

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE UN EDIFICIO
DE CONCRETO ARMADO PARA DIFERENTES RESISTENCIAS
A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO Y DENSIDADES DE
MUROS**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil.

AUTORES:

Herbert Saúl Mendoza Romero

Víctor Alberto Vizcarra Alvarez

ASESOR:

Edward Jonathan Soto Oblea

Lima, Setiembre, 2024

Informe de Similitud

Yo, Edward Jonathan Soto Oblea,

docente de la Facultad de CIENCIAS E INGENIERIA de la Pontificia

Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado:

Estudio de la Vulnerabilidad Sísmica de un Edificio de Concreto Armado para diferentes resistencias a la compresión del concreto y densidades de muros.

de los autores


Herbert Saul Mendoza Romero,

Víctor Alberto Vizcarra Álvarez,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 13%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 19/09/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis 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 septiembre de 2024

Apellidos y nombres del asesor: Soto Oblea, Edward Jonathan	
DNI:45532183	Firma
ORCID: 0000-0001-5267-0899	 Edward Jonathan Soto Oblea

RESUMEN

La presente investigación es a raíz de destacar la importancia de evaluar sísmicamente las construcciones tal que su estado de daño alcanzado en un evento sísmico sea aceptable. En este contexto, se busca optimizar los costos asociados al análisis estructural. En particular, se analiza cómo la variación en la resistencia del concreto ($f'c$) y la densidad de los muros estructurales afecta la vulnerabilidad sísmica.

Para abordar este análisis, se lleva a cabo una evaluación exhaustiva de la vulnerabilidad de la estructura mediante el análisis detallado de curvas de fragilidad, teniendo en cuenta una variedad de valores para la resistencia a compresión del concreto ($f'c$) así como la densidad de los muros dentro de la estructura, de manera que se puedan identificar con precisión las potenciales debilidades y su impacto en la integridad estructural bajo diferentes condiciones de carga y resistencia.

En cuanto a los objetivos, se pretende conducir un análisis comparativo de la vulnerabilidad sísmica en una edificación con el objetivo de poder identificar un punto de equilibrio entre una vulnerabilidad sísmica aceptable y los costos asociados. Así como, generar curvas de capacidad de cada modelo en estudio además de conseguir el punto de desempeño asociados a un sismo específico. También analizar cómo varían las curvas de fragilidad para distintas resistencias del concreto y densidad de muros.

Se empleará un enfoque analítico para realizar el análisis estático - no lineal o pushover, esto será posible usando la herramienta ingenieril de acrónimo ETABS y la metodología Hazus, el cual es un método estadístico para la creación de gráficos de vulnerabilidad estructural, los cuales interpretaremos como curvas de fragilidad.

Por último, proponer posibles estrategias para seleccionar la resistencia del concreto y densidad de muros adecuadas al inicio de un diseño estructural con el fin de minimizar la vulnerabilidad de las edificaciones.

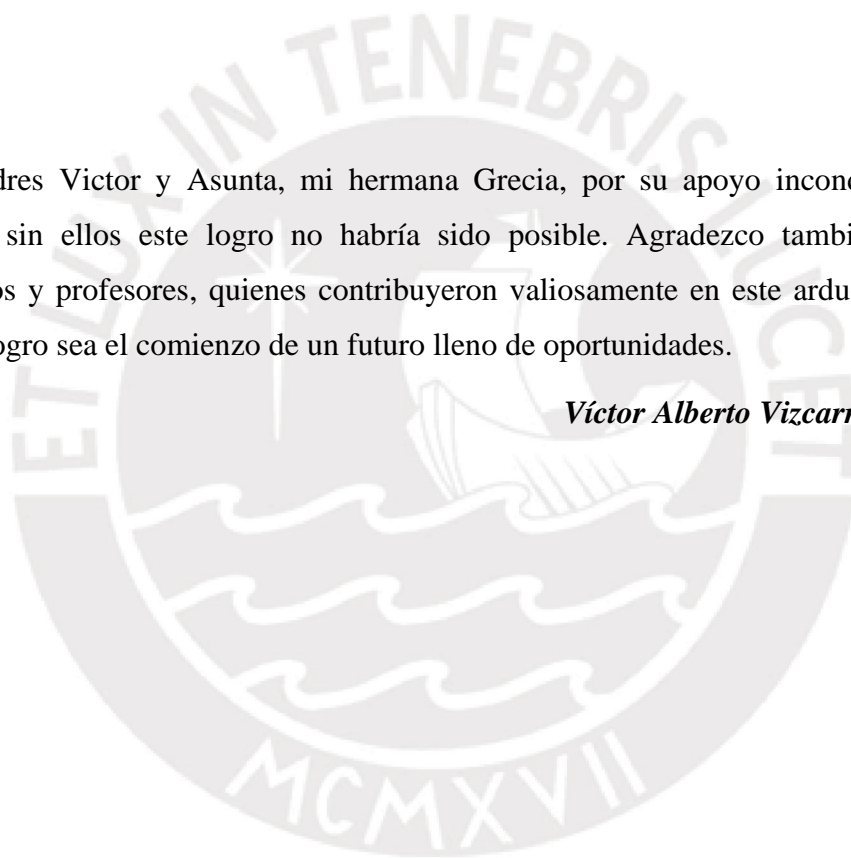
DEDICATORIA

A mis queridos padres Segundo y Mariza, mi hermano Harold, quienes han estado a mi lado en cada paso de este proceso. Agradezco a Dios por brindarme la oportunidad de conocer amigos que, con su apoyo incondicional, han sido una luz en la elaboración de esta investigación. Extiendo mi agradecimiento a mis docentes, cuyas enseñanzas y guía han sido fundamentales en este viaje. Con fe en el futuro, dedico este trabajo a todos ustedes.

Herbert Saúl Mendoza Romero

A mis padres Victor y Asunta, mi hermana Grecia, por su apoyo incondicional y sacrificio, sin ellos este logro no habría sido posible. Agradezco también a mis compañeros y profesores, quienes contribuyeron valiosamente en este arduo camino. Que este logro sea el comienzo de un futuro lleno de oportunidades.

Víctor Alberto Vizcarra Alvarez



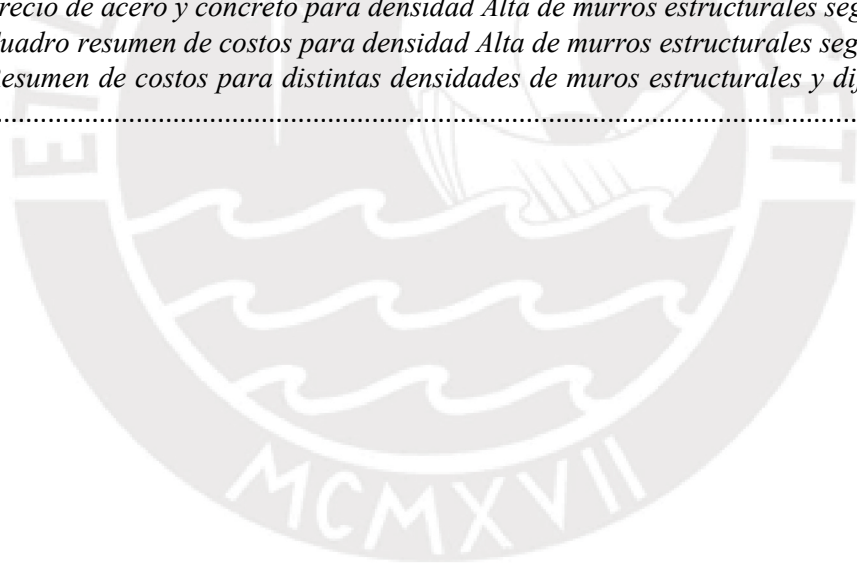
ÍNDICE

LISTA DE TABLAS.....	II
LISTA DE FIGURAS.....	IV
CAPÍTULO I	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.3 OBJETIVOS	2
1.4 JUSTIFICACIÓN E HIPÓTESIS	2
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	4
2.1 ANTECEDENTES	4
2.2. VULNERABILIDAD SÍSMICA	4
2.2.1 MÉTODOS PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD SÍSMICA	5
2.3 CURVAS DE CAPACIDAD	7
2.4 ESPECTRO DE DEMANDA.....	8
2.5 DESEMPEÑO SÍSMICO (MÉTODO DE COEFICIENTES – SECTORIZACIÓN SEAOC).....	9
2.6 CURVAS DE FRAGILIDAD.....	13
2.7 ÍNDICE DE DAÑO ESPERADO.....	14
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	16
3.1 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ..	16
3.2 CARACTERÍSTICAS Y MODELACIÓN DE LA EDIFICACIÓN EN ESTUDIO .	18
3.2.1 PRINCIPALES VARIABLES A CONSIDERAR EN LA INVESTIGACIÓN...	21
3.3 OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA LINEAL DE LA ESTRUCTURA	22
3.3.1 ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL Y CURVAS DE CAPACIDAD.....	34
3.3.2 MÉTODO DE LOS COEFICIENTES.....	52
3.4 PROCEDIMIENTO Y OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD	55
3.5 PROCEDIMIENTO Y OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE DAÑO	58
CAPÍTULO IV: MUESTRA DE RESULTADOS.....	60
4.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS NO LINEAL ESTÁTICO PARA TODOS LOS MODELOS Y SUS RESPECTIVAS CURVAS DE FRAGILIDAD.....	60
4.2 CUANTIFICACIÓN DE COSTOS.....	80
4.2.1. DENSIDAD BAJA DE MUROS ESTRUCTURALES:	81
4.2.2. DENSIDAD MEDIA DE MUROS ESTRUCTURALES:	83
4.2.3. DENSIDAD ALTA DE MUROS ESTRUCTURALES:.....	83
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....	86
RECOMENDACIONES.....	87
BIBLIOGRAFÍA.....	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Factor C_0</i>	11
Tabla 2. <i>Factor de masa efectiva C_m</i>	12
Tabla 3. <i>Factor de sitio "a"</i>	12
Tabla 4. <i>Comparación entre los formas de evaluación respecto a su vulnerabilidad sísmica</i> ..	16
Tabla 5. <i>Características geométricas del edificio</i>	21
Tabla 6. <i>Elementos estructurales</i>	21
Tabla 7. <i>Cálculo de la densidad de muros</i>	21
Tabla 8. <i>Determinación de las cargas muertas y vivas en losas aligeradas</i>	26
Tabla 9. <i>Cálculo de la carga por tabiquería en vigas</i>	26
Tabla 10. <i>Comprobación del sistema estructural en cada dirección</i>	33
Tabla 11. <i>Categorización del edificio según el número de niveles</i>	56
Tabla 12. <i>Valores del S_d, media y desviación estándar</i>	56
Tabla 13. <i>Probabilidades de alcanzar un estado de daño para el modelo de densidad de muros baja y $f'c$ de 210 kg/cm². Análisis en ambas direcciones</i>	61
Tabla 14. <i>Derivas en cada dirección para el modelo de densidad de muros baja y $f'c$ de 210 kg/cm²</i>	62
Tabla 15. <i>Probabilidades de alcanzar un estado de daño para el modelo de densidad de muros media y $f'c$ de 210 kg/cm². Análisis en ambas direcciones</i>	63
Tabla 16. <i>Derivas en cada dirección para el modelo de densidad de muros media y $f'c$ de 210 kg/cm²</i>	64
Tabla 17. <i>Probabilidades de alcanzar un estado de daño para el modelo de densidad de muros alta y $f'c$ de 210 kg/cm². Análisis en ambas direcciones</i>	65
Tabla 18. <i>Derivas en cada dirección para el modelo de densidad de muros alta y $f'c$ de 210 kg/cm²</i>	66
Tabla 19. <i>Probabilidades de alcanzar un estado de daño para el modelo de densidad de muros baja y $f'c$ de 280 kg/cm². Análisis en ambas direcciones</i>	67
Tabla 20. <i>Derivas en cada dirección para el modelo de densidad de muros baja y $f'c$ de 280 kg/cm²</i>	68
Tabla 21. <i>Probabilidades de alcanzar un estado de daño para el modelo de densidad de muros media y $f'c$ de 280 kg/cm². Análisis en ambas direcciones</i>	69
Tabla 22. <i>Derivas en cada dirección para el modelo de densidad de muros media y $f'c$ de 280 kg/cm²</i>	70
Tabla 23. <i>Probabilidades de alcanzar un estado de daño para el modelo de densidad de muros alta y $f'c$ de 280 kg/cm². Análisis en ambas direcciones</i>	71
Tabla 24. <i>Derivas en cada dirección para el modelo de densidad de muros alta y $f'c$ de 280 kg/cm²</i>	72
Tabla 25. <i>Probabilidades de alcanzar un estado de daño para el modelo de densidad de muros baja y $f'c$ de 350 kg/cm². Análisis en ambas direcciones</i>	73
Tabla 26. <i>Derivas en cada dirección para el modelo de densidad de muros baja y $f'c$ de 350 kg/cm²</i>	74
Tabla 27. <i>Probabilidades de alcanzar un estado de daño para el modelo de densidad de muros media y $f'c$ de 350 kg/cm². Análisis en ambas direcciones</i>	75
Tabla 28. <i>Derivas en cada dirección para el modelo de densidad de muros media y $f'c$ de 350 kg/cm²</i>	76
Tabla 29. <i>Probabilidades de alcanzar un estado de daño para el modelo de densidad de muros alta y $f'c$ de 350 kg/cm². Análisis en ambas direcciones</i>	77
Tabla 30. <i>Derivas en cada dirección para el modelo de densidad de muros alta y $f'c$ de 350 kg/cm²</i>	78
Tabla 31. <i>Resumen de derivas para cada modelo</i>	78
Tabla 32. <i>Parámetros de curva de capacidad de los modelos con $f'c$ constante de 210 kg/cm². Resultados del análisis en "X"</i>	79

Tabla 33. <i>Parámetros de curva de capacidad de los modelos con $f'c$ constante de 210 kg/cm². Resultados del análisis en “Y”</i>	79
Tabla 34. <i>Parámetros de curva de capacidad de los modelos con densidad de muros baja constante. Resultados del análisis en “X”</i>	79
Tabla 35. <i>Parámetros de curva de capacidad de los modelos con densidad de muros baja constante. Resultados del análisis en “Y”</i>	79
Tabla 36. <i>Matriz de Probabilidad de daño considerando la variable de densidad de muros con un $f'c$ constante de 210 kg/cm². Resultados del análisis en “X”</i>	80
Tabla 37. <i>Matriz de Probabilidad de daño considerando la variable de resistencia del concreto con una densidad constante de muros baja. Resultados del análisis en “X”</i>	80
Tabla 38. <i>Matriz de Probabilidad de daño considerando la variable de densidad de muros con un $f'c$ constante de 210 kg/cm². Resultados del análisis en “Y”</i>	80
Tabla 39. <i>Matriz de Probabilidad de daño considerando la variable de resistencia del concreto con una densidad constante de muros baja. Resultados del análisis en “Y”</i>	80
Tabla 40. <i>Precio del acero por kg</i>	81
Tabla 41. <i>Cuadro Resumen de RATIOS</i>	81
Tabla 42. <i>Masa para Densidad Baja de muros estructurales</i>	82
Tabla 43. <i>Precios de acero y concreto para Densidad Baja de muros estructurales según $f'c$</i>	82
Tabla 44. <i>Cuadro Resumen de costos para densidad Baja de muros estructurales según $f'c$</i> ...	82
Tabla 45. <i>Masa para densidad Media de muros estructurales</i>	83
Tabla 46. <i>Precio de acero y concreto para densidad Media de muros estructurales según $f'c$</i> ..	83
Tabla 47. <i>Cuadro Resumen de costos para densidad Media de muros estructurales según $f'c$</i> ..	83
Tabla 48. <i>Masa sísmica para densidad Alta de muros estructurales</i>	83
Tabla 49. <i>Precio de acero y concreto para densidad Alta de muros estructurales según $f'c$</i> ..	84
Tabla 50. <i>Cuadro resumen de costos para densidad Alta de muros estructurales según $f'c$</i> ...	84
Tabla 51. <i>Resumen de costos para distintas densidades de muros estructurales y diferentes $f'c$</i>	84



LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Curvas de capacidad de un edificio aleatorio.....	8
<i>Figura 2.</i> Desempeño de edificios comunes, esenciales y de seguridad crítica.....	9
<i>Figura 3.</i> Representación gráfica del método de los coeficientes.....	11
<i>Figura 4.</i> Ejemplo de curvas de fragilidad para 4 diferentes estados de daño. Fuente: (FEMA, 2003)	14
<i>Figura 5.</i> Ejemplo de índice de daño esperado. Fuente: Propia.....	15
<i>Figura 6.</i> Planta típica del modelo de baja densidad de muros. Fuente propia.....	18
<i>Figura 7.</i> Planta típica del modelo de media densidad de muros. Fuente propia.....	19
<i>Figura 8.</i> Planta típica del modelo de alta densidad de muros. Fuente propia.....	20
<i>Figura 9.</i> Esquema 3D del modelo de baja densidad de muros. Fuente propia.	20
<i>Figura 10.</i> Definición de propiedades del concreto en Etabs. Fuente propia.	23
<i>Figura 11.</i> Definición de las propiedades de sección para las Vigas en Etabs. Fuente propia. ..	24
<i>Figura 12.</i> Definición de las propiedades de sección para las Columnas en Etabs. Fuente propia.	24
<i>Figura 13.</i> Definición de las propiedades de sección para las Placas en Etabs. Fuente propia. .	25
<i>Figura 14.</i> Definición de las propiedades de sección para las losas aligeradas en Etabs. Fuente propia.....	25
<i>Figura 15.</i> Definición de las propiedades de sección para las losas macizas en Etabs. Fuente propia.....	26
<i>Figura 16.</i> Asignación de las cargas muertas y vivas para las losas, datos para el Etabs. Fuente propia.....	27
<i>Figura 17.</i> Asignación de las cargas muertas en vigas y asignación de diafragma rígido en cada piso en Etabs. Fuente propia.	27
<i>Figura 18.</i> Definición de la masa sísmica para una edificación común en Etabs. Fuente propia.	28
<i>Figura 19.</i> Definición de los casos modales en Etabs. Fuente propia.....	28
<i>Figura 20.</i> Obtención de los periodos en cada dirección en Etabs. Fuente propia.	29
<i>Figura 21.</i> Definición del Espectro de la Norma E.030 en Etabs. Fuente propia.	30
<i>Figura 22.</i> Definición de los casos de carga en cada dirección en Etabs. Fuente propia.....	31
<i>Figura 23.</i> Definición del caso desplazamiento llamado “DX” y “DY” en Etabs. Fuente propia.	32
<i>Figura 24.</i> Definición de la Envolvente en Etabs. Fuente propia.	33
<i>Figura 25.</i> Derivas en cada dirección en Etabs. Fuente propia.....	34
<i>Figura 26.</i> Definición de las propiedades no lineales del concreto en Etabs. Fuente propia.....	35
<i>Figura 27.</i> Definición de las propiedades no lineales del acero en Etabs. Fuente propia.....	36
<i>Figura 28.</i> Modelos idealizados para una viga y/o columna. Fuente: (Deierlein et al., 2010) ...	37
<i>Figura 29.</i> Definición de la idealización tipo fibra en Etabs. Fuente propia.	37
<i>Figura 30.</i> Asignación de las rótulas en los elementos las columnas en Etabs. Fuente propia...	37
<i>Figura 31.</i> Definición de las propiedades del refuerzo en las columnas en Etabs. Fuente propia.	38
<i>Figura 32.</i> Asignación de las rótulas en los elementos las vigas en Etabs. Fuente propia.	39
<i>Figura 33.</i> Definición de las propiedades del refuerzo en las vigas en Etabs. Fuente propia.....	39
<i>Figura 34.</i> Definición de las propiedades del refuerzo en las vigas en Etabs. Fuente propia.....	40
<i>Figura 35.</i> Definición de las propiedades del refuerzo en la placa del ascensor en la dirección X en Etabs. Fuente propia.	41
<i>Figura 36.</i> Definición de las propiedades del refuerzo en la placa del ascensor en la dirección Y en Etabs. Fuente propia.	42
<i>Figura 37.</i> Definición de las propiedades del refuerzo en las losas en Etabs. Fuente propia.	43
<i>Figura 38.</i> (a) Diagrama momento – rotación de una viga sísmica. (b) Diagrama momento – curvatura de la viga sísmica. Fuente propia.	43

<i>Figura 39.</i> (a) Diagrama momento – rotación de una columna. (b) Diagrama esfuerzo – deformación unitaria de la columna. (c) Diagrama momento – curvatura de la columna. Fuente propia.....	44
<i>Figura 40.</i> (a) Diagrama momento – rotación de una placa. (b) Diagrama momento – curvatura de la placa. Fuente propia.....	45
<i>Figura 41.</i> Definición del caso de carga “Gravedad” en Etabs. Fuente propia.....	46
<i>Figura 42.</i> Definición del caso de carga “PUSH XX” en Etabs. Fuente propia.	46
<i>Figura 43.</i> Asignación del desplazamiento y punto de control para x-x en Etabs. Fuente propia.	47
<i>Figura 44.</i> Definición del caso de carga “PUSH YY” en Etabs. Fuente propia.	47
<i>Figura 45.</i> Asignación del desplazamiento y punto de control para y-y en Etabs. Fuente propia.	48
<i>Figura 46.</i> Curva de Capacidad analizada en x para el modelo de densidad de muros baja. Fuente propia.....	49
<i>Figura 47.</i> Curva de Capacidad analizada en y para el modelo de densidad de muros baja. Fuente propia.....	49
<i>Figura 48.</i> Curvas esfuerzo – deformación para cilindros de concreto cargados en compresión uniaxial. Fuente: (Park y Paulay, 1978)	50
<i>Figura 49.</i> Derivas de cada entrepiso para el modelo de un $f'c=280\text{kg/cm}^2$. Fuente propia.	51
<i>Figura 50.</i> Curva de Capacidad analizada en x para el modelo de un $f'c=280\text{kg/cm}^2$. Fuente propia.....	51
<i>Figura 51.</i> Curva de Capacidad analizada en y para el modelo de un $f'c=280\text{kg/cm}^2$. Fuente propia.....	52
<i>Figura 52.</i> Curva de capacidad idealizada en X y punto de desempeño para el modelo de densidad de muros baja con $f'c$ de 210 kg/cm^2 . Fuente propia.	54
<i>Figura 53.</i> Curva de capacidad idealizada en Y y punto de desempeño para el modelo de densidad de muros baja con $f'c$ de 210 kg/cm^2 . Fuente propia.	55
<i>Figura 54.</i> Curva de fragilidad para el edificio con densidad de muros baja con $f'c$ 210kg/cm^2 analizada en “X”. Fuente propia.	58
<i>Figura 55.</i> Índice de daño esperado para el edificio con densidad de muros baja con $f'c$ 210kg/cm^2 analizada en “X”. Fuente propia.	59
<i>Figura 56.</i> (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros baja con $f'c$ de 210kg/cm^2 analizada en “X”. Fuente propia.	60
<i>Figura 57.</i> (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros baja con $f'c$ de 210kg/cm^2 analizada en “Y”. Fuente propia.	61
<i>Figura 58.</i> (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros media con $f'c$ de 210kg/cm^2 analizada en “X”. Fuente propia.....	62
<i>Figura 59.</i> (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros media con $f'c$ de 210kg/cm^2 analizada en “Y”. Fuente propia.....	63
<i>Figura 60.</i> (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo densidad de muros alta con $f'c$ de 210kg/cm^2 analizada en “X”. Fuente propia.....	64
<i>Figura 61.</i> (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros alta con $f'c$ de 210kg/cm^2 analizada en “Y”. Fuente propia.	65
<i>Figura 62.</i> (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros baja con $f'c$ de 280kg/cm^2 analizada en “X”. Fuente propia.	66
<i>Figura 63.</i> (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros baja con $f'c$ de 280kg/cm^2 analizada en “Y”. Fuente propia.	67

<i>Figura 64.</i> (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros media con $f'c$ de 280kg/cm ² analizada en “X”. Fuente propia.....	68
<i>Figura 65.</i> (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros media con $f'c$ de 280kg/cm ² analizada en “Y”. Fuente propia.....	69
<i>Figura 66.</i> (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros alta con $f'c$ de 280kg/cm ² analizada en “X”. Fuente propia.	70
<i>Figura 67.</i> (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros alta con $f'c$ de 280kg/cm ² analizada en “Y”. Fuente propia.	71
<i>Figura 68.</i> (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros baja con $f'c$ de 350kg/cm ² analizada en “X”. Fuente propia.	72
<i>Figura 69.</i> (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros baja con $f'c$ de 350kg/cm ² analizada en “Y”. Fuente propia.	73
<i>Figura 70.</i> (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros media con $f'c$ de 350kg/cm ² analizada en “X”. Fuente propia.....	74
<i>Figura 71.</i> (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros media con $f'c$ de 350kg/cm ² analizada en “Y”. Fuente propia.....	75
<i>Figura 72.</i> (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros alta con $f'c$ de 350kg/cm ² analizada en “X”. Fuente propia.	76
<i>Figura 73.</i> (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros alta con $f'c$ de 350kg/cm ² analizada en “Y”. Fuente propia.	77

CAPÍTULO I

1.1 Introducción

La creciente preocupación por la seguridad estructural en áreas propensas a sismos ha impulsado la necesidad de realizar evaluaciones sísmicas detalladas de las edificaciones. En este contexto, la ingeniería estructural enfrenta el reto de garantizar que los edificios sean capaces de resistir las fuerzas generadas por eventos sísmicos, minimizando los daños y salvaguardando la vida humana. La vulnerabilidad sísmica en una estructura no solo depende de su diseño, sino también de factores materiales, como la resistencia del concreto y la densidad de los muros.

De lo mencionado anteriormente es recomendable realizar un estudio de vulnerabilidad para conocer cuál es el posible estado de la edificación frente a una determinada acción sísmica y así actuar con posibles medidas de prevención si es que la edificación posee vulnerabilidad alta.

Se conoce que la vulnerabilidad es una característica inherente de la estructura dependiendo de su rigidez, resistencia, ductilidad, etc. Es por ello que, variando diversas características como la calidad del concreto, tipo de agregado, densidad de muros y secciones de los elementos estructurales, podemos mejorar el comportamiento estructural. Centrándose en la mayor presencia de placas, éstas aportan una elevada rigidez lateral al edificio controlando los desplazamientos horizontales y a su vez absorben un gran porcentaje de la fuerza sísmica (San Bartolomé, 1998). Por otro lado, con respecto a la resistencia del concreto, la cual es conocida por determinar la calidad del mismo, está relacionada con el módulo de elasticidad y este asimismo con la rigidez.

En este contexto, el enfoque de la presente tesis es evaluar el grado de vulnerabilidad sísmica en un edificio de concreto armado, grado de daño, el cual se generan en los edificios frente a un sismo, modificando la densidad de los elementos estructurales como, placas, columnas y por otro lado variando la resistencia del concreto. Dicha evaluación se realizará a través de la interpretación con curvas de desempeño sísmico conocido también como curvas de fragilidad. Estos gráficos de capacidad y demanda nos permiten determinar aproximadamente la probabilidad del tipo de daño de una estructura mediante variables que afecten directamente la intensidad del sismo; asimismo, estimar o atribuirle un estado de daño probable alterando los parámetros mencionados. Además, se consideran los costos involucrados, ya que representan un factor crucial en la planificación de los proyectos.

En conclusión, esta tesis se concentra en comparar qué parámetro de los dos anteriormente mencionados influyen más a la vulnerabilidad sísmica de una estructura de concreto reforzado; además plantear posibles estrategias y recomendaciones para escoger una densidad de muros o resistencia del concreto idónea para reducir la vulnerabilidad sísmica y optimizar los costos relacionados.

1.2 Pregunta de investigación

¿Cuál es la resistencia del concreto y densidad de muros óptima en cuestión a costos para conseguir una vulnerabilidad sísmica aceptable en una edificación?

1.3 Objetivos

Objetivo general:

Identificar un punto de equilibrio entre una vulnerabilidad sísmica aceptable y los costos de una estructura estudiada.

Objetivos específicos:

Realizar diseño estructural de la edificación.

Incorporar características no lineales de materiales en la idealización del modelo.

Generar curvas de capacidad en cada dirección y obtener su punto crítico o desempeño.

Obtener y analizar cómo varían las curvas de fragilidad para distintas resistencias del concreto y densidad de muros.

Proponer posibles estrategias para seleccionar la resistencia del concreto y densidad de muros adecuadas al inicio de un diseño estructural con el fin de minimizar la vulnerabilidad de las edificaciones.

1.4 Justificación e hipótesis

Justificación

La alta vulnerabilidad sísmica en edificaciones representa un riesgo significativo para garantizar la protección de los ocupantes y la estabilidad de la estructura en caso de un terremoto. Sin embargo, implementar medidas para reducir drásticamente esta vulnerabilidad puede resultar en costos prohibitivos que impacten negativamente en la viabilidad económica del proyecto.

Por tanto, es crucial encontrar un equilibrio entre la mitigación de la vulnerabilidad sísmica y los costos asociados al diseño y construcción de la edificación. Optimizar el diseño para lograr una vulnerabilidad sísmica aceptable, que garantice la seguridad de los ocupantes y

la integridad estructural sin incurrir en costos excesivos, es un objetivo fundamental en la ingeniería sísmica.

En esta investigación, se busca identificar estrategias que permitan alcanzar un nivel óptimo de vulnerabilidad sísmica teniendo en cuenta la particularidad de la estructuración del edificio, considerando no solo la seguridad y la resistencia estructural, sino también la viabilidad económica del proyecto. El propósito es desarrollar un enfoque integral que combine la ingeniería sísmica con la gestión eficiente de costos, con el fin de lograr un diseño sostenible y seguro que sea económicamente viable.

Hipótesis:

Aumentar la densidad de muros muestra un mejor desempeño de la estructura en comparación de aumentar la resistencia del concreto; sin embargo, esta última es una opción menos costosa.



CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

El actual capítulo abordará ciertos conceptos claves que se necesitan para desarrollar el estudio de vulnerabilidad sísmica. Se comienza con una revisión preliminar de los antecedentes relevantes, luego definiremos qué métodos existen para dicha evaluación. Asimismo, se explican conceptos que nos ayudarán a definir las posibles respuestas de la estructura frente a una actividad sísmica.

2.1 Antecedentes

Velásquez (2006) realizó un estudio detallado centrado en la evaluación de las pérdidas económicas y daños estructurales provocados por sismos de distintas magnitudes, tomado como punto de estudio las edificaciones en Perú, utilizando curvas de fragilidad analíticas. El propósito del estudio fue ayudar a Reducir la vulnerabilidad sísmica en las edificaciones en Perú. Entre los principales objetivos específicos se incluyeron el desarrollo de un método para evaluar la vulnerabilidad sísmica de infraestructuras, la cual se realizó a través de curvas de fragilidad, la elaboración de estas curvas para dos tipos de edificaciones educativas comunes en Perú, y la aplicación de metodologías y herramientas creadas para poder estimar las pérdidas por el sismo originado.

La síntesis del problema se centra en la alta vulnerabilidad de las edificaciones educativas. Además, en Perú no se cuenta con una metodología para evaluar el nivel de riesgo sísmico, el cual se indica que está relacionado con la vulnerabilidad, correspondiente a este tipo de construcciones. Entre las conclusiones más resaltantes, se destacó que las curvas de fragilidad, al ser herramientas probabilísticas, son particularmente eficientes cuando se utilizan en grupos de edificaciones que presentan características estructurales homogéneas. También se encontraron curvas de fragilidad más representativas al utilizar datos de historio de sismos ocurridos, en lugar de señales sintéticas que cumplen con el espectro, el cual está establecido en la norma técnica peruana sismorresistente.

Este antecedente se relaciona con la presente tesis ya que ambas se encuentran involucradas en evaluar la vulnerabilidad sísmica a partir del análisis del resultado de curvas de fragilidad.

2.2. Vulnerabilidad sísmica

La vulnerabilidad sísmica es una característica propia e intrínseca de una estructura o conjunto de ellas, reflejando su tipo de comportamiento específico frente a un evento

sísmico, que se considera la causa del daño resultante. (Sandi,1986).

2.2.1 Métodos para evaluar la vulnerabilidad sísmica

Existen distintas maneras de clasificar las metodologías para evaluar la vulnerabilidad sísmica en infraestructura hechas de concreto armado.

Corsanego y Petrini (1990) propusieron una clasificación que se divide por el tipo de resultados que brindan. Estas pueden ser tales como: Técnicas directas, indirectas, convencionales e híbridas.

Técnicas directas

Las técnicas directas se enfocan en predecir rápidamente el daño recibido a la estructura por un sismo determinado. Existen 2 métodos para este tipo de técnica: Métodos Tipológicos y Métodos Mecánicos. El método tipológico define a las estructuras según características que alteren la respuesta sísmica de las mismas, por consiguiente, la vulnerabilidad sísmica se mide con la probabilidad de que una estructura con una tipología determinada reciba un grado de afectación de daño para un sismo específico. Esta probabilidad de incurrir en daño está relacionada a los daños ocurridos en eventos sísmicos pasados. Esta técnica es válida únicamente para un área donde existan construcciones similares y la fiabilidad de los resultados están basados en la cantidad de muestras. Por otro lado, los métodos mecánicos prevén las respuestas sísmicas de la estructura mediante modelos mecánicos simples y detallados. Los modelos simples consisten en realizar un modelo para diferentes edificaciones con parámetros sencillos que permitan obtener resultados del comportamiento de las estructuras ante un sismo de manera rápida. Mientras que los modelos detallados se centran en el estudio de una estructura individual debido a que requieren de un análisis más profundo en donde todos los detalles de la edificación sean abarcados para obtener una respuesta sísmica específica de la estructura analizada. Se identifican cuatro categorías de análisis para el modelo detallado, que incluyen: el análisis lineal estático, el análisis no lineal estático, el análisis lineal dinámico y el análisis no lineal dinámico.

Técnicas indirectas

Las técnicas indirectas se utilizan exclusivamente para investigaciones de estructuras a gran escala, donde se asigna un índice de vulnerabilidad a la edificación estudiada. Luego, se establece una relación entre el daño y el sismo en un análisis posterior al terremoto. Uno de los métodos más conocidos que emplea esta técnica, es el denominado Método

del Índice de Vulnerabilidad. (Benedetti & Petrini, 1984). El cual consiste en evaluar características esenciales de la edificación, mediante cálculos estructurales, que controlan el daño provocado por un sismo; luego se le asigna un índice de vulnerabilidad. Este índice está vinculado al nivel de daño que ha experimentado la estructura y se determina mediante funciones de vulnerabilidad. Dichas funciones nos posibilitan calcular, el índice de daño, para cada grado de intensidad macro sísmica correspondiente a los terremotos, y evaluar su vulnerabilidad sísmica. (Yépez, 1996).

Técnicas convencionales

Las técnicas convencionales están orientadas a asignar el índice de vulnerabilidad, a cada estructura sin tomar en cuenta las predicciones de daño y solo se usa para obtener una vulnerabilidad relativa, la cual se usa para comparar diferentes edificaciones de la misma tipología y que se encuentren ubicadas en zonas con misma sismicidad. Existen 2 métodos para la obtención de ese índice. El primer método clasifica a la estructura de manera empírica según sus características físicas y el segundo método evalúa la relación capacidad/demanda de la estructura según una norma de diseño sismorresistente (Bonett, 2003).

Luego de la clasificación inicial dada por (Corsanego y Petrini, 1990) surgió un nuevo criterio de clasificación propuesto por (Dolce et al, 1995). Este criterio surgió del análisis de las etapas clave (datos de entrada, método utilizado y resultados obtenidos) en el proceso de análisis de la vulnerabilidad sísmica. Por lo cual, obtuvimos 3 métodos para dicha evaluación: Métodos estadísticos, Métodos analíticos y Métodos de juicio de expertos.

El método estadístico consiste en obtener información acerca de las características de las estructuras, respuestas de las estructuras post - sismo, ensayos de laboratorio de elementos estructurales, datos geotécnicos y geológicos del área en análisis. De acuerdo a los datos obtenidos la vulnerabilidad sísmica, fue determinada en base a la probabilidad, de que la estructura sufra niveles de daños dados por sismos específicos (Vulnerabilidad observada). Este tipo de método empírico brinda información común solo para las estructuras que se ubiquen en la zona de estudio.

En contraste, el método analítico evalúa el desempeño de la estructura ante un terremoto de diferentes magnitudes, mediante un modelo mecánico realizado en un software. Dicho modelo debe representar a detalle las características mecánicas de la estructura en estudio

a fin de obtener resultados certeros frente a una actividad sísmica.

Para finalizar esta clasificación actualizada tenemos el método de juicio por expertos, el cual evalúa la vulnerabilidad de la edificación basado en la opinión de expertos que realizan una evaluación de las características y ubicación de las estructuras en análisis. De acuerdo a la experiencia de los jueces tomarán en cuenta parámetros que consideran esenciales para indicar el comportamiento sísmico de las edificaciones.

2.3 Curvas de Capacidad

Evaluar el comportamiento estructural de una infraestructura, mientras ocurre un evento sísmico implica crear una curva de capacidad, la cual ilustra la correlación entre la fuerza cortante en la base y el desplazamiento en el nivel superior de la estructura. La curva de capacidad se determina al considerar la respuesta inelástica de la estructura, la cual se calcula mediante la implementación de análisis estáticos no lineales, o también dinámicos no lineales. Estos enfoques permiten capturar de manera precisa el comportamiento no lineal de la estructura bajo diferentes condiciones de carga, proporcionando una representación detallada de su capacidad de resistencia frente a fuerzas externa.

En el proceso del análisis estático no lineal o pushover, se aplican cargas laterales incrementales al modelo de la estructura, distribuidas de manera que reflejen las fuerzas de inercia que se anticipan durante la ocurrencia de un sismo. Estas cargas se continúan aplicando hasta alcanzar el colapso, lo que indica el desplazamiento de demanda que el sismo podría imponer a la estructura. (Deierlein et al., 2010). La curva de capacidad obtenida por este análisis también se puede generar por ensayos en laboratorio. Estos ensayos son de desplazamiento incremental y son de 2 tipos: Monotónico y Cíclico.

Los análisis dinámicos tienen una alta complejidad de realización, sin embargo, son los que mejor detallan el comportamiento estructural de la edificación. Su complejidad se justifica en que incluyen factores dinámicos, cambios de amortiguamiento y también se necesitan gran cantidad de acelerogramas para así someterlos a la estructura y realizar un análisis tiempo-historia; en donde para cada acelerograma dado se incrementa su amplitud hasta que la estructura alcance el colapso. La curva de capacidad por este tipo de análisis también puede ser obtenida en laboratorio y se realiza a través de una mesa vibratoria.

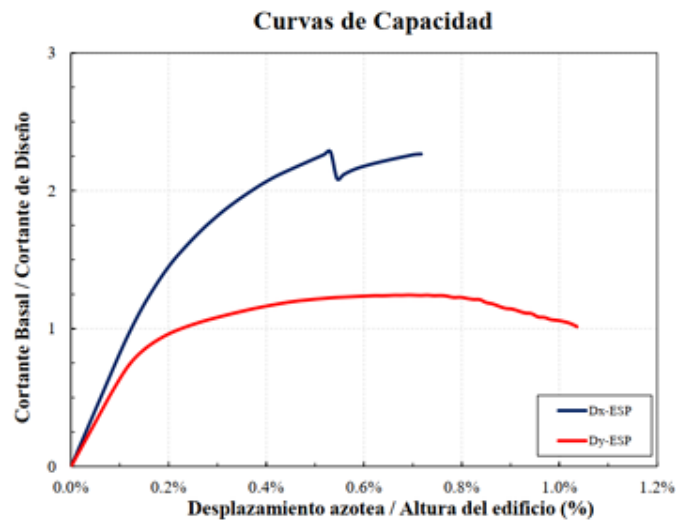


Figura 1. Curvas de capacidad de un edificio aleatorio.
Fuente: (MIDAS, 2019)

2.4 Espectro de demanda

El espectro de demanda establece la acción sísmica que influye sobre la estructura. En este contexto, y específicamente en el caso de Perú, el (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2017) en su Norma E.030, define el espectro a través de lo que se denomina parámetros sísmicos. Además, en el apartado 26.2 de esta norma, se describe el espectro de pseudo-aceleraciones en las direcciones horizontales mediante la siguiente expresión.

$$S_a = \frac{Z \cdot U \cdot C \cdot S}{R} \cdot g \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde Z viene a ser factor de zona, U factor de uso, C el factor de amplificación sísmica, S es el factor de suelo, R es el factor de reducción (considerado 1 para un análisis no lineal) y g es la gravedad.

Es importante considerar que existen también espectros generados por señales sísmicas reales que pueden influir en el comportamiento estructural. Estos espectros, a diferencia del espectro de diseño parametrizado por la norma, representan la variación de la amplitud de las vibraciones sísmicas en función de la frecuencia.

Los espectros generados por señales sísmicas reales proporcionan información detallada sobre la distribución de energía en diferentes frecuencias durante un evento sísmico específico. Estos espectros son útiles para comprender mejor la naturaleza y las características del movimiento sísmico real, lo que puede influir en el diseño y La valoración de la respuesta estructural de una construcción.

2.5 Desempeño sísmico (Método de coeficientes – Sectorización SEAOC)

El método de análisis de una edificación basado en el desempeño nace en 1995, publicada en el documento Visión 2000 por la Asociación de ingenieros estructurales de California de acrónimo (SEAOC). En dicho documento presentan cuatro objetivos principales que la estructura que debe alcanzar: Resistir sismos menores sin apreciar daños, resistir sismos moderados sin daños estructurales, pero con algunos daños no estructurales; resistir sismos mayores con daños estructurales y no estructurales y por último resistir los sismos más severos que haya podido afectar el edificio sin colapsar. Estos objetivos se observan en la Figura 5, donde se distinguen distintos niveles de desempeño mínimos que se deben cumplir determinados tipos de estructuras sometidas por diferentes tipos de sismos según su periodo de retorno.

		Nivel de desempeño			
		Completamente operativo	Operativo	Resguardo de la vida	Cerca al colapso
Sismo de diseño	Sismo frecuente (45 años)				
	Sismo ocasional (75 años)				
	Sismo raro (475 años)				
	Sismo muy raro (970 años)				




		
Edificación común	Edificación esencial	Edif. de seguridad crítica

Figura 2. Desempeño de edificios comunes, esenciales y de seguridad crítica.
Fuente: (Muñoz, 2018).

No obstante, antes de clasificar el nivel de desempeño, Es fundamental derivar la respuesta de la estructura a partir del espectro de demanda elástica, ya que esto permite una evaluación precisa del comportamiento estructural bajo condiciones sísmicas. De este modo, se garantiza que la respuesta obtenida refleje adecuadamente las exigencias impuestas por el espectro, facilitando una mejor comprensión de cómo la estructura reaccionará frente a las fuerzas sísmicas esperadas, establecido en la Norma E.030. Para identificar el punto de respuesta en la curva de capacidad, se pueden emplear dos enfoques: inicialmente el método de los espectros y; por otro lado, el método de coeficientes descrito en el ASCE 41-13.

El método de los espectros fue propuesto inicialmente por el (Applied Technology Council - 40, 1996) y consiste en interceptar el espectro de capacidad junto con el espectro de

demanda obteniendo el punto de respuesta. El espectro de capacidad se obtiene de la curva de capacidad, la pseudo - aceleración se calcula dividiendo la cortante basal entre la masa efectiva y el pseudo - desplazamiento se calcula dividiendo el desplazamiento de la azotea entre el factor de participación. Mientras que el espectro de demanda es el definido por la Norma E.030 mediante parámetros sísmicos que varía según la zona, el tipo de uso, el período y el tipo de suelo de la edificación.

El método de los espectros, que fue inicialmente propuesto por el Applied Technology Council en el informe ATC-40 de 1996, implica la intersección del espectro de capacidad con el espectro de demanda para determinar el punto de respuesta. En este proceso, la curva de capacidad se emplea para calcular el espectro de capacidad. Para obtener el espectro de capacidad, se calcula la pseudo - aceleración dividiendo la cortante basal entre la masa efectiva, mientras que la pseudo - desplazamiento se determina dividiendo el desplazamiento en la azotea por el factor de participación. De esta manera, se facilita una evaluación precisa del comportamiento de la estructura bajo condiciones sísmicas al combinar estos elementos analíticos. Por otro lado, el espectro de demanda está definido por la Norma E.030 y se basa en parámetros sísmicos que varían en función de la zona, el uso, el período y el tipo de suelo de la edificación.

Por otro lado, el método de los coeficientes se basa en una respuesta lineal elástica de un modelo simplificado de un grado de libertad, la cual se multiplica por una serie de coeficientes (C0 a C2) con el propósito de estimar el desplazamiento global máximo, conocido como desplazamiento objetivo. Esta metodología, descrita en el estándar (ASCE/EI 41-17, 2017), permite una aproximación precisa al evaluar la respuesta de la estructura bajo condiciones sísmicas, ajustando la estimación del desplazamiento mediante la aplicación de estos coeficientes. El procedimiento comienza con la curva de capacidad idealizada, a partir de la cual se establece un período efectivo derivado de un período inicial, ya que durante el cambio del rango elástico al inelástico se produce una pérdida de rigidez. Por último, el esquema del procedimiento y la fórmula para calcular el desplazamiento se presentan en la Figura 3.

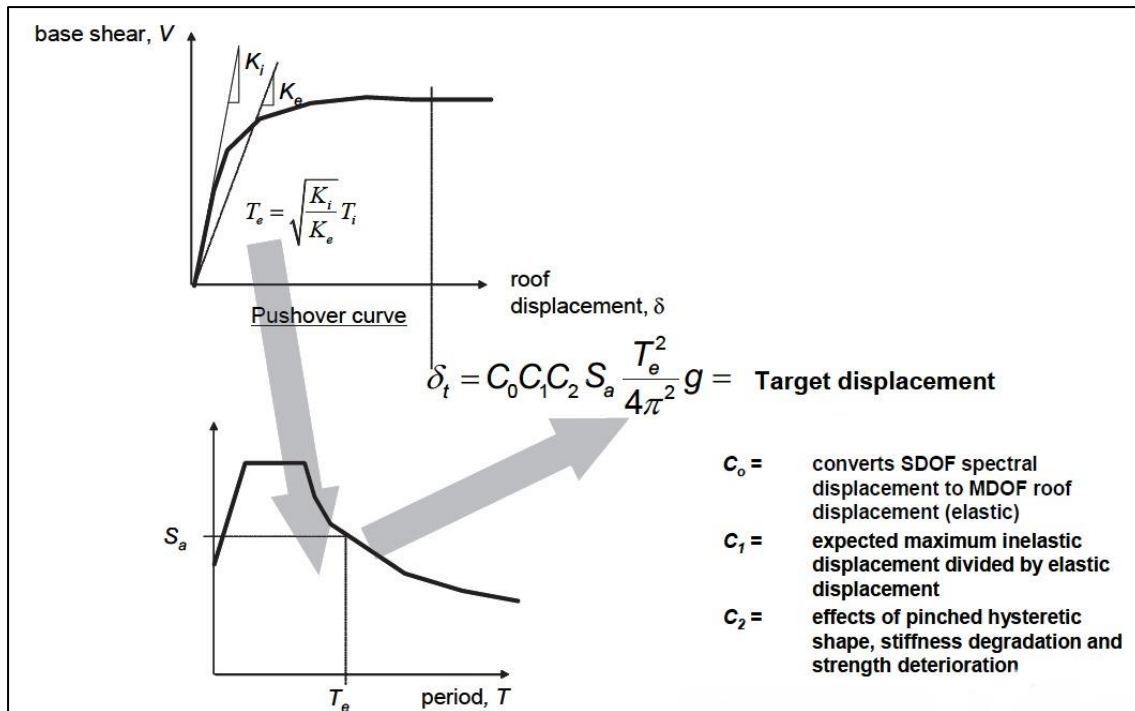


Figura 3. Representación gráfica del método de los coeficientes.

Fuente: (FEMA, 2005)

El cálculo de estos coeficientes está dado por las siguientes tablas y ecuaciones:

El valor de C_0 se refiere al factor utilizado para transformar el desplazamiento espectral de un sistema de un grado de libertad (SDOF) al desplazamiento en la azotea de un sistema de múltiples grados de libertad (MDOF).

Tabla 1. Factor C_0 .

Número de niveles	Edificios a corte		Otro tipo de edificios
	Patrón de cargas triangular	Patrón de cargas uniforme	Patrón de cargas uniforme
1	1.0	1.0	1.0
2	1.2	1.2	1.2
3	1.2	1.2	1.3
5	1.3	1.2	1.4
10 o más	1.3	1.2	1.5

Nota. Tomado de “Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings”, por ASCE, 2017.

El valor de C_1 hace referencia al factor entre el desplazamiento máximo inelástico esperado con el desplazamiento calculado por la respuesta elástica lineal.

$$C1 = 1 + \frac{\mu \text{ strenght} - 1}{a T_e^2} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde $\mu \text{ strenght}$ se define como la relación entre la demanda de resistencia elástica con la resistencia al inicio de la fluencia.

$$\mu \text{ strenght} = \frac{Sa}{Vy/W} \cdot Cm \quad (\text{Ec. 2})$$

Tabla 2. Factor de masa efectiva Cm .

Número de niveles	Edificio de concreto aporcionado	Edificios de concreto tipo muros
1-2	1.0	1.0
3 o más	0.9	0.8

Nota. Tomado de “Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buligings”, por ASCE, 2017.

Te representa el período fundamental efectivo del edificio en la dirección que se está analizando, considerando así la respuesta dinámica de la estructura en esa orientación específica. Ti es el período fundamental elástico. Ki corresponde a la rigidez lateral elástica, mientras que Ke se refiere a la rigidez lateral efectiva.

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Tabla 3. Factor de sitio “a”.

Clase de Sitio	<i>a</i>
A. Roca Dura	130
B. Roca	130
C. Suelo muy denso y roca blanda	90
D. Suelo rígido	60
E. Suelo arcilloso blando	60

Nota. Tomado de “Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buligings”, por ASCE, 2017.

El factor C2 representa la componente histerética de una estructura, considerando la degradación de la rigidez que resulta de los efectos combinados de carga y descarga. Específicamente, este factor refleja cómo la rigidez estructural se ve afectada durante los ciclos de carga y descarga, proporcionando una medida de la reducción en la capacidad de la estructura para resistir fuerzas debido a estos procesos. Este factor se calcula mediante la Ec.4.

$$C2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{\mu \text{ strength} - 1}{T_e} \right)^2 \quad (\text{Ec. 4})$$

2.6 Curvas de fragilidad

Las curvas de fragilidad se definen como la representación gráfica de la función de distribución acumulativa que muestra la probabilidad de alcanzar o superar un estado de daño límite específico. Este análisis tiene en cuenta la respuesta estructural ante una acción sísmica particular, proporcionando así una visualización detallada de cómo la estructura podría comportarse frente a diferentes niveles de intensidad sísmica. En otras palabras, estas curvas permiten evaluar la probabilidad de que una estructura experimente un cierto nivel de daño en función de la magnitud y características del evento sísmico considerado. (FEMA, 1999). Estas curvas se establecen a partir de un valor promedio de un parámetro de demanda vinculado a un umbral de daño, así como la variabilidad relacionada con dicho estado. La probabilidad suele graficarse junto a variables que representen la respuesta estructural de la edificación tales como el desplazamiento de la azotea, aceleración pico alcanzada o deriva de entrepiso (Vielma et al., 2007). La Figura 4 nos muestra un ejemplo de curvas de fragilidad mostrando 4 estados donde en el eje horizontal tenemos al desplazamiento espectral como parámetro de demanda y el eje vertical denotado por la probabilidad de exceder o llegar a un estado de daño; el conjunto de probabilidades obtenidas a partir de una gama de respuestas de la estructura se representa mediante matrices de probabilidad de daño.

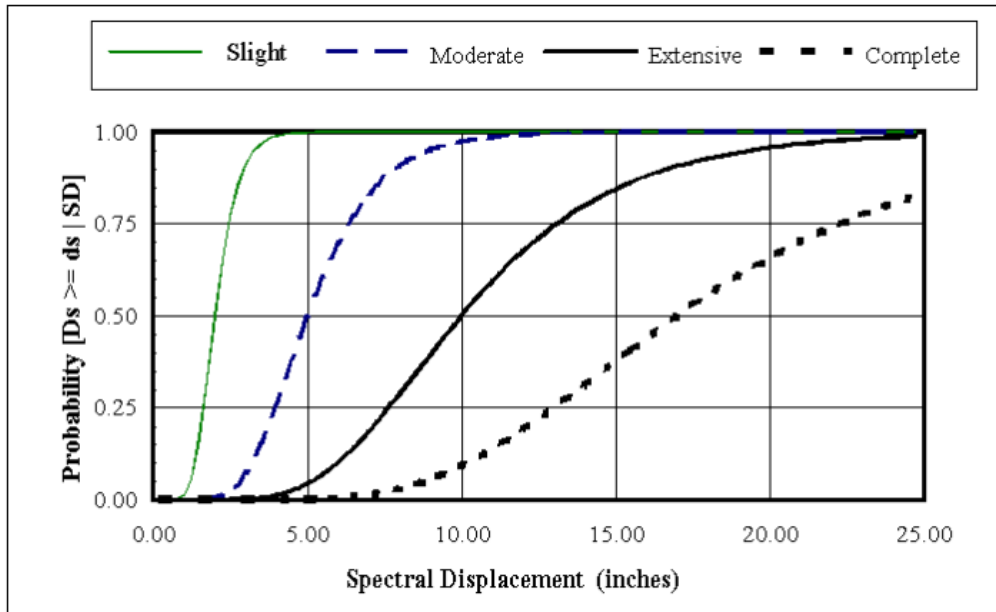


Figura 4. Ejemplo de curvas de fragilidad para 4 diferentes estados de daño. Fuente: (FEMA, 2003)

Para obtener la probabilidad de poder alcanzar o exceder un nivel de estado limite, que conforma un tipo de daño se usa fórmulas de distribución log normal.

$$P(ED \geq EDi/PIS) = \Phi\left[\frac{1}{\beta_{PIS,EDi}} \ln\left(\frac{PIS}{PIS}\right)\right] \quad (\text{Ec.5})$$

En donde: $P(ED \geq EDi)$ representa la Probabilidad de alcanzar o exceder el estado de daño, PIS es Parámetro indicador la intensidad sísmica, \overline{PIS} es la media del parámetro indicador la intensidad sísmica y β es desviación estándar del logaritmo natural de PIS .

2.7 Índice de daño esperado

Utilizando las probabilidades asociadas a cada nivel de daño $P(dsi)$, que se obtienen a partir de las curvas de fragilidad, es posible determinar el índice de daño esperado (ID). Este índice refleja el promedio normalizado de los diferentes niveles de daño y ofrece una estimación del daño total anticipado en la estructura.

$$ID = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n iP(dsi) \quad (\text{Ec.6})$$

En esta situación, n representa el número de estados de daños que se están tomando en cuenta asociados a niveles de deformación, agrietamientos o deterioro de la estructura, que

en este caso son 4. Además, $P(dsi)$ representa la probabilidad de que se presente un estado de daño d_{si} . La figura 5 ilustra el índice de daño (ID) calculado a través de un enfoque determinista, utilizando las curvas de fragilidad adecuadas y teniendo en cuenta desplazamientos espectrales que oscilan entre 0 y 30 cm.

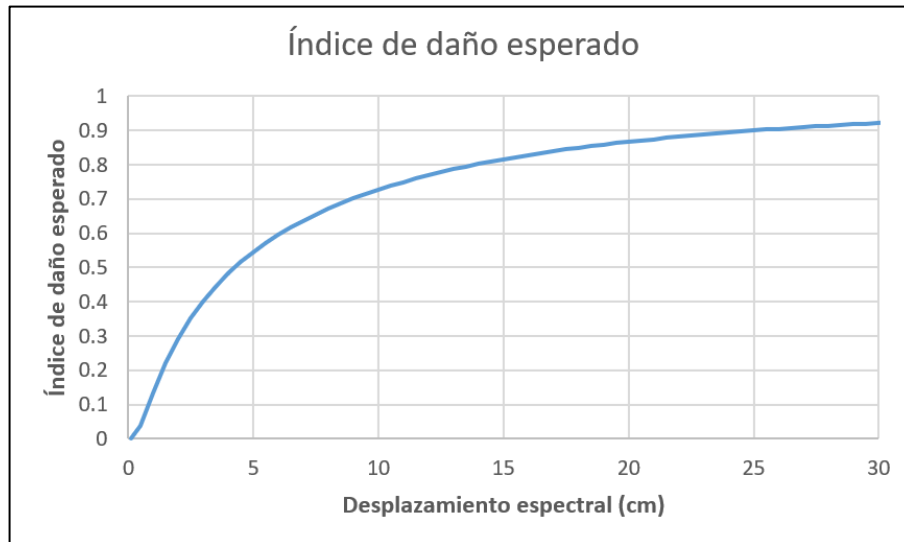


Figura 5. Ejemplo de índice de daño esperado. Fuente: Propia.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

El presente capítulo tiene como finalidad detallar el procedimiento a seguir para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica. Partiendo de los métodos descritos en el acápite anterior, se opta por un método analítico para el análisis estático no lineal o pushover mediante el programa Etabs y la metodología Hazus (1999), método estadístico, para la obtención de las curvas de fragilidad.

3.1 Selección del método de evaluación de la vulnerabilidad

Para la elección del método a usar tenemos que plantear los objetivos de la presente tesis. Estos objetivos se fundamentan en analizar las respuestas estructurales de un edificio frente a un evento sísmico, modificando la densidad de los muros y la resistencia a la compresión del concreto, con el propósito de evaluar la vulnerabilidad sísmica. Por lo tanto, es aconsejable emplear un método que se ajuste a estos objetivos y que asegure resultados confiables.

A continuación, la tabla 4 presenta un análisis comparativo que resalta las fortalezas y debilidades de cada método.

Tabla 4.

Comparación entre las formas de evaluación respecto a su vulnerabilidad sísmica.

Método	Ventaja	Desventaja
Analítico	El modelo mecánico es detallado a rigurosidad, lo cual representa de manera real el comportamiento sísmico de la estructura sin necesidad de realizar el análisis post sismo.	El modelamiento de la edificación es de alta complejidad debido a que los parámetros para representar el comportamiento de la estructura en el software; son sensibles y su no adecuada configuración conlleva a una respuesta estructural no real.

Método	Ventaja	Desventaja
Estadístico	Las respuestas estructurales de varias edificaciones son censadas post sismo y son tomadas en cuenta para llevar a cabo la evaluación de la vulnerabilidad en las estructuras	La vulnerabilidad sísmica se determina para una zona particular, donde las edificaciones comparten una tipología similar, sin considerar las particularidades de la estructura en cuestión.
Juicio de expertos	La vulnerabilidad sísmica es dada por ingenieros que poseen vasta experiencia en el análisis estructural y están más que capacitados para determinar el comportamiento sísmico de la estructura.	La actividad sísmica es impredecible; es por ello que, es complicado anticipar el comportamiento estructural frente a un sismo futuro a pesar de contar con experiencias pasadas y expertos en el tema.

Teniendo en cuenta que se analiza una edificación en particular considerando dos parámetros a variar, se opta por el método analítico para el análisis estático no lineal de las estructuras debido a que genera resultados precisos y además nos brinda la posibilidad de representar de manera gráfica el comportamiento sísmico de las estructuras a analizar. El análisis estático no lineal o pushover se realizará a través del programa estructural ETABS, el cual permite modelar cada estructura de manera singular. El modelamiento de las estructuras será realizado en base al manual del programa ETABS y documentos con información mecánica de los materiales como el acero y el concreto; para representar una idealización completa de la estructura. De esta manera los resultados del comportamiento sísmico para cada modelo será el más certero. Seguidamente se optó la metodología Hazus (1999), método estadístico, desarrollado por *Federal Emergency Management Agency* para la obtención de las curvas de fragilidad. El principal motivo es que su base de inventario de edificios es extensa, lo cual facilita la evaluación de la vulnerabilidad de las edificaciones en función de su tipo, altura, diseño estructural, prácticas de construcción y concordancia con los códigos de construcción sísmica, etc. Justamente estas son las variables de entrada a considerar en el análisis. Según sea el caso, esta metodología te

brinda un valor de media del parámetro sísmico escogido para cada estado de daño; asimismo brinda la desviación estándar para formar las curvas con distribución log normal. En por ello que se considera que la metodología Hazus es viable y garantiza curvas de fragilidad en base a resultados precisos.

3.2 Características y modelación de la edificación en estudio

Se ha abordado el siguiente edificio como caso académico; el uso del edificio es para vivienda ubicado en Lima-Perú en el distrito de San Juan de Lurigancho (Suelo S2). Asimismo, si bien no se cuenta con arquitectura base real, se permite realizar las variaciones de densidad de muro y resistencia a compresión del concreto. Además, como se muestra en la figura 6 las luces de los pórticos son pequeñas por ende se tiene un sobredimensionamiento de los pórticos. A continuación, en las siguientes figuras, se mostrará la configuración estructural de la edificación inicial base en vista planta y 3D del modelo realizado en Etabs.

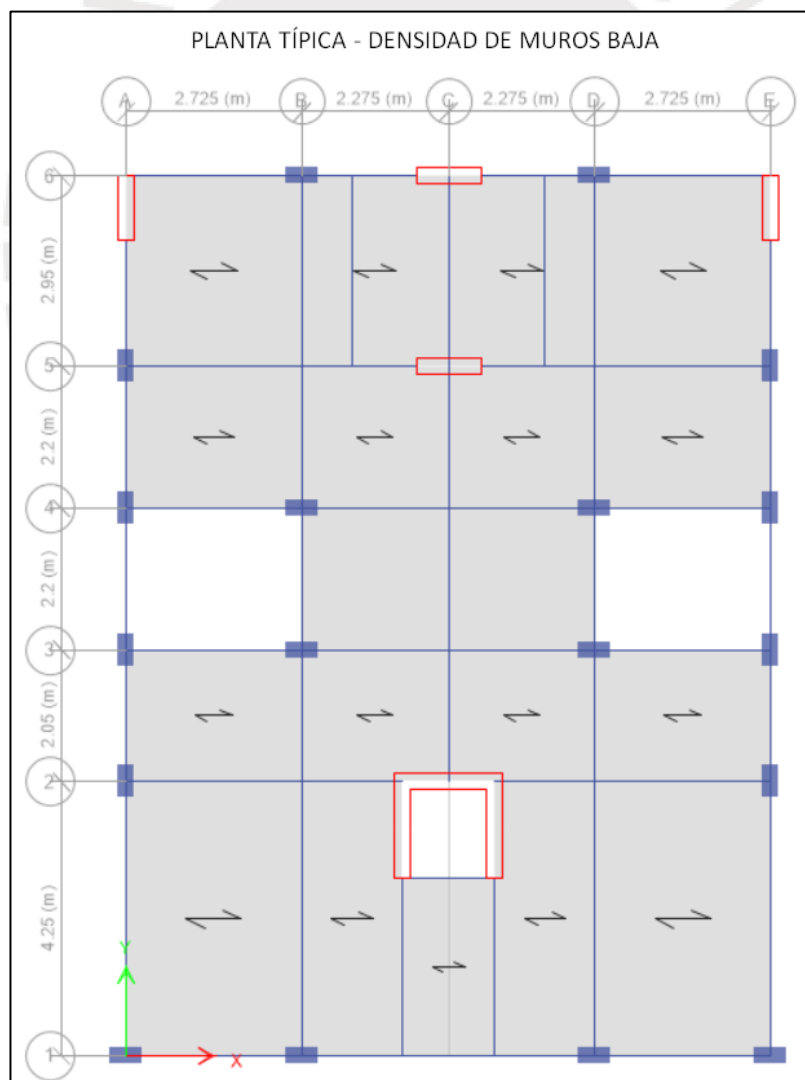


Figura 6. Planta típica del modelo de baja densidad de muros. Fuente propia.

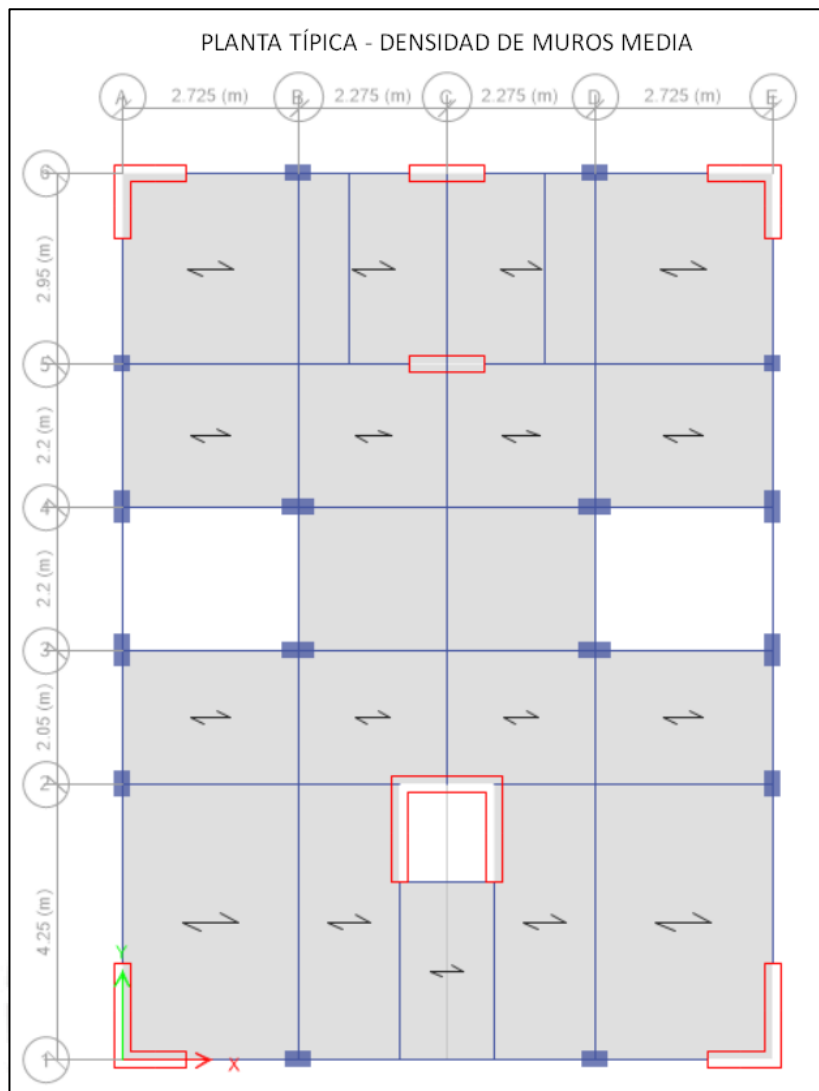


Figura 7. Planta típica del modelo de media densidad de muros. Fuente propia.

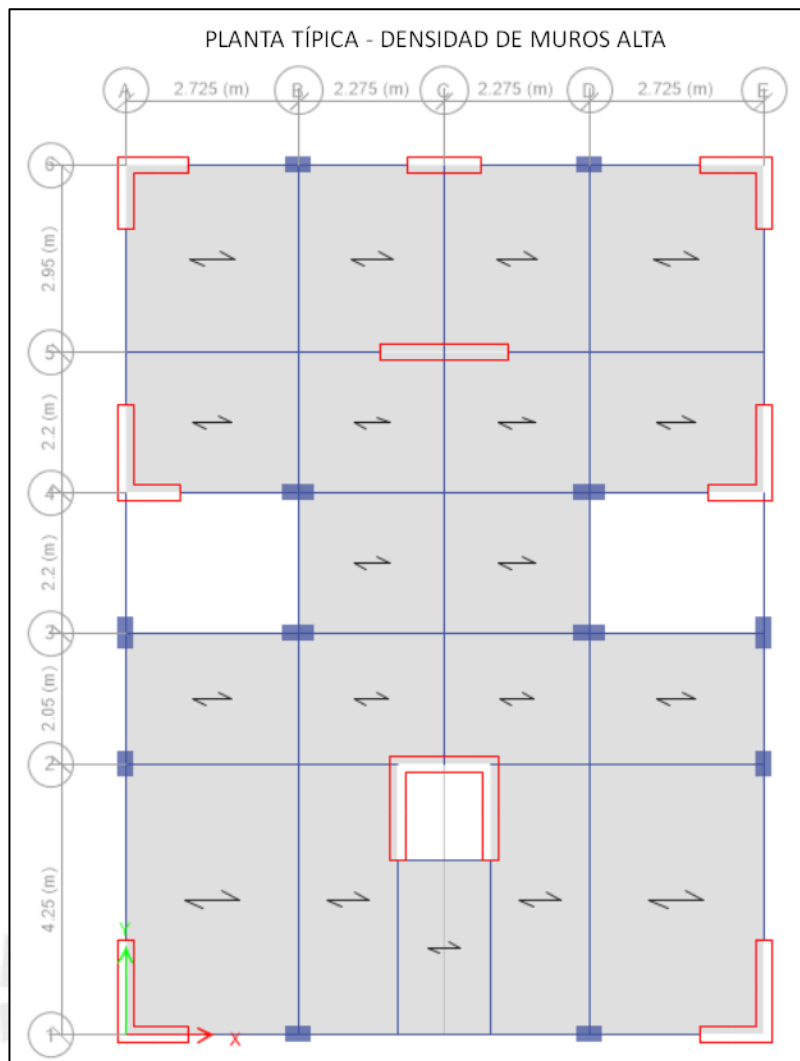


Figura 8. Planta típica del modelo de alta densidad de muros. Fuente propia.

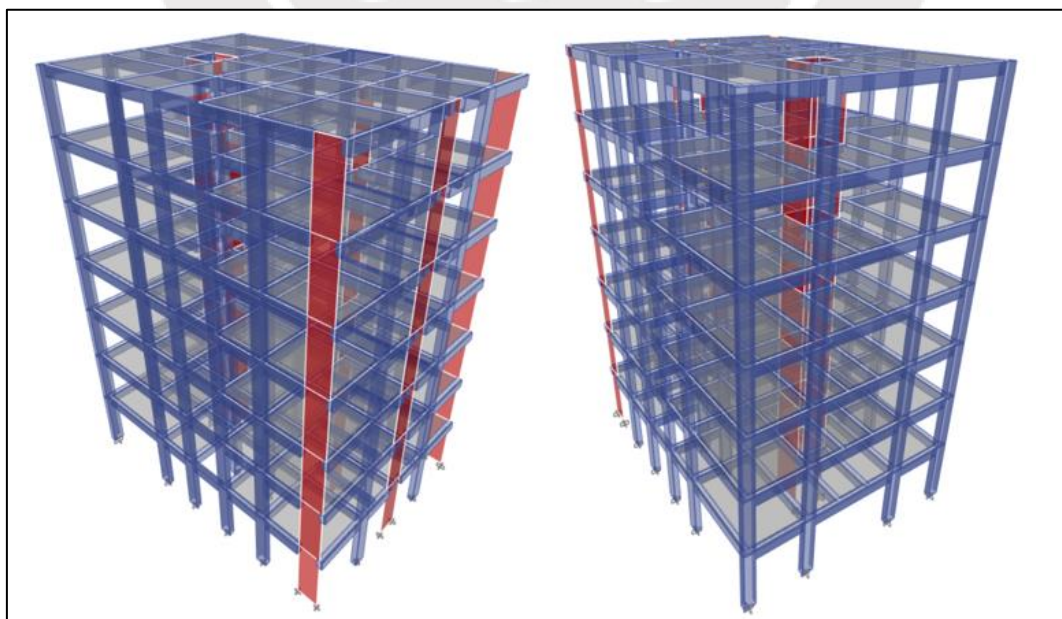


Figura 9. Esquema 3D del modelo de baja densidad de muros. Fuente propia.

Las tablas siguientes presentan las propiedades geométricas y los componentes estructurales del edificio.

Tabla 5. Características geométricas del edificio.

Número de Pisos	Altura total (m)	Área total por piso (m ²)	Altura de pisos (m)	
			Primer Piso	Pisos Típicos
7	18.8	136.5	2.9	2.65

Tabla 6. Elementos estructurales.

Elemento estructural	Dimensiones (m)
Columnas	0.25 x 0.50 / 0.25 x 0.40 / 0.25 x 0.25
Vigas internas y perimetrales	0.25 x 0.40
Espesor de muros	0.25
Losa aligerada y macizas	0.20

3.2.1 Principales variables a considerar en la investigación

Las dos variables en estudio son la densidad de muros o placas y la resistencia del concreto a la compresión.

En esta investigación se variará la densidad de muros, contemplando tres casos: La estructura con una densidad de muros baja, la misma estructura con densidad de muros media y finalmente con una densidad de muros alta. Para el cálculo del tipo de densidad de muros se realiza mediante la ecuación 6, los valores serán expuestos en la tabla 7. El uso importante de esta variable nos permitirá conocer aproximadamente cuál es la densidad de muros óptima tal que se presente una vulnerabilidad sísmica aceptable.

$$\text{Densidad de muros} = \frac{\sum L * t}{A_p} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde L es la longitud de muros en su respectiva dirección, t es el espesor y A_p viene a ser el área en planta típica.

Tabla 7. Cálculo de la densidad de muros.

	Densidad De Muros		
Dirección	Baja	Media	Alta
X	0.67%	1.4%	1.9%
Y	0.9%	1.4%	1.9%

De igual manera, se considerará variar la resistencia del concreto a la compresión para tres casos; además se sabe que el módulo de elasticidad varía según la resistencia, según Park y Paulay (1978) se estima el “ E_c ” mediante: $57000 * \sqrt{f'c}$ en unidades de lb/pulg² que viene a ser aproximadamente $15000 * \sqrt{f'c}$ en unidades de kg/cm² para concretos de peso que varían entre 90 y 155 lb/pie³. Por ende, al igual que el caso de la densidad de muros, se observará una óptima resistencia del concreto para obtener una vulnerabilidad sísmica aceptable.

Es importante señalar que, aunque se proporciona una fórmula estándar para estimar el módulo de elasticidad, existe una considerable variabilidad en este parámetro debido a factores como la composición del concreto, el método de mezcla y el proceso de curado.

3.3 Obtención de la respuesta lineal de la estructura

Se describirá a continuación el proceso y los aspectos a tener en cuenta en el programa Etabs para modelar la primera estructura, que corresponde a muros de baja densidad. Posteriormente, se abordará el modelado de otra estructura, teniendo en cuenta la segunda variable de estudio relacionada con la resistencia a la compresión del concreto.

Para el estudio de la estructura de Muros de densidad baja en Etabs, en primer lugar, se realiza el modelo lineal elástico y se ejecuta un análisis sísmico para verificar qué derivas se obtienen y verificar si se estén dentro o aproximados a la que estipula la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente que es de 7/1000. Y para llevar a cabo este análisis, se define los tipos de materiales a usar; los cuales son el concreto con $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ y acero grado 60. Para definir estos materiales se tiene que insertar sus propiedades mecánicas como: Peso por volumen (tonf/m^3), Módulo de elasticidad (tonf/m^2).

Para el concreto se usará: peso por volumen = 2.4 tonf/m^3 , Modulo de elasticidad = $15000 * \sqrt{f'c} = 2173706.5 \text{ tonf/m}^2$ y $f'c=2100 \text{ tonf/m}^2$.

Section	Property	Value	Unit
General Data	Material Name	Concreto 210 kg/cm2	
	Material Type	Concrete	
	Directional Symmetry Type	Isotropic	
	Material Display Color		
	Material Notes		
Material Weight and Mass	Specify Weight Density	<input checked="" type="radio"/>	
	Specify Mass Density	<input type="radio"/>	
	Weight per Unit Volume	2.4	tonf/m³
Mechanical Property Data	Mass per Unit Volume	0.244732	tonf-s²/m⁴
	Modulus of Elasticity, E	2173706.51	tonf/m²
	Poisson's Ratio, U	0.15	
	Coefficient of Thermal Expansion, A	0.0000099	1/C
	Shear Modulus, G	945089.79	tonf/m²

Figura 10. Definición de propiedades del concreto en Etabs. Fuente propia.

Luego se define las propiedades de sección de cada elemento estructural y consta de columnas, vigas, placas y losas aligeradas y macizas. Las dimensiones se presentan en la Tabla 5.

Nota: Se hizo uso de 2 varillas de acero diferentes para el diseño en las vigas de 25x40, las cuales son de 5/8" y 1/2".

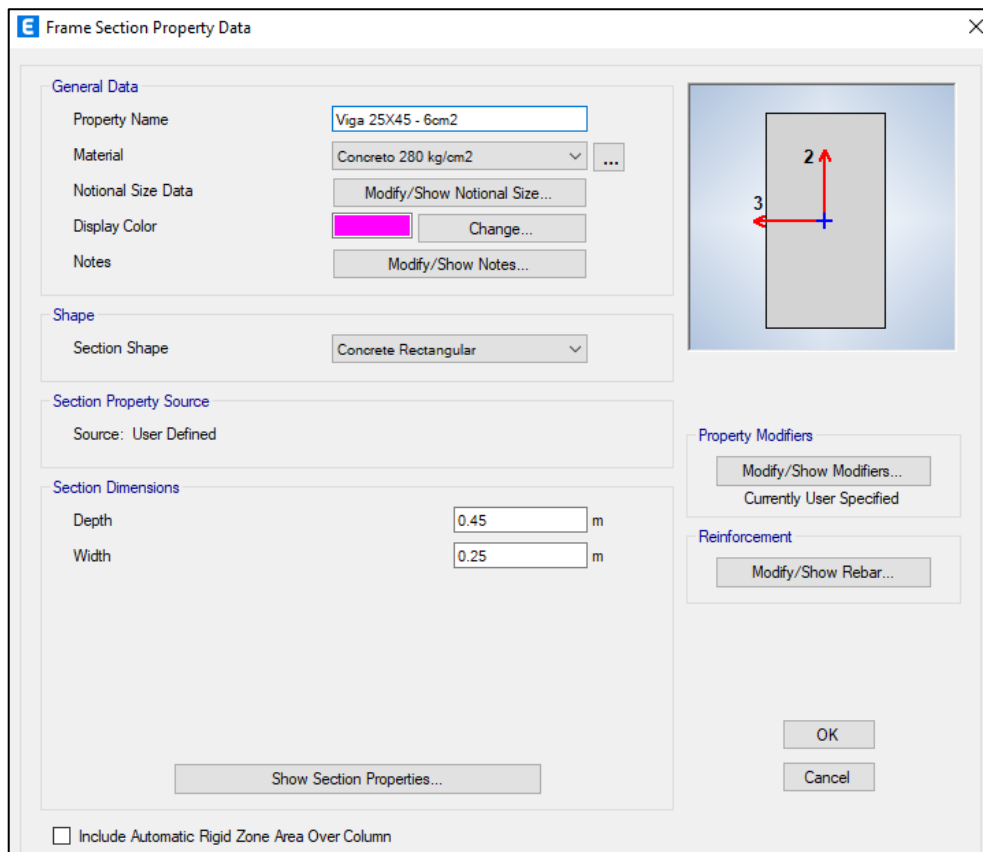


Figura 11. Definición de las propiedades de sección para las Vigas en Etabs. Fuente propia.

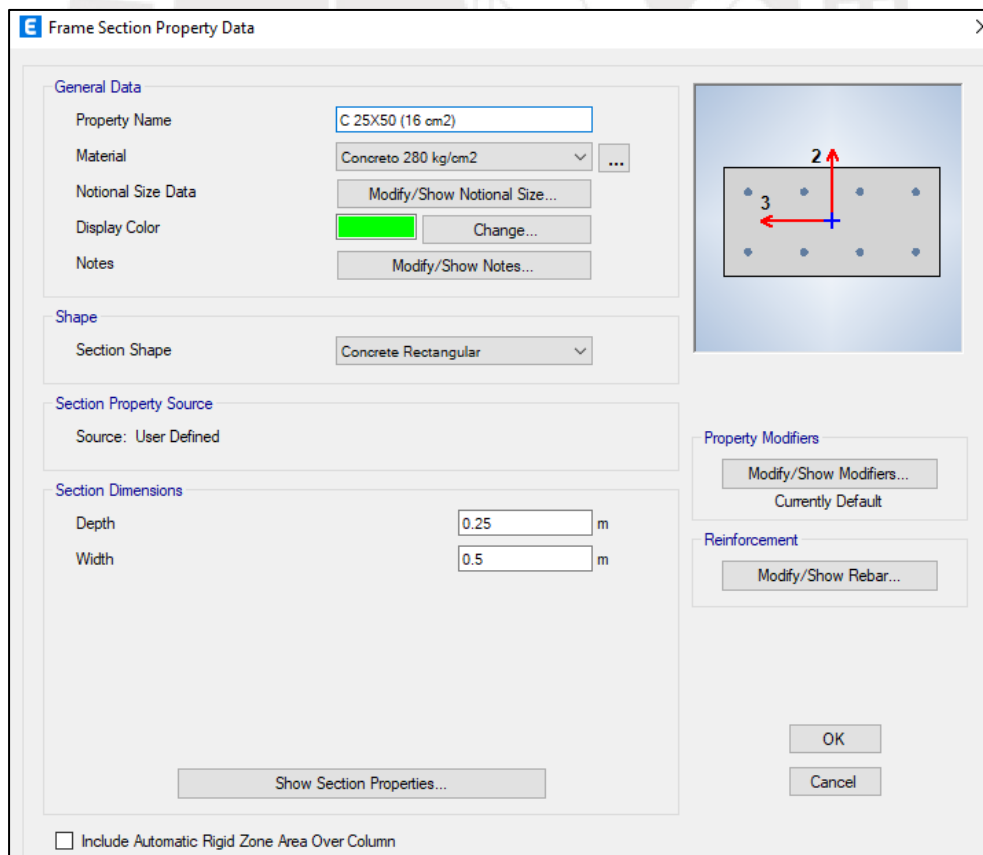


Figura 12. Definición de las propiedades de sección para las Columnas en Etabs. Fuente propia.

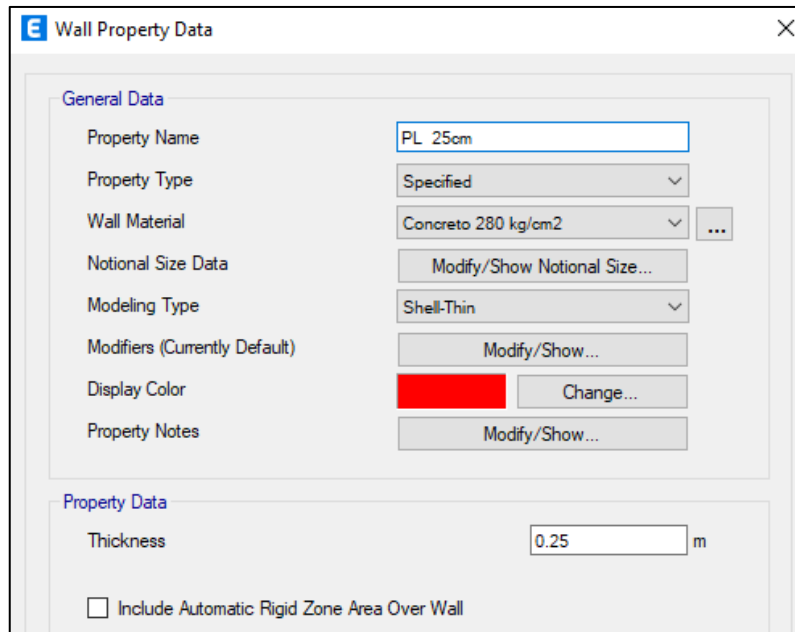


Figura 13. Definición de las propiedades de sección para las Placas en Etabs. Fuente propia.

Al espesor del aligerado se le asignó como casi cero, más adelante se coloca la carga distribuida muerta y viva de acuerdo al uso multifamiliar de la estructura.

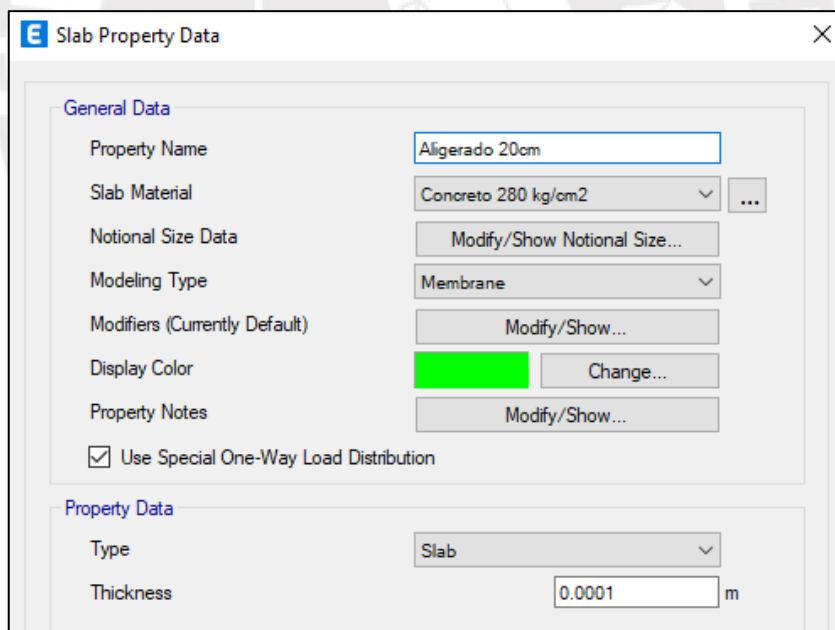


Figura 14. Definición de las propiedades de sección para las losas aligeradas en Etabs. Fuente propia.

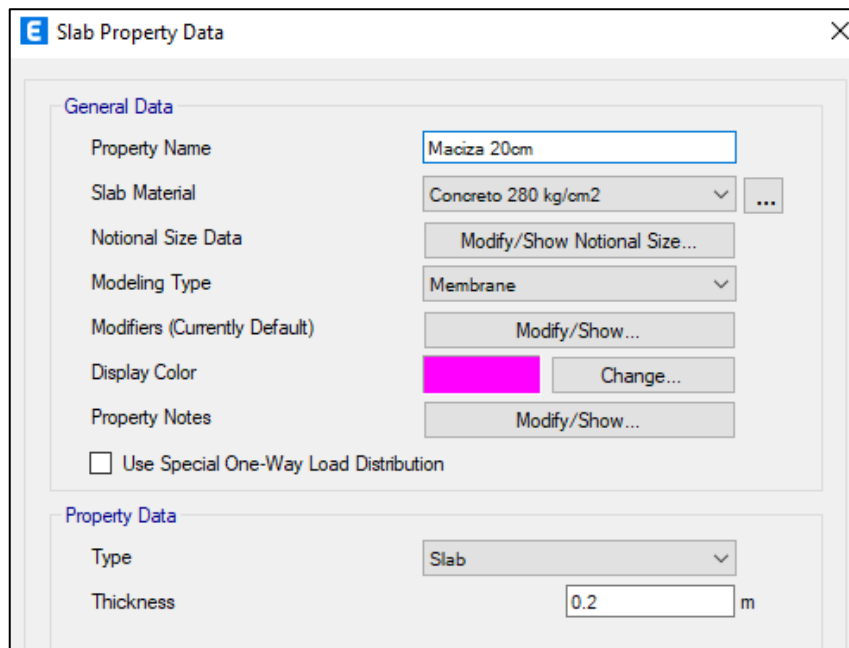


Figura 15. Definición de las propiedades de sección para las losas macizas en Etabs. Fuente propia.

Después de haber realizado los pasos anteriores, se efectuó la colocación de los elementos estructurales con una configuración estructural dada en la Figura 5. Luego de tener el modelo realizado se le asigna empotramiento en la base y se procede a colocar las cargas distribuidas a lo largo de las losas y vigas que tengan por encima tabiques. Para terminar el modelo se les asigna diafragma rígido a todas las plantas.

Las cargas para las losas aligeradas de uso multifamiliar se usarán:

Tabla 8. Determinación de las cargas muertas y vivas en losas aligeradas.

Carga Muerta (ton/m ²)		Carga Viva (ton/m ²)	
Peso propio	0.3	cv	0.2
Piso terminado	0.1		
cm	0.4		

Tabla 9. Cálculo de la carga por tabiquería en vigas.

Tabiquería (ton/m)	
peso específico	1.35
espesor	0.15
altura	2.4
W _{tab}	0.486

Las cargas distribuidas en las vigas varían entre 0.101 tonf/m , 0.158 tonf/m , 0.395 tonf/m y 0.43 tonf/m, esto es tomando en cuenta el metrado de cargas que se realizó.

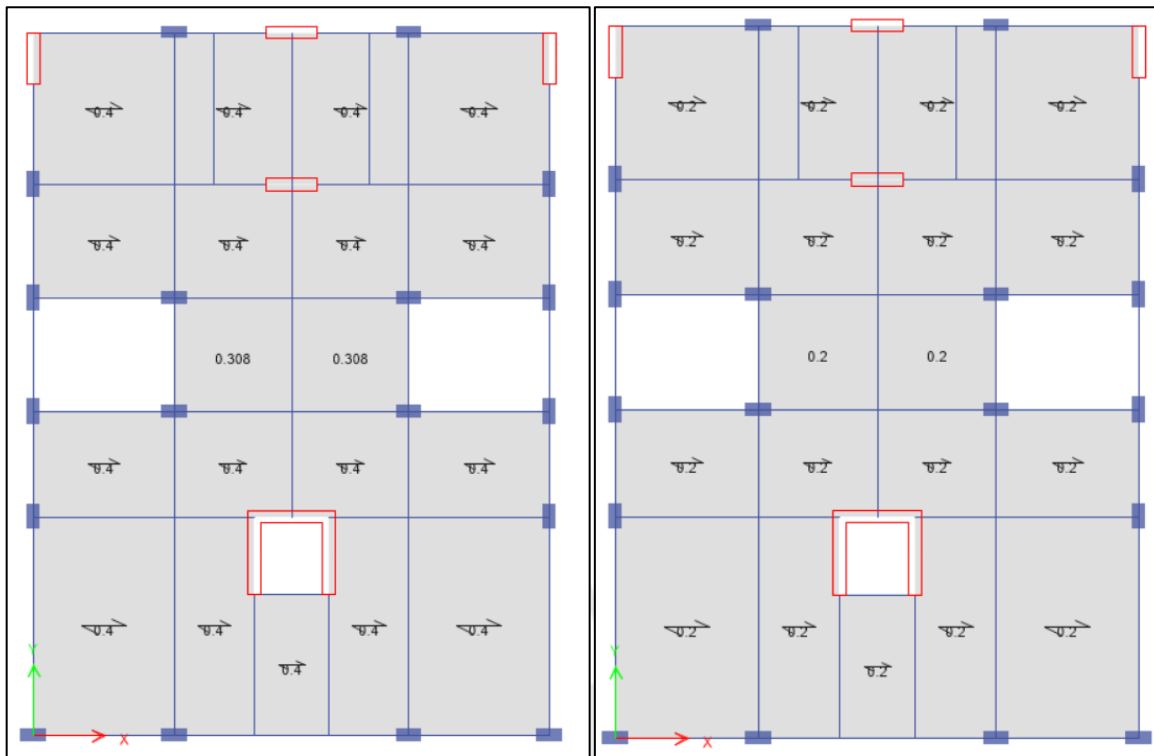


Figura 16. Asignación de las cargas muertas y vivas para las losas, datos para el Etabs. Fuente propia.

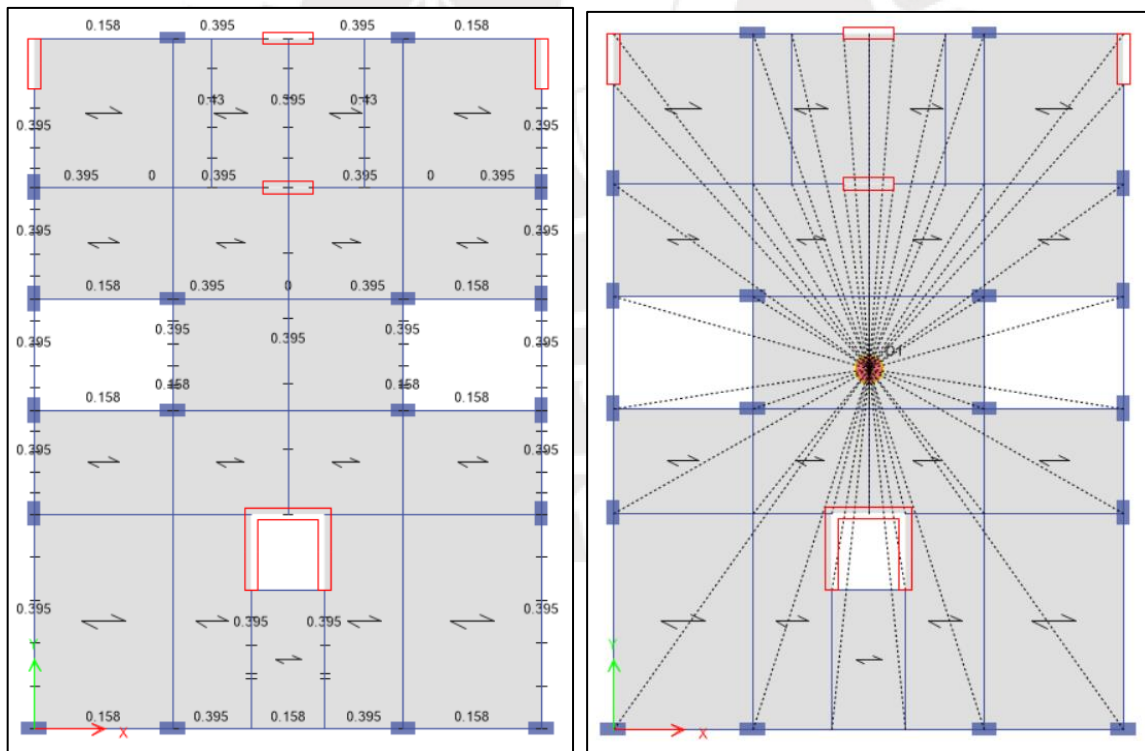


Figura 17. Asignación de las cargas muertas en vigas y asignación de diafragma rígido en cada piso en Etabs. Fuente propia.

Una vez terminado lo anterior se define un caso de Masa a la estructura y los casos modales.

La definición de la Masa sísmica lo toma de los Casos de carga: Carga Muerta =1 y Carga Viva= 0,25 para edificios comunes. Y en los casos modales se le coloca 21 debido a que son 7 pisos y 3 grados de libertad dinámicos por piso; sin embargo, son los 9 primeros modos los cuales alcanzan el 90% de masa participativa como se verá más adelante en la figura 20.

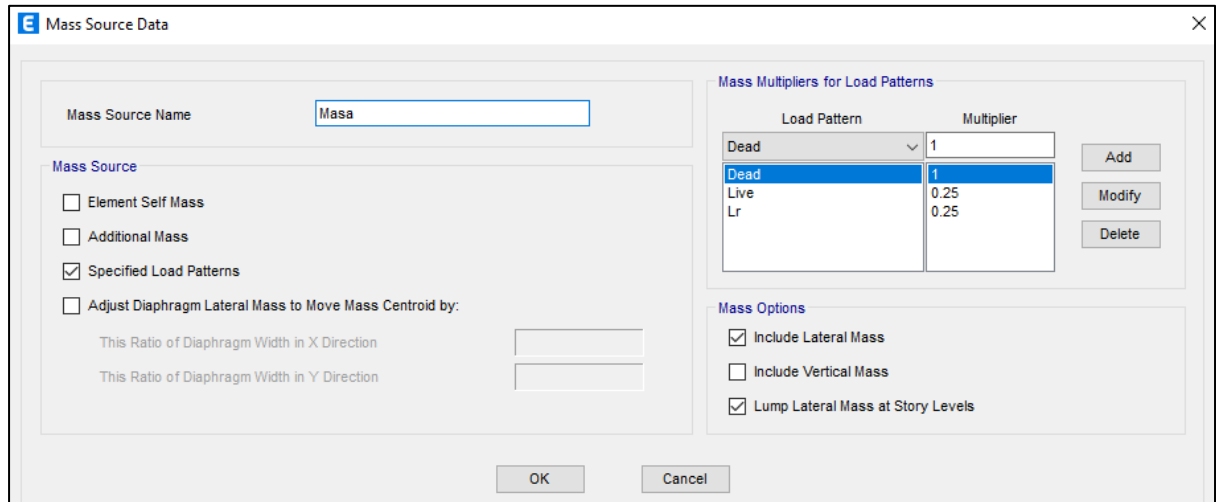


Figura 18. Definición de la masa sísmica para una edificación común en Etabs. Fuente propia.

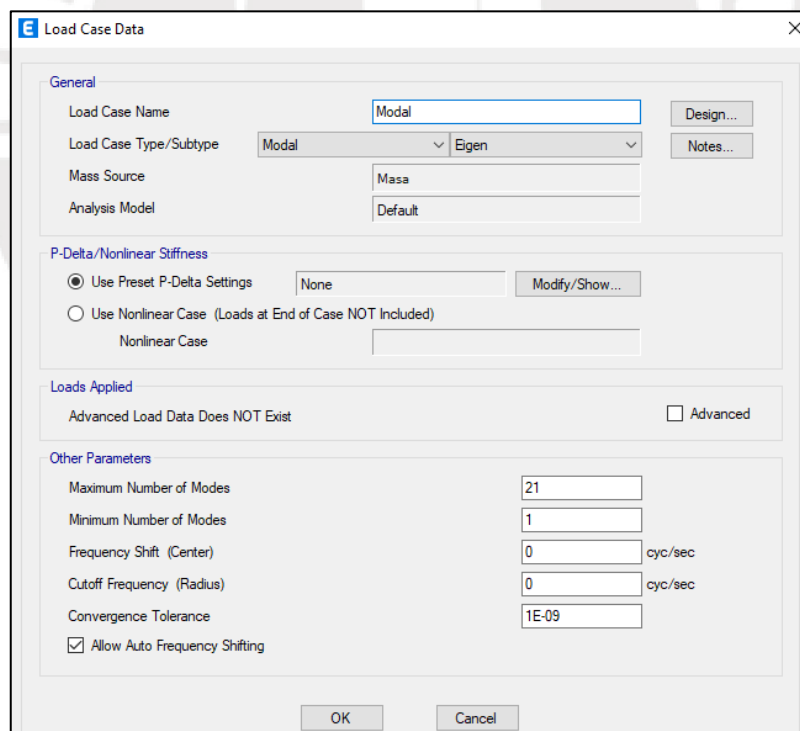


Figura 19. Definición de los casos modales en Etabs. Fuente propia.

Se corre el modelo para un set de casos de carga que son: Modal. Carga Muerta y Carga viva; con la finalidad de obtener el modo fundamental y el periodo de la estructura para realizar el análisis lineal.

El cálculo de los períodos fundamentales es crucial para poder realizar el análisis sísmico y el diseño de estructuras, debido a que permite entender la respuesta de la edificación ante cargas dinámicas, como los sismos. A partir del modelo en ETABS, se lleva a cabo un análisis del espectro de respuesta modal, utilizando un número adecuado de modos para alcanzar al menos un 90% de participación de masa del edificio. El software genera los modos de vibración, seguidamente esto se ilustra en la figura 20.

Modal Participating Mass Ratios								
File Edit Format-Filter-Sort Select Options								
Units: As Noted			Hidden Columns: No		Sort: None		Modal Participating Mass Ratios	
Filter: None								
	Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY
▶	Modal	1	0.573	0.7566	0.0001	0	0.7566	0.0001
	Modal	2	0.54	0.0001	0.7692	0	0.7567	0.7693
	Modal	3	0.469	0.0024	0	0	0.7591	0.7693
	Modal	4	0.164	0.1383	1.851E-05	0	0.8973	0.7693
	Modal	5	0.158	1.948E-05	0.1231	0	0.8974	0.8924
	Modal	6	0.147	0.0005	0	0	0.8978	0.8924
	Modal	7	0.082	0.0374	1.365E-06	0	0.9352	0.8924
	Modal	8	0.079	0.0129	1.904E-05	0	0.9481	0.8924
	Modal	9	0.078	1.922E-06	0.0486	0	0.9481	0.941

Figura 20. Obtención de los periodos en cada dirección en Etabs. Fuente propia.

Se observa que se cumple el 90% de la masa participativa considerada por el software, además los períodos fundamentales son 0.573 para la dirección “X” y de 0.54 para la dirección “Y”.

Luego, se inserta los parámetros necesarios para crear el espectro de demanda en cada dirección en unidades “g” según la Norma Técnica E.030, en donde: Zona sísmica = 0.45g, Categoría del edificio: Edificación común “C”, Tipo de Suelo “S2”, $I_a=1$, $I_b=1$ y $R=6$ debido a que es una estructura de muros estructurales. Después, se crea los casos de carga dinámicos ESPECTRO X-X y ESPECTRO Y-Y. Para estos casos de carga sísmica se inserta el tipo de carga, nombre de la carga, función y factor de escala. En donde: la aceleración es el tipo de carga, nombre de la carga varía entre U1, U2 y U3 dependiendo de la dirección, la función a usar es el espectro de demanda creado y el factor de escala es 9.81 para la dirección de análisis dado que el espectro está en unidades “g” y en la dirección Z es los 2/3 partes como se puede apreciar en la Figura 23.

Nota: En el acápite 3.2 se menciona que la estructura es regular y es por esa razón los valores para I_a e I_b son de 1. Posteriormente se justificará que la configuración estructural

corresponde a Muros Estructurales $R=6$.

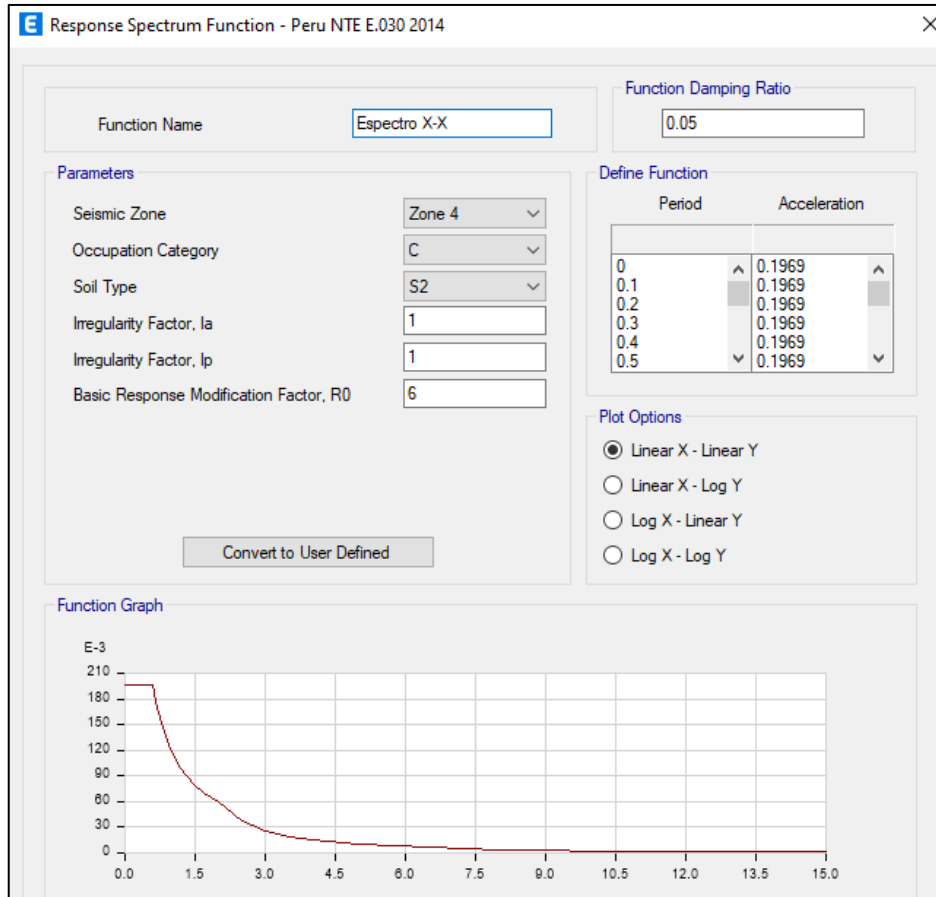
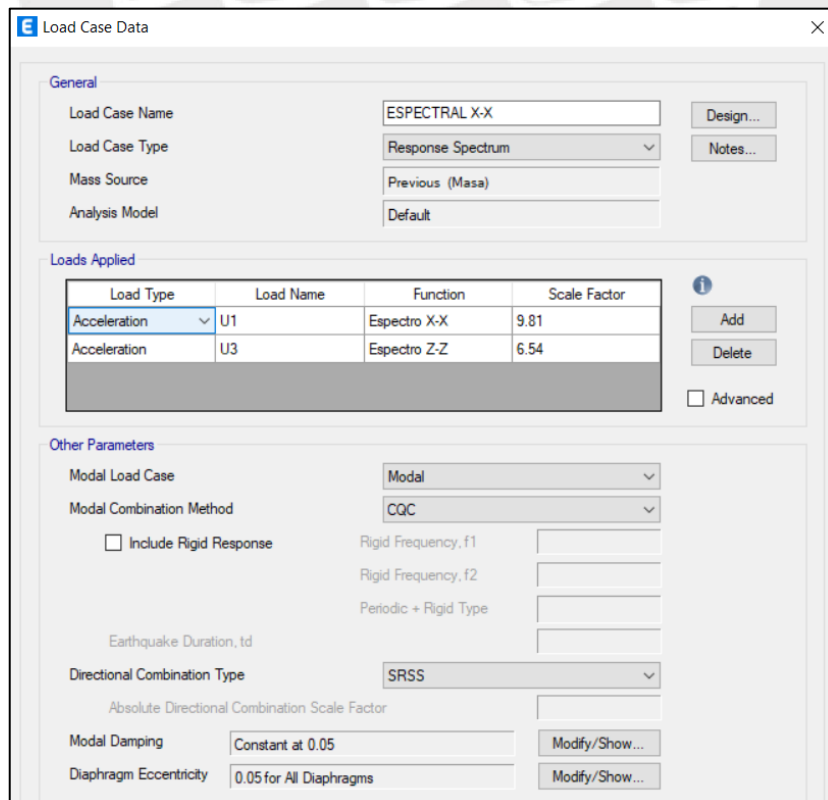


Figura 21. Definición del Espectro de la Norma E.030 en Etabs. Fuente propia.



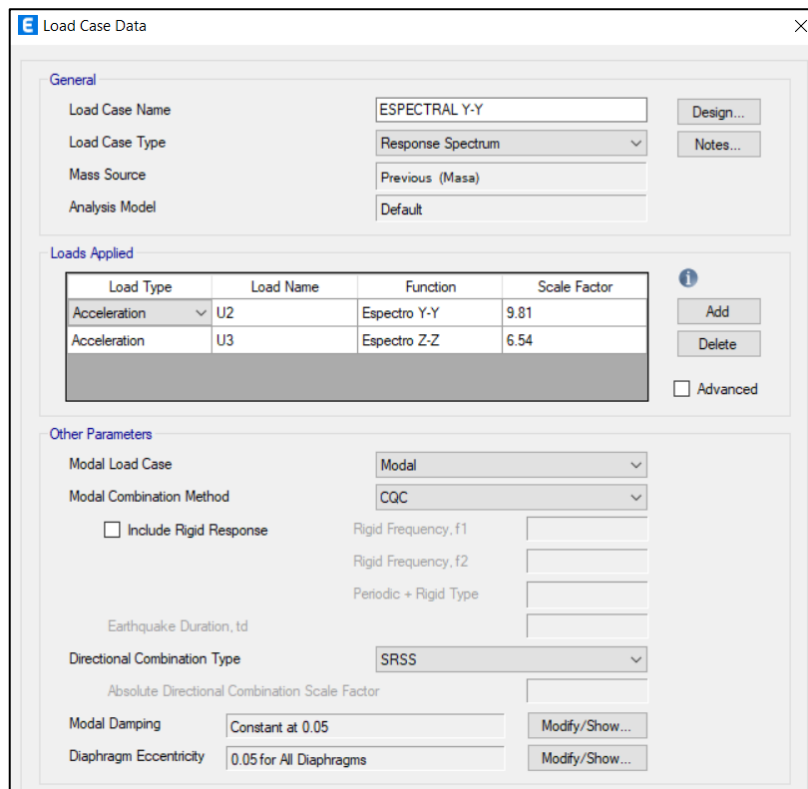


Figura 22. Definición de los casos de carga en cada dirección en Etabs. Fuente propia.

Asimismo, se define los casos de carga para obtener tanto los desplazamientos, así como las derivas, estos casos son DX y DX, los cuales se definen multiplicando los factores de la Figura 22 con un factor de $0.75 \cdot R$ como se muestra en la Figura 23.

E Load Case Data [X]

General

Load Case Name: [Design...]

Load Case Type: [Notes...]

Mass Source:

Analysis Model:

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U1	Espectro X-X	44.145
Acceleration	U3	Espectro Z-Z	29.43

[Add] [Delete] Advanced

Other Parameters

Modal Load Case:

Modal Combination Method:

Include Rigid Response

Rigid Frequency, f1:

Rigid Frequency, f2:

Periodic + Rigid Type:

Earthquake Duration, td:

Directional Combination Type:

Absolute Directional Combination Scale Factor:

Modal Damping: [Modify/Show...]

Diaphragm Eccentricity: [Modify/Show...]

E Load Case Data [X]

General

Load Case Name: [Design...]

Load Case Type: [Notes...]

Mass Source:

Analysis Model:

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U2	Espectro Y-Y	44.145
Acceleration	U3	Espectro Z-Z	29.43

[Add] [Delete] Advanced

Other Parameters

Modal Load Case:

Modal Combination Method:

Include Rigid Response

Rigid Frequency, f1:

Rigid Frequency, f2:

Periodic + Rigid Type:

Earthquake Duration, td:

Directional Combination Type:

Absolute Directional Combination Scale Factor:

Modal Damping: [Modify/Show...]

Diaphragm Eccentricity: [Modify/Show...]

Figura 23. Definición del caso desplazamiento llamado “DX” y “DY” en Etabs. Fuente propia.

Terminado los casos de carga se procede a asignar las diferentes combinaciones de carga. Estas combinaciones sirven para el análisis lineal son: “0.9 CM+ SX ”, “0.9CM+ SY ”,

“1.4CM+1.7CV”, “1.25(CM+CV) + SX” y “1.25(CM+CV) + SY” y Envolvente. a partir del análisis sísmico en el modelo lineal.

Los casos de SX y SY hacen referencia a los casos de carga por sismo estático. Así es como se define la combinación “Envolvente” que engloba las demás combinaciones como se muestra en la Figura 26, esta combinación se usa para el diseño de cada elemento.

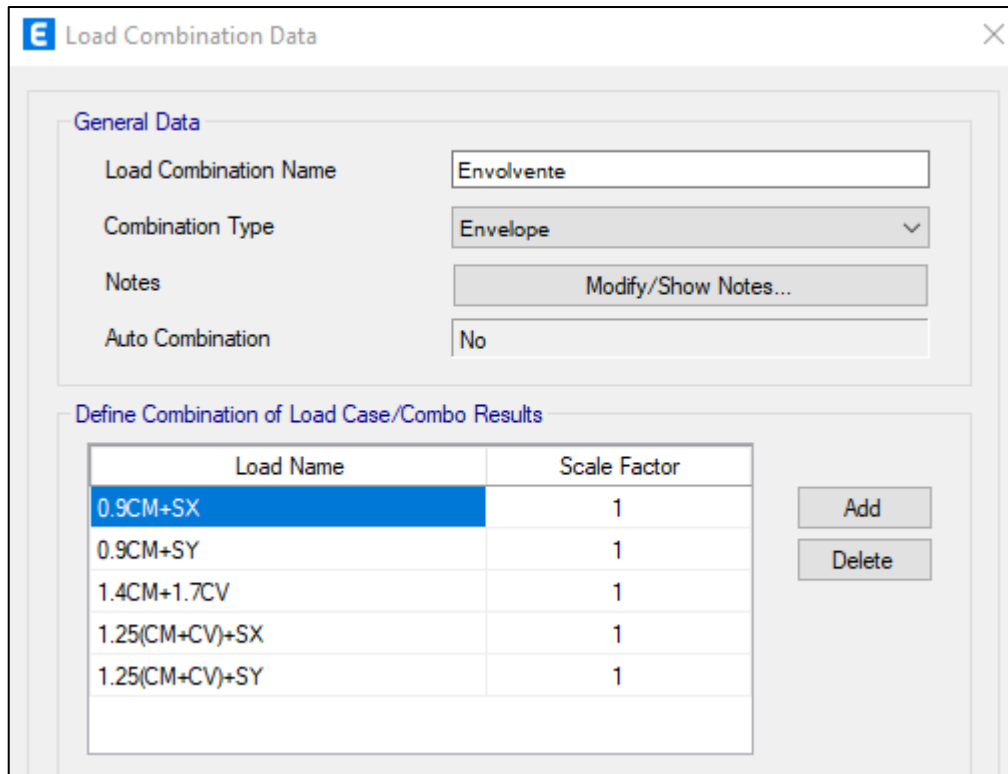


Figura 24. Definición de la Envolvente en Etabs. Fuente propia.

Finalmente, se ejecuta el modelo con el conjunto de cargas que incluye: Modal, Carga Muerta, Carga Viva, ESPECTRAL X-X, ESPECTRAL Y-Y, DX y DY. A través de este análisis sísmico del modelo lineal, se determina la deriva de la estructura en los ejes X e Y, con el objetivo de verificar que el edificio se mantenga dentro de los límites de deriva establecidos por la Norma E.030 y que la configuración estructural sea adecuada para Muros Estructurales. A continuación, se presentan los resultados:

A partir de la Tabla 10 se obtiene el porcentaje que absorben los muros de concreto armado de la cortante basal, siendo estos valores mayores a 70% queda verificado que el sistema estructural es de muros estructurales en ambas direcciones según la norma E.030.

Tabla 10. Comprobación del sistema estructural en cada dirección.

Símbolo	V total (ton)	V muros (ton)	%muros
---------	---------------	---------------	--------

X-X	106.6	86.0	81%
Y-Y	116.9	93.0	80%

Por otro lado, en la Figura 27 se muestra las derivas obtenidas en cada dirección, se obtuvo una deriva de 0.00780 en X (gráfica azul) y de 0.0061 en Y (gráfica roja).

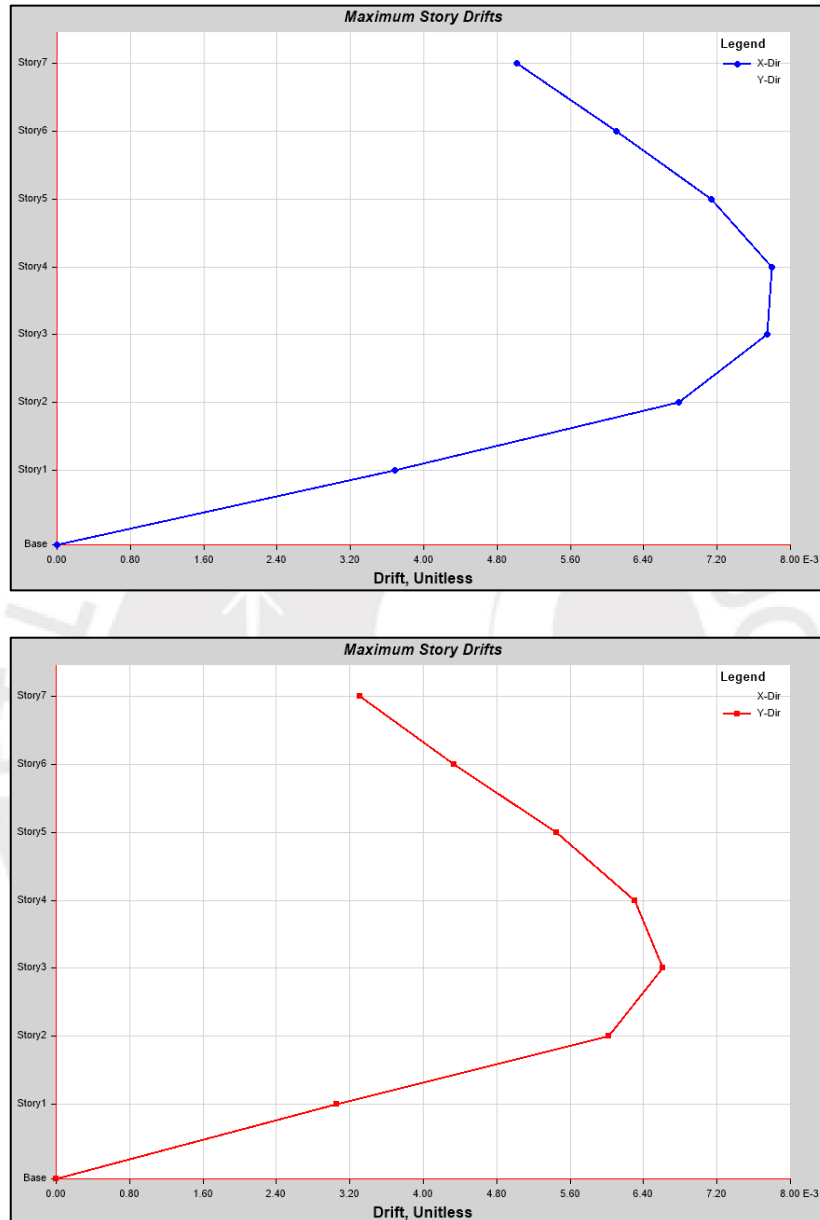


Figura 25. Derivas en cada dirección en Etabs. Fuente propia.

Se prosigue a realizar, en el próximo acápite, el análisis estático no lineal del modelo para observar el desempeño.

3.3.1 Análisis estático no lineal y curvas de capacidad

Para el análisis estático no lineal o pushover se debe comenzar con asignar las propiedades mecánicas no lineales del concreto usado en el modelo lineal del acápite anterior. Se usará

los valores de las propiedades de concreto no confinado dadas por Mander et al. (1988). En donde considera como deformación unitaria máxima el valor de 0.004 y 0.002 como deformación en el punto de máximo esfuerzo. De igual manera con el acero Grado 60, se usará los valores para un modelo simple. Para la deformación unitaria máxima es 0.09 y para la deformación de la barra al inicio del endurecimiento es 0.01.

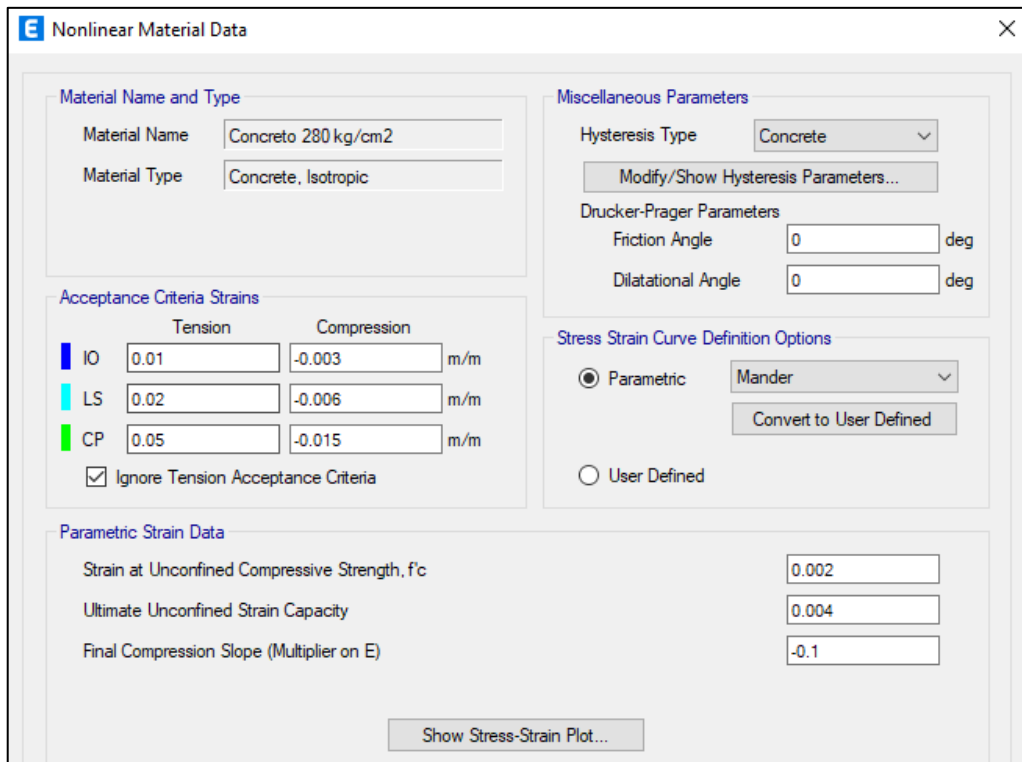


Figura 26. Definición de las propiedades no lineales del concreto en Etabs. Fuente propia.

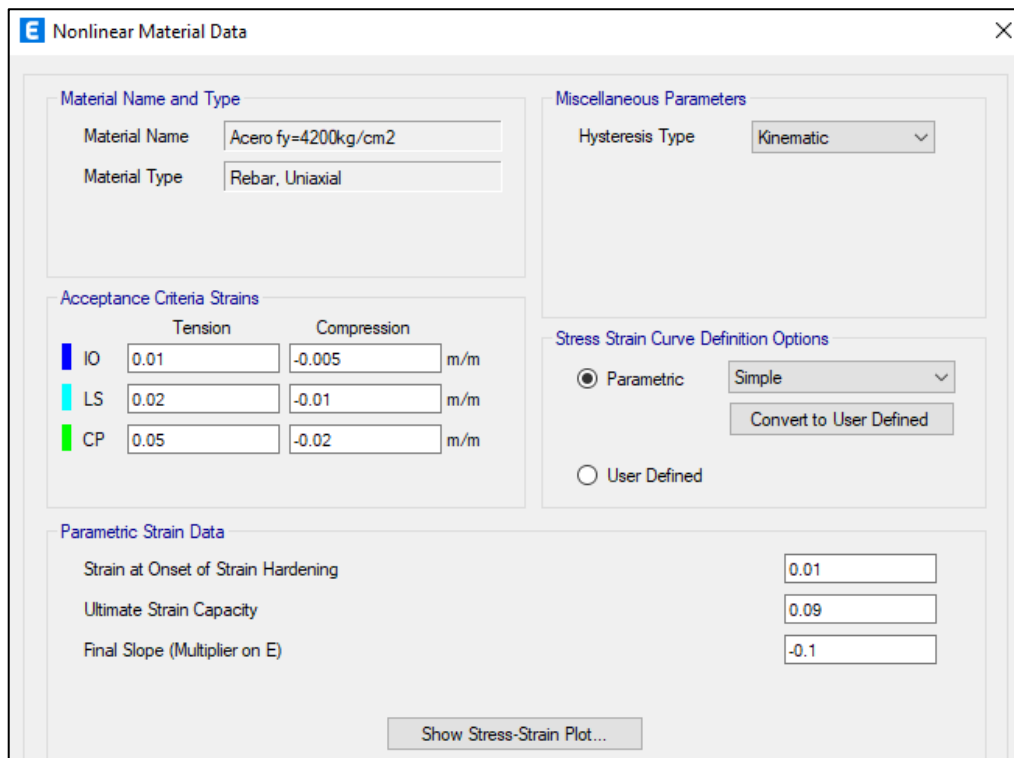


Figura 27. Definición de las propiedades no lineales del acero en Etabs. Fuente propia.

Lo que sigue es la idealización de los elementos estructurales para este tipo de análisis no lineal. Según Deierlein et al. (2010) menciona los tipos de modelos para idealizar la respuesta inelástica en los elementos estructurales (Figura 28). Para las placas se considera la no linealidad a lo largo del elemento con plasticidad distribuida eligiendo modelo tipo fibra; mientras que para las vigas y columnas se considera un modelo con rótulas concentradas en sus extremos del elemento. Además, según el ACI 318-19 menciona que el uso de fibras como idealización representa efectos de agrietamiento del concreto y fluencia del refuerzo a lo largo del elemento, siendo esto cierto cuando se considere un material confinado dentro de los estribos y un material no confinado para la zona del recubrimiento. Al considerar tipo fibra entonces no es necesario dar al elemento una rigidez efectiva en caso se use otro tipo de idealización. Para el caso de las rótulas concentradas se considera una rigidez efectiva con el fin de considerar la degradación de la rigidez, para el caso de vigas se considera un factor de 0.3 por flexión según el ACI 318-19 en la tabla de valores de rigidez efectiva.

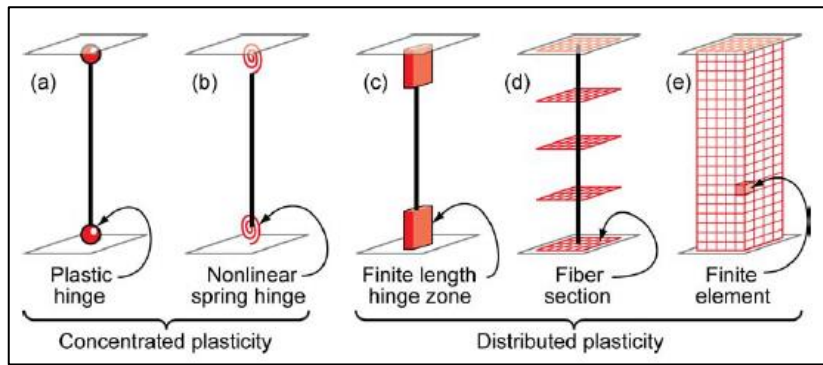


Figura 28. Modelos idealizados para una viga y/o columna. Fuente: (Deierlein et al., 2010)

Por tanto, se define la idealización tipo fibra para las placas mientras que tipo rótula concentrada para vigas y columnas. Después de definir los tipos de modelos de idealización se asigna a cada tipo de elemento.

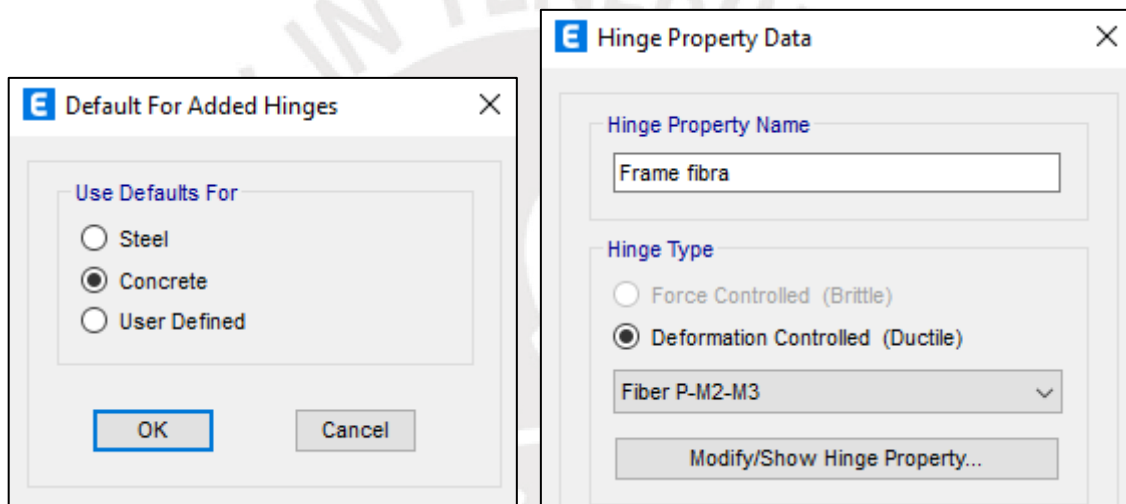


Figura 29. Definición de la idealización tipo fibra en Etabs. Fuente propia.

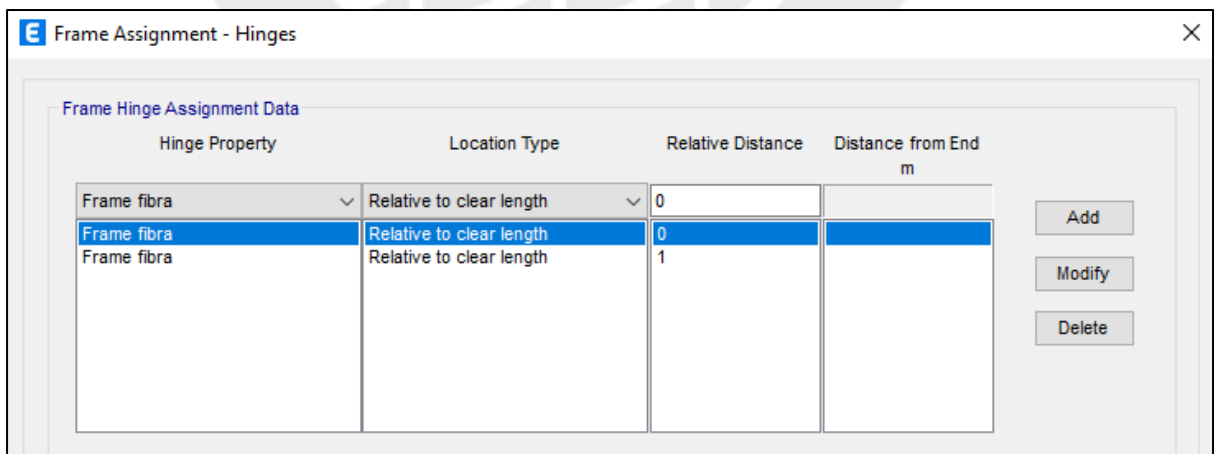


Figura 30. Asignación de las rótulas en los elementos las columnas en Etabs. Fuente propia.

En esta parte es en donde se coloca el acero en los elementos estructurales. En el caso de

columnas se tendrá 4cm de recubrimiento, en el diseño de las columnas se verificó que la cuantía mínima es suficiente, por ello se utiliza 8 varillas de 5/8” para las barras longitudinales, fierro de 8mm @ 0.1 para el confinamiento y 2 barras confinadas por lado como se muestra en la Figura 32.

E Frame Section Property Reinforcement Data

Design Type

- P-M2-M3 Design (Column)
- M3 Design Only (Beam)

Rebar Material

Longitudinal Bars: Acero fy=4200kg/cm2

Confinement Bars (Ties): Acero fy=4200kg/cm2

Reinforcement Configuration

- Rectangular
- Circular

Confinement Bars

- Ties
- Spirals

Check/Design

- Reinforcement to be Checked
- Reinforcement to be Designed

Longitudinal Bars

Clear Cover for Confinement Bars: 0.04 m

Number of Longitudinal Bars Along 3-dir Face: 4

Number of Longitudinal Bars Along 2-dir Face: 2

Longitudinal Bar Size and Area: #5, 0.0002 m²

Corner Bar Size and Area: #5, 0.0002 m²

Confinement Bars

Confinement Bar Size and Area: User, 0.00005 m²

Longitudinal Spacing of Confinement Bars (Along 1-Axis): 0.1 m

Number of Confinement Bars in 3-dir: 2

Number of Confinement Bars in 2-dir: 2

Figura 31. Definición de las propiedades del refuerzo en las columnas en Etabs. Fuente propia.

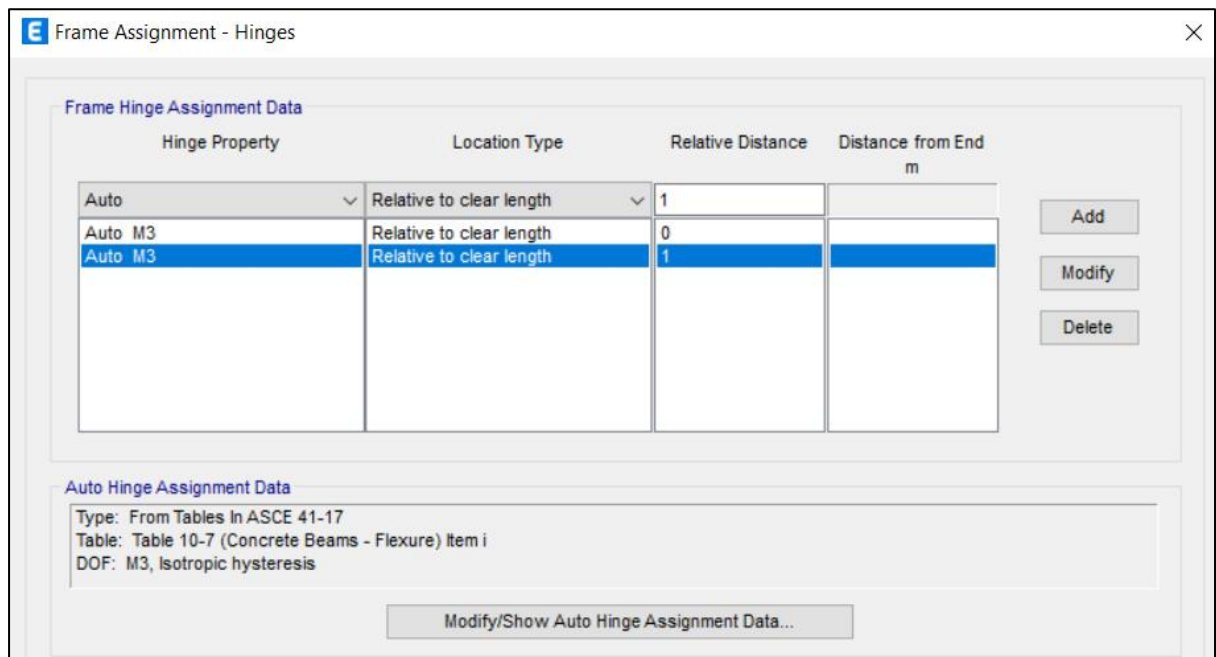


Figura 32. Asignación de las rótulas en los elementos las vigas en Etabs. Fuente propia.

En el caso de las vigas, se utilizarán varillas de 5/8" y 3/4", con cuantías que varían según las cargas aplicadas. La Figura 33 ilustra el acero de una viga que cuenta con 3 varillas de 5/8" en las zonas superior e inferior iniciales, mientras que en las zonas superior e inferior finales se incluyen 3 varillas de 5/8" y 1 de 3/4". Por otro lado, la Figura 34 presenta una configuración diferente, con 4 varillas de 5/8" en las zonas superior e inferior iniciales y 4 varillas de 5/8" más 2 de 3/4" en las zonas superior e inferior finales.

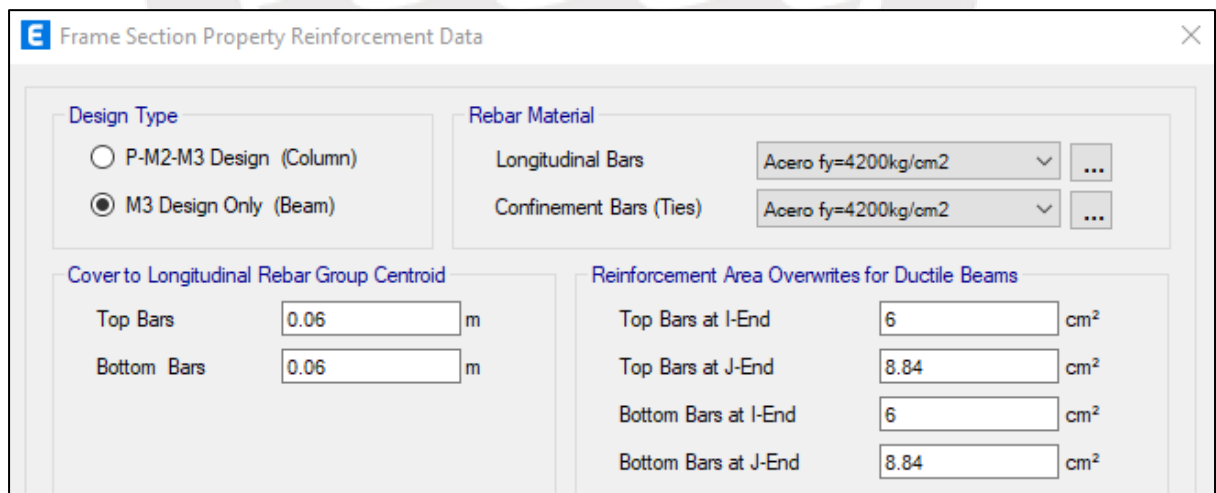


Figura 33. Definición de las propiedades del refuerzo en las vigas en Etabs. Fuente propia.

Section	Property	Value	Unit
Design Type	P-M2-M3 Design (Column)	<input type="radio"/>	
	M3 Design Only (Beam)	<input checked="" type="radio"/>	
Rebar Material	Longitudinal Bars	Acero fy=4200kg/cm2	
	Confinement Bars (Ties)	Acero fy=4200kg/cm2	
Cover to Longitudinal Rebar Group Centroid	Top Bars	0.07462	m
	Bottom Bars	0.07462	m
Reinforcement Area Overwrites for Ductile Beams	Top Bars at I-End	8	cm ²
	Top Bars at J-End	13.68	cm ²
	Bottom Bars at I-End	8	cm ²
	Bottom Bars at J-End	13.68	cm ²

Figura 34. Definición de las propiedades del refuerzo en las vigas en Etabs. Fuente propia.

En el caso de las placas previo a la asignación del tipo fibra se tiene que colocar el confinamiento del refuerzo en los bordes si es que necesita. Se tomará como ejemplo la placa del ascensor, cuya configuración de acero es la siguiente: En el eje X se colocará 20 barras verticales de fierro de 1/2", dos filas de fierro de 3/8" @ .15m para el acero horizontal; mientras que en el eje Y debido al diseño por flexocompresión se vio conveniente usar núcleos de confinamiento de 25cm de longitud con 6 varillas de 5/8" mientras que en el alma se tiene 12 varillas de 1/2" para el acero vertical, para el acero horizontal dos filas de fierro de 3/8" @ .15m. Estas configuraciones en cada dirección se muestran en las Figuras 35 y 36. Finalmente, se le asigna el tipo fibra para placas (Figura 37).

Wall Hinge Reinforcement

Wall Design Type

Pier

Spandrel

Rebar Material and Clear Cover

Material Flexure: Acero fy=4200kg/c

Material Shear: Acero fy=4200kg/c

Bar Clear Cover: 0.04 m

Rebar Layout

Geometry

Start X (m)	Start Y (m)	End X (m)	End Y (m)	Length (m)	Thickness (m)	Start Zone Size (m)	End Zone Size (m)
4.275	4.25	5.725	4.25	1.45	0.25	1.45	0

Reinforcement

Flexural Detail - Each Face

Station	Bar Size	Bar Spacing (m)	Number of Bars
Start	#4		10
Center	#5	0.3	0
End	#8		0

Flexural Detail (Additional Individual Bars)

Material	Distance (m)	Area (cm2)
*		

Shear/Confinement Detail

Station	Bar Size	Bar Spacing (m)	Confined
Start	#3	0.15	No
Center	#5	0.3	No
End	#5	0.15	Yes

Figura 35. Definición de las propiedades del refuerzo en la placa del ascensor en la dirección X en Etabs.

Fuente propia.

Wall Hinge Reinforcement

Wall Design Type

Pier
 Spandrel

Rebar Material and Clear Cover

Material Flexure: Acero fy=4200kg/c
Material Shear: Acero fy=4200kg/c
Bar Clear Cover: 0.04 m

Rebar Layout

Geometry

Start X (m)	Start Y (m)	End X (m)	End Y (m)	Length (m)	Thickness (m)	Start Zone Size (m)	End Zone Size (m)
4.275	2.75	4.275	4.25	1.5	0.25	0.25	0

Reinforcement

Flexural Detail - Each Face

Station	Bar Size	Bar Spacing (m)	Number of Bars
Start	#5		3
Center	#4	0.2	6
End	#8		0

Flexural Detail (Additional Individual Bars)

Material	Distance (m)	Area (cm2)
*		

Shear/Confinement Detail

Station	Bar Size	Bar Spacing (m)	Confined
Start	#3	0.15	Yes
Center	#3	0.15	No
End	#5	0.15	Yes

Figura 36. Definición de las propiedades del refuerzo en la placa del ascensor en la dirección Y en Etabs.

Fuente propia.

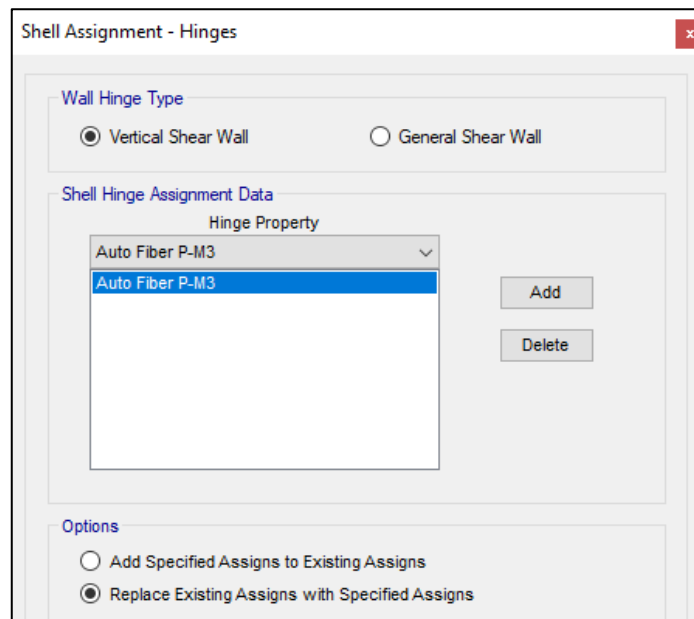
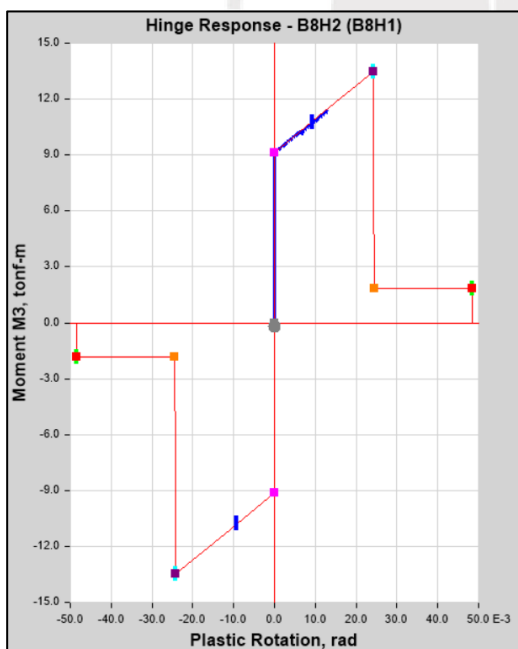


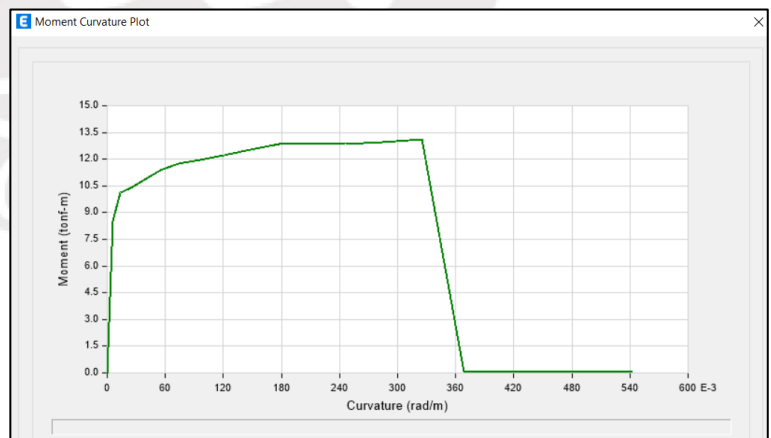
Figura 37. Definición de las propiedades del refuerzo en las losas en Etabs. Fuente propia.

Por otro lado, se muestra los diagramas: momento vs rotación y momento vs curvatura para una viga, columna y una placa para el modelo de densidad de muros baja con $f'c$ 210 kg/cm^2 .

Viga sísmica



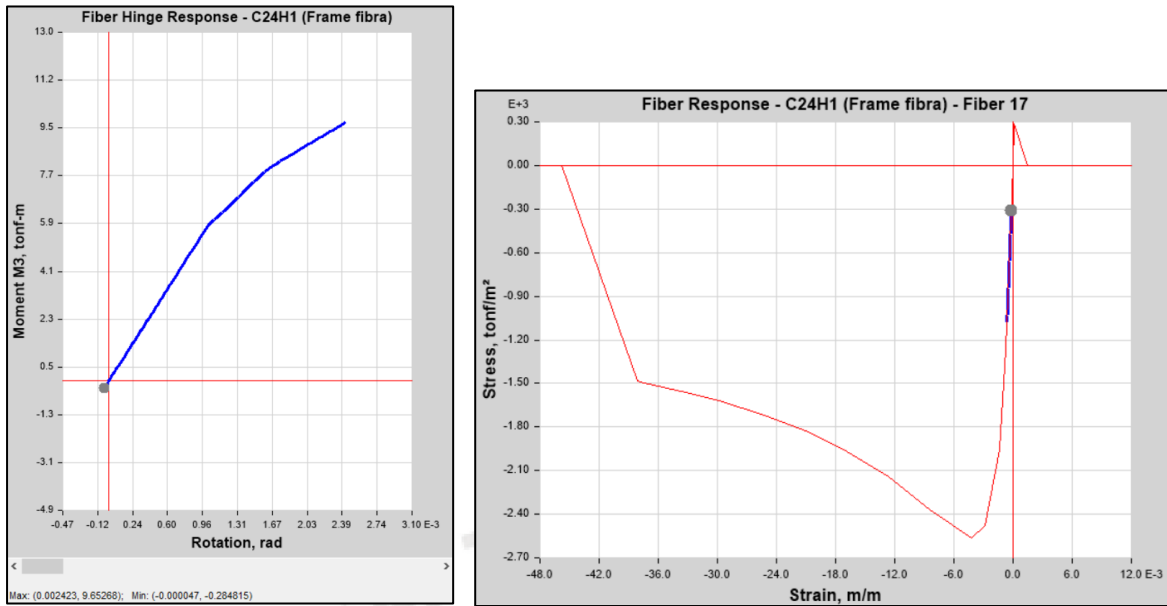
2.3.1.1.1



(b)

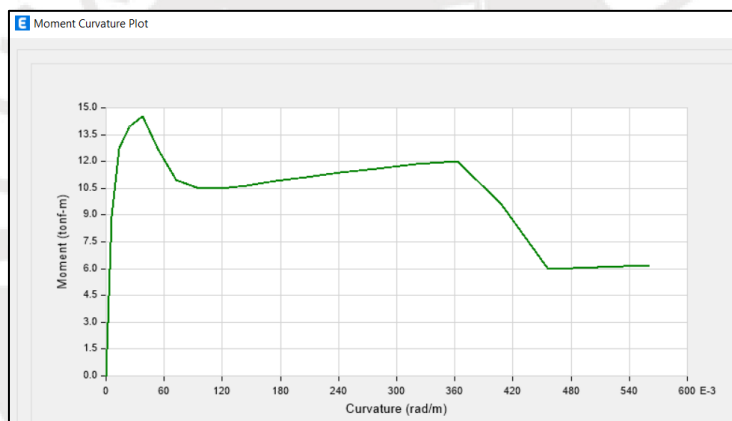
Figura 38. (a) Diagrama momento – rotación de una viga sísmica. (b) Diagrama momento – curvatura de la viga sísmica. Fuente propia.

Columna



(a)

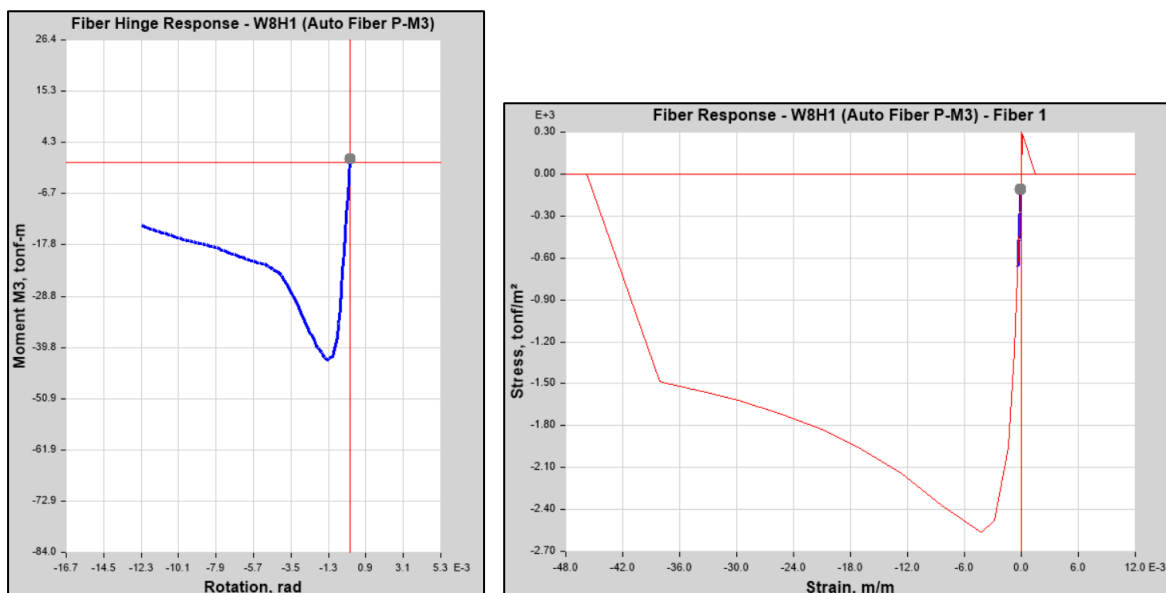
(b)



(c)

Figura 39. (a) Diagrama momento – rotación de una columna. (b) Diagrama esfuerzo – deformación unitaria de la columna. (c) Diagrama momento – curvatura de la columna. Fuente propia.

Placa



(a) (b)

Figura 40. (a) Diagrama momento – rotación de una placa. (b) Diagrama momento – curvatura de la placa. Fuente propia.

Una vez definido el tipo de plasticidad, las cuantías de cada elemento y las propiedades lineales y no lineales de cada material se crea los casos de carga para el análisis estático no lineal, los cuales son: “Gravedad”, “PUSH XX” y “PUSH YY”. El caso de carga Gravedad parte de la condición de la estructura sin deformar y las cargas aplicadas son de 1 veces la Carga Muerta y 0.25 veces la Carga Viva (Figura 41). Para PUSHXX parte del caso Gravedad previamente definido, el ASCE nos pide que el tipo de carga sea en base al modo fundamental según la dirección de análisis y el factor de escala es 1 para el caso positivo (Figura 42). Además, se define otros parámetros como el control de aplicación de carga, la cual se realizará por desplazamientos en el punto más cercano al centro de masas del último piso (*label 51*), se le asigna un desplazamiento de control que elegimos de 0.5 m, este valor se obtiene a partir de la media del desplazamiento espectral para el colapso acorde HAZUS donde para una edificación de muros de mediana altura tiene un valor de 18 pulgadas, U1 porque el caso de análisis es en el eje X (Figura 43). De la misma manera para el caso de carga PUSH YY.

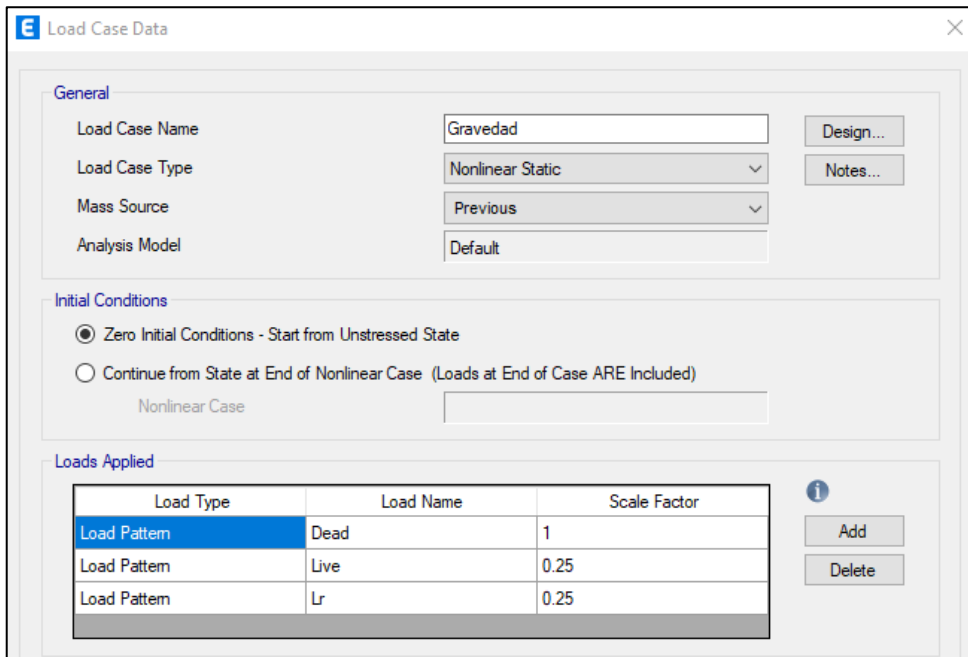


Figura 41. Definición del caso de carga “Gravedad” en Etabs. Fuente propia.

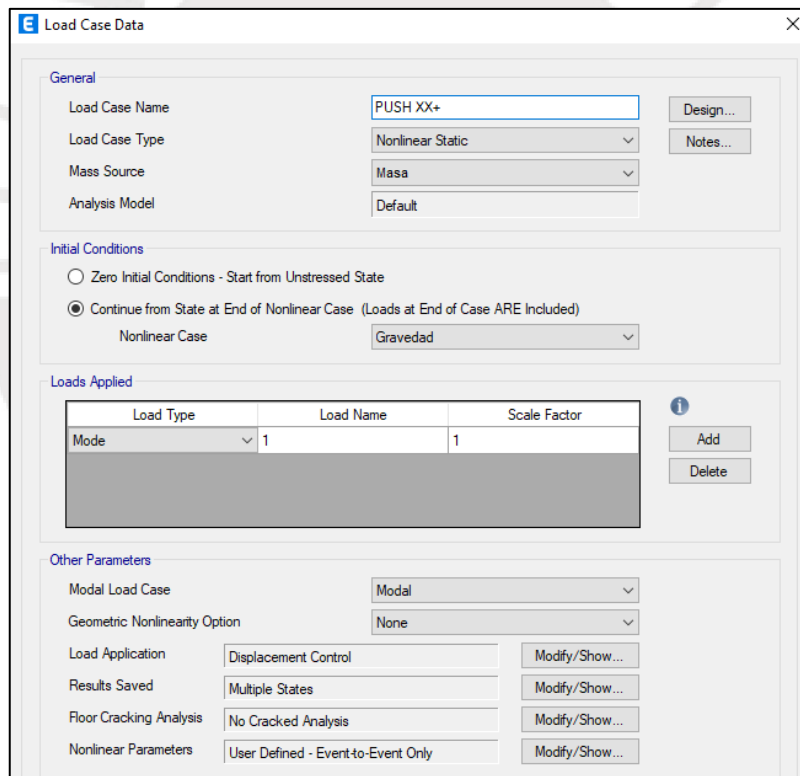


Figura 42. Definición del caso de carga “PUSH XX” en Etabs. Fuente propia.

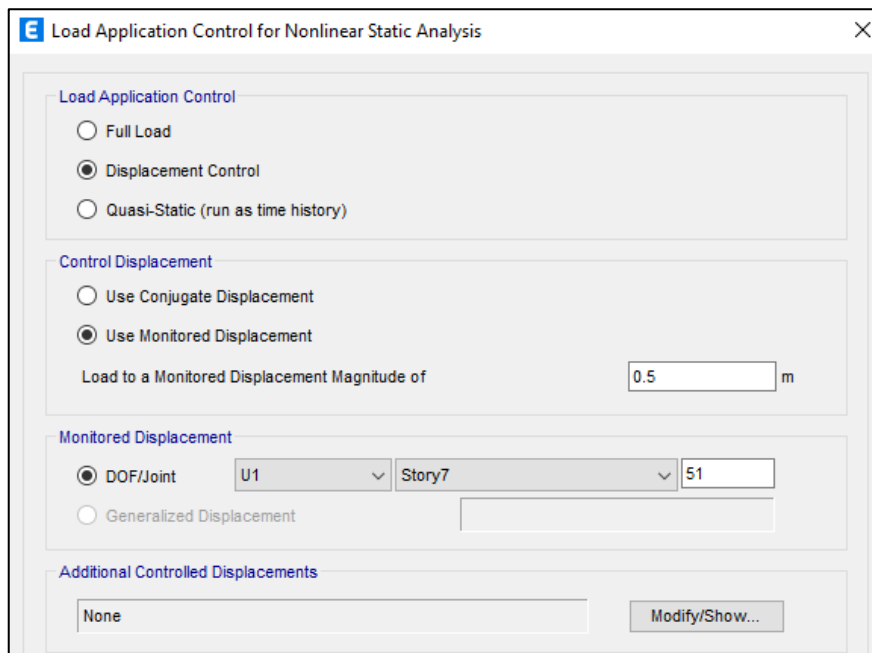


Figura 43. Asignación del desplazamiento y punto de control para x-x en Etabs. Fuente propia.

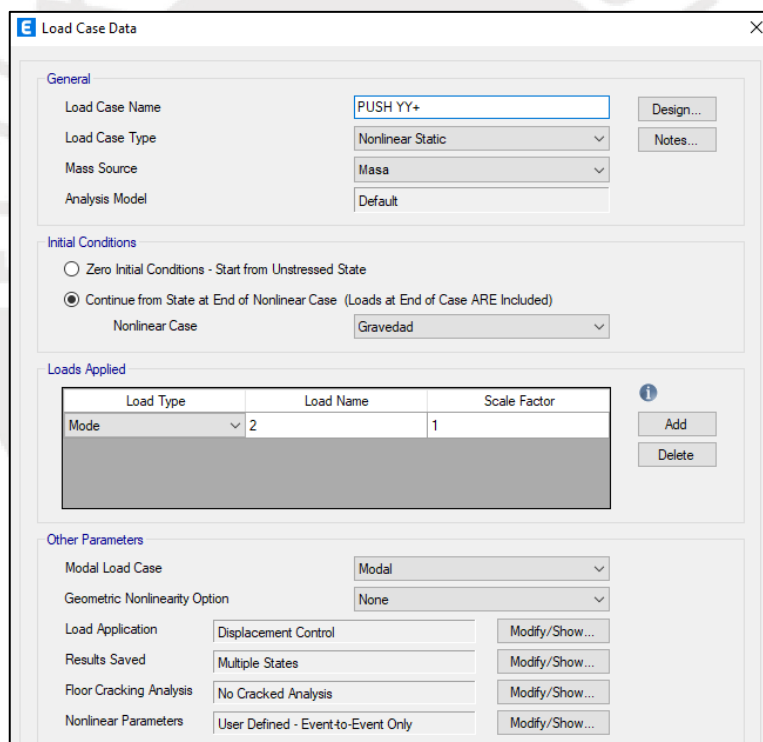


Figura 44. Definición del caso de carga "PUSH YY" en Etabs. Fuente propia.

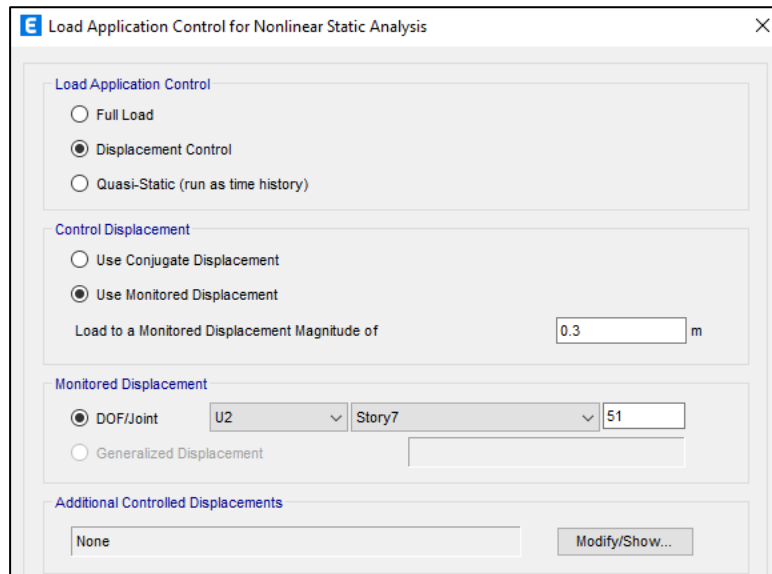


Figura 45. Asignación del desplazamiento y punto de control para y-y en Etabs. Fuente propia.

Después de haber realizado todo el procedimiento anterior se corre el modelo para los casos de carga de: Gravedad, PUSH XX y PUSH YY. De esta manera se obtiene la curva de capacidad de la estructura para el eje X e Y. Las curvas de capacidad se obtuvieron a partir del patrón de cargas asignado en forma del modo fundamental verificando antes que dicho modo presente más del 75% de influencia en la forma de vibrar de la estructura.

Modelo con baja densidad de muros:

Curva de capacidad en X, desplazamiento último de 42.67 cm con una cortante de 469.88 ton.

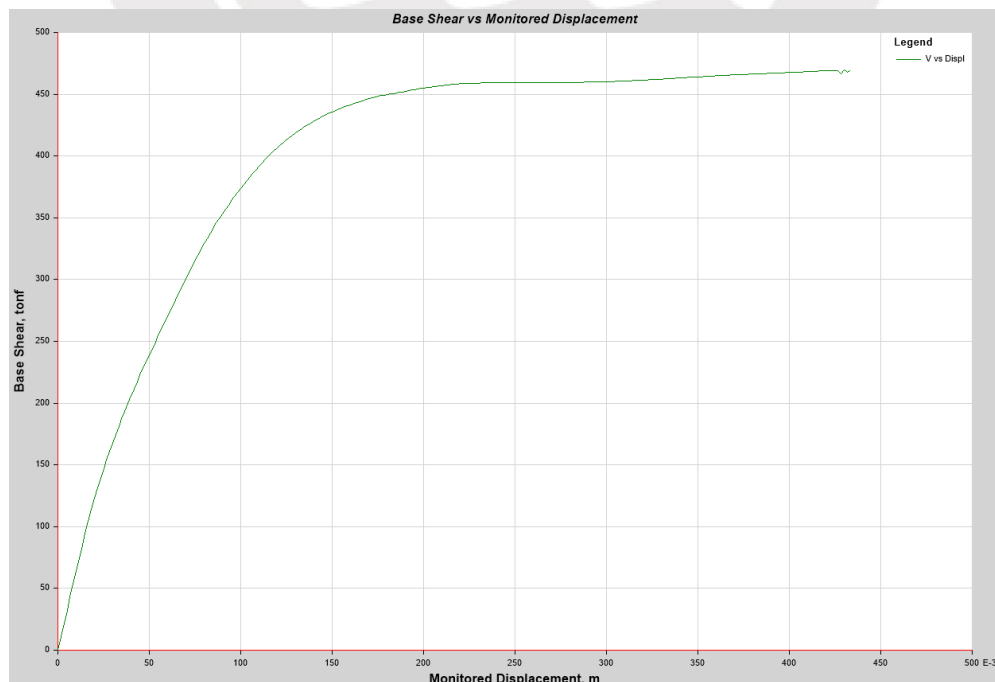


Figura 46. Curva de Capacidad analizada en x para el modelo de densidad de muros baja. Fuente propia.

Curva de capacidad en Y, desplazamiento último de 39.77 cm con una cortante de 456.10 ton.

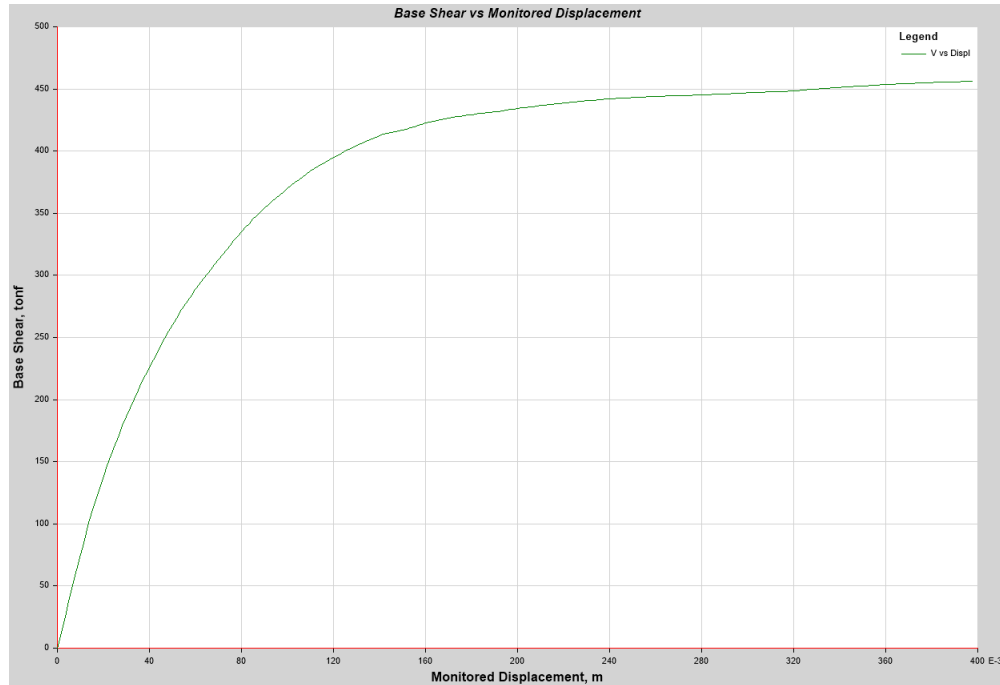


Figura 47. Curva de Capacidad analizada en y para el modelo de densidad de muros baja. Fuente propia.

De manera similar, se genera la curva de capacidad para el modelo que considera la variable de estudio: Resistencia a la Compresión del Concreto. La única variación radica en modificar las propiedades mecánicas del concreto, específicamente la resistencia a la compresión y, por lo tanto, su módulo de elasticidad. Lo anterior se fundamenta en que, según (Park y Paulay, 1978), para concretos de hasta un valor de aproximadamente de 400 kg/cm^2 la deformaciones unitarias, cuando se alcanza el esfuerzo a compresión máximo, son cercanas a 0.002 y que la deformación unitaria final entre 0.003 y 0.004 (Figura 48).

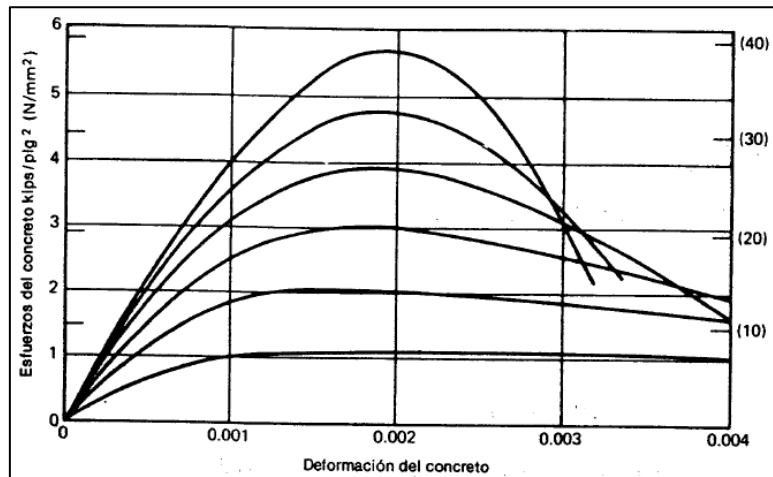
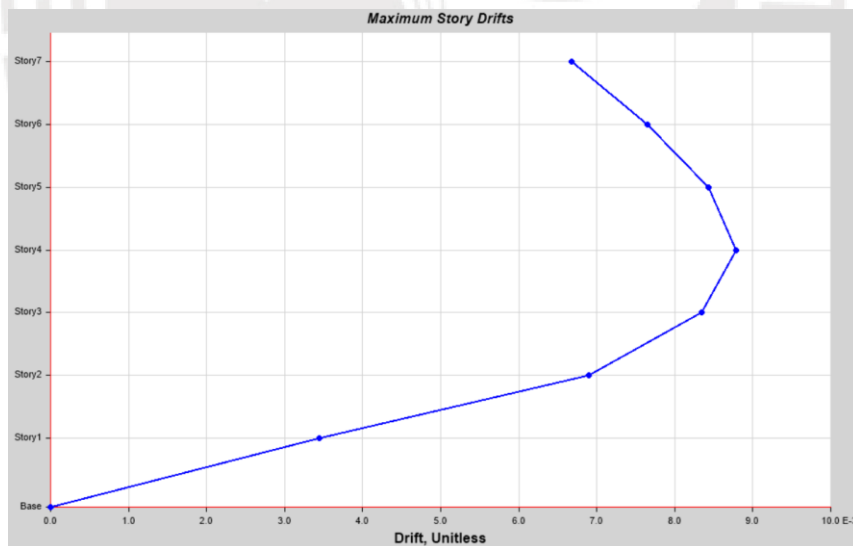


Figura 48. Curvas esfuerzo – deformación para cilindros de concreto cargados en compresión uniaxial.
Fuente: (Park y Paulay, 1978)

Por lo explicado anteriormente se prosigue a realizar los cambios correspondientes, en este caso se presentará el modelo de la estructura con Resistencia a la Compresión del Concreto de 280 kg/cm^2 . El módulo de elasticidad es $2509980.1 \text{ tonf/m}^2$ y la Resistencia a la compresión es de 2800 tonf/m^2 . A continuación, se presenta las máximas derivas (Figura 49) y curva de capacidad para los ejes X y Y (Figura 50 y Figura 51).



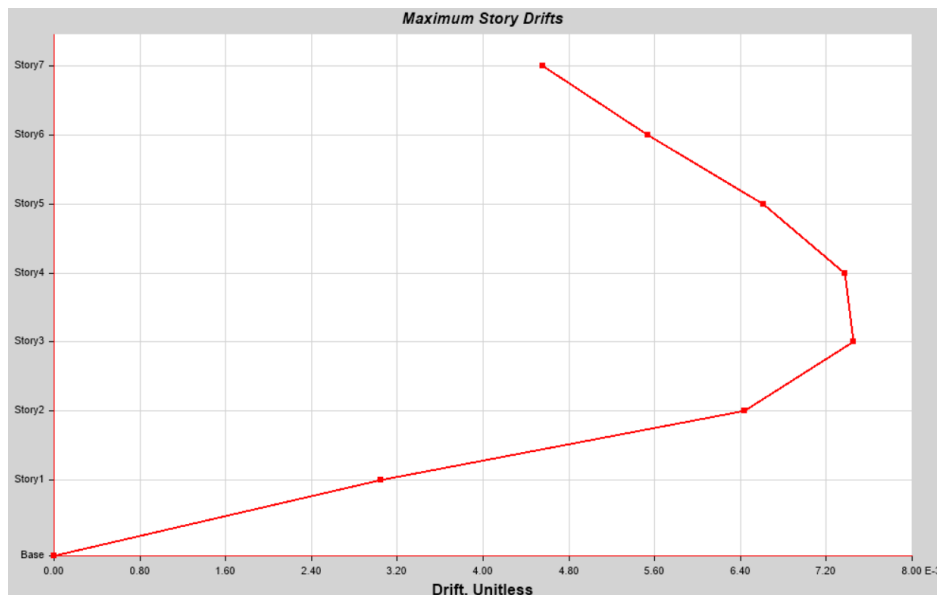


Figura 49. Derivas de cada entrepiso para el modelo de un $f'c=280\text{kg/cm}^2$. Fuente propia.

Para el caso del modelo con Resistencia a Compresión del Concreto de 280 kg/cm^2 se observa que la curva de rojo tiene una deriva de 7.3 perteneciente al eje “Y” y la de azul tiene una deriva de 8.8 perteneciente al eje “X”. Según la Norma E.030 la deriva máxima permisible es de 7, por lo tanto, el modelo no se encuentra dentro del rango permitido, por ende se espera que el porcentaje de daño esperado para el caso moderado o extensivo sea alto.

Modelo con resistencia del concreto a la compresión de 280 kg/cm^2 :

Curva de capacidad en X, desplazamiento último de 46.0 cm con una cortante de 395 ton.

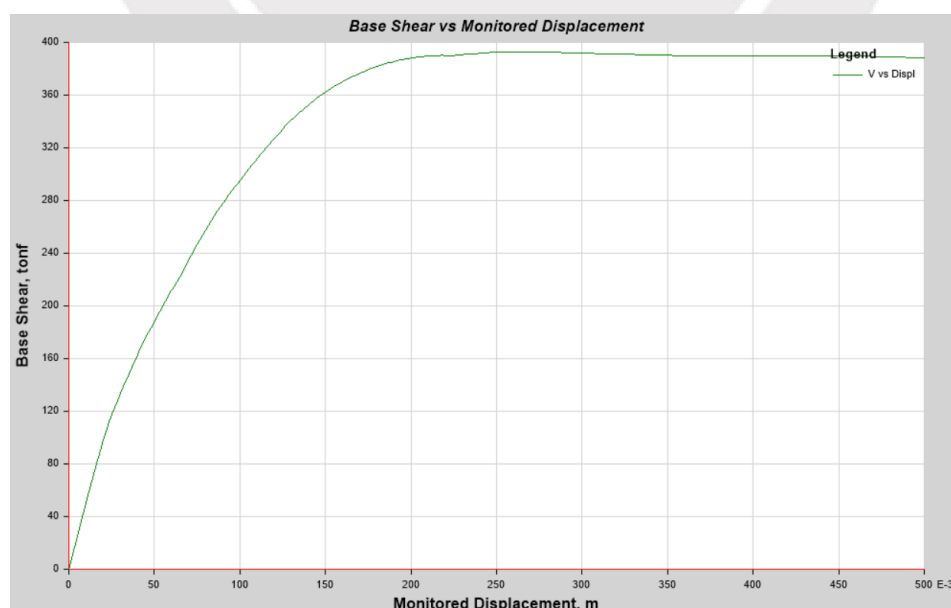


Figura 50. Curva de Capacidad analizada en x para el modelo de un $f'c=280\text{kg/cm}^2$. Fuente propia.

Curva de capacidad en Y, desplazamiento último de 47.7 cm con una cortante de 377.0 ton.

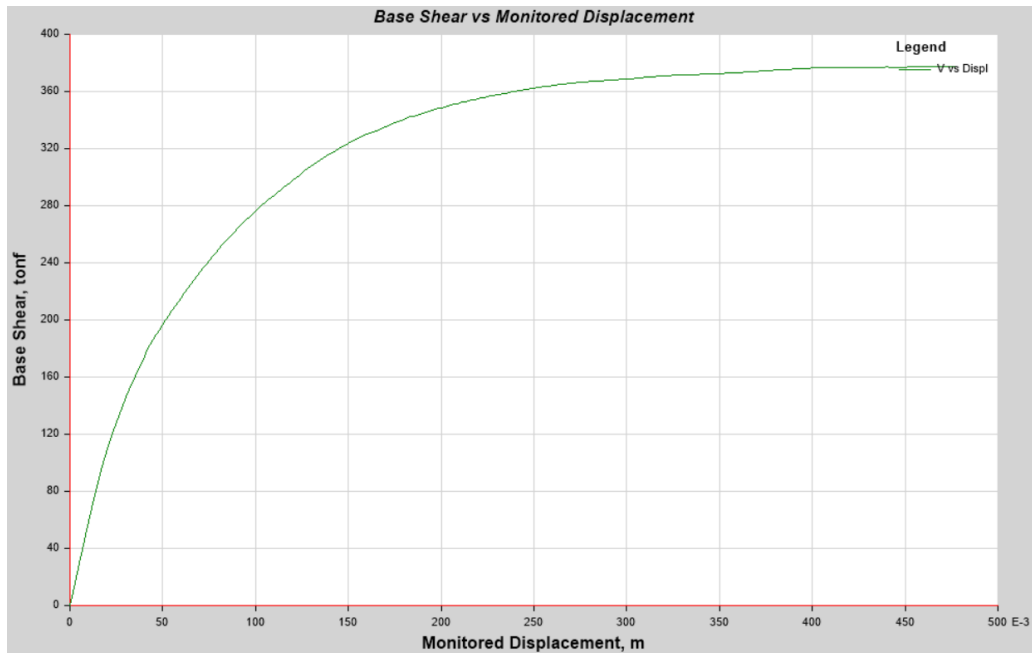


Figura 51. Curva de Capacidad analizada en y para el modelo de un $f'c=280\text{kg/cm}^2$. Fuente propia.

3.3.2 Método de los coeficientes

Para esta investigación la obtención del desplazamiento máximo que alcanza la estructura ante un evento sísmico se basa en la publicación del ASCE/SEI 41-13 “Evaluación Sísmica y Modernización de Edificios Existentes”; la cual hace mención el uso del método de coeficientes. A continuación, se presenta la ecuación para obtener el desplazamiento objetivo o punto de desempeño que, en este caso, será para el sismo de diseño considerado con un periodo de retorno de 475 años.

$$\delta t = C_0 C_1 C_2 S a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (\text{Ec. 6})$$

El cálculo de C_0 es mediante la tabla 1, donde para un edificio tipo corte de 7 niveles con un patrón de cargas triangular se tiene un valor de C_0 igual a 1.3.

Para el cálculo de C_1 mediante la Ec.1 primero se debe calcular la variable μ *strenght* con la Ec.2 en donde: Sa es la aceleración del espectro elástico en unidades “g” para el periodo fundamental efectivo, V_y es la cortante cuando comienza la fluencia, W es el peso sísmico efectivo y C_m , factor de masa efectiva que depende del tipo de estructura y la altura de esta, para este caso es de 0.8 según la tabla 2. El valor de “a” depende del tipo de

suelo, para la estructura en análisis corresponde un suelo intermedio S2, para el ASCE 7-16 este suelo es de clase D, es por ello que como se muestra en la tabla 3 el valor de “a” es de 60. Para la determinación del periodo efectivo (T_e), se utiliza la Ec.3 donde por los resultados obtenidos de la curva de capacidad, se tiene una rigidez efectiva parecida a la rigidez inicial del rango elástico (T_i).

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = 0.63 \sqrt{\frac{5104.5}{4245.1}} = 0.69 \text{ s}$$

El cálculo de S_a se muestra a continuación, en donde Z, U, C, S son los parámetros sísmicos que nos brinda la norma E.030. Estos dependen de la zona sísmica, uso de la edificación, periodo de la estructura y tipo de suelo respectivamente.

$$S_a = \frac{Z * U * S * C}{R} = \frac{0.45 * 1 * 1.05 * (2.5 * 0.6 / 0.69)}{1} = 1.026 \text{ g}$$

$$\mu \text{ strenght} = \frac{S_a}{V_y/W} * C_m = \frac{1.026}{251.4/981.6} * 0.8 = 3.204$$

$$C_1 = 1 + \frac{\mu \text{ strenght} - 1}{a T_e^2} = 1 + \frac{3.204 - 1}{60 * 0.69^2} = 1.077$$

El C2 se calcula mediante la Ec.4.

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{\mu \text{ strenght} - 1}{T_e} \right)^2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{3.204 - 1}{0.69} \right)^2 = 1.013$$

Finalmente, mediante la Ec. 6 se obtiene el desplazamiento objetivo o punto de desempeño según el ASCE 41-13.

$$\delta t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g = 1.3 * 1.077 * 1.013 * 1.026 \frac{0.69^2}{4\pi^2} g$$

$$\delta t = 17.3 \text{ cm}$$

Este método es un proceso iterativo, tanteando inicialmente el punto de fluencia en la curva de capacidad, en base a la pendiente inicial por el punto de fluencia asumido obtenemos el K_i , además asumiendo inicialmente un K_e igual a K_i obtenemos un periodo efectivo igual al inicial, luego utilizando la ecuación 6 se obtiene el desplazamiento objetivo, a partir de este valor se procede a verificar que el área por debajo de la curva sea igual al área por encima de la curva cumpliendo el principio de energía como se muestra en las figuras 53-54 para cada dirección.

A continuación, en la figura 52, se muestra la curva de capacidad en el eje "X" y su idealización bilineal. Además, se observa el punto de desempeño para el modelo de Muro de Densidad Baja en los ejes X e Y con Resistencia a la Compresión del Concreto de 210 kg/cm^2 .

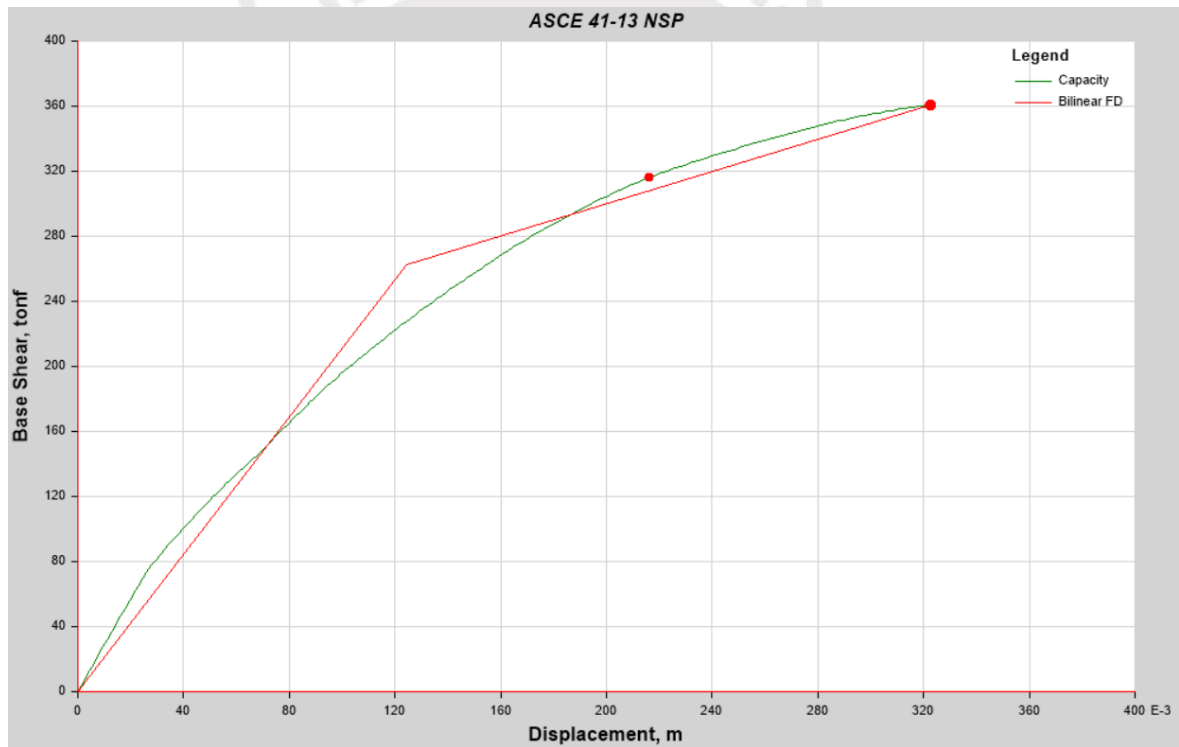


Figura 52. Curva de capacidad idealizada en X y punto de desempeño para el modelo de densidad de muros baja con $f'c$ de 210 kg/cm^2 . Fuente propia.

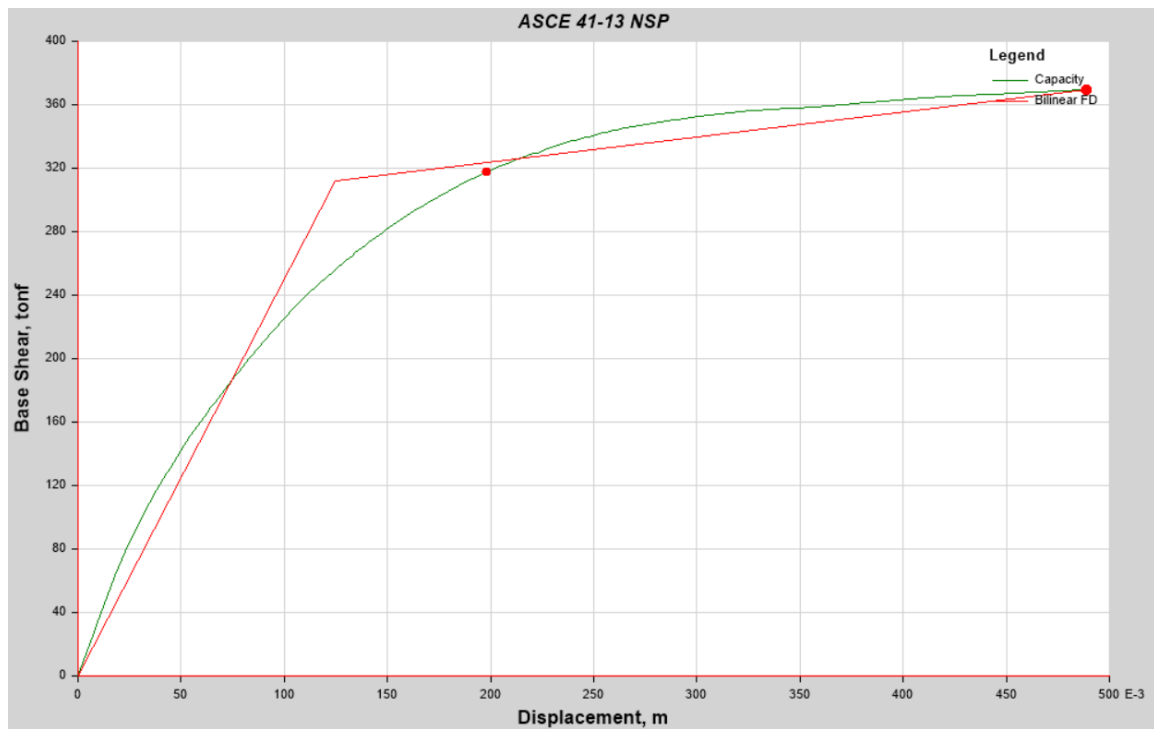


Figura 53. Curva de capacidad idealizada en Y y punto de desempeño para el modelo de densidad de muros baja con f'_c de 210 kg/cm². Fuente propia.

3.4 Procedimiento y obtención de las curvas de fragilidad

La curva de fragilidad para cada modelo se elabora utilizando la Ec.5, donde el parámetro que indica la intensidad sísmica en este caso es el desplazamiento espectral en la base. Esta metodología se basa en el manual técnico HAZUS, creado por la *Federal Emergency Management Agency*. Se procederá a obtener las curvas de fragilidad para un modelo específico, que corresponde a Muros de Densidad Baja con una resistencia del concreto de 210 kg/cm². Los demás modelos se desarrollarán de manera similar.

Se parte del desempeño de la estructura en donde se determina el desplazamiento espectral en el último nivel, sin embargo, se necesita el desplazamiento espectral en la base. Esto se realiza con la siguiente expresión.

$$S_d = S_d(\text{azotea}) * \alpha_2 \quad (\text{Ec. 7})$$

En base al manual α_2 es el factor el cual se debe multiplicar al desplazamiento en la azotea para obtener el desplazamiento en la base y esta depende del tipo de edificación. Este factor se encuentra en la tabla del manual HAZUS que se encuentra en el Anexo 1 - Tabla A1.1.

El manual categoriza a las edificaciones según el material predominante, por el sistema estructural y por su altura. En la Tabla 9 se muestra que, para nuestro caso, edificación de 7 niveles, nos encontramos en una altura media y se ha demostrado que la edificación en

análisis para todos los modelos tiene una configuración estructural que le corresponde a Muros Estructurales.

Tabla 11. Categorización del edificio según el número de niveles.

Símbolo	Descripción	Altura	
		Nombre	Niveles
C2L	Sistema de muros estructurales	Altura baja	1-3
C2M		Altura media	4-7
C2H		Altura alta	8+

Nota. Tomado de “Multi-hazard Loss Estimation Methodology”, por FEMA, 1999.

Una vez clasificada la edificación, se procede a la obtención de los parámetros de la curva de fragilidad, los cuales son la media de la variable que nos represente la respuesta del edificio y su desviación estándar.

El valor del desplazamiento espectral en la azotea obtenido del ETABS para el modelo de Muros de Densidad Baja en el eje “X” es de 16.30 cm. Para determinar el desplazamiento espectral en la base se utiliza la Ec. 7 donde el factor α_2 es considerado 0.75 para edificios de muros de altura mediana.

$$S_d = 16.30 \text{ cm} * 0.75 = 12.225 \text{ cm} = 4.81 \text{ pulgadas}$$

Los valores promedios (S_d , d_s) y las desviaciones estándar (B_d s) se extraen del Anexo 1 - Tabla A1.2, que presenta los valores de estos parámetros para un código de diseño sísmico moderado en el que se está trabajando. La Tabla 10 muestra los valores recopilados para cada estado de daño.

Tabla 12. Valores del S_d , media y desviación estándar.

	Ligero	Moderado	Extensivo	Completo
S_d (pulg)	4.87	4.87	4.87	4.87
S_d , d_s	1.20	2.53	6.95	18.00
B_d s	0.81	0.77	0.73	0.91

Nota. Tomado de “Multi-hazard Loss Estimation Methodology”, por FEMA, 1999.

Haciendo uso de la Ec. 5 del acápite 2.6 se procede a calcular la probabilidad acumulada de alcanzar un estado de daño. A continuación, se realiza el cálculo para cada estado.

Para un estado de daño ligero:

$$P[ds | Sd] = \Phi \left[\frac{1}{0.81} \ln \left(\frac{4.81}{1.20} \right) \right]$$

$$P[ds | Sd] = \Phi[1.7148]$$

$$P[ds | Sd] = 0.957$$

Para un estado de daño moderado:

$$P[ds | Sd] = \Phi \left[\frac{1}{0.77} \ln \left(\frac{4.81}{2.53} \right) \right]$$

$$P[ds | Sd] = \Phi[0.8352]$$

$$P[ds | Sd] = 0.798$$

Para un estado de daño extensivo:

$$P[ds | Sd] = \Phi \left[\frac{1}{0.73} \ln \left(\frac{4.81}{6.95} \right) \right]$$

$$P[ds | Sd] = \Phi[-0.503]$$

$$P[ds | Sd] = 0.307$$

Para un estado de daño completo:

$$P[ds | Sd] = \Phi \left[\frac{1}{0.91} \ln \left(\frac{4.81}{18} \right) \right]$$

$$P[ds | Sd] = \Phi[-1.450]$$

$$P[ds | Sd] = 0.0736$$

Con estos resultados acumulativos se procede a hallar las probabilidades de cada estado de daño restando la probabilidad acumulada entre cada uno; obteniendo un 15.9% de probabilidad de que el daño sea ligero, 49.1% moderado, 23.4% extensivo y de 7.4% un daño completo, el resto de porcentaje para alcanzar el total es de 4.3%, representado la probabilidad de no alcanzar daño alguno. Estas probabilidades son de acuerdo a la respuesta sísmica de la estructura.

Para crear las curvas de fragilidad, se sigue el mismo procedimiento mencionado anteriormente, pero en este caso se utilizan valores de desplazamiento espectral (S_d) que van desde 0.1 pulgadas hasta 15 pulgadas. Así, se obtienen probabilidades en función del desplazamiento espectral, como se ilustra en la Figura 55, que corresponde al edificio con muros de baja densidad y una resistencia del concreto de f'_c de 210 kg/cm^2 .

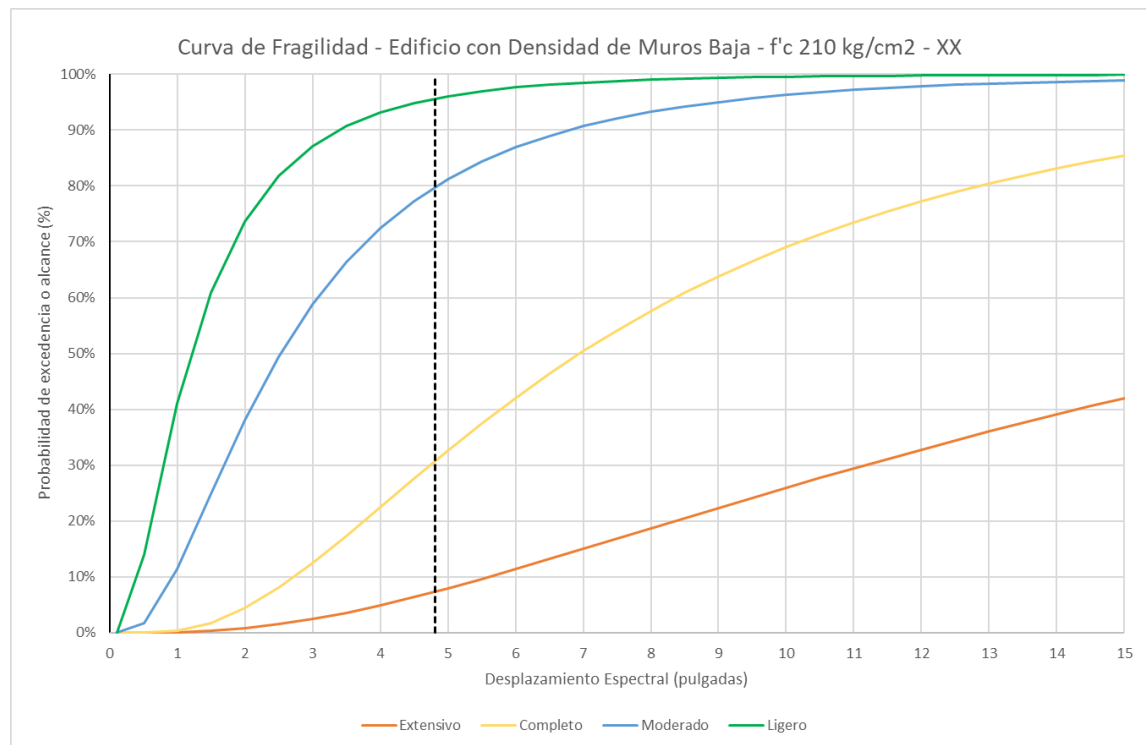


Figura 54. Curva de fragilidad para el edificio con densidad de muros baja con f'_c 210 kg/cm^2 analizada en “X”. Fuente propia.

3.5 Procedimiento y obtención del índice de daño

El índice de daño esperado para cada modelo se realiza mediante la Ec.6 a partir de las curvas de fragilidad obtenidas previamente, representando una medida del daño global que se espera que ocurra en dicha estructura en caso de un evento sísmico u otro tipo de carga. Este índice proporciona una estimación general del nivel de daño que la estructura puede experimentar durante su vida útil debido a eventos específicos, lo que es fundamental para evaluar su vulnerabilidad y tomar decisiones de diseño, refuerzo o mitigación de riesgos.

Para el modelo de Muros de Densidad Baja en el eje “X” se obtiene el siguiente gráfico con un índice de daño esperado de 0.53 (Figura 56).

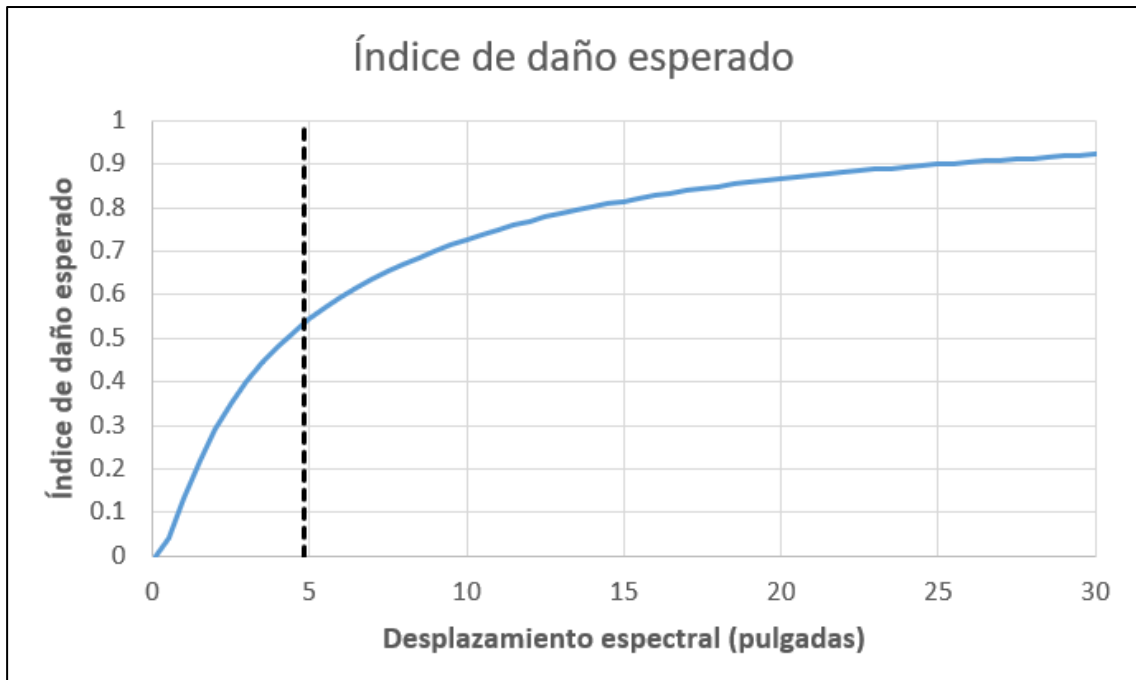
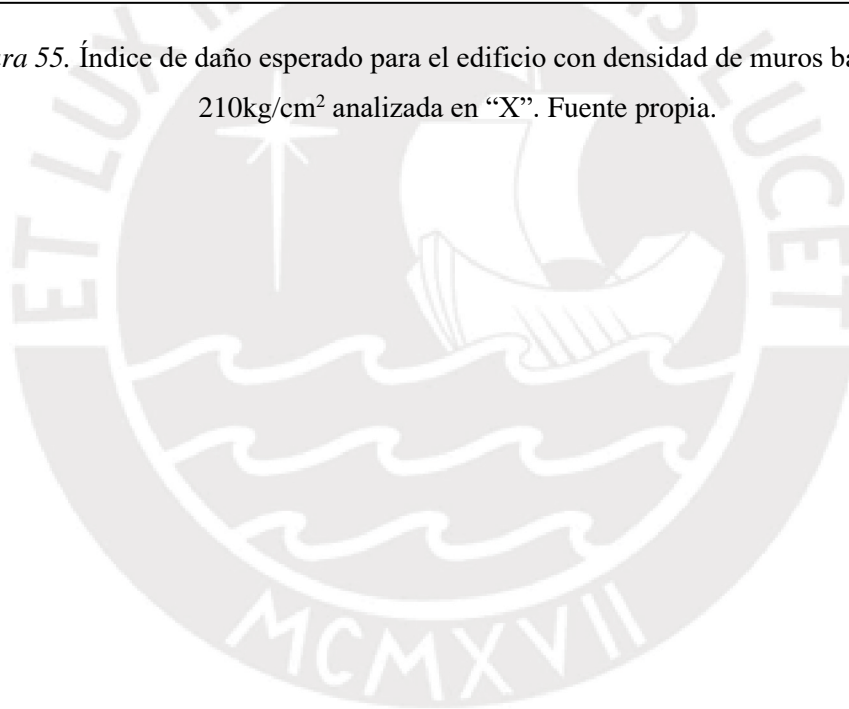


Figura 55. Índice de daño esperado para el edificio con densidad de muros baja con f'_c 210kg/cm² analizada en "X". Fuente propia.



CAPÍTULO IV: MUESTRA DE RESULTADOS

4.1 Resultados del análisis no lineal estático para todos los modelos y sus respectivas curvas de fragilidad.

A continuación, se muestran los resultados de cada modelo, que incluyen el punto de desempeño obtenido a través del método de coeficientes, junto con las curvas de fragilidad que reflejan las probabilidades de cada estado de daño y el índice de daño asociado. Además, se especifican las derivas en ambas direcciones.

Modelo de Densidad de Muros Baja con $f'c$ 210 kg/cm²:

En la figura 56 (a) se presenta los resultados en la dirección X-X, se puede observar un punto de desempeño de (21.7 cm, 317 ton), que se sitúa en la zona de 'Resguardo de Vida' según la sectorización propuesta por el SEAOC. Además, el índice de daño obtenido es de 0.61, como se muestra en la figura 56 (b). Por otro lado, los resultados de la curva de fragilidad graficada en la figura 56 (c) se presentan en la tabla 13.

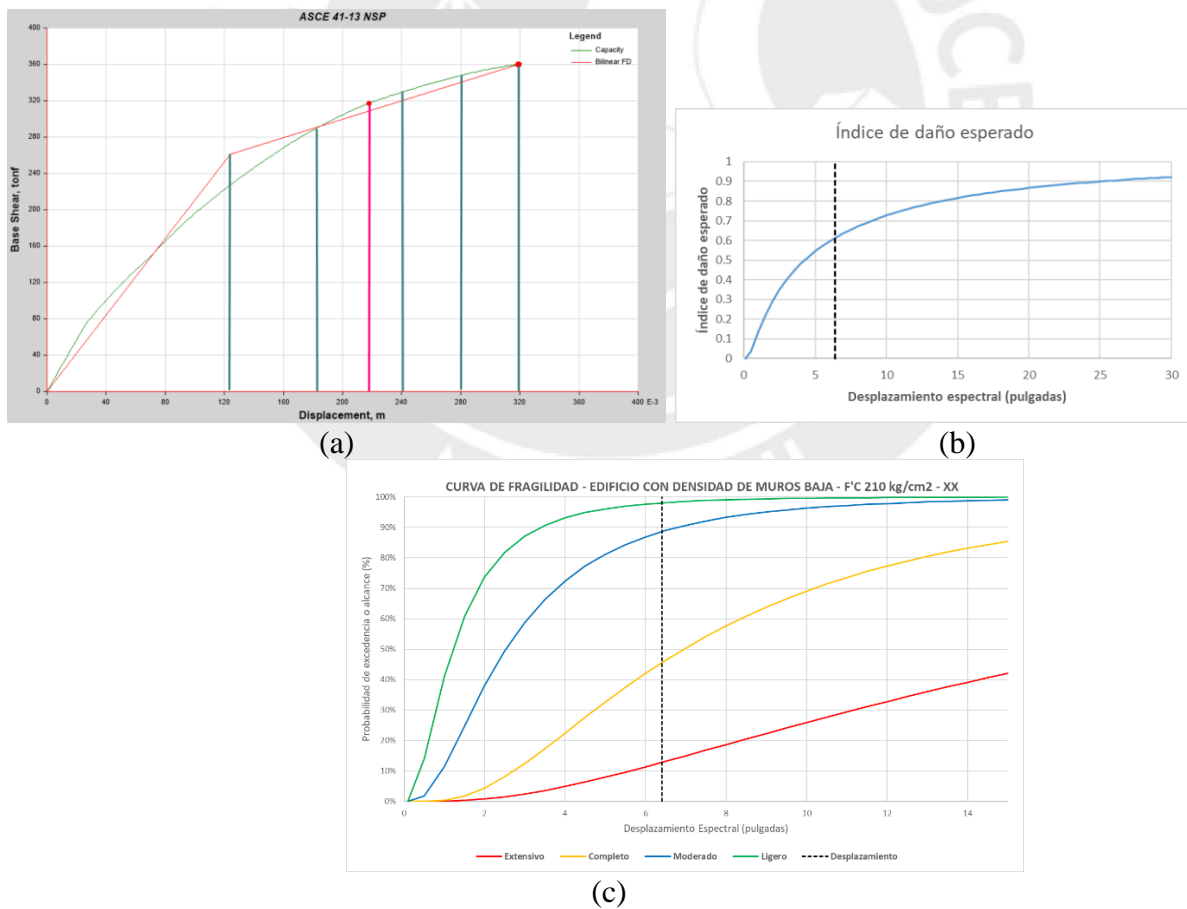


Figura 56. (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros baja con $f'c$ de 210kg/cm² analizada en "X". Fuente propia.

En la figura 57 (a) se presenta los resultados en la dirección Y-Y, se puede observar un punto de desempeño de (19.8 cm, 331 ton), que se sitúa en la zona de 'Funcional' según la sectorización propuesta por el SEAOC. Además, el índice de daño obtenido es de 0.59, como se muestra en la figura 57 (b).

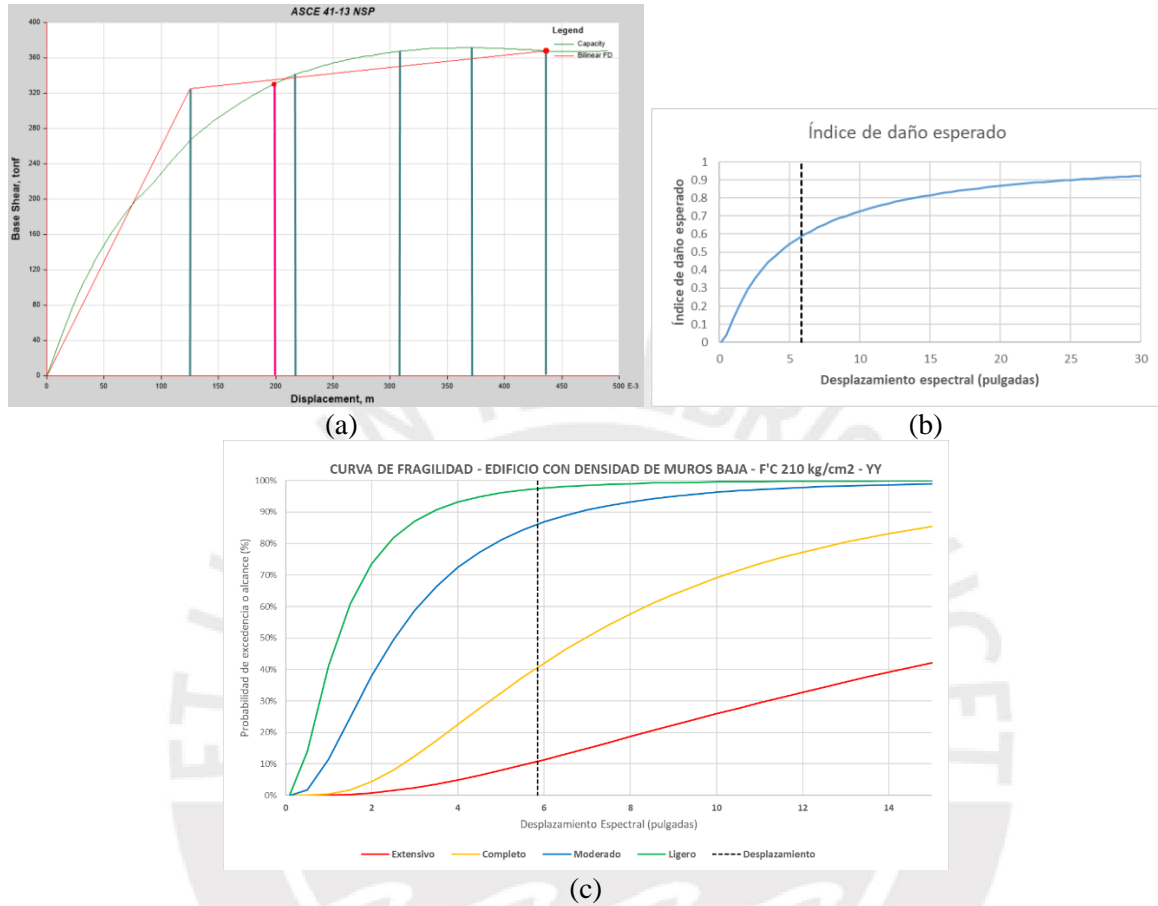


Figura 57. (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros baja con $f'c$ de 210kg/cm² analizada en “Y”. Fuente propia.

Tabla 13. Probabilidades de alcanzar un estado de daño para el modelo de densidad de muros baja y $f'c$ de 210 kg/cm². Análisis en ambas direcciones.

Modelo de Densidad de Muros Baja con $f'c$ 210 kg/cm ²	Probabilidad de alcanzar o pasar el estado de daño (%)				
	Sin daño	Ligero	Moderado	Extensivo	Completo
X-X	1.9	9.4	43.1	32.7	12.8
Y-Y	2.5	11.3	45.5	29.8	10.8

Derivas:

Tabla 14. Derivas en cada dirección para el modelo de densidad de muros baja y $f'c$ de 210 kg/cm^2 .

Modelo	Deriva X (10^{-3})	Deriva Y (10^{-3})
Densidad de Muros Baja – $f'c$ 210 kg/cm^2	12.0	10.1

Modelo de Densidad de Muros Media con $f'c$ 210 kg/cm^2 :

En la figura 58 (a) se presenta los resultados en la dirección X-X, se puede observar un punto de desempeño de (15.9 cm, 371 ton), que se sitúa en la zona de 'Funcional' según la sectorización propuesta por el SEAOC. Además, el índice de daño obtenido es de 0.54, como se muestra en la figura 58 (b).

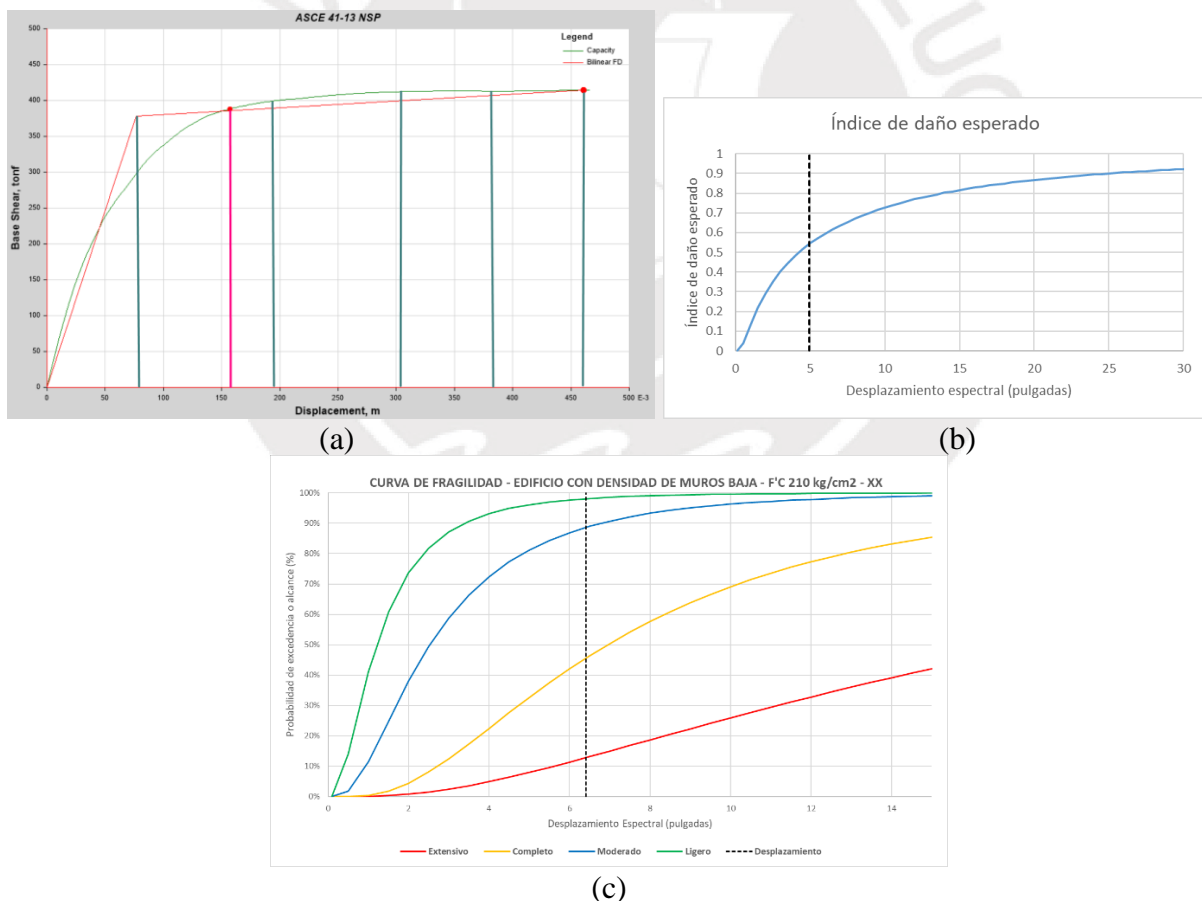


Figura 58. (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros media con $f'c$ de 210 kg/cm^2 analizada en “X”. Fuente propia.

En la figura 59 (a) se presenta los resultados en la dirección Y-Y, se puede observar un punto de desempeño de (16 cm, 386 ton), que se sitúa en la zona de 'Funcional' según la sectorización propuesta por el SEAOC. Además, el índice de daño obtenido es de 0.53, como se muestra en la figura 59 (b).

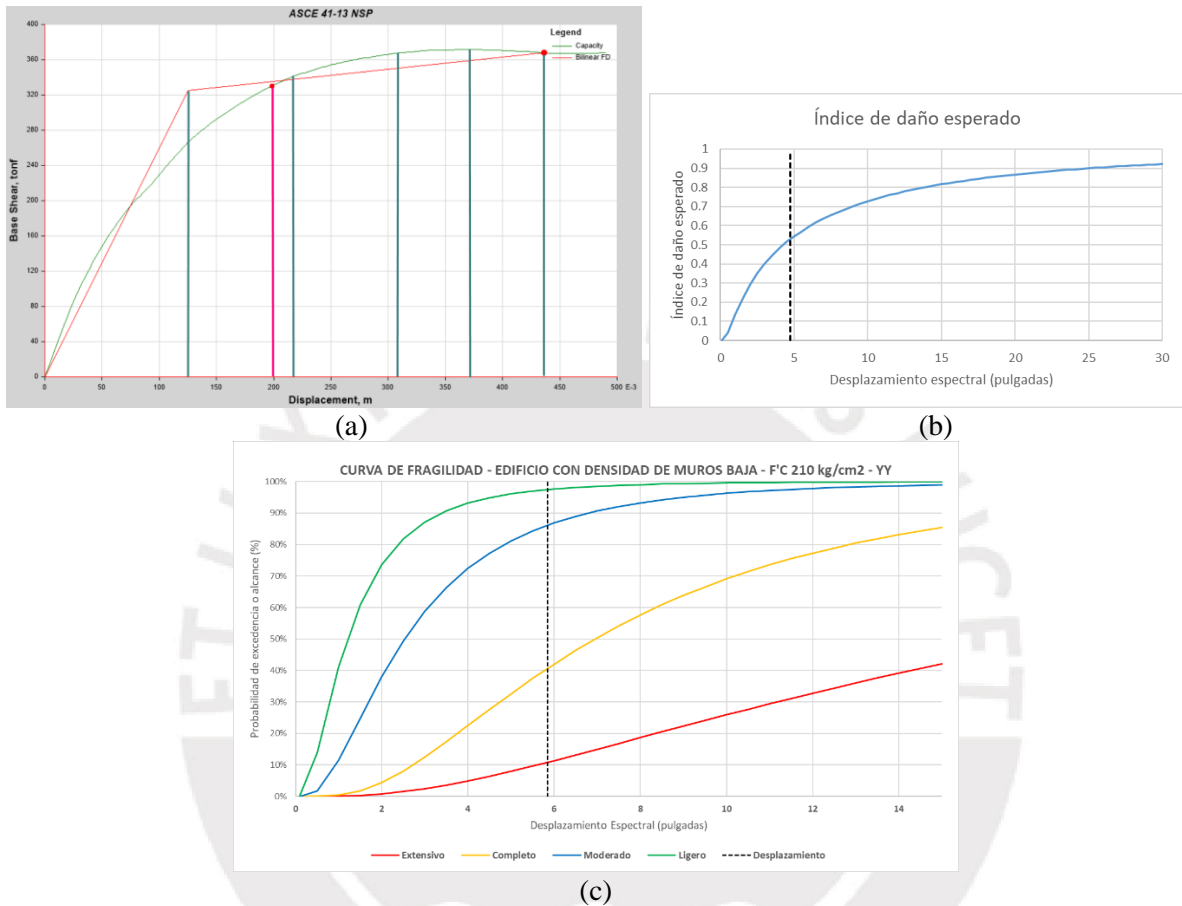


Figura 59. (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros media con $f'c$ de 210kg/cm² analizada en “Y”. Fuente propia.

Tabla 15. Probabilidades de alcanzar un estado de daño para el modelo de densidad de muros media y $f'c$ de 210 kg/cm². Análisis en ambas direcciones.

Modelo de Densidad de Muros Media con $f'c$ 210 kg/cm ²	Probabilidad de alcanzar o pasar el estado de daño (%)				
	Sin daño	Ligero	Moderado	Extensivo	Completo
X-X	4.1	15.3	48.8	24.2	7.7
Y-Y	4.5	16.3	49.3	22.9	7.1

Derivas:

Tabla 16. Derivas en cada dirección para el modelo de densidad de muros media y $f'c$ de 210 kg/cm².

Modelo	Deriva X (10 ⁻³)	Deriva Y (10 ⁻³)
Densidad de Muros Media – $f'c$ 210kg/cm ²	7.0	6.7

Modelo de Densidad de Muros Alta con $f'c$ 210 kg/cm²:

En la figura 60 (a) se presenta los resultados en la dirección X-X, se puede observar un punto de desempeño de (12.7 cm, 425 ton), que se sitúa en la zona de 'Funcional' según la sectorización propuesta por el SEAOC. Además, el índice de daño obtenido es de 0.46, como se muestra en la figura 60 (b).

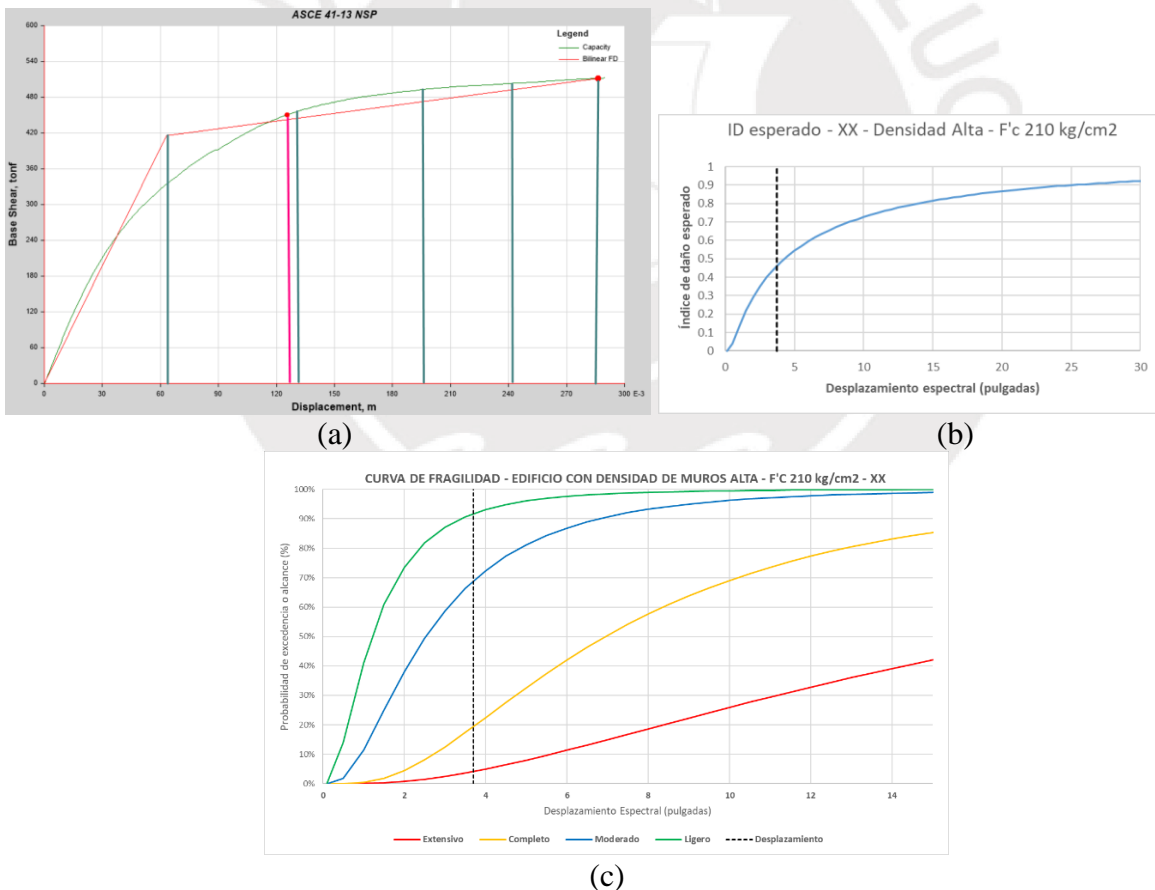


Figura 60. (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo densidad de muros alta con $f'c$ de 210kg/cm² analizada en “X”.

Fuente propia.

En la figura 61 (a) se presenta los resultados en la dirección Y-Y, se puede observar un punto de desempeño de (13.7 cm, 450 ton), que se sitúa en la zona de 'Funcional' según la sectorización propuesta por el SEAOC. Además, el índice de daño obtenido es de 0.49, como se muestra en la figura 61 (b).

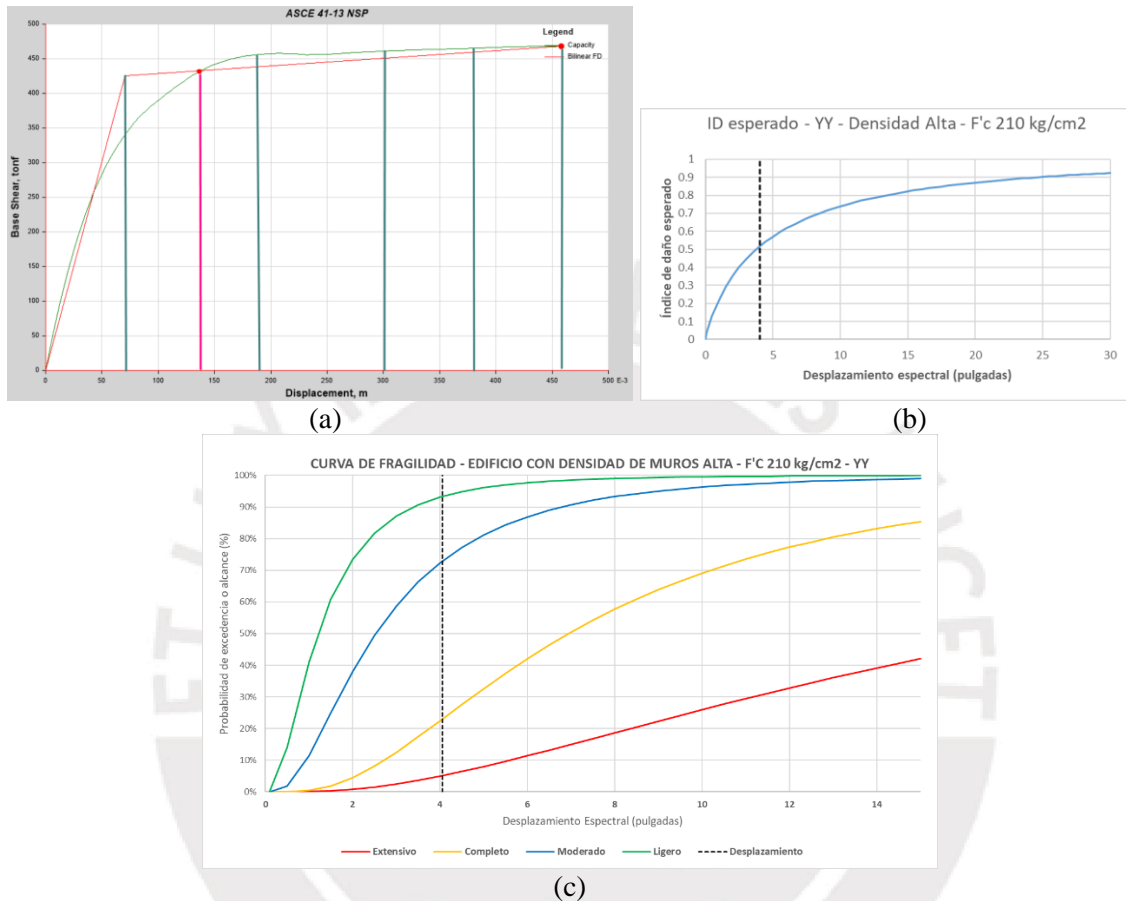


Figura 61. (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros alta con $f'c$ de 210kg/cm² analizada en “Y”. Fuente propia.

Tabla 17. Probabilidades de alcanzar un estado de daño para el modelo de densidad de muros alta y $f'c$ de 210 kg/cm². Análisis en ambas direcciones.

Modelo de Densidad de Muros Alta con $f'c$ 210 kg/cm ²	Probabilidad de alcanzar o pasar el estado de daño (%)				
	Sin daño	Ligero	Moderado	Extensivo	Completo
X-X	8.2	22.9	49.5	15.3	4.1
Y-Y	6.7	20.4	50	17.9	5.1

Derivas:

Tabla 18. Derivas en cada dirección para el modelo de densidad de muros alta y $f'c$ de 210 kg/cm^2 .

Modelo	Deriva X (10^{-3})	Deriva Y (10^{-3})
Densidad de Muros Alta – $f'c$ 210 kg/cm^2	6.1	5.6

Modelo de Densidad de Muros Baja con $f'c$ 280 kg/cm^2 :

En la figura 62 (a) se presenta los resultados en la dirección X-X, se puede observar un punto de desempeño de (17.3 cm, 378 ton), que se sitúa en la zona de 'Funcional' según la sectorización propuesta por el SEAOC. Además, el índice de daño obtenido es de 0.55, como se muestra en la figura 62 (b).

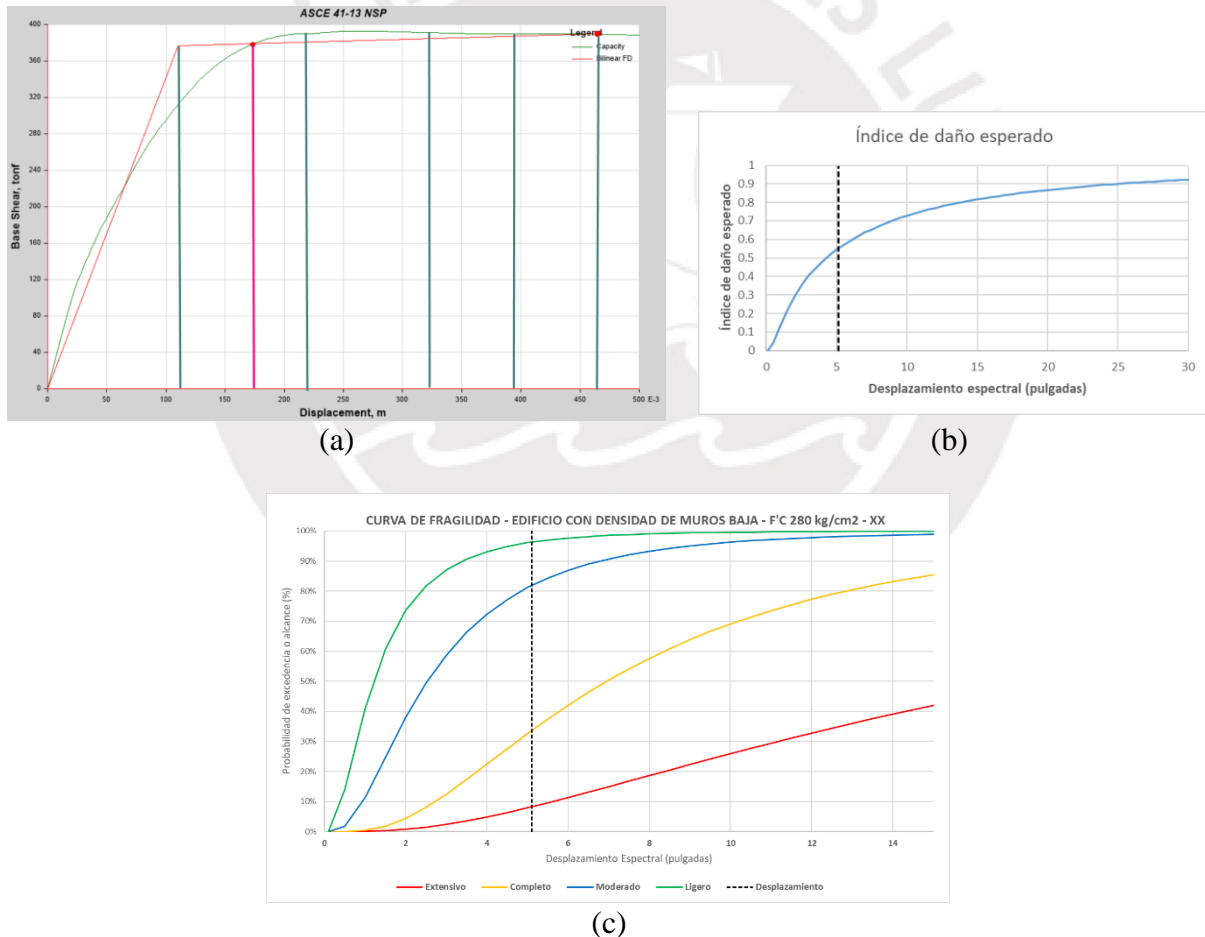


Figura 62. (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros baja con $f'c$ de 280 kg/cm^2 analizada en “X”. Fuente propia.

En la figura 63 (a) se presenta los resultados en la dirección Y-Y, se puede observar un

punto de desempeño de (17.0 cm, 332 ton), que se sitúa en la zona de 'Funcional' según la sectorización propuesta por el SEAOC. Además, el índice de daño obtenido es de 0.55, como se muestra en la figura 63 (b).

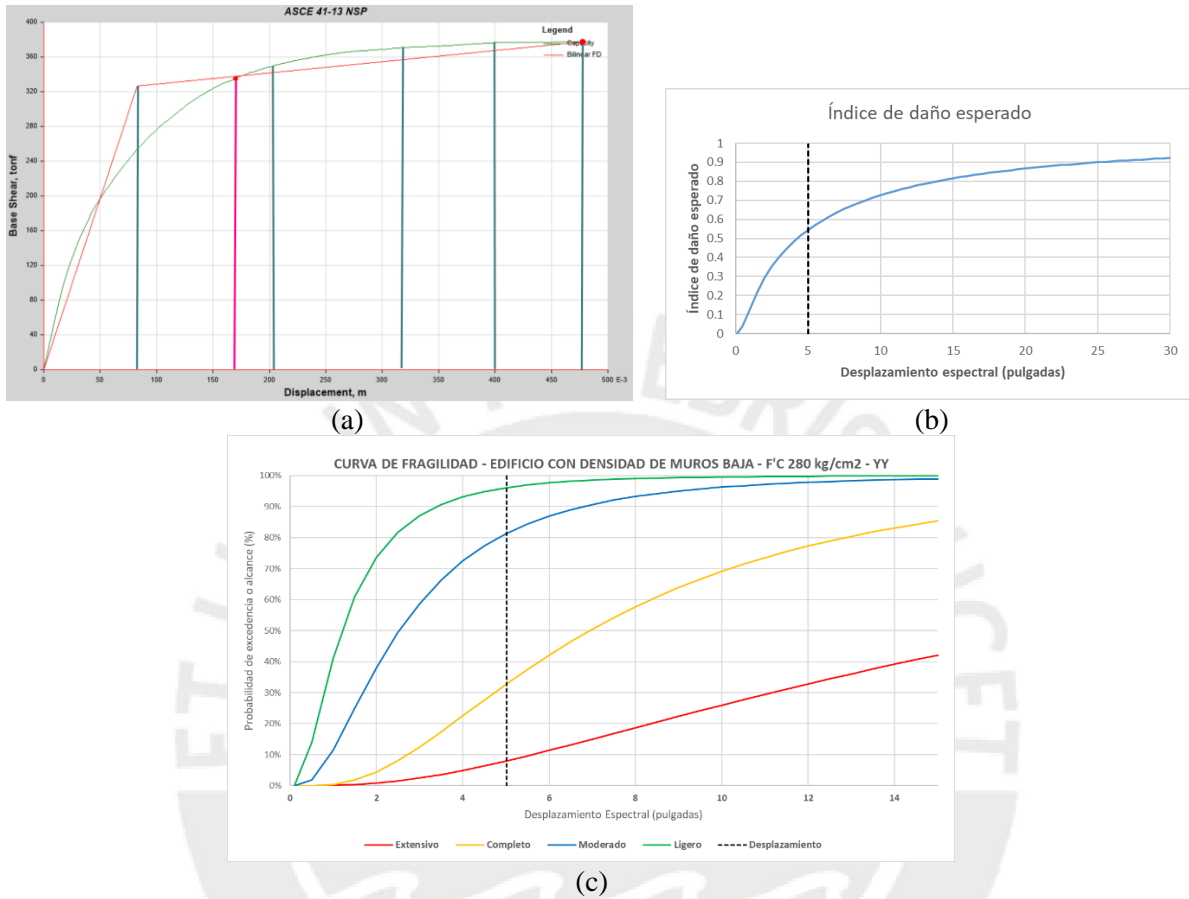


Figura 63. (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros baja con $f'c$ de 280kg/cm² analizada en “Y”. Fuente propia.

Tabla 19. Probabilidades de alcanzar un estado de daño para el modelo de densidad de muros baja y $f'c$ de 280 kg/cm². Análisis en ambas direcciones.

Modelo de Densidad de Muros Baja con $f'c$ 280 kg/cm ²	Probabilidad de alcanzar o pasar el estado de daño (%)				
	Sin daño	Ligero	Moderado	Extensivo	Completo
X-X	3.7	14.4	48.3	25.3	8.3
Y-Y	3.9	14.8	48.5	24.8	8

Derivas:

Tabla 20. Derivas en cada dirección para el modelo de densidad de muros baja y $f'c$ de 280 kg/cm^2 .

Modelo	Deriva X (10^{-3})	Deriva Y (10^{-3})
Densidad de Muros Baja – $f'c$ 280 kg/cm^2	8.80	7.3

Modelo de Densidad de Muros Media con $f'c$ 280 kg/cm^2 :

En la figura 64 (a) se presenta los resultados en la dirección X-X, se puede observar un punto de desempeño de (13.5 cm, 410 ton), que se sitúa en la zona de 'Funcional' según la sectorización propuesta por el SEAOC. Además, el índice de daño obtenido es de 0.48, como se muestra en la figura 64 (b).

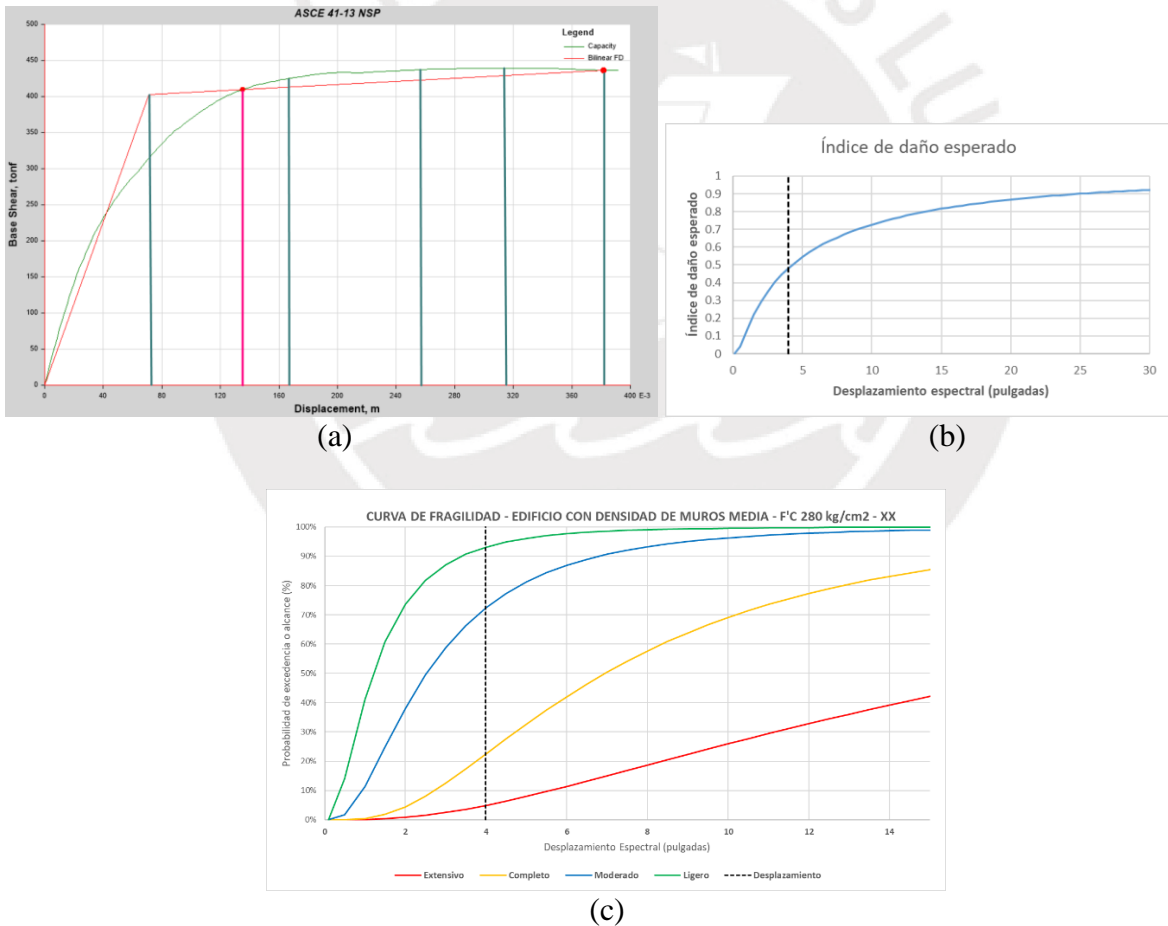


Figura 64. (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros media con $f'c$ de 280 kg/cm^2 analizada en “X”. Fuente propia.

En la figura 65 (a) se presenta los resultados en la dirección Y-Y, se puede observar un

punto de desempeño de (14.2 cm, 400 ton), que se sitúa en la zona de 'Funcional' según la sectorización propuesta por el SEAOC. Además, el índice de daño obtenido es de 0.49, como se muestra en la figura 65 (b).

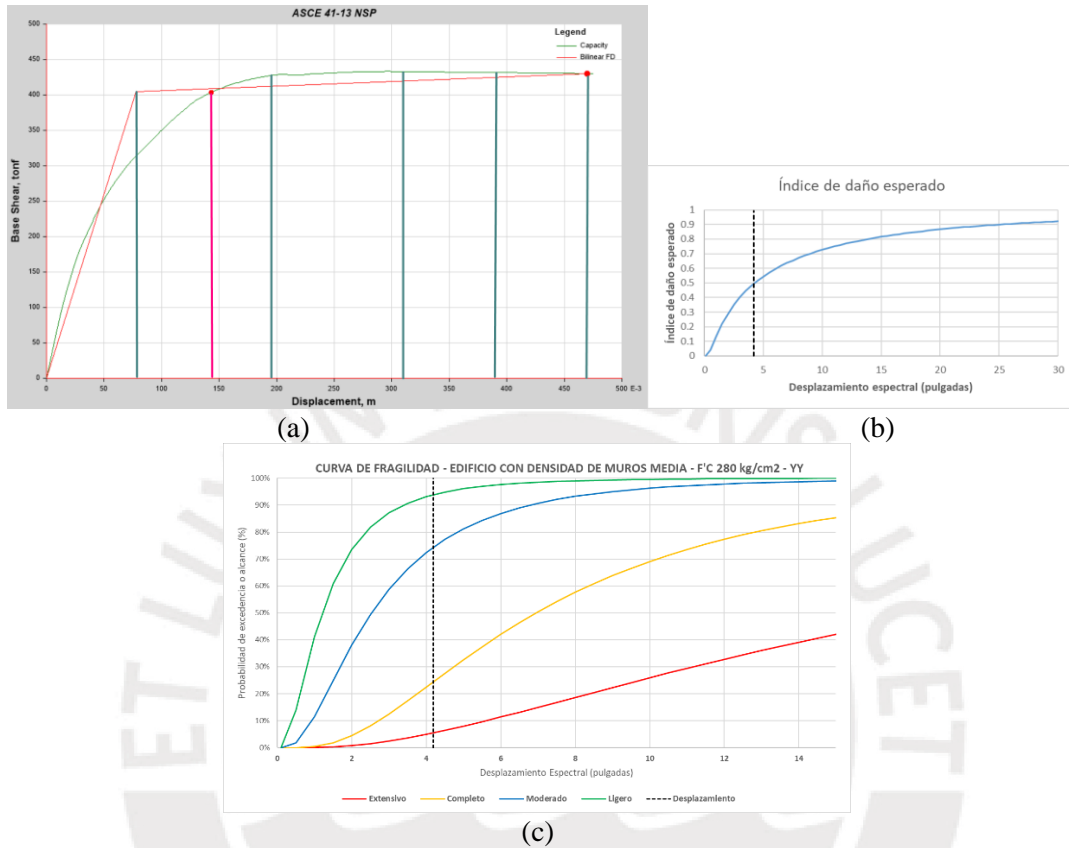


Figura 65. (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros media con $f'c$ de 280 kg/cm^2 analizada en "Y". Fuente propia.

Tabla 21. Probabilidades de alcanzar un estado de daño para el modelo de densidad de muros media y $f'c$ de 280 kg/cm^2 . Análisis en ambas direcciones.

Modelo de Densidad de Muros Media con $f'c$ 280 kg/cm^2	Probabilidad de alcanzar o pasar el estado de daño (%)				
	Sin daño	Ligero	Moderado	Extensivo	Completo
X-X	6.9	20.8	49.9	17.4	4.9
Y-Y	6.1	19.5	50	19	5.5

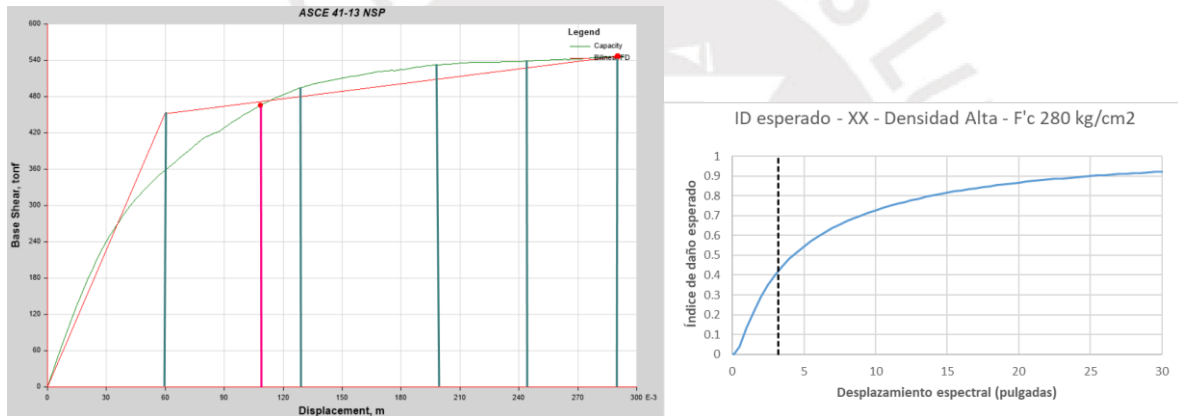
Derivas:

Tabla 22. Derivas en cada dirección para el modelo de densidad de muros media y $f'c$ de 280 kg/cm².

Modelo	Deriva X (10 ⁻³)	Deriva Y (10 ⁻³)
Densidad de Muros Media – $f'c$ 280kg/cm ²	6.4	5.8

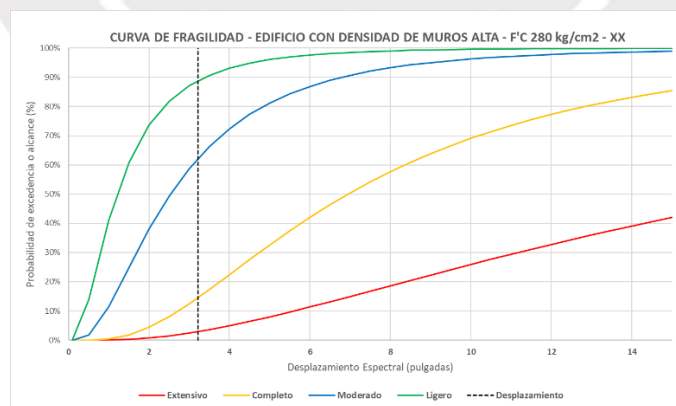
Modelo de Densidad de Muros Alta con $f'c$ 280 kg/cm²:

En la figura 66 (a) se presenta los resultados en la dirección X-X, se puede observar un punto de desempeño de (10.9 cm, 470 ton), que se sitúa en la zona de 'Funcional' según la sectorización propuesta por el SEAOC. Además, el índice de daño obtenido es de 0.42, como se muestra en la figura 66 (b).



(a)

(b)



(c)

Figura 66. (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros alta con $f'c$ de 280kg/cm² analizada en “X”. Fuente propia.

En la figura 67 (a) se presenta los resultados en la dirección Y-Y, se puede observar un

punto de desempeño de (11.9 cm, 450 ton), que se sitúa en la zona de 'Funcional' según la sectorización propuesta por el SEAOC. Además, el índice de daño obtenido es de 0.44, como se muestra en la figura 67 (b).

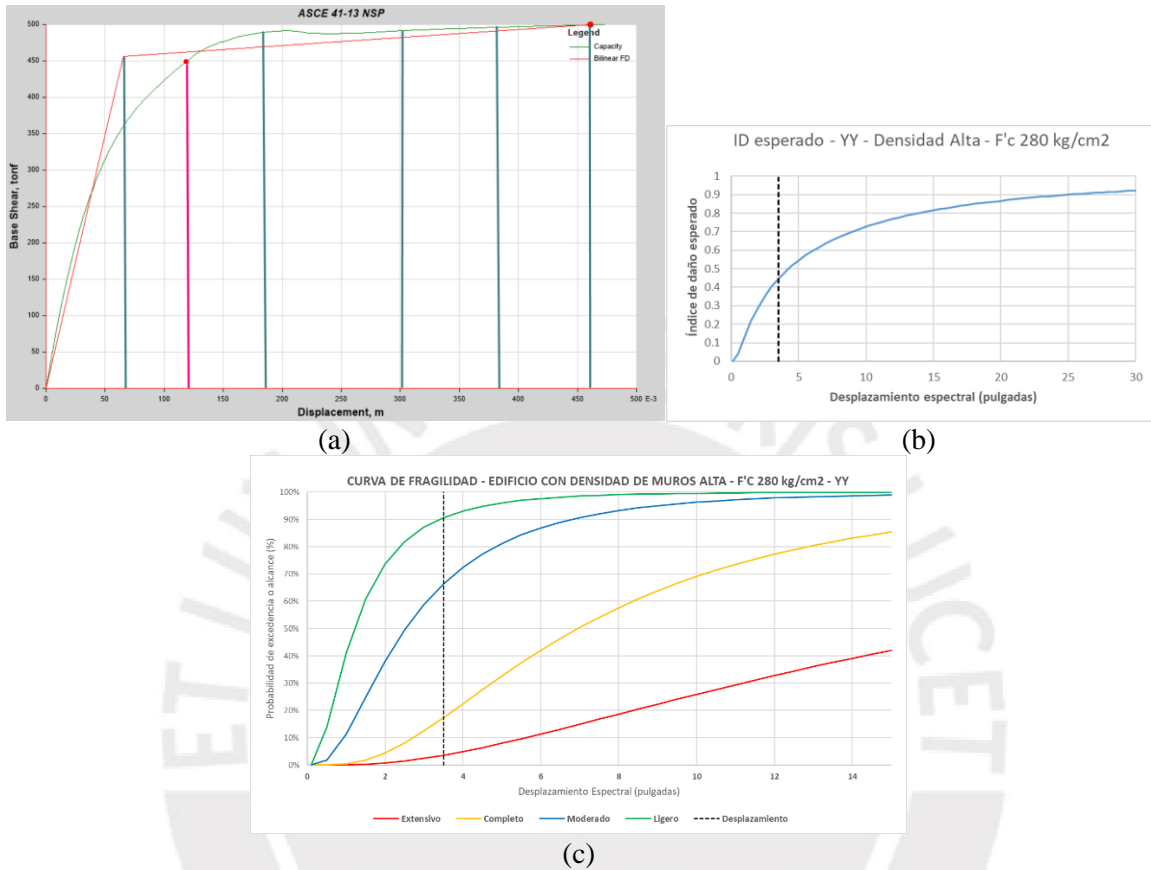


Figura 67. (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros alta con $f'c$ de 280kg/cm² analizada en “Y”. Fuente propia.

Tabla 23. Probabilidades de alcanzar un estado de daño para el modelo de densidad de muros alta y $f'c$ de 280 kg/cm². Análisis en ambas direcciones.

Modelo de Densidad de Muros Alta con $f'c$ 280 kg/cm ²	Probabilidad de alcanzar o pasar el estado de daño (%)				
	Sin daño	Ligero	Moderado	Extensivo	Completo
X-X	11.2	26.6	47.7	11.7	2.9
Y-Y	9.3	24.4	49	13.8	3.6

Derivas:

Tabla 24. Derivas en cada dirección para el modelo de densidad de muros alta y $f'c$ de 280 kg/cm^2 .

Modelo	Deriva X (10^{-3})	Deriva Y (10^{-3})
Densidad de Muros Alta – $f'c$ 280 kg/cm^2	5.6	4.8

Modelo de Densidad de Muros Baja con $f'c$ 350 kg/cm^2 :

En la figura 68 (a) se presenta los resultados en la dirección X-X, se puede observar un punto de desempeño de (16.3 cm, 416 ton), que se sitúa en la zona de 'Funcional' según la sectorización propuesta por el SEAOC. Además, el índice de daño obtenido es de 0.53, como se muestra en la figura 68 (b).

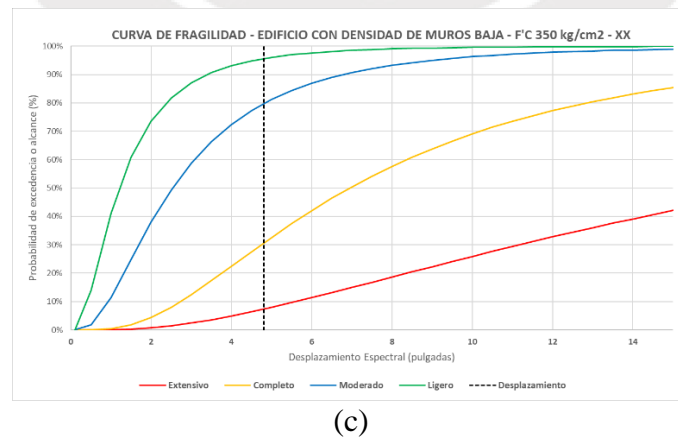
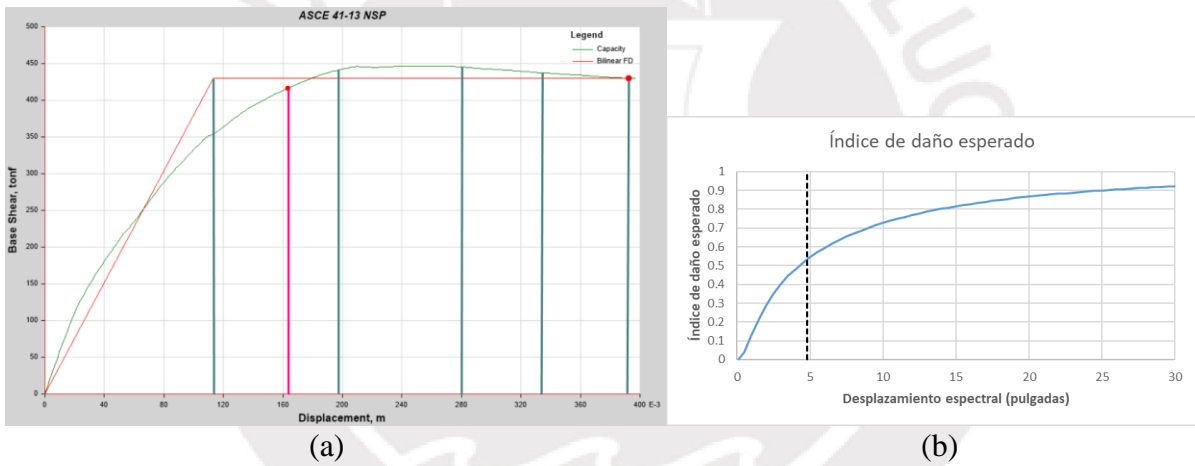


Figura 68. (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros baja con $f'c$ de 350 kg/cm^2 analizada en "X". Fuente propia.

En la figura 69 (a) se presenta los resultados en la dirección Y-Y, se puede observar un punto de desempeño de (15.5 cm, 394 ton), que se sitúa en la zona de 'Funcional' según la sectorización propuesta por el SEAOC. Además, el índice de daño obtenido es de 0.52, como se muestra en la figura 69 (b).

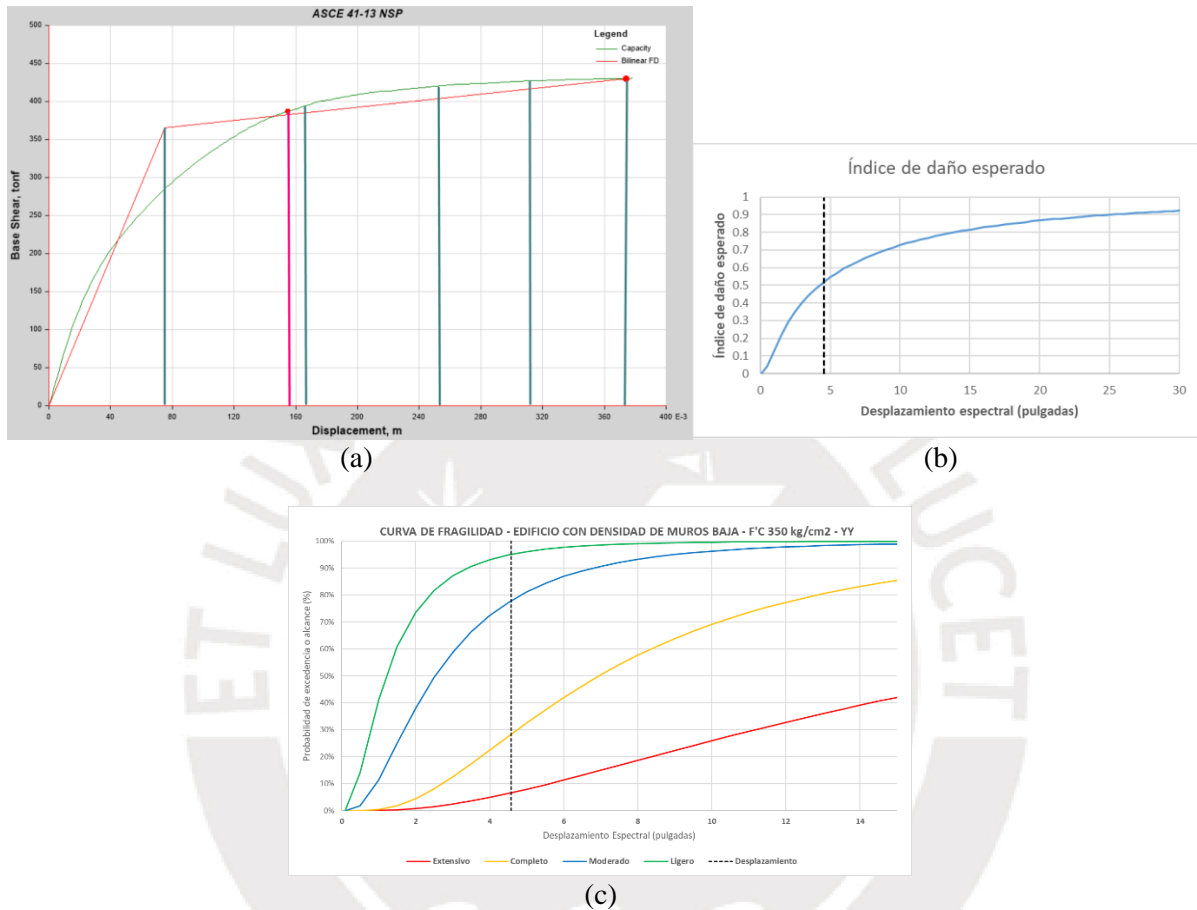


Figura 69. (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros baja con $f'c$ de 350 kg/cm^2 analizada en “Y”. Fuente propia.

Tabla 25. Probabilidades de alcanzar un estado de daño para el modelo de densidad de muros baja y $f'c$ de 350 kg/cm^2 . Análisis en ambas direcciones.

Modelo de Densidad de Muros Baja con $f'c$ 350 kg/cm^2	Probabilidad de alcanzar o pasar el estado de daño (%)				
	Sin daño	Ligero	Moderado	Extensivo	Completo
X-X	4.3	15.9	49.1	23.4	7.4
Y-Y	4.9	17.2	49.6	21.7	6.6

Derivas:

Tabla 26. Derivas en cada dirección para el modelo de densidad de muros baja y $f'c$ de 350 kg/cm^2 .

Modelo	Deriva X (10^{-3})	Deriva Y (10^{-3})
Densidad de Muros Baja – $f'c$ 350 kg/cm^2	7.1	6.5

Modelo de Densidad de Muros Media con $f'c$ 350 kg/cm^2 :

En la figura 70 (a) se presenta los resultados en la dirección Y-Y, se puede observar un punto de desempeño de (12.1 cm, 424 ton), que se sitúa en la zona de 'Funcional' según la sectorización propuesta por el SEAOC. Además, el índice de daño obtenido es de 0.45, como se muestra en la figura 70 (b).

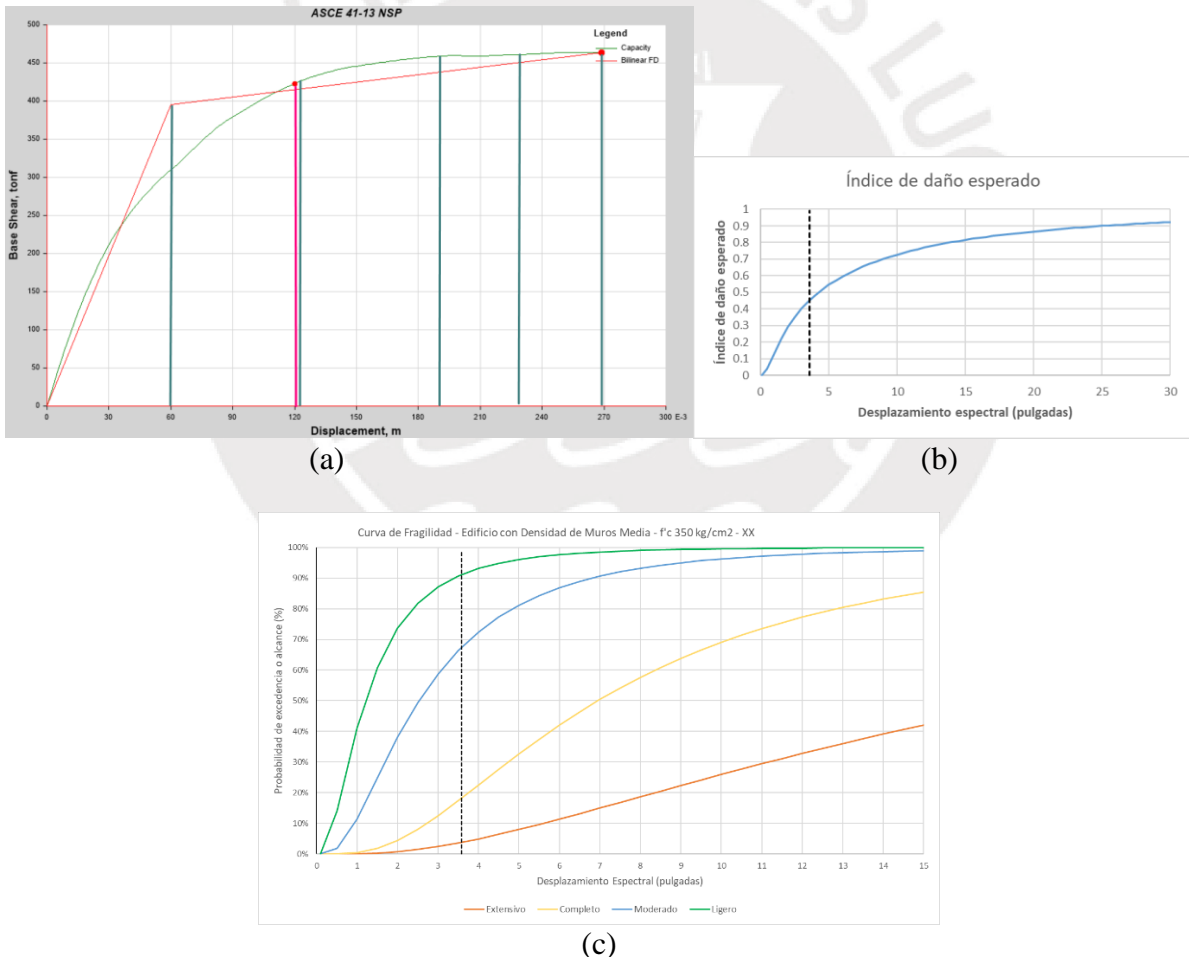


Figura 70. (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros media con $f'c$ de 350 kg/cm^2 analizada en “X”. Fuente propia.

En la figura 71 (a) se presenta los resultados en la dirección Y-Y, se puede observar un punto de desempeño de (12.7 cm, 412 ton), que se sitúa en la zona de 'Funcional' según la sectorización propuesta por el SEAOC. Además, el índice de daño obtenido es de 0.46, como se muestra en la figura 71 (b).

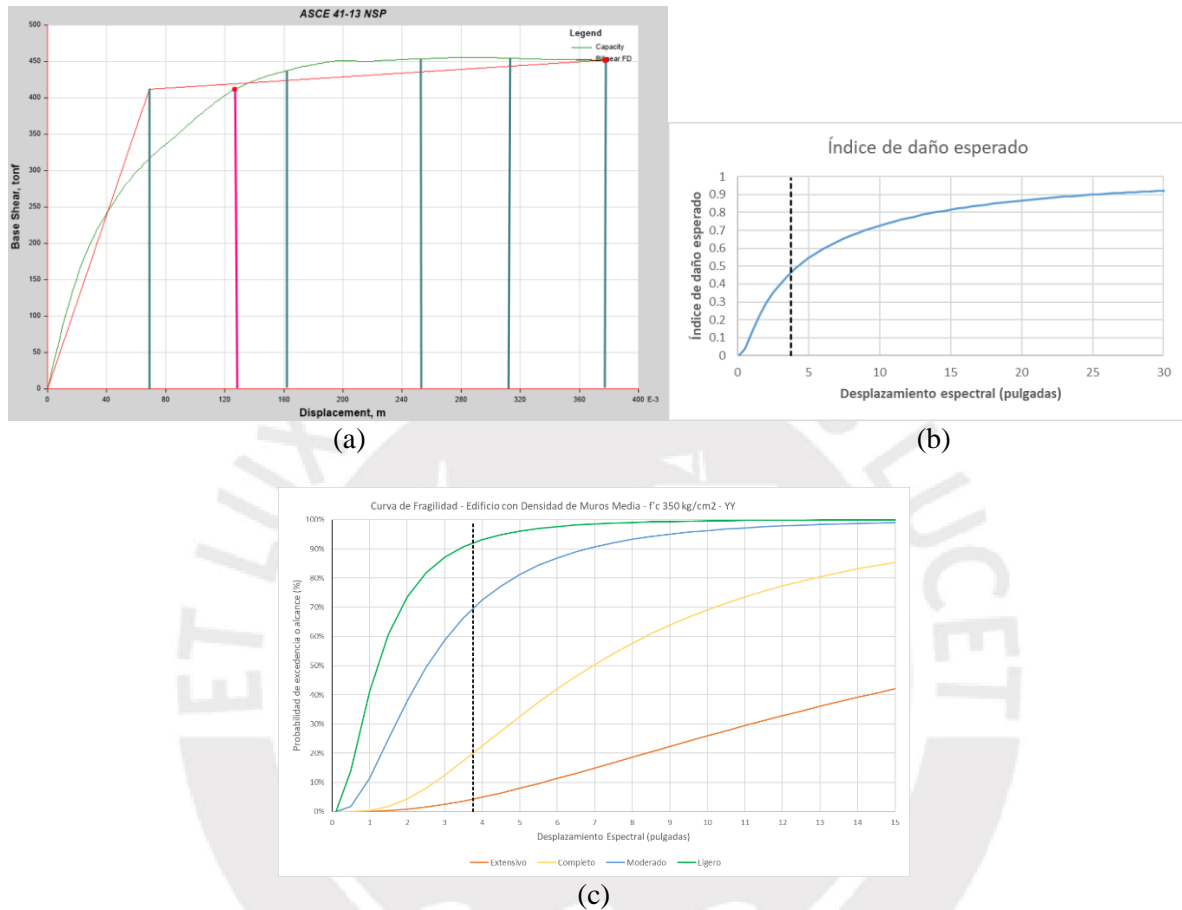


Figura 71. (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros media con $f'c$ de 350kg/cm^2 analizada en “Y”. Fuente propia.

Tabla 27. Probabilidades de alcanzar un estado de daño para el modelo de densidad de muros media y $f'c$ de 210 kg/cm^2 . Análisis en ambas direcciones.

Modelo de Densidad de Muros Media con $f'c$ 350 kg/cm^2	Probabilidad de alcanzar o pasar el estado de daño (%)				
	Sin daño	Ligero	Moderado	Extensivo	Completo
X-X	8.9	23.8	49.2	14.4	3.8
Y-Y	7.9	22.4	49.6	15.7	4.3

Derivas:

Tabla 28. Derivas en cada dirección para el modelo de densidad de muros media y $f'c$ de 350 kg/cm².

Modelo	Deriva X (10 ⁻³)	Deriva Y (10 ⁻³)
Densidad de Muros Media – $f'c$ 350kg/cm ²	5.80	5.1

Modelo de Densidad de Muros Alta con $f'c$ 350 kg/cm²:

En la figura 72 (a), se puede observar un punto de desempeño de (9.8 cm, 480 ton), que se sitúa en la zona de 'Funcional' según la sectorización propuesta por el SEAOC. Además, el índice de daño obtenido es de 0.39, como se muestra en la figura 73 (b).

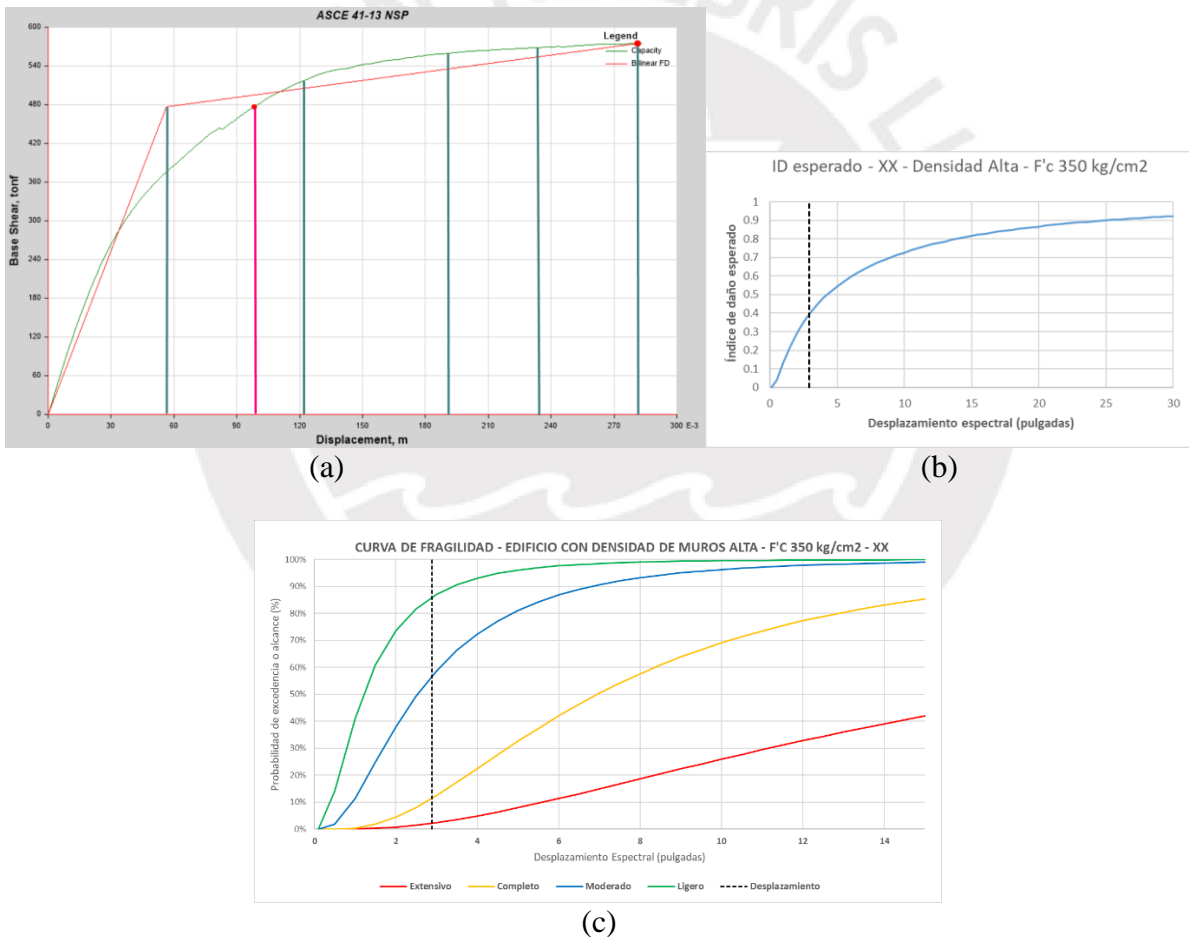


Figura 72. (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros alta con $f'c$ de 350kg/cm² analizada en “X”. Fuente propia.

En la figura 73 (a), se puede observar un punto de desempeño de (10.6 cm, 460 ton), que se sitúa en la zona de 'Funcional' según la sectorización propuesta por el SEAOC. Además,

el índice de daño obtenido es de 0.41, como se muestra en la figura 73 (b).

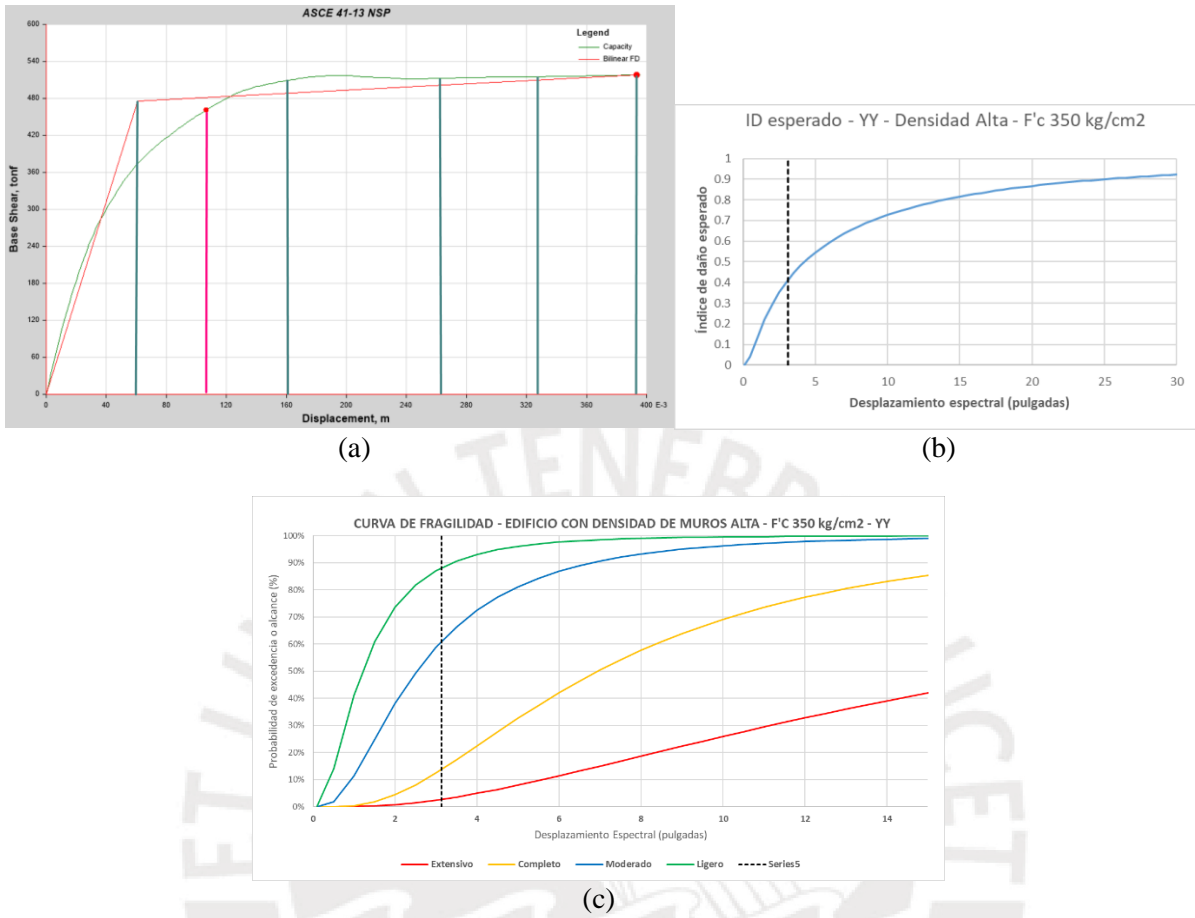


Figura 73. (a) Curva de Capacidad y punto de desempeño. (b) Índice de daño. (c) Curvas de fragilidad. Resultados del modelo de densidad de muros alta con $f'c$ de 350kg/cm² analizada en “Y”. Fuente propia.

Tabla 29. Probabilidades de alcanzar un estado de daño para el modelo de densidad de muros alta y $f'c$ de 350 kg/cm². Análisis en ambas direcciones.

Modelo de Densidad de Muros Alta con $f'c$ 350 kg/cm ²	Probabilidad de alcanzar o pasar el estado de daño (%)				
	Sin daño	Ligero	Moderado	Extensivo	Completo
X-X	13.9	29.2	45.4	9.3	2.2
Y-Y	11.8	27.3	47.2	11	2.7

Derivas:

Tabla 30. Derivas en cada dirección para el modelo de densidad de muros alta y f'c de 350 kg/cm².

Modelo	Deriva X (10 ⁻³)	Deriva Y (10 ⁻³)
Densidad de Muros Alta – f'c 350kg/cm ²	4.8	4.1

A continuación, se muestran una tabla resumen de las derivas en cada tipo de modelo y, por otro lado, parámetros arrojados de las curvas de capacidad, así como las matrices de probabilidad de daño para cada caso de variable en estudio y en cada dirección de análisis.

Tabla 31. Resumen de derivas para cada modelo.

Modelo	Deriva X (10 ⁻³)	Deriva Y (10 ⁻³)
Densidad de Muros Baja (f'c 210 kg/cm ²)	12.0	10.1
Densidad de Muros Media (f'c 210 kg/cm ²)	7.0	6.7
Densidad de Muros Alta (f'c 210 kg/cm ²)	6.1	5.6
Densidad de Muros Baja (f'c 280 kg/cm ²)	8.8	7.3
Densidad de Muros Media (f'c 280 kg/cm ²)	6.4	5.8
Densidad de Muros Alta (f'c 280 kg/cm ²)	5.6	4.8
Densidad de Muros Baja (f'c 350 kg/cm ²)	7.1	6.5
Densidad de Muros Media (f'c 350 kg/cm ²)	5.8	5.1

Modelo	Deriva X (10 ⁻³)	Deriva Y (10 ⁻³)
Densidad de Muros Alta (f'c 350 kg/cm ²)	4.8	4.1

Tabla 32. Parámetros de curva de capacidad de los modelos con f'c constante de 210 kg/cm². Resultados del análisis en "X"

Densidad de Muros	Ki (tonf/m)	Ke (tonf/m)	Dy (cm)	Vy (tonf)	Displ (cm)
Baja	2869.5	2463.1	12.37	181.5	21.7
Media	6805.3	5741.6	7.66	276.8	15.6
Alta	8208.9	7423.2	6.30	293.5	12.5

Tabla 33. Parámetros de curva de capacidad de los modelos con f'c constante de 210 kg/cm². Resultados del análisis en "Y"

Densidad de Muros	Ki (tonf/m)	Ke (tonf/m)	Dy (cm)	Vy (tonf)	Displ (cm)
Baja	3546.4	3240.4	12.50	193.2	19.8
Media	6599.8	5632.1	8.22	260.5	16.0
Alta	8196.4	6911.6	7.03	307.1	13.7

Tabla 34. Parámetros de curva de capacidad de los modelos con densidad de muros baja constante. Resultados del análisis en "X"

Resistencia del concreto (kg/cm ²)	Ki (tonf/m)	Ke (tonf/m)	Dy (cm)	Vy (tonf)	Displ (cm)
210	6487.4	5397.0	5.75	310.5	21.7
280	7476.3	6484.5	4.68	303.5	17.3
350	8375.0	7801.3	3.42	267.0	16.3

Tabla 35. Parámetros de curva de capacidad de los modelos con densidad de muros baja constante. Resultados del análisis en "Y"

Resistencia del concreto (kg/cm ²)	Ki (tonf/m)	Ke (tonf/m)	Dy (cm)	Vy (tonf)	Displ (cm)
210	7580.9	6413.4	4.58	293.5	19.8
280	8777.1	7765.4	3.61	280.3	17.0
350	9822.1	8925.0	3.07	274.0	15.5

Tabla 36. Matriz de Probabilidad de daño considerando la variable de densidad de muros con un $f'c$ constante de 210 kg/cm². Resultados del análisis en “X”

Densidad de Muros	Sin daño	Daño Ligero	Daño Moderado	Daño Extensivo	Daño Completo
Baja	1.9%	9.4%	43.1%	32.7%	12.8%
Media	4.1%	15.3%	48.8%	24.2%	7.7%
Alta	8.2%	22.9%	49.5%	15.3%	4.1%

Tabla 37. Matriz de Probabilidad de daño considerando la variable de resistencia del concreto con una densidad constante de muros baja. Resultados del análisis en “X”

Resistencia del concreto $f'c$ (kg/cm ²)	Sin daño	Daño Ligero	Daño Moderado	Daño Extensivo	Daño Completo
210	1.9%	9.4%	43.1%	32.7%	12.8%
280	3.7%	14.4%	48.3%	25.3%	8.3%
350	4.3%	15.9%	49.1%	23.4%	7.4%

Tabla 38. Matriz de Probabilidad de daño considerando la variable de densidad de muros con un $f'c$ constante de 210 kg/cm². Resultados del análisis en “Y”

Densidad de Muros	Sin daño	Daño Ligero	Daño Moderado	Daño Extensivo	Daño Completo
Baja	2.5%	11.3%	45.5%	29.8%	10.8%
Media	4.5%	16.3%	49.3%	22.9%	7.1%
Alta	6.7%	20.4%	50.0%	17.9%	5.1%

Tabla 39. Matriz de Probabilidad de daño considerando la variable de resistencia del concreto con una densidad constante de muros baja. Resultados del análisis en “Y”

Resistencia del concreto $f'c$ (kg/cm ²)	Sin daño	Daño Ligero	Daño Moderado	Daño Extensivo	Daño Completo
210	2.5%	11.3%	45.5%	29.8%	10.8%
280	3.9%	14.8%	48.5%	24.8%	8.0%
350	4.9%	17.2%	49.6%	21.7%	6.6%

4.2 Cuantificación de costos.

Por último, para medir los resultados obtenidos, se lleva a cabo una estimación de los costos de concreto y acero.

Cálculo del precio del acero por Kg:

Se realizó la conversión del precio por longitud de acero a precio por kilogramo; para ello

se usó el promedio de barras ASTM A615 – Grado 60 de 1/2” y de 3/8”, de la marca Aceros Arequipa correspondiente a un proyecto del Centro de atención Renal de ESSALUD, 2023.

Cálculo de la cantidad de concreto:

El volumen del concreto se obtiene a partir de la masa sísmica, sin considerar la tabiquería y la carga viva, dividido entre el peso específico del concreto (2.4tn/m³). Se está considerando el precio del concreto premezclado incluida la pluma de bombeo, estos precios son obtenidos del Suplemento Técnico de la Revista Costos de Junio 2024.

Además, se tienen los siguientes parámetros para el caso en desarrollo

Área Construida = 997.36 m²; # Pisos = 7; Concreto premezclado

Tabla 40. Precio del acero por kg

Peso específico del Acero =7850 (kg/m ³)				
Diámetro (cm)	Longitud (m)	precio	Kg	Precio x kg (S/)
1.27	9	7.59	8.95	1.2
0.953	9	4.23	5.03	1.2

Para calcular la cantidad de acero en kg que se utilizará en el edificio, se emplearon ratios obtenidos de proyectos anteriores similares en área construida y número de niveles, como se muestra en la tabla

Tabla 41. Cuadro Resumen de RATIOS

	Densidad baja Proyecto 1	Densidad media Proyecto 2	Densidad alta Proyecto 3
Ratio Concreto (m ³ /m ²)	0.33	0.34	0.35
Ratio Acero (Kg/m ²)	29.68	35.6	39.25

El proyecto 1 es una estructura multifamiliar de 8 pisos con 330m² por nivel de densidad baja de muros ubicado en el distrito de Miraflores, el proyecto 2 es una estructura multifamiliar de 7 pisos con 360m² por nivel con densidad media de muros ubicado en magdalena del mar, el proyecto 3 se trata de una estructura multifamiliar de 7 pisos sin sótano con un área de 450m² por nivel con densidad alta de muros.

4.2.1. Densidad baja de muros estructurales:

Teniendo la masa del edificio de obtiene el valor del peso, seguidamente teniendo el peso específico del concreto se obtiene el volumen total del concreto.

Tabla 42. Masa para Densidad Baja de muros estructurales.

Densidad de muros estructurales BAJA		
Piso	Diafragma	Masa X
		tonf-s ² /m
7	D1	9.5
6	D1	11.6
5	D1	11.6
4	D1	11.6
3	D1	11.6
2	D1	11.6
1	D1	11.8
$\Sigma =$	79.4	tonf-s²/m

$$\text{Peso edificio (ton)} = \text{Masa} \left(\frac{\text{Ton} - \text{s}^2}{\text{m}} \right) \times g \left(\frac{\text{M}}{\text{S}^2} \right)$$

$$\text{Peso edificio (ton)} = 78.87 \times 9.81 = 778.58 \text{ ton}$$

$$\text{Volumen} = \frac{\text{Peso del edificio (ton)}}{\text{Peso específico} \left(\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right)}$$

$$\text{Volumen} = \frac{778.58}{2.4} = 324.41 \text{ m}^3$$

Se calcula el precio del acero y del concreto para las distintas resistencias del concreto para el modelo con densidad de muros estructurales baja. Además el precio unitario del concreto incluye la pluma de concreto.

Tabla 43. Precios de acero y concreto para Densidad Baja de muros estructurales según f'c.

		UNIDADES				
Peso total =	773.68	ton	f'c	PU	TOTAL	RATIO
CONCRETO	324.41	m3	210	S/ 340.92	S/ 110,597.86	0.33
			280	S/ 367.11	S/ 119,094.16	0.33
			350	S/ 390.20	S/ 126,584.78	0.33
ACERO	31107.7	KG	210	S/ 1.20	S/ 37,329.19	31.19
	30788.5	KG	280	S/ 1.20	S/ 36,946.20	30.87
	29990.6	KG	350	S/ 1.20	S/ 35,988.74	30.07

Se muestra el cuadro resumen de los costos asociados para el modelo con densidad de muros estructurales baja según las distintas resistencias del concreto.

Tabla 44. Cuadro Resumen de costos para densidad Baja de muros estructurales según f'c

COSTO TOTAL DENSIDAD BAJA f'c 210 kg/cm ²	S/ 147,927.05
------------------------------------------------------	---------------

COSTO TOTAL DENSIDAD BAJA f'c 280 kg/cm2	S/ 156,040.36
COSTO TOTAL DENSIDAD BAJA f'c 350 kg/cm2	S/ 162,573.52

A continuación, en 4.2.1 y 4.2.2 se sigue el mismo procedimiento para los modelos con densidad media y alta respectivamente.

4.2.2. Densidad media de muros estructurales:

Tabla 45. Masa para densidad Media de muros estructurales.

Densidad de muros estructurales MEDIA		
Piso	Diafragma	Masa X
		tonf-s ² /m
7	D1	9.8
6	D1	12.3
5	D1	12.3
4	D1	12.3
3	D1	12.3
2	D1	12.3
1	D1	12.5
$\Sigma =$	83.95	tonf-s²/m

Tabla 46. Precio de acero y concreto para densidad Media de muros estructurales según f'c.

		UNIDADES	f'c	PU	TOTAL	RATIO
Peso total =	823.6	ton				
CONCRETO	343.15	m3	210	S/ 340.92	S/ 116,987.97	0.34
			280	S/ 367.11	S/ 125,975.16	0.34
			350	S/ 390.20	S/ 133,898.58	0.34
ACERO	35865.1	KG	210	S/ 1.20	S/ 43,038.08	35.96
	34125.5	KG	280	S/ 1.20	S/ 40,950.54	35.64
	32150.1	KG	350	S/ 1.20	S/ 38,580.14	34.84

Tabla 47. Cuadro Resumen de costos para densidad Media de muros estructurales según f'c

COSTO TOTAL DENSIDAD MEDIA f'c 210 kg/cm2	S/ 160,026.04
COSTO TOTAL DENSIDAD MEDIA f'c 280 kg/cm2	S/ 166,925.70
COSTO TOTAL DENSIDAD MEDIA f'c 350 kg/cm2	S/ 172,478.72

4.2.3. Densidad alta de muros estructurales:

Tabla 48. Masa sísmica para densidad Alta de muros estructurales.

Densidad de muros estructurales ALTA

Piso	Diafragma	Masa X
		tonf-s ² /m
7	D1	10.0
6	D1	12.9
5	D1	12.9
4	D1	12.9
3	D1	12.9
2	D1	12.9
1	D1	13.1
$\Sigma =$		87.5 tonf-s ² /m

Tabla 49. Precio de acero y concreto para densidad Alta de muros estructurales según f'c.

		UNIDADES	f'c	PU	TOTAL	RATIO
Peso total =	858.03	ton				
CONCRETO	357.51	m ³	210	S/ 340.92	S/ 121,883.34	0.35
			280	S/ 367.11	S/ 131,246.61	0.35
			350	S/ 390.20	S/ 139,501.58	0.35
ACERO	38827.2	KG	210	S/ 1.20	S/ 46,592.67	38.93
	38508.1	KG	280	S/ 1.20	S/ 46,209.68	38.61
	37710.2	KG	350	S/ 1.20	S/ 45,252.22	37.81

Tabla 50. Cuadro resumen de costos para densidad Alta de muros estructurales según f'c.

COSTO TOTAL DENSIDAD ALTA f'c 210 kg/cm ²	S/ 168,476.01
COSTO TOTAL DENSIDAD ALTA f'c 280 kg/cm ²	S/ 177,456.29
COSTO TOTAL DENSIDAD ALTA f'c 350 kg/cm ²	S/ 184,753.80

Finalmente, se muestra la tabla resumen de los costos relacionados a cada modelo en estudio.

Tabla 51. Resumen de costos para distintas densidades de muros estructurales y diferentes f'c.

		DENSIDADES DE LOS MUROS ESTRUCTURALES		
		BAJA	MEDIA	ALTA
RESISTENCIA	f'c=210 kg/cm ²	S/ 147,927.05	S/ 160,026.04	S/ 168,476.01
	f'c=280 kg/cm ²	S/ 156,040.36	S/ 166,925.70	S/ 177,456.29
	f'c=350 kg/cm ²	S/ 162,573.52	S/ 172,478.72	S/ 184,753.80

Los costos incrementan a mayor densidad de muros, y estos a su vez aumentan a mayor resistencia requerida del concreto; por ello, el costo es directamente proporcional a la densidad de muros y resistencia de concreto.



CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

- Los modelos de muros estructurales con densidad media y resistencia $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ o $f'_c=280 \text{ kg/cm}^2$ son los más óptimos en cuanto a costos y comportamiento estructural.
- Los resultados indican que, al aumentar la resistencia y densidad de los muros, también se incrementan los costos, lo que sugiere que reducir la vulnerabilidad sísmica implica un mayor gasto.
- Un porcentaje de densidad de muros cercano al 1% es el más óptimo para lograr un adecuado desempeño de la edificación dentro de los comportamientos aceptables.
- Para nuestro caso los modelos de baja densidad son económicos, pero no ofrecen un comportamiento estructural aceptable, por lo que no son viables.
- Ambas variables reducen la vulnerabilidad sísmica al aumentar, pero el incremento en la densidad de muros tiene un mayor impacto que el aumento en la resistencia del concreto.
- La mayor reducción en la vulnerabilidad sísmica ocurre al pasar de una densidad de muros baja a media, por lo que una densidad media es suficiente para lograr un desempeño estructural aceptable.
- Se confirma que una mayor densidad de muros estructurales reduce el periodo de la edificación, lo cual es crucial para el diseño sísmico. Es necesario encontrar un equilibrio: una estructura demasiado rígida puede sufrir daños por no disipar energía, mientras que una demasiado flexible puede causar desplazamientos y deterioro prematuro. Por lo tanto, se debe optimizar el diseño para lograr un periodo adecuado que resista eficazmente las fuerzas sísmicas.
- Las curvas de capacidad de los modelos con f'_c de 210 kg/cm^2 y densidad de muros variable muestran que la rigidez efectiva es directamente proporcional a la resistencia, mientras que el desplazamiento máximo elástico (D_y) y el desplazamiento de desempeño son inversamente proporcionales a la resistencia. (Figuras 52 y 53).
- Las curvas de capacidad de los modelos de muros estructurales muestran un comportamiento elastoplástico inicial, que luego se convierte en inelástico debido al deterioro de la rigidez y la formación de rótulas plásticas en secciones críticas.
- De la figura 38.b y 39.b se puede observar que los diagramas esfuerzos – deformación unitaria son compatibles con el modelo constitutivo del concreto utilizado tipo Mander.

- Las figuras 38, 39 y 40 muestran que la columna no presenta comportamiento inelástico, ya que las placas asumen la mayor parte de las sollicitaciones sísmicas. En cambio, las vigas sí desarrollan un comportamiento inelástico, superando levemente el daño de ocupación inmediata, lo que refuerza el concepto de viga débil – columna fuerte.

RECOMENDACIONES

- Debido que la presente investigación no ha contemplado un diseño de los elementos estructurales para cada modelo en específico, se contempla que un diseño detallado para cada caso brindaría resultados más precisos.
- Es vital un estudio de la vulnerabilidad y más aún si la edificación se encuentra en una zona sísmica, debido que con este estudio se podría tomar precauciones al momento de diseñar o de optar por una configuración estructural determinada.
- Si bien se han tomado como caso de estudio dos variables (resistencia del concreto y densidad de muros estructurales) para el análisis de la vulnerabilidad sísmica, es importante notar que existen otros factores que a la vez afectan la vulnerabilidad sísmica como por ejemplo las placas en forme de “L” aportando mayor rigidez que dos placas separadas con las mismas longitudes. Asimismo, al elegir un modelo más complejo o irregular se podrían obtener resultados más notorios para la disminución de la vulnerabilidad sísmica.

BIBLIOGRAFÍA

- Applied Technology Council - 40. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings* (Vol. 1).
- ASCE/EI 41-17. (2017). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*.
- Benedetti, & Petrini. (1984). *Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura, proposta di un metodo. L'Industria delle Costruzioni* (pp. 18, 66–78).
- Bonett Díaz, R.L. Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada.
- Canales, C. (2006). *Edificio de sótano y 12 pisos de oficinas* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería]. Repositorio PUCP. https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/970/CANALES_QUI%C3%91ONES_CARLOS_EDIFICIO_SOTANO_12_PISOS.pdf?sequence=1
- Corsanego, A., y Petrini, V. (1990). Seismic vulnerability of buildings. Proceedings of the SEISMED 3, Trieste, Italy.
- Deierlein, G. G., Reinhorn, A. M., & Willford, M. R. (2010). Nonlinear Structural Analysis For Seismic Design. *NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 4, 4*, 1–32.
- Dolce, M., Kappos, A., Zaccaro, G., y Coburn, A.W. (1995). Report of the EAE working group 3: Vulnerability and risk analysis. Technical Report 10th European Conference on Earthquake Engineering, Viena., 4, 3049-3077.
- Federal Emergency Management Agency. (1999). *Hazus®-MH 2.1*.
- FEMA. (2003). *HAZUS MR4 Thecnical Manual*.
- FEMA. (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. In *FEMA 440, Federal Emergency Management Agency, Washington DC*.
- Liñan, D., & Paco, H. (2024). *Diseño estructural, metrados y ratios de un edificio de concreto armado de 8 pisos* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería]. Repositorio PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio//handle/20.500.12404/27860>
- MIDAS. (2019). *Análisis Estáticos No Lineales de Estructuras de Concreto Reforzado*.
- Muñoz, A. (2018). Diseño de Hospitales con la Norma Peruana de Aislamiento Sísmico E.031. *II CONGRESO INTERNACIONAL DE ESTRUCTURAS EN EDIFICACIONES*.
- Park, R., & Paulay, T. (1978). *Estructuras de concreto reforzado*. John Wiley & Sons.
- Sandi, H (1986). "Vulnerability and risk analysis for individual structures and systems". Report of the Working Group of the European Association for Earthquake Engineering. Proceeding of the 8th ECEE. Lisbon. Portugal.
- Suplemento técnico de la revista Costos. (2024, junio). *Costos*.
- Reglamento Nacional de Edificaciones. (2017). *Norma E.030 Diseño Sismorresistente*.
- San Bartolomé, Á. (1998). *Analisis De Edificios*.
- Velásquez, J. (2006). *Estimación de pérdidas por sismo en edificios peruanos mediante Curvas de Fragilidad analíticas*.
- Vielma, J., Barbat, A. H., & Oller, S. (2007). Curvas de Fragilidad y Matrices de Probabilidad de daño de edificios de concreto armado con ductilidad limitada. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil.*, 7(2–3), 273–286.
- Yépez, F. (1996). Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras aplicando técnica de simulación. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.