PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

COMPARATIVA DE LAS FILOSOFÍAS DE DISEÑO BASADAS EN FUERZA Y DESPLAZAMIENTO PARA LA CONSIDERACIÓN DE EFECTOS DE SISMOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES RESISTENTES A MOMENTO

Autores:

González Ponce Ariel Sebastián

Padilla Córdova Pablo Andrés

Director:

Ing. Marcelo Guerra A. MSc-MDI

Quito DM, febrero 2023

DEDICATORIA

A mis padres, mi hermano, mi abuelita Fanny y mis abuelitos que ya no están conmigo César, Blanca y Nicolás.

Ariel González Ponce

A mis padres, mi hermana, y a quienes ya no están conmigo, Virginia Jaramillo y Geovanny Córdova.

Pablo Padilla Córdova

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Dalva y Patricio, por ser el pilar fundamental en mi vida, por inculcarme valores para formar un hombre de bien y por su amor incondicional.

A mi hermano Matías, por enseñarme a ser una mejor persona.

A mi abuelita Fanny y a mi familia, por todo el apoyo que me han brindado para llegar hasta aquí.

A mi compañero Pablo, por su apoyo y responsabilidad. Muchas gracias.

Ariel González Ponce

A mi madre Beatriz quien con su apoyo incondicional me ha acompañado en todos los pasos de mi vida.

A mi padre Pablo quien ha sido mi inspiración y pilar fundamental.

A mi hermana María Beatriz que ha sido mi compañera y confidente durante esta etapa.

A mis amigos Alex y José quienes han estado presentes en cada momento difícil.

A mi novia Bárbara quien ha sido de especial motivación en este proceso.

A Geovanny Córdova quien me recibió y enseñó como un hijo durante el tiempo que estuvo con nosotros.

A mi compañero Ariel, por su compromiso, paciencia y esfuerzo. Muchas gracias.

Pablo Padilla Córdova

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA I
AGRADECIMIENTOS II
ÍNDICE DE CONTENIDO III
ÍNDICE DE TABLAS VII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES IX
RESUMEN XI
ABSTRACT XII
CAPÍTULO I 1
1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. Justificación 1
1.2. Planteamiento del problema 1
1.3. Objetivos 4
1.3.1. Objetivo general 4
1.3.2. Objetivos específicos 4
1.4. Antecedentes 4
1.5. Alcance 6
CAPÍTULO II 8
2. MARCO TEÓRICO 8
2.1. Sistemas estructurales 8
2.2. Diseño sismo resistente 9
2.2.1. Filosofía del diseño sismo resistente 9
2.2.1.1. Niveles de desempeño y límites permisibles de derivas de piso 10
2.2.2. Parámetros del diseño sismo resistente 10

2.2.2.1. Fuerza inercial 10
2.2.2.2. Período y frecuencia 11
2.2.2.3. Amortiguamiento 11
2.2.2.4. Resistencia y rigidez 12
2.2.2.5. Torsión 12
2.2.2.6. Ductilidad 12
2.2.2.7. Sistemas de un grado de libertad 13
2.2.2.8. Sistemas de múltiples grados de libertad 14
2.2.2.9. Espectros de respuesta 14
2.2.2.9.1. Espectros de respuesta elástica 15
2.2.2.9.2. Espectros de respuesta inelástica 16
2.2.2.9.3. Espectros de diseño 16
2.3. Diseño basado en fuerzas (DBF) 17
2.3.1. Metodología 17
2.3.2. Procedimiento DBF 19
2.3.3. Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) 21
2.4. Diseño basado en desplazamientos (DBD) 34
2.4.1. Metodología 34
2.4.1.1. Estructuras de un grado de libertad (1GDL) 36
2.4.1.2. Estructuras de múltiples grados de libertad (MGDL) 42
2.4.2. Procedimiento DBD 46
2.4.2.1. Sistema aporticado 48
2.4.2.2. Sistema Dual 54
2.4.3. Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) 62
2.4.3.1. Espectro elástico de desplazamiento 62

2.4.3.2. Puntos clave DBD 62
2.4.3.3. Caracterización de la estructura 63
CAPÍTULO III 74
3. MODELACIÓN 74
3.1. Estructuración de los modelos 74
3.1.1. Pórticos resistentes a momento y Sistema dual 74
3.2. Predimensionamiento de la estructura 81
3.3. Análisis de las estructuras 95
3.3.1. Pórtico resistente a momento 95
3.3.2. Sistema dual 99
3.3.3. Análisis empleando DBF 103
3.3.3.1. Procesamiento de resultados empleando rutinas de Matlab 103
3.3.3.1.1. Pórtico Resistente a Momento 103
3.3.3.1.2. Sistema Dual 107
3.3.3.2. Presentación de resultados (Pórticos resistentes a momento) 112
3.3.3.3. Presentación de resultados (Sistema dual) 114
3.3.4. Análisis empleando DBD 116
3.3.4.1. Procesamiento de resultados 116
3.3.4.1.1. Pórticos resistentes a momento (Priestley et al., 2007) 116
3.3.4.1.2. Pórticos resistentes a momento (NEC, 2015) 123
3.3.4.1.3. Sistema dual (Priestley et al., 2007) 129
3.3.4.2. Procesamiento de resultados empleando rutinas de Matlab 141
3.3.4.2.1. Pórtico Resistente a Momento 141
3.3.4.2.2. Sistema Dual 145
3.3.4.3. Presentación de resultados (Pórticos resistentes a momento) 148

3.3.4.4. Presentación de resultados (Sistema dual)..... 149
3.4. Discusión de resultados..... 151
3.4.1. Período..... 151
3.4.2. Cortante Basal..... 152
3.4.3. Cortante de piso..... 153
3.4.3.1. Pórtico resistente a momento..... 153
3.4.3.2. Sistema dual..... 154
3.4.4. Desplazamiento de piso..... 156
3.4.4.1. Pórtico resistente a momento..... 156
3.4.4.2. Sistema dual..... 157
3.4.5. Deriva de piso..... 159
3.4.5.1. Pórtico resistente a momento..... 159
3.4.5.2. Sistema dual..... 160
CAPÍTULO IV..... 162
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 162
CAPÍTULO V..... 166
5. BIBLIOGRAFÍA..... 166
CAPÍTULO VI..... 169
6. ANEXOS..... 169

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diferencias conceptuales DBF - DBD. Fuente: Pérez Vargas, 2014..... 2
Tabla 2. Coeficiente de importancia. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015..... 9
Tabla 3. Límites permisibles para derivas de piso. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015..... 10
Tabla 4. Filosofía de diseño sísmico. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015 10
Tabla 5. Valores del factor Z. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015..... 22
Tabla 6. Tipo de suelo. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015 22
Tabla 7. Coeficientes por perfil de suelo Fa, Fd y Fs. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015... 23
Tabla 8. Coeficientes por tipo de estructura. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015..... 25
Tabla 9. Coeficientes R (sistemas estructurales dúctiles). Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015 28
Tabla 10. Coeficientes R (sistemas estructurales ductilidad limitada). Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015 28
Tabla 11. Valores de factor K. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015..... 30
Tabla 12. Inercia de las secciones agrietadas. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015 33
Tabla 13. Secciones de las columnas pisos 1, 2 y 3. Fuente: Propia 92
Tabla 14. Secciones de las columnas pisos 4, 5 y 6. Fuente: Propia 93
Tabla 15. Coeficientes C y alfa según el tipo de estructura. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015..... 95
Tabla 16. Valores de factor K. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015..... 97
Tabla 17. Cortante basal estático y dinámico. Fuente: Propia..... 98
Tabla 18. Cortante basal corregido. Fuente: Propia..... 98
Tabla 19. Coeficientes C y alfa según el tipo de estructura. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015..... 99
Tabla 20. Valores de factor K. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015..... 101
Tabla 21. Cortante basal estático y dinámico. Fuente: Propia..... 101
Tabla 22. Cortante basal corregido. Fuente: Propia..... 102
Tabla 23. Momentos de volcamiento para muros y pórticos. Fuente: Propia..... 130
Tabla 24. Comparativa de períodos. Fuente: Propia..... 151
Tabla 25. Comparativa cortante basal. Fuente: Propia 152

Tabla 26. Comparativa cortante de piso dirección X. Fuente: Propia 153
Tabla 27. Comparativa cortante de piso dirección Y. Fuente: Propia 154
Tabla 28. Comparativa cortante de piso dirección X. Fuente: Propia 155
Tabla 29. Comparativa cortante de piso dirección Y. Fuente: Propia 155
Tabla 30. Comparativo desplazamiento de piso dirección X. Fuente: Propia 156
Tabla 31. Comparativo desplazamiento de piso dirección Y. Fuente: Propia 157
Tabla 32. Comparativo desplazamiento de piso dirección X. Fuente: Propia 158
Tabla 33. Comparativo desplazamiento de piso dirección Y. Fuente: Propia 158
Tabla 34. Comparativa deriva de piso dirección X. Fuente: Propia 159
Tabla 35. Comparativa deriva de piso dirección Y. Fuente: Propia 160
Tabla 36. Comparativa deriva de piso dirección X. Fuente: Propia 161
Tabla 37. Comparativa deriva de piso dirección Y. Fuente: Propia 161

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Sistemas de un grado de libertad. Fuente: Chopra, 2014 13
Ilustración 2. Sistemas de múltiples grados de libertad. Fuente: Chopra, 2014 14
Ilustración 3. Método de determinación del espectro de respuesta. Fuente: Chopra, 2014 15
Ilustración 4. Espectro elástico e inelástico. Fuente: Propia 16
Ilustración 5. Diagrama de flujo DBF. Fuente: Priestley et al., 2007 18
Ilustración 6. Espectro elástico de diseño en aceleración. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015 23
Ilustración 7. Concepción general del método DBD. Fuente: Priestley et al., 2007 35
Ilustración 8. Diagrama de flujo DBD. Fuente: Pérez, 2014 47
Ilustración 9. Espectro de desplazamiento. Fuente: Propia 52
Ilustración 10. Factor de reducción de demanda sísmica. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015 70
Ilustración 11. Vista 3D Pórtico resistente a momento. Fuente: Propia 74
Ilustración 12. Vista en planta Pórtico resistente a momento. Fuente: Propia 75
Ilustración 13. Elevación Y - X Pórtico resistente a momento. Fuente: Propia 76
Ilustración 14. Vista 3D Sistema dual. Fuente: Propia 77
Ilustración 15. Vista en planta Sistema dual. Fuente: Propia 78
Ilustración 16. Elevación X - Y Sistema dual. Fuente: Propia 79
Ilustración 17. Vista 3D modelos estructurales. Fuente: Propia 80
Ilustración 18. Dimensiones de losa alivianada. Fuente: Propia 82
Ilustración 19. Sección de losa de altura equivalente. Fuente: Propia 83
Ilustración 20. Elevación y Planta de losa alivianada. Fuente: Propia 84
Ilustración 21. Valores de carga viva uniforme. Fuente: NEC-SE-CG 85
Ilustración 22. Ejemplo de transformación de cargas. Fuente: Propia 86
Ilustración 23. Cargas de viga del pórtico C. Fuente: Propia 87
Ilustración 24. Momento último de la viga del pórtico C. Fuente: Propia 89
Ilustración 25. Secciones de los elementos de la estructura aporticada. Fuente: Propia 94
Ilustración 26. Secciones de los elementos de la estructura dual. Fuente: Propia 95
Ilustración 27. Espectro elástico en aceleración NEC 2015. Fuente: Propia 96

Ilustración 28. Espectro elástico en aceleración NEC 2015. Fuente: Propia 100
Ilustración 29. Cortante de piso pórticos resistentes a momento. Fuente: Propia 112
Ilustración 30. Desplazamiento inelástico pórticos resistentes a momento. Fuente: Propia 113
Ilustración 31. Deriva inelástica pórticos resistentes a momento. Fuente: Propia..... 113
Ilustración 32. Cortante de piso sistema dual. Fuente: Propia 114
Ilustración 33. Desplazamiento inelástico sistema dual. Fuente: Propia 114
Ilustración 34. Deriva inelástica sistema dual. Fuente: Propia 115
Ilustración 35. Amortiguamiento v Ductilidad. Fuente: Propia..... 119
Ilustración 36. Espectro inelástico en desplazamiento. Fuente: Propia 120
Ilustración 37. Factor de reducción demanda sísmica. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015 126
Ilustración 38. Amortiguamiento v Ductilidad. Fuente: Propia..... 138
Ilustración 39. Espectro inelástico en desplazamiento. Fuente: Propia 139
Ilustración 40.Cortante de piso pórticos resistentes a momento. Fuente: Propia 148
Ilustración 41. Desplazamiento inelástico pórticos resistentes a momento. Fuente: Propia 148
Ilustración 42. Deriva inelástica pórticos resistentes a momento. Fuente: Propia..... 149
Ilustración 43.Cortante de piso sistema dual. Fuente: Propia 149
Ilustración 44. Desplazamiento inelástico sistema dual. Fuente: Propia 150
Ilustración 45. Deriva inelástica sistema dual. Fuente: Propia 150
Ilustración 46. Comparativa cortante de piso. Fuente: Propia 153
Ilustración 47. Comparativa cortante de piso. Fuente: Propia 154
Ilustración 48. Comparativo desplazamiento de piso. Fuente: Propia 156
Ilustración 49. Comparativa desplazamiento de piso. Fuente: Propia 157
Ilustración 50. Comparativa deriva de piso. Fuente: Propia 159
Ilustración 51. Comparativa deriva de piso. Fuente: Propia 160

RESUMEN

Dentro de la práctica del diseño sismorresistente existen diferentes metodologías que permiten representar mediante un modelo matemático el comportamiento de una edificación durante un evento sísmico. Debido a su amplio desarrollo en códigos normativos y paquetes de software, el Diseño Basado en Fuerzas (DBF) es el más utilizado. Sin embargo, en los últimos años se han presentado desarrollos para el Diseño Basado en Desplazamientos (DBD) que constituyen una alternativa aparentemente sólida.

El presente documento parte de la revisión de los principios fundamentales del diseño sismorresistente y la dinámica estructural con una aproximación a su aplicación dentro del marco de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC). Se continúa presentando los procesos de aplicación de cada metodología dentro de la práctica común haciendo énfasis en los aspectos normativos vigentes. Para el procesamiento de resultados y desarrollo de los métodos se emplean herramientas computacionales con el fin de facilitar los procesos de aplicación y comparación de resultados. Además, se aplican las metodologías sobre los sistemas estructurales aporticados y duales, que son los más usados en nuestro medio. Con el fin de determinar las diferencias entre metodologías se realiza una comparación de resultados en las que se emplea como indicadores, el cortante de piso, el desplazamiento de piso y la deriva de piso para establecer que filosofía de diseño resulta ser una alternativa más adecuada.

ABSTRACT

Within the practice of seismic resistant design, there are different methodologies that allow us to represent the behavior of a building during a seismic event through a mathematical model. Due to its extensive development in standard codes and software packages, Force Based Design (DBF) is the most widely used. However, in recent years there have been developments for Displacement Based Design (DBD) that constitute an apparently solid alternative.

This document is based on the review of the fundamental principles of earthquake-resistant design and structural dynamics with an approach to its application within the rules of the Ecuadorian Construction Standard (Norma Ecuatoriana de la Construcción). It continues to present the application processes of each methodology within common practice, emphasizing current regulatory aspects. For the processing of results and development of the methods, computational tools are used to facilitate the processes of application and comparison of results. The methodologies on framed and dual structural systems are applied, which are the most used in our environment. To determine the differences between methodologies, a comparison of results is made in which shear, displacement and drift are used as indicators to establish which design philosophy turns out to be a more suitable alternative.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

En el 2016 el Ecuador constató los peligros sísmicos de los que siempre se ha tenido conocimiento mas no consciencia. Como ingenieros civiles es nuestro deber velar por la seguridad de los usuarios de los proyectos de los que somos responsables. Para este fin, debemos valernos de avances tecnológicos, técnicos y nuevas metodologías que permitan conocer de manera más adecuada el comportamiento sísmico de las estructuras. Sin embargo, vivimos en un imaginario social que no acepta el cambio de paradigma. Actualmente el diseño sismorresistente ha evolucionado y con él la concepción de la construcción, por lo que, necesitamos evolucionar a su ritmo.

En los últimos años se han desarrollado nuevas metodologías para la consideración de efectos sísmicos en la construcción, de hecho, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC Committee-SE-DS, 2015) establece métodos basados en fuerzas (DBF) y basados en desplazamiento (DBD). Esta última metodología no se revisa a fondo en la etapa de pregrado por lo que para el estudiante y futuro profesional existe desconocimiento de las ventajas del DBD y las limitaciones del DBF que es el método más utilizado en nuestro contexto. El presente proyecto pretende realizar una comparativa de las dos filosofías, para poder ampliar la divulgación de ambos métodos.

1.2. Planteamiento del problema

Los dos métodos que plantea la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC Committee-SE-DS, 2015) son aplicables a nuestra realidad y normativamente seguros, sin embargo, se debe

considerar que el método basado en fuerzas presenta límites establecidos que deben tomarse en cuenta, mientras que el DBD puede abordar de mejor manera estas limitaciones. Según (Pérez Vargas, 2014) en su publicación "Diseño sísmico basado en desplazamientos" considera que las diferencias conceptuales entre ambas filosofías de diseño son:

MÉTODO DBF	MÉTODO DBD
• Apropiados para analizar condiciones de comportamiento aproximadamente elástico (cargas verticales, viento, etc.), pero no para efectos de respuesta inelástica • Se basan en análisis elásticos complejos de una estructura que en realidad se comportará inelásticamente durante los sismos. • Usan espectros de aceleraciones • Se basan en rigideces inciertas: desde el 35% hasta el 100% de las propiedades de las secciones homogéneas. • Los períodos de vibración y los desplazamientos resultan inciertos. No hay control confiable de los objetivos de un PBSD (Diseño Sísmico por Desempeño). • Usan factores de ductilidad muy variables de una Norma a otra. Pero al final del diseño no se sabe si se alcanzó el valor supuesto. • Separan el análisis del diseño estructural. • Suponen demandas de ductilidad idénticas para todos los elementos de la estructura. • Las fuerzas y desplazamientos de diseño se basan en combinaciones tipo SRSS o CQC.	• Apropiado para el diseño de estructuras que entren en el rango inelástico de respuesta, como en el caso del estado límite de control de daños durante sismos. • Usa hipótesis y procedimientos muy sencillos, apoyados a veces en simples condiciones de equilibrio, con menos posibilidades de error. • Usan espectros de desplazamiento. • Se basa en las curvaturas de los elementos en estado de fluencia, cuyos valores son más confiables. • Parte del desplazamiento como una meta del diseño, para poder cumplir confiablemente los objetivos de un PBSD. • Usa amortiguamientos equivalentes a la ductilidad, poco sensibles al valor de ésta. La ductilidad final es cuantificable. • Análisis y diseños integrados. • Cada elemento puede tener una demanda de ductilidad diferente. • Las combinaciones modales tienen en cuenta que la respuesta del primer modo es inelástica, pero en los modos superiores puede ser elástica.

Tabla 1. Diferencias conceptuales DBF - DBD. Fuente: Pérez Vargas, 2014

A partir de las diferencias conceptuales (Pérez Vargas, 2014) afirma que se puede establecer una comparativa directa entre ambos métodos como, por ejemplo:

- En el método basado en fuerzas la rigidez no depende de la resistencia, mientras que, para el método basado en desplazamiento la rigidez sí.
- En el DBD se parte de un objetivo, el cual es el desplazamiento de diseño, mientras que, en el DBF se parte de un predimensionamiento de modelo elástico para determinar períodos de vibración.
- En el DBF se determina el cortante basal mediante un espectro elástico de aceleraciones. A su vez, el DBD parte de un espectro de desplazamientos para cumplir con el período requerido de una estructura.
- En el DBD se deduce la rigidez y el cortante basal requeridos para cumplir los límites normativos, mientras que, en el DBF se verifica que sean los desplazamientos los que cumplen los límites establecidos.

De igual forma, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC Committee-SE-DS, 2015) señala ciertas limitaciones del DBF como el uso de factores de reducción de resistencia sísmica para cada tipología estructural, esto implica que la demanda de ductilidad y la sobre resistencia son iguales para edificios de una misma categoría. Asimismo, se supone que la rigidez es independiente de la resistencia, es decir que la rigidez y el período pueden estimarse antes de conocer el refuerzo de las secciones de hormigón armado. Por lo que se puede decir que el DBD es una metodología más racional que la comúnmente usada DBF, pese a ciertas limitaciones del DBD como su aplicación para estructuras regulares y de pocas plantas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Realizar una comparativa entre el diseño basado en fuerzas (DBF) y basado en desplazamientos (DBD) en estructuras reticulares resistentes al momento.

1.3.2. Objetivos específicos

- Establecer los modelos teóricos para los sistemas estructurales de pórtico resistente a momento y sistema dual con las siguientes características:
  - Altura de entrepiso
  - Número de pisos
  - Emplazamiento
  - Elementos estructurales
  - Sistema de cargas (vivas y muertas)
- Establecer los parámetros comparables de las metodologías.
- Describir el proceso de análisis para el DBF y el DBD.
- Crear un proceso semiautomático mediante rutinas de Matlab para el procesamiento de resultados que permita una comparación gráfica de parámetros.
- Establecer una comparativa entre los resultados de los parámetros seleccionados.
- Verificar que los modelos de ambas filosofías cumplan con los límites de la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

1.4. Antecedentes

Para poder comprender la necesidad del diseño sismo resistente, es importante conocer el contexto sísmico del Ecuador y las problemáticas que representa, que se han visto evidenciadas a

lo largo de su historia y que inevitablemente se seguirán presentando. El Ecuador se encuentra en el denominado cinturón de fuego del pacifico, que toma su nombre debido a que es la región más susceptible de presentar efectos sísmicos y erupciones volcánicas. Esto se debe a los continuos cambios de la superficie del planeta como respuesta a la interacción de las placas tectónicas. (Rivadeneira et al., 2007)

Estos efectos no solo se presentan en nuestro país sino también alrededor del mundo, sin embargo, Latinoamérica es una zona que está expuesta a constantes sismos debido a que se encuentra ubicada cerca de dos importantes placas tectónicas, la Placa Sudamericana y la Placa de Nazca. La principal razón de que América Latina sea un sector vulnerable se debe a que la Placa de Nazca se encuentra incrustada por debajo de la Placa Sudamericana, produciendo constantes movimientos telúricos. De manera simplificada los sismos de origen telúrico se generan por la ruptura de rocas en la litosfera (placas tectónicas) liberando energía súbitamente en un punto de la corteza terrestre, energía que se transmite en ondas sísmicas que se propagan alejándose de su punto de origen.

Estos eventos representan una problemática en el diseño de estructuras puesto que al considerarlos se origina cierta cantidad de dudas, por lo que se ha adoptado diferentes filosofías a lo largo de la historia que dan frente a las mismas. Las filosofías sismorresistentes parten de las propiedades de los materiales y el comportamiento en conjunto de los elementos que conforman. El fenómeno sísmico en una estructura analizada linealmente puede verse como la alteración de su estado natural por una fuerza lateral o por un desplazamiento, como lo indica la Ley de Hooke en la que la fuerza es proporcional a la rigidez y al desplazamiento de un elemento. En los métodos para la consideración de efectos sísmicos se plantea considerar al sismo como una fuerza lateral sobre la estructura (DBF) o desplazamientos esperados de la misma (DBD). (Pérez Vargas, 2014)

A lo largo de la historia de las estructuras se ha visto las afectaciones que pueden producir las excitaciones sísmicas, en un primer intento normativo de considerarlas en Japón (1930) se propuso considerar la fuerza lateral como un 10 % del peso de la estructura, después del sismo de Kanto (1923) de 7.8 Mw. Posteriormente, se introducen nuevos conceptos como el estado límite de resistencia y servicio, en el que se presentan nuevas consideraciones para el diseño sismorresistente. (Ospina Trujillo, 2012)

En un diseño de manera general se busca que la demanda sea menor a la capacidad (considerando la demanda como las cargas a las que se someterá la estructura y la capacidad como las cargas que puede soportar). En los códigos normativos se opta que en el diseño se aumente como factor de seguridad la demanda o se reduzca la capacidad, códigos como el ACI proponen una combinación de ambas. (Pérez Vargas, 2014)

Al extrapolar la filosofía de diseño convencional al diseño sismorresistente se puede notar las serias dificultades a las que se verá sometida esta consideración, puesto que debido a la naturaleza aleatoria de los eventos sísmicos en los que no se podrá determinar de manera certera la fuerza sísmica a la que se verá sometida una estructura, no se podría determinar factores de seguridad adecuados. Los códigos normativos proponen metodologías que permiten considerar el fenómeno de una manera más adecuada, sin embargo, se debe considerar que se lo expone como un fenómeno estático en el que no interviene el tiempo, que es de vital importancia al analizar fenómenos sísmicos. (Priestley et al., 2007)

1.5. Alcance

El propósito del presente proyecto de investigación es comparar las metodologías de análisis y diseño DBF y DBD considerando los parámetros de: cortante de piso, derivas de piso y

desplazamientos de piso, para un modelo tridimensional de hormigón armado en los sistemas estructurales: pórtico resistente a momento y duales. Los modelos que se presentarán son teóricos y no representan una edificación real, además cumplirán los límites de desempeño establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC). No se considerará la interacción suelo estructura y los parámetros normativos de tipo de suelo se asumirán en función del sector de Quito y se explicarán en el desarrollo del proyecto.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Sistemas estructurales

Es un conjunto de elementos estructurales ensamblados para resistir cargas, ya sean verticales u horizontales con la finalidad de resolver un problema constructivo, los sistemas estructurales considerados en esta investigación son Pórtico Espacial Sismo Resistente y Pórtico Especial Sismo Resistente con Muros Estructurales (Sistema dual) que se definen como:

Pórtico Especial Sismo Resistente: "Estructura formada por columnas y vigas descolgadas del sistema de piso, que resiste cargas verticales y de origen sísmico, en la cual tanto el pórtico como la conexión viga-columna son capaces de resistir tales fuerzas y está especialmente diseñado y detallado para presentar un comportamiento estructural dúctil." (NEC Committee-SE-DS, 2015)

Pórtico Especial Sismo Resistente con Muros Estructurales (Sistema dual): "Sistema resistente de una estructura compuesta tanto por pórticos especiales sismos resistentes como por muros estructurales adecuadamente dispuestos espacialmente, diseñados todos ellos para resistir fuerzas sísmicas. Se entiende como una adecuada disposición ubicar los muros estructurales lo más simétricamente posible, hacia la periferia y que mantienen su longitud en planta en todo lo alto de la estructura. Para que la estructura se considere como un sistema dual se requiere que los muros absorban al menos el 75 % del corte basal en cada dirección." (NEC Committee-SE-DS, 2015)

2.2. Diseño sismo resistente

2.2.1. Filosofía del diseño sismo resistente

La (NEC Committee-SE-DS, 2015) considera la filosofía del diseño sismo resistente por desempeño que se puede definir como un método sistemático de diseño de edificaciones para que estas alcancen un comportamiento predecible y deseable en sus elementos estructurales y no estructurales, aún en condiciones inelásticas de deformación. Por lo cual se establecen metas y objetivos cuantificados en "Niveles de desempeño estructural". Además, proporciona criterios para definir límites de desempeño basados en la importancia de la estructura. La importancia de la estructura es un factor de seguridad que aumenta la aceleración sísmica a la que se ve sometida.

Categoría	Coeficiente
Edificios esenciales	1.5
Estructuras de ocupación especial	1.3
Otras estructuras	1.0

Tabla 2. Coeficiente de importancia. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015

Esta filosofía de diseño se logra conseguir solo sí el diseño de la estructura cumple con:

- Tener la capacidad para resistir las fuerzas especificadas por la NEC-SE-DS.
- Presentar derivas menores a las admisibles.
- Disipar la energía de deformación inelástica, empleando técnicas de diseño por capacidad o utilizando dispositivos de control sísmico.

2.2.1.1. Niveles de desempeño y límites permisibles de derivas de piso

Estructura	Deriva inelástica máxima	Deriva inelástica máxima (%)
Hormigón armado, metálicas y madera	0.02	2
Mampostería	0.01	1

Tabla 3. Límites permisibles para derivas de piso. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015

Desempeño	Elementos estructurales	Elementos no estructurales	Tasa anual de excedencia	Período de retorno
Servicio	Ningún daño	Ningún daño	0.023	45
Daño	Ningún daño	Daños	0.01389	72
Colapso	Cierto grado de daño	Daños considerables	0.00211	475

Tabla 4. Filosofía de diseño sísmico. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015

2.2.2. Parámetros del diseño sismo resistente

2.2.2.1. Fuerza inercial

Según (Pastora Estrada & Ríos Novoa, 2016) la fuerza de inercia en una estructura es aquella que se genera por el movimiento sísmico que se transmite de la cimentación a la superestructura y se desarrolla por su relación de masa y aceleración.

Los efectos de esta fuerza pueden entenderse al considerar un sistema de un grado de libertad (GDL) sin excitación dinámica pero que se somete a una fuerza estática en dirección al GDL. En el sistema la fuerza estática produce una deformación que genera una fuerza interna igual y opuesta a la fuerza estática. Para determinar la relación entre esta fuerza y el desplazamiento se emplea un análisis estático estándar que será válido para pequeñas deformaciones (De manera que esta relación sea lineal). Por lo tanto, al asociar este comportamiento a una fuerza lateral producto

de un sismo se puede decir que las deformaciones producidas por esta fuerza serán proporcionales a la misma como se muestra en el caso estático. (Chopra, 2014)

2.2.2.2. Período y frecuencia

La vibración de una estructura posee un movimiento oscilatorio repetitivo en forma de un péndulo invertido, donde el período estructural es el tiempo empleado en realizar un ciclo, es decir, el tiempo comprendido en dos instantes de tiempo. Por otro lado, la frecuencia es el número de ciclos que ocurre en una unidad de tiempo. Los períodos de vibración van decreciendo con respecto al primero, por lo tanto, el primer período de vibración es el más largo en duración y el que introduce mayor daño a la estructura puesto que origina los mayores desplazamientos. Al primer período de vibración también se le conoce como período fundamental, y físicamente representa la dirección más flexible de la estructura o la dirección débil de esta.

2.2.2.3. Amortiguamiento

El amortiguamiento es el proceso mediante el cual la amplitud de una vibración disminuye de manera constante mediante la disipación de energía por diversos mecanismos, que se pueden presentar al mismo tiempo. En las estructuras reales se representa de una manera idealizada en sistemas de un GDL con un amortiguador viscoso lineal, que posee un coeficiente equivalente a la energía disipada por todos los mecanismos de amortiguamiento combinados, a lo que se conoce como amortiguador viscoso equivalente. Este amortiguador tiene la intención de modelar la disipación de energía para amplitudes de deformación dentro del límite elástico lineal de la estructura. (Chopra, 2014)

2.2.2.4. Resistencia y rigidez

La rigidez es la capacidad que tienen los elementos de todas las estructuras de soportar los esfuerzos sin deformarse. Esto indica que las estructuras serán más rígidas mientras menor sea su deformación. En la realidad no existen estructuras que se puedan considerar infinitamente rígidas, por lo tanto, toda estructura es deformable y la rigidez es la capacidad de deformarse ante fuerzas cada vez mayores. La resistencia es la capacidad que tienen los elementos de todas las estructuras de soportar los esfuerzos sin romperse, de tal forma que se pueda evitar el colapso. Esta característica depende de varios factores como la geometría, el material del elemento y las uniones que puedan existir en estos.

2.2.2.5. Torsión

La Torsión se presenta por la excentricidad entre el centro de masa y el centro de rigidez. Esto se puede presentar en configuraciones de edificaciones en las que no existe simetría estructural, por lo que el edificio se verá sometido a concentraciones de esfuerzos debido a cargas y deformaciones laterales. Por lo tanto, diferentes códigos normativos establecen límites para el índice de torsión accidental en planta cuando se realice un análisis lineal. (Pastora Estrada & Ríos Novoa, 2016)

2.2.2.6. Ductilidad

La ductilidad es la capacidad de un material de deformarse plásticamente sin romperse, por lo que, un material es dúctil si es capaz de deformarse de manera permanente y apreciable en el rango inelástico antes de fallar. (Bozzo & Barbat, 2000) En síntesis, la ductilidad se puede considerar como la capacidad de un material, sección o estructura de permitir grandes deformaciones sin afectar a su resistencia.

2.2.2.7. Sistemas de un grado de libertad

Los sistemas de un grado de libertad se componen de una masa concentrada en el nivel del techo, un marco sin masa que proporciona rigidez y un amortiguador viscoso que disipa la energía de vibración del sistema, suponiendo axialmente indeformables a vigas y columnas. Estos sistemas pueden considerarse como la idealización de una estructura de un solo nivel en la que cada elemento estructural proporciona propiedades inerciales, elásticas y de disipación que se concentran en tres componentes puros distintos (masa, rigidez y amortiguamiento). (Chopra, 2014)

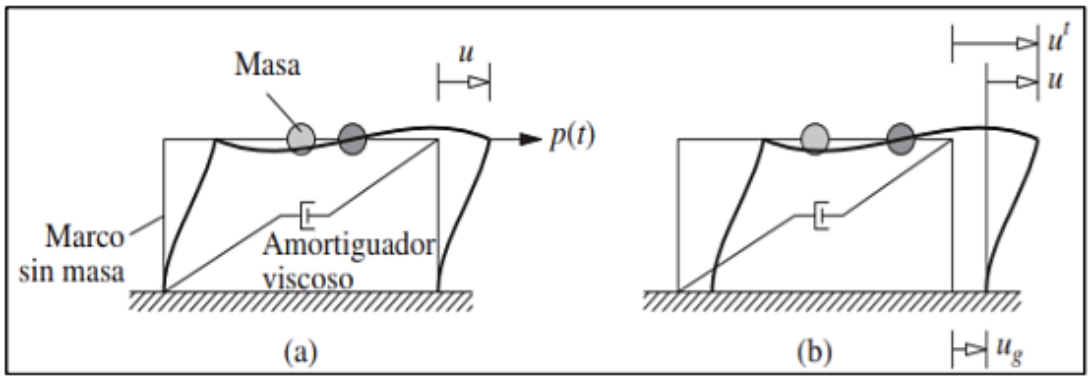


Ilustración 1. Sistemas de un grado de libertad. Fuente: Chopra, 2014

El número de desplazamientos que puede tener la masa desde su punto inicial en cualquier dirección corresponde a los grados de libertad. Al considerar un grado de libertad el modelo matemático que describe el movimiento de la estructura es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t)$$

Donde:

m: Masa del sistema.

c: Amortiguamiento viscoso.

k: Rigidez del sistema.

2.2.2.8. Sistemas de múltiples grados de libertad

Al concebir una estructura como un sistema de 1 GDL se espera que la respuesta dinámica se presente de forma directa al resolver la ecuación diferencial de movimiento, lo que suele ser viable en estructuras simples, pero gran parte de los sistemas estructurales no se pueden modelar de esta manera, ya que su respuesta en el tiempo de desplazamientos o giros varía en amplitud de acuerdo con cómo se ha deformado por lo que en edificaciones de varios niveles se emplean modelos de 3 GDL. (Chopra, 2014)

En los sistemas de múltiples grados de libertad, se presentan diferentes formas de vibrar que se conocen como respuesta modal, y su solución radica en obtener las frecuencias de vibración de la estructura con sus correspondientes formas modales.

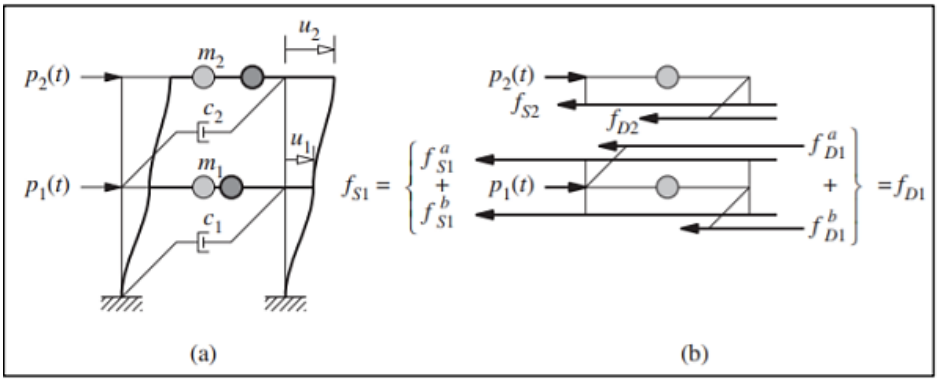


Ilustración 2. Sistemas de múltiples grados de libertad. Fuente: Chopra, 2014

2.2.2.9. Espectros de respuesta

Según (Grajales Vargas, 2003) un espectro es un gráfico de la respuesta máxima, expresada en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración, que produce una acción dinámica determinada en una estructura u oscilador de un grado de libertad para un amortiguamiento dado. En síntesis, se puede considerar a un espectro como un gráfico donde se representa las máximas

ordenadas espectrales absolutas en las ordenadas y el período o la frecuencia en las abscisas para uno o varios factores de amortiguamiento.

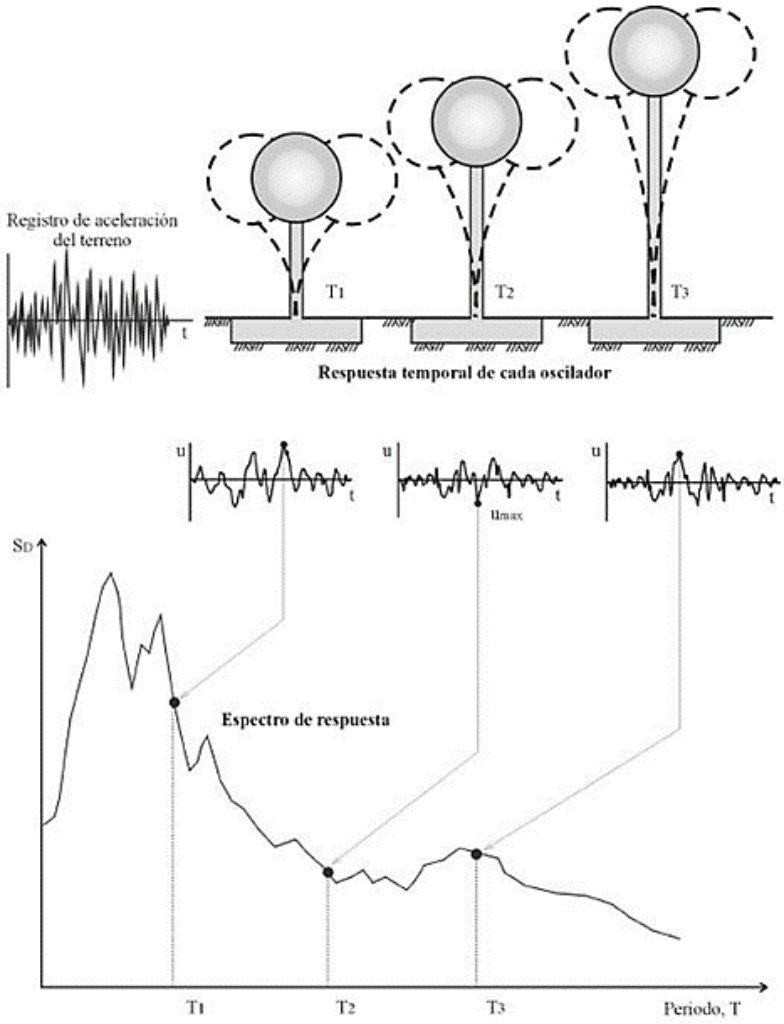


Ilustración 3. Método de determinación del espectro de respuesta. Fuente: Chopra, 2014

2.2.2.9.1. Espectros de respuesta elástica

El espectro de respuesta elástica representa la respuesta máxima para un evento sísmico específico que se desarrolla a partir de diferentes valores de amortiguamiento. Este tipo de espectro se genera asumiendo que el material tiene un comportamiento totalmente elástico sin efectos de segundo orden. Para idealizar este espectro se realiza una aproximación de valores promedio de

aceleraciones obtenidas, llegando a determinar un espectro medio de la muestra considerada para un 5% de amortiguamiento. (Grajales Vargas, 2003)

2.2.2.9.2. Espectros de respuesta inelástica

Este tipo de espectros son similares a los elásticos, sin embargo, su diferencia radica en que en este caso se supone que el oscilador de un grado de libertad exhibe comportamiento no lineal, lo que significa que la estructura puede experimentar deformaciones en el rango plástico por una acción sísmica. (Grajales Vargas, 2003)

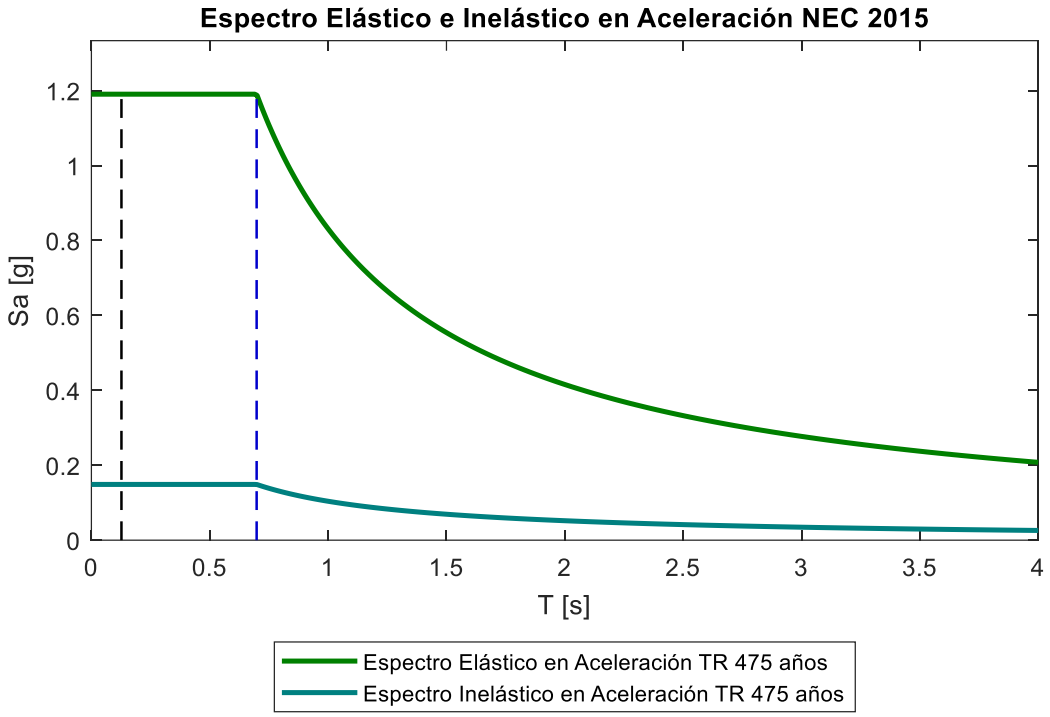


Ilustración 4. Espectro elástico e inelástico. Fuente: Propia

2.2.2.9.3. Espectros de diseño

Los espectros elásticos e inelásticos se desarrollan para sismos específicos, pero las construcciones no pueden diseñarse a partir de espectros desarrollados para un sismo en particular.

Por esto, la verificación del diseño debe efectuarse para espectros que no tengan variaciones bruscas de trayectoria (suavizados) y que engloben el efecto de varios terremotos a partir de procedimientos estadísticos. Aquellos espectros que se desarrollen bajo esta metodología se los denomina espectros de diseño. (Grajales Vargas, 2003)

2.3. Diseño basado en fuerzas (DBF)

2.3.1. Metodología

La metodología de diseño basada en fuerzas se fundamenta en la determinación de fuerzas laterales de diseño basadas en las propiedades dinámicas estimadas o calculadas según el caso de un modelo elástico de la estructura y un espectro de aceleraciones que depende de las condiciones de sitio. A partir de estas fuerzas laterales se obtienen desplazamientos sísmicos y se calculan las fuerzas internas de los elementos de la estructura que se ven afectados por factores de reducción similares a una relación de ductilidad dependientes del sistema estructural y de los detalles de refuerzo que se utilicen. Se deben cumplir los requisitos de derivas de piso y límites de diseño establecidos, si el modelo no llegase a satisfacer estos criterios se deberá modificar la geometría de los elementos de la estructura hasta obtener resultados satisfactorios, de tal manera que constituye un proceso iterativo. (Pérez Vargas, 2014)

(Priestley et al., 2007) proponen el siguiente diagrama de flujo de manera sintetizada para un diseño basado en fuerzas.

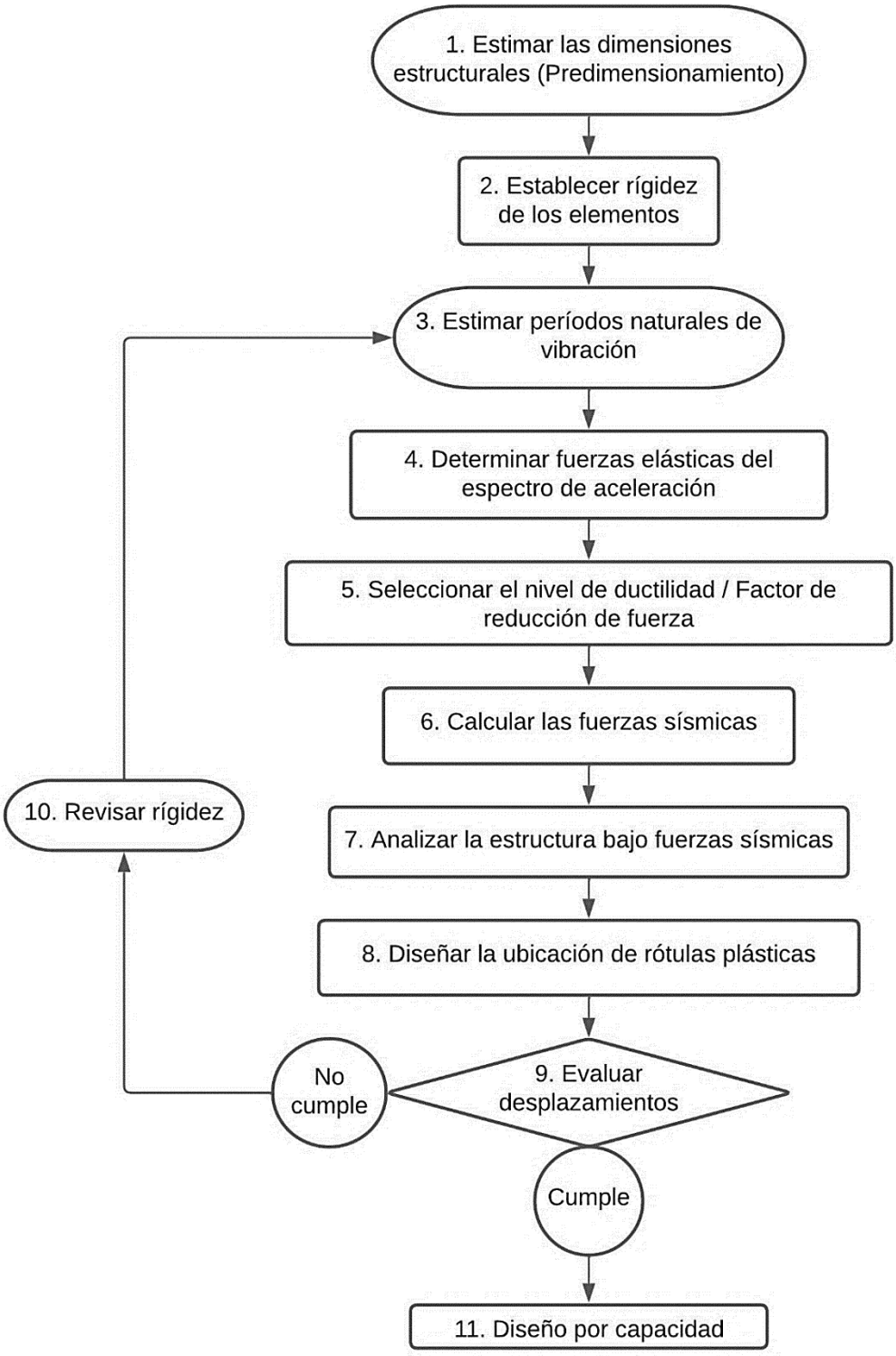


Ilustración 5. Diagrama de flujo DBF. Fuente: Priestley et al., 2007

2.3.2. Procedimiento DBF

El procedimiento del método que se detalla a continuación corresponde al procedimiento específico de un análisis modal espectral también llamado análisis dinámico espectral (denominado así por la NEC), que se complementará con un método estático de fuerza lateral equivalente necesario en el predimensionamiento y posterior revisión de congruencia de resultados.

A. Elección del sistema estructural.

Elegir un sistema estructural se basa en consideraciones técnicas, constructivas, funcionales, estéticas, entre otras, que corresponderá a cada proyecto en específico y muchas veces se prioriza criterios arquitectónicos que deben evaluarse por el ingeniero calculista para obtener soluciones óptimas. (Pérez Vargas, 2014)

B. Predimensionamiento de la estructura.

Las dimensiones de los diferentes elementos estructurales (losas, vigas, columnas y muros) se establecen en base a criterios de dimensionamiento en función de la experiencia del ingeniero o recomendaciones normativas vigentes. (Pérez Vargas, 2014)

Dentro de este paso se debe considerar de manera simplificada las acciones que el sismo inducirá a la estructura para lo cual se emplea la Norma Ecuatoriana de la Construcción para determinar factores de sitio por zonificación sísmica, espectros de diseño y expresiones necesarias para estimar los efectos sísmicos.

C. Modelo para análisis y cálculo del período de vibración

En este punto se deberá modelar las estructuras con las secciones y cargas (verticales y laterales) obtenidas en el predimensionamiento de las que se obtendrá los períodos de vibración de la estructura. Los últimos avances en computación aplicada permiten realizar estos análisis de

manera más efectiva considerando la inercia efectiva de los diferentes elementos estructurales. (Pérez Vargas, 2014)

D. Determinación del cortante basal (V)

El cortante basal se deduce del espectro de aceleraciones y el peso reactivo de la estructura, afectados a su vez por factores de reducción normativos como factor de importancia (I), factor de irregularidad en planta y elevación ($\emptyset_p \; y \; \emptyset_e$) y el coeficiente de reducción de respuesta estructural (R), esto para un análisis de fuerza lateral equivalente.

E. Cálculo de desplazamientos y derivas de piso

Las derivas de piso se definen como la diferencia entre el desplazamiento del piso superior e inferior en relación inversamente proporcional a la altura de entrepiso para comportamientos elásticos. Si se considera que en los diseños por desempeño se incursiona en el rango inelástico se debe tomar en cuenta que los factores de reducción se considerarán directamente proporcionales a la deriva elástica para que sean comparables con los límites permisibles establecidos por la NEC.

F. Determinación de fuerzas de diseño de elementos de la estructura

Para un análisis modal espectral se debe emplear herramientas computacionales que permitan combinar los efectos de cargas verticales, sísmicas (cargando al software el espectro de respuesta en aceleración), con el comportamiento modal de la estructura evaluando la participación de masa para los principales modos de vibración. (Pérez Vargas, 2014)

G. Diseño del refuerzo por capacidad

El diseño del refuerzo por capacidad consiste en determinar las cuantías de refuerzo (longitudinal y transversal) para controlar la secuencia de las posibles fallas de los elementos estructurales para evitar el colapso del edificio. Este concepto busca controlar la respuesta inelástica de la estructura mediante mecanismos de falla (rótulas plásticas) detallados para una alta

capacidad de deformación. Esto se logra mediante las consideraciones de códigos normativos de diseño como el ACI 318-19. (Pérez Vargas, 2014)

2.3.3. Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC)

La Norma Ecuatoriana de la Construcción en el capítulo 6 del código NEC-SE-DS establece los siguientes pasos para realizar un diseño basado en fuerzas.

A. Determinación del espectro de diseño de acuerdo con las características de sitio específicas del emplazamiento.

Los valores determinados en esta sección corresponden a la base del análisis y diseño de la estructura, permitiéndonos conocer los efectos sísmicos a los que se verá sometida la estructura, en función de la aceleración y velocidad de onda sísmica en roca considerando, a su vez, las características locales del emplazamiento.

1. **Zonificación sísmica**

- La NEC establece el uso del valor "Z" que representa la aceleración máxima en roca esperada para sismo de diseño, expresada como una fracción de la aceleración de la gravedad para una excedencia del 10 % en 50 años (aproximadamente 475 años de período de retorno).
- La NEC establece un mapa de zonificación sísmica que establece seis diferentes zonas sísmicas caracterizadas por el factor "Z".
- Zonas sísmicas.

Zona	Z	Peligro sísmico
I	0.15 g	Intermedio
II	0.25 g	Alto
III	0.30 g	Alto
IV	0.35 g	Alto
V	0.40 g	Alto
VI	≥ 0.50 g	Muy alto

Tabla 5. Valores del factor Z. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015

2. Geología Local

- Se definen 6 tipos de suelos de acuerdo con la norma, que deberán determinarse por ensayos geotécnicos.
- Tipos de suelo establecidos por la norma (resumida descripción, obviando velocidad de onda sísmica).

Tipo de perfil	Descripción
A	Perfil de roca competente
B	Perfil de roca de rigidez media
C	Suelos muy densos o Roca blanda
D	Suelos rígidos
E	Altura mayor a 3 m de arcilla blanda
F	Arcillas, turba, suelos de alta plasticidad, etc.

Tabla 6. Tipo de suelo. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015

- Los suelos tipo F tienen una subclasificación y requieren consideraciones especiales.
- La norma establece tres coeficientes de perfil de suelo, que se correlacionan con la aceleración sísmica los cuales son:
    - Fa: Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período de corto.

- Fd: Coeficiente de amplificación de las ordenadas del espectro de respuesta de desplazamientos para diseño en roca.
- Fs: Coeficiente de comportamiento no lineal de los suelos.

- Resumen de coeficientes de perfil de suelo:

	Factor de zona sísmica / Factor Z / Coeficientes por perfil de suelo Fa, Fd y Fs																	
	I			II			III			IV			V			VI		
Tipo perfil	0.15			0.25			0.30			0.35			0.40			≥ 0.5		
	Fa	Fd	Fs	Fa	Fd	Fs	Fa	Fd	Fs	Fa	Fd	Fs	Fa	Fd	Fs	Fa	Fd	Fs
A	0.90	0.90	0.75	0.90	0.90	0.75	0.90	0.90	0.75	0.90	0.90	0.75	0.90	0.90	0.75	0.90	0.90	0.75
B	1.00	1.00	0.75	1.00	1.00	0.75	1.00	1.00	0.75	1.00	1.00	0.75	1.00	1.00	0.75	1.00	1.00	0.75
C	1.40	1.36	0.85	1.30	1.28	0.94	1.25	1.19	1.02	1.23	1.15	1.06	1.20	1.11	1.11	1.18	1.06	1.23
D	1.60	1.62	1.02	1.40	1.45	1.06	1.30	1.36	1.11	1.25	1.28	1.19	1.20	1.19	1.28	1.12	1.11	1.40
E	1.80	2.10	1.50	1.40	1.75	1.60	1.25	1.70	1.70	1.10	1.65	1.80	1.00	1.60	1.90	0.85	1.50	2.00
F	Consideraciones especiales																	

Tabla 7. Coeficientes por perfil de suelo Fa, Fd y Fs. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015

3. Espectro elástico de diseño en aceleraciones

La NEC-SE-DS presenta el siguiente esquema para la creación del espectro de diseño en aceleración:

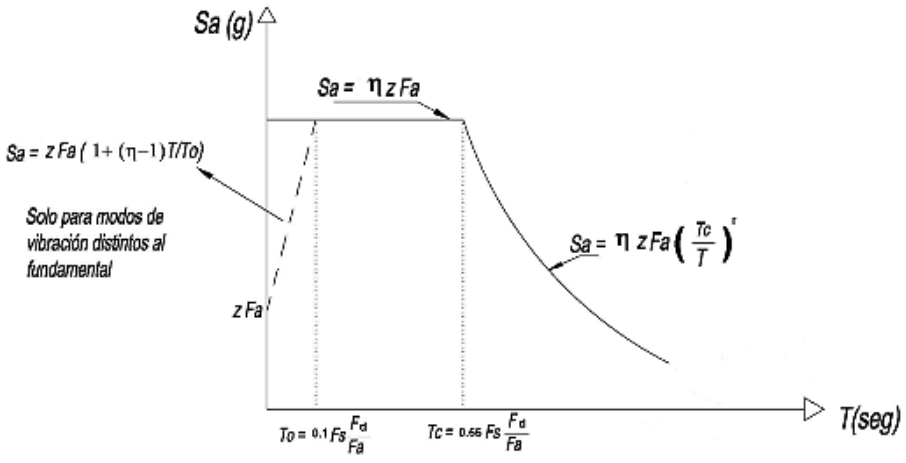


Ilustración 6. Espectro elástico de diseño en aceleración. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015

Donde:

Sa: Espectro elástico de aceleración espectral, expresado como fracción de aceleración de la gravedad.

n: Razón entre la aceleración espectral Sa en período de 1 segundo y el período de retorno seleccionado. (Sa/Z)

- n: 1.80 (En provincias de la costa excepto Esmeraldas)
- n: 2.48 (En provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos)
- n: 2.60 (En provincias del Oriente)

$Fa, Fd\ y\ Fs$: Coeficientes de amplificación de suelo.

T: Período fundamental de la estructura.

To: Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño.

Tc: Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño.

Z: Aceleración máxima esperada en roca.

r: Factor usado en el espectro de diseño dependiente de la ubicación geográfica del proyecto.

- r: 1 (Para todos los suelos excepto, el suelo tipo E)
- r: 1.5 (Para suelo tipo E)

B. Cálculo del período fundamental de vibración aproximado.

La (NEC Committee-SE-DS, 2015) establece dos métodos para el período de vibración de la estructura T, en cada dirección principal. El valor obtenido de T constituye una estimación inicial razonable que permite el cálculo de fuerzas sísmicas para realizar el dimensionamiento de la estructura.

- **Método 1**

$$T = C_t * {h_n}^{\propto}$$

Donde:

$C_t \; y \; \propto$: Coeficiente que depende del tipo de estructura.

h_n Altura máxima de la edificación de n pisos, medida desde la base de la estructura (m).

T: Período de vibración.

La (NEC Committee-SE-DS, 2015) indica los valores de Ct y α, como se muestra a continuación.

Tipo de estructura	Ct	α
Estructuras de acero		
Sin arriostramientos	0.072	0.8
Con arriostramientos	0.073	0.75
Pórticos especiales de hormigón armado		
Sin muros estructurales ni diagonales rigidizadores	0.55	0.9
Con muros estructurales o diagonales rigidizadores y para otras estructuras en muros y mampostería estructurales	0.055	0.75

Tabla 8. Coeficientes por tipo de estructura. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015

De manera alternativa se propone en edificios con muros estructurales y de mampostería portante con $\propto = 1$, el cálculo del coeficiente por tipo de edificio (C_t) mediante, las expresiones:

$$C_t \; \frac{0.0062}{\sqrt{\mathrm{Cw}}}$$

$$C_w = \frac{100}{A_B} * \sum_{i=1}^{n_w} \left[\left(\frac{h_n}{h_{wi}} \right)^2 * \frac{A_{wi}}{1 + 0.83 * \left(\frac{h_{wi}}{l_{wi}} \right)^2} \right]$$

Donde:

A_B: Área de la edificación en su base (m^2).

n_w: Número de muros de la edificación diseñados para resistir las fuerzas sísmicas en la dirección de estudio.

h_{wi}: Altura del muro i medida desde la base (m).

A_{wi}: Área mínima de cortante de la sección de un muro estructural i, medida en un plano horizontal, en el primer nivel de la estructura y en la dirección de estudio (m^2).

l_{wi}: Longitud medida horizontalmente, (m), de un muro estructural i en el primer nivel de la estructura y en la dirección de estudio.

- **Método 2**

El método 2 establece que T puede ser calculado usando las propiedades estructurales y características de deformación de los elementos resistentes en un análisis apropiado y sustentado. Para este objetivo se propone la siguiente expresión que debe considerarse en cada dirección principal o empleando el análisis modal.

$$T_a = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i * {\delta_i}^2}{g * \sum_{i=1}^{n} f_i * \delta_i}}$$

Donde:

f_i: Representa cualquier distribución aproximada de las fuerzas laterales en el piso i, de acuerdo con los principios descritos en el presente capítulo, o cualquiera otra distribución racional.

δ_i: Deflexión elástica del piso i, calculada utilizando las fuerzas laterales f_i

w_i: Peso asignado al piso o nivel i de la estructura, siendo una fracción de la carga reactiva W (incluye la fracción de la carga viva correspondiente) peso: w / cargas: W

Se establece que el valor calculado de T del método 2 no debe exceder un 30% del valor de T del método 1. El modelo debe iterarse hasta que la variación de los períodos obtenidos por el segundo método o mediante un análisis modal sean menor o igual al 10 % del T del primer método.

C. Determinación del cortante basal (V).

La (NEC Committee-SE-DS, 2015) considera que el cortante en la base a nivel de cargas últimas aplicado a una dirección especifica, se determinará mediante la siguiente expresión:

$$V = \frac{I * S_a(T_a)}{R * \emptyset_p * \emptyset_e} * W$$

Donde:

$S_a(T_a)$: Aceleración espectral para el período fundamental del sistema estructural.

$\emptyset_p \; y \; \emptyset_e$: Factores que consideran la irregularidad en planta y elevación respectivamente.

I: Factor de importancia de la estructura.

W: Peso reactivo de la estructura.

R: Coeficiente de reducción de resistencia sísmica o respuesta estructural.

El coeficiente R permite una reducción de las fuerzas sísmicas de diseño siempre y cuando las estructuras y conexiones se diseñen para desarrollar mecanismos de fallas dúctiles, en donde se concentra el daño en secciones diseñadas para funcionar como rótulas plásticas. La

consideración de este factor depende del tipo de estructura, tipo de suelo, período de vibración, y factores de ductilidad, sobre resistencia, redundancia y amortiguamiento en condiciones límite.

La (NEC Committee-SE-DS, 2015) establece las siguientes consideraciones de reducción de resistencia para sistemas dúctiles y de ductilidad limitada, como se muestra en la siguiente tabla.

SISTEMAS ESTRUCTURALES DÚCTILES	**R**
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas banda, con muros estructurales de hormigón armado o con diagonales rigidizadores.	7
PÓRTICOS RESISTENTES A MOMENTO	
Pórticos espaciales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas.	8
Pórticos especiales sismo resistentes, de acero laminado en caliente o con elementos armados de placas.	8
Pórticos con columnas de hormigón armado y vigas de acero laminado en caliente.	8
OTROS SISTEMAS ESCTRUCTURALES PARA EDIFICACIONES	
Sistemas de muros estructurales dúctiles de hormigón armado.	5
Pórticos especiales sismo resistentes de hormigón armado con vigas banda.	5

Tabla 9. Coeficientes R (sistemas estructurales dúctiles). Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015

SISTEMAS ESTRUCTURALES DE DÚCTILIDAD LIMITADA	**R**
PÓRTICOS RESISTENTES A MOMENTO	
Hormigón armado con secciones de dimensión menor a la especificada en la NEC-SE-HM limitados a viviendas de hasta 2 pisos con luces de 5 metros.	3
Hormigón armado con secciones de dimensión menor a la especificada en la NEC-SE-HM, con armadura electrosoldada de alta resistencia.	2.5
Estructuras de acero conformado en frío, aluminio, madera, limitado a 2 pisos.	2.5
MUROS ESTRUCTURALES PORTANTES	
Mampostería no reforzada, limitada a un piso.	1
Mampostería reforzada, limitada a dos pisos.	3
Mampostería confinada, limitada dos pisos.	3
Muros de hormigón armado limitados a cuatro pisos.	3

Tabla 10. Coeficientes R (sistemas estructurales ductilidad limitada). Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015

D. Definir distribución horizontal y vertical del cortante basal (V), momentos torsionales horizontales y torsión accidental.

Distribución Vertical

La (NEC Committee-SE-DS, 2015) considera la distribución de fuerzas verticales como una distribución lineal (triangular), estableciendo las siguientes expresiones:

$$V = \sum_{i=1}^{n} F_i$$

$$V_X = \sum_{i=x}^{n} F_i$$

$$F_X = \frac{w_x * {h_x}^k}{\sum_{i=1}^{n} w_i * {h_i}^k} * V$$

Donde:

V: Cortante total en la base de la estructura.

V_X: Cortante total en el piso x de la estructura.

F_i: Fuerza lateral aplicada en el piso i de la estructura.

F_X: Fuerza lateral aplicada en el piso x de la estructura.

n: Número de pisos de la estructura.

w_x: Peso asignado al piso o nivel x de la estructura, siendo una fracción de la carga reactiva W.

w_i: Peso asignado al piso o nivel i de la estructura, siendo una fracción de la carga reactiva W.

h_x: Altura del piso x de la estructura.

h_i: Altura del piso i de la estructura.

k: Coeficiente relacionado con el período de vibración de la estructura T.

Los valores de k se determinan de acuerdo con la siguiente tabla.

Valores de $T(s)$	k
≤ 0.5	1.00
0.5 < T ≤ 2.5	$0.75 + 0.50\,T$
> 2.5	2.00

Tabla 11. Valores de factor K. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015

Distribución Horizontal

Se establece que el cortante V_X de piso de la distribución vertical debe distribuirse en todos los elementos de resistencia a cargas laterales en proporción a sus rigideces tomando en cuenta la rigidez propia del piso. La masa de cada nivel debe considerarse de manera concentrada en el centro de masas del piso desplazada un 5 % respecto a la máxima dimensión del piso en sentido perpendicular a la dirección de las fuerzas laterales para estructuras irregulares e irregulares. Este desplazamiento se realiza para poder considerar los efectos de torsión accidental y debe incluirse en la distribución de cortante y de momentos torsionales. (NEC Committee-SE-DS, 2015)

Momentos torsionales y torsión accidental

El momento torsional de cada piso debe calcularse como el momento resultante de las excentricidades entre las cargas laterales en los pisos superiores al piso considerado y los elementos resistentes a estas cargas del piso en sí, más los efectos de torsión accidental, para un desplazamiento del 5 % respecto al centro de masas del piso. De exigir irregularidad torsional se deben considera los incrementos de torsión accidental en cada piso mediante un factor de amplificación A_X, que no deberá ser mayor a 3.0. (NEC Committee-SE-DS, 2015)

$$A_X = \left(\frac{\delta_{max}}{1.2 * \delta_{prom}}\right)^2$$

Donde:

A_X: Factor de amplificación torsional.

δ_{prom}: Promedio de desplazamientos de los puntos extremos de la estructural en el nivel x.

δ_{max}: Valor del desplazamiento máximo en el nivel x.

E. Determinar las direcciones de aplicación de las fuerzas sísmicas y verificación de derivas.

Efectos de segundo de orden

Los efectos de segundo son los efectos adicionales, en las dos direcciones principales de la estructura, causados el incremento en las fuerzas internas, momentos y derivas de las estructuras. Deben ser considerados para la evaluación de la estabilidad de la estructura y el cálculo de incrementos.

Índice de estabilidad

La (NEC Committee-SE-DS, 2015) establece que el índice de estabilidad Q_i no debe ser mayor a 0.30, puesto que esto indicaría que la estructura es potencialmente inestable, a menos que se demuestre lo contrario, mediante procedimientos más estrictos.

$$Q_i = \frac{P_i * \Delta_i}{V_i * h_i}$$

Donde:

Q_i: Índice de estabilidad del piso i (Relación entre el momento de segundo orden y primer orden).

P_i: Suma de la carga vertical total sin mayorar, que incluye el peso muerto y la sobrecarga por carga viga, del piso i y todos los pisos sobre dicho piso.

Δ_i: Deriva del piso calculada en el centro de masas del piso.

V_i: Cortante sísmico del piso i.

h_i: Altura del piso i.

Factor de mayoración $f_{\mathbf{P-\Delta}}$

La (NEC Committee-SE-DS, 2015) indica que los efectos $\mathrm{P}-\Delta$ no deberán ser considerados cuando Q_i < 0.1. Para 0.1 < Q_i < 0.3 se deberá considerar estos efectos mediante un factor de mayoración $f_{\mathrm{P}-\Delta}$ que se multiplicará por:

- Las derivas de piso, Δ_{Ei}.
- Las fuerzas internas.
- Los momentos de la estructura que aparecen como producto de la aplicación de cargas laterales de diseño.

Este factor de mayoración se determina mediante la siguiente expresión.

$$f_{\mathrm{P}-\Delta} = \frac{1}{1 - Q_i}$$

Donde:

$f_{\mathrm{P}-\Delta}$: Factor de mayoración.

Q_i: Índice de estabilidad del piso i.

Control de derivas

La (NEC Committee-SE-DS, 2015) establece que el control de derivas se realizará mediante el cálculo de las derivas inelásticas máximas de piso, que se consideran de acuerdo con la siguiente expresión.

$$\Delta \mathrm{M} = 0.75 * R * \Delta \mathrm{E}$$

Donde:

ΔM: Deriva máxima inelástica

ΔE: Desplazamiento obtenido en aplicación de fuerzas laterales de diseño reducidas

R: Factor de reducción de resistencia.

La normativa establece que se deberá evaluar $\Delta \mathrm{M} < \Delta \mathrm{M}$máxima (Los límites permisibles para la deriva de piso se detallan en la Tabla 3). Estos criterios se deberán aplicar al trabajar en el modelo con las secciones agrietadas que se presentan a continuación.

Elemento estructural	Inercia agrietada
Vigas	0.5 Ig
Columnas	0.8 Ig
Muros estructurales	0.6 Ig

Tabla 12. Inercia de las secciones agrietadas. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015

- Consideraciones de sección agrietada en muros estructurales
    - Para estructuras sin subsuelos, se aplicará únicamente a los dos primeros pisos de la edificación.

- Para estructuras con subsuelos, se aplicará en los dos primeros pisos y el subsuelo.
- En ningún caso se aplicarán en una altura menor que la longitud en planta del muro.
- Para el resto de los pisos la inercia agrietada del muro estructural puede considerarse igual a la inercia no agrietada.

2.4. Diseño basado en desplazamientos (DBD)

2.4.1. Metodología

El método basado en desplazamientos tiene como principal objetivo diseñar una estructura para una demanda sísmica determinada como también para un estado límite definido. Para este método es recomendable combinar el diseño por capacidad, de esta forma se podría garantizar la formación de rótulas plásticas en los puntos que sean necesarios para evitar que los elementos tengan una falla frágil. (Bay, 2021)

La metodología de diseño directo basada en desplazamientos (DDBD) propuesta por (Priestley et al., 2007) se basa en considerar las propiedades de la estructura en un sistema de un grado de libertad (1GDL), que caracteriza la estructura mediante una rigidez secante (Ke) para un desplazamiento máximo (Δd) y un amortiguamiento viscoso equivalente (ξ) representativo de la combinación de amortiguamiento elástico del comportamiento histérico durante una respuesta inelástica para una demanda de ductilidad esperada.

A partir del desplazamiento máximo esperado para un determinado amortiguamiento se encuentra el período efectivo de la estructura (Te) a una altura efectiva (He), mediante un espectro de desplazamiento cuantificado para el nivel de amortiguamiento requerido por la demanda de ductilidad (u). Este período permite determinar la rigidez secante (Ke), empleando el inverso de la ecuación para el período de un sistema de un grado de libertad. Conociendo la masa de la estructura

y su rigidez se puede determinar el cortante en la base de la estructura, que se repartirá en los diferentes niveles de la estructura en función del modo de vibración de la estructura. (Bay, 2021)

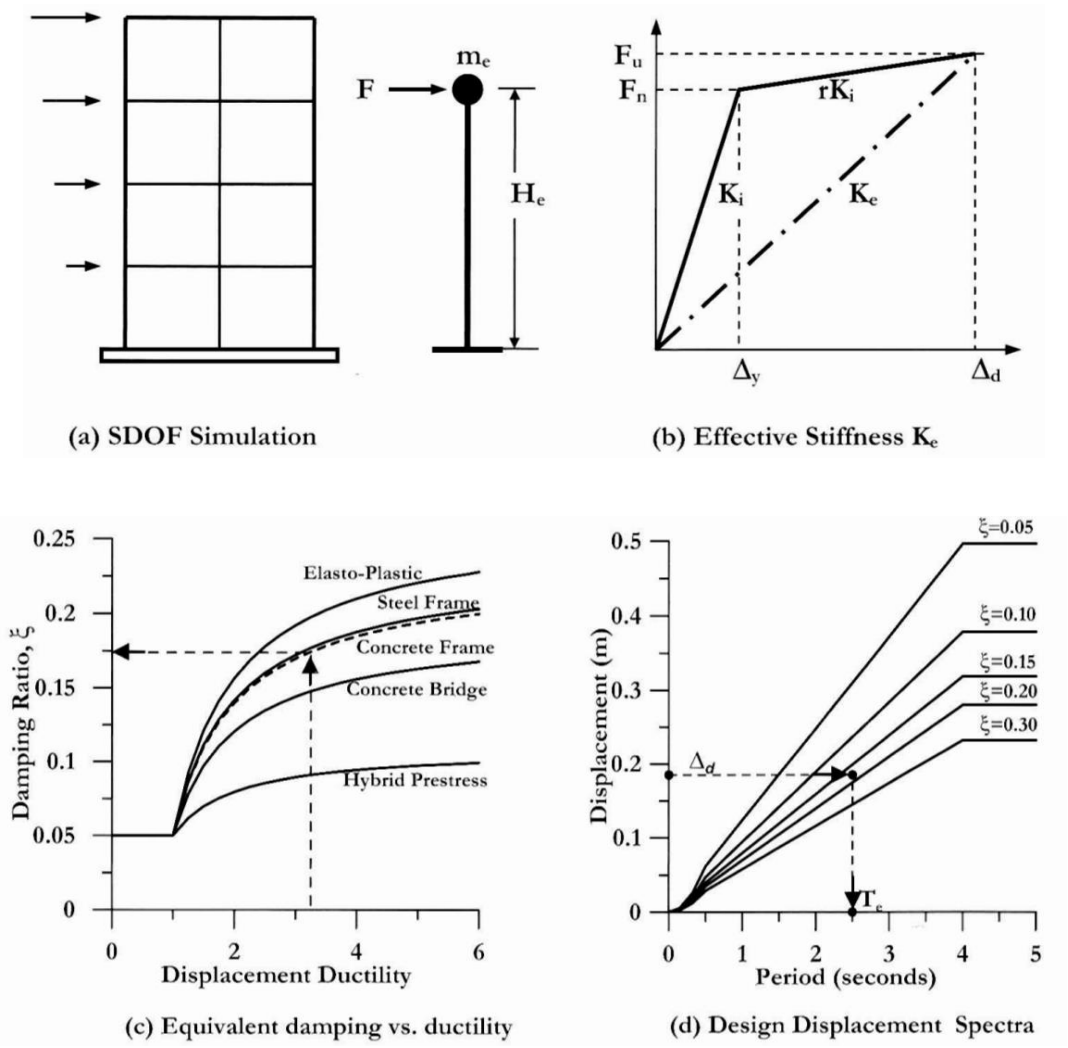


Ilustración 7. Concepción general del método DBD. Fuente: Priestley et al., 2007

La metodología de diseño basado en desplazamientos es simple de manera conceptual pero su complejidad radica en determinar las características de la estructura sustituta para el desplazamiento de diseño y desarrollar el espectro en desplazamientos. Uno de los méritos principales de esta metodología es lograr tomar en cuenta los efectos de la ductilidad para una

demanda sísmica de manera independiente a las características histeréticas de la estructura, basándose en la relación amortiguamiento/ductilidad. En la que el amortiguamiento para el diseño de la estructura depende de la ductilidad requerida para el desplazamiento de diseño.

2.4.1.1. Estructuras de un grado de libertad (1GDL)

- **Desplazamiento de diseño**

(Priestley et al., 2007) señala que el desplazamiento de diseño dependerá del estado límite para el que se considera el diseño de la estructura. Sin embargo, para cualquier estado límite el comportamiento estructural debe gobernarse por los esfuerzos admisibles de los materiales que conforman la estructura. Una manera simple de entender este principio es considerar una columna de hormigón armado en voladizo vertical, sosteniendo una masa en la parte superior y sometida a cargas laterales; del estudio del comportamiento del hormigón armado se tiene que existen dos posibles curvaturas para la sección dada por el concreto a compresión y el refuerzo de acero a tensión.

$$\emptyset_{ls.c} = \frac{\varepsilon_{ls.c}}{c}$$

$$\emptyset_{ls.s} = \frac{\varepsilon_{ls.c}}{d - c}$$

Donde:

$\emptyset_{ls.c}$: Curvatura del hormigón en estado limite (Compresión).

$\emptyset_{ls.s}$: Curvatura del acero en estado limite (Tensión).

A partir de este análisis se tiene que el desplazamiento de diseño va a estar gobernado por el menor valor de curvatura de los materiales, y está definido por la siguiente expresión:

$$\Delta_d = \emptyset_y * \frac{(H + L_{SP})^2}{3} + (\emptyset_{ls} - \emptyset_y) * L_P * H$$

Donde:

Δ_d: Desplazamiento de diseño.

$\emptyset_y$: Curvatura de fluencia.

H: Altura del sistema.

L_{SP}: Altura adicional que representa efectos de penetración.

$\emptyset_{ls}$; Menor curvatura en estado límite entre $\emptyset_{ls.c}$ y $\emptyset_{ls.s}$

L_P: Longitud de la rótula plástica.

Una manera alternativa para definir el desplazamiento de diseño es considerar el comportamiento deseado del sistema en relación con los elementos no estructurales, por lo que se puede establecer este valor en función de la deriva de piso, la cual se puede obtener de códigos normativos, por lo que el desplazamiento será función de la altura de la edificación y el porcentaje de deriva admisible.

$$\Delta_\theta = \theta_c * H$$

Donde:

Δ_θ: Desplazamiento de diseño en función de la deriva.

θ_c: Deriva (%).

H: Altura de la edificación.

- **Desplazamiento de diseño**

De acuerdo con (Priestley et al., 2007), el desplazamiento de fluencia debe conocerse para poder determinar el amortiguamiento viscoso equivalente puesto que permite determinar la demanda de ductilidad. Para determinar este desplazamiento se debe conocer la curva de fluencia.

Resultados analíticos indican que, para miembros de hormigón armado y mampostería, la curva de fluencia es esencialmente independiente a la cuantía de acero del elemento y el nivel de carga axial, demostrando que es función del esfuerzo de fluencia y el peralte de la sección, de manera que se proporcionan las siguientes aproximaciones para algunos tipos de secciones.

Columna rectangular de hormigón

$$\emptyset_y = \frac{2.10 * \varepsilon_y}{hc}$$

Muro de concreto armado

$$\emptyset_y = \frac{2.00 * \varepsilon_y}{Iw}$$

Pórticos de hormigón armado

$$\emptyset_y = \frac{0.5 * \varepsilon_y * Lb}{hb}$$

Donde:

ε_y: Deformación unitaria a flexión.

hc, Iw, hb: Dimensiones correspondientes a los elementos de análisis.

Lb: Luz libre entre apoyos.

$\emptyset_y$: Curva de fluencia.

Para sistemas de un grado de libertad en sistemas tipo voladizo vertical el desplazamiento de fluencia es satisfactorio para la expresión:

$$\Delta_y = \frac{\emptyset_y * (H + L_{SP})^2}{3}$$

Donde:

Δ_y: Desplazamiento de fluencia.

H: Altura del elemento.

- **Amortiguamiento viscoso equivalente**

El procedimiento de análisis relaciona el nivel de ductilidad con el amortiguamiento, considerando que se obtiene un amortiguamiento viscoso equivalente que se representa como la suma del amortiguamiento elástico más el amortiguamiento histerético. Para los sistemas estructurales de la presente investigación (Priestley et al., 2007) proporciona expresiones de amortiguamiento equivalente para diferentes sistemas estructurales de los cuales se destacan:

Muros de hormigón armado

$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.444 * \left(\frac{u - 1}{u * \pi}\right)$$

Pórticos de hormigón armado

$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.565 * \left(\frac{u - 1}{u * \pi}\right)$$

Donde:

u: Ductilidad $\left(\frac{\Delta_d}{\Delta_y}\right)$

ξ_{eq}: Amortiguamiento equivalente.

De acuerdo con las expresiones señaladas, se tiene el valor de 0.05 que representa el amortiguamiento elástico del 5 %, mientras que el comportamiento histerético es una relación de la ductilidad con coeficientes dependientes del sistema estructural.

- **Espectro inelástico de desplazamiento**

La normativa establece procedimientos para determinar espectros de desplazamiento elásticos, de manera análoga al diseño basado en fuerzas (DBF), el espectro debe disminuir el periodo por el comportamiento inelástico de la estructura. Por lo que (Priestley et al., 2007) establece lo siguiente.

$$T_i = T_e * R_u$$

Donde:

T_i: Período inelástico.

T_e: Período elástico.

R_u: Factor de modificación.

El factor de modificación Ru, está en relación con la demanda de ductilidad de la estructura, por lo que este factor de modificación representa un procedimiento más adecuado al adoptado en el diseño basado en fuerzas (DBF). Este factor se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$R_u = \left(\frac{0.07}{0.07 + C * \left(\frac{u-1}{u * \pi} \right)} \right)^{\alpha}$$

Donde:

R_u: Factor de modificación.

u: Ductilidad $\left(\frac{\Delta_d}{\Delta_y}\right)$

C: Coeficiente de amplificación de amortiguamiento histerético.

α: Factor que depende de la velocidad del pulso (0.5).

- **Cortante en la base**

El cortante en la base de la estructura depende del desplazamiento y la rigidez del sistema. Esta rigidez secante se puede obtener de la ecuación básica de la dinámica de estructuras, que relaciona la rigidez con el periodo de la estructura.

$$K_e = \frac{4 * \pi^2 * m_e}{Ti^2}$$

$$V_{base} = K_e * \Delta_d$$

Donde:

K_e: Rigidez efectiva.

m_e: Masa efectiva.

T_i: Período inelástico.

V_{base}: Cortante basal.

Δ_d: Desplazamiento de diseño.

2.4.1.2. Estructuras de múltiples grados de libertad (MGDL)

Para estructuras de múltiples grados de libertad el primer paso es determinar las características de la estructura sustituta (sistema de un grado de libertad). Estas características son, masa equivalente, desplazamiento de diseño y amortiguamiento efectivo. Con estos valores se puede definir el cortante en la base del sistema, que se distribuirá a los elementos de masa como fuerzas inerciales, con las que se podrá realizar el análisis y diseño de la estructura. (Pérez Vargas, 2014)

- **Desplazamiento de diseño**

El desplazamiento característico de la estructura sustituta depende del estado límite de desplazamiento o deriva del miembro más crítico de la estructura real asumiendo una deformada de la estructura que corresponde al primer modo de vibración para una excitación sísmica. Los cambios en la deformada para el primer modo de vibración son resultado de los cambios de rigidez en la estructura por la generación de rótulas plásticas. Esta representación resulta consistente con la caracterización de la estructura para una rigidez secante en la máxima respuesta, de manera que la deformada para el primer modo de vibración inelástico es muy similar a la vibración elástica. (Pérez Vargas, 2014)

En base a esto (Priestley et al., 2007) propone la siguiente expresión para determinar el desplazamiento de diseño de la estructura:

$$\Delta_d = \frac{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i^2)}{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i)}$$

Donde:

Δ_d: Desplazamiento de diseño para estructuras con múltiples grados de libertad.

mi: Masa concentrada en el nivel i.

Δ_i: Desplazamiento del nivel i.

De acuerdo con (Priestley et al., 2007) el desplazamiento para cada nivel pude determinarse usando la siguiente aproximación en función de la forma de vibrar inelástica.

$$\Delta_i = \delta_i * \frac{\Delta_c}{\delta_c}$$

Donde:

Δ_i: Desplazamiento del nivel i.

δ_i: Deformada inelástica para el nivel i.

Δ_c: Desplazamiento de diseño para la masa crítica c (Usualmente es el primer nivel).

δ_c: Deformada inelástica para la masa crítica c (Usualmente es el primer nivel).

De acuerdo con (Pérez Vargas, 2014) los modos altos de vibración tienen una influencia generalmente pequeña sobre los desplazamientos y derivas, por lo que no se consideran en las etapas iniciales del diseño, sin embargo, en edificios mayores a 10 pisos o edificios de baja altura con irregularidades, se los debe considerar puesto que los efectos de amplificación dinámica pueden aumentar en gran medida los desplazamientos.

- **Masa efectiva**

Para la caracterización de la masa efectiva de la estructura sustituta se considera la masa participativa de cada nivel en el primer modo de vibración. Esta participación de masa se obtiene

del análisis modal propio de la dinámica de estructuras. (Priestley et al., 2007) define la expresión para la masa efectiva como:

$$m_e = \frac{\sum_{i=1}^{n}(m_i * \Delta_i)}{\Delta_d}$$

Donde:

m_e: Masa efectiva.

m_i: Masa participativa en el nivel i.

Δ_i: Desplazamiento del nivel i.

Δ_d: Desplazamiento de diseño.

De acuerdo con (Pérez Vargas, 2014) la masa efectiva típica corresponde al 70 % de la masa total en sistemas duales y el 85 % en sistemas aporticados para el primer modo de vibración.

- **Amortiguamiento viscoso equivalente**

(Priestley et al., 2007) indica que el amortiguamiento de la estructura depende del sistema estructural empleado y la demanda de ductilidad de la estructura. Para determinar la demanda de ductilidad de la estructura se deberá conocer el desplazamiento de fluencia de esta que deberá ser interpolado a partir del perfil de desplazamiento en estructuras duales. Para estructuras aporticadas es adecuado asumir que la deriva de fluencia es lineal para la altura efectiva del oscilador.

Muros de hormigón armado

$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.444 * \left(\frac{u-1}{u*\pi}\right)$$

Pórticos de hormigón armado

$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.565 * \left(\frac{u-1}{u*\pi}\right)$$

Donde:

u: Ductilidad $\left(\frac{\Delta_d}{\Delta_y}\right)$

ξ_{eq}: Amortiguamiento equivalente.

- **Cortante en la base y distribución de fuerzas**

El período se obtiene al emplear el espectro de desplazamiento utilizando el desplazamiento de diseño con una amortiguación viscosa equivalente en particular.

$$K_e = \frac{4 * \pi^2 * m_e}{T^2}$$

$$V_{base} = K_e * \Delta_d$$

Donde:

K_e: Rigidez efectiva.

m_e: Masa efectiva.

T: Período efectivo.

V_{base}: Cortante basal.

Δ_d: Desplazamiento de diseño.

Una vez realizada la caracterización total de la estructura sustituta, se puede determinar la rigidez del sistema y por lo tanto el cortante basal de la misma. Al considerar que este sistema de

un grado de liberta tiene las propiedades de la estructura real, este cortante basal puede distribuirse a las localizaciones de concentración de masa. (Pérez Vargas, 2014)

Para realizar esta distribución (Priestley et al., 2007) indica la siguiente expresión:

$$F_i = V_{base} * \frac{m_i * \Delta_i}{\sum_{i=1}^{n}(m_i * \Delta_i)}$$

Donde:

F_i: Fuerza en el nivel i.

V_{base}: Cortante basal.

m_i: Masa concentrada en nivel i.

Δ_i: Desplazamiento en nivel i.

2.4.2. Procedimiento DBD

El procedimiento del método dependerá de las consideraciones del sistema estructural a emplearse, de manera general y correspondiente a la metodología presenta se tiene que el proceso de diseño sigue el siguiente diagrama de flujo.

(Pérez Vargas, 2014) propone el siguiente diagrama de flujo de manera sintetizada para un diseño basado en desplazamientos.

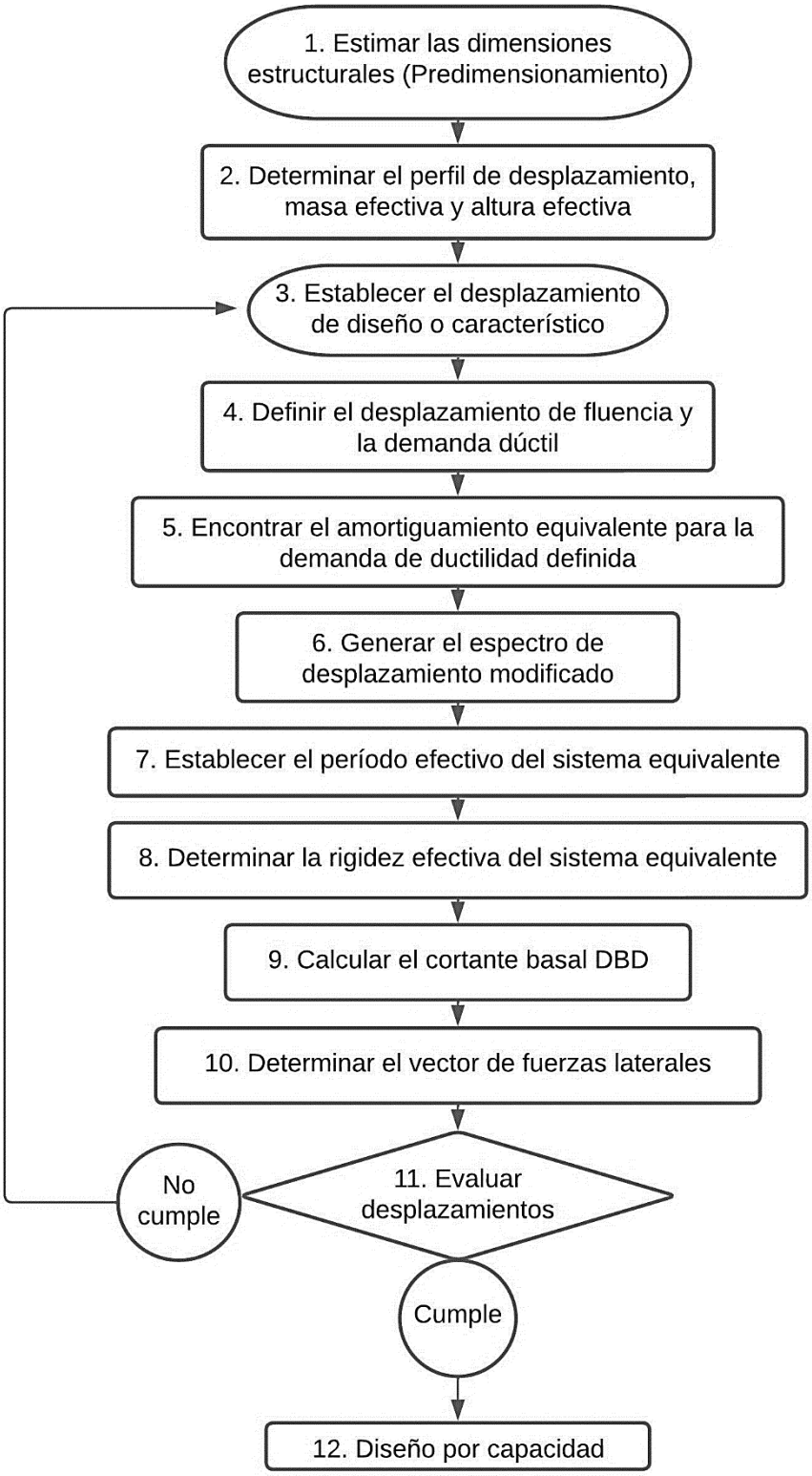


Ilustración 8. Diagrama de flujo DBD. Fuente: Pérez, 2014

2.4.2.1. Sistema aporticado

- **Datos de partida**

Para emplear el método DBD en un sistema estructural aporticado se empieza con los datos de partida, los cuales son las alturas de cada nivel de la estructura, como también la masa concentrada de cada piso.

- **Perfil de desplazamiento**

De acuerdo con (Priestley et al., 2007) el desplazamiento para cada nivel pude determinarse usando la siguiente aproximación en función de la forma de vibrar inelástica.

$$\Delta_i = \delta_i * \frac{\Delta_c}{\delta_c}$$

Donde:

Δ_i: Desplazamiento del nivel i.

δ_i: Deformada inelástica para el nivel i.

Δ_c: Desplazamiento de diseño para la masa crítica c (Usualmente es el primer nivel).

δ_c: Deformada inelástica para la masa crítica c (Usualmente es el primer nivel).

- **Deformada inelástica**

$$Para\ n \leq 4$$

$$\delta_i = \frac{H_i}{H_n}$$

$$Para\ n > 4$$

$$\delta_i = \frac{4}{3} * \left(\frac{H_i}{H_n}\right) * \left(1 - \frac{H_i}{4 * H_n}\right)$$

Donde:

H_i: Altura del nivel i.

H_n: Altura total edificio.

- **Desplazamiento de diseño**

$$\Delta_d = \frac{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i^2)}{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i)}$$

Donde:

Δ_d: Desplazamiento de diseño para estructuras con múltiples grados de libertad.

mi: Masa concentrada en el nivel i.

Δ_i: Desplazamiento del nivel i.

- **Altura efectiva**

$$H_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i * H_i)}{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i)}$$

Donde:

H_{eff}: Altura efectiva del sistema equivalente para el primer modo de vibración.

H_i: Altura del nivel i del edificio.

Δ_i: Desplazamiento de diseño para el nivel i.

mi: Masa en el piso i.

- **Masa efectiva**

$$M_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i)}{\Delta_d}$$

Donde:

M_{eff}: Masa efectiva del sistema equivalente.

Δ_i: Desplazamiento de diseño para el nivel i.

mi: Masa en el piso i.

Δ_d: Desplazamiento de diseño o característico.

- **Desplazamiento de fluencia**

$$\Delta_y = \theta_y * H_{eff}$$

Donde:

Δ_y: Desplazamiento de fluencia.

θ_y: Deriva de fluencia.

H_{eff}: Altura efectiva del sistema equivalente.

$$\theta_y = 0.5 * \epsilon_y * \frac{L_b}{h_b}$$

Donde:

θ_y: Deriva de fluencia.

ϵ_y: Deformación unitaria de fluencia del acero de refuerzo.

L_b, h_b: Longitud y peralte característico de una viga del pórtico.

- **Demanda de ductilidad**

$$u = \frac{\Delta_d}{\Delta_y}$$

Donde:

u: Demanda ductilidad.

Δ_d: Desplazamiento característico o de diseño.

Δ_y: Desplazamiento de fluencia.

- **Amortiguamiento viscoso equivalente**

Pórticos de hormigón armado

$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.565 * \left(\frac{u-1}{u * \pi}\right)$$

Donde:

u: Ductilidad.

ξ_{eq}: Amortiguamiento equivalente.

- **Factor de reducción de demanda sísmica**

$$R_\xi = \left(\frac{0.10}{0.05 + \xi_{eq}}\right)^{0.5}$$

Donde:

R_ξ: Factor de reducción de demanda sísmica.

ξ_{eq}: Amortiguamiento equivalente.

- **Período efectivo**

El período se obtiene con el espectro de desplazamiento modificado con el amortiguamiento viscoso equivalente y este a su vez se consigue con la demanda de ductilidad. El período no es calculado puesto que se ingresa al espectro de desplazamiento con el desplazamiento de diseño o característico hasta que interseque con la curva correspondiente.

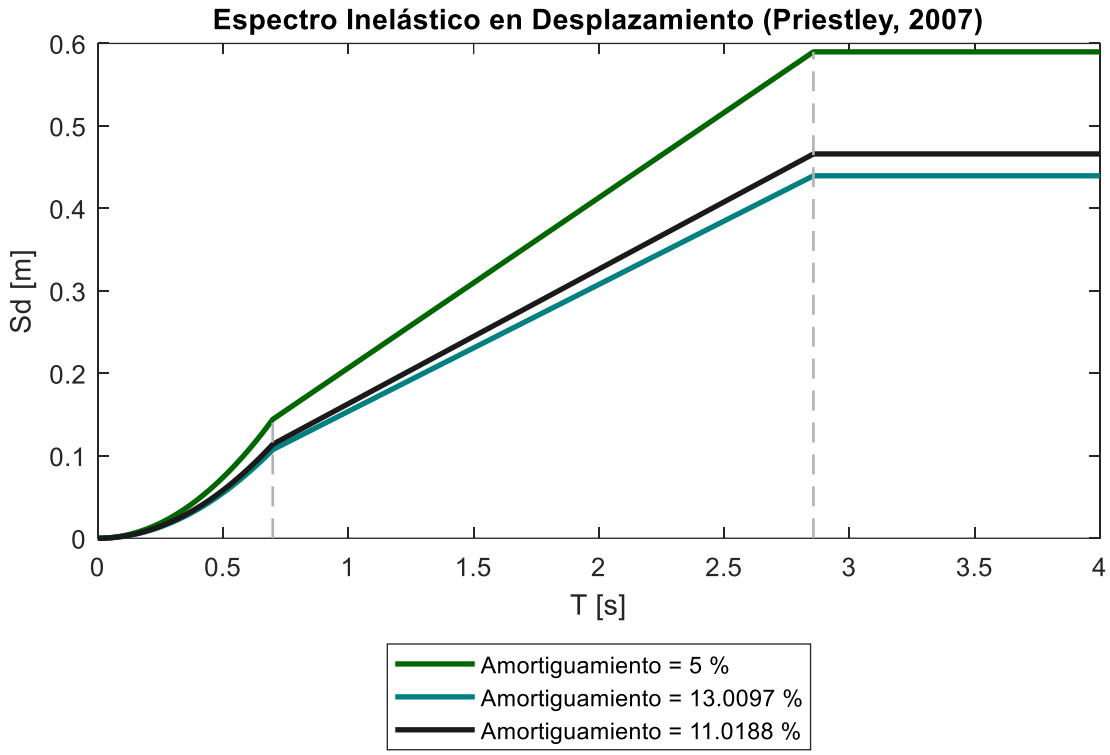


Ilustración 9. Espectro de desplazamiento. Fuente: Propia

- **Rigidez efectiva**

$$K_{eff} = \frac{4 * \pi^2 * M_{eff}}{T_{eff}^2}$$

Donde:

K_{eff}: Rigidez efectiva.

M_{eff}: Masa efectiva.

T_{eff}: Período efectivo.

- **Cortante basal**

$$V_{DBD} = K_{eff} * \Delta_d$$

Donde:

K_{eff}: Rigidez efectiva.

Δ_d: Desplazamiento característico o de diseño.

- **Distribución de fuerzas laterales**

Para pisos 1 a n-1:

$$F_i = V_{DBD} * \frac{mi * \Delta_i}{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i)}$$

Para techos (Piso n):

$$F_i = (1 - K) * V_{DBD} + K * V_{DBD} * \frac{m_i * \Delta_i}{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i)}$$

Donde:

F_i: Fuerza lateral en el nivel i.

K: Coeficiente de sistema estructural (pórticos $K = 0.9$).

V_{DBD}: Cortante basal para diseño basado en desplazamientos.

mi: Masa del piso i.

Δ_i: Perfil de desplazamiento para el centro de masa del piso i.

2.4.2.2. Sistema Dual

- **Datos de partida**

Para emplear el método DBD en un sistema estructural aporticado se empieza con los datos de partida, los cuales son las alturas de cada nivel de la estructura, como también la masa concentrada de cada piso.

- **Asignación del porcentaje basal para pórticos y muros**

Se decide el porcentaje que se distribuirá del cortante basal hacia los diferentes pórticos y a los muros estructurales, esto con la finalidad de obtener los momentos de volcamiento de muros y pórticos. Usualmente la distribución del cortante basal a los pórticos es del 30 % o 40 %.

- **Definición de altura de contra flexión del muro**

$$Si\ \frac{\sqrt{9-8*\beta_v}-1}{n^{0.25}} < \frac{n-1}{n}$$

$$\frac{H_{CF}}{H_n} = \frac{\sqrt{9-8*\beta_v}-1}{n^{0.25}}$$

$$Si\ \frac{\sqrt{9-8*\beta_v}-1}{n^{0.25}} \geq \frac{n-1}{n}$$

$$\frac{H_{CF}}{H_n} = 1$$

Donde:

β_v: Relación entre la resistencia al volteo de pórtico y la resistencia al volteo total $\left(\frac{M_{portico}}{M_{total}}\right)$

H_n: Altura total del edificio.

n: Número total de pisos.

H_{CF}: Altura de contra flexión del muro.

- **Curvatura de fluencia**

Para muros estructurales rectangulares de hormigón armado se emplea la siguiente fórmula:

$$\theta_y = 2 * \frac{\varepsilon_y}{l_w}$$

Donde:

θ_y: Curvatura de fluencia del muro

ε_y: Deformación unitaria a flexión.

l_w: Largo del muro.

- **Desplazamiento de fluencia para cada nivel**

$$Si\ H_i \leq H_{CF}$$

$$\Delta_{yi} = \theta_y * \left(\frac{{H_i}^2}{2} - \frac{{H_i}^3}{6 * H_{CF}}\right)$$

$$Si\ H_i > H_{CF}$$

$$\Delta_{yi} = \theta_y * \left(\frac{H_{CF} * H_i}{2} - \frac{{H_{CF}}^2}{6}\right)$$

Donde:

θ_y: Curvatura de fluencia del muro

Δ_{yi}: Desplazamiento de fluencia para el nivel i.

H_{CF}: Altura de contra flexión del muro.

H_i: Altura de cada nivel.

- **Perfil de desplazamiento**

$$\Delta_{Di} = \Delta_{yi} + \left(\theta_C - \frac{\theta_y * H_{CF}}{2}\right) * H_i$$

Donde:

Δ_{Di}: Perfil de desplazamiento para cada nivel.

θ_y: Curvatura de fluencia del muro.

θ_C: Deriva límite normativo.

Δ_{yi}: Desplazamiento de fluencia para el nivel i.

H_{CF}: Altura de contra flexión del muro.

H_i: Altura de cada nivel.

- **Desplazamiento de diseño**

$$\Delta_d = \frac{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i^2)}{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i)}$$

Donde:

Δ_d: Desplazamiento de diseño para estructuras con múltiples grados de libertad.

mi: Masa concentrada en el nivel i.

Δ_i: Desplazamiento del nivel i.

- **Altura efectiva**

$$H_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i * H_i)}{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i)}$$

Donde:

H_{eff}: Altura efectiva del sistema equivalente para el primer modo de vibración.

H_i: Altura del nivel i del edificio.

Δ_i: Desplazamiento de diseño para el nivel i.

mi: Masa en el piso i.

- **Masa efectiva**

$$M_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i)}{\Delta_d}$$

Donde:

M_{eff}: Masa efectiva del sistema equivalente.

Δ_i: Desplazamiento de diseño para el nivel i.

mi: Masa en el piso i.

Δ_d: Desplazamiento de diseño o característico.

- **Desplazamiento de fluencia**
    - **Muros**

$$Si\ H_{eff} \leq H_{CF}$$

$$\Delta_{yi} = \theta_y * \left(\frac{{H_{eff}}^2}{2} - \frac{{H_{eff}}^3}{6 * H_{CF}}\right)$$

$$Si\ H_{eff} > H_{CF}$$

$$\Delta_{yi} = \theta_y * \left(\frac{H_{CF} * H_{eff}}{2} - \frac{{H_{CF}}^2}{6}\right)$$

Donde:

θ_y: Curvatura de fluencia del muro

Δ_{yi}: Desplazamiento de fluencia para el nivel i.

H_{CF}: Altura de contra flexión del muro.

H_{eff}: Altura efectiva.

- **Pórticos**

$$\Delta_y = \theta_y * H_{eff}$$

Donde:

Δ_y: Desplazamiento de fluencia.

θ_y: Deriva de fluencia.

H_{eff}: Altura efectiva del sistema equivalente.

$$\theta_y = 0.5 * \epsilon_y * \frac{L_b}{h_b}$$

Donde:

θ_y: Deriva de fluencia.

ϵ_y: Deformación unitaria de fluencia del acero de refuerzo.

$L_{b,} h_b$: Longitud y peralte característico de una viga del pórtico.

- **Demanda de ductilidad**

$$u = \frac{\Delta_d}{\Delta_y}$$

Donde:

u: Demanda ductilidad.

Δ_d: Desplazamiento característico o de diseño.

Δ_y: Desplazamiento de fluencia.

- **Amortiguamiento viscoso equivalente**

Muros de hormigón armado

$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.444 * \left(\frac{u-1}{u*\pi}\right)$$

Pórticos de hormigón armado

$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.565 * \left(\frac{u-1}{u*\pi}\right)$$

Donde:

u: Ductilidad.

ξ_{eq}: Amortiguamiento equivalente.

- **Amortiguamiento viscoso equivalente del sistema**

$$\xi_{eqsis} = \frac{\xi_{eqm} * M_w + \xi_{eqp} * M_{OTMF}}{M_{OTM}}$$

Donde:

ξ_{eqsis}: Amortiguamiento equivalente del sistema.

ξ_{eqm}: Amortiguamiento equivalente de muros.

ξ_{eqp}: Amortiguamiento equivalente de pórticos.

M_w: Momento de volcamiento del muro.

M_{OTMF}: Momento de volcamiento del pórtico.

M_{OTM}: Momento de volcamiento total.

- **Factor de reducción de demanda sísmica**

$$R_\xi = \left(\frac{0.10}{0.05 + \xi_{eq}}\right)^{0.5}$$

Donde:

R_ξ: Factor de reducción de demanda sísmica.

ξ_{eq}: Amortiguamiento equivalente.

- **Período efectivo**

El período se obtiene con el espectro de desplazamiento modificado con el amortiguamiento viscoso equivalente y este a su vez se consigue con la demanda de ductilidad. El período no es calculado puesto que se ingresa al espectro de desplazamiento con el desplazamiento de diseño o característico hasta que interseque con la curva correspondiente.

- **Rigidez efectiva**

$$K_{eff} = \frac{4 * \pi^2 * M_{eff}}{T_{eff}^2}$$

Donde:

K_{eff}: Rigidez efectiva.

M_{eff}: Masa efectiva.

T_{eff}: Período efectivo.

- **Cortante basal**

$$V_{DBD} = K_{eff} * \Delta_d$$

Donde:

K_{eff}: Rigidez efectiva.

Δ_d: Desplazamiento característico o de diseño.

- **Distribución de fuerzas laterales**

Para pisos 1 a n-1:

$$F_i = V_{DBD} * \frac{mi * \Delta_i}{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i)}$$

Para techos (Piso n):

$$F_i = (1 - K) * V_{DBD} + K * V_{DBD} * \frac{m_i * \Delta_i}{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i)}$$

Donde:

F_i: Fuerza lateral en el nivel i.

K: Coeficiente de sistema estructural (pórticos $K = 0.9$).

V_{DBD}: Cortante basal para diseño basado en desplazamientos.

mi: Masa del piso i.

Δ_i: Perfil de desplazamiento para el centro de masa del piso i.

2.4.3. Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC)

2.4.3.1. Espectro elástico de desplazamiento

La (NEC Committee-SE-DS, 2015) determina que, para definir el espectro elástico de desplazamientos, se tomará como punto de partida la aceleración espectral (Sa) del espectro elástico de aceleraciones, de acuerdo con los periodos límite como se indica a continuación:

$$S_d = S_a(g) * \left(\frac{T}{2 * \pi}\right)^2 \; para \; 0 \leq T \leq T_L$$

$$S_d = S_a(g) * \left(\frac{T_L}{2 * \pi}\right)^2 \; para \; T > T_L$$

Donde:

g: Aceleración de la gravedad.

T: Periodo fundamental de la estructura.

S_a: Ordenada espectral de aceleración.

S_d: Ordenada espectral en desplazamiento, para un amortiguamiento del 5%.

T_L: Periodo limite en desplazamiento ($T_L = 2.4 * F_d$).

2.4.3.2. Puntos clave DBD

La (NEC Committee-SE-DS, 2015) considera los siguientes puntos clave para la aplicación del método:

- Se emplea una estructura equivalente (sustituta) de un grado de libertad que caracteriza la estructura real y representa la respuesta para un pico de desplazamiento.
- Caracteriza la estructura por una rigidez secante.
- En nivel de amortiguamiento se define por el comportamiento elástico e histerético de la estructura.
- El diseño parte de un desplazamiento objetivo fijado por el estructurista.

2.4.3.3. Caracterización de la estructura

La (NEC Committee-SE-DS, 2015) basa la aplicación de la metodología de acuerdo con (Priestley et al., 2007) con algunas consideraciones adicionales.

- **Perfil de desplazamiento**

El perfil de desplazamiento proviene de la observación de resultados de análisis inelásticos tiempo historia en diferentes sistemas estructurales, de manera que la (NEC Committee-SE-DS, 2015) establece las siguientes expresiones:

- **Edificaciones aporticadas**

En edificaciones conformadas por pórticos de n pisos, el perfil de desplazamiento se determinará para:

a) Cada nivel de altura H_i
b) La deriva de diseño θ_T (0.004 para el Hormigón y 0.06 para el acero de refuerzo)
c) La altura total del edificio H_n

$$Para\ n \leq 4$$

$$\Delta_i = w_\theta * H_i * \theta_T$$

$$Para\ n > 4$$

$$\Delta_i = w_\theta * H_i * \theta_T * \frac{4 * H_n - H_i}{4 * H_n - H_1}$$

Donde:

Δ_i: Perfil de desplazamiento del piso i.

w_θ: Factor de amplificación dinámica de derivas ($w_\theta = 1.15 - 0.0034 * H_n \leq 1.0$).

H_i: Altura del nivel i.

θ_T: Deriva de diseño.

H_n: Altura total edificio.

H_1: Altura para el nivel 1.

- **Edificaciones duales**

La (NEC Committee-SE-DS, 2015) establece que para el perfil de desplazamiento en estructuras duales se determinará de acuerdo con los siguiente:

$$\Delta_i = \Delta_{iy} + \theta_{pFW} * H_i$$

Donde:

Δ_i: Perfil de desplazamiento del piso i.

Δ_{iy}: Desplazamiento en nivel i para la fluencia del muro estructural.

θ_{pFW}: Rotación plástica de diseño para estructuras duales.

H_i: Altura del nivel i.

Rotación para edificaciones duales

$$\theta_{pFW} = \theta_c - \frac{\phi_{yw} * H_{CF}}{2} \leq (\phi_{ls} - \phi_{yw}) * L_p$$

$$L_p = k * H_n + 0.1 * L_w + L_{SP}$$

Donde:

$$k = 0.15 * (\frac{f_u}{f_y} - 1) \leq 0.06$$

$$L_{SP} = 0.0022 * f_y * d_{bl}$$

θ_c: Deriva límite de código.

ϕ_{yw}: Curvatura de fluencia de la sección del muro estructural (Se obtiene por el análisis momento curvatura).

H_{CF}: Altura del muro hasta el punto de contra flexión.

ϕ_{ls}: Curvatura de la sección en el estado límite de diseño.

L_p: Longitud de la rótula plástica.

$$Si\ \frac{\sqrt{9 - 8 * \beta_v} - 1}{n^{0.25}} < \frac{n - 1}{n}$$

$$\frac{H_{CF}}{H_n} = \frac{\sqrt{9 - 8 * \beta_v} - 1}{n^{0.25}}$$

$$Si\ \frac{\sqrt{9-8*\beta_v}-1}{n^{0.25}} \geq \frac{n-1}{n}$$

$$\frac{H_{CF}}{H_n} = 1$$

Donde:

β_v: Relación entre la resistencia al volteo de pórtico y la resistencia al volteo total $\left(\frac{M_{portico}}{M_{total}}\right)$

H_n: Altura total del edificio.

n: Número total de pisos.

De acuerdo con la anterior se tiene que el perfil de desplazamiento viene dado por:

$$Si\ h_i \leq H_{CF}$$

$$\Delta_i = \phi_{yw} * (\frac{h_i^2}{2} - \frac{h_i^3}{6 * H_{CF}})$$

$$Si\ h_i > H_{CF}$$

$$\Delta_i = \phi_{yw} * (\frac{H_{CF} * h_i}{2} - \frac{H_{CF}^2}{6})$$

- **Desplazamiento de diseño**

El desplazamiento de diseño que caracteriza la estructura dentro de la normativa deberá ser reducido por la aplicación de los factores de regularidad y configuración estructural. Al reducir el desplazamiento objetivo la estructura deberá poseer mayor rigidez efectiva.

$$\Delta_d = \emptyset_p * \emptyset_e * \frac{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i^2)}{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i)}$$

Donde:

Δ_d: Desplazamiento de diseño.

mi: Masa del nivel i.

Δ_i: Desplazamiento de diseño para el piso i.

$\emptyset_p$: Coeficiente de irregularidad en planta.

$\emptyset_e$: Coeficiente de irregularidad en elevación.

- **Altura y Masa efectiva**

La (NEC Committee-SE-DS, 2015) indica que la altura efectiva es la que define el centroide de las fuerzas inerciales generadas para el primero modo de vibración.

$$H_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i * H_i)}{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i)}$$

Donde:

H_{eff}: Altura efectiva del sistema equivalente para el primer modo de vibración.

H_i: Altura del nivel i del edificio.

Δ_i: Desplazamiento de diseño para el nivel i.

mi: Masa en el piso i.

A su vez la masa efectiva se determina como:

$$M_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i)}{\Delta_d}$$

Donde:

M_{eff}: Masa efectiva del sistema equivalente.

Δ_i: Desplazamiento de diseño para el nivel i.

mi: Masa en el piso i.

Δ_d: Desplazamiento de diseño o característico.

- **Desplazamiento de fluencia**

El desplazamiento de fluencia se estima mediante un análisis estructural racional, o dependiendo del sistema estructural (aporticado o dual) como se indica a continuación (NEC Committee-SE-DS, 2015)

  - **Edificaciones aporticadas**

$$\Delta_y = \theta_y * H_{eff}$$

Donde:

Δ_y: Desplazamiento de fluencia.

θ_y: Deriva de fluencia.

H_{eff}: Altura efectiva del sistema equivalente.

$$\theta_y = 0.5 * \epsilon_y * \frac{L_b}{h_b}$$

Donde:

θ_y: Deriva de fluencia.

ϵ_y: Deformación unitaria de fluencia del acero de refuerzo.

$l_{b,}h_b$: Longitud y peralte característico de una viga del pórtico.

- **Edificaciones duales**

$$\Delta_y = \frac{\in_y}{l_w} * H_{eff}^2 * \left(1 - \frac{H_{eff}}{3 * H_n}\right)$$

Donde:

Δ_y: Desplazamiento de fluencia.

l_w: Longitud del muro en su base.

H_{eff}: Altura efectiva del sistema equivalente.

H_n: Altura total del edificio.

ϵ_y: Deformación unitaria de fluencia del acero de refuerzo.

- **Demanda de ductilidad**

De acuerdo con la (NEC Committee-SE-DS, 2015) la demanda de ductilidad u se calcula como la razón entre el desplazamiento característico (diseño) y el desplazamiento de fluencia.

$$u = \frac{\Delta_d}{\Delta_y}$$

Donde:

u: Demanda ductilidad.

Δ_d: Desplazamiento característico o de diseño.

Δ_y: Desplazamiento de fluencia.

- **Factor de reducción de demanda sísmica**

El factor de reducción de la demanda sísmica se obtiene a partir de la demanda de ductilidad y la (NEC Committee-SE-DS, 2015) establece la siguiente figura para determinar este valor.

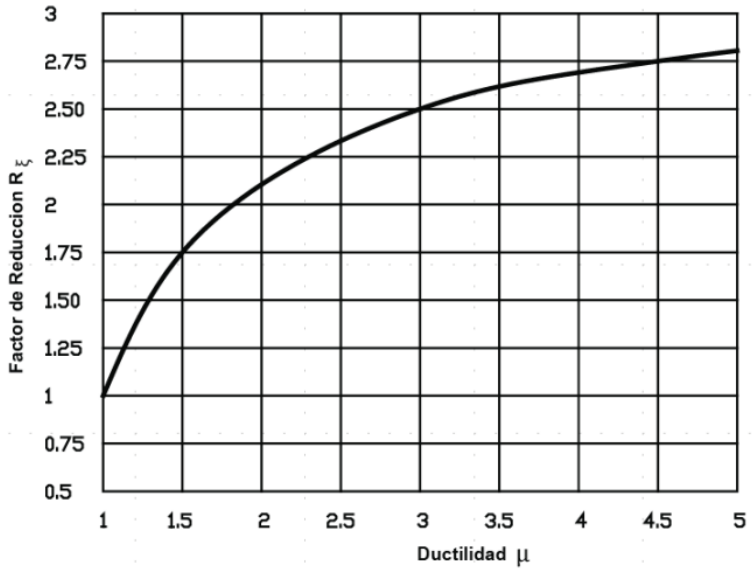


Ilustración 10. Factor de reducción de demanda sísmica. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015

- **Período efectivo**

El periodo efectivo se determina a partir del espectro de desplazamientos elásticos (determinado a partir del espectro de aceleraciones) de acuerdo con las siguientes expresiones.

$$Si\ T_c \leq T_{eff} \leq T_L$$

$$T_{eff} = \frac{\Delta_d * R_\xi}{0.38 * Z * F_d}$$

$$Si\ T_{eff} > T_L$$

$$T_{eff} = T_L$$

Donde:

$$T_L = 2.4 * F_d \qquad T_o = 0.1 * F_s * \frac{F_d}{F_a} \qquad T_c = 0.48 * F_s * \frac{F_d}{F_a}$$

Δ_d: Desplazamiento característico o de diseño.

R_ξ: Factor de reducción de demanda sísmica.

Z: Factor de zona sísmica.

F_d: Factor de sitio de la sección.

- **Rigidez efectiva**

La rigidez efectiva de acuerdo con (NEC Committee-SE-DS, 2015) se determina a través de la relación básica de la dinámica estructural entre el periodo, masa y rigidez para un sistema de un grado de libertad.

$$K_{eff} = \frac{4 * \pi^2 * M_{eff}}{T_{eff}^2}$$

Donde:

K_{eff}: Rigidez efectiva.

M_{eff}: Masa efectiva.

T_{eff}: Período efectivo.

- **Cortante basal**

El cortante basal para el diseño basado en desplazamientos, es la resistencia requerida por la estructura cuando se llega al desplazamiento de diseño o característico. La (NEC Committee-SE-DS, 2015) establece que el cortante basal para DBD se calculará para las dos direcciones principales de la estructura, como el producto de la rigidez efectiva y el desplazamiento de diseño.

$$V_{DBD} = K_{eff} * \Delta_d$$

Donde:

K_{eff}: Rigidez efectiva.

Δ_d: Desplazamiento característico o de diseño.

- **Vector de fuerzas laterales**

En conformidad a lo que establece la (NEC Committee-SE-DS, 2015) el cortante en la base (V_{DBD}) se distribuirá en el centro de masa de cada nivel de la edificación de acuerdo con las siguientes relaciones:

Para pisos 1 a n-1:

$$F_i = K * V_{DBD} * \frac{mi * \Delta_i}{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i)}$$

Para techos (Piso n):

$$F_i = (1 - K) * V_{DBD} + K * V_{DBD} * \frac{m_i * \Delta_i}{\sum_{i=1}^{n}(mi * \Delta_i)}$$

Donde:

F_i: Fuerza lateral en el nivel i.

K: Coeficiente de sistema estructural (pórticos $K = 0.9$ y para demás estructuras $K = 1$).

V_{DBD}: Cortante basal para diseño basado en desplazamientos.

mi: Masa del piso i.

Δ_i: Perfil de desplazamiento para el centro de masa del piso i.

El código normativo establece que la estructura debe analizarse bajo la acción del vector de fuerza lateral de diseño para determinar la capacidad de momento de las rótulas plásticas. Este análisis estará basado en la rigidez efectiva de los miembros estructurales compatibles con el perfil de desplazamiento objetivo. Este procedimiento permite distribuir la resistencia en todos los elementos de la estructura. (NEC Committee-SE-DS, 2015)

CAPÍTULO III

3. MODELACIÓN

3.1. Estructuración de los modelos

3.1.1. Pórticos resistentes a momento y Sistema dual

1.- Vistas de las estructuras propuestas

- **Pórticos resistentes a momento**

Vista 3D:

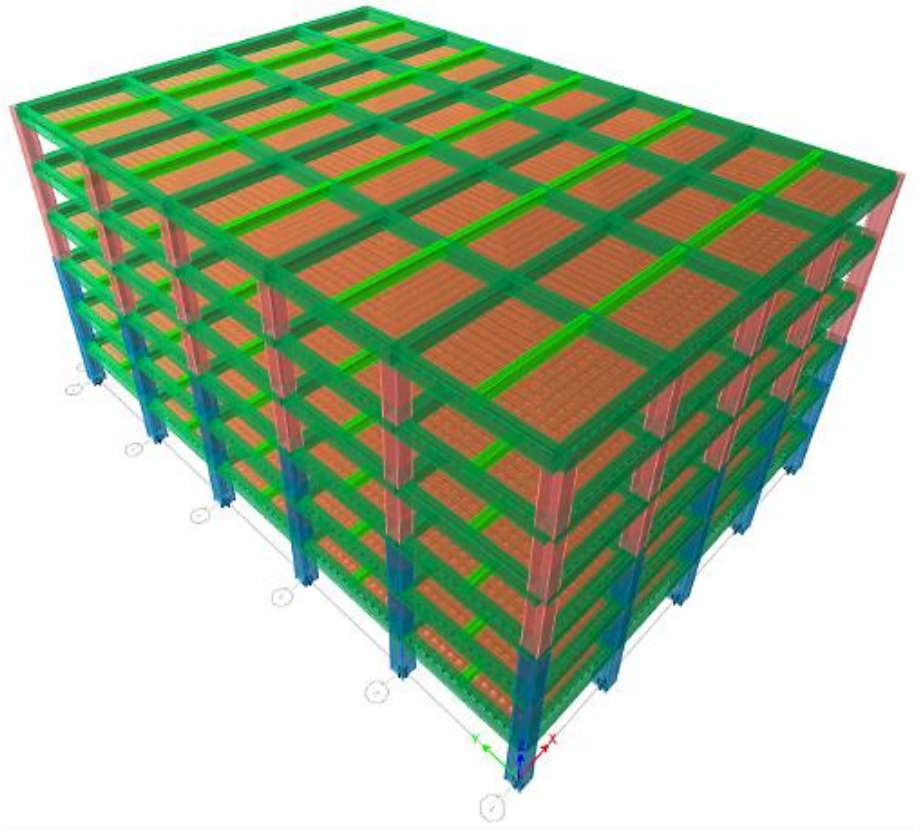


Ilustración 11. Vista 3D Pórtico resistente a momento. Fuente: Propia

Vista en planta:

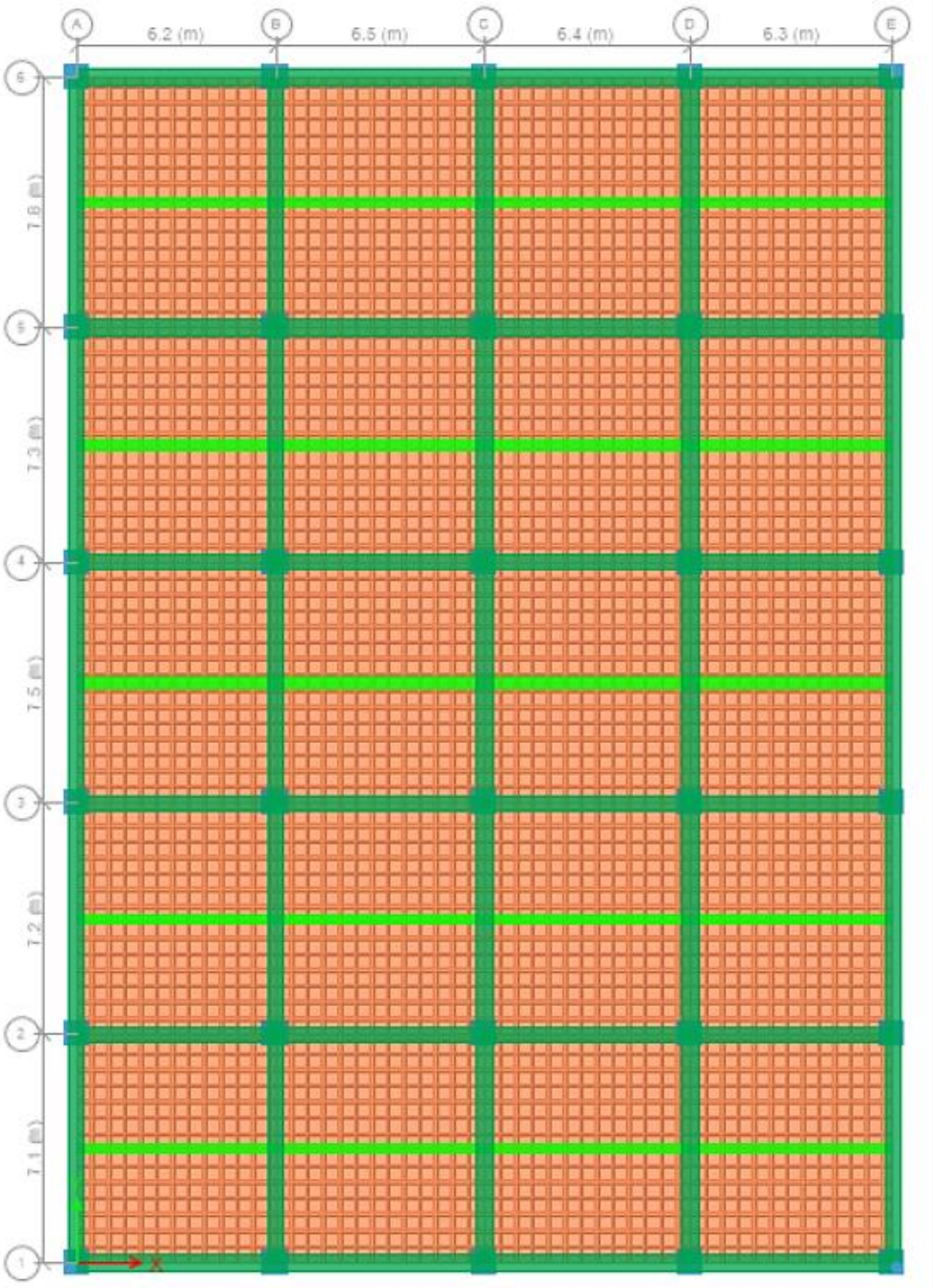
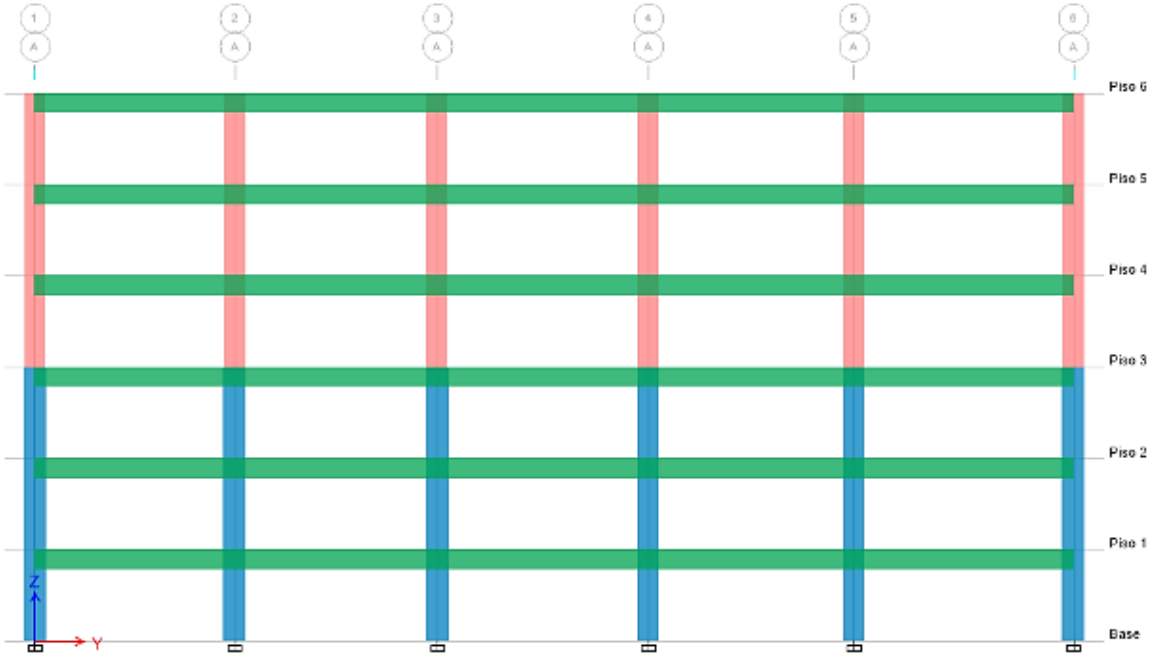


Ilustración 12. Vista en planta Pórtico resistente a momento. Fuente: Propia

Elevación (Dirección Y - X):

Altura de entrepiso: 3.24 m



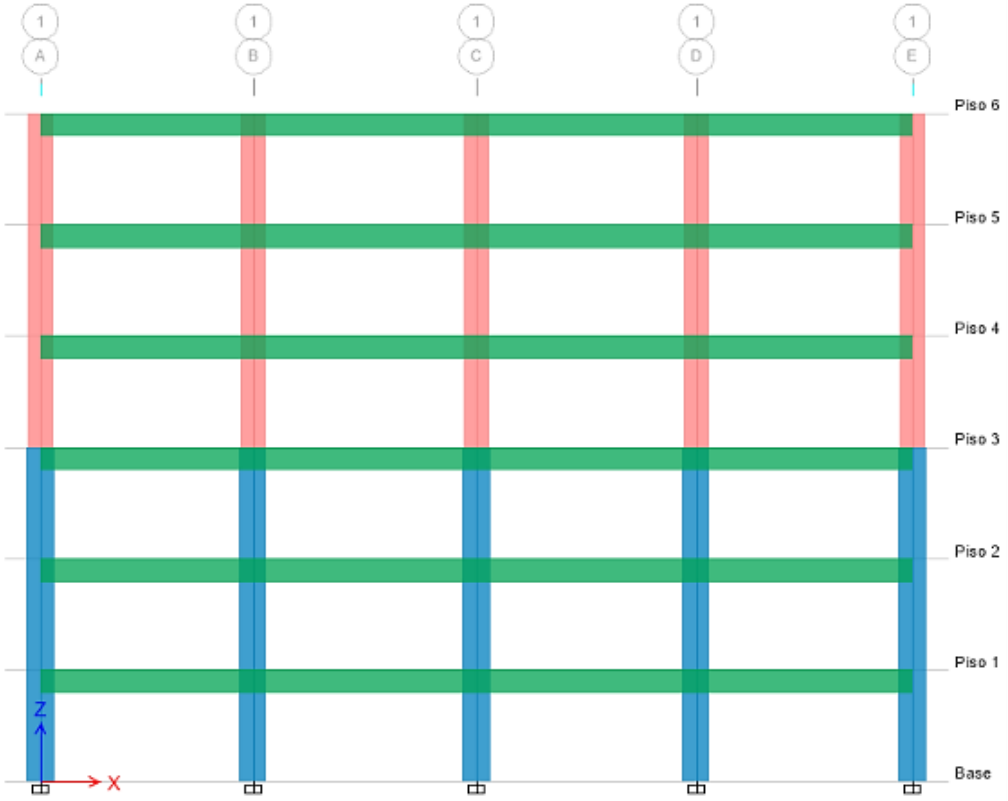


Ilustración 13. Elevación Y - X Pórtico resistente a momento. Fuente: Propia

- **Sistema dual**

Vista 3D:

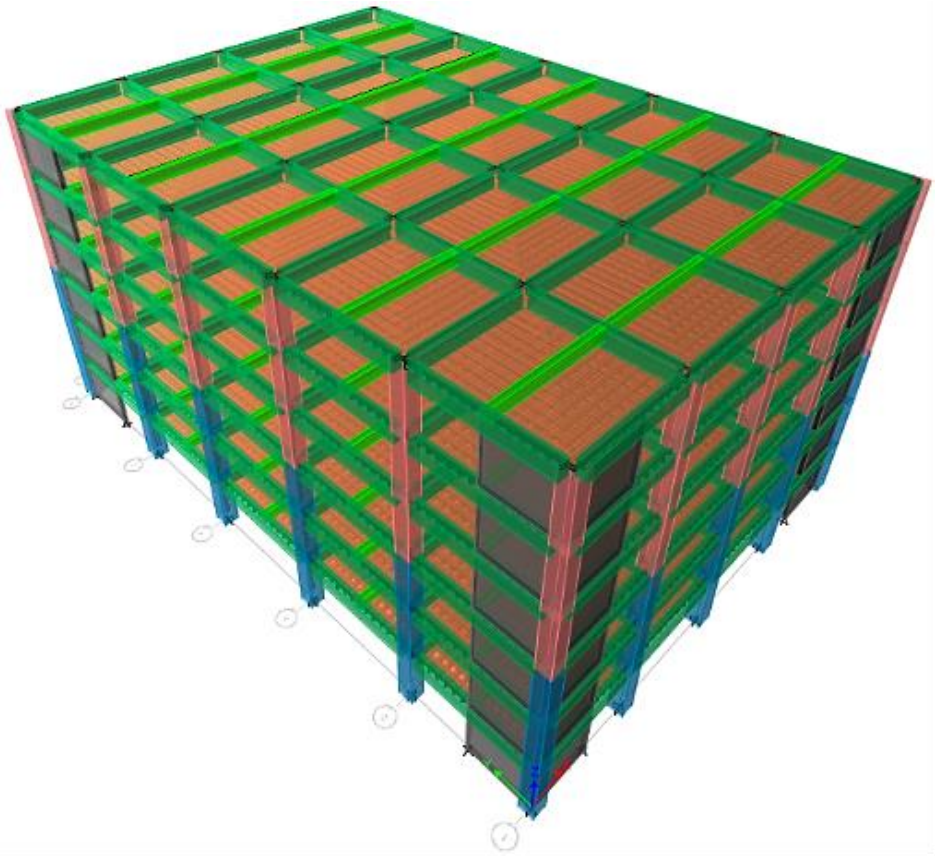


Ilustración 14. Vista 3D Sistema dual. Fuente: Propia

Vista en planta:

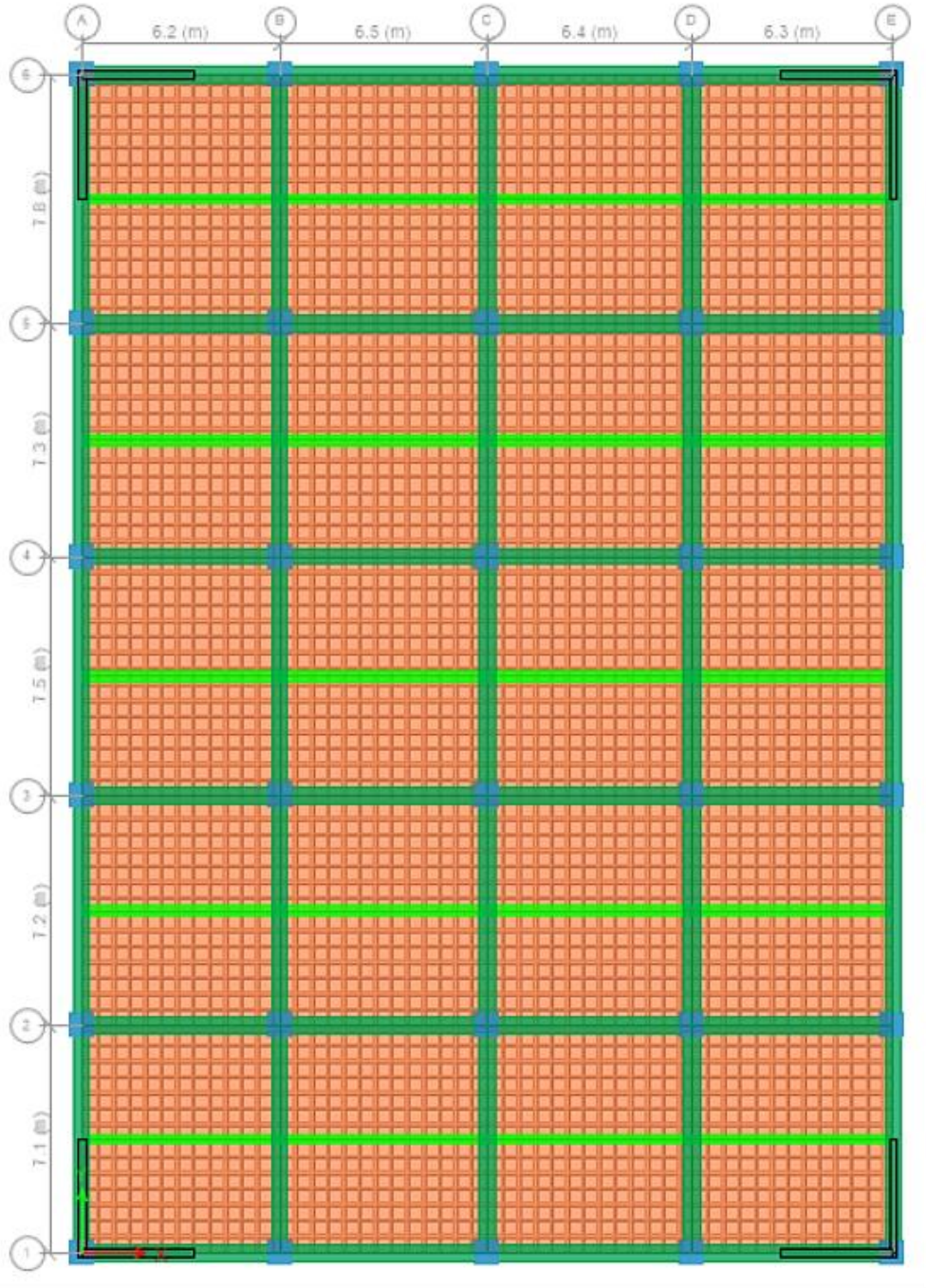
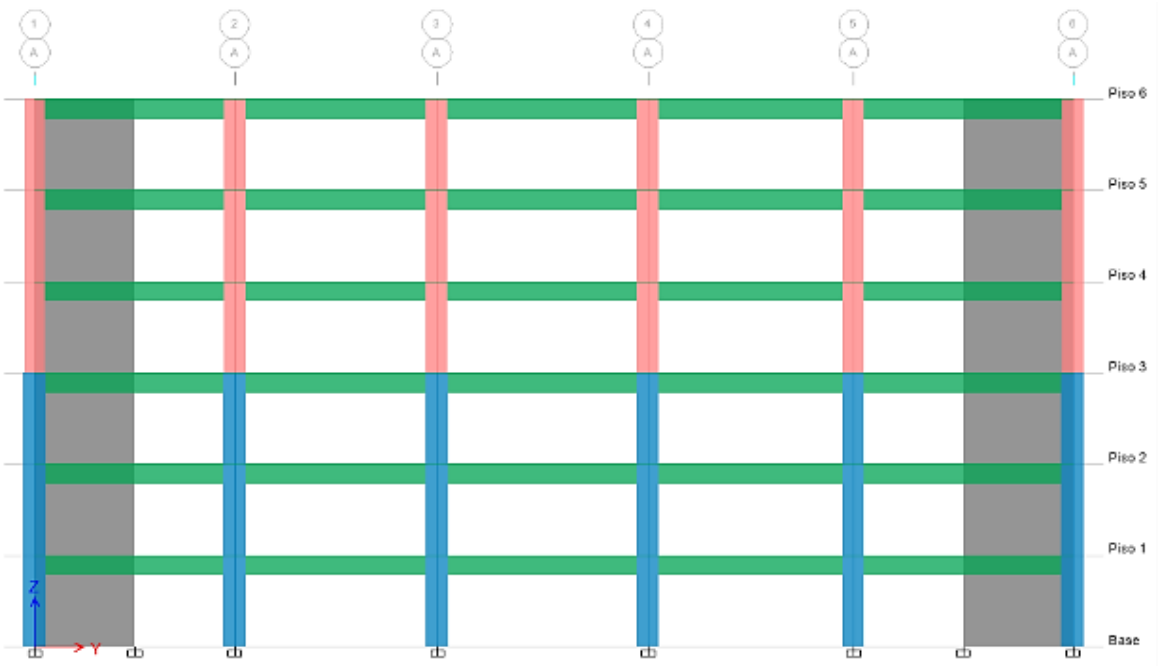


Ilustración 15. Vista en planta Sistema dual. Fuente: Propia

Elevación (Dirección Y - X):

Altura de entrepiso: 3.24 m



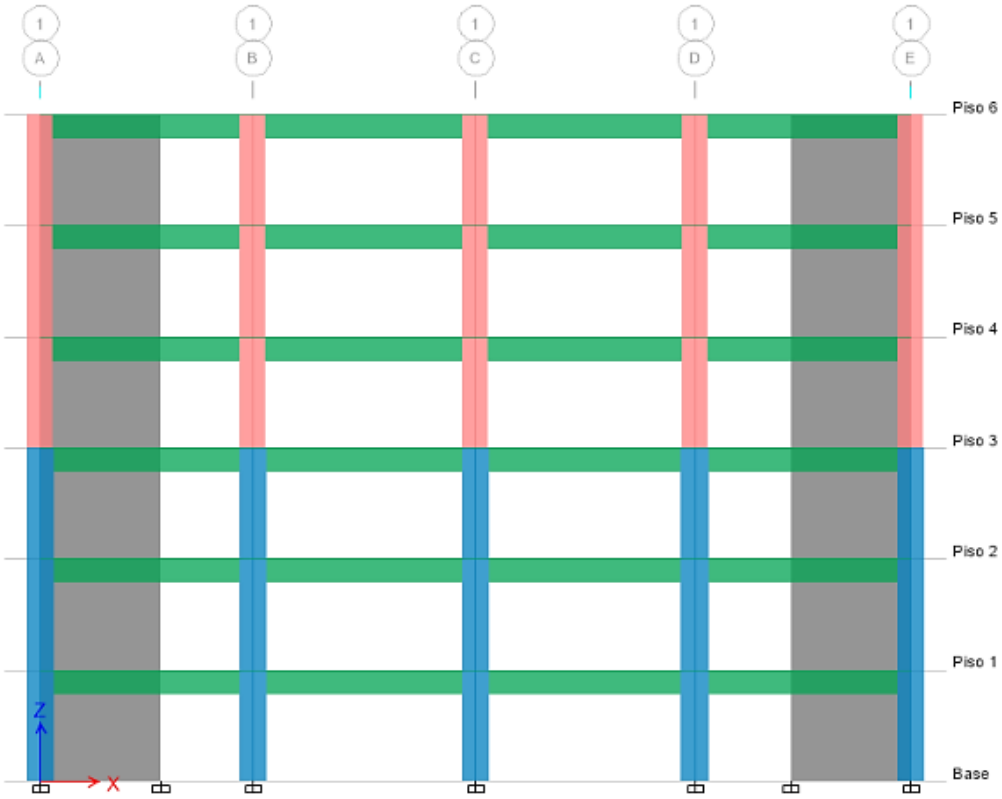


Ilustración 16. Elevación X - Y Sistema dual. Fuente: Propia

Vista 3D de los modelos estructurales (Pórtico resistente a momento y Sistema dual)

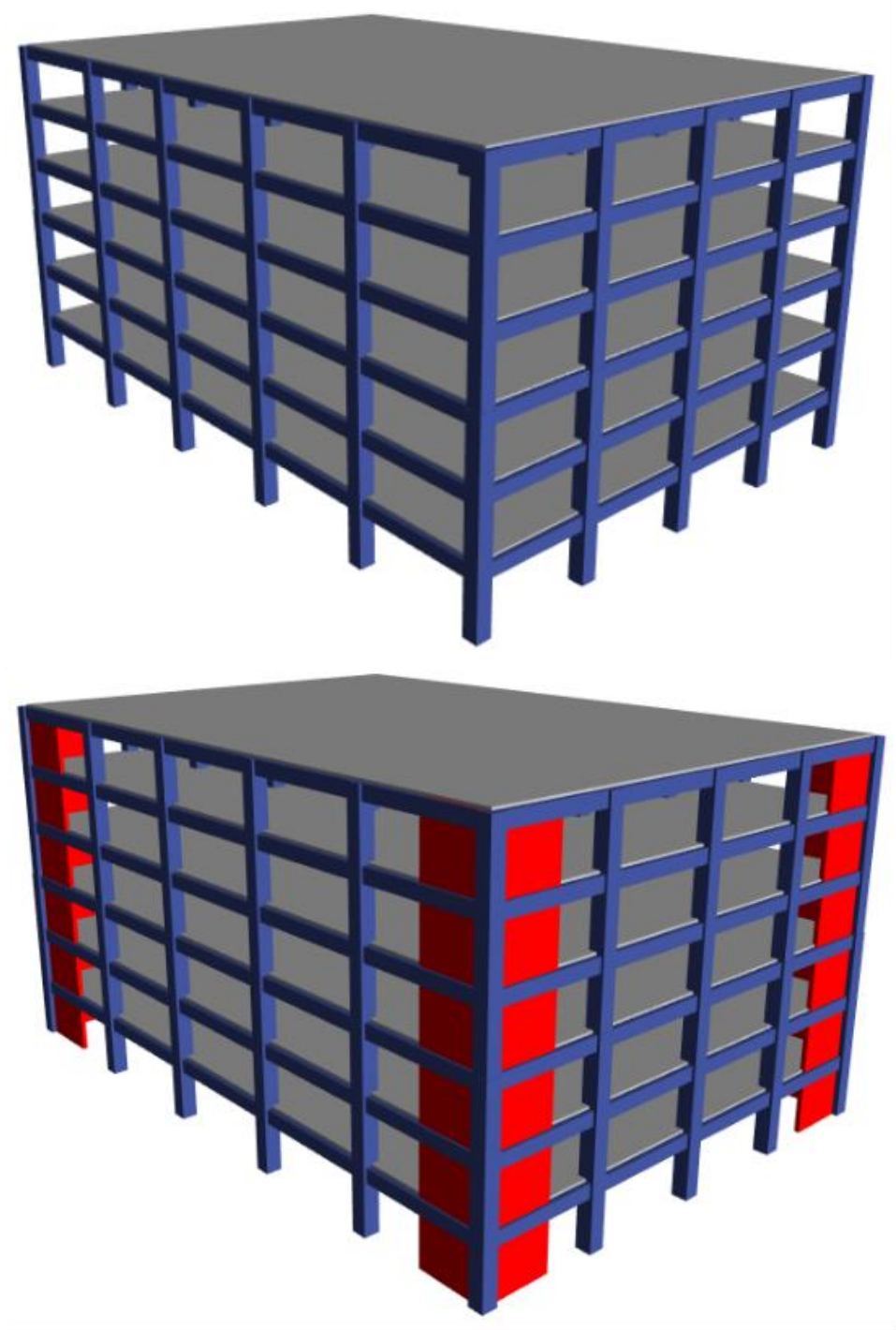


Ilustración 17. Vista 3D modelos estructurales. Fuente: Propia

3.2. Predimensionamiento de la estructura

2.- Predimensionamiento de la losa

Ecuación 8.3.1.2 del ACI 318-19, para determinar espesor de la losa.

$$h = \frac{\ell_n \left(0.8 + \frac{f_y}{14{,}000} \right)}{36 + 5\beta(\alpha_{fm} - 0.2)} \geq 12.5 \text{ cm}$$

Luz libre en la dirección larga del panel: $ln := 6.5\ m$

Esfuerzo de fluencia del acero: $fy := 4200\ \frac{kg}{cm^2}$

Promedio de los valores de αf: $\alpha_{fm} := 0.2$
(Asumiendo α_{fm})

Peralte o espesor de la losa maciza o altura de inercia equivalente de losa nervada:

$$h_{min} := \frac{ln \left(0.8 + \frac{fy \cdot \frac{cm^2}{kg}}{14000} \right)}{36} = 19.861\ cm$$

Distancia libre entre nervios (5 veces el ancho del nervio): $L_1 := 50\ cm$ (Suponiendo 10 cm de ancho del nervio)

Espesor de la loseta de compresión:

$$e_{los_c} := \frac{L_1}{12} = 4.167\ cm$$

· Recomendaciones geométricas del ACI con respectos a las losas nervadas.

-Ancho de los nervios deberán ser de al menos 10 cm.

$b_n := 10\ cm$ (Adoptado)

-Peralte de los nervios no deberán ser mayor que tres veces y medio del ancho de estos.

$$h_{n_max} := 3.5 \cdot b_n = 35\ cm$$

$$h_n := 25\ cm \qquad \text{(Adoptado)}$$

-Distancia libre entre nervios (L1) no deberá ser mayor que 75 cm

Se asume un espesor de losa alivianada de 30 cm, donde la loseta de compresión será de un espesor de 5 cm. Los bloques de alivianamientos serán de 20 x 25 x 40 cm.

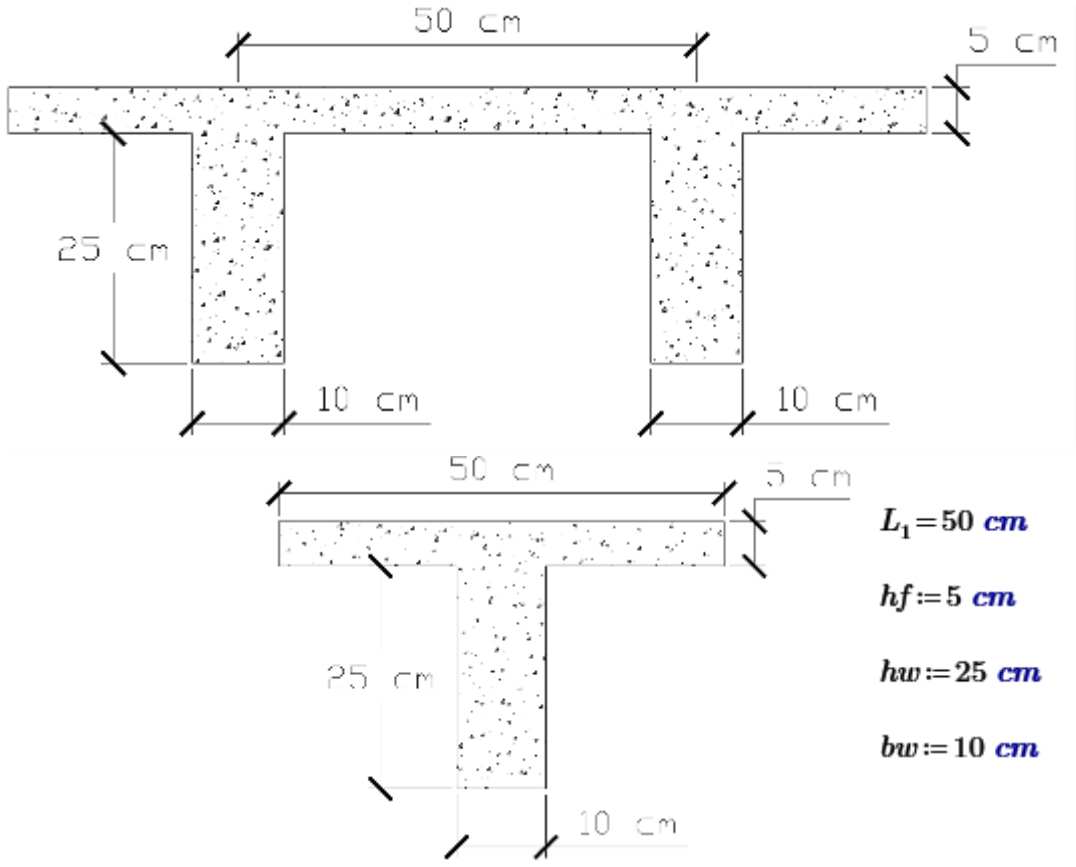


Ilustración 18. Dimensiones de losa alivianada. Fuente: Propia

Cálculo de centro de gravedad de la losa alivianada

$$CG_Y := \frac{L_1 \cdot hf \cdot \left(hw + \frac{hf}{2}\right) + hw \cdot bw \cdot \left(\frac{hw}{2}\right)}{(L_1 \cdot hf) + (bw \cdot hw)} = 20\ cm$$

Cálculo de la inercia

$$I := \frac{L_1 \cdot hf^3}{12} + (L_1 \cdot hf) \cdot \left(hw + \frac{hf}{2} - CG_Y\right)^2 + \frac{bw \cdot hw^3}{12} + (bw \cdot hw) \cdot \left(\frac{hw}{2} - CG_Y\right)^2$$

$$I = 41666.667\ cm^4$$

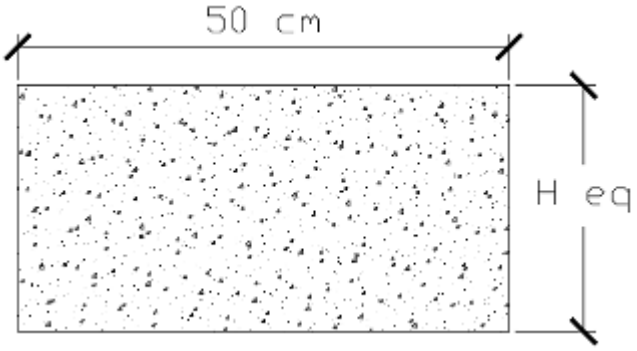


Ilustración 19. Sección de losa de altura equivalente. Fuente: Propia

$$I = \frac{L_1 \cdot h_{eq}^{\ 3}}{12}$$

$$h_{eq} := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I}{L_1}} = 21.544\ cm$$

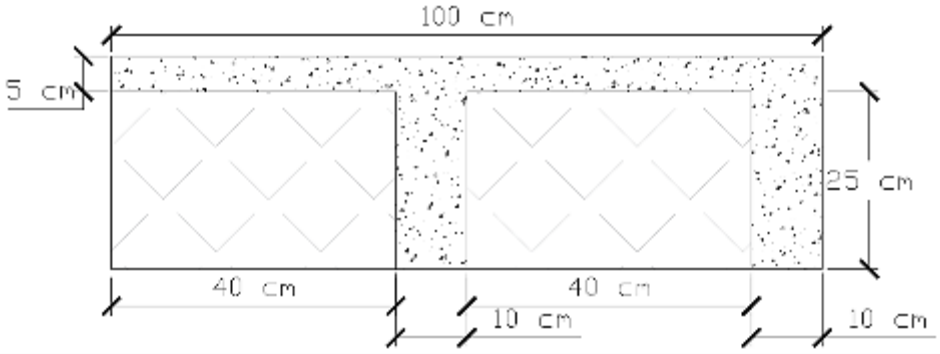
$$Evaluación := \text{if } h_{eq} \geq h_{min} \ \| \ \text{“CUMPLE”} \ \text{else} \ \| \ \text{“NO CUMPLE”}$$

$$Evaluación = \text{“CUMPLE”}$$

$h_{losa} := 30\ cm$ (Adoptado)

3.- Determinación de cargas en la losa

(Se calcula el peso para 1 metro cuadrado de losa)



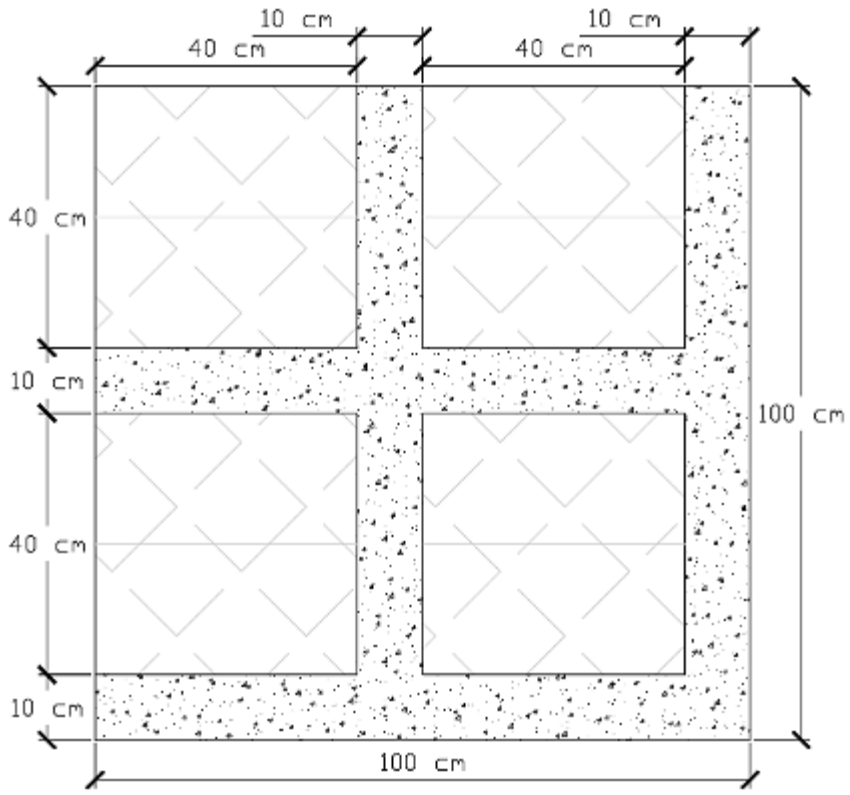


Ilustración 20. Elevación y Planta de losa alivianada. Fuente: Propia

Peso propio de la losa

Longitud total de los nervios: $L_{T_n} := 3.6\ m$

Peso específico del hormigón: $\gamma_{hor} := 2400\ \frac{kg}{m^3}$

Peso de bloque de alivianamiento: $P_{bloque} := 15\ \frac{kg}{m^2}$

$$P_n := bw \cdot hw \cdot L_{T_n} \cdot \gamma_{hor} \cdot \frac{1}{m^2} = 0.216\ \frac{tonne}{m^2}$$

$$P_{los_c} := hf \cdot 1\ m \cdot 1\ m\ \gamma_{hor} \cdot \frac{1}{m^2} = 0.12\ \frac{tonne}{m^2}$$

$$P_{aliv} := 8 \cdot P_{bloque} = 0.12\ \frac{tonne}{m^2}$$

$$PP_{losa} := P_n + P_{los_c} + P_{aliv} = 0.456\ \frac{tonne}{m^2}$$

Carga permanente de la losa

Peso específico del mortero: $\gamma_{mor} := 2200 \frac{kg}{m^3}$

Espesor 2 cm Enlucido + 2 cm Masillado: $e_{en_ma} := 4\ cm$

$$P_{en_ma} := e_{en_ma} \cdot \gamma_{mor} = 0.088 \frac{tonne}{m^2}$$

Recubrimiento piso: $recub := 2\ cm$

$$R_{piso} := recub \cdot \gamma_{mor} = 0.044 \frac{tonne}{m^2}$$

Peso de mampostería (Asumido): $P_{mamp} := 200 \frac{kg}{m^2}$

$$CP := P_{en_ma} + R_{piso} + P_{mamp} = 0.332 \frac{tonne}{m^2}$$

Carga viva (Vivienda) Carga uniforme en unidades de [kN/m2]

$$CV := 0.204 \frac{tonne}{m^2}$$

Residencias	
Viviendas (unifamiliares y bifamiliares)	2.00
Hoteles y residencias multifamiliares	
Habitaciones	2.00
Salones de uso público y sus corredores	4.80

Ilustración 21. Valores de carga viva uniforme. Fuente: NEC-SE-CG

4.- Predimensionamiento de las vigas

Carga viva

$$CV = 0.204 \frac{tonne}{m^2}$$

Peso propio de la losa + Carga permanente

$$PP_{losa} + CP = 0.788 \frac{tonne}{m^2}$$

Peso de las vigas (Asumiendo secciones)

Ancho y Altura de viga dirección X: $b_{bx} := 50\ cm$ $h_{bx} := 70\ cm$

Ancho y Altura de viga dirección Y: $b_{by} := 50\ cm$ $h_{by} := 70\ cm$

Ancho y Altura de vigas secundarias: $b_{bs} := 30\ cm$ $h_{bs} := 50\ cm$

Longitud total del edificio en dirección X: $L_{Tx} := 25.4\ m$

Longitud total del edificio en dirección Y: $L_{Ty} := 36.9\ m$

Número de ejes en dirección X: $n_x := 5$

Número de ejes en dirección Y: $n_y := 6$

$$P_b := \frac{\left(\left(b_{bx} \cdot \left(h_{bx} - h_{losa}\right) \cdot L_{Tx} \cdot n_y\right) + \left(b_{by} \cdot \left(h_{by} - h_{losa}\right) \cdot L_{Ty} \cdot n_x\right) + \left(b_{bs} \cdot \left(h_{bs} - h_{losa}\right) \cdot L_{Ty} \cdot n_x\right)\right) \cdot \gamma_{hor}}{L_{Tx} \cdot L_{Ty}}$$

$$P_b = 0.201\ \frac{tonne}{m^2}$$

Carga muerta (Vigas)

$$CM_b := \left(PP_{losa} + CP\right) + P_b = 0.989\ \frac{tonne}{m^2}$$

Carga última (Wu)

Se considerará una mayoración del 60 % debido a la acción sísmica

$$Wu := 1.6 \cdot \left(1.2 \cdot \left(CM_b\right) + 1.6 \cdot \left(CV\right)\right) = 2.421\ \frac{tonne}{m^2}$$

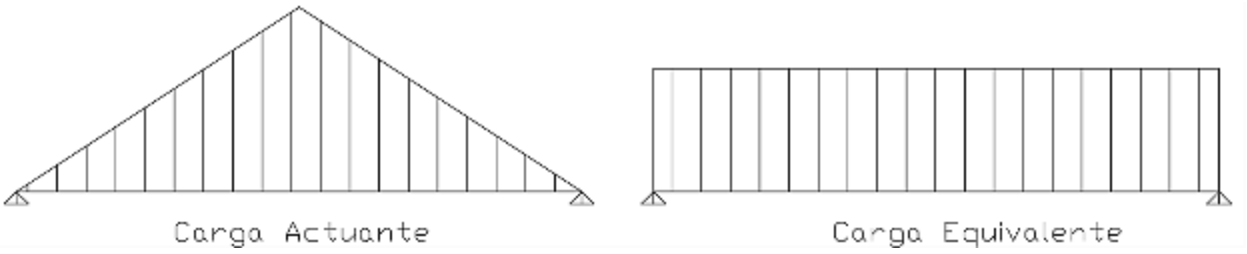


Ilustración 22. Ejemplo de transformación de cargas. Fuente: Propia

Carga triangular a carga uniformemente distribuida $W = \frac{q \cdot s}{3}$

Carga trapezoidal a carga uniformemente distribuida

$$W = \frac{q \cdot s}{3} \cdot \left(\frac{3 - m^2}{2} \right)$$

s: Vano considerado
m: Relación menor/mayor

Vigas del pórtico C

Longitud de los vanos considerados en dirección X e Y

$Lv_1 := 7.8\ m$ $Lv_2 := 7.3\ m$ $Lv_3 := 7.5\ m$ $Lv_4 := 7.2\ m$ $Lv_5 := 7.1\ m$

$L_x := 6.5\ m$

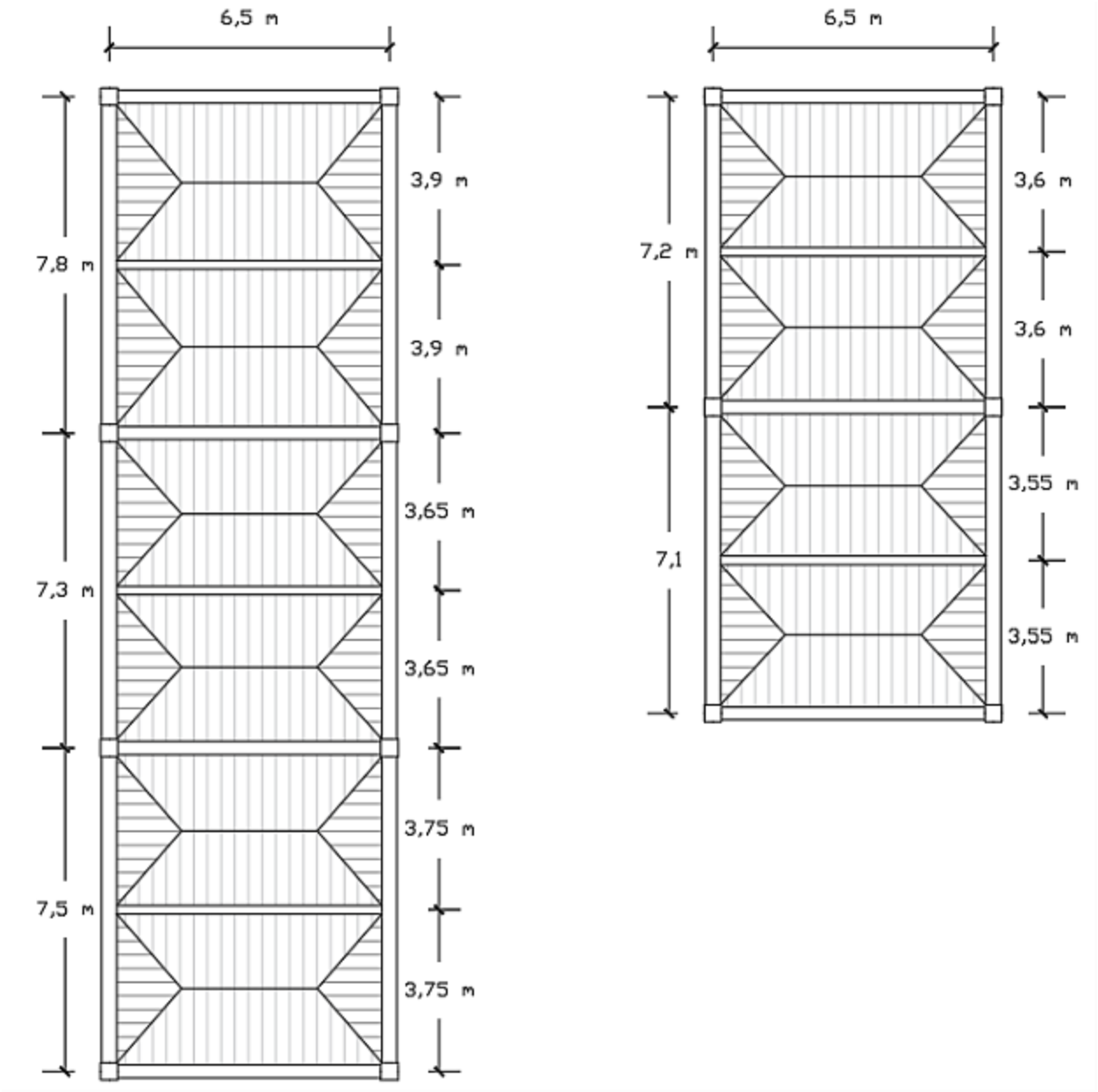


Ilustración 23. Cargas de viga del pórtico C. Fuente: Propia

Cargas triangulares a uniformemente distribuidas

$$W_1 := \frac{Wu \cdot \frac{Lv_1}{2}}{3} = 3.147 \ \frac{tonne}{m} \qquad W_{T1} := 2 \cdot W_1 = 6.294 \ \frac{tonne}{m}$$

$$W_2 := \frac{Wu \cdot \frac{Lv_2}{2}}{3} = 2.945 \ \frac{tonne}{m} \qquad W_{T2} := 2 \cdot W_2 = 5.891 \ \frac{tonne}{m}$$

$$W_3 := \frac{Wu \cdot \frac{Lv_3}{2}}{3} = 3.026 \ \frac{tonne}{m} \qquad W_{T3} := 2 \cdot W_3 = 6.052 \ \frac{tonne}{m}$$

$$W_4 := \frac{Wu \cdot \frac{Lv_4}{2}}{3} = 2.905 \ \frac{tonne}{m} \qquad W_{T4} := 2 \cdot W_4 = 5.81 \ \frac{tonne}{m}$$

$$W_5 := \frac{Wu \cdot \frac{Lv_5}{2}}{3} = 2.865 \ \frac{tonne}{m} \qquad W_{T5} := 2 \cdot W_5 = 5.729 \ \frac{tonne}{m}$$

Cargas trapezoidales a cargas puntuales

$$W_{1p} := W_1 \cdot \left(\frac{3 - \left(\frac{Lv_1}{L_x} \right)^2}{2} \right) \cdot 2 = 4.91 \ \frac{tonne}{m} \qquad W_{T1p} := \frac{W_{1p} \cdot L_x}{2} \cdot 2 = 31.912 \ tonne$$

$$W_{2p} := W_2 \cdot \left(\frac{3 - \left(\frac{Lv_2}{L_x} \right)^2}{2} \right) \cdot 2 = 5.121 \ \frac{tonne}{m} \qquad W_{T2p} := \frac{W_{2p} \cdot L_x}{2} \cdot 2 = 33.288 \ tonne$$

$$W_{3p} := W_3 \cdot \left(\frac{3 - \left(\frac{Lv_3}{L_x} \right)^2}{2} \right) \cdot 2 = 5.05 \ \frac{tonne}{m} \qquad W_{T3p} := \frac{W_{3p} \cdot L_x}{2} \cdot 2 = 32.822 \ tonne$$

$$W_{4p} := W_4 \cdot \left(\frac{3 - \left(\frac{Lv_4}{L_x} \right)^2}{2} \right) \cdot 2 = 5.151 \ \frac{tonne}{m} \qquad W_{T4p} := \frac{W_{4p} \cdot L_x}{2} \cdot 2 = 33.48 \ tonne$$

$$W_{5p} := W_5 \cdot \left(\frac{3 - \left(\frac{Lv_5}{L_x} \right)^2}{2} \right) \cdot 2 = 5.176 \ \frac{tonne}{m} \qquad W_{T5p} := \frac{W_{5p} \cdot L_x}{2} \cdot 2 = 33.645 \ tonne$$

Momento último

Modelo realizado en Sap2000

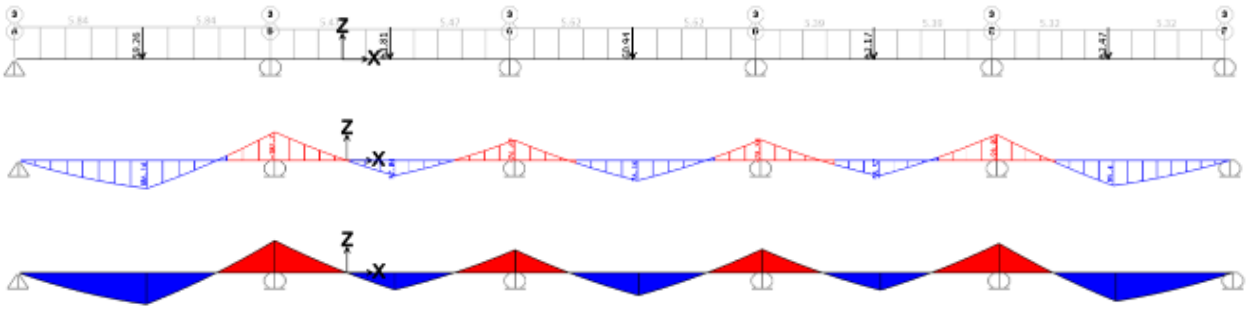


Ilustración 24. Momento último de la viga del pórtico C. Fuente: Propia

$$M_u := 71.68 \ tonne \cdot m$$

Factor β_1 depende de la resistencia característica del hormigón: $\beta_1 := 0.85$

Resistencia característica del hormigón a compresión: $fc := 280 \ \frac{kg}{cm^2}$

Cuantía balanceada

$$p_b := 0.85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{fc}{fy} \cdot \frac{6300}{6300 + \left(fy \cdot \frac{cm^2}{kg} \right)} = 0.0289$$

Cuantía

$$p := 0.5 \cdot p_b = 0.01445$$

Factor de resistencia a flexión Ru

$$R_u := p \cdot fy \cdot \left(1 - 0.588 \cdot \frac{p \cdot fy}{fc} \right) = 52.955 \ \frac{kg}{cm^2}$$

Momento último Mu y Cálculo de la altura de la viga

$$Mu = \phi \cdot Mn$$

$$Mu = \phi \cdot R_u \cdot b \cdot d^2$$

Ancho de viga (Asumido): $b_b := 50\ cm$ $\phi := 0.9$

$$d := \sqrt{\frac{M_u}{\phi \cdot R_u \cdot b_b}} = 54.845\ cm$$

$b_b = 50\ cm$ $h_b := 70\ cm$ (Adoptado para ambas direcciones)

5.- Predimensionamiento de las columnas

$$Pu = 0.8 \cdot \phi \cdot \left[0.85 \cdot fc \cdot \left(A_g - A_s\right) + A_s \cdot fy\right]$$

El acero de refuerzo será: $A_s = 1\% \cdot A_g$ $A_s = 0.01 \cdot A_g$

$$Pu = 0.8 \cdot \phi \cdot \left[0.85 \cdot fc \cdot \left(A_g - 0.01 \cdot A_g\right) + A_s \cdot fy\right]$$

$$Pu = 0.8 \cdot 0.65 \cdot \left[0.85 \cdot 240 \cdot \left(A_g - 0.01 \cdot A_g\right) + 0.01 \cdot A_g \cdot 4200\right]$$

$$Pu = 0.8 \cdot 0.65 \cdot \left[0.85 \cdot 240 \cdot \left(A_g - 0.01 \cdot A_g\right) + 0.01 \cdot A_g \cdot 4200\right]$$

$$Pu = 0.8 \cdot 0.65 \cdot \left[243.96 \cdot A_g\right]$$

$$Pu = 126.8592 \cdot A_g$$

$$A_g = \frac{Pu}{126.8592}$$

Se considera una mayoración del 20 % por acción sísmica y se asume que $\left(1.2 \cdot D + 1.6 \cdot L\right)$ produce una mayoración de 1.4 veces en la carga vertical P.

$$A_g = 1.2 \cdot 1.4 \cdot \frac{Pu}{126.8592}$$

$$A_g = 1.2 \cdot 1.4 \cdot \frac{Pu}{126.8592}$$

$A_g = 14 \cdot P$ (P en toneladas y A_g en cm^2)

Peso propio de la losa + Carga permanente

$$PP_{losa} + CP = 0.788 \ \frac{tonne}{m^2}$$

Peso de las vigas

$$P_b = 0.201 \ \frac{tonne}{m^2}$$

Peso de las columnas (Asumido)

$$P_c := 100 \ \frac{kg}{m^2}$$

Carga muerta (Columnas)

$$CM_c := PP_{losa} + CP + P_b + P_c = 1.089 \ \frac{tonne}{m^2}$$

Carga viva

$$CV = 0.204 \ \frac{tonne}{m^2}$$

Carga última

$$C_c := 1.2 \cdot (CM_c) + 1.6 \cdot (CV) = 1.6331 \ \frac{tonne}{m^2}$$

Cálculo de P

$$P = n_{pisos} \cdot C_c \cdot A_{coop}$$

Columnas (Piso 1, 2 y 3)

EJE	ÁREA COOPERANTE (m2)	P (ton)	Ag (cm2)	Sección		Asumido
				b (cm)	t (cm)	
A1	11.01	107.83	1509.67	65.00	23.23	70x70
A2	22.17	217.19	3040.60	65.00	46.78	70x70
A3	22.79	223.26	3125.66	65.00	48.09	70x70
A4	22.94	224.78	3146.92	65.00	48.41	70x70
A5	23.41	229.34	3210.71	65.00	49.40	70x70
A6	12.09	118.47	1658.51	65.00	25.52	70x70
B1	22.54	220.88	3092.39	65.00	47.58	70x70
B2	45.40	444.88	6228.33	65.00	95.82	70x70
B3	46.67	457.33	6402.55	65.00	98.50	70x70
B4	46.99	460.44	6446.11	65.00	99.17	70x70
B5	47.94	469.77	6576.77	65.00	101.18	70x70
B6	24.77	242.66	3397.27	65.00	52.27	70x70
C1	22.90	224.36	3141.09	65.00	48.32	70x70
C2	46.12	451.89	6326.42	65.00	97.33	70x70
C3	47.41	464.53	6503.38	65.00	100.05	70x70
C4	47.73	467.69	6547.62	65.00	100.73	70x70
C5	48.70	477.17	6680.34	65.00	102.77	70x70
C6	25.16	246.48	3450.77	65.00	53.09	70x70
D1	22.54	220.88	3092.39	65.00	47.58	70x70
D2	45.40	444.88	6228.33	65.00	95.82	70x70
D3	46.67	457.33	6402.55	65.00	98.50	70x70
D4	46.99	460.44	6446.11	65.00	99.17	70x70
D5	47.94	469.77	6576.77	65.00	101.18	70x70
D6	24.77	242.66	3397.27	65.00	52.27	70x70
E1	11.18	109.57	1534.02	65.00	23.60	70x70
E2	22.52	220.69	3089.65	65.00	47.53	70x70
E3	23.15	226.86	3176.07	65.00	48.86	70x70
E4	23.31	228.41	3197.68	65.00	49.20	70x70
E5	23.78	233.04	3262.49	65.00	50.19	70x70
E6	12.29	120.38	1685.26	65.00	25.93	70x70

Tabla 13. Secciones de las columnas pisos 1, 2 y 3. Fuente: Propia

$b_{c1} := 0.7\ m$ $h_{c1} := 0.7\ m$

Columnas (Piso 4, 5 y 6)

EJE	ÁREA COOPERANTE (m2)	P (ton)	Ag (cm2)	Sección		Asumido
				b (cm)	t (cm)	
A1	11.01	53.92	754.84	65.00	11.61	65x65
A2	22.17	108.59	1520.30	65.00	23.39	65x65
A3	22.79	111.63	1562.83	65.00	24.04	65x65
A4	22.94	112.39	1573.46	65.00	24.21	65x65
A5	23.41	114.67	1605.35	65.00	24.70	65x65
A6	12.09	59.23	829.26	65.00	12.76	65x65
B1	22.54	110.44	1546.19	65.00	23.79	65x65
B2	45.40	222.44	3114.17	65.00	47.91	65x65
B3	46.67	228.66	3201.28	65.00	49.25	65x65
B4	46.99	230.22	3223.05	65.00	49.59	65x65
B5	47.94	234.88	3288.39	65.00	50.59	65x65
B6	24.77	121.33	1698.64	65.00	26.13	65x65
C1	22.90	112.18	1570.54	65.00	24.16	65x65
C2	46.12	225.94	3163.21	65.00	48.66	65x65
C3	47.41	232.26	3251.69	65.00	50.03	65x65
C4	47.73	233.84	3273.81	65.00	50.37	65x65
C5	48.70	238.58	3340.17	65.00	51.39	65x65
C6	25.16	123.24	1725.39	65.00	26.54	65x65
D1	22.54	110.44	1546.19	65.00	23.79	65x65
D2	45.40	222.44	3114.17	65.00	47.91	65x65
D3	46.67	228.66	3201.28	65.00	49.25	65x65
D4	46.99	230.22	3223.05	65.00	49.59	65x65
D5	47.94	234.88	3288.39	65.00	50.59	65x65
D6	24.77	121.33	1698.64	65.00	26.13	65x65
E1	11.18	54.79	767.01	65.00	11.80	65x65
E2	22.52	110.34	1544.82	65.00	23.77	65x65
E3	23.15	113.43	1588.03	65.00	24.43	65x65
E4	23.31	114.20	1598.84	65.00	24.60	65x65
E5	23.78	116.52	1631.25	65.00	25.10	65x65
E6	12.29	60.19	842.63	65.00	12.96	65x65

Tabla 14. Secciones de las columnas pisos 4, 5 y 6. Fuente: Propia

$b_{c4} := 0.65\ m$ $h_{c4} := 0.65\ m$

Resumen general de elementos estructurales (Pórticos resistentes a momento)

Altura de la losa:	$h_{losa} = 0.3\ m$	
Ancho y altura de las vigas (Dirección larga):	$b_b = 0.5\ m$	$h_b = 0.7\ m$
Ancho y altura de las vigas (Dirección corta):	$b_b = 0.5\ m$	$h_b = 0.7\ m$
Ancho y altura de las vigas secundarias:	$b_{sb} := 0.3\ m$	$h_{sb} := 0.5\ m$
Ancho y altura de las columnas (Pisos 1, 2 y 3):	$b_{c1} = 0.7\ m$	$h_{c1} = 0.7\ m$
Ancho y altura de las columnas (Pisos 4, 5 y 6):	$b_{c4} = 0.65\ m$	$h_{c4} = 0.65\ m$

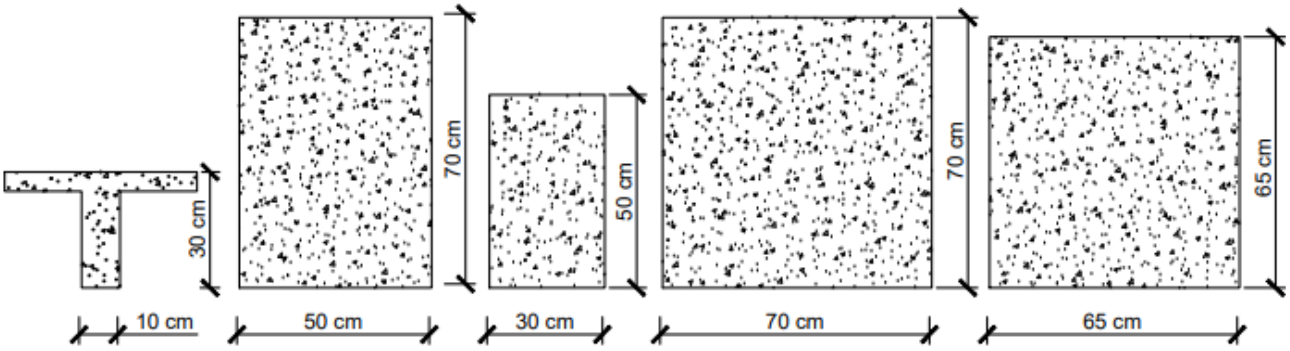


Ilustración 25. Secciones de los elementos de la estructura aporticada. Fuente: Propia

Para las secciones de los elementos estructurales del sistema dual se reducen alrededor de un 30 % las secciones que se presentaron anteriormente en el sistema de pórticos resistentes a momento.

Resumen general de elementos estructurales (Sistema dual)

Ancho y altura de las vigas (Dirección larga):	$b_b := 0.3\ m$	$h_b := 0.4\ m$
Ancho y altura de las vigas (Dirección corta):	$b_b = 0.3\ m$	$h_b = 0.4\ m$
Ancho y altura de las vigas secundarias:	$b_{sb} := 0.25\ m$	$h_{sb} := 0.35\ m$
Ancho y altura de las columnas (Pisos 1, 2 y 3):	$b_{c1} := 0.45\ m$	$h_{c1} := 0.45\ m$
Ancho y altura de las columnas (Pisos 4, 5 y 6):	$b_{c4} := 0.4\ m$	$h_{c4} := 0.4\ m$
Espesor muro de corte:	$e_m := 0.3\ m$	

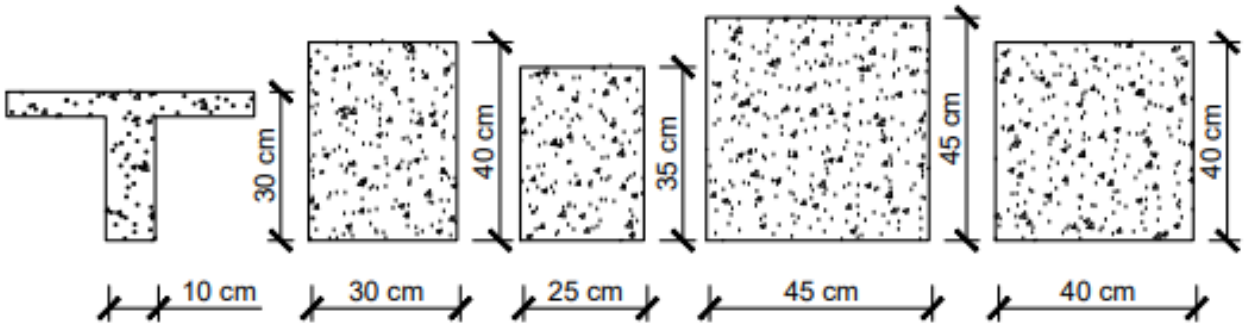


Ilustración 26. Secciones de los elementos de la estructura dual. Fuente: Propia

3.3. Análisis de las estructuras

3.3.1. Pórtico resistente a momento

1.- Período de vibración de la estructura

Coeficientes que depende del tipo de estructura: $C_t := 0.055$

$\alpha := 0.9$

Tipo de estructura	C_t	α
Pórticos especiales de hormigón armado		
Sin muros estructurales ni diagonales rigidizadoras	0.055	0.9
Con muros estructurales o diagonales rigidizadoras y para otras estructuras basadas en muros estructurales y mampostería estructural	0.055	0.75

Tabla 15. Coeficientes C y alfa según el tipo de estructura. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015

Número de pisos: $n := 6$

Altura de entrepiso: $h := 3.24\ m$

Altura de la estructura: $h_n := n \cdot h = 19.44\ m$

Período de vibración de la estructura

$$T := C_t \cdot \left(h_n \cdot \frac{1}{m} \right)^{\alpha} \cdot s = 0.79467\ s$$

2.- Coeficiente del cortante basal

Importancia de la estructura: $I := 1$

Factor de reducción de resistencia sísmica: $R := 8$

Coeficiente de configuración en planta: $\phi_p := 1$

Coeficiente de configuración en elevación: $\phi_e := 1$

Espectro elástico en aceleración (Datos)

Región, Tipo de suelo y Zona sísmica: Sierra, Tipo D y Zona V

Factor de zona sísmica $Z := 0.4$

Coeficiente de perfil de suelo $F_a := 1.2$ $F_d := 1.19$ $F_s := 1.28$

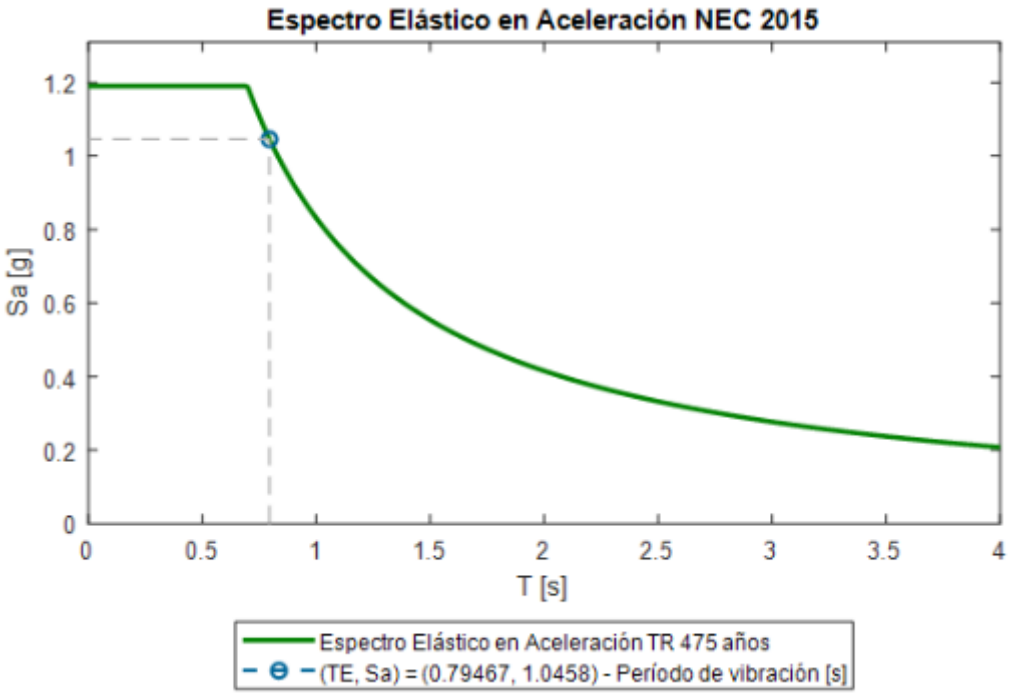


Ilustración 27. Espectro elástico en aceleración NEC 2015. Fuente: Propia

Pseudo aceleración espectral para el período de vibración de la estructura:

$Sa := 1.0458$

(Se toma del espectro de respuesta en aceleración elástica)

$$Coef := \frac{I \cdot Sa}{R \cdot \phi_p \cdot \phi_e} = 0.13073$$

3.- Coeficiente k

Valores de T (s)	k
≤ 0.5	1
0.5 < T ≤ 2.5	0.75 + 0.50 T
> 2.5	2

Tabla 16. Valores de factor K. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015

$$k := \begin{cases} 1 & \text{if } T \cdot \frac{1}{s} \le 0.5 \\ 0.75 + 0.5 \cdot \left(T \cdot \frac{1}{s}\right) & \text{else if } 0.5 < T \cdot \frac{1}{s} \le 2.5 \\ 2 & \text{else if } T \cdot \frac{1}{s} > 2.5 \end{cases} = 1.1473$$

4.- Corrección del cortante basal

El valor del cortante basal dinámico no debe ser menor que el 80 % del cortante basal estático para estructuras regulares.

Output Case	Case Type	Step Type	FX tonf	FY tonf
Sismo X	LinStatic		-803.7962	0
Sismo Y	LinStatic		0	-803.7962
Dinámico X	LinRespSpec	Max	624.6895	0.1965
Dinámico Y	LinRespSpec	Max	0.1965	580.4804
Dinámico XY	LinRespSpec	Max	624.6896	580.4804

Tabla 17. Cortante basal estático y dinámico. Fuente: Propia

Cortante basal estático: $V_{est} := 803.7962\ tonne$

Cortante basal dinámico X: $V_{dinx} := 624.6895\ tonne$

Cortante basal dinámico Y: $V_{diny} := 580.4804\ tonne$

Factores de corrección del cortante basal

$$fx := \frac{V_{est} \cdot 0.8}{V_{dinx}} = 1.029371 \qquad fy := \frac{V_{est} \cdot 0.8}{V_{diny}} = 1.107767$$

Output Case	Case Type	Step Type	FX tonf	FY tonf
Sismo X	LinStatic		-803.7962	0
Sismo Y	LinStatic		0	-803.7962
Dinámico X	LinRespSpec	Max	643.0354	0.2023
Dinámico Y	LinRespSpec	Max	0.2177	643.0373
Dinámico XY	LinRespSpec	Max	643.0373	643.0374

Tabla 18. Cortante basal corregido. Fuente: Propia

Cortante basal dinámico: $V_{din} := 643.03\ tonne$

$$Evaluación := \text{if } V_{din} < 0.8 \cdot V_{est} \ \| \ \text{“CUMPLE”} \ \text{else} \ \| \ \text{“NO CUMPLE”}$$

$Evaluación = \text{“CUMPLE”}$

Peso de la estructura: $We := 6148.52175\ tonne$

3.3.2. Sistema dual

1.- Período de vibración de la estructura

Coeficientes que depende del tipo de estructura: $C_t := 0.055$

$\alpha := 0.75$

Tipo de estructura	C_t	α
Pórticos especiales de hormigón armado		
Sin muros estructurales ni diagonales rigidizadoras	0.055	0.9
Con muros estructurales o diagonales rigidizadoras y para otras estructuras basadas en muros estructurales y mampostería estructural	0.055	0.75

Tabla 19. Coeficientes C y alfa según el tipo de estructura. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015

Número de pisos: $n := 6$

Altura de entrepiso: $h := 3.24\ m$

Altura de la estructura: $h_n := n \cdot h = 19.44\ m$

Período de vibración de la estructura

$$T := C_t \cdot \left(h_n \cdot \frac{1}{m}\right)^{\alpha} \cdot s = 0.5092\ s$$

2.- Coeficiente del cortante basal

Importancia de la estructura: $I := 1$

Factor de reducción de resistencia sísmica: $R := 8$

Coeficiente de configuración en planta: $\phi_p := 1$

Coeficiente de configuración en elevación: $\phi_e := 1$

Espectro elástico en aceleración (Datos)

Región, Tipo de suelo y Zona sísmica: Sierra, Tipo D y Zona V

Factor de zona sísmica $Z := 0.4$

Coeficiente de perfil de suelo $F_a := 1.2$ $F_d := 1.19$

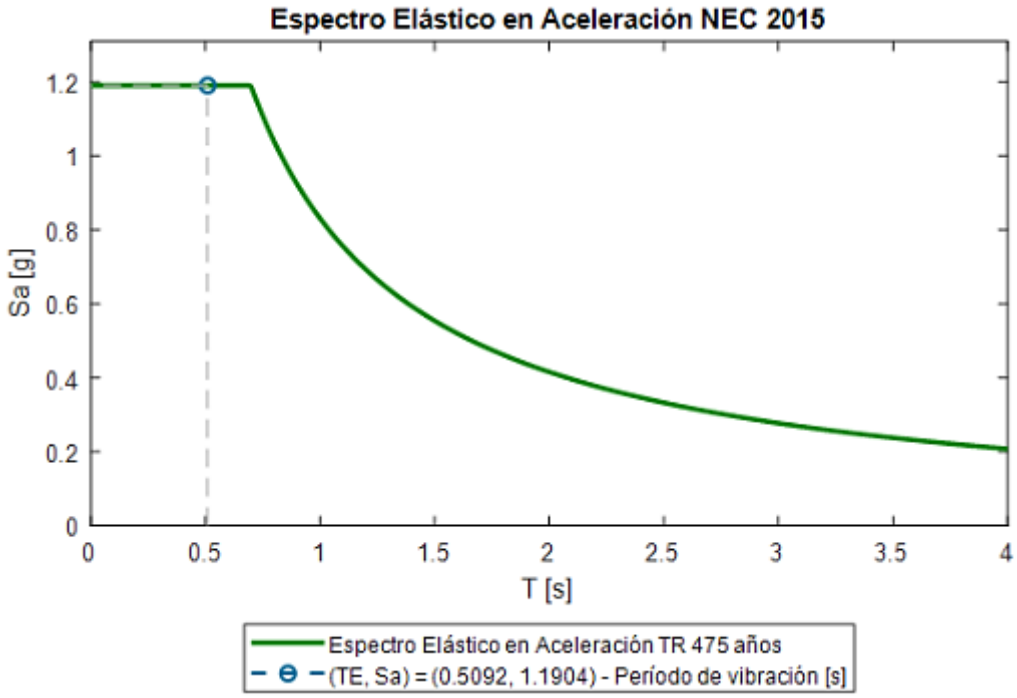


Ilustración 28. Espectro elástico en aceleración NEC 2015. Fuente: Propia

Pseudo aceleración espectral para el período de vibración de la estructura: $Sa := 1.1904$

(Se toma del espectro de respuesta en aceleración elástica)

$$Coef := \frac{I \cdot Sa}{R \cdot \phi_p \cdot \phi_e} = 0.1488$$

3.- Coeficiente k

Valores de T (s)	k
≤ 0.5	1
0.5 < T ≤ 2.5	0.75 + 0.50 T
> 2.5	2

Tabla 20. Valores de factor K. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015

$$k := \begin{cases} 1 & \text{if } T \cdot \frac{1}{s} \le 0.5 \\ 0.75 + 0.5 \cdot \left(T \cdot \frac{1}{s}\right) & \text{else if } 0.5 < T \cdot \frac{1}{s} \le 2.5 \\ 2 & \text{else if } T \cdot \frac{1}{s} > 2.5 \end{cases} = 1.0046$$

4.- Corrección del cortante basal

El valor del cortante basal dinámico no debe ser menor que el 80 % del cortante basal estático para estructuras regulares.

Output Case	Case Type	Step Type	FX tonf	FY tonf
Sismo X	LinStatic		-757.3614	0
Sismo Y	LinStatic		0	-757.3614
Dinámico X	LinRespSpec	Max	550.4082	0.1377
Dinámico Y	LinRespSpec	Max	0.1377	549.1836
Dinámico XY	LinRespSpec	Max	550.4082	549.1836

Tabla 21. Cortante basal estático y dinámico. Fuente: Propia

Cortante basal estático: $V_{est} := 757.3614\ tonne$

Cortante basal dinámico X: $V_{dinx} := 550.4082\ tonne$

Cortante basal dinámico Y: $V_{diny} := 549.1836\ tonne$

Factores de corrección del cortante basal

$$fx := \frac{V_{est} \cdot 0.8}{V_{dinx}} = 1.1008 \qquad fy := \frac{V_{est} \cdot 0.8}{V_{diny}} = 1.103254$$

Output Case	Case Type	Step Type	FX tonf	FY tonf
Sismo X	LinStatic		-757.3614	0
Sismo Y	LinStatic		0	-757.3614
Dinámico X	LinRespSpec	Max	605.8867	0.1516
Dinámico Y	LinRespSpec	Max	0.1519	605.8878
Dinámico XY	LinRespSpec	Max	605.8894	605.8878

Tabla 22. Cortante basal corregido. Fuente: Propia

Cortante basal dinámico: $V_{din} := 605.88\ tonne$

$$Evaluación := \text{if } V_{din} < 0.8 \cdot V_{est} \text{ "CUMPLE" else "NO CUMPLE"} \qquad Evaluación = \text{"CUMPLE"}$$

Peso de la estructura: $We := 5089.79416\ tonne$

3.3.3. Análisis empleando DBF

3.3.3.1. Procesamiento de resultados empleando rutinas de Matlab

3.3.3.1.1. Pórtico Resistente a Momento

CORTANTE DE PISO, DESPLAZAMIENTO Y DERIVAS PÓRTICOS RESISTENTES A MOMENTO

```
clc
clear
close all
```

IMPORTACIÓN DATOS EXCEL

```
Vdinx=readmatrix('Story_Shears_DBF_P.xlsx','sheet',"Dinámico X");
Vdiny=readmatrix('Story_Shears_DBF_P.xlsx','sheet',"Dinámico Y");
Vsx=readmatrix('Story_Shears_DBF_P.xlsx','sheet',"Estático X");
Vsy=readmatrix('Story_Shears_DBF_P.xlsx','sheet',"Estático Y");

Disdinx=readmatrix('Displacement_DBF_P.xlsx','sheet',"Dinámico X");
Disdiny=readmatrix('Displacement_DBF_P.xlsx','sheet',"Dinámico Y");
Dissx=readmatrix('Displacement_DBF_P.xlsx','sheet',"Estático X");
Dissy=readmatrix('Displacement_DBF_P.xlsx','sheet',"Estático Y");

Dridinx=readmatrix('Drifts_DBF_P.xlsx','sheet',"Dinámico X");
Dridiny=readmatrix('Drifts_DBF_P.xlsx','sheet',"Dinámico Y");
Drisx=readmatrix('Drifts_DBF_P.xlsx','sheet',"Estático X");
Drisy=readmatrix('Drifts_DBF_P.xlsx','sheet',"Estático Y");
```

DATOS

```
R=8; %Factor de reducción de resistencia sísmica
F=0.75; %Factor de conversión
```

CORTANTE DE PISO

Coordenadas en Y (Altura)

```
CoordY=Vdinx(:,2);
CoordY(isnan(CoordY))=0;
Aux=Vdinx(3:end,2);
Aux(isnan(Aux))=0;
Aux=[0;Aux;0];
Coord_Y=CoordY+Aux; %Altura [m]
```

Coordenadas en X (Cortante por piso)

```
Vdinx_x=Vdinx(:,4); %Cortante [T] dinámico X en dirección X
Vdinx_y=Vdinx(:,5); %Cortante [T] dinámico X en dirección Y
Vdiny_x=Vdiny(:,4)*-1; %Cortante [T] dinámico Y en dirección X
Vdiny_y=Vdiny(:,5)*-1; %Cortante [T] dinámico Y en dirección Y
Vsx_x=Vsx(:,4)*-1; %Cortante [T] estático X en dirección X
Vsx_y=Vsx(:,5)*-1; %Cortante [T] estático X en dirección Y
Vsy_x=Vsy(:,4); %Cortante [T] estático Y en dirección X
Vsy_y=Vsy(:,5); %Cortante [T] estático Y en dirección Y
```

Gráfico

```
figure()
hold on
box on
subplot(1,2,1)
plot(Vdinx_x,Coord_Y,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Vdinx_y,Coord_Y,'-x','color',[0.6 0.6 0.6],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Vdiny_x,Coord_Y,'-x','color',[0.1 0.1 0.1],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Vdiny_y,Coord_Y,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
xlim([-750 750])
xlabel('Cortante [T]')
ylabel('Altura [m]')
title('Cortante de Piso')
legend('Dinámico X (Dirección X)','Dinámico X (Dirección Y)','Dinámico Y
(Dirección X)','Dinámico Y (Dirección Y)','location','southoutside')
grid on
subplot(1,2,2)
plot(Vsx_x,Coord_Y,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Vsx_y,Coord_Y,'-x','color',[0.6 0.6 0.6],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Vsy_x,Coord_Y,'-x','color',[0.1 0.1 0.1],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Vsy_y,Coord_Y,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
xlabel('Cortante [T]')
ylabel('Altura [m]')
title('Cortante de Piso')
legend('Estático X (Dirección X)','Estático X (Dirección Y)','Estático Y
(Dirección X)','Estático Y (Dirección Y)','location','southoutside')
grid on
fig=gcf;
```

```
fig.Units='normalized';
set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
set(gcf,'Visible','on')
hold off
```

DESPLAZAMIENTO INELÁSTICO

Coordenadas en Y (Altura)

```
Coord_YD=Disdinx(:,2); %Altura [m]
```

Coordenadas en X (Desplazamiento inelástico)

```
Disdinx_x=Disdinx(:,4)*R*100;  %Desplazamiento [cm] Dinámico X en dirección X
Disdinx_y=Disdinx(:,5)*R*100; %Desplazamiento [cm] Dinámico X en dirección Y
Disdiny_x=Disdiny(:,4)*R*-1*100; %Desplazamiento [cm] Dinámico Y en dirección X
Disdiny_y=Disdiny(:,5)*R*-1*100; %Desplazamiento [cm] Dinámico Y en dirección Y
Dissx_x=Dissx(:,4)*R*100; %Desplazamiento [cm] Estático X en dirección X
Dissx_y=Dissx(:,5)*R*100; %Desplazamiento [cm] Estático X en dirección Y
Dissy_x=Dissy(:,4)*R*-1*100; %Desplazamiento [cm] Estático Y en dirección X
Dissy_y=Dissy(:,5)*R*-1*100; %Desplazamiento [cm] Estático Y en dirección Y
```

Gráfico

```
figure()
hold on
box on
subplot(1,2,1)
plot(Disdinx_x,Coord_YD,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Disdinx_y,Coord_YD,'-x','color',[0.6 0.6 0.6],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Disdiny_x,Coord_YD,'-x','color',[0.1 0.1 0.1],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Disdiny_y,Coord_YD,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
xlim([-40 40])
xlabel('Desplazamiento [cm]')
ylabel('Altura [m]')
title('Desplazamiento Inelástico')
legend('Dinámico X (Dirección X)','Dinámico X (Dirección Y)','Dinámico Y
(Dirección X)','Dinámico Y (Dirección Y)','location','southoutside')
grid on
subplot(1,2,2)
plot(Dissx_x,Coord_YD,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Dissx_y,Coord_YD,'-x','color',[0.6 0.6 0.6],'LineWidth',1.5)
```

```
hold on
plot(Dissy_x,Coord_YD,'-x','color',[0.1 0.1 0.1],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Dissy_y,Coord_YD,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
xlim([-40 40])
xlabel('Desplazamiento [cm]')
ylabel('Altura [m]')
title('Desplazamiento Inelástico')
legend('Estático X (Dirección X)','Estático X (Dirección Y)','Estático Y
(Dirección X)','Estático Y (Dirección Y)','location','southoutside')
grid on
fig=gcf;
fig.Units='normalized';
set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
set(gcf,'Visible','on')
hold off
```

DERIVA INELÁSTICA

Coordenadas en Y (Altura)

```
Coord_YDr=Dridinx(:,2); %Altura [m]
```

Coordenadas en X (Deriva inelástica)

```
Dridinx_x=Dridinx(:,4)*R*100*F;  %Deriva [%] Dinámico X en dirección X
Dridinx_y=Dridinx(:,5)*R*100*F; %Deriva [%] Dinámico X en dirección Y
Dridiny_x=Dridiny(:,4)*R*-1*100*F; %Deriva [%] Dinámico Y en dirección X
Dridiny_y=Dridiny(:,5)*R*-1*100*F; %Deriva [%] Dinámico Y en dirección Y
Drisx_x=Drisx(:,4)*R*100*F; %Deriva [%] Estático X en dirección X
Drisx_y=Drisx(:,5)*R*100*F; %Deriva [%] Estático X en dirección Y
Drisy_x=Drisy(:,4)*R*-1*100*F; %Deriva [%] Estático Y en dirección X
Drisy_y=Drisy(:,5)*R*-1*100*F; %Deriva [%] Estático Y en dirección Y
```

Gráfico

```
figure()
hold on
box on
subplot(1,2,1)
plot(Dridinx_x,Coord_YDr,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Dridinx_y,Coord_YDr,'-x','color',[0.6 0.6 0.6],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Dridiny_x,Coord_YDr,'-x','color',[0.1 0.1 0.1],'LineWidth',1.5)
hold on
```

```
 plot(Dridiny_y,Coord_YDr,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
 xlim([-2 2])
 xlabel('Deriva de piso [%]')
 ylabel('Altura [m]')
 title('Deriva Inelástica')
 legend('Dinámico X (Dirección X)','Dinámico X (Dirección Y)','Dinámico Y
(Dirección X)','Dinámico Y (Dirección Y)','location','southoutside')
 grid on
 subplot(1,2,2)
 plot(Drisx_x,Coord_YDr,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
 hold on
 plot(Drisx_y,Coord_YDr,'-x','color',[0.6 0.6 0.6],'LineWidth',1.5)
 hold on
 plot(Drisy_x,Coord_YDr,'-x','color',[0.1 0.1 0.1],'LineWidth',1.5)
 hold on
 plot(Drisy_y,Coord_YDr,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
 xlim([-2 2])
 xlabel('Deriva de piso [%]')
 ylabel('Altura [m]')
 title('Deriva Inelástica')
 legend('Estático X (Dirección X)','Estático X (Dirección Y)','Estático Y
(Dirección X)','Estático Y (Dirección Y)','location','southoutside')
 grid on
 fig=gcf;
 fig.Units='normalized';
 set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
 set(gcf,'Visible','on')
 hold off
```

3.3.3.1.2. Sistema Dual

CORTANTE DE PISO, DESPLAZAMIENTO Y DERIVAS SISTEMA DUAL

```
 clc
 clear
 close all
```

IMPORTACIÓN DATOS EXCEL

```
 Vdinx=readmatrix('Story_Shears_DBF_M.xlsx','sheet',"Dinámico X");
 Vdiny=readmatrix('Story_Shears_DBF_M.xlsx','sheet',"Dinámico Y");
 Vsx=readmatrix('Story_Shears_DBF_M.xlsx','sheet',"Estático X");
 Vsy=readmatrix('Story_Shears_DBF_M.xlsx','sheet',"Estático Y");
```

```
Disdinx=readmatrix('Displacement_DBF_M.xlsx','sheet',"Dinámico X");
Disdiny=readmatrix('Displacement_DBF_M.xlsx','sheet',"Dinámico Y");
Dissx=readmatrix('Displacement_DBF_M.xlsx','sheet',"Estático X");
Dissy=readmatrix('Displacement_DBF_M.xlsx','sheet',"Estático Y");

Dridinx=readmatrix('Drifts_DBF_M.xlsx','sheet',"Dinámico X");
Dridiny=readmatrix('Drifts_DBF_M.xlsx','sheet',"Dinámico Y");
Drisx=readmatrix('Drifts_DBF_M.xlsx','sheet',"Estático X");
Drisy=readmatrix('Drifts_DBF_M.xlsx','sheet',"Estático Y");
```

DATOS

```
R=8; %Factor de reducción de resistencia sísmica
F=0.75; %Factor de conversión
```

CORTANTE DE PISO

Coordenadas en Y (Altura)

```
CoordY=Vdinx(:,2);
CoordY(isnan(CoordY))=0;
Aux=Vdinx(3:end,2);
Aux(isnan(Aux))=0;
Aux=[0;Aux;0];
Coord_Y=CoordY+Aux; %Altura [m]
```

Coordenadas en X (Cortante por piso)

```
Vdinx_x=Vdinx(:,4); %Cortante [T] dinámico X en dirección X
Vdinx_y=Vdinx(:,5); %Cortante [T] dinámico X en dirección Y
Vdiny_x=Vdiny(:,4)*-1; %Cortante [T] dinámico Y en dirección X
Vdiny_y=Vdiny(:,5)*-1; %Cortante [T] dinámico Y en dirección Y
Vsx_x=Vsx(:,4)*-1; %Cortante [T] estático X en dirección X
Vsx_y=Vsx(:,5)*-1; %Cortante [T] estático X en dirección Y
Vsy_x=Vsy(:,4); %Cortante [T] estático Y en dirección X
Vsy_y=Vsy(:,5); %Cortante [T] estático Y en dirección Y
```

Gráfico

```
figure()
hold on
box on
subplot(1,2,1)
plot(Vdinx_x,Coord_Y,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
hold on
```

```
 plot(Vdinx_y,Coord_Y,'-x','color',[0.6 0.6 0.6],'LineWidth',1.5)
 hold on
 plot(Vdiny_x,Coord_Y,'-x','color',[0.1 0.1 0.1],'LineWidth',1.5)
 hold on
 plot(Vdiny_y,Coord_Y,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
 xlim([-750 750])
 xlabel('Cortante [T]')
 ylabel('Altura [m]')
 title('Cortante de Piso')
 legend('Dinámico X - Dirección X','Dinámico X - Dirección Y','Dinámico Y -
Dirección X','Dinámico Y - Dirección Y','location','southoutside')
 grid on
 subplot(1,2,2)
 plot(Vsx_x,Coord_Y,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
 hold on
 plot(Vsx_y,Coord_Y,'-x','color',[0.6 0.6 0.6],'LineWidth',1.5)
 hold on
 plot(Vsy_x,Coord_Y,'-x','color',[0.1 0.1 0.1],'LineWidth',1.5)
 hold on
 plot(Vsy_y,Coord_Y,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
 xlabel('Cortante [T]')
 ylabel('Altura [m]')
 title('Cortante de Piso')
 legend('Estático X - Dirección X','Estático X - Dirección Y','Estático Y -
Dirección X','Estático Y - Dirección Y','location','southoutside')
 grid on
 fig=gcf;
 fig.Units='normalized';
 set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
 set(gcf,'Visible','on')
 hold off
```

DESPLAZAMIENTO INELÁSTICO

Coordenadas en Y (Altura)

```
 Coord_YD=Disdinx(:,2); %Altura [m]
```

Coordenadas en X (Desplazamiento inelástico)

```
 Disdinx_x=Disdinx(:,4)*R*100;  %Desplazamiento [cm] Dinámico X en dirección X
 Disdinx_y=Disdinx(:,5)*R*100; %Desplazamiento [cm] Dinámico X en dirección Y
 Disdiny_x=Disdiny(:,4)*R*-1*100; %Desplazamiento [cm] Dinámico Y en dirección X
 Disdiny_y=Disdiny(:,5)*R*-1*100; %Desplazamiento [cm] Dinámico Y en dirección Y
 Dissx_x=Dissx(:,4)*R*100; %Desplazamiento [cm] Estático X en dirección X
 Dissx_y=Dissx(:,5)*R*100; %Desplazamiento [cm] Estático X en dirección Y
```

```
Dissy_x=Dissy(:,4)*R*-1*100; %Desplazamiento [cm] Estático Y en dirección X
Dissy_y=Dissy(:,5)*R*-1*100; %Desplazamiento [cm] Estático Y en dirección Y
```

Gráfico

```
figure()
hold on
box on
subplot(1,2,1)
plot(Disdinx_x,Coord_YD,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Disdinx_y,Coord_YD,'-x','color',[0.6 0.6 0.6],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Disdiny_x,Coord_YD,'-x','color',[0.1 0.1 0.1],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Disdiny_y,Coord_YD,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
xlim([-30 30])
xlabel('Desplazamiento [cm]')
ylabel('Altura [m]')
title('Desplazamiento Inelástico')
legend('Dinámico X - Dirección X','Dinámico X - Dirección Y','Dinámico Y -
Dirección X','Dinámico Y - Dirección Y','location','southoutside')
grid on
subplot(1,2,2)
plot(Dissx_x,Coord_YD,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Dissx_y,Coord_YD,'-x','color',[0.6 0.6 0.6],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Dissy_x,Coord_YD,'-x','color',[0.1 0.1 0.1],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Dissy_y,Coord_YD,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
xlim([-30 30])
xlabel('Desplazamiento [cm]')
ylabel('Altura [m]')
title('Desplazamiento Inelástico')
legend('Estático X - Dirección X','Estático X - Dirección Y','Estático Y -
Dirección X','Estático Y - Dirección Y','location','southoutside')
grid on
fig=gcf;
fig.Units='normalized';
set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
set(gcf,'Visible','on')
hold off
```

DERIVA INELÁSTICA

Coordenadas en Y (Altura)

```
Coord_YDr=Dridinx(:,2); %Altura [m]
```

Coordenadas en X (Deriva inelástica)

```
Dridinx_x=Dridinx(:,4)*R*100*F;  %Deriva [%] Dinámico X en dirección X
Dridinx_y=Dridinx(:,5)*R*100*F; %Deriva [%] Dinámico X en dirección Y
Dridiny_x=Dridiny(:,4)*R*-1*100*F; %Deriva [%] Dinámico Y en dirección X
Dridiny_y=Dridiny(:,5)*R*-1*100*F; %Deriva [%] Dinámico Y en dirección Y
Drisx_x=Drisx(:,4)*R*100*F; %Deriva [%] Estático X en dirección X
Drisx_y=Drisx(:,5)*R*100*F; %Deriva [%] Estático X en dirección Y
Drisy_x=Drisy(:,4)*R*-1*100*F; %Deriva [%] Estático Y en dirección X
Drisy_y=Drisy(:,5)*R*-1*100*F; %Deriva [%] Estático Y en dirección Y
```

Gráfico

```
figure()
hold on
box on
subplot(1,2,1)
plot(Dridinx_x,Coord_YDr,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Dridinx_y,Coord_YDr,'-x','color',[0.6 0.6 0.6],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Dridiny_x,Coord_YDr,'-x','color',[0.1 0.1 0.1],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Dridiny_y,Coord_YDr,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
xlim([-2 2])
xlabel('Deriva de piso [%]')
ylabel('Altura [m]')
title('Deriva Inelástica')
legend('Dinámico X - Dirección X','Dinámico X - Dirección Y','Dinámico Y -
Dirección X','Dinámico Y - Dirección Y','location','southoutside')
grid on
subplot(1,2,2)
plot(Drisx_x,Coord_YDr,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Drisx_y,Coord_YDr,'-x','color',[0.6 0.6 0.6],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Drisy_x,Coord_YDr,'-x','color',[0.1 0.1 0.1],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(Drisy_y,Coord_YDr,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
xlim([-2 2])
xlabel('Deriva de piso [%]')
ylabel('Altura [m]')
```

```
 title('Deriva Inelástica')
 legend('Estático X - Dirección X','Estático X - Dirección Y','Estático Y -
Dirección X','Estático Y - Dirección Y','location','southoutside')
 grid on
 fig=gcf;
 fig.Units='normalized';
 set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
 set(gcf,'Visible','on')
 hold off
```

3.3.3.2. Presentación de resultados (Pórticos resistentes a momento)

- Cortante basal

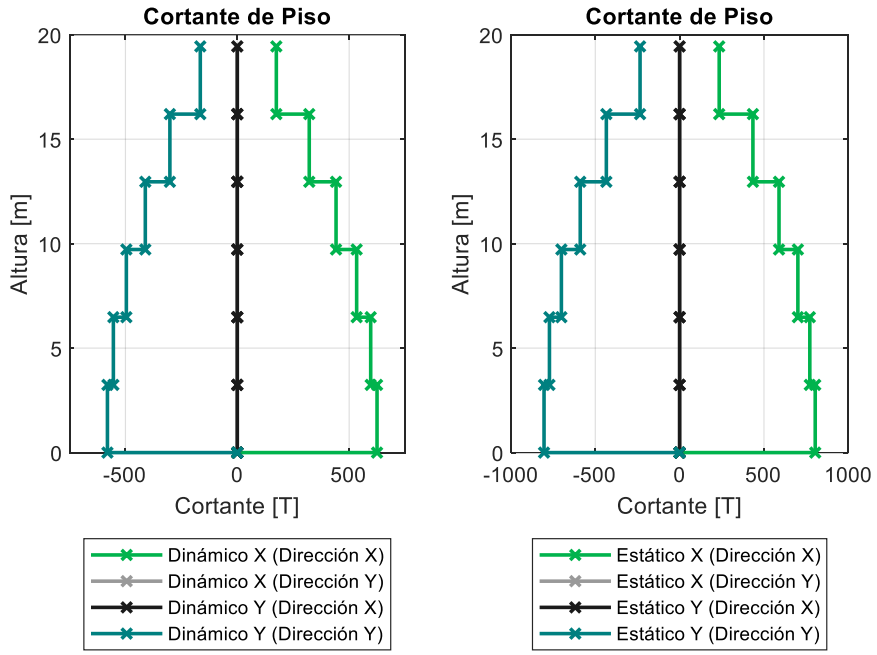


Ilustración 29. Cortante de piso pórticos resistentes a momento. Fuente: Propia

- Desplazamiento

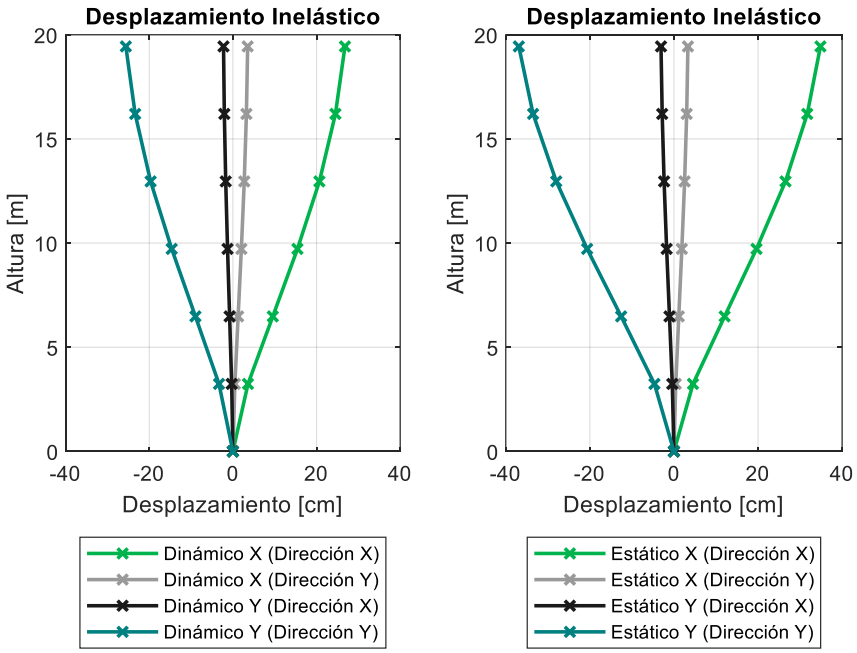


Ilustración 30. Desplazamiento inelástico pórticos resistentes a momento. Fuente: Propia

- Deriva de piso

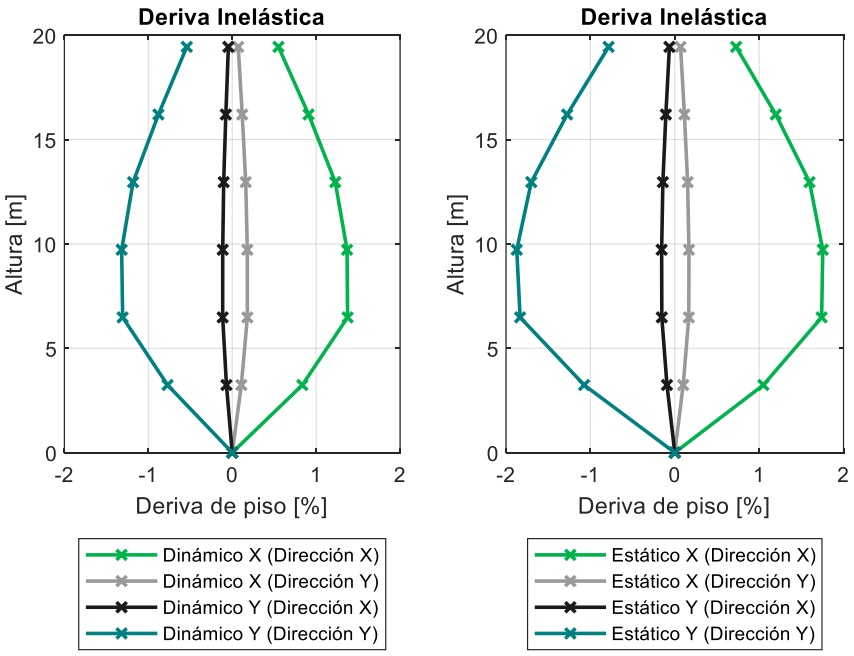


Ilustración 31. Deriva inelástica pórticos resistentes a momento. Fuente: Propia

3.3.3.3. Presentación de resultados (Sistema dual)

- Cortante basal

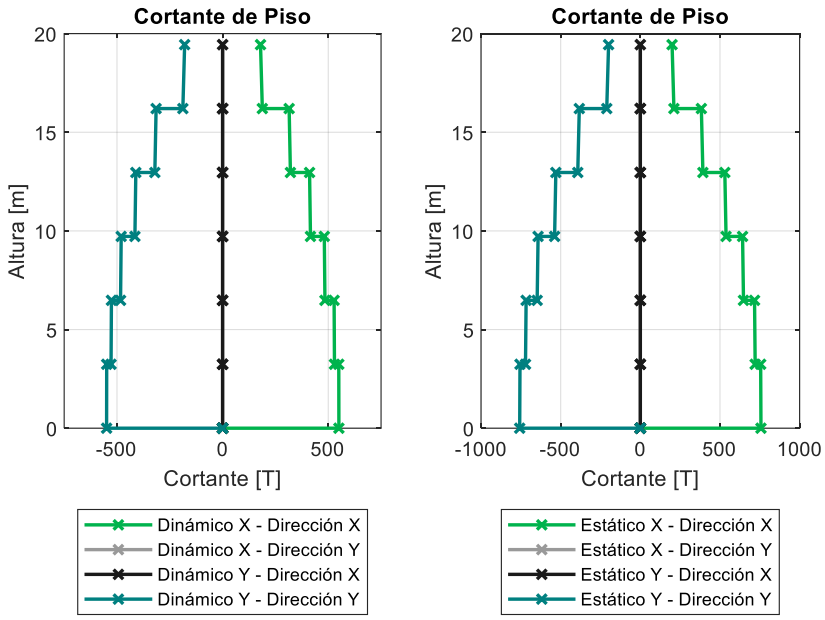


Ilustración 32. Cortante de piso sistema dual. Fuente: Propia

- Desplazamiento

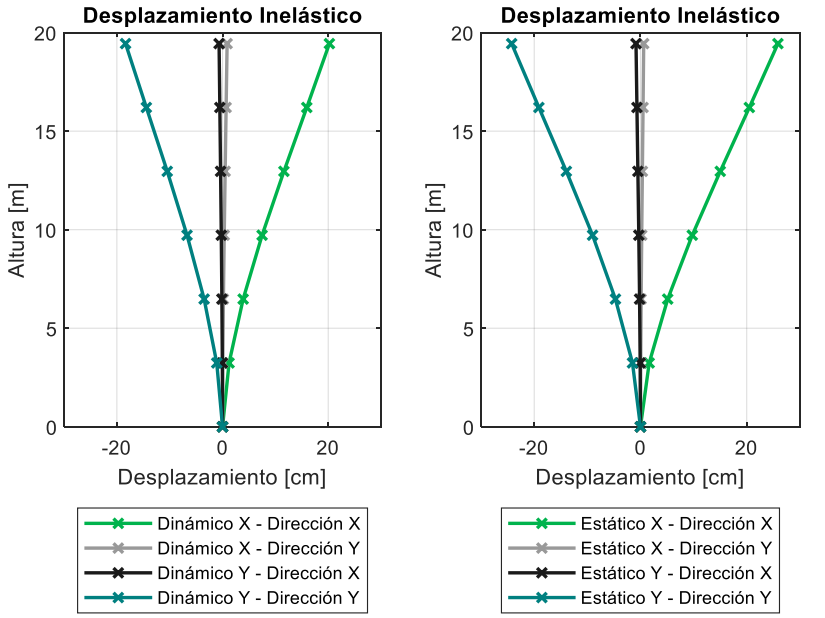


Ilustración 33. Desplazamiento inelástico sistema dual. Fuente: Propia

- Deriva de piso

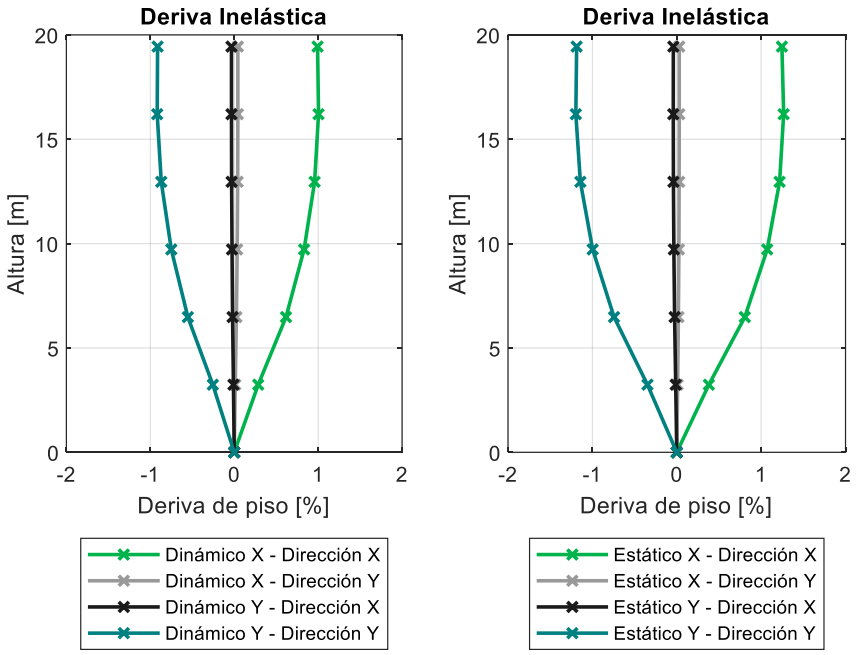


Ilustración 34. Deriva inelástica sistema dual. Fuente: Propia

3.3.4. Análisis empleando DBD

3.3.4.1. Procesamiento de resultados

3.3.4.1.1. Pórticos resistentes a momento (Priestley et al., 2007)

DISEÑO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS PÓRTICOS (PRIESTLEY ET AL., 2007)

1.- Datos de partida

Altura total de la edificación: $H_{total} := 19.44\ m$

Nivel 1 (Altura y Masa): $h_1 := 3.24\ m$ $m_1 := 106.16697\ tonne \cdot \frac{s^2}{m}$

Nivel 2 (Altura y Masa): $h_2 := 6.48\ m$ $m_2 := 106.16697\ tonne \cdot \frac{s^2}{m}$

Nivel 3 (Altura y Masa): $h_3 := 9.42\ m$ $m_3 := 105.3632\ tonne \cdot \frac{s^2}{m}$

Nivel 4 (Altura y Masa): $h_4 := 12.96\ m$ $m_4 := 104.76953\ tonne \cdot \frac{s^2}{m}$

Nivel 5 (Altura y Masa): $h_5 := 16.2\ m$ $m_5 := 104.76953\ tonne \cdot \frac{s^2}{m}$

Nivel 6 (Altura y Masa): $h_6 := 19.44\ m$ $m_6 := 99.73853\ tonne \cdot \frac{s^2}{m}$

Deriva de diseño: $\theta_T := 0.02$

Deformación unitaria de acero de fluencia: $\varepsilon_y := 0.002$

Coeficiente de sistema estructural $K := 0.9$

2.- Perfil de desplazamiento

Forma de modo inelástico de cada nivel:

Nivel 1: $$\delta_1 := \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{h_1}{H_{total}}\right) \cdot \left(1 - \frac{h_1}{4 \cdot H_{total}}\right) = 0.213$$

Nivel 2: $$\delta_2 := \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{h_2}{H_{total}}\right) \cdot \left(1 - \frac{h_2}{4 \cdot H_{total}}\right) = 0.407$$

Nivel 3: $$\delta_3 := \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{h_3}{H_{total}}\right) \cdot \left(1 - \frac{h_3}{4 \cdot H_{total}}\right) = 0.568$$

Nivel 4: $$\delta_4 := \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{h_4}{H_{total}}\right) \cdot \left(1 - \frac{h_4}{4 \cdot H_{total}}\right) = 0.741$$

Nivel 5: $$\delta_5 := \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{h_5}{H_{total}}\right) \cdot \left(1 - \frac{h_5}{4 \cdot H_{total}}\right) = 0.88$$

Nivel 6: $$\delta_6 := \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{h_6}{H_{total}}\right) \cdot \left(1 - \frac{h_6}{4 \cdot H_{total}}\right) = 1$$

Desplazamiento de diseño del nivel con más masa (Primer nivel): $$\Delta_c := h_1 \cdot \theta_T = 6.48 \ cm$$

Forma de modo del nivel con más masa (Primer nivel): $$\delta_c := \delta_1 = 0.213$$

Desplazamiento para cada nivel:

Nivel 1: $$\Delta_1 := \delta_1 \cdot \left(\frac{\Delta_c}{\delta_c}\right) = 6.48 \ cm$$

Nivel 2: $$\Delta_2 := \delta_2 \cdot \left(\frac{\Delta_c}{\delta_c}\right) = 12.397 \ cm$$

Nivel 3: $$\Delta_3 := \delta_3 \cdot \left(\frac{\Delta_c}{\delta_c}\right) = 17.278 \ cm$$

Nivel 4: $$\Delta_4 := \delta_4 \cdot \left(\frac{\Delta_c}{\delta_c}\right) = 22.539 \ cm$$

Nivel 5: $$\Delta_5 := \delta_5 \cdot \left(\frac{\Delta_c}{\delta_c}\right) = 26.765 \ cm$$

Nivel 6: $$\Delta_6 := \delta_6 \cdot \left(\frac{\Delta_c}{\delta_c}\right) = 30.428 \ cm$$

3.- Desplazamiento de diseño

$$\Delta_d := \frac{m_1 \cdot \Delta_1^{\,2} + m_2 \cdot \Delta_2^{\,2} + m_3 \cdot \Delta_3^{\,2} + m_4 \cdot \Delta_4^{\,2} + m_5 \cdot \Delta_5^{\,2} + m_6 \cdot \Delta_6^{\,2}}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6}$$

$$\Delta_d = 0.2269\ m$$

4.- Altura efectiva

$$H_{eff} := \frac{m_1 \cdot \Delta_1 \cdot h_1 + m_2 \cdot \Delta_2 \cdot h_2 + m_3 \cdot \Delta_3 \cdot h_3 + m_4 \cdot \Delta_4 \cdot h_4 + m_5 \cdot \Delta_5 \cdot h_5 + m_6 \cdot \Delta_6 \cdot h_6}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6}$$

$$H_{eff} = 13.55\ m$$

5.- Masa efectiva

$$M_{eff} := \frac{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6}{\Delta_d}$$

$$M_{eff} = 529.96\ \frac{s^2}{m} \cdot tonne$$

6.- Desplazamiento de fluencia

- **Deriva de fluencia (X)**

Mayor luz libre: $L_{bx} := 6.5\ m$

Peralte (viga): $H_b := 0.7\ m$

Deriva de fluencia: $\theta_{yx} := 0.5 \cdot \varepsilon_y \cdot \frac{L_{bx}}{H_b} = 0.009$

Desplazamiento de fluencia: $\Delta_{yx} := \theta_{yx} \cdot H_{eff}$ $\Delta_{yx} = 12.582\ cm$

- **Deriva de fluencia (Y):**

Mayor luz libre: $L_{by} := 7.8\ m$

Peralte (viga): $H_b = 0.7\ m$

Deriva de fluencia: $\theta_{yy} := 0.5 \cdot \varepsilon_y \cdot \frac{L_{by}}{H_b} = 0.011$

Desplazamiento de fluencia: $\Delta_{yy} := \theta_{yy} \cdot H_{eff}$ $\Delta_{yy} = 15.098\ cm$

7.- Demanda de ductilidad

- **Demanda de ductilidad (X):** $u_x := \frac{\Delta_d}{\Delta_{yx}}$ $u_x = 1.8034$
- **Demanda de ductilidad (Y):** $u_y := \frac{\Delta_d}{\Delta_{yy}}$ $u_y = 1.5028$

8.- Amortiguamiento viscoso equivalente

Concrete Frame Building (TF): $\xi_{eq} = 0.05 + 0.565\left(\frac{\mu - 1}{\mu\pi}\right)$

- **Amortiguamiento equivalente (X):** $\xi_{eqx} := 0.05 + 0.565 \cdot \left(\frac{u_x - 1}{u_x \cdot \pi}\right) = 0.13012$
- **Amortiguamiento equivalente** $\xi_{eqy} := 0.05 + 0.565 \cdot \left(\frac{u_y - 1}{u_y \cdot \pi}\right) = 0.11017$

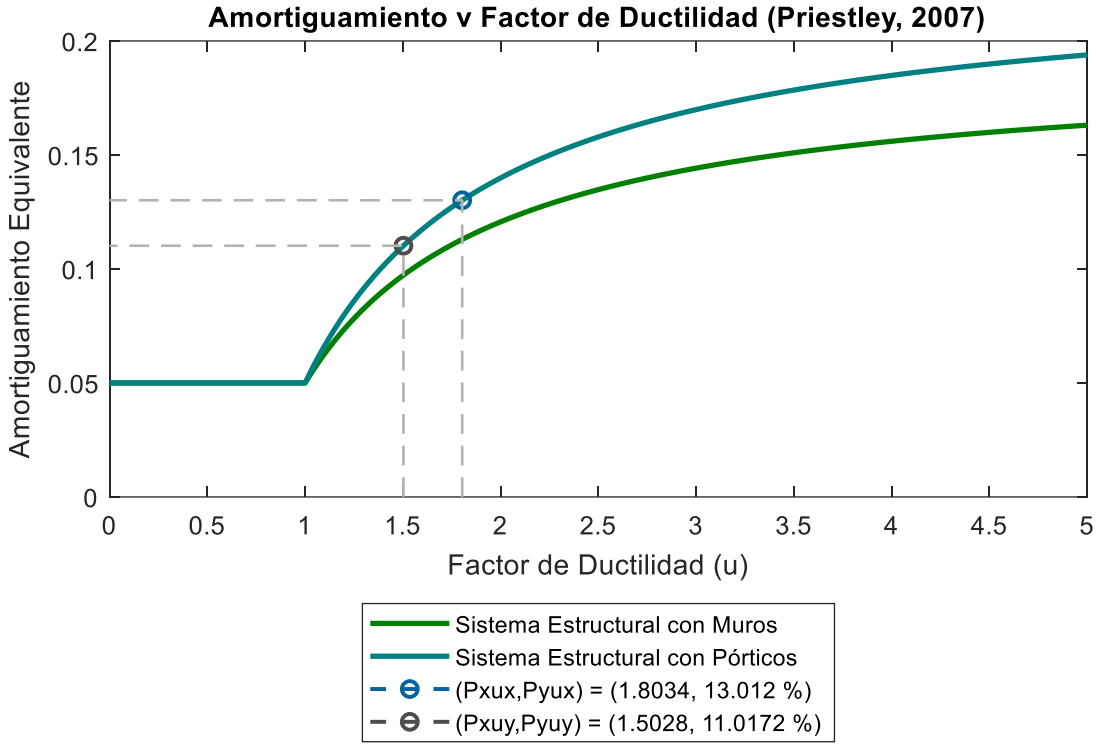


Ilustración 35. Amortiguamiento v Ductilidad. Fuente: Propia

9.- Factor de reducción

- **Factor de reducción (X):** $R_{\xi x} := \left(\frac{0.10}{0.05 + \xi_{eqx}} \right)^{0.5} = 0.745$

- **Factor de reducción (Y):** $R_{\xi y} := \left(\frac{0.10}{0.05 + \xi_{eqy}} \right)^{0.5} = 0.79$

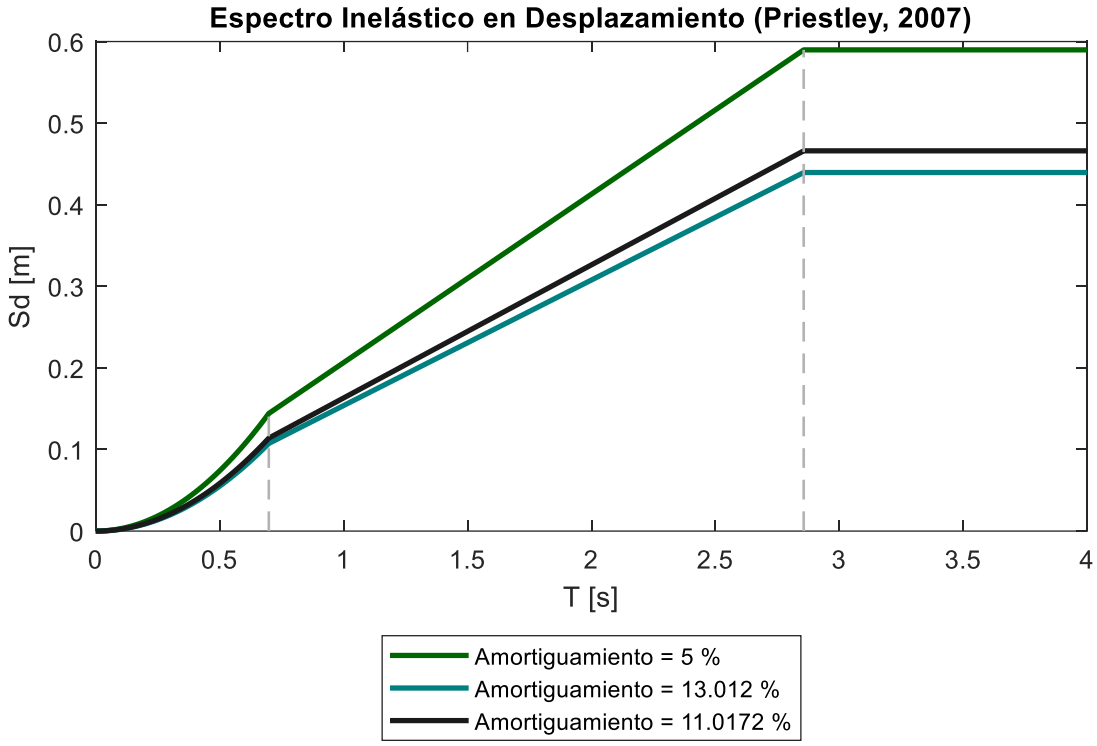


Ilustración 36. Espectro inelástico en desplazamiento. Fuente: Propia

10.- Periodo efectivo

- **Periodo efectivo (X):** $T_{effx} := 1.475\ s$

- **Periodo efectivo (Y):** $T_{effy} := 1.391\ s$

11.- Rigidez efectiva

- **Rigidez efectiva (X):** $k_{effx} := \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot M_{eff}}{T_{effx}^{\ 2}} = 9616.546\ \frac{tonne}{m}$

- **Rigidez efectiva (Y):** $k_{effy} := \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot M_{eff}}{T_{effy}^{\ 2}} = 10813.067\ \frac{tonne}{m}$

12.- Cortante basal

- **Cortante basal (X):** $V_{DBDx} := k_{effx} \cdot \Delta_d = 2182.013\ tonne$
- **Cortante basal (Y):** $V_{DBDy} := k_{effy} \cdot \Delta_d = 2453.506\ tonne$

13.- Vector de fuerzas laterales

- **Fuerzas laterales (X):**

$$F_{1x} := V_{DBDx} \cdot \frac{m_1 \cdot \Delta_1}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 124.836\ tonne$$

$$F_{2x} := V_{DBDx} \cdot \frac{m_2 \cdot \Delta_2}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 238.817\ tonne$$

$$F_{3x} := V_{DBDx} \cdot \frac{m_3 \cdot \Delta_3}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 330.33\ tonne$$

$$F_{4x} := V_{DBDx} \cdot \frac{m_4 \cdot \Delta_4}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 428.497\ tonne$$

$$F_{5x} := V_{DBDx} \cdot \frac{m_5 \cdot \Delta_5}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 508.84\ tonne$$

$$F_{6x} := (1 - K) \cdot V_{DBDx} + K \cdot V_{DBDx} \cdot \frac{m_6 \cdot \Delta_6}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6}$$

$$F_{6x} = 713.825\ tonne$$

- **Fuerzas laterales (Y):**

$$F_{1y} := V_{DBDy} \cdot \frac{m_1 \cdot \Delta_1}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 140.369 \ tonne$$

$$F_{2y} := V_{DBDy} \cdot \frac{m_2 \cdot \Delta_2}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 268.531 \ tonne$$

$$F_{3y} := V_{DBDy} \cdot \frac{m_3 \cdot \Delta_3}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 371.43 \ tonne$$

$$F_{4y} := V_{DBDy} \cdot \frac{m_4 \cdot \Delta_4}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 481.812 \ tonne$$

$$F_{5y} := V_{DBDy} \cdot \frac{m_5 \cdot \Delta_5}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 572.152 \ tonne$$

$$F_{6y} := (1 - K) \cdot V_{DBDy} + K \cdot V_{DBDy} \cdot \frac{m_6 \cdot \Delta_6}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6}$$

$$F_{6y} = 802.641 \ tonne$$

3.3.4.1.2. Pórticos resistentes a momento (NEC, 2015)

DISEÑO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS PÓRTICOS (NEC, 2015)

1.- Datos de partida

Altura total de la edificación: $H_{total} := 19.44\ m$

Nivel 1 (Altura y Masa): $h_1 := 3.24\ m$ $m_1 := 106.16697\ tonne \cdot \frac{s^2}{m}$

Nivel 2 (Altura y Masa): $h_2 := 6.48\ m$ $m_2 := 106.16697\ tonne \cdot \frac{s^2}{m}$

Nivel 3 (Altura y Masa): $h_3 := 9.42\ m$ $m_3 := 105.3632\ tonne \cdot \frac{s^2}{m}$

Nivel 4 (Altura y Masa): $h_4 := 12.96\ m$ $m_4 := 104.76953\ tonne \cdot \frac{s^2}{m}$

Nivel 5 (Altura y Masa): $h_5 := 16.2\ m$ $m_5 := 104.76953\ tonne \cdot \frac{s^2}{m}$

Nivel 6 (Altura y Masa): $h_6 := 19.44\ m$ $m_6 := 99.73853\ tonne \cdot \frac{s^2}{m}$

Deriva de diseño: $\theta_T := 0.02$

Factor de irregularidad en planta: $\phi_p := 1$

Factor de irregularidad en elevación: $\phi_e := 1$

Deformación unitaria de acero de fluencia: $\varepsilon_y := 0.002$

Factor de zona sísmica $Z := 0.4$

Coeficiente perfil del suelo $F_a := 1.2$ $F_d := 1.19$ $F_s := 1.28$

Coeficiente de sistema estructural $K := 0.9$

2.- Perfil de desplazamiento

Factor de amplificación dinámico: $W_{\theta'} := 1.15 - 0.0034 \cdot H_{total} \cdot \frac{1}{m} = 1.084$

$$W_\theta := \begin{cases} W_{\theta'} & \text{if } W_{\theta'} < 1 \\ 1 & \text{else} \end{cases} = 1$$

Desplazamiento para cada nivel:

Nivel 1: $\Delta_1 := W_\theta \cdot h_1 \cdot \theta_T \cdot \frac{4 \cdot H_{total} - h_1}{4 \cdot H_{total} - h_1} = 6.48\ cm$

Nivel 2: $\Delta_2 := W_\theta \cdot h_2 \cdot \theta_T \cdot \frac{4 \cdot H_{total} - h_2}{4 \cdot H_{total} - h_1} = 12.397\ cm$

Nivel 3: $\Delta_3 := W_\theta \cdot h_3 \cdot \theta_T \cdot \frac{4 \cdot H_{total} - h_3}{4 \cdot H_{total} - h_1} = 17.278\ cm$

Nivel 4: $\Delta_4 := W_\theta \cdot h_4 \cdot \theta_T \cdot \frac{4 \cdot H_{total} - h_4}{4 \cdot H_{total} - h_1} = 22.539\ cm$

Nivel 5: $\Delta_5 := W_\theta \cdot h_5 \cdot \theta_T \cdot \frac{4 \cdot H_{total} - h_5}{4 \cdot H_{total} - h_1} = 26.765\ cm$

Nivel 6: $\Delta_6 := W_\theta \cdot h_6 \cdot \theta_T \cdot \frac{4 \cdot H_{total} - h_6}{4 \cdot H_{total} - h_1} = 30.428\ cm$

3.- Desplazamiento de diseño

$$\Delta_d := \phi_p \cdot \phi_e \cdot \frac{m_1 \cdot \Delta_1^{\,2} + m_2 \cdot \Delta_2^{\,2} + m_3 \cdot \Delta_3^{\,2} + m_4 \cdot \Delta_4^{\,2} + m_5 \cdot \Delta_5^{\,2} + m_6 \cdot \Delta_6^{\,2}}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6}$$

$$\Delta_d = 0.227\ m$$

4.- Altura efectiva

$$H_{eff} := \frac{m_1 \cdot \Delta_1 \cdot h_1 + m_2 \cdot \Delta_2 \cdot h_2 + m_3 \cdot \Delta_3 \cdot h_3 + m_4 \cdot \Delta_4 \cdot h_4 + m_5 \cdot \Delta_5 \cdot h_5 + m_6 \cdot \Delta_6 \cdot h_6}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6}$$

$$H_{eff} = 13.55\ m$$

5.- Masa efectiva

$$M_{eff} := \frac{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6}{\Delta_d}$$

$$M_{eff} = 529.96 \ \frac{s^2}{m} \cdot tonne$$

6.- Desplazamiento de fluencia

- **Deriva de fluencia (X)**

Mayor luz libre: $L_{bx} := 6.5 \ m$

Peralte (viga): $H_b := 0.7 \ m$

Deriva de fluencia: $\theta_{yx} := 0.5 \cdot \varepsilon_y \cdot \frac{L_{bx}}{H_b} = 0.009$

Desplazamiento de fluencia: $\Delta_{yx} := \theta_{yx} \cdot H_{eff}$ $\Delta_{yx} = 12.582 \ cm$

- **Deriva de fluencia (Y):**

Mayor luz libre: $L_{by} := 7.8 \ m$

Peralte (viga): $H_b = 0.7 \ m$

Deriva de fluencia: $\theta_{yy} := 0.5 \cdot \varepsilon_y \cdot \frac{L_{by}}{H_b} = 0.011$

Desplazamiento de fluencia: $\Delta_{yy} := \theta_{yy} \cdot H_{eff}$ $\Delta_{yy} = 15.098 \ cm$

7.- Demanda de ductilidad

- **Demanda de ductilidad (X):** $u_x := \frac{\Delta_d}{\Delta_{yx}}$ $u_x = 1.8034$

- **Demanda de ductilidad (Y):** $u_y := \frac{\Delta_d}{\Delta_{yy}}$ $u_y = 1.5028$

8.- Factor de reducción de demanda sísmica

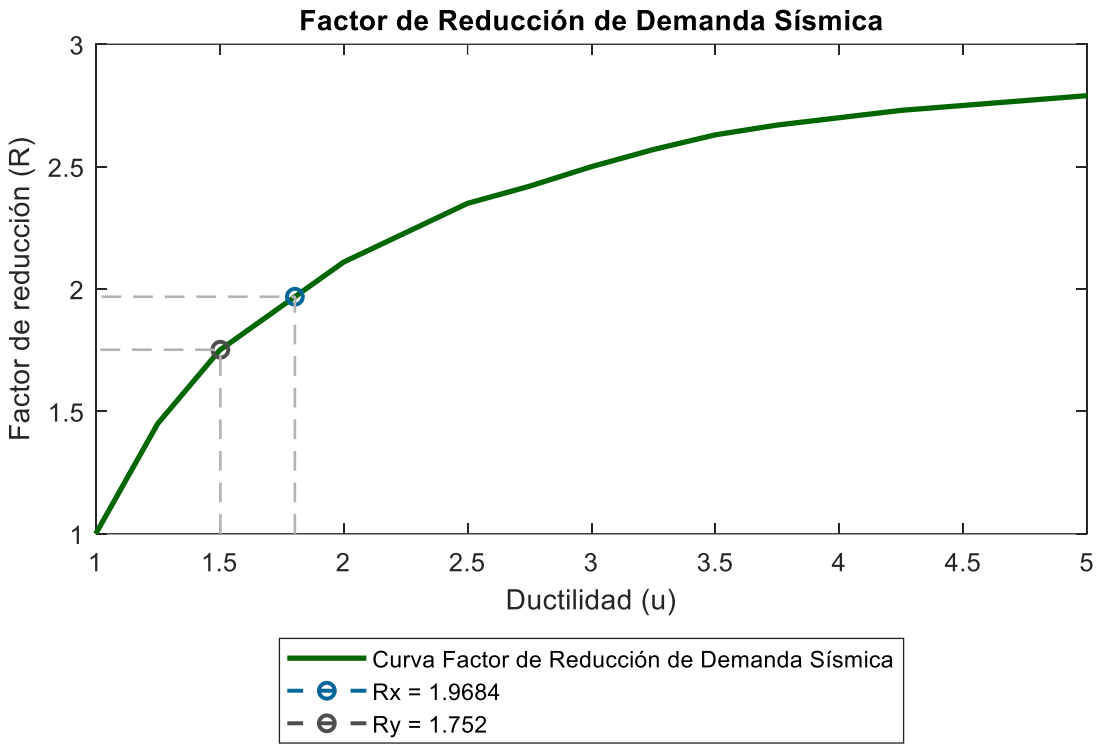


Ilustración 37. Factor de reducción demanda sísmica. Fuente: NEC Committee-SE-DS, 2015

- **Factor de reducción (X):** $R_{\xi x} := 1.9684$

- **Factor de reducción** $R_{\xi y} := 1.752$

9.- Periodo efectivo

Periodos límite de vibración:

$$T_o := 0.1 \cdot F_s \cdot \frac{F_d}{F_a} \cdot s = 0.127\ s \qquad T_c := 0.48 \cdot F_s \cdot \frac{F_d}{F_a} \cdot s = 0.609\ s \qquad T_L := 2.4 \cdot F_d \cdot s = 2.856\ s$$

- **Periodo efectivo (X):**

$$T_{effx'} := \frac{\left(\Delta_d \cdot \frac{s}{m} \cdot R_{\xi x}\right)}{0.38 \cdot Z \cdot F_d} = 2.469\ s$$

$$T_{effx} := \begin{array}{l} \text{if } T_c \le T_{effx'} \le T_L \\ \quad \| \, T_{effx'} \\ \text{else} \\ \quad \| \, T_L \end{array} = 2.469 \ s$$

- **Periodo efectivo (Y):**

$$T_{effy'} := \frac{\left(\Delta_d \cdot \frac{s}{m} \cdot R_{\xi y}\right)}{0.38 \cdot Z \cdot F_d} = 2.198 \ s$$

$$T_{effy} := \begin{array}{l} \text{if } T_c \le T_{effy'} \le T_L \\ \quad \| \, T_{effy'} \\ \text{else} \\ \quad \| \, T_L \end{array} = 2.198 \ s$$

10.- Rigidez efectiva

- **Rigidez efectiva (X):** $k_{effx} := \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot M_{eff}}{T_{effx}^{\ 2}} = 3431.477 \ \frac{tonne}{m}$

- **Rigidez efectiva (Y):** $k_{effy} := \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot M_{eff}}{T_{effy}^{\ 2}} = 4331.513 \ \frac{tonne}{m}$

11.- Cortante basal

- **Cortante basal (X):** $V_{DBDx} := k_{effx} \cdot \Delta_d = 778.609 \ tonne$
- **Cortante basal (Y):** $V_{DBDy} := k_{effy} \cdot \Delta_d = 982.829 \ tonne$

12.- Vector de fuerzas laterales

- **Fuerzas laterales (X):**

$$F_{1x} := K \cdot V_{DBDx} \cdot \frac{m_1 \cdot \Delta_1}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 40.091 \ tonne$$

$$F_{2x} := K \cdot V_{DBDx} \cdot \frac{m_2 \cdot \Delta_2}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 76.695 \ tonne$$

$$F_{3x} := K \cdot V_{DBDx} \cdot \frac{m_3 \cdot \Delta_3}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 106.085 \ tonne$$

$$F_{4x} := K \cdot V_{DBDx} \cdot \frac{m_4 \cdot \Delta_4}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 137.611 \ tonne$$

$$F_{5x} := K \cdot V_{DBDx} \cdot \frac{m_5 \cdot \Delta_5}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 163.413 \ tonne$$

$$F_{6x} := (1 - K) \cdot V_{DBDx} + K \cdot V_{DBDx} \cdot \frac{m_6 \cdot \Delta_6}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6}$$

$$F_{6x} = 254.715 \ tonne$$

- **Fuerzas laterales (Y):**

$$F_{1y} := K \cdot V_{DBDy} \cdot \frac{m_1 \cdot \Delta_1}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 50.606 \ tonne$$

$$F_{2y} := K \cdot V_{DBDy} \cdot \frac{m_2 \cdot \Delta_2}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 96.812 \ tonne$$

$$F_{3y} := K \cdot V_{DBDy} \cdot \frac{m_3 \cdot \Delta_3}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 133.909 \ tonne$$

$$F_{4y} := K \cdot V_{DBDy} \cdot \frac{m_4 \cdot \Delta_4}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 173.704 \ tonne$$

$$F_{5y} := K \cdot V_{DBDy} \cdot \frac{m_5 \cdot \Delta_5}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6} = 206.274 \ tonne$$

$$F_{6y} := (1 - K) \cdot V_{DBDy} + K \cdot V_{DBDy} \cdot \frac{m_6 \cdot \Delta_6}{m_1 \cdot \Delta_1 + m_2 \cdot \Delta_2 + m_3 \cdot \Delta_3 + m_4 \cdot \Delta_4 + m_5 \cdot \Delta_5 + m_6 \cdot \Delta_6}$$

$$F_{6y} = 321.523 \ tonne$$

3.3.4.1.3. Sistema dual (Priestley et al., 2007)

DISEÑO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS SISTEMA DUAL (PRIESTLEY, 2007)

1.- Datos de partida

Altura total de la edificación: $H_{total} := 19.44\ m$

Nivel 1 (Altura y Masa): $h_1 := 3.24\ m$ $m_1 := 81.3961\ tonne \cdot \frac{s^2}{m}$

Nivel 2 (Altura y Masa): $h_2 := 6.48\ m$ $m_2 := 81.3961\ tonne \cdot \frac{s^2}{m}$

Nivel 3 (Altura y Masa): $h_3 := 9.42\ m$ $m_3 := 80.8900\ tonne \cdot \frac{s^2}{m}$

Nivel 4 (Altura y Masa): $h_4 := 12.96\ m$ $m_4 := 80.4559\ tonne \cdot \frac{s^2}{m}$

Nivel 5 (Altura y Masa): $h_5 := 16.2\ m$ $m_5 := 80.4559\ tonne \cdot \frac{s^2}{m}$

Nivel 6 (Altura y Masa): $h_6 := 19.44\ m$ $m_6 := 78.1941\ tonne \cdot \frac{s^2}{m}$

Deriva de diseño: $\theta_T := 0.02$

Deformación unitaria de acero de fluencia: $\varepsilon_y := 0.002$

Longitud del muro (Sentido X) $l_{wx} := 3.15\ m$

Longitud del muro (Sentido Y) $l_{wy} := 3.9\ m$

Esfuerzo nominal de fluencia del acero $f_y := 400\ MPa$

Diámetro del refuerzo de acero $d_b := 22\ mm$

Número de pisos $n := 6$

Coeficiente de sistema estructural $K' := 0.9$

2.- Asignación del porcentaje de cortante basal para pórticos y muros

De acuerdo con la distribución de pórticos y muros se considera que el aporte de resistencia lateral (Cortante Basal) de los pórticos es del 30 %

$$\beta_{pórticos} := 0.3$$

$$V_{pórticos} = \beta_{pórticos} \cdot V_{basal} \qquad V_{pórticos} = 0.3 \cdot V_{basal}$$

$$V_{muros} = \left(1 - \beta_{pórticos}\right) \cdot V_{basal} \qquad V_{muros} = 0.7 \cdot V_{basal}$$

3.- Definición de altura de contra flexión del muro

Piso	Altura $h_i\ (m)$	Masa m_i $(Ton * s^2/m)$	$m_{i*}h_i$ $(Ton * s^2)$	F_i (rel)	V_{Ti} (rel)	M_{OTMi} (rel)	M_{OTMi} (rel)	V_{Fi} $(Pórticos)$	V_{Wi} $(Muros)$	M_{Wi} $(Muros)$	M_{Wi} $(Muros)$
6	19.44	78.1941	1520.0937	0.2792	0.2792	0.0000	0.0000	0.3	-0.0208	0.0000	0.0000
5	16.20	80.4559	1303.3861	0.2394	0.5187	0.9047	0.9047	0.3	0.2187	-0.0664	-0.0664
4	12.96	80.4559	1042.7089	0.1915	0.7102	1.6805	2.5853	0.3	0.4102	0.7085	0.6421
3	9.72	80.8900	786.2505	0.1444	0.8547	2.3011	4.8864	0.3	0.5547	1.3291	1.9712
2	6.48	81.3961	527.4464	0.0969	0.9516	2.7691	7.6555	0.3	0.6516	1.7971	3.7683
1	3.24	81.3961	263.7232	0.0484	1.0000	3.0830	10.7385	0.3	0.7000	2.1110	5.8794
0	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	3.2400	13.9785	0.3	0.7000	2.2680	8.1474
	Σ:	482.7881	5443.6087	1.0000							

Tabla 23. Momentos de volcamiento para muros y pórticos. Fuente: Propia

$$\frac{H_{CF}}{H_n} = \frac{\sqrt[2]{9 - 8 \cdot B_F} - 1}{n^{0.25}} \qquad \frac{H_{CF}}{H_n} = 1 \qquad B_F = \frac{M_{Total}}{M_{Pórticos}}$$

$$M_{Total} := 13.9785 \qquad Mw_0 := 8.1474$$

$$M_{Pórticos} := M_{Total} - Mw_0 = 5.831$$

$$B_F := \frac{M_{Pórticos}}{M_{Total}} = 0.417$$

$$\frac{\sqrt[2]{9 - 8 \cdot B_F} - 1}{n^{0.25}} = 0.882 \qquad \frac{n-1}{n} = 0.833$$

$$H_{CF} := \begin{cases} \dfrac{\sqrt[2]{9-8\cdot B_F}-1}{n^{0.25}} \geq \dfrac{n-1}{n} \\ \dfrac{\sqrt[2]{9-8\cdot B_F}-1}{n^{0.25}} \cdot H_{total} \\ \text{else} \\ H_{total} \end{cases} = 17.137\ m$$

4.- Curvatura de fluencia

- **Curvatura de fluencia (X):** $\phi y_x := 2 \cdot \dfrac{\varepsilon_y}{l_{wy}} = 0.001026\ \dfrac{1}{m}$

- **Curvatura de fluencia (Y):** $\phi y_y := 2 \cdot \dfrac{\varepsilon_y}{l_{wx}} = 0.00127\ \dfrac{1}{m}$

5.- Desplazamiento de fluencia

$Si \quad h_i \leq H_{CF} \qquad \Delta_{yi} = \theta_y \cdot \left(\dfrac{hi^2}{2} - \dfrac{h_i^3}{6 \cdot Hc} \right)$

$Si \quad h_i > H_{CF} \qquad \Delta_{yi} = \theta_y \cdot \left(\dfrac{Hc \cdot h_i}{2} - \dfrac{Hc}{6} \right)$

- **Desplazamiento de fluencia**

$$\Delta_{y1x} := \phi y_x \cdot \left(\frac{h_1^2}{2} - \frac{h_1^3}{6 \cdot H_{CF}} \right) = 0.005\ m$$

$$\Delta_{y2x} := \phi y_x \cdot \left(\frac{h_2^2}{2} - \frac{h_2^3}{6 \cdot H_{CF}} \right) = 0.0188\ m$$

$$\Delta_{y3x} := \phi y_x \cdot \left(\frac{h_3^2}{2} - \frac{h_3^3}{6 \cdot H_{CF}} \right) = 0.0372\ m$$

$$\Delta_{y4x} := \phi y_x \cdot \left(\frac{h_4^2}{2} - \frac{h_4^3}{6 \cdot H_{CF}} \right) = 0.0644\ m$$

$$\Delta_{y5x} := \phi y_x \cdot \left(\frac{h_5 \cdot H_{CF}}{2} - \frac{H_{CF}^2}{6} \right) = 0.0922\ m$$

$$\Delta_{y6x} := \phi y_x \cdot \left(\frac{h_6 \cdot H_{CF}}{2} - \frac{H_{CF}^2}{6} \right) = 0.1206\ m$$

- **Desplazamiento de fluencia**

$$\Delta_{y1y} := \phi y_y \cdot \left(\frac{h_1^{\,2}}{2} - \frac{h_1^{\,3}}{6 \cdot H_{CF}} \right) = 0.0062\ m$$

$$\Delta_{y2y} := \phi y_y \cdot \left(\frac{h_2^{\,2}}{2} - \frac{h_2^{\,3}}{6 \cdot H_{CF}} \right) = 0.0233\ m$$

$$\Delta_{y3y} := \phi y_y \cdot \left(\frac{h_3^{\,2}}{2} - \frac{h_3^{\,3}}{6 \cdot H_{CF}} \right) = 0.046\ m$$

$$\Delta_{y4y} := \phi y_y \cdot \left(\frac{h_4^{\,2}}{2} - \frac{h_4^{\,3}}{6 \cdot H_{CF}} \right) = 0.0798\ m$$

$$\Delta_{y5y} := \phi y_y \cdot \left(\frac{h_5 \cdot H_{CF}}{2} - \frac{H_{CF}^{\,2}}{6} \right) = 0.1141\ m$$

$$\Delta_{y6y} := \phi y_y \cdot \left(\frac{h_6 \cdot H_{CF}}{2} - \frac{H_{CF}^{\,2}}{6} \right) = 0.1494\ m$$

6.- Perfil de desplazamiento de diseño

- **Perfil de desplazamiento de diseño (X):**

Curvatura de control de daños reducido un 10 %

$$\phi_{dcx} := \left(\frac{0.072}{l_{wx}} \right) \cdot 0.9 = 0.02057\ \frac{1}{m}$$

Longitud de la rótula plástica

$$L_P = K \cdot H_{CF} + 0.1 \cdot l_w + L_{SP}$$

$$K = 0.2 \cdot \left(\frac{f_u}{f_y} - 1 \right)$$

$$K := 0.2\ (1.35 - 1) = 0.07$$

$$K. := \begin{cases} K & \text{if } K \le 0.08 \\ 0.08 & \text{else} \end{cases} = 0.07$$

$$L_{SP} = 0.022 \cdot f_y \cdot d_b \qquad f_y = 400\ MPa$$

$$L_{SP} := 0.022 \cdot \left(f_y \cdot \frac{1}{MPa} \right) \cdot d_b = 193.6\ mm$$

$$L_{Px} := (K. \cdot H_{CF}) + (0.1 \cdot l_{wx}) + L_{SP} = 1.708\ m$$

Chequeo si el límite de deriva en la altura de contra flexión del muro excede la deriva límite

$$\theta_{CF} = \frac{\phi y \cdot H_{CF}}{2} + (\phi_{dc} - \phi y) \cdot L_P$$

$$\theta_{CFx} := \frac{\phi y_x \cdot H_{CF}}{2} + (\phi_{dcx} - \phi y_x) \cdot L_{Px} = 0.042$$

$$Evaluación_1 := \text{if } \theta_{CFx} > \theta_T \ \| \ \text{“Excede”} \ \text{else} \ \| \ \text{“NoExcede”} = \text{“Excede”}$$

Deriva límite de altura de contra flexión excede la deriva límite de la normativa por lo que se opta a utilizar esta deriva.

Deriva límite reducida $\theta_C = \theta_T$ $\theta_C := \theta_T = 0.02$

6.- Perfil de desplazamiento de diseño

Perfil de desplazamiento $\Delta_{Di} = \Delta_{yi} + \left(\theta_C - \frac{\phi y \cdot H_{CF}}{2}\right) \cdot h_i$

Nivel 1: $\Delta_{D1x} := \Delta_{y1x} + \left(\theta_C - \frac{\phi y_x \cdot H_{CF}}{2}\right) \cdot h_1 = 0.0414\ m$

Nivel 2: $\Delta_{D2x} := \Delta_{y2x} + \left(\theta_C - \frac{\phi y_x \cdot H_{CF}}{2}\right) \cdot h_2 = 0.0915\ m$

Nivel 3: $\Delta_{D3x} := \Delta_{y3x} + \left(\theta_C - \frac{\phi y_x \cdot H_{CF}}{2}\right) \cdot h_3 = 0.1428\ m$

Nivel 4: $\Delta_{D4x} := \Delta_{y4x} + \left(\theta_C - \frac{\phi y_x \cdot H_{CF}}{2}\right) \cdot h_4 = 0.2097\ m$

Nivel 5: $\Delta_{D5x} := \Delta_{y5x} + \left(\theta_C - \frac{\phi y_x \cdot H_{CF}}{2}\right) \cdot h_5 = 0.2738\ m$

Nivel 6: $\Delta_{D6x} := \Delta_{y6x} + \left(\theta_C - \frac{\phi y_x \cdot H_{CF}}{2}\right) \cdot h_6 = 0.3386\ m$

- **Perfil de desplazamiento de diseño (Y):**

Curvatura de control de daños reducido un 10 %

$$\phi_{dcy} := \left(\frac{0.072}{l_{wy}}\right) \cdot 0.9 = 0.01662 \ \frac{1}{m}$$

Longitud de la rótula plástica $L_P = K \cdot H_{CF} + 0.1 \cdot l_w + L_{SP}$

$$L_{Py} := (K. \cdot H_{CF}) + (0.1 \cdot l_{wy}) + L_{SP} = 1.783 \ m$$

Chequeo si el límite de deriva en la altura de contra flexión del muro excede la deriva límite

$$\theta_{CF} = \frac{\phi y \cdot H_{CF}}{2} + (\phi_{dc} - \phi y) \cdot L_P$$

$$\theta_{CFy} := \frac{\phi y_y \cdot H_{CF}}{2} + (\phi_{dcy} - \phi y_y) \cdot L_{Py} = 0.038 \qquad \theta_{CF} > \theta_T$$

$$Evaluación_2 := \text{if } \theta_{CFy} > \theta_T \ \| \ \text{“Excede”} \ \text{else} \ \| \ \text{“NoExcede”} = \text{“Excede”}$$

Perfil de desplazamiento $\Delta_{Di} = \Delta_{yi} + \left(\theta_C - \frac{\phi y \cdot H_{CF}}{2}\right) \cdot h_i$

Nivel 1: $\Delta_{D1y} := \Delta_{y1y} + \left(\theta_C - \frac{\phi y_y \cdot H_{CF}}{2}\right) \cdot h_1 = 0.0358 \ m$

Nivel 2: $\Delta_{D2y} := \Delta_{y2y} + \left(\theta_C - \frac{\phi y_y \cdot H_{CF}}{2}\right) \cdot h_2 = 0.0824 \ m$

Nivel 3: $\Delta_{D3y} := \Delta_{y3y} + \left(\theta_C - \frac{\phi y_y \cdot H_{CF}}{2}\right) \cdot h_3 = 0.1319 \ m$

Nivel 4: $\Delta_{D4y} := \Delta_{y4y} + \left(\theta_C - \frac{\phi y_y \cdot H_{CF}}{2}\right) \cdot h_4 = 0.1979 \ m$

Nivel 5: $\Delta_{D5y} := \Delta_{y5y} + \left(\theta_C - \frac{\phi y_y \cdot H_{CF}}{2}\right) \cdot h_5 = 0.2618 \ m$

Nivel 6: $\Delta_{D6y} := \Delta_{y6y} + \left(\theta_C - \frac{\phi y_y \cdot H_{CF}}{2}\right) \cdot h_6 = 0.3266 \ m$

7.- Desplazamiento de diseño

- **Desplazamiento de diseño (X):**

$$\Delta_{Dx} := \frac{m_1 \cdot \Delta_{D1x}^{\ 2} + m_2 \cdot \Delta_{D2x}^{\ 2} + m_3 \cdot \Delta_{D3x}^{\ 2} + m_4 \cdot \Delta_{D4x}^{\ 2} + m_5 \cdot \Delta_{D5x}^{\ 2} + m_6 \cdot \Delta_{D6x}^{\ 2}}{m_1 \cdot \Delta_{D1x} + m_2 \cdot \Delta_{D2x} + m_3 \cdot \Delta_{D3x} + m_4 \cdot \Delta_{D4x} + m_5 \cdot \Delta_{D5x} + m_6 \cdot \Delta_{D6x}}$$

$$\Delta_{Dx} = 0.23939\ m$$

- **Desplazamiento de diseño (Y):**

$$\Delta_{Dy} := \frac{m_1 \cdot \Delta_{D1y}^{\ 2} + m_2 \cdot \Delta_{D2y}^{\ 2} + m_3 \cdot \Delta_{D3y}^{\ 2} + m_4 \cdot \Delta_{D4y}^{\ 2} + m_5 \cdot \Delta_{D5y}^{\ 2} + m_6 \cdot \Delta_{D6y}^{\ 2}}{m_1 \cdot \Delta_{D1y} + m_2 \cdot \Delta_{D2y} + m_3 \cdot \Delta_{D3y} + m_4 \cdot \Delta_{D4y} + m_5 \cdot \Delta_{D5y} + m_6 \cdot \Delta_{D6y}}$$

$$\Delta_{Dy} = 0.230322\ m$$

8.- Altura efectiva

- **Altura efectiva (X):**

$$H_{effx} := \frac{m_1 \cdot \Delta_{D1x} \cdot h_1 + m_2 \cdot \Delta_{D2x} \cdot h_2 + m_3 \cdot \Delta_{D3x} \cdot h_3 + m_4 \cdot \Delta_{D4x} \cdot h_4 + m_5 \cdot \Delta_{D5x} \cdot h_5 + m_6 \cdot \Delta_{D6x} \cdot h_6}{m_1 \cdot \Delta_{D1x} + m_2 \cdot \Delta_{D2x} + m_3 \cdot \Delta_{D3x} + m_4 \cdot \Delta_{D4x} + m_5 \cdot \Delta_{D5x} + m_6 \cdot \Delta_{D6x}}$$

$$H_{effx} = 14.33993\ m$$

- **Altura efectiva (Y):**

$$H_{effy} := \frac{m_1 \cdot \Delta_{D1y} \cdot h_1 + m_2 \cdot \Delta_{D2y} \cdot h_2 + m_3 \cdot \Delta_{D3y} \cdot h_3 + m_4 \cdot \Delta_{D4y} \cdot h_4 + m_5 \cdot \Delta_{D5y} \cdot h_5 + m_6 \cdot \Delta_{D6y} \cdot h_6}{m_1 \cdot \Delta_{D1y} + m_2 \cdot \Delta_{D2y} + m_3 \cdot \Delta_{D3y} + m_4 \cdot \Delta_{D4y} + m_5 \cdot \Delta_{D5y} + m_6 \cdot \Delta_{D6y}}$$

$$H_{effy} = 14.45973\ m$$

9.- Masa efectiva

- **Masa efectiva (X):**

$$M_{effx} := \frac{m_1 \cdot \Delta_{D1x} + m_2 \cdot \Delta_{D2x} + m_3 \cdot \Delta_{D3x} + m_4 \cdot \Delta_{D4x} + m_5 \cdot \Delta_{D5x} + m_6 \cdot \Delta_{D6x}}{\Delta_{Dx}}$$

$$M_{effx} = 366.517\ \frac{s^2}{m} \cdot tonne$$

- **Masa efectiva (Y):**

$$M_{effy} := \frac{m_1 \cdot \Delta_{D1y} + m_2 \cdot \Delta_{D2y} + m_3 \cdot \Delta_{D3y} + m_4 \cdot \Delta_{D4y} + m_5 \cdot \Delta_{D5y} + m_6 \cdot \Delta_{D6y}}{\Delta_{Dy}}$$

$M_{effy} = 359.61 \ \frac{s^2}{m} \cdot tonne$

10.- Desplazamiento de fluencia

- **Muros (X)**

$H_{effx} = 14.34 \ m$

$H_{CF} = 17.137 \ m$

$H_{effx} \leq H_{CF}$

Desplazamiento de fluencia

$$\Delta_y = \phi y \cdot \left(\frac{H_{eff}^{\ 2}}{2} - \frac{H_{eff}^{\ 3}}{6 \cdot H_{CF}} \right)$$

$$\Delta_{yxm} := \phi y_x \cdot \left(\frac{H_{effx}^{\ 2}}{2} - \frac{H_{effx}^{\ 3}}{6 \cdot H_{CF}} \right) \qquad \Delta_{yxm} = 7.604 \ cm$$

- **Muros (Y)**

$H_{effy} = 14.46 \ m$

$H_{CF} = 17.137 \ m$

$H_{effy} \leq H_{CF}$

Desplazamiento de fluencia

$$\Delta_y = \phi y \cdot \left(\frac{H_{eff}^{\ 2}}{2} - \frac{H_{eff}^{\ 3}}{6 \cdot H_{CF}} \right)$$

$$\Delta_{yym} := \phi y_y \cdot \left(\frac{H_{effy}^{\ 2}}{2} - \frac{H_{effy}^{\ 3}}{6 \cdot H_{CF}} \right) \qquad \Delta_{yym} = 9.541 \ cm$$

- **Pórticos (X)**

Mayor luz libre: $L_{bx} := 6.5 \ m$

Peralte (viga): $H_b := 0.7 \ m$

Deriva de fluencia: $\theta_{yx} := 0.5 \cdot \varepsilon_y \cdot \frac{L_{bx}}{H_b} = 0.009$

Desplazamiento de fluencia: $\Delta_{yxp} := \theta_{yx} \cdot H_{effx}$ $\qquad \Delta_{yxp} = 13.316 \ cm$

- **Pórticos (Y):**

Mayor luz libre: $L_{by} := 7.8\ m$

Peralte (viga): $H_b = 0.7\ m$

Deriva de fluencia: $\theta_{yy} := 0.5 \cdot \varepsilon_y \cdot \frac{L_{by}}{H_b} = 0.011$

Desplazamiento de fluencia: $\Delta_{yyp} := \theta_{yy} \cdot H_{effy}$ $\Delta_{yyp} = 16.112\ cm$

11.- Demanda de ductilidad

- **Muros (X):** $u_{wx} := \frac{\Delta_{Dx}}{\Delta_{yxm}}$ $u_{wx} = 3.148$
- **Muros (Y):** $u_{wy} := \frac{\Delta_{Dy}}{\Delta_{yym}}$ $u_{wy} = 2.414$
- **Pórticos (X):** $u_{px} := \frac{\Delta_{Dx}}{\Delta_{yxp}}$ $u_{px} = 1.798$
- **Pórticos (Y):** $u_{py} := \frac{\Delta_{Dy}}{\Delta_{yyp}}$ $u_{py} = 1.429$

12.- Amortiguamiento viscoso equivalente

Concrete Wall Building, Bridges (TT): $\xi_{eq} = 0.05 + 0.444\left(\frac{\mu - 1}{\mu\pi}\right)$

Concrete Frame Building (TF): $\xi_{eq} = 0.05 + 0.565\left(\frac{\mu - 1}{\mu\pi}\right)$

- **Muros (X):** $\xi_{eqxm} := 0.05 + 0.444 \cdot \left(\frac{u_{wx} - 1}{u_{wx} \cdot \pi}\right) = 0.14644$
- **Muros (Y):** $\xi_{eqym} := 0.05 + 0.444 \cdot \left(\frac{u_{wy} - 1}{u_{wy} \cdot \pi}\right) = 0.13278$
- **Pórticos (X):** $\xi_{eqxp} := 0.05 + 0.565 \cdot \left(\frac{u_{px} - 1}{u_{px} \cdot \pi}\right) = 0.12981$

- **Pórticos (Y):**

$$\xi_{eqyp} := 0.05 + 0.565 \cdot \left(\frac{u_{py} - 1}{u_{py} \cdot \pi} \right) = 0.10403$$

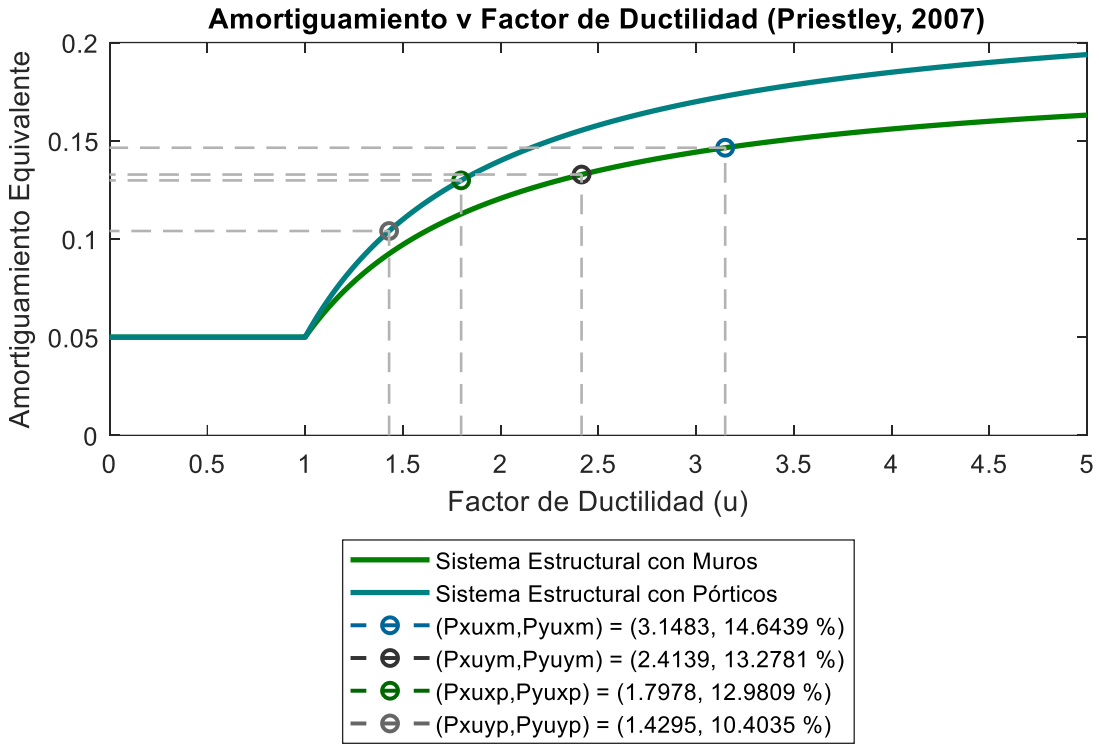


Ilustración 38. Amortiguamiento v Ductilidad. Fuente: Propia

Amortiguamiento viscoso equivalente del sistema

$$\xi_{sis} = \frac{\xi_m \cdot M_{OTMm} + \xi_p \cdot M_{OTMp}}{M_{OTM}}$$

$$M_{OTM0.} := 13.9785 \qquad Mw_{0.} := 8.1474$$

$$M_{OTMF.} := M_{OTM0.} - Mw_{0.}$$

- **Amortiguamiento viscoso equivalente (X):**

$$\xi_{sisx} := \frac{\xi_{eqxm} \cdot Mw_{0.} + \xi_{eqxp} \cdot M_{OTMF.}}{M_{OTM0.}} = 0.1395$$

- **Amortiguamiento viscoso equivalente (Y):**

$$\xi_{sisy} := \frac{\xi_{eqym} \cdot Mw_{0.} + \xi_{eqyp} \cdot M_{OTMF.}}{M_{OTM0.}} = 0.12079$$

13.- Factor de reducción

- **Factor de reducción (X):** $R_{\xi x} := \left(\frac{0.10}{0.05 + \xi_{sisx}} \right)^{0.5} = 0.726$

- **Factor de reducción (Y):** $R_{\xi y} := \left(\frac{0.10}{0.05 + \xi_{sisy}} \right)^{0.5} = 0.765$

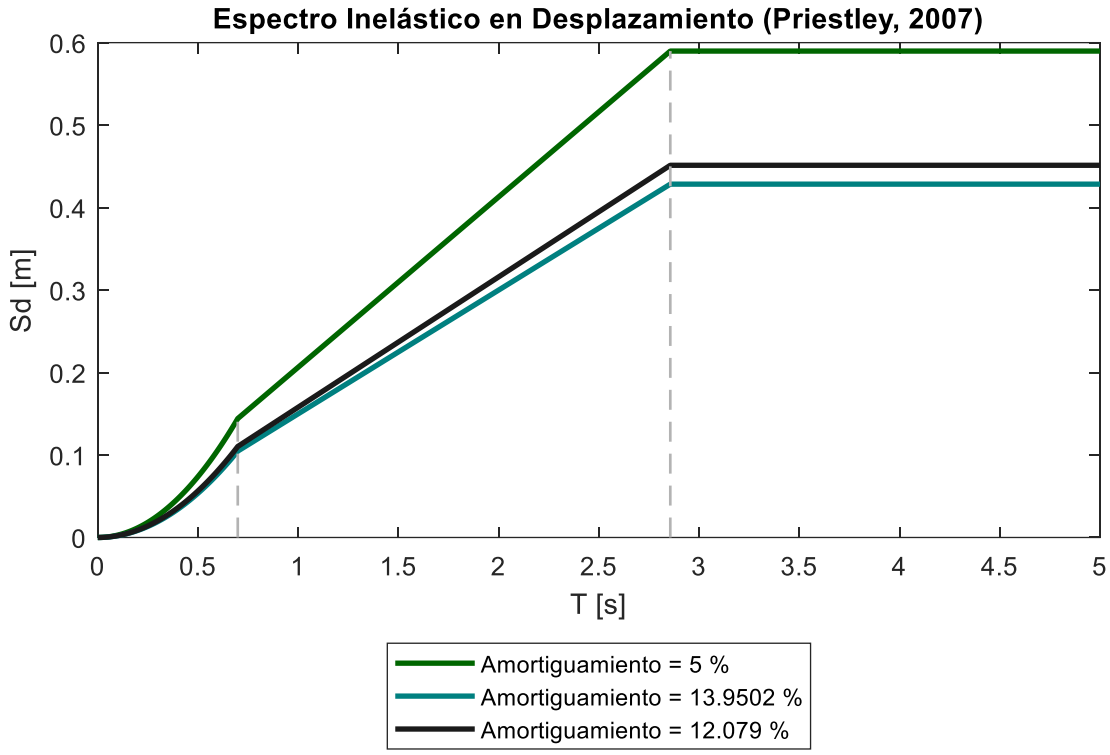


Ilustración 39. Espectro inelástico en desplazamiento. Fuente: Propia

14.- Periodo efectivo

- **Periodo efectivo (X):** $T_{effx} := 1.595\ s$

- **Periodo efectivo (Y):** $T_{effy} := 1.458\ s$

15.- Rigidez efectiva

- **Rigidez efectiva (X):** $k_{effx} := \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot M_{effx}}{T_{effx}^{\ 2}} = 5687.643\ \frac{tonne}{m}$

- **Rigidez efectiva (Y):** $k_{effy} := \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot M_{effy}}{T_{effy}^{\ 2}} = 6678.462 \ \frac{tonne}{m}$

16.- Cortante basal

- **Cortante basal (X):** $V_{DBDx} := k_{effx} \cdot \Delta_{Dx} = 1361.581 \ tonne$
- **Cortante basal (Y):** $V_{DBDy} := k_{effy} \cdot \Delta_{Dy} = 1538.195 \ tonne$

17.- Vector de fuerzas laterales

- **Fuerzas laterales (X):**

$$F_{1x} := V_{DBDx} \cdot \frac{m_1 \cdot \Delta_{D1x}}{m_1 \cdot \Delta_{D1x} + m_2 \cdot \Delta_{D2x} + m_3 \cdot \Delta_{D3x} + m_4 \cdot \Delta_{D4x} + m_5 \cdot \Delta_{D5x} + m_6 \cdot \Delta_{D6x}} = 52.256 \ tonne$$

$$F_{2x} := V_{DBDx} \cdot \frac{m_2 \cdot \Delta_{D2x}}{m_1 \cdot \Delta_{D1x} + m_2 \cdot \Delta_{D2x} + m_3 \cdot \Delta_{D3x} + m_4 \cdot \Delta_{D4x} + m_5 \cdot \Delta_{D5x} + m_6 \cdot \Delta_{D6x}} = 115.539 \ tonne$$

$$F_{3x} := V_{DBDx} \cdot \frac{m_3 \cdot \Delta_{D3x}}{m_1 \cdot \Delta_{D1x} + m_2 \cdot \Delta_{D2x} + m_3 \cdot \Delta_{D3x} + m_4 \cdot \Delta_{D4x} + m_5 \cdot \Delta_{D5x} + m_6 \cdot \Delta_{D6x}} = 179.23 \ tonne$$

$$F_{4x} := V_{DBDx} \cdot \frac{m_4 \cdot \Delta_{D4x}}{m_1 \cdot \Delta_{D1x} + m_2 \cdot \Delta_{D2x} + m_3 \cdot \Delta_{D3x} + m_4 \cdot \Delta_{D4x} + m_5 \cdot \Delta_{D5x} + m_6 \cdot \Delta_{D6x}} = 261.848 \ tonne$$

$$F_{5x} := V_{DBDx} \cdot \frac{m_5 \cdot \Delta_{D5x}}{m_1 \cdot \Delta_{D1x} + m_2 \cdot \Delta_{D2x} + m_3 \cdot \Delta_{D3x} + m_4 \cdot \Delta_{D4x} + m_5 \cdot \Delta_{D5x} + m_6 \cdot \Delta_{D6x}} = 341.844 \ tonne$$

$$F_{6x} := (1 - K') \cdot V_{DBDx} + K' \cdot V_{DBDx} \cdot \frac{m_6 \cdot \Delta_{D6x}}{m_1 \cdot \Delta_{D1x} + m_2 \cdot \Delta_{D2x} + m_3 \cdot \Delta_{D3x} + m_4 \cdot \Delta_{D4x} + m_5 \cdot \Delta_{D5x} + m_6 \cdot \Delta_{D6x}}$$

$$F_{6x} = 505.936 \ tonne$$

- **Fuerzas laterales (Y):**

$$F_{1y} := V_{DBDy} \cdot \frac{m_1 \cdot \Delta_{D1y}}{m_1 \cdot \Delta_{D1y} + m_2 \cdot \Delta_{D2y} + m_3 \cdot \Delta_{D3y} + m_4 \cdot \Delta_{D4y} + m_5 \cdot \Delta_{D5y} + m_6 \cdot \Delta_{D6y}} = 54.105 \ tonne$$

$$F_{2y} := V_{DBDy} \cdot \frac{m_2 \cdot \Delta_{D2y}}{m_1 \cdot \Delta_{D1y} + m_2 \cdot \Delta_{D2y} + m_3 \cdot \Delta_{D3y} + m_4 \cdot \Delta_{D4y} + m_5 \cdot \Delta_{D5y} + m_6 \cdot \Delta_{D6y}} = 124.55 \ tonne$$

$$F_{3y} := V_{DBDy} \cdot \frac{m_3 \cdot \Delta_{D3y}}{m_1 \cdot \Delta_{D1y} + m_2 \cdot \Delta_{D2y} + m_3 \cdot \Delta_{D3y} + m_4 \cdot \Delta_{D4y} + m_5 \cdot \Delta_{D5y} + m_6 \cdot \Delta_{D6y}} = 198.179 \ tonne$$

$$F_{4y} := V_{DBDy} \cdot \frac{m_4 \cdot \Delta_{D4y}}{m_1 \cdot \Delta_{D1y} + m_2 \cdot \Delta_{D2y} + m_3 \cdot \Delta_{D3y} + m_4 \cdot \Delta_{D4y} + m_5 \cdot \Delta_{D5y} + m_6 \cdot \Delta_{D6y}} = 295.768 \ tonne$$

$$F_{5y} := V_{DBDy} \cdot \frac{m_5 \cdot \Delta_{D5y}}{m_1 \cdot \Delta_{D1y} + m_2 \cdot \Delta_{D2y} + m_3 \cdot \Delta_{D3y} + m_4 \cdot \Delta_{D4y} + m_5 \cdot \Delta_{D5y} + m_6 \cdot \Delta_{D6y}} = 391.246 \ tonne$$

$$F_{6y} := (1 - K') \cdot V_{DBDy} + K' \cdot V_{DBDy} \cdot \frac{m_6 \cdot \Delta_{D6y}}{m_1 \cdot \Delta_{D1y} + m_2 \cdot \Delta_{D2y} + m_3 \cdot \Delta_{D3y} + m_4 \cdot \Delta_{D4y} + m_5 \cdot \Delta_{D5y} + m_6 \cdot \Delta_{D6y}}$$

$$F_{6y} = 580.733 \ tonne$$

3.3.4.2. Procesamiento de resultados empleando rutinas de Matlab

3.3.4.2.1. Pórtico Resistente a Momento

CORTANTE DE PISO, DESPLAZAMIENTO Y DERIVAS PÓRTICOS RESISTENTES A MOMENTO

```
clc
clear
close all
```

IMPORTACIÓN DATOS EXCEL

```
VNEC=readmatrix('Story_Shears_DBD_P.xlsx','sheet',"NEC X - Y");
VPR=readmatrix('Story_Shears_DBD_P.xlsx','sheet',"PRIESTLEY X - Y");

DisNEC=readmatrix('Displacement_DBD_P.xlsx','sheet',"NEC X - Y");
DisPR=readmatrix('Displacement_DBD_P.xlsx','sheet',"PRIESTLEY X - Y");

DriNEC=readmatrix('Drifts_DBD_P.xlsx','sheet',"NEC X - Y");
DriPR=readmatrix('Drifts_DBD_P.xlsx','sheet',"PRIESTLEY X - Y");
```

CORTANTE DE PISO

Coordenadas en Y (Altura)

```
CoordY=VNEC(:,2);
CoordY(isnan(CoordY))=0;
Aux=VNEC(3:end,2);
```

```
Aux(isnan(Aux))=0;
Aux=[0;Aux;0];
Coord_Y=CoordY+Aux; %Altura [m]
```

Coordenadas en X (Cortante por piso)

```
VNECx=VNEC(:,4); %Cortante [T] NEC en dirección X
VNECy=VNEC(:,5)*-1; %Cortante [T] NEC en dirección Y
VPRx=VPR(:,4); %Cortante [T] PRIESTLEY en dirección X
VPRy=VPR(:,5)*-1; %Cortante [T] PRIESTLEY en dirección Y
```

Gráfico

```
figure()
hold on
box on
subplot(1,2,1)
plot(VNECx,Coord_Y,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(VNECy,Coord_Y,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
xlim([-1000 1000])
xlabel('Cortante [T]')
ylabel('Altura [m]')
title('Cortante de Piso')
legend('NEC (Dirección X)','NEC (Dirección Y)','location','southoutside')
grid on
subplot(1,2,2)
plot(VPRx,Coord_Y,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(VPRy,Coord_Y,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
xlim([-3000 3000])
xlabel('Cortante [T]')
ylabel('Altura [m]')
title('Cortante de Piso')
legend('PRIESTLEY (Dirección X)','PRIESTLEY (Dirección
Y)','location','southoutside')
grid on
fig=gcf;
fig.Units='normalized';
set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
set(gcf,'Visible','on')
hold off
```

DESPLAZAMIENTO INELÁSTICO

Coordenadas en Y (Altura)

```
Coord_YD=DisNEC(:,2); %Altura [m]
```

Coordenadas en X (Desplazamiento inelástico)

```
DisNECx=DisNEC(:,4)*100;  %Desplazamiento [cm] NEC en dirección X
DisNECy=DisNEC(:,5)*-1*100; %Desplazamiento [cm] NEC en dirección Y
DisPRx=DisPR(:,4)*100; %Desplazamiento [cm] NEC en dirección X
DisPRy=DisPR(:,5)*-1*100; %Desplazamiento [cm] NEC en dirección Y
```

Gráfico

```
figure()
hold on
box on
subplot(1,2,1)
plot(DisNECx,Coord_YD,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(DisNECy,Coord_YD,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
xlim([-10 10])
xlabel('Desplazamiento [cm]')
ylabel('Altura [m]')
title('Desplazamiento Inelástico')
legend('NEC (Dirección X)','NEC (Dirección Y)','location','southoutside')
grid on
subplot(1,2,2)
plot(DisPRx,Coord_YD,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(DisPRy,Coord_YD,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
xlim([-20 20])
xlabel('Desplazamiento [cm]')
ylabel('Altura [m]')
title('Desplazamiento Inelástico')
legend('PRIESTLEY (Dirección X)','PRIESTLEY (Dirección
Y)','location','southoutside')
grid on
fig=gcf;
fig.Units='normalized';
set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
set(gcf,'Visible','on')
hold off
```

DERIVA INELÁSTICA

Coordenadas en Y (Altura)

```
Coord_YDr=DriNEC(:,2); %Altura [m]
```

Coordenadas en X (Deriva inelástica)

```
DriNECx=DriNEC(:,4)*100;  %Deriva [%] NEC en dirección X
DriNECy=DriNEC(:,5)*-1*100; %Deriva [%] NEC en dirección Y
DriPRx=DriPR(:,4)*100; %Deriva [%] PRIESTLEY en dirección X
DriPRy=DriPR(:,5)*-1*100; %Deriva [%] PRIESTLEY en dirección Y
```

Gráfico

```
figure()
hold on
box on
subplot(1,2,1)
plot(DriNECx,Coord_YDr,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(DriNECy,Coord_YDr,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
xlim([-1 1])
xlabel('Deriva de piso [%]')
ylabel('Altura [m]')
title('Deriva Inelástica')
legend('NEC (Dirección X)','NEC (Dirección Y)','location','southoutside')
grid on
subplot(1,2,2)
plot(DriPRx,Coord_YDr,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(DriPRy,Coord_YDr,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
xlim([-2 2])
xlabel('Deriva de piso [%]')
ylabel('Altura [m]')
title('Deriva Inelástica')
legend('PRIESTLEY (Dirección X)','PRIESTLEY (Dirección
Y)','location','southoutside')
grid on
fig=gcf;
fig.Units='normalized';
set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
set(gcf,'Visible','on')
hold off
```

3.3.4.2.2. Sistema Dual

CORTANTE DE PISO, DESPLAZAMIENTO Y DERIVAS PÓRTICOS RESISTENTES A MOMENTO

```
clc
clear
close all
```

IMPORTACIÓN DATOS EXCEL

```
VPR=readmatrix('Story_Shears_DBD_M.xlsx','sheet',"PRIESTLEY X - Y");

DisPR=readmatrix('Displacement_DBD_M.xlsx','sheet',"PRIESTLEY X - Y");

DriPR=readmatrix('Drifts_DBD_M.xlsx','sheet',"PRIESTLEY X - Y");
```

CORTANTE DE PISO

Coordenadas en Y (Altura)

```
CoordY=VPR(:,2);
CoordY(isnan(CoordY))=0;
Aux=VPR(3:end,2);
Aux(isnan(Aux))=0;
Aux=[0;Aux;0];
Coord_Y=CoordY+Aux; %Altura [m]
```

Coordenadas en X (Cortante por piso)

```
VPRx=VPR(:,4); %Cortante [T] PRIESTLEY en dirección X
VPRy=VPR(:,5)*-1; %Cortante [T] PRIESTLEY en dirección Y
```

Gráfico

```
figure()
hold on
box on
plot(VPRx,Coord_Y,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(VPRy,Coord_Y,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
xlim([-2000 2000])
xlabel('Cortante [T]')
ylabel('Altura [m]')
title('Cortante de Piso')
```

```
 legend('PRIESTLEY (Dirección X)','PRIESTLEY (Dirección
Y)','location','southoutside')
 grid on
 fig=gcf;
 fig.Units='normalized';
 set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
 set(gcf,'Visible','on')
 hold off
```

DESPLAZAMIENTO INELÁSTICO

Coordenadas en Y (Altura)

```
 Coord_YD=DisPR(:,2); %Altura [m]
```

Coordenadas en X (Desplazamiento inelástico)

```
 DisPRx=DisPR(:,4)*100; %Desplazamiento [cm] NEC en dirección X
 DisPRy=DisPR(:,5)*-1*100; %Desplazamiento [cm] NEC en dirección Y
```

Gráfico

```
 figure()
 hold on
 box on
 plot(DisPRx,Coord_YD,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
 hold on
 plot(DisPRy,Coord_YD,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
 xlim([-8 8])
 xlabel('Desplazamiento [cm]')
 ylabel('Altura [m]')
 title('Desplazamiento Inelástico')
 legend('PRIESTLEY (Dirección X)','PRIESTLEY (Dirección
Y)','location','southoutside')
 grid on
 fig=gcf;
 fig.Units='normalized';
 set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
 set(gcf,'Visible','on')
 hold off
```

DERIVA INELÁSTICA

Coordenadas en Y (Altura)

```
 Coord_YDr=DriPR(:,2); %Altura [m]
```

Coordenadas en X (Deriva inelástica)

```
DriPRx=DriPR(:,4)*100; %Deriva [%] PRIESTLEY en dirección X
DriPRy=DriPR(:,5)*-1*100; %Deriva [%] PRIESTLEY en dirección Y
```

Gráfico

```
figure()
hold on
box on
plot(DriPRx,Coord_YDr,'-x','color',[0 0.7 0.3],'LineWidth',1.5)
hold on
plot(DriPRy,Coord_YDr,'-x','color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',1.5)
xlim([-0.6 0.8])
xlabel('Deriva de piso [%]')
ylabel('Altura [m]')
title('Deriva Inelástica')
legend('PRIESTLEY (Dirección X)','PRIESTLEY (Dirección
Y)','location','southoutside')
grid on
fig=gcf;
fig.Units='normalized';
set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
set(gcf,'Visible','on')
hold off
```

3.3.4.3. Presentación de resultados (Pórticos resistentes a momento)

- Cortante basal

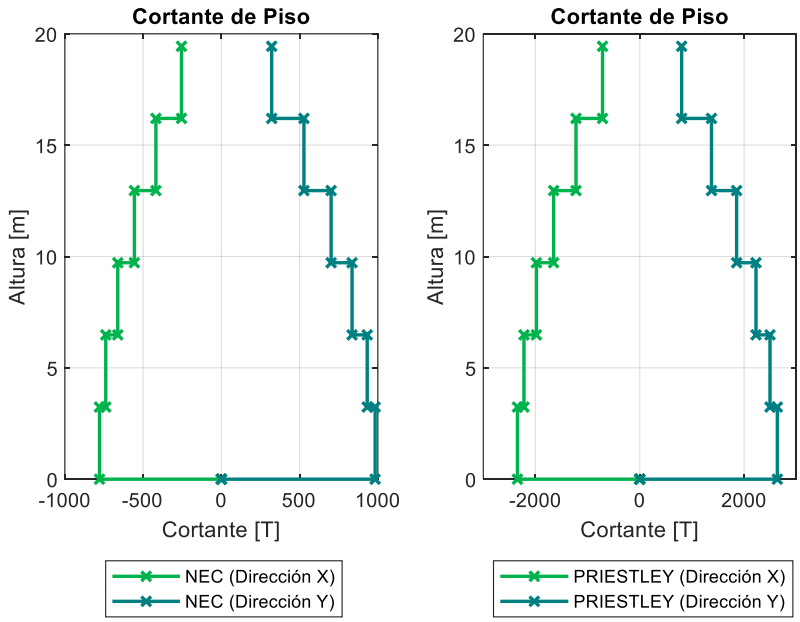


Ilustración 40.Cortante de piso pórticos resistentes a momento. Fuente: Propia

- Desplazamiento

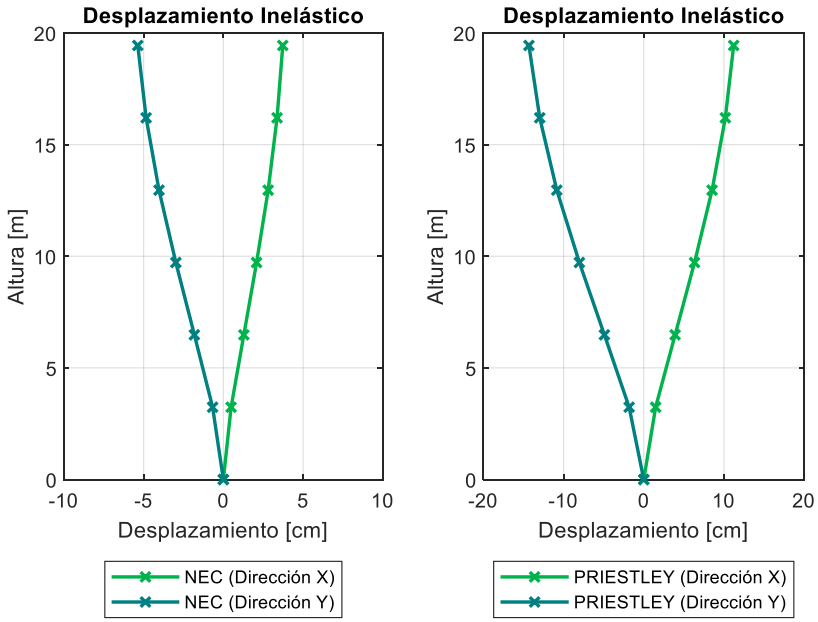


Ilustración 41. Desplazamiento inelástico pórticos resistentes a momento. Fuente: Propia

- Deriva de piso

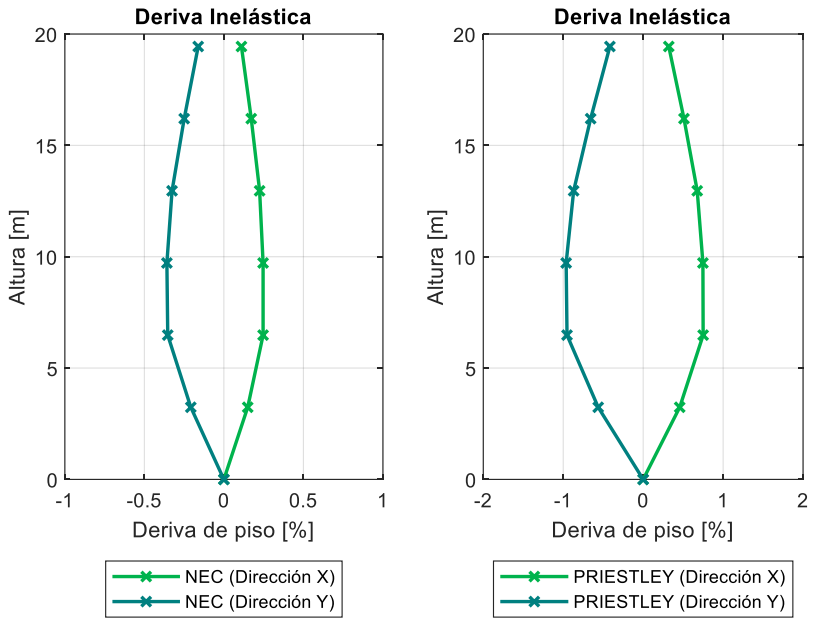


Ilustración 42. Deriva inelástica pórticos resistentes a momento. Fuente: Propia

3.3.4.4. Presentación de resultados (Sistema dual)

- Cortante basal

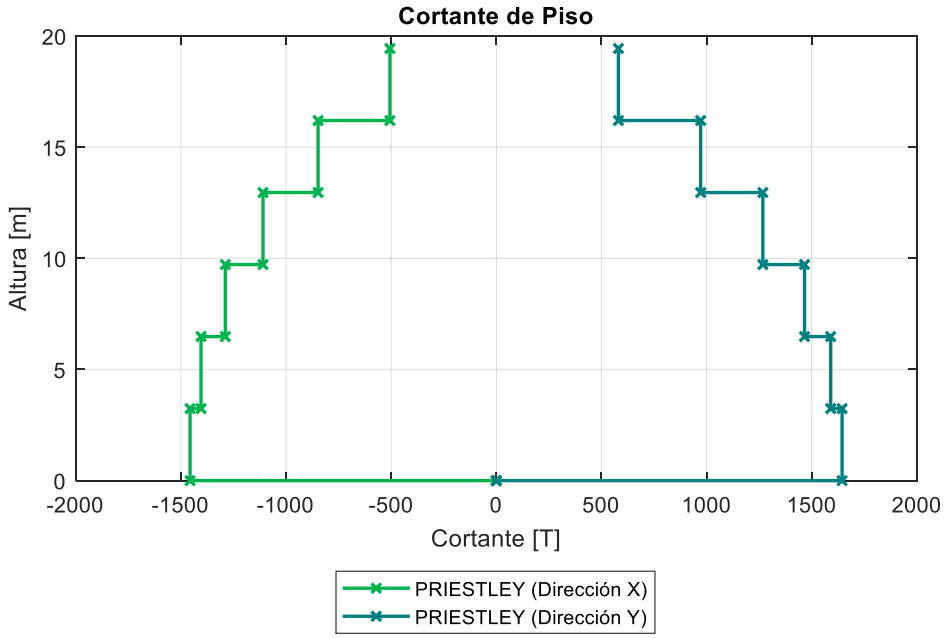


Ilustración 43.Cortante de piso sistema dual. Fuente: Propia

- Desplazamiento

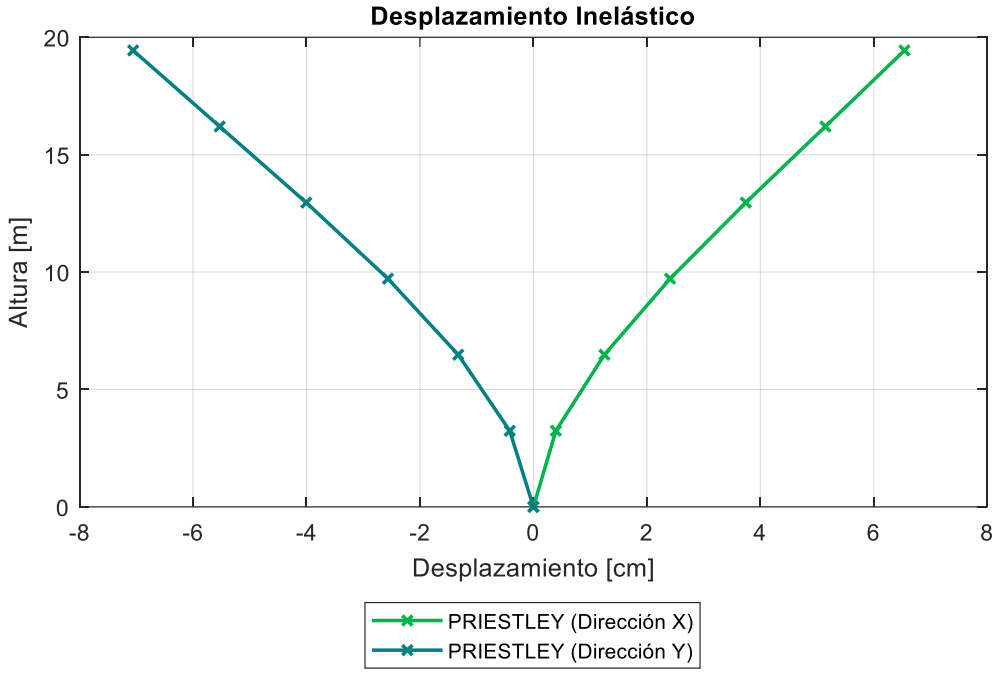


Ilustración 44. Desplazamiento inelástico sistema dual. Fuente: Propia

- Deriva de piso

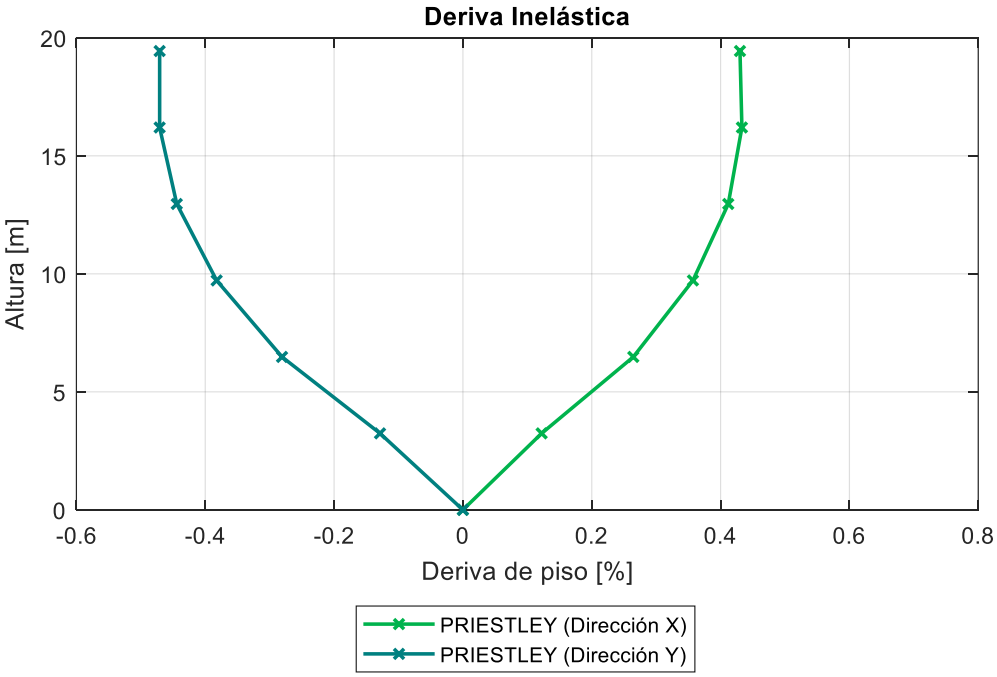


Ilustración 45. Deriva inelástica sistema dual. Fuente: Propia

3.4. Discusión de resultados

Para la discusión de resultados se realiza una comparativa entre el Análisis Modal Espectral (AME) para el DBF y el Diseño Directo Basado en Desplazamientos (DDBD) de (Priestley et al., 2007) para el DBD. Esta decisión se debe a que el procedimiento presentado por la (NEC Committee-SE-DS, 2015) presenta incongruencias en la forma de calcular el factor de reducción de demanda sísmica y no emplea el espectro de desplazamientos para determinar el periodo de la estructura.

3.4.1. Período

	Período T (Pórticos) [s]		
	AME	**REAL**	**Ratio**
Dir X	0.795	0.897	13 %
Dir Y	0.795	0.835	5 %

	Período T (Pórticos) [s]		
	REAL	**PRIESTLEY**	**Ratio**
Dir X	0.897	1.475	64 %
Dir Y	0.835	1.391	67 %

	Período T (Muros) [s]		
	AME	**REAL**	**Ratio**
Dir X	0.509	0.673	32 %
Dir Y	0.509	0.653	28 %

	Período T (Muros) [s]		
	REAL	**PRIESTLEY**	**Ratio**
Dir X	0.673	1.595	137 %
Dir Y	0.653	1.548	137 %

Tabla 24. Comparativa de períodos. Fuente: Propia

Nota: *La Tabla 24 establece los períodos obtenidos por las diferentes metodologías estudiadas en las dos direcciones ortogonales. Se debe considerar que el período establecido como "REAL" corresponde al período obtenido al modelar la estructura en Etabs. El Ratio es una función en porcentaje que resulta al dividir el período de la metodología con respecto al período obtenido en Etabs, expresado como variación absoluta.*

De acuerdo con la tabla presentada se tiene que los períodos determinados para el DBF se aproximan más a los obtenidos por el análisis modal que realiza el software Etabs. La variación promedio para el DBF es del 9 % en pórticos y del 30 % en muros, mientras que en el DBD estas variaciones son del 65.5 % y el 137 % en pórticos y muros respectivamente.

3.4.2. Cortante Basal

	Cortante Basal V (Pórticos) [Ton]		
	AME	**PRIESTLEY**	**Ratio**
Dir X	643.037	2182.013	3.39
Dir Y	643.037	2453.506	3.82

	Cortante Basal V (Muros) [Ton]		
	AME	**PRIESTLEY**	**Ratio**
Dir X	605.887	1361.581	2.25
Dir Y	605.887	1538.195	2.54

Tabla 25. Comparativa cortante basal. Fuente: Propia

Al analizar el cortante en la base para las dos filosofías de diseño se tiene que en el DBD los valores exceden 3.39 veces al valor obtenido por el Análisis Modal Espectral en la dirección X y 3.82 veces en dirección Y para pórticos. A su vez en muros, se tiene una diferencia menor que llega a ser de 2.25 veces y 2.54 veces en las direcciones X e Y respectivamente.

Se debe considerar que el cortante basal obtenido para el DBD es mayor al del DBF porque considera la sobre resistencia de la estructura debido a que tiene en cuenta la ductilidad explícitamente. A su vez, es importante tener en cuenta que el cortante de muros para este caso particular es menor que el de pórticos, puesto que se realizó una reducción en las dimensiones en los elementos.

3.4.3. Cortante de piso

3.4.3.1. Pórtico resistente a momento

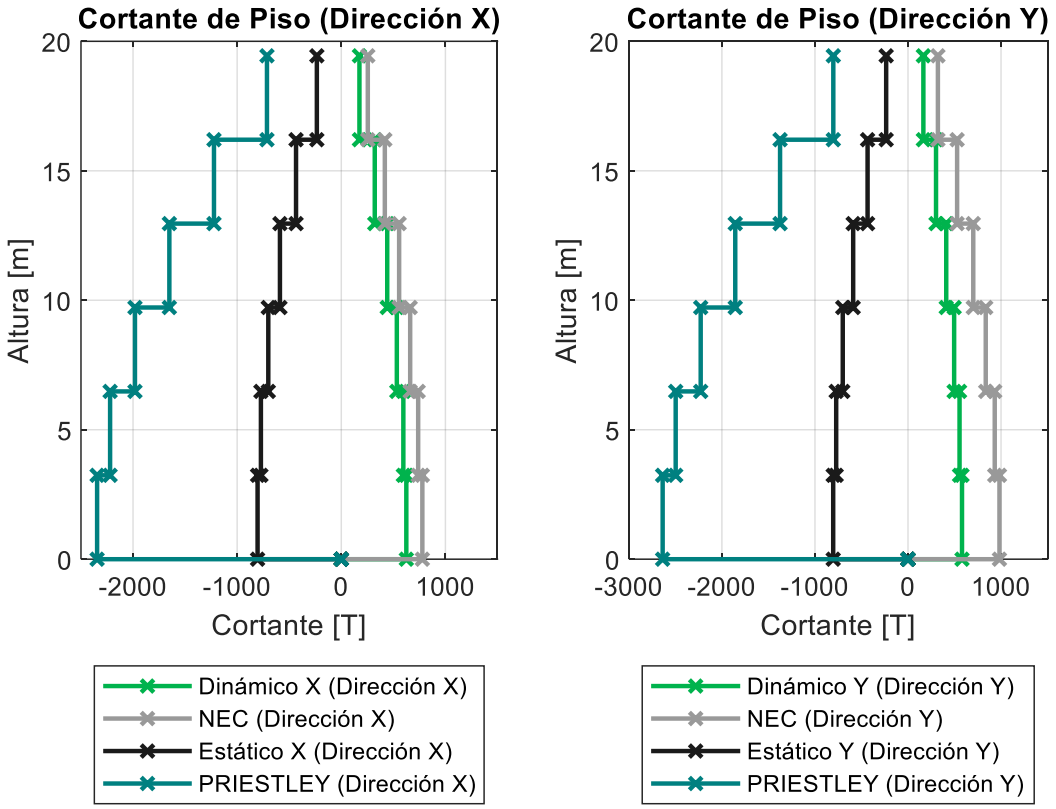


Ilustración 46. Comparativa cortante de piso. Fuente: Propia

	Cortante de Piso (Dir X) [Ton]			
	DBF		DBD	
	AME X	Estático X	NEC	PRIESTLEY
Piso 6	174.505	234.558	254.715	713.825
Piso 5	321.672	434.442	418.128	1222.665
Piso 4	441.392	589.178	555.739	1651.162
Piso 3	533.499	701.046	661.824	1981.492
Piso 2	596.321	771.837	738.519	2220.309
Piso 1	624.690	803.796	778.610	2345.145
Base	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 26. Comparativa cortante de piso dirección X. Fuente: Propia

	Cortante de Piso (Dir Y) [Ton]			
	DBF		DBD	
	AME Y	Estático Y	NEC	PRIESTLEY
Piso 6	165.421	234.558	321.523	802.641
Piso 5	301.323	434.442	527.797	1374.793
Piso 4	411.177	589.178	701.501	1856.605
Piso 3	495.881	701.046	835.410	2228.035
Piso 2	553.958	771.837	932.222	2496.566
Piso 1	580.480	803.796	982.828	2636.935
Base	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 27. Comparativa cortante de piso dirección Y. Fuente: Propia

3.4.3.2. Sistema dual

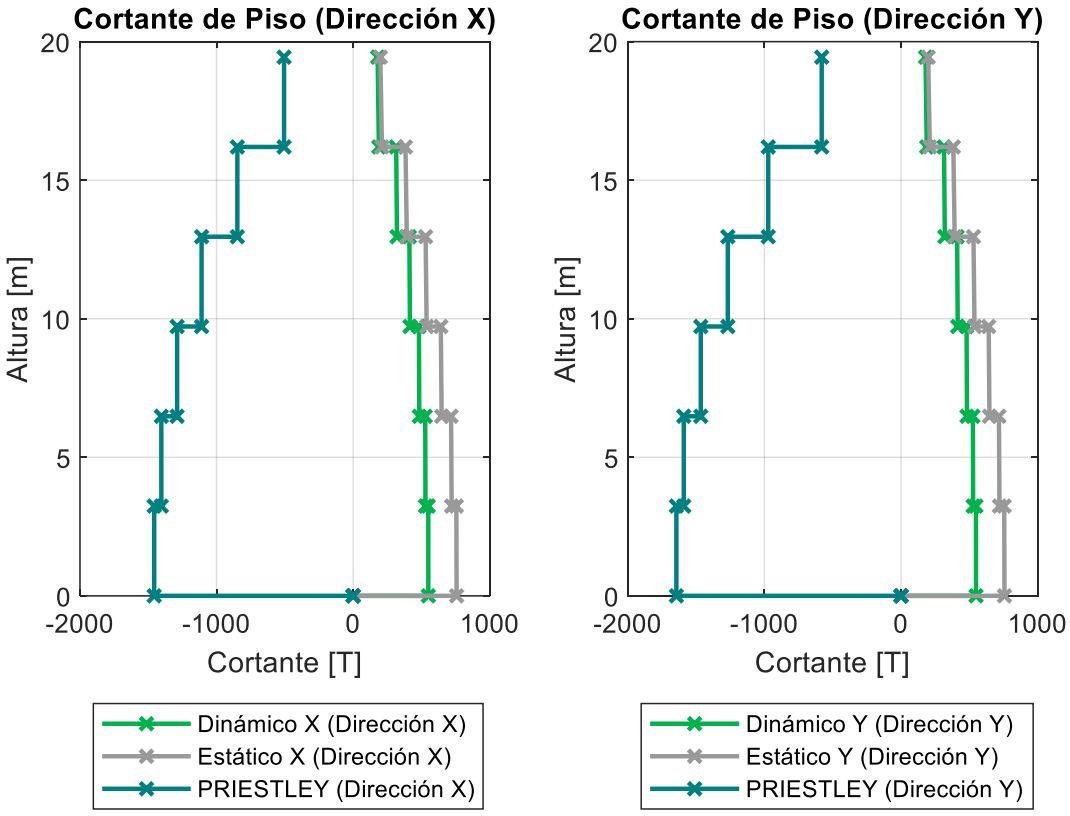


Ilustración 47. Comparativa cortante de piso. Fuente: Propia

	Cortante de Piso (Dir X) [Ton]		
	DBF		DBD
	AME X	Estático X	PRIESTLEY
Piso 6	187.956	210.808	505.936
Piso 5	320.917	392.744	847.78
Piso 4	415.916	538.144	1109.628
Piso 3	484.336	647.596	1288.858
Piso 2	529.486	720.851	1404.397
Piso 1	550.408	757.361	1456.653
Base	0.000	0.000	0.000

Tabla 28. Comparativa cortante de piso dirección X. Fuente: Propia

	Cortante de Piso (Dir Y) [Ton]		
	DBF		DBD
	AME Y	Estático Y	PRIESTLEY
Piso 6	188.222	210.808	580.733
Piso 5	320.765	392.744	971.979
Piso 4	415.113	538.144	1267.747
Piso 3	483.098	647.596	1465.926
Piso 2	528.098	720.851	1590.476
Piso 1	549.184	757.361	1644.581
Base	0.000	0.000	0.000

Tabla 29. Comparativa cortante de piso dirección Y. Fuente: Propia

La distribución del cortante de piso depende de la rigidez de la estructura, que a su vez depende del período de vibración, por lo que es evidente que la distribución por piso tendrá diferentes solicitaciones. Al comparar esto en pórticos se tiene una diferencia del 22 % para la dirección X y del 43 % para la dirección Y. De la misma manera, se tiene que para muros esta diferencia es del 62 % y 67 % en la dirección X e Y respectivamente. En este punto se puede observar que la metodología de Priestley guarda mejor relación con el DBF para pórticos que para muros.

3.4.4. Desplazamiento de piso

3.4.4.1. Pórtico resistente a momento

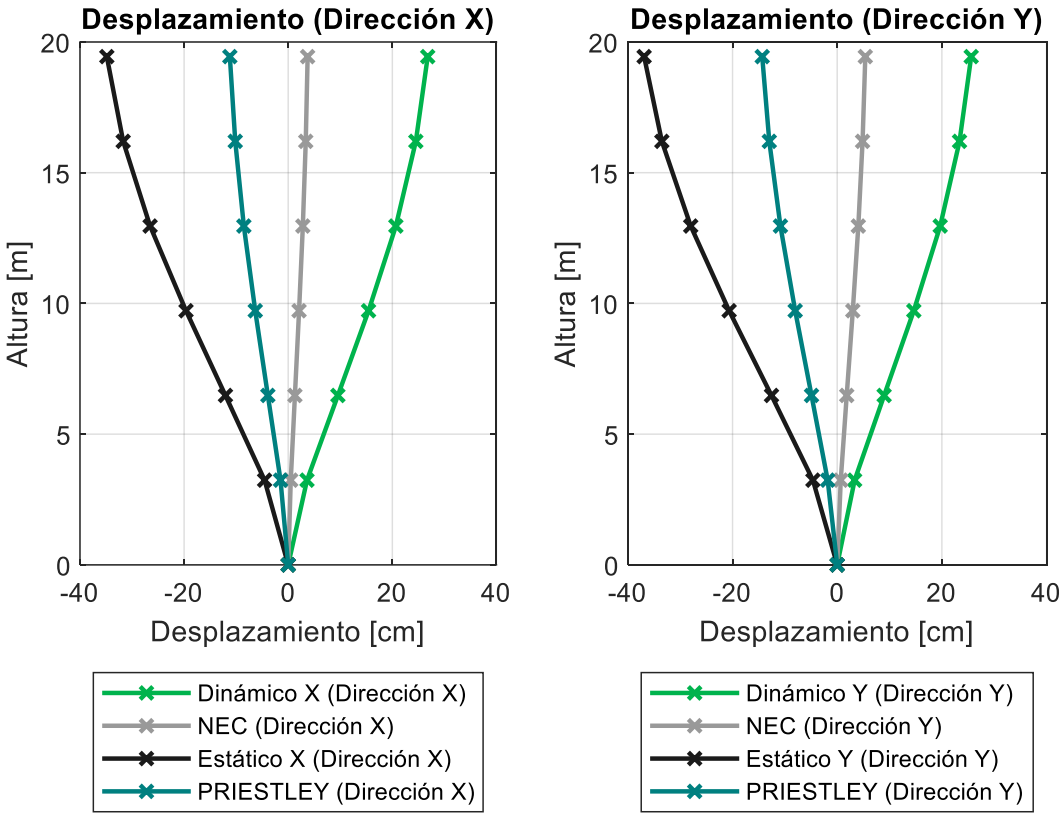


Ilustración 48. Comparativo desplazamiento de piso. Fuente: Propia

	Desplazamiento Inelástico (Dir X) [cm]			
	DBF		DBD	
	AME X	Estático X	NEC	PRIESTLEY
Piso 6	26.797	34.843	3.725	11.214
Piso 5	24.514	31.702	3.368	10.176
Piso 4	20.678	26.533	2.811	8.522
Piso 3	15.430	19.634	2.083	6.332
Piso 2	9.542	12.057	1.284	3.911
Piso 1	3.607	4.537	0.486	1.480
Base	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 30. Comparativo desplazamiento de piso dirección X. Fuente: Propia

	Desplazamiento Inelástico (Dir Y) [cm]			
	DBF		DBD	
	AME Y	Estático Y	NEC	PRIESTLEY
Piso 6	25.600	36.890	5.367	14.326
Piso 5	23.372	33.502	4.844	12.977
Piso 4	19.677	27.991	4.035	10.849
Piso 3	14.635	20.646	2.979	8.031
Piso 2	8.964	12.557	1.818	4.909
Piso 1	3.329	4.639	0.674	1.823
Base	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 31. Comparativo desplazamiento de piso dirección Y. Fuente: Propia

3.4.4.2. Sistema dual

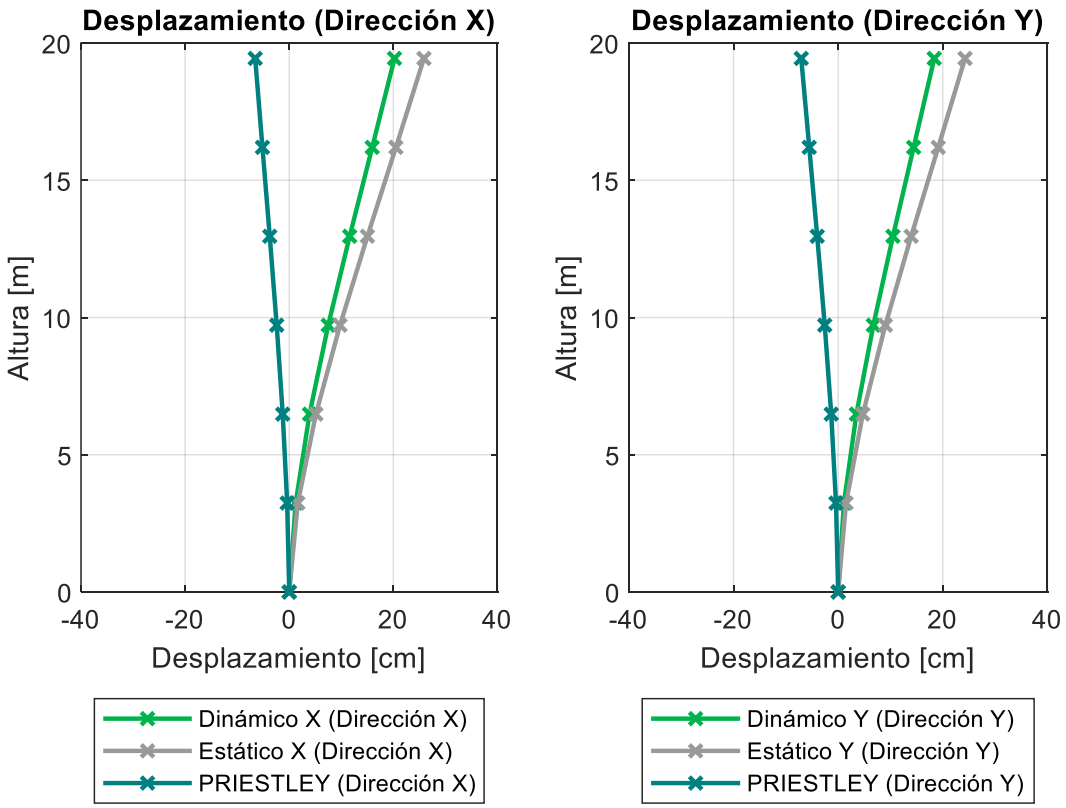


Ilustración 49. Comparativa desplazamiento de piso. Fuente: Propia

	Desplazamiento Inelástico (Dir X) [cm]		
	DBF		DBD
	AME X	Estático X	PRIESTLEY
Piso 6	20.220	25.875	6.5396
Piso 5	15.940	20.492	5.146
Piso 4	11.613	15.021	3.7428
Piso 3	7.485	9.755	2.4083
Piso 2	3.897	5.126	1.2513
Piso 1	1.234	1.642	0.3958
Base	0.000	0.000	0.000

Tabla 32. Comparativo desplazamiento de piso dirección X. Fuente: Propia

	Desplazamiento Inelástico (Dir Y) [cm]		
	DBF		DBD
	AME Y	Estático Y	PRIESTLEY
Piso 6	18.358	24.246	7.0545
Piso 5	14.422	19.121	5.529
Piso 4	10.468	13.953	4.0037
Piso 3	6.722	9.018	2.5643
Piso 2	3.486	4.713	1.3256
Piso 1	1.101	1.502	0.4169
Base	0.000	0.000	0.000

Tabla 33. Comparativo desplazamiento de piso dirección Y. Fuente: Propia

Se tiene que el DBD presenta valores 2.42 veces menores para pórticos en la dirección X y 1.81 veces menores en dirección Y respecto a los valores obtenidos para el DBF de desplazamientos de piso. De manera similar en muros se tiene que los desplazamientos de piso en dirección X son 3.11 veces menores y en dirección Y son 2.62 veces menores. En este punto se puede identificar que a pesar de que los cortantes por piso son más altos para el DBD, los desplazamientos son menores.

3.4.5. Deriva de piso

3.4.5.1. Pórtico resistente a momento

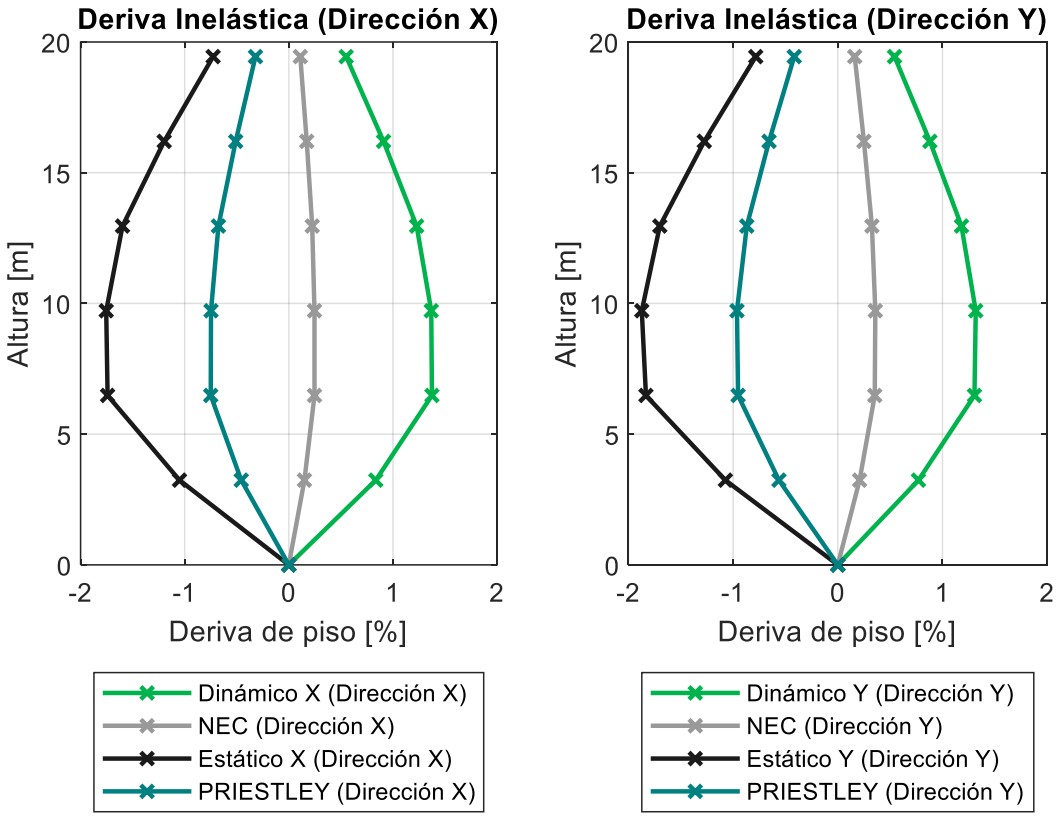


Ilustración 50. Comparativa deriva de piso. Fuente: Propia

	Deriva Inelástica (Dir X) [%]			
	DBF		DBD	
	AME X	Estático X	NEC	PRIESTLEY
Piso 6	0.551	0.727	0.110	0.320
Piso 5	0.910	1.197	0.172	0.510
Piso 4	1.228	1.597	0.225	0.676
Piso 3	1.368	1.754	0.247	0.747
Piso 2	1.375	1.741	0.247	0.750
Piso 1	0.835	1.050	0.150	0.457
Base	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 34. Comparativa deriva de piso dirección X. Fuente: Propia

	Deriva Inelástica (Dir Y) [%]			
	DBF		DBD	
	AME Y	Estático Y	NEC	PRIESTLEY
Piso 6	0.542	0.784	0.162	0.416
Piso 5	0.880	1.276	0.250	0.657
Piso 4	1.181	1.700	0.326	0.870
Piso 3	1.318	1.873	0.358	0.964
Piso 2	1.306	1.833	0.353	0.953
Piso 1	0.770	1.074	0.208	0.563
Base	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 35. Comparativa deriva de piso dirección Y. Fuente: Propia

3.4.5.2. Sistema dual

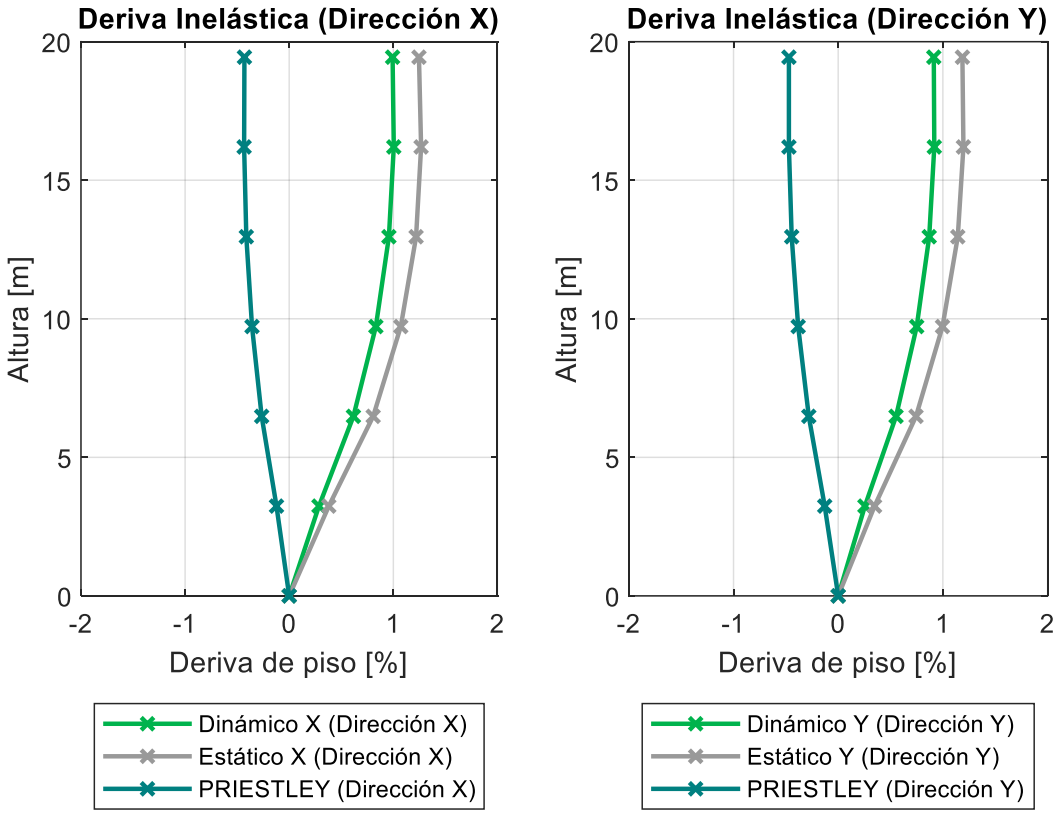


Ilustración 51. Comparativa deriva de piso. Fuente: Propia

	Deriva Inelástica (Dir X) [%]		
	DBF		DBD
	AME X	Estático X	PRIESTLEY
Piso 6	0.993	1.246	0.4301
Piso 5	1.004	1.267	0.4331
Piso 4	0.958	1.219	0.4119
Piso 3	0.832	1.072	0.3571
Piso 2	0.617	0.806	0.2645
Piso 1	0.286	0.380	0.1222
Base	0.000	0.000	0

Tabla 36. Comparativa deriva de piso dirección X. Fuente: Propia

	Deriva Inelástica (Dir Y) [%]		
	DBF		DBD
	AME Y	Estático Y	PRIESTLEY
Piso 6	0.913	1.1868	0.4708
Piso 5	0.918	1.1964	0.4708
Piso 4	0.869	1.1424	0.4442
Piso 3	0.750	0.9966	0.3823
Piso 2	0.553	0.7434	0.2808
Piso 1	0.255	0.3474	0.1287
Base	0.000	0.000	0.000

Tabla 37. Comparativa deriva de piso dirección Y. Fuente: Propia

La deriva de piso es uno de los indicadores de desempeño que exigen los códigos normativos, para el caso de Ecuador este valor se ha fijado en un 2 %. Dentro del análisis realizado se tiene que para pórticos en el DBF los valores promedio de deriva de piso en el sentido X exceden en un 44 % a los obtenidos con el DBD y un 26 % para el sentido Y. Para muros, se tiene para la dirección X que el DBF es 57 % mayor en promedio al DBD. Mientras que para la dirección Y es 49 % mayor. Es importante recalcar que todas las metodologías empleadas cumplen con la deriva límite de servicio.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Para ambas filosofías de diseño sismo resistente se han seguido los procedimientos establecidos en normativa y bibliografía vigente, a partir de los cuales se ha determinado ciertas discrepancias en los períodos calculados para el DBF y el DBD con relación al período de la estructura (obtenido mediante el análisis modal espectral en Etabs). En el DBF el período es una función de la altura total de la edificación y el sistema estructural empleado, esto de manera implícita está asumiendo la rigidez de la estructura, puesto que, las expresiones empleadas se han determinado a partir de valores empíricos. En el DBD el período de la estructura es función del amortiguamiento que requiere la misma, el que a su vez depende de la demanda de ductilidad. Sin embargo, el período calculado para el DBF es más cercano al real, a pesar de que la metodología del DBD resulta más consistente de manera conceptual.
- Uno de los puntos clave establecido por los autores del DBD es la forma de determinar la rigidez en el DBF, que resulta más racional para el DBD. En el DBF la rigidez está implícita en el sistema estructural y la altura del edificio, mientras que en el DBD esta se determina a partir del período de la estructura para el que se desarrolla espectros de desplazamiento para diferentes niveles de amortiguamiento que está en función de la ductilidad. Esto se asocia a que para un período más bajo la rigidez requerida es mayor, puesto que es inversamente proporcional. De acuerdo con los resultados obtenidos en período se puede afirmar que la rigidez requerida para el DBD es mayor que para el DBF, lo que resulta en la necesidad de secciones mayores de los elementos estructurales.

- El cortante basal de las estructuras es de igual manera una función de la rigidez, por lo que para una mayor demanda de rigidez se obtendrá mayores cortantes en la base. En el DBD estos cortantes consideran la sobre resistencia de la estructura, esta sobre resistencia es la obtenida por la ductilidad (que es la capacidad de la estructura para incursionar en el rango no lineal). Por lo tanto, estos valores entre DBF y DBD variarán en relación con la ductilidad de la estructura. Es importante notar que el DBF no considera la ductilidad de manera directa, siendo esta asumida por el sistema estructural a emplearse, lo que se representa como un factor de reducción de demanda sísmica que en la Norma Ecuatoriana de la Construcción no está adecuadamente explicada.
- El cortante de piso representa la demanda de capacidad que requiere la estructura, es decir, para desplazamientos menores esta demanda es mayor, lo que se puede evidenciar en los pisos altos, puesto que el cortante es menor y el desplazamiento es mayor. En el DBF los desplazamientos resultan mayores obteniendo así una menor demanda de cortante, por lo que se puede afirmar que para el DBD se requieren elementos más robustos capaces de soportar esta demanda.
- Para ambas metodologías se ha logrado cumplir los requisitos normativos para una deriva menor al 2 %. Para el DBF los límites de deriva están sumamente ajustados a los límites normativos, por lo que no existiría la posibilidad de optimizar más las secciones. Sin embargo, para el DBD estos límites son bajos por lo que se podría buscar obtener secciones más pequeñas optimizando así el diseño. Es importante notar que, si bien los límites de deriva y desplazamiento permiten optimización para el DBD, la demanda de cortante es mayor, por lo que se deberá realizar un análisis de ambos parámetros antes de modificar las secciones.

- Las consideraciones de ductilidad en el DBF tienen repercusión en la forma de determinar la rigidez de la estructura y se encuentra implícitos en las expresiones empleadas, mientras que en el DBD se determina la ductilidad explícitamente, esto representa una ventaja puesto que se puede tener un mayor control de las secciones requeridas. La ductilidad dentro de la dinámica de estructuras juega un papel importante para poder caracterizar una estructura de una manera satisfactoria. Sin embargo, los resultados obtenidos reflejan una mayor congruencia para el DBF. Esto puede estar relacionado a la forma de calcular los periodos de los paquetes estructurales como Etabs, lo que amerita ser tema de investigaciones futuras.
- En el desarrollo del presente documento se han empleado diferentes recursos para lograr realizar un análisis estructural adecuado. Para el DBF la NEC presenta expresiones de más fácil aplicación, sin embargo, asume factores de reducción de resistencia sísmica que están en función de la ductilidad que no se presenta de manera clara, por lo que no se puede realizar una comparativa clara entre métodos. Para el DBD particularmente en sistemas duales la normativa ecuatoriana no presenta herramientas ni expresiones que puedan ser aplicadas satisfactoriamente.
- El desarrollo tecnológico de paquetes estructurales en el apartado de diseño sismo resistente ha sido desarrollado para ser una herramienta para usarse en el DBF, por lo que presenta mayores facilidades para ser un análisis de este tipo. Esto se debe principalmente a lo prematuro que todavía resulta el DBD para edificaciones, al ser este un método más desarrollado para estructuras de un grado de libertad. Se espera que con el tiempo y la investigación se logre desarrollar herramientas que permitan la aplicación de este método en edificios.

- El DBD resulta ser un método muy rico conceptualmente que puede ser aprovechado en otros ámbitos de la ingeniería estructural, sin embargo, resulta ser insuficiente para el diseño de edificios. Este método dentro de la práctica profesional más que para un diseño completo puede emplearse como un medio de comprobación de resultados, puesto que el DBF presenta múltiples avances que no pueden compararse en utilidad práctica a los métodos del DBD.

CAPÍTULO V

5. BIBLIOGRAFÍA

ACI 318-19. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19). In *318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute. https://doi.org/10.14359/51716937

Barreto Noa, G., & Samayani García, R. (2017). *Análisis elástico e inelástico y verificación por desempeño para el reforzamiento estructural de la facultad de ingeniería civil UNSA*.

Bay, C. O. (2021). *Diseño Basado en Desplazamientos para el refuerzo de estructuras existentes mediante disipadores histeréticos* [Universidad Tecnológica Nacional]. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33587.76322

Bozzo, L. M., & Barbat, A. H. (2000). *Diseño sismorresistente de edificios*. Editorial Reverté S. A.

Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras* (Cuarta Edición). Pearson Education.

Grajales Vargas, E. (2003). *Comportamiento dinámico de los edificios provistos con dispositivos disipadores de energía*. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Guerra Avendaño, M., & Guerra Valladares, M. (2020). *Diseño Sismo Resistente de Edificios de Hormigón Armado Utilizando Etabs*.

Guzmán Sáenz, J. F. (2014). *Análisis comparativo de los métodos de diseño sismorresistente basado en fuerzas y basado en desplazamientos para edificaciones en el Ecuador*. Universidad San Francisco de Quito.

NEC Committee-SE-DS. (2015). *Peligro sísmico - Diseño sismo resistente*. Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.

Ordóñez Fernández, J. L. (2015). *Diseño sísmico basado en desplazamiento de estructuras de hormigón armado aporticadas y estructuras con muros de corte*. Escuela Politécnica Nacional.

Ospina Trujillo, A. (2012). *Método basado en desplazamientos para el diseño y evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes de concreto reforzado*. Universidad EAFIT.

Pastora Estrada, A. G., & Ríos Novoa, M. (2016). *Análisis del efecto de aisladores sísmicos en la respuesta dinámica de un edificio aporticado de 4 niveles, según las condiciones de suelo de la zona noroeste de la ciudad de Managua, Nicaragua*. Universidad Centroamericana.

Paz Arias, R. S. (2007). *Evaluación del método de diseño directo basado en desplazamientos (DDBD) para pórticos con irregularidades verticales*. Universidad Técnica Particular de Loja.

Pérez Vargas, F. J. (2014). *Diseño sísmico basado en desplazamientos (DDBD)*.

Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2007). *Displacement Based Seismic Design of Structures*.

Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2008). *Displacement Based Seismic Design of Structures*.

Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Sullivan, T. J. (2012). *A model code for the displacement-based seismic design of structures*. IUSS Press.

Rivadeneira, F., Segovia, M., Alvarado, A., Egred, J., Troncoso, L., Vaca, S., & Yepes, H. (2007). *Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador*. Corporación Editora Nacional.

Rojas Abarca, E. A. (2009). *Diseño directo basado en desplazamientos para puentes con interacción suelo estructura*. Universidad Técnica Particular de Loja.

Suárez, V. (2009). Diseño basado en desplazamientos, una alternativa racional al diseño basado en fuerzas. *Revista Tecnológica ESPOL*, *22*.

CAPÍTULO VI

6. ANEXOS

ESPECTRO ELÁSTICO DE DISEÑO EN ACELERACIONES NEC 2015

ESPECTRO ELÁSTICO DE DISEÑO EN DESPLAZAMIENTOS NEC 2015

```
clc
clear
close all
```

DATOS DE ENTRADA

DATOS PARA ESPECTRO NEC 2015

```
Rg='S'; %Regiones del Ecuador - C: Costa (Excepto Esmeraldas), S: Sierra
(Incluye Esmeraldas y Galápagos) y O: Oriente
Suelo='D'; %Tipo de perfil del subsuelo (A, B, C, D, E y F)
Zona=5; %Zona sísmic a (I, II, II, IV, V y VI) - (1, 2, 3, 4, 5 y 6)
Tf=4; %Período final hasta donde llega el espectro [s]
I=1; %Coeficiente de importancia
R=8; %Factor de reducción de resistencia sísmica
fip=1; %Coeficientes de configuración en planta
fie=1; %Coeficientes de configuración en elevación

N_pisos=6; %Número de pisos de la estructura
H_episo=3.24; %Altura de entrepiso [m]
Hn=N_pisos*H_episo; %Altura máxima del edificio de n pisos medido desde la base
[m]
```

Datos (Sistema Aporticado)

```
Ctp=0.055; %Coeficiente que depende del tipo de estructura
alfap=0.9; %Coeficiente que depende del tipo de estructura
TEp=Ctp*Hn^alfap; %Período de vibración de la estructura [s]

TFp=0.89867; %Período fundamental de la estructura [s] - Se obtiene del
análisis modal espectral

u=5; %Factor de ductilidad máxima
```

Datos (Sistema Dual)

```
Ctd=0.055; %Coeficiente que depende del tipo de estructura
```

```
 alfad=0.75; %Coeficiente que depende del tipo de estructura
 TEd=Ctd*Hn^alfad; %Período de vibración de la estructura [s]

 TFd=0.67274; %Período fundamental de la estructura [s] - Se obtiene del
análisis modal espectral
 if Suelo=='A'
     PS=1;
     r=1;
 elseif Suelo=='B'
     PS=2;
     r=1;
 elseif Suelo=='C'
     PS=3;
     r=1;
 elseif Suelo=='D'
     PS=4;
     r=1;
 elseif Suelo=='E'
     PS=5;
     r=1.5;
 elseif Suelo=='F'
     PS=6;
     r=1;
 end

 r; %Factor usado en el espectro de diseño elástico, cuyos valores dependen de
la ubicación geográfica del proyecto.

 if Zona==1
     Z=0.15;
 elseif Zona==2
     Z=0.25;
 elseif Zona==3
     Z=0.30;
 elseif Zona==4
     Z=0.35;
 elseif Zona==5
     Z=0.40;
 elseif Zona==6
     Z=0.50;
 end

 Z; %Aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como
fracción de la aceleración de la gravedad g, para un TR = 475 años

 if Rg=='C'
```

```
    n=1.80;
 elseif Rg=='S'
    n=2.48;
 elseif Rg=='O'
    n=2.60;
 end

 n; %Razón entre la aceleración espectral Sa (T = 0.1 s) y el PGA para el
período de retorno seleccionado

 Fa_=[0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9;1 1 1 1 1 1;1.4 1.3 1.25 1.23 1.20 1.18;1.6 1.4
1.3 1.25 1.2 1.12;1.8 1.4 1.25 1.1 1 0.85;0 0 0 0 0 0];
 Fa=Fa_(PS,Zona);
 Fd_=[0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9;1 1 1 1 1 1;1.36 1.28 1.19 1.15 1.11 1.06;1.62
1.45 1.36 1.28 1.19 1.11;2.10 1.75 1.7 1.65 1.60 1.50; 0 0 0 0 0 0];
 Fd=Fd_(PS,Zona);
 Fs_=[0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75;0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75;0.85 0.94 1.02
1.06 1.11 1.23;1.02 1.06 1.11 1.19 1.28 1.4;1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2;0 0 0 0 0 0];
 Fs=Fs_(PS,Zona);
```

PERÍODOS CALCULADOS

```
 To=0.1*Fs*(Fd/Fa); %Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico
de aceleraciones que representa el sismo de diseño
 Tc=0.55*Fs*(Fd/Fa); %Período límite de vibración en el espectro sísmico
elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño
 Tl=2.4*Fd; %Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de
desplazamientos que representa el sismo de diseño
```

RESUMEN DE PARÁMETROS

```
 Parametros=table(Z,Fa,Fd,Fs,n,To,Tc,Tl)
```

ESPECTRO ELÁSTICO E INELÁSTICO EN ACELERACIÓN

```
 j=1;
 for T=0:0.001:Tf
    if T<=To
        Spec_Elastic(j,1)=T;
        Spec_Elastic(j,2)=n*Z*Fa;
        Spec_Elastic(j,3)=Z*Fa*(1+(n-1)*(T/To));
    elseif (T>=To) && (T<=Tc)
        Spec_Elastic(j,1)=T;
        Spec_Elastic(j,2)=n*Z*Fa;
        Spec_Elastic(j,3)=n*Z*Fa;
    else
```

```
        Spec_Elastic(j,1)=T;
        Spec_Elastic(j,2)=n*Z*Fa*(Tc/T)^r;
        Spec_Elastic(j,3)=n*Z*Fa*(Tc/T)^r;
    end
    j=j+1;
end
Spec_Inel(:,1)=Spec_Elastic(:,1);
Spec_Inel(:,2)=Spec_Elastic(:,2).*I/(R*fip*fie);
Spec_Inel(:,3)=Spec_Elastic(:,3).*I/(R*fip*fie);

X1=[To,To];
Y1=[0,(n*Z*Fa)];
X2=[Tc,Tc];
Y2=[0,(n*Z*Fa)];

if TEp<=To
    SaE=Z*Fa*(1+(n-1)*(TEp/To));
elseif (TEp>0) && (TEp<=Tc)
    SaE=n*Z*Fa;
else
    SaE=n*Z*Fa*(Tc/TEp)^r;
end

XEp=[TEp,TEp,0];
YEp=[0,SaE,SaE];
PPVx=[TEp];
PPVy=[SaE];

if TFp<=To
    SaF=Z*Fa*(1+(n-1)*(TFp/To));
elseif (TFp>0) && (TFp<=Tc)
    SaF=n*Z*Fa;
else
    SaF=n*Z*Fa*(Tc/TFp)^r;
end

XFp=[TFp,TFp,0];
YFp=[0,SaF,SaF];
PPFx=[TFp];
PPFy=[SaF];
```

TABLAS

ESPECTRO ELÁSTICO E INELÁSTICO EN ACELERACIÓN

```
SEA=table(Spec_Elastic(:,1),Spec_Elastic(:,2));
```

```
SIA=table(Spec_Inel(:,1),Spec_Inel(:,2));
```

GRÁFICAS

ESPECTRO ELÁSTICO E INELÁSTICO EN ACELERACIÓN

```
figure()
hold on
box on
plot(Spec_Elastic(:,1),Spec_Elastic(:,2),'color',[0 0.5 0],'LineWidth',2)
plot(PPVx,PPVy,'--o','color',[0 0.4 0.6],"LineWidth",1.5)
plot(XEp,YEp,'color',[0.7 0.7 0.7],'LineStyle',"--","LineWidth",1)
ylim([0 1.1*(n*Z*Fa)])
xlabel('T [s]')
ylabel('Sa [g]')
title('Espectro Elástico en Aceleración NEC 2015')
legend('Espectro Elástico en Aceleración TR 475 años',['(TE, Sa) =
(',num2str(TEp),', ',num2str(SaE),') - Período de vibración
[s]'],'location','southoutside')
grid off
fig=gcf;
fig.Units='normalized';
set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
set(gcf,'Visible','on')
hold off

figure()
hold on
box on
plot(Spec_Elastic(:,1),Spec_Elastic(:,2),'color',[0 0.5 0],'LineWidth',2)
plot(Spec_Inel(:,1),Spec_Inel(:,2),'color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',2)
plot(X1,Y1,'color',[0 0 0],'LineStyle',"--","LineWidth",1)
plot(X2,Y2,'color',[0 0 0.8],'LineStyle',"--","LineWidth",1)
plot(PPVx,PPVy,'--o','color',[0 0.4 0.6],"LineWidth",1.5)
plot(PPFx,PPFy,'--o','color',[0.3 0.3 0.3],"LineWidth",1.5)
plot(XEp,YEp,'color',[0.7 0.7 0.7],'LineStyle',"--","LineWidth",1)
plot(XFp,YFp,'color',[0.7 0.7 0.7],'LineStyle',"--","LineWidth",1)
plot(Spec_Elastic(:,1),Spec_Elastic(:,3),'color',[0 0.5 0],'LineStyle',"--
",'LineWidth',2)
plot(Spec_Inel(:,1),Spec_Inel(:,3),'color',[0 0.5 0.5],'LineStyle',"--
",'LineWidth',2)
ylim([0 1.12*(n*Z*Fa)])
xlabel('T [s]')
ylabel('Sa [g]')
title('Espectro Elástico e Inelástico en Aceleración NEC 2015')
```

```
 legend('Espectro Elástico en Aceleración TR 475 años','Espectro Inelástico en
Aceleración TR 475 años',['To = ',num2str(To),' [s]'],['Tc = ',num2str(Tc),'
[s]'],['(TE, Sa) = (',num2str(TEp),', ',num2str(SaE),') - Período de vibración
[s]'],['(TF, Sa) = (',num2str(TFp),', ',num2str(SaF),') - Período fundamental
[s]'],'location','southoutside')
 grid off
 fig=gcf;
 fig.Units='normalized';
 set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
 set(gcf,'Visible','on')
 hold off
```

ESPECTRO ELÁSTICO EN DESPLAZAMIENTO

```
 j=1;
 for T=0:0.001:Tf
     if T<Tl
         Spec_Des(j,1)=T;
         Spec_Des(j,2)=Spec_Elastic(j,2)*9.81*(T/(2*pi))^2;
     elseif T==Tl
         Spec_Des(j,1)=Tl;
         Spec_Des(j,2)=Spec_Elastic(j,2)*9.81*(Tl/(2*pi))^2;
     elseif T>Tl
         Spec_Des(j,1)=T;
         Spec_Des(j,2)=n*Z*Fa*(Tc/Tl)^r*9.81*(Tl/(2*pi))^2;
     end
     j=j+1;
 end

 X3=[Tc,Tc];
 Y3=[0,n*Z*Fa*9.81*(Tc/(2*pi))^2];
 X4=[Tl,Tl];
 Y4=[0,(n*Z*Fa*9.81*(Tc/Tl)^r*(Tl/(2*pi))^2)];

 if TEp<=To
     SdE=Z*Fa*(1+(n-1)*(TEp/To))*9.81*(TEp/(2*pi))^2;
 elseif (TEp>0) && (TEp<=Tc)
     SdE=n*Z*Fa*9.81*(TEp/(2*pi))^2;
 else
     SdE=n*Z*Fa*(Tc/TEp)^r*9.81*(TEp/(2*pi))^2;
 end

 if TFp<=To
     SdF=Z*Fa*(1+(n-1)*(TFp/To))*9.81*(TFp/(2*pi))^2;
 elseif (TFp>0) && (TFp<=Tc)
     SdF=n*Z*Fa*9.81*(TFp/(2*pi))^2;
```

```
else
    SdF=n*Z*Fa*(Tc/TFp)^r*9.81*(TFp/(2*pi))^2;
end
```

GRÁFICAS

ESPECTRO ELÁSTICO EN DESPLAZAMIENTO

```
figure()
hold on
box on
plot(Spec_Des(:,1),Spec_Des(:,2),'color',[0 0.5 0],'LineWidth',2)
plot(X3,Y3,'color',[0.7 0.7 0.7],'LineStyle',"--","LineWidth",1)
plot(X4,Y4,'color',[0.7 0.7 0.7],'LineStyle',"--","LineWidth",1)
xlabel('T [s]')
ylabel('Sd [m]')
title('Espectro Elástico en Desplazamiento NEC 2015')
legend('Espectro Elástico en Desplazamiento TR 475 años - Amort 5
%','location','southoutside')
grid off
fig=gcf;
fig.Units='normalized';
set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
set(gcf,'Visible','on')
hold off
```

GRÁFICA AMORTIGUAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA DUCTILIDAD PARA MUROS Y PÓRTICOS (Priestley, 2007)

Concrete Wall Building, Bridges (TI): $\xi_{eq} = 0.05 + 0.444\left(\frac{\mu - 1}{\mu\pi}\right)$

Concrete Frame Building (TF): $\xi_{eq} = 0.05 + 0.565\left(\frac{\mu - 1}{\mu\pi}\right)$

```
j=1;
for U=0:0.001:u
    if U<1
        Amort_eq(j,1)=U;
        Amort_eq(j,2)=0.05;
        Amort_eq(j,3)=0.05;
    elseif U>=1
        Amort_eq(j,1)=U;
        Amort_eq(j,2)=0.05+0.444*((U-1)/(U*pi));
        Amort_eq(j,3)=0.05+0.565*((U-1)/(U*pi));
```

```
    end
    j=j+1;
end
```

Demanda de ductilidad

```
Fux=1.8034; %Demanda de ductilidad (Sentido X)
Fuy=1.5028; %Demanda de ductilidad (Sentido Y)
```

GRÁFICA AMORTIGUAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA DUCTILIDAD PARA MUROS Y PÓRTICOS (Priestley, 2007)

```
Xux=[Fux,Fux,0];
Yux=[0,0.05+0.565*((Fux-1)/(Fux*pi)),0.05+0.565*((Fux-1)/(Fux*pi))];
Pxux=Fux;
Pyux=0.05+0.565*((Fux-1)/(Fux*pi));
Pyux_=(0.05+0.565*((Fux-1)/(Fux*pi)))*100;

Xuy=[Fuy,Fuy,0];
Yuy=[0,0.05+0.565*((Fuy-1)/(Fuy*pi)),0.05+0.565*((Fuy-1)/(Fuy*pi))];
Pxuy=Fuy;
Pyuy=0.05+0.565*((Fuy-1)/(Fuy*pi));
Pyuy_=(0.05+0.565*((Fuy-1)/(Fuy*pi)))*100;

figure()
hold on
box on
plot(Amort_eq(:,1),Amort_eq(:,2),'color',[0 0.5 0],'LineWidth',2)
plot(Amort_eq(:,1),Amort_eq(:,3),'color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',2)
plot(Pxux,Pyux,'--o','color',[0 0.4 0.6],"LineWidth",1.5)
plot(Pxuy,Pyuy,'--o','color',[0.3 0.3 0.3],"LineWidth",1.5)
plot(Xux,Yux,'color',[0.7 0.7 0.7],'LineStyle',"--","LineWidth",1)
plot(Xuy,Yuy,'color',[0.7 0.7 0.7],'LineStyle',"--","LineWidth",1)
xlabel('Factor de Ductilidad (u)')
ylabel('Amortiguamiento Equivalente')
title('Amortiguamiento v Factor de Ductilidad (Priestley, 2007)')
legend('Sistema Estructural con Muros','Sistema Estructural con
Pórticos',['(Pxux,Pyux) = (',num2str(Pxux),', ',num2str(Pyux_),'
%',')'],['(Pxuy,Pyuy) = (',num2str(Pxuy),', ',num2str(Pyuy_),'
%',')'],'location','southoutside')
grid off
fig=gcf;
fig.Units='normalized';
set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
set(gcf,'Visible','on')
```

```
hold off
```

ESPECTROS INELÁSTICOS EN DESPLAZAMIENTO EN FUNCIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO

$$R_\xi = \left(\frac{0.10}{0.05 + \xi} \right)^{0.5}$$

```
Amort=[5 Pyux_ Pyuy_]; %Coeficiente de amortiguamiento (%)

j=1;
for Damp=Amort
    Spec_Damp2(:,j)=Spec_Des(:,2)*(0.1/(0.05+(Damp/100))).^0.5;
j=j+1;
end

figure()
hold on
box on
plot(Spec_Des(:,1),Spec_Damp2(:,1),'color',[0 0.4 0],'LineWidth',2)
plot(Spec_Des(:,1),Spec_Damp2(:,2),'color',[0 0.5 0.5],'LineWidth',2)
plot(Spec_Des(:,1),Spec_Damp2(:,3),'color',[0.1 0.1 0.1],'LineWidth',2)
plot(X3,Y3,'color',[0.7 0.7 0.7],'LineStyle',"--","LineWidth",1)
plot(X4,Y4,'color',[0.7 0.7 0.7],'LineStyle',"--","LineWidth",1)
xlabel('T [s]')
ylabel('Sd [m]')
title('Espectro Inelástico en Desplazamiento (Priestley, 2007)')
legend(['Amortiguamiento = ',num2str(Amort(1,1)),' %'],['Amortiguamiento =
',num2str(Amort(1,2)),' %'],['Amortiguamiento = ',num2str(Amort(1,3)),'
%'],'location','southoutside')
lgd=legend;
lgd.NumColumns=1;
grid off
fig=gcf;
fig.Units='normalized';
set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
set(gcf,'Visible','on')
hold off
```

FACTOR DE REDUCCIÓN DE DEMANDA SÍSMICA

```
x=[1 1.25 1.5 1.75 2 2.25 2.5 2.75 3 3.25 3.5 3.75 4 4.25 4.5 4.75 5];
y=[1 1.45 1.75 1.93 2.11 2.23 2.35 2.42 2.5 2.57 2.63 2.67 2.7 2.73 2.75 2.77
2.79];
```

```
Fx=interp1(x,y,Fux);
Fy=interp1(x,y,Fuy);

Ux=Fux;
Uy=Fuy;

Xux=[Ux,Ux,0];
Yux=[0,Fx,Fx];

Xuy=[Uy,Uy,0];
Yuy=[0,Fy,Fy];

figure()
hold on
box on
plot(x,y,'color',[0 0.4 0],'LineWidth',2)
plot(Ux,Fx,'--o','color',[0 0.4 0.6],"LineWidth",1.5)
plot(Uy,Fy,'--o','color',[0.3 0.3 0.3],"LineWidth",1.5)
plot(Xux,Yux,'color',[0.7 0.7 0.7],'LineStyle',"--","LineWidth",1)
plot(Xuy,Yuy,'color',[0.7 0.7 0.7],'LineStyle',"--","LineWidth",1)
xlabel('Ductilidad (u)')
ylabel('Factor de reducción (R)')
xlim([1 5]);
ylim([1 3]);
title('Factor de Reducción de Demanda Sísmica')
legend('Curva Factor de Reducción de Demanda Sísmica',['Rx =
',num2str(Fx)],['Ry = ',num2str(Fy)],'location','southoutside')
grid off
fig=gcf;
fig.Units='normalized';
set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
set(gcf,'Visible','on')
hold off
```