina*. Municipalidad de La Molina. Lima

Perú <https://www.yumpu.com/es/document/read/27932992/municipalidad-de-la-molina-presenta-plano-de-riesgo-de-la-molina->

Instituto Nacional de Defensa Civil - DIPRE. (2017). *Escenario sísmico para Lima Metropolitana y Callao: Sismo 8.8Mw*. [Archivo PDF].

<https://www.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/01/201711231521471-1.pdf>

Lovon, H. M.; Tarque, S. N.; Silva, V.(2016). Development of fragility curves for confined masonry buildings of Lima, calibrated with cyclic test

Maldonado, O. (2019). Estimación de funciones de vulnerabilidad sísmica en edificaciones con base en procedimientos probabilísticos [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú].

<http://hdl.handle.net/20.500.12404/15731>

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y Universidad Nacional de Ingeniería. (2010). Informe Microzonificación Sísmica en el Distrito de La Molina.

https://www.munimolina.gob.pe/descargas/pdf/informe_microzonificacion_sismica_MDLM/informe_01_LaMolina_MVC_BID_VF.pdf

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2011). *ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y VULNERABILIDAD EN EL DISTRITO DE LA MOLINA*. [Archivo PDF].

http://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA%20PUBLICAR/CISMID/ZonSism_PautasTecnicas_LAMOLINA.pdf

Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2016). Manual para la Reducción del Riesgo Sísmico de Viviendas en el Perú.

<http://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA%20PUBLICAR/MINISTERIOS/Manual%20para%20la%20Reduccion%20del%20Riesgo%20Sismico%20de%20Viviendas%20en%20el%20Peru.pdf>

Municipalidad de Lima (2021). *Plan de Contingencia ante Sismo de gran magnitud seguido de tsunami de la Provincia de Lima 2021-2023*. [Archivo PDF].

https://www.munlima.gob.pe/images/PC_Ante_Sismo_y_Tsunami_MML-V_11-5-2021_-Vfinal_VB-SDC.pdf

Muñoz, A. (2020). *Ingeniería Sismoresistente*. Pontificia Universidad Católica del Perú

Negulescu, C y Gehl, P. (2013). Mechanical Methods: Fragility Curves and Pushover Analysis. *Seismic Vulnerability of Structures* (pp. 63 - 110). CPI Group (UK) Ltd. [Mechanical Methods - Seismic Vulnerability of Structures - Wiley Online Library](#)

Ottazi, G. (2016). *Apuntes del Curso Concreto Armado 1*. Pontificia Universidad Católica del Perú

Paredes, M. (2016). *Evaluación del desempeño sismorresistente de un edificio destinado a vivienda en la ciudad de Lima aplicando el análisis estático no lineal pushover* [Tesis de Bachiller, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].

Quiroz, E. (2017). *Vulnerabilidad sísmica de una edificación escolar típica módulo 780 Pre NDSR-1997 mediante modelos no lineales* [Tesis de Maestría]. Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/8610>

Rangwani, K. & Brzev, S. (2016). Seismic Analysis of Confined Masonry Shear Walls Using the Wide Column Model. *Applied Mechanics and Materials, Vol 857*, 212-218. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.857.212>

Ramirez, P. (2017). *Evaluación experimental de una propuesta de reforzamiento estructural para las edificaciones escolares construidas antes de 1997, Perú* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/9751>

Resolución Ministerial N.º 355-2018-VIVIENDA. Reglamento Nacional de Edificaciones (22 octubre de 2018). E.030 Diseño sismorresistente.

Riahi, Z.; Elwood K; Alcocer, S. (2009). Backbone Model for Confined Masonry Walls for Performance-Based Seismic Design. *Journal of Structural Engineering-asce - J STRUCT ENG-ASCE*. 135. 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000012.

- Scaletti, H. (29 de agosto de 2014). *Consideraciones sobre el Análisis Sísmico de Estructuras de Concreto Armado*. Seminario de Promoción de la Normatividad para el Diseño y Construcción de Edificaciones Seguras, American Concrete Institute de Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Silva, W. (Marzo de 2012). Criterios Técnicos para la Construcción de Edificaciones Sismoresistentes. En *Seminario de Promoción de la Normativa para el Diseño y Construcción de Edificaciones Seguras*. Seminario llevado a cabo en el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Perú.
<https://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/difusion/eventos/2012/TOTAL/10.%20Criterios%20T%C3%A9cnicos%20para%20la%20construcci%C3%B3n%20de%20Edificaciones%20Sismorresistentes.pdf>
- Soto, E. (2018). *Comparación de los Métodos: FEMA 154, Hirosawa y Demanda-Resistencia para evaluar vulnerabilidad sísmica en infraestructura Educativa-Baños del Inca* [Tesis de titulación, Universidad Privada del Norte]
<https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/13477>
- Structural Engineers Association of California. SEAOC (1999). *Recommended Lateral Forces Requirements and Commentary (the Blue Book)*. California.
- Tavera, T. (2014). *Evaluación del peligro Asociado a los Sismos y Efectos Secundarios en Perú*. Instituto Geofísico del Perú.
<https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12816/777/peligrosismos-Per%c3%ba.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tavera, H; Bernal, I; Condori, Cristóbal; Ordaz, M; Zevallos, A; Ishizawa; Oscar .(2014). *Evaluación del Peligro Sísmico en Perú*
http://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA%20PUBLICAR/IGP/Mapa_Peligro_Sismico_Peru_2015_Version_Preliminar.pdf
- Taveras, M. (2008). *Revisión de las recomendaciones para modelar y analizar estructuras de mampostería confinada ante carga lateral* [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.
<https://es.slideshare.net/slideshow/taverasmontero/66290941#2>

Velásquez, J. (2006). Estimación de pérdidas por sismo en edificios peruanos mediante curvas de fragilidad analíticas [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/135>

Xiaohui, Y; Dagang, L; & Bing, L. (2016). Estimating uncertainty in limit state capacities for reinforced concrete frame structures through pushover analysis. *Revista Earthquakes and Structures*, 10(1), 141-161. <https://dr.ntu.edu.sg/handle/10356/84541?mode=simple>



ANEXOS

Anexo 1. Planos de las tipologías obtenidas

1. Tipología de 5 ejes

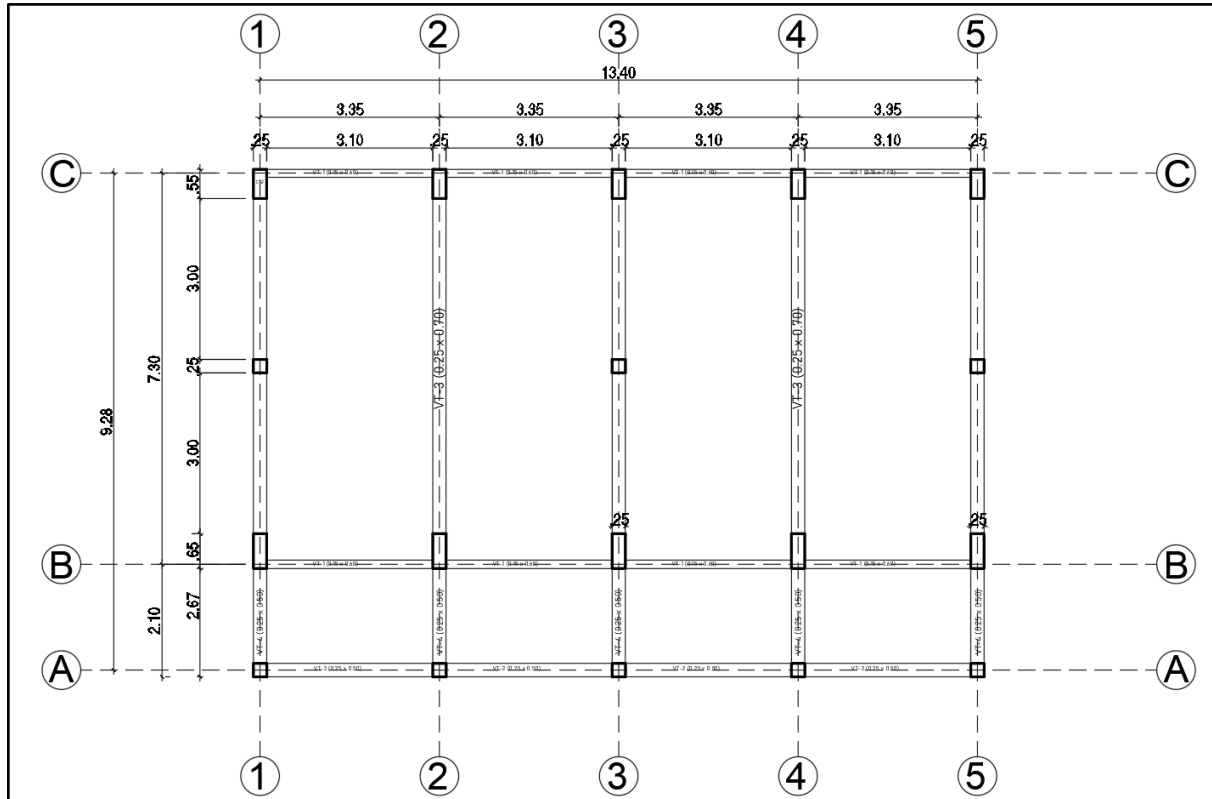


Figura A1. Vista en planta de la tipología de 5 ejes.

Nota: Fuente propia.

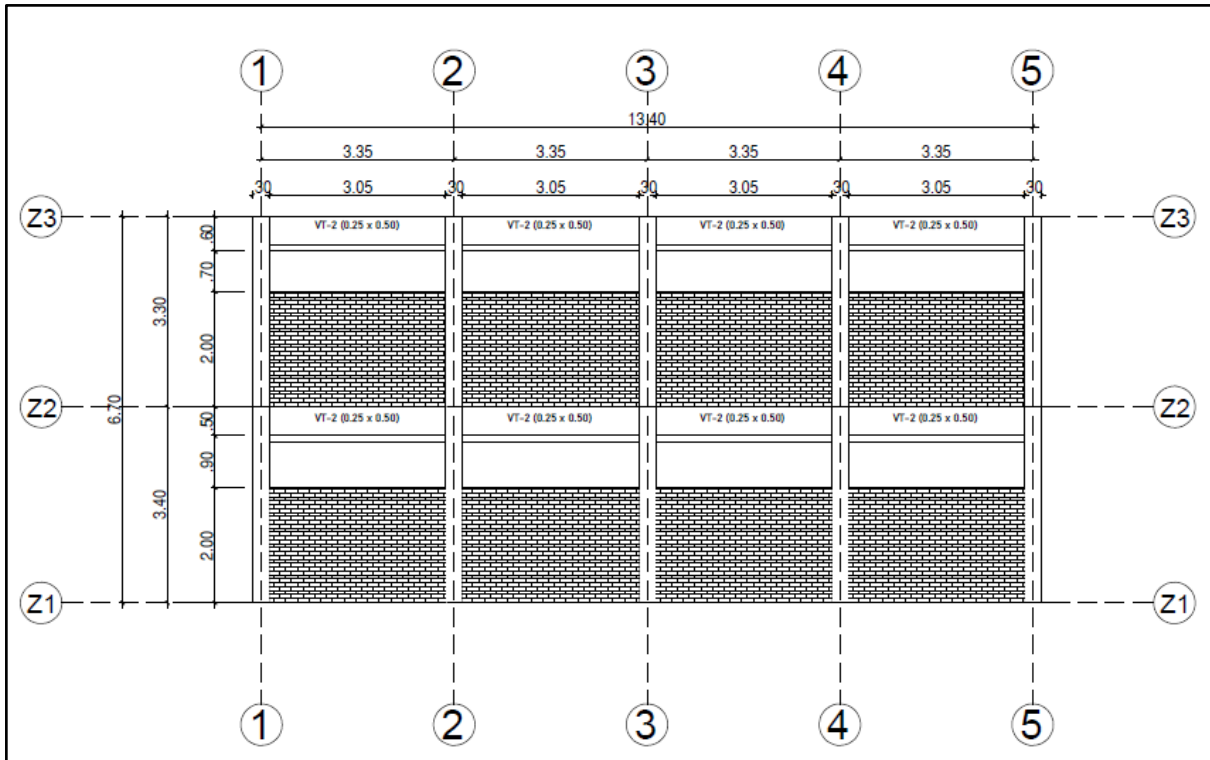


Figura A2. Elevación de la tipología de 5 ejes.

Nota: Fuente propia.

2. Tipología de 7 ejes

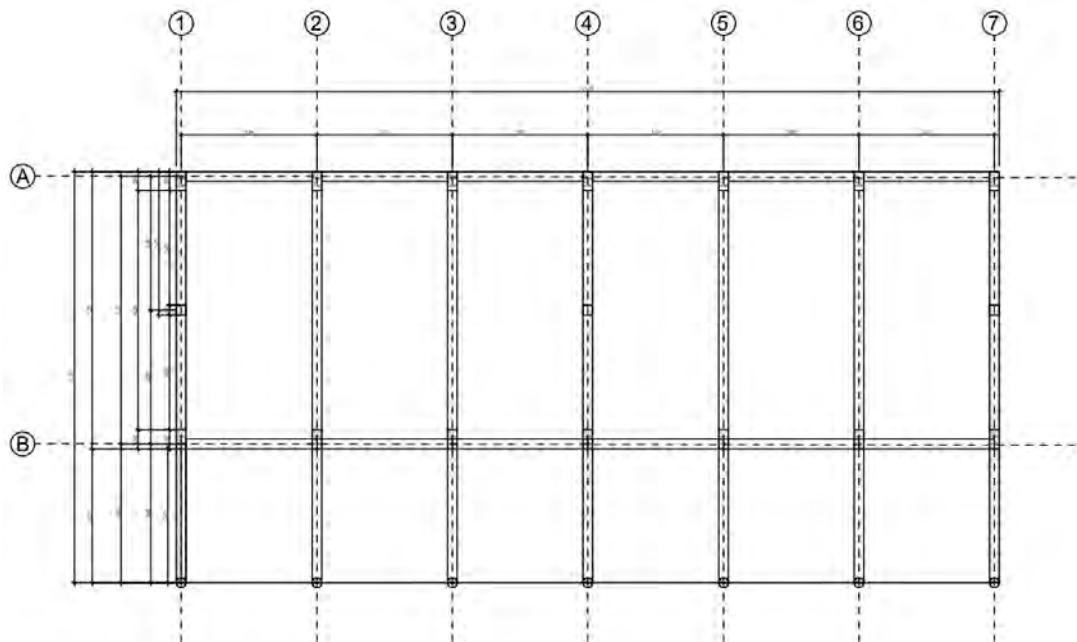


Figura A3. Vista en planta de la tipología de 7 ejes.

Nota: Fuente propia

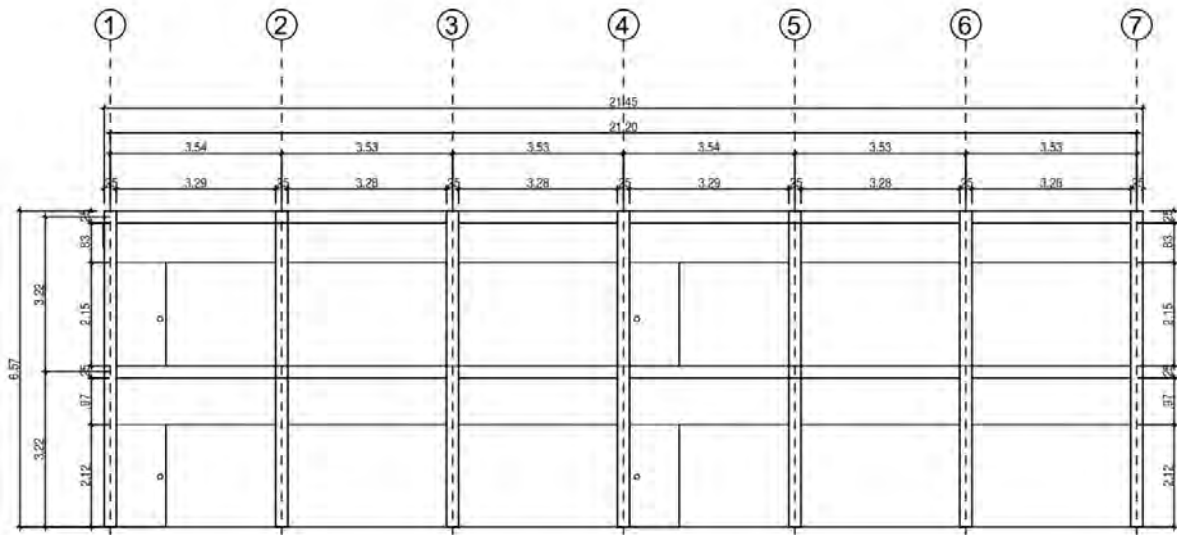
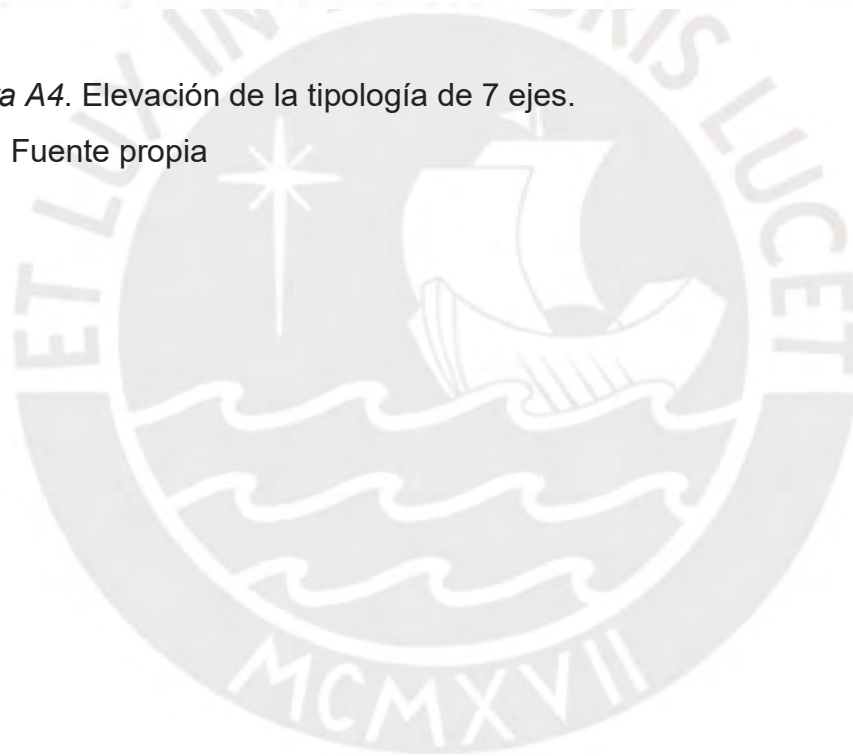


Figura A4. Elevación de la tipología de 7 ejes.

Nota: Fuente propia



Anexo 2: Formato de Entrevista



Entrevista: Entrevistado: _____

Cargo: _____ Fecha: ____ / ____ / ____

| | | |
|------------------------|--|------------|
| Espesor Aligerado | | 17 - 20 cm |
| Espesor de Albañilería | | 25 cm |
| Altura de Edificio | | - |
| Tipo de Concreto | | 210 |
| Tipo de Acero | | 4200 |
| Ladrillos Albañilería | | - |

¿Han visto daños estructurales?:

¿Ocurrieron fallas en el sismo del 2007?:

¿Debido al sismo del 2007, se tuvieron que realizar reparaciones?:

¿Se realizaron modificaciones en el edificio? ¿ Cuales y cual fue su año de construcción?:

Nota: Fuente Propia

Anexo 3: Formato de recolección de dimensiones



LISTADO DE INFORMACIÓN DE INSTITUCIONES EDUCATIVAS

Institución Educativa: _____

Dirección: _____

Fecha de Revisión: ____/____/____

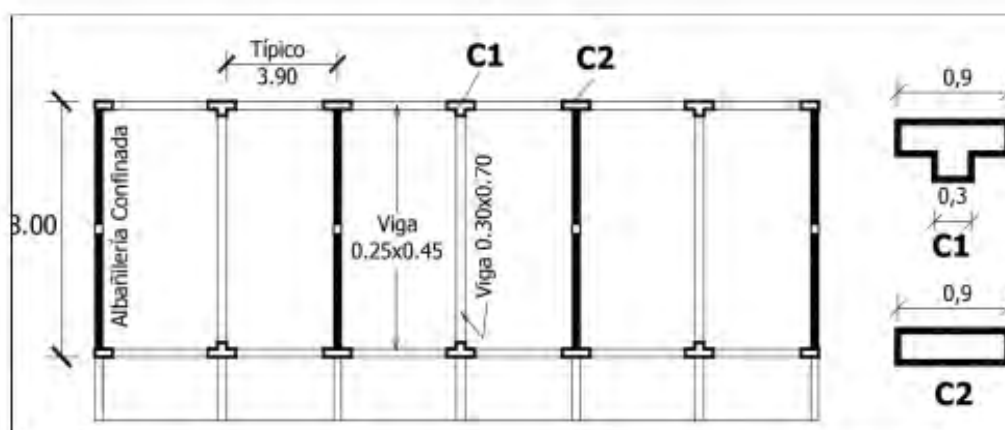


Figura de Pabellón 780 post

Pabellón elegido: _____

| LEVANTAMIENTO DE CAMPO | | Área de Pabellón: _____ |
|----------------------------------|---------|-------------------------|
| Dimensión | Medidas | Típico |
| Largo entre Vigas (X-X) | | |
| Ancho de Pabellón | | 7.8 - 8m |
| Columna 1 | | |
| Columna 2 | | |
| Sección Viga Transversal 1 (Y-Y) | | 30 x 70 (cm) |

| | | |
|-----------------------------------|--|----------------|
| Sección Viga Transversal 2 (Y-Y) | | 30 x 70 (cm) |
| Sección Viga Longitudinal 1 (X-X) | | 25 x 45 (cm) |
| Sección Viga Longitudinal 2 (X-X) | | 25 x 45 (cm) |
| Ancho de Alfeizar Corredor | | 15 (cm) |
| Alfeizar Corredor | | 1.3 (m) |
| Alfeizar Posterior | | 2 (m) |
| Vano de Ventana Corredor | | |
| Vano de Ventana Posterior | | |
| Vano de Puerta | | |
| Juntas | | 1" = 2.54 (cm) |
| Ancho de Corredor | | 2 - 2.1 m |
| Altura de Entrepisos | | 3 m |
| Número de Pisos | | 1 - 3 |
| Número de Aulas por Pisos | | 2 - 3 |

Observaciones:



Nota: Fuente Propia

Anexo 4: Recopilación de Información y Promedios por tipología

1. Tipología de 5 ejes

Tabla A1

Dimensiones de los colegios utilizados para la tipología de 5 ejes

| | | COLEGIO A | COLEGIO C | COLEGIO D | COLEGIO E | PROM |
|--------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|
| COLUMNA 1 | DIMX (cm) | 30 | 29.3 | 30 | - | 29.8 |
| | DIMY (cm) | 57 | 54 | 84 | - | 65.0 |
| COLUMNA TRACERA | DIMX (cm) | 30 | 30 | 30 | - | 29.8 |
| | DIMY (cm) | 30 | 54 | 84 | - | 56.0 |
| VIGA CENTRAL YY | ancho (cm) | 30 | 29.3 | 30 | - | 29.8 |
| | peralte (cm) | 70 | 70.1 | 60 | - | 66.7 |
| VIGA PASADIZO XX | ancho (cm) | 20 | 29 | 17 | 17 | 20.8 |
| | peralte (cm) | - | 68 | 65 | 50 | 61.0 |
| AULA | L (m) | 8.01 | 7.2 | 5.4 | 6.17 | 6.70 |
| | L1 (m) | 4.02 | 3.6 | - | - | 3.35 |
| | L2 (m) | 3.99 | 3.6 | - | - | 3.35 |
| | A (m) | 8.23 | 7.68 | 7.09 | 6.18 | 7.30 |
| LOSA | (cm) | 30 | 30 | 60 | 30 | 37.5 |
| ANCHO CORREDOR | (m) | 2.92 | 2.03 | 1.57 | 1.85 | 2.1 |
| VIGA CORREDOR XX | ancho (cm) | 30 | 29 | 30 | 28 | 29.8 |
| | peralte (cm) | 40 | 68 | 60 | 30 | 49.5 |
| VIGA CORREDOR YY | ancho (cm) | 29 | 30 | 20 | 30 | 27.3 |
| | peralte (cm) | 40 | 68 | 65 | 30 | 50.8 |
| ENTREPISO 1 | (m) | 3.56 | 3.38 | 3.57 | 3.16 | 3.4 |
| ENTREPISO 2 | (m) | 3.25 | 3.38 | 3.57 | 3.15 | 3.3 |
| ALFEIZAR CORREDOR | (m) | 2.27 | 2.25 | 1.90 | 1.7 | 2.0 |
| ALFEIZAR POSTERIOR | (m) | 1.53 | 1.04 | 1.06 | 1.7 | 1.3 |
| JUNTA | | SI | NO | NO | NO | |

Nota: Fuente propia

2. Tipología de 7 ejes

Tabla A2

Dimensiones de los colegios utilizados para la tipología de 7 ejes

| | | Colegio B | | Colegio C | PROMEDIO | SIN |
|-------------------------------|-----------------|-----------|----------|-----------|----------|----------|
| | | 1er piso | 2do piso | 1 er piso | APROX | TERRAJEO |
| Columnas Rectangulares | Dim X-X (cm) | 29.7 | 29.3 | 29.3 | 30 | 25 |
| | Dim Y-Y (cm) | 57 | 55.9 | 55 | 55 | 50 |
| Columnas Externas | Perimetro (cm) | 92.5 | 92.8 | - | 90 | - |
| | Diametro (cm) | 29.4 | 29.5 | - | 30 | 25 |
| Vigas Centrales Y-Y | Ancho (xx) (cm) | 29.7 | 29.3 | 29.3 | 30 | 25 |
| | Peralte (cm) | 69.6 | 71.1 | 69.7 | 70 | 65 |
| Vigas Pasadizo X-X | Ancho (yy) (cm) | - | - | 29 | 30 | 25 |
| | Peralte (cm) | - | - | 68.7 | 70 | 65 |
| Aulas | L (m) | 10.518 | 10.467 | 10.8 | 10.60 | 10.6 |
| | A (m) | 6.881 | 6.963 | 7.22 | 7.02 | 7.00 |
| | L1 (m) | 3.211 | 3.197 | 3.6 | 3.54 | 3.54 |
| | L2 (m) | 3.196 | 3.197 | 3.6 | 3.53 | 3.53 |
| | L3 (m) | 3.196 | 3.19 | 3.6 | 3.53 | 3.53 |
| Losa | cm | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Alfeizar Corredor | Altura (m) | 2.05 | 2.064 | 2.25 | 2.12 | 2.15 |
| | Ancho yy (cm) | 20.5 | 19.7 | 17 | 20 | 20 |
| Alfeizar Posterior | Altura (m) | 1.27 | 1.285 | 1.04 | 1.20 | 1.20 |
| Corredor | Ancho (m) | - | 3.437 | - | 3.50 | 3.50 |
| Entrepiso | m | 3.255 | 3.015 | 3.384 | 3.22 | 3.20 |

Nota: Fuente propia



Anexo 5 - Curvas de Capacidad de las tipologías estudiadas

1. Tipología de 5 ejes.

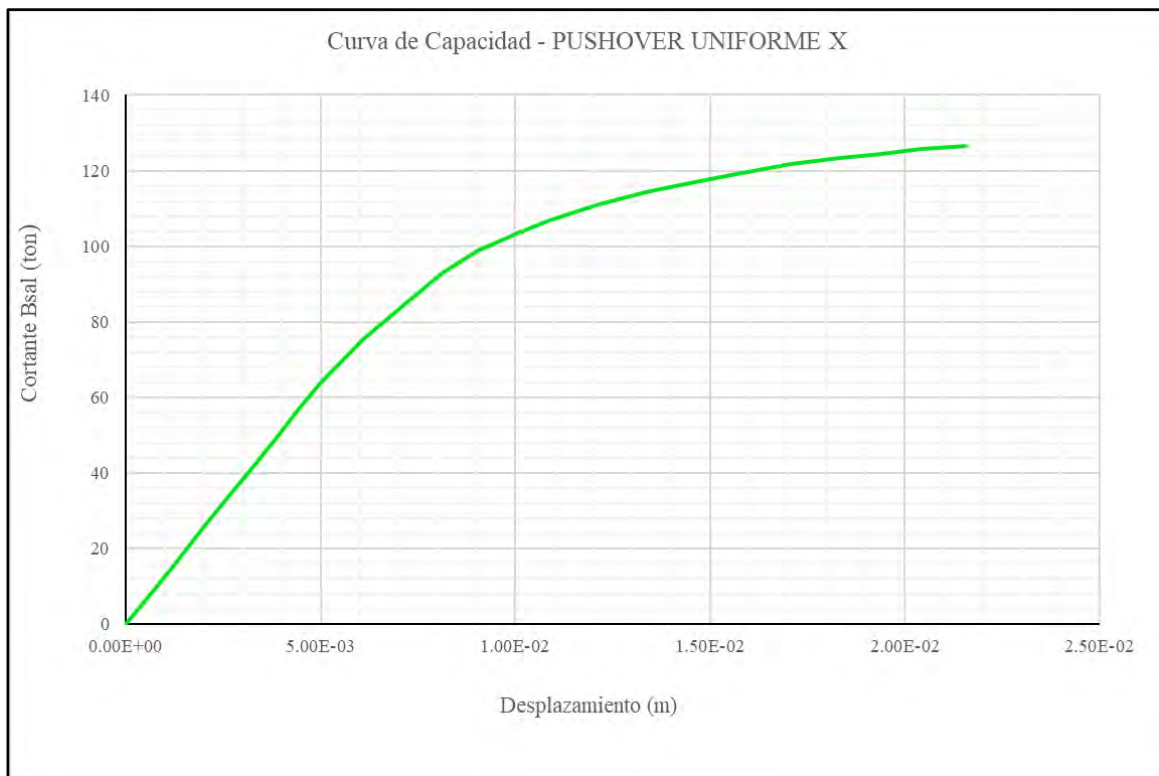


Figura A5. Curva de capacidad para pushover uniforme con carga en X.

Nota: Fuente propia

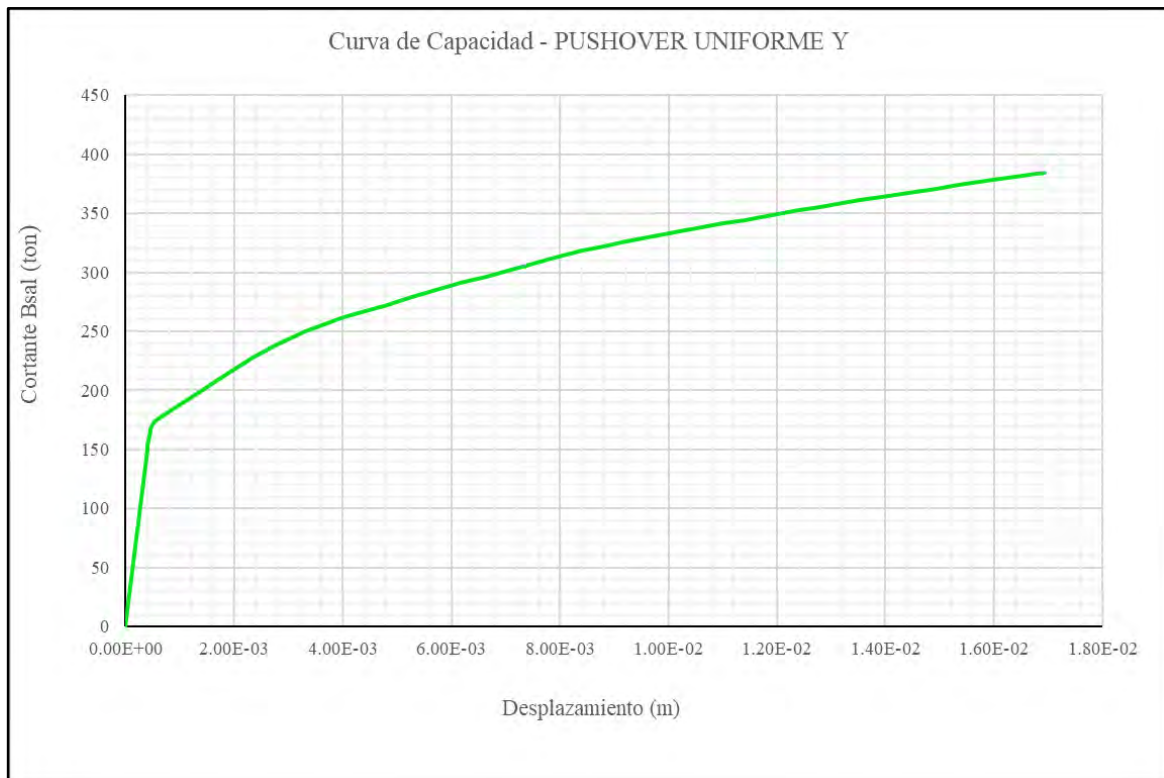


Figura A6. Curva de capacidad para pushover con carga uniforme en Y.

Nota: Fuente propia

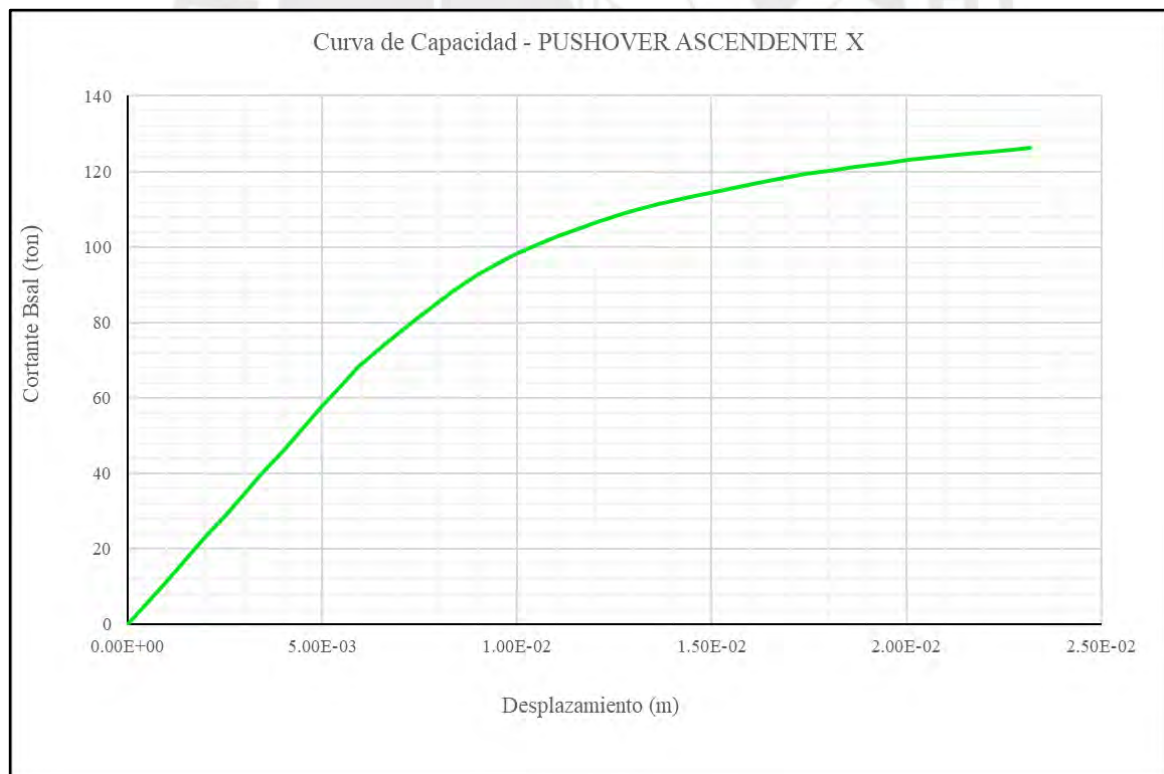


Figura A7. Curva de capacidad para pushover con carga ascendente en X.

Nota: Fuente propia

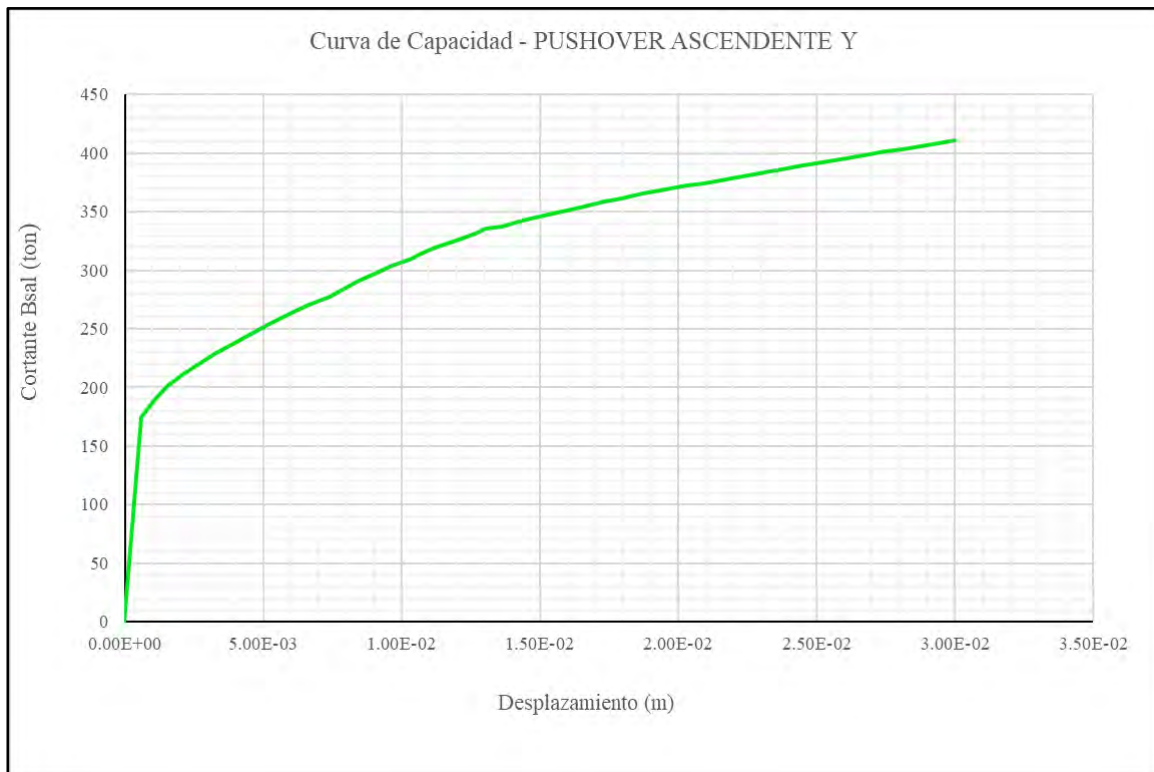


Figura A8. Curva de capacidad para pushover con carga ascendente en Y.

Nota: Fuente propia

2. Tipología de 7 ejes.

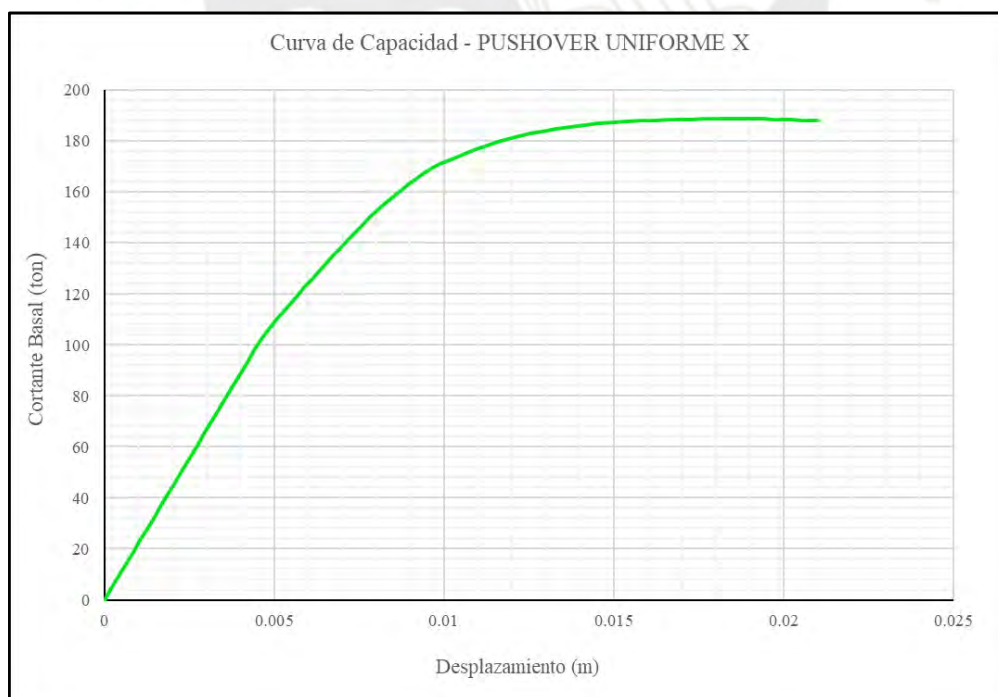


Figura A9. Curva de capacidad para pushover con carga uniforme en X.

Nota: Fuente propia

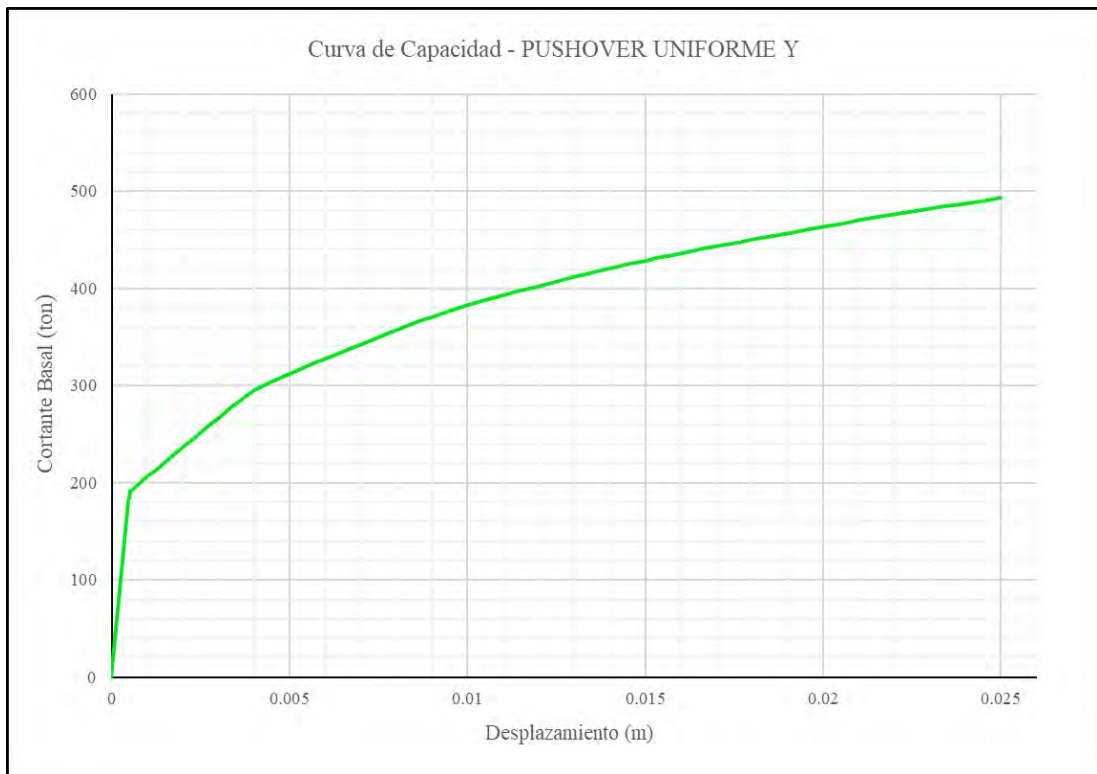


Figura A10. Curva de capacidad para pushover con carga uniforme en Y.

Nota: Fuente propia

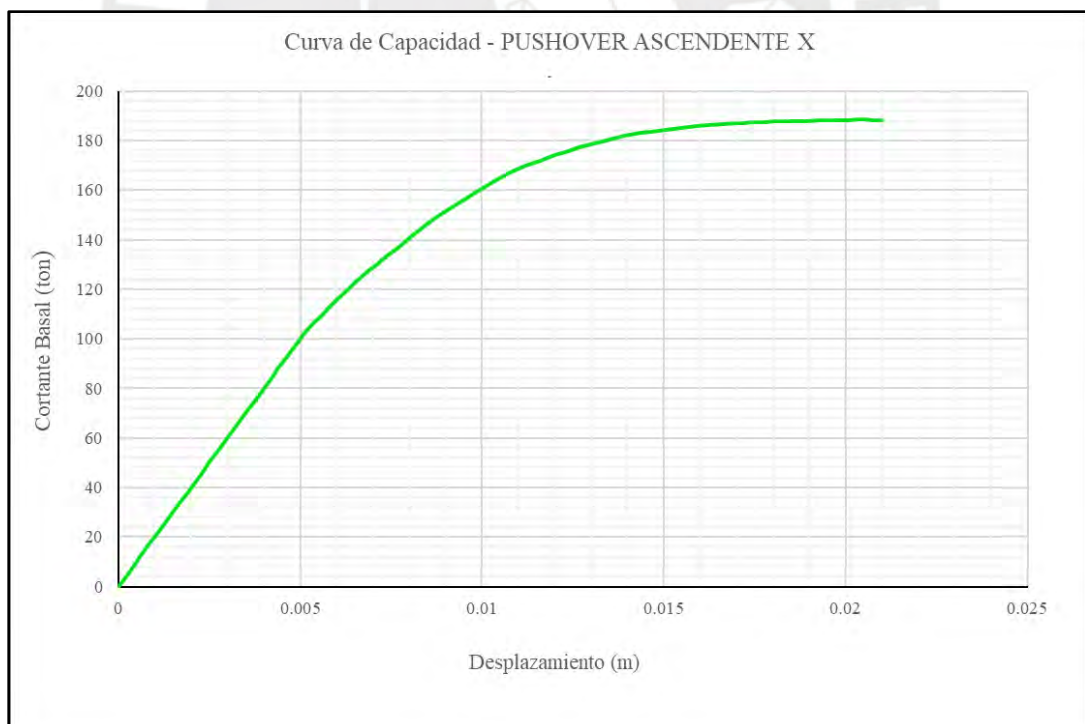


Figura A11. Curva de capacidad para pushover con carga ascendente en X.

Nota: Fuente propia

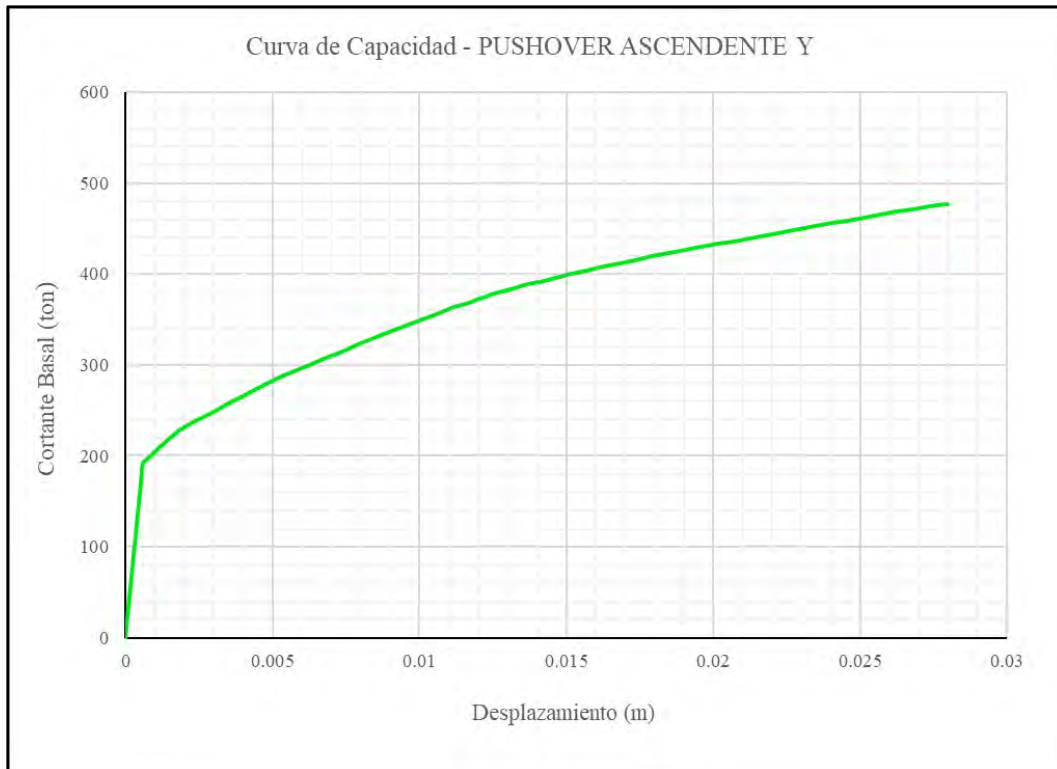


Figura A12. Curva de capacidad para pushover con carga ascendente en Y.

Nota: Fuente propia

Anexo 6 - Espectro de Capacidad de las tipologías estudiadas

1. Tipología de 5 ejes.

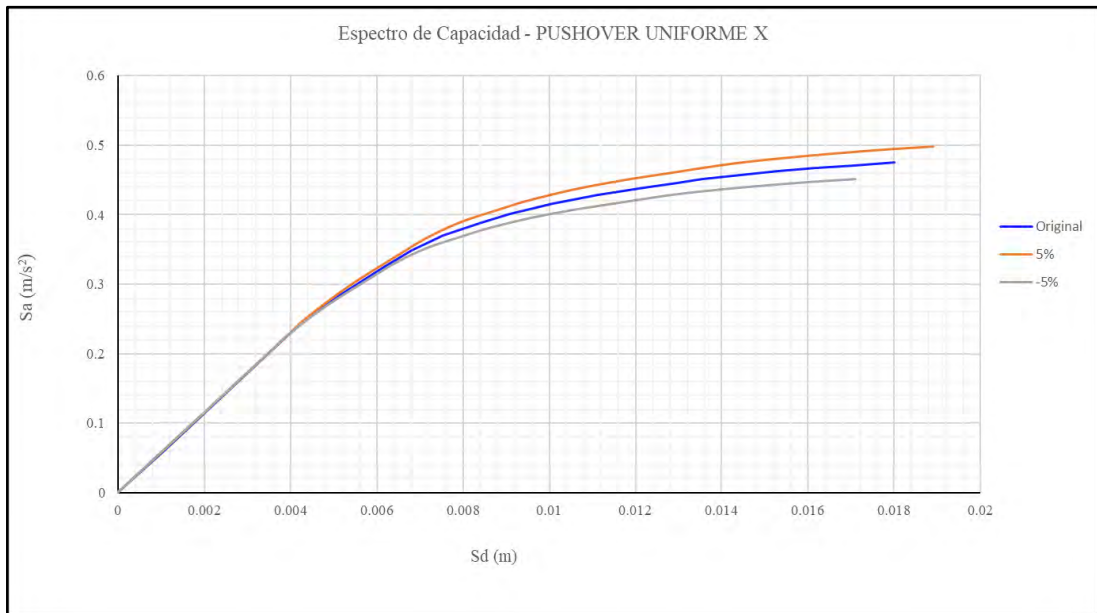


Figura A13. Espectro de capacidad para pushover uniforme con carga en X.

Nota: Fuente propia

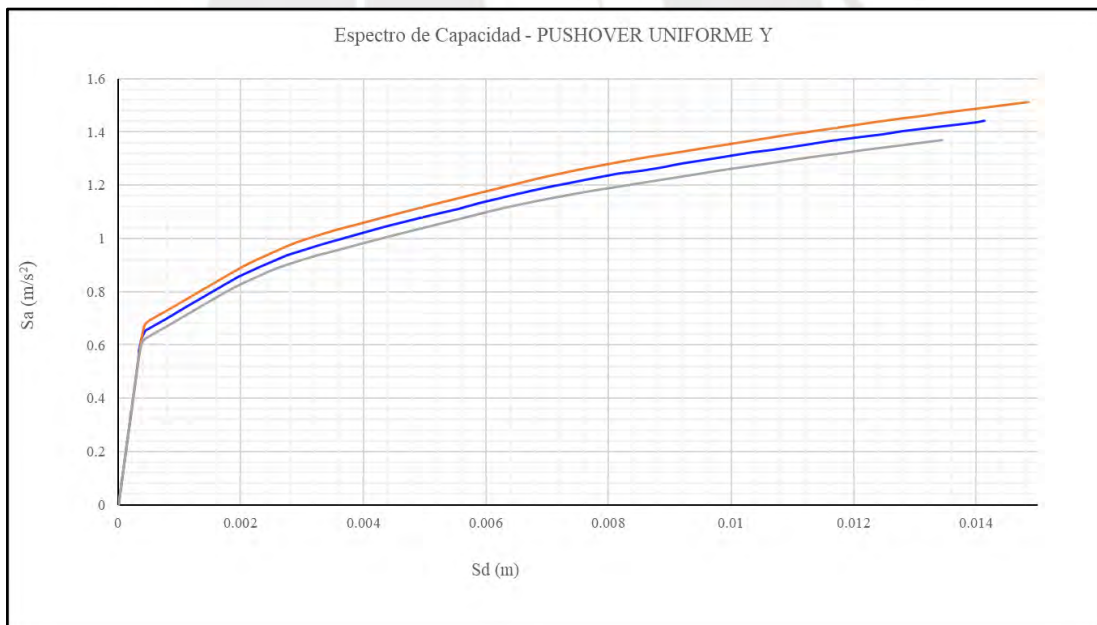


Figura A14. Espectro de capacidad para pushover uniforme con carga en Y.

Nota: Fuente propia

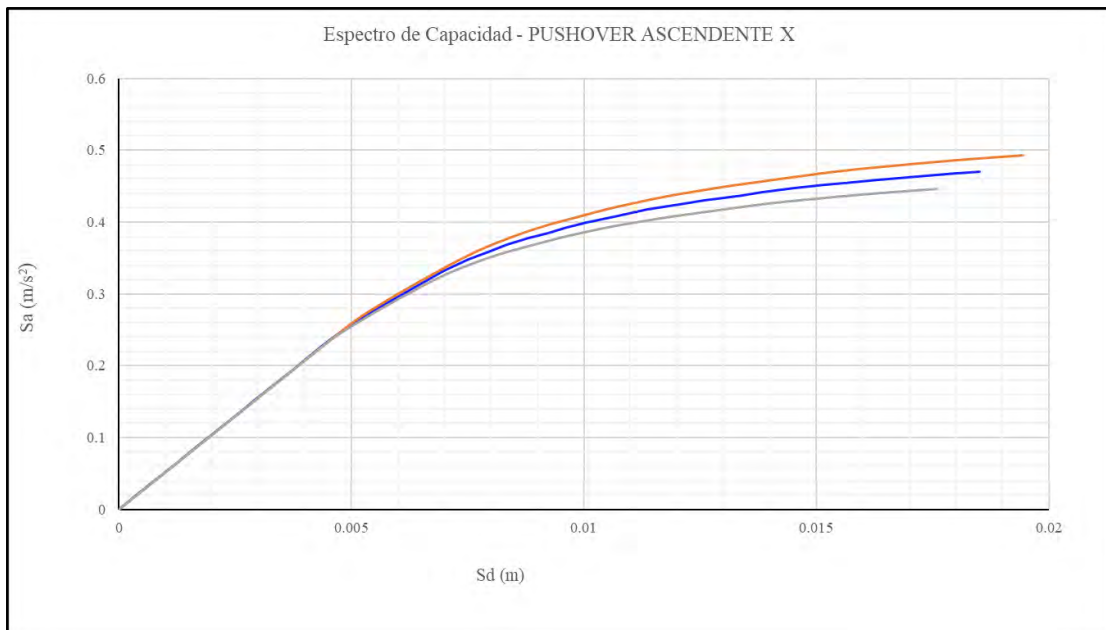


Figura A15. Espectro de capacidad para pushover ascendente con carga en X.

Nota: Fuente propia

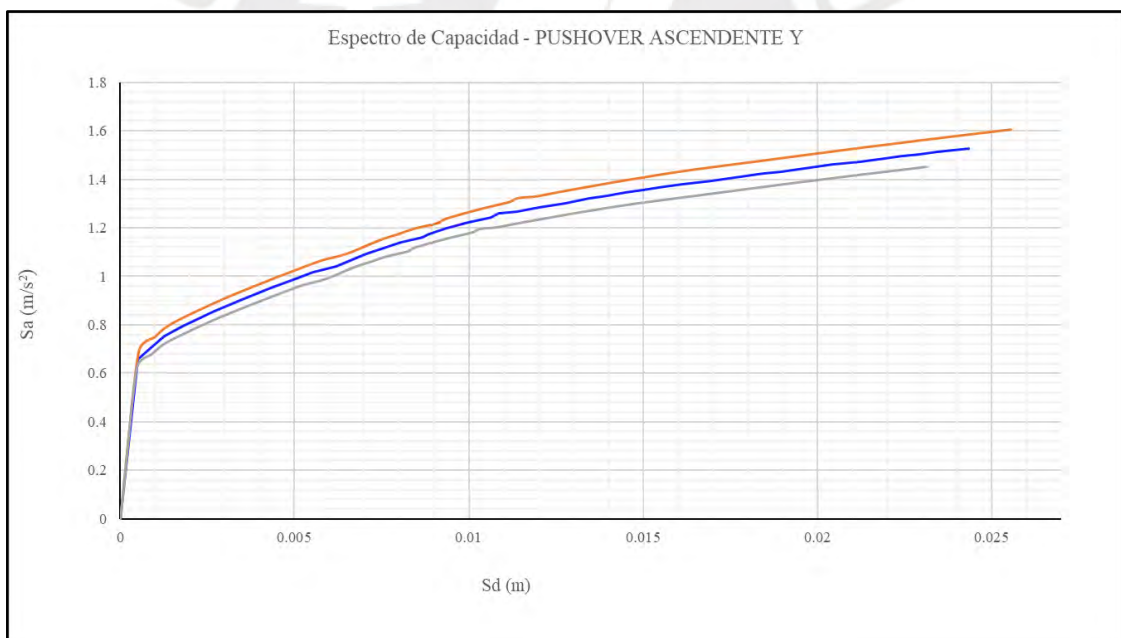


Figura A16. Espectro de capacidad para pushover ascendente con carga en Y.

Nota: Fuente propia

2. Tipología de 7 ejes.

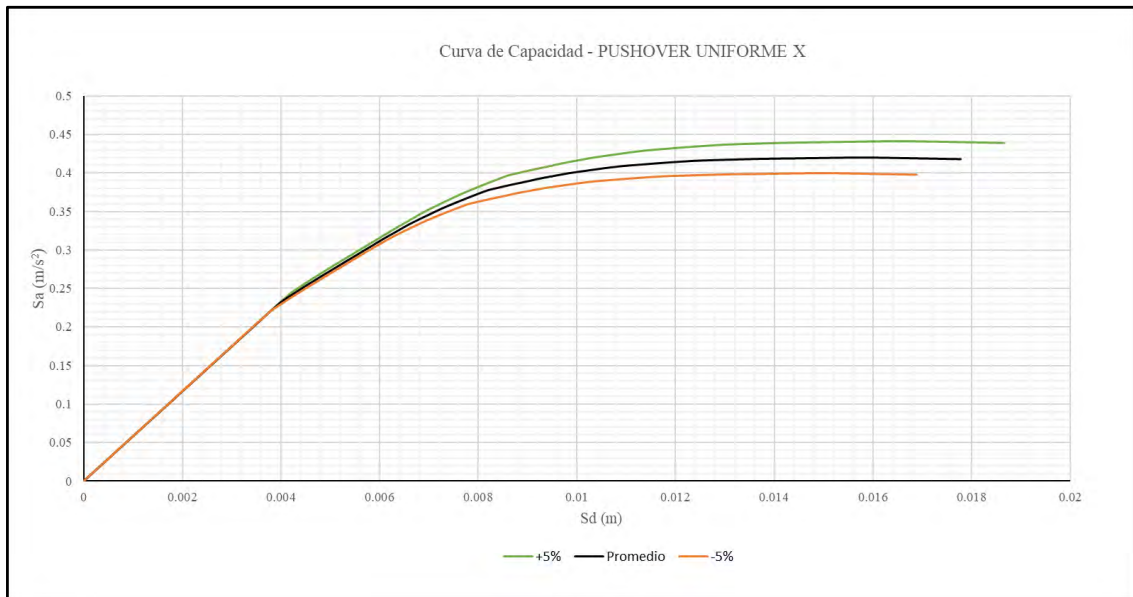


Figura A17. Espectro de capacidad para pushover uniforme con carga en X.

Nota: Fuente propia

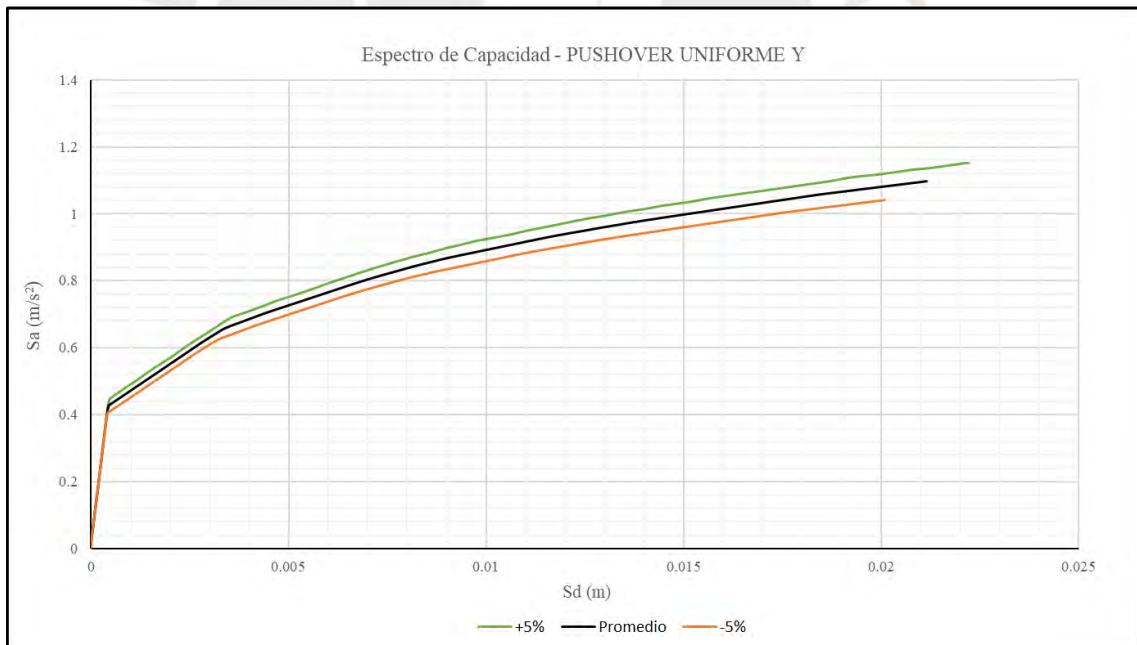


Figura A18. Espectro de capacidad para pushover uniforme con carga en Y.

Nota: Fuente propia

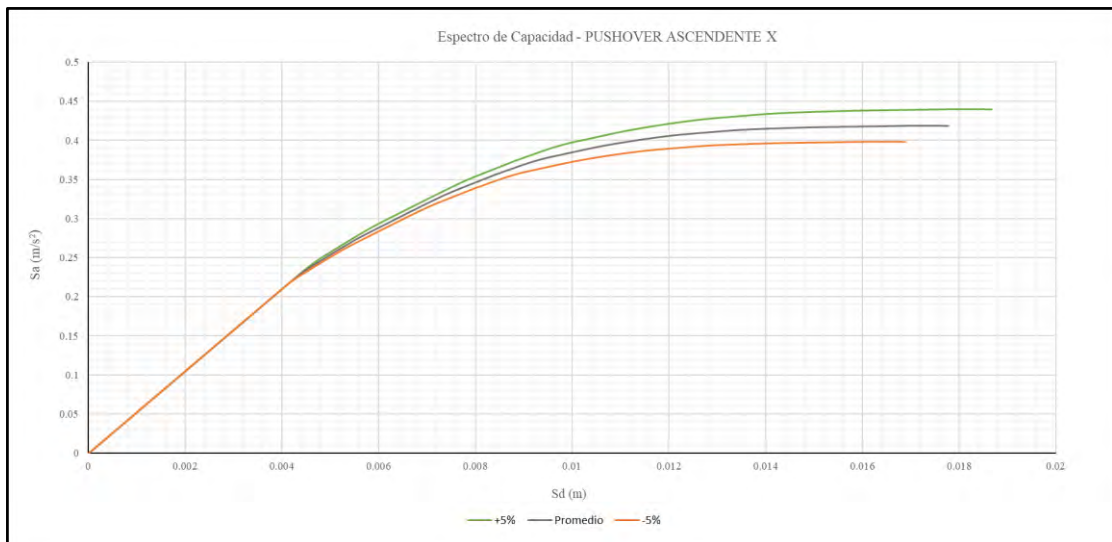


Figura A19. Espectro de capacidad para pushover ascendente con carga en X.

Nota: Fuente propia

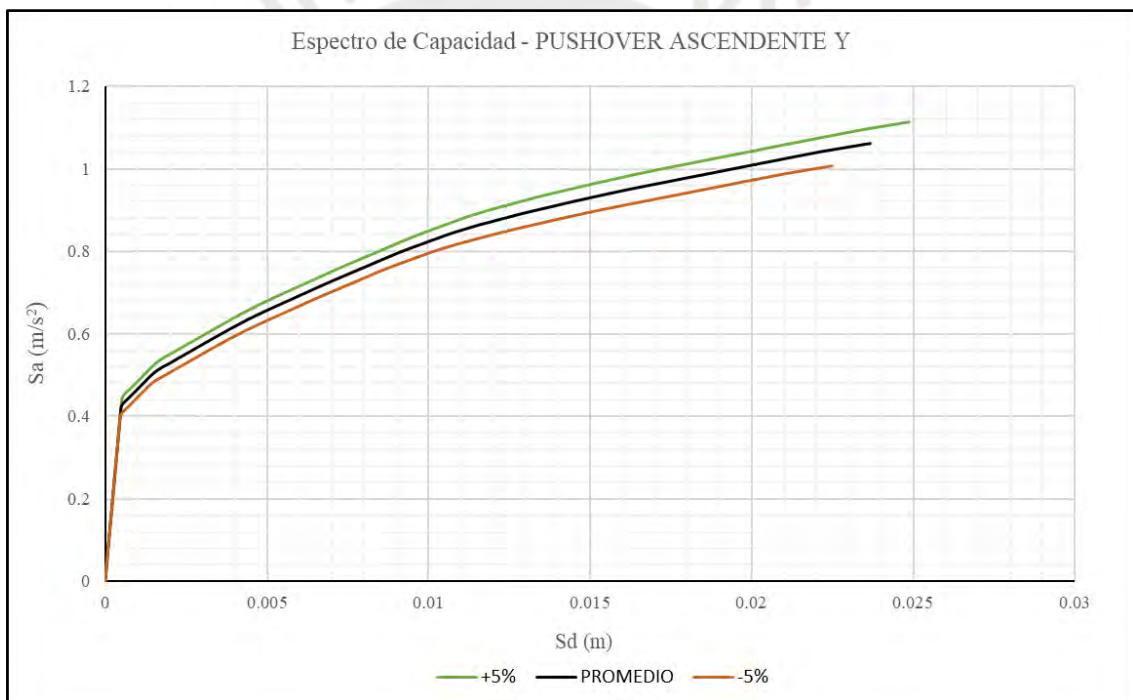


Figura A20. Espectro de capacidad para pushover ascendente con carga en Y.

Nota: Fuente propia

Anexo 7

Table 5.1 Model Building Types

| No. | Label | Description | Height | | | |
|-----|-------|------------------------------------------------------|-----------|---------|---------|------|
| | | | Range | | Typical | |
| | | | Name | Stories | Stories | Feet |
| 1 | W1 | Wood, Light Frame ($\leq 5,000$ sq. ft.) | | 1 - 2 | 1 | 14 |
| 2 | W2 | Wood, Commercial and Industrial ($> 5,000$ sq. ft.) | | All | 2 | 24 |
| 3 | S1L | Steel Moment Frame | Low-Rise | 1 - 3 | 2 | 24 |
| 4 | S1M | | Mid-Rise | 4 - 7 | 5 | 60 |
| 5 | S1H | | High-Rise | 8+ | 13 | 156 |
| 6 | S2L | Steel Braced Frame | Low-Rise | 1 - 3 | 2 | 24 |
| 7 | S2M | | Mid-Rise | 4 - 7 | 5 | 60 |
| 8 | S2H | | High-Rise | 8+ | 13 | 156 |
| 9 | S3 | Steel Light Frame | | All | 1 | 15 |
| 10 | S4L | Steel Frame with Cast-in-Place Concrete Shear Walls | Low-Rise | 1 - 3 | 2 | 24 |
| 11 | S4M | | Mid-Rise | 4 - 7 | 5 | 60 |
| 12 | S4H | | High-Rise | 8+ | 13 | 156 |
| 13 | S5L | Steel Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls | Low-Rise | 1 - 3 | 2 | 24 |
| 14 | S5M | | Mid-Rise | 4 - 7 | 5 | 60 |
| 15 | S5H | | High-Rise | 8+ | 13 | 156 |
| 16 | C1L | Concrete Moment Frame | Low-Rise | 1 - 3 | 2 | 20 |
| 17 | C1M | | Mid-Rise | 4 - 7 | 5 | 50 |
| 18 | C1H | | High-Rise | 8+ | 12 | 120 |
| 19 | C2L | Concrete Shear Walls | Low-Rise | 1 - 3 | 2 | 20 |
| 20 | C2M | | Mid-Rise | 4 - 7 | 5 | 50 |

Table 5.9b Structural Fragility Curve Parameters – Moderate Code Seismic Design Level

| Building Properties | | | Interstory Drift at Threshold of Damage State | | | | Spectral Displacement (inches) | | | | | | | |
|---------------------|-----------------|-------|-----------------------------------------------|----------|-----------|----------|--------------------------------|------|----------|------|-----------|------|----------|------|
| Type | Height (inches) | | Slight | Moderate | Extensive | Complete | Slight | | Moderate | | Extensive | | Complete | |
| | Roof | Modal | | | | | Median | Beta | Median | Beta | Median | Beta | Median | Beta |
| W1 | 168 | 126 | 0.0040 | 0.0099 | 0.0306 | 0.0750 | 0.50 | 0.84 | 1.25 | 0.86 | 3.86 | 0.89 | 9.45 | 1.04 |
| W2 | 288 | 216 | 0.0040 | 0.0099 | 0.0306 | 0.0750 | 0.86 | 0.89 | 2.14 | 0.95 | 6.62 | 0.95 | 16.20 | 0.92 |
| S1L | 288 | 216 | 0.0060 | 0.0104 | 0.0235 | 0.0600 | 1.30 | 0.80 | 2.24 | 0.75 | 5.08 | 0.74 | 12.96 | 0.88 |
| S1M | 720 | 540 | 0.0040 | 0.0069 | 0.0157 | 0.0400 | 2.16 | 0.65 | 3.74 | 0.68 | 8.46 | 0.69 | 21.60 | 0.87 |
| S1H | 1872 | 1123 | 0.0030 | 0.0052 | 0.0118 | 0.0300 | 3.37 | 0.64 | 5.83 | 0.64 | 13.21 | 0.71 | 33.70 | 0.83 |
| S2L | 288 | 216 | 0.0050 | 0.0087 | 0.0233 | 0.0600 | 1.08 | 0.93 | 1.87 | 0.92 | 5.04 | 0.93 | 12.96 | 0.93 |
| S2M | 720 | 540 | 0.0033 | 0.0058 | 0.0156 | 0.0400 | 1.80 | 0.70 | 3.12 | 0.69 | 8.40 | 0.69 | 21.60 | 0.89 |
| S2H | 1872 | 1123 | 0.0025 | 0.0043 | 0.0117 | 0.0300 | 2.81 | 0.66 | 4.87 | 0.64 | 13.10 | 0.69 | 33.70 | 0.80 |
| S3 | 180 | 135 | 0.0040 | 0.0070 | 0.0187 | 0.0525 | 0.54 | 0.88 | 0.94 | 0.92 | 2.52 | 0.97 | 7.09 | 0.89 |
| S4L | 288 | 216 | 0.0040 | 0.0069 | 0.0187 | 0.0525 | 0.86 | 0.96 | 1.50 | 1.00 | 4.04 | 1.03 | 11.34 | 0.92 |
| S4M | 720 | 540 | 0.0027 | 0.0046 | 0.0125 | 0.0350 | 1.44 | 0.75 | 2.50 | 0.72 | 6.73 | 0.72 | 18.90 | 0.94 |
| S4H | 1872 | 1123 | 0.0020 | 0.0035 | 0.0093 | 0.0262 | 2.25 | 0.66 | 3.90 | 0.67 | 10.50 | 0.70 | 29.48 | 0.90 |
| S5L | | | | | | | | | | | | | | |
| S5M | | | | | | | | | | | | | | |
| S5H | | | | | | | | | | | | | | |
| C1L | 240 | 180 | 0.0050 | 0.0087 | 0.0233 | 0.0600 | 0.90 | 0.89 | 1.56 | 0.90 | 4.20 | 0.90 | 10.80 | 0.89 |
| C1M | 600 | 450 | 0.0033 | 0.0058 | 0.0156 | 0.0400 | 1.50 | 0.70 | 2.60 | 0.70 | 7.00 | 0.70 | 18.00 | 0.89 |
| C1H | 1440 | 864 | 0.0025 | 0.0043 | 0.0117 | 0.0300 | 2.16 | 0.66 | 3.74 | 0.66 | 10.08 | 0.76 | 25.92 | 0.91 |
| C2L | 240 | 180 | 0.0040 | 0.0084 | 0.0232 | 0.0600 | 0.72 | 0.91 | 1.52 | 0.97 | 4.17 | 1.03 | 10.80 | 0.87 |
| C2M | 600 | 450 | 0.0027 | 0.0056 | 0.0154 | 0.0400 | 1.20 | 0.81 | 2.53 | 0.77 | 6.95 | 0.73 | 18.00 | 0.91 |
| C2H | 1440 | 864 | 0.0020 | 0.0042 | 0.0116 | 0.0300 | 1.73 | 0.66 | 3.64 | 0.68 | 10.00 | 0.70 | 25.92 | 0.87 |
| C3L | | | | | | | | | | | | | | |
| C3M | | | | | | | | | | | | | | |
| C3H | | | | | | | | | | | | | | |
| PC1 | 180 | 135 | 0.0040 | 0.0070 | 0.0187 | 0.0525 | 0.54 | 0.89 | 0.94 | 0.92 | 2.52 | 0.97 | 7.09 | 1.04 |
| PC2L | 240 | 180 | 0.0040 | 0.0069 | 0.0187 | 0.0525 | 0.72 | 0.96 | 1.25 | 1.00 | 3.37 | 1.03 | 9.45 | 0.88 |
| PC2M | 600 | 450 | 0.0027 | 0.0046 | 0.0125 | 0.0350 | 1.20 | 0.82 | 2.08 | 0.79 | 5.61 | 0.75 | 15.75 | 0.93 |
| PC2H | 1440 | 864 | 0.0020 | 0.0035 | 0.0094 | 0.0263 | 1.73 | 0.68 | 3.00 | 0.69 | 8.08 | 0.77 | 22.68 | 0.89 |
| RM1L | 240 | 180 | 0.0040 | 0.0069 | 0.0187 | 0.0525 | 0.72 | 0.96 | 1.25 | 0.99 | 3.37 | 1.05 | 9.45 | 0.94 |
| RM1M | 600 | 450 | 0.0027 | 0.0046 | 0.0125 | 0.0350 | 1.20 | 0.81 | 2.08 | 0.82 | 5.61 | 0.80 | 15.75 | 0.89 |
| RM2L | 240 | 180 | 0.0040 | 0.0069 | 0.0187 | 0.0525 | 0.72 | 0.91 | 1.25 | 0.96 | 3.37 | 1.02 | 9.45 | 0.93 |
| RM2M | 600 | 450 | 0.0027 | 0.0046 | 0.0125 | 0.0350 | 1.20 | 0.81 | 2.08 | 0.80 | 5.61 | 0.75 | 15.75 | 0.88 |
| RM2H | 1440 | 864 | 0.0020 | 0.0035 | 0.0094 | 0.0263 | 1.73 | 0.67 | 3.00 | 0.69 | 8.08 | 0.70 | 22.68 | 0.86 |
| URML | | | | | | | | | | | | | | |
| URMM | | | | | | | | | | | | | | |
| MH | 120 | 120 | 0.0040 | 0.0080 | 0.0240 | 0.0700 | 0.48 | 0.91 | 0.96 | 1.00 | 2.88 | 1.03 | 8.40 | 0.92 |

