



Análisis, diseño y evaluación del desempeño sísmico de una edificación dual de concreto reforzado de mediana altura, basado en el método de desplazamientos.

López Hoyos, Carlos Israel y Pérez Viteri, Andrea Priscila.

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Dra. Haro Báez, Ana Gabriela

18 de agosto del 2023



Plagiarism and AI Content Detection Report

DDBD_10_CORREGIDO_PLAGIO_MIC L...

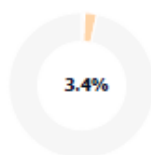
Scan details

Scan time: August 31th, 2023 at 21:23 UTC

Total Pages: 62

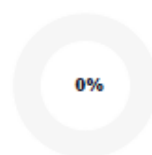
Total Words: 15282

Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
Identical	0.4%	61
Minor Changes	0.2%	27
Paraphrased	2.6%	394
Omitted Words	7.2%	1097

AI Content Detection



Text coverage		Words
AI text	0%	0
Human text	100%	14185

[Learn more](#)

(PDF) UNIVERSIDAD ESTATAL DEL SUR DE MANABÍre... 0.7%

<https://dokumen.tips/documents/universidad-estatal-del-sur...>

Others

...

UNIVERSIDAD ESTATAL DEL SUR DE MANABÍreposito... 0.7%

<https://fdocuments.mx/amp/document/universidad-estatal-...>

Others

...

Microsoft Word - TEXTO DDBD 0.6%

<https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/...>

Usuario

Maestría en Ingeniería Civil Análisis comparativo entre la metodología de diseño basada en fuerzas y la metodología de diseño basada en ...





Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular, **"Análisis, diseño y evaluación del desempeño sísmico de una edificación dual de concreto reforzado de mediana altura, basado en el método de desplazamientos"** fue realizado por los estudiantes **López Hoyos, Carlos Israel y Pérez Viteri, Andrea Priscila**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolqui 18 de agosto del 2023



Ing. Haro Baez, Ana Gabriela PhD.

1713500302



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **López Hoyos, Carlos Israel** y **Pérez Viteri, Andrea Priscila**; con cédulas de ciudadanía n° 0704409184 y 1717932238 declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **"Análisis, diseño y evaluación del desempeño sísmico de una edificación dual de concreto reforzado de mediana altura, basado en el método de desplazamientos"** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolqui 18 de agosto del 2023

López Hoyos, Carlos Israel

C.C: 0704409184

Pérez Viteri, Andrea Priscila

C.C: 1717932238



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Autorización de Publicación

Nosotros, **López Hoyos, Carlos Israel y Pérez Viteri, Andrea Priscila**; con cédulas de ciudadanía n° 0704409184 y 1717932238 autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **"Análisis, diseño y evaluación del desempeño sísmico de una edificación dual de concreto reforzado de mediana altura, basado en el método de desplazamientos"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí 18 de agosto del 2023

López Hoyos, Carlos Israel

C.C: 0704409184

Pérez Viteri, Andrea Priscila

C.C: 1717932238

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a todas aquellas personas, que nos enseñaron que el éxito y la superación se alcanza con esfuerzo y dedicación, esas personas son nuestros padres, esposa, esposo e hijos y en general a todas aquellas personas que, con su apoyo incondicional, nos han ayudado a lo largo de este de este duro camino, soportando y comprendiendo con estoica paciencia la dedicación que se requiere para culminar con éxito y responsabilidad el presente proyecto de investigación de curso.

Agradecimiento

A la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por habernos brindado los conocimientos necesarios en nuestro camino de profesionalización hacia una nueva especialidad dentro de nuestra profesión militar, como miembros de esta noble e hidalga institución que es el Ejército Ecuatoriano y a todos los docentes, pues han sido un pilar fundamental en este proceso de perfeccionamiento, siendo además fuente de inspiración y orgullo al ver su despliegue de profesionalismo y entereza.

Un agradecimiento especial a nuestra tutora del Trabajo de Integración Curricular, Dra. Anita Haro por la guía y apoyo brindado en el desarrollo del presente proyecto.

Índice de contenidos

Dedicatoria.....	2
Agradecimiento.....	7
Índice de tablas.....	12
Índice de figuras.....	13
Resumen	14
Abstract.....	15
Capítulo I	16
Generalidades.....	16
Planteamiento del problema.....	16
Antecedentes.....	19
Objetivos	21
Objetivo general	21
Objetivos específicos.....	21
Descripción del contenido.....	21
<i>Capítulo 1</i>	21
<i>Capítulo 2</i>	21
<i>Capítulo 3</i>	22
<i>Capítulo 4</i>	22
<i>Capítulo 5</i>	22
Capítulo II	23
Marco teórico	23
Consideraciones de diseño sismorresistente.....	23
Diseño directo basado en desplazamientos.....	23

Diseño y niveles de desempeño	25
Ventajas del DDBD sobre el DBF	27
Métodos existentes en la literatura	28
Requisitos para la aplicación del DDBD	29
Proceso del diseño DDBD	30
Capítulo III	31
Marco Metodológico.....	31
Método (DDBD).....	31
<i>Fundamentos y descripción del método</i>	31
<i>Estados límite de comportamiento</i>	34
<i>Estados límite de la sección</i>	35
<i>Espectro de diseño de desplazamientos</i>	37
<i>Modelo equivalente de un solo grado de libertad</i>	39
<i>Desplazamiento de diseño</i>	39
<i>Formas de desplazamiento</i>	42
<i>Edificios con muros en voladizo</i>	43
<i>Masa efectiva</i>	44
<i>Amortiguamiento viscoso equivalente</i>	45
<i>Distribución</i>	48
<i>Análisis de la estructura</i>	48
<i>Requerimientos de diseño por capacidad</i>	49
<i>Comentarios sobre el método</i>	51
Capítulo IV	53
Guía para el diseño sísmico basado en desplazamiento mediante el método propuesto por Priestley y otros (2007)	53

Estructura dual	53
Configuración estructural.....	54
Límites de diseño y niveles desempeño sísmico	54
Diseño basado en desplazamientos (DDBD).....	55
<i>Fundamentos para la aplicación del método</i>	56
<i>Formas de respuesta fuerza-desplazamiento</i>	56
<i>Espectro de desplazamiento</i>	57
Sistema equivalente de un grado de libertad (SDOF)	58
<i>Desplazamiento de diseño</i>	58
<i>Masa efectiva</i>	58
<i>Amortiguamiento viscoso equivalente</i>	58
<i>Altura efectiva</i>	59
<i>Distribución del cortante basal</i>	59
Diseño por capacidad	59
Geometría de la estructura	60
<i>Propiedades de los materiales</i>	60
<i>Cargas impuestas</i>	61
<i>Espectro de aceleraciones</i>	62
Aplicación del método DDBD	65
<i>Paso 1.- Asignación del porcentaje del cortante basal</i>	65
<i>Paso 2.- Definición de la altura de inflexión</i>	67
<i>Paso 3.- Desplazamiento de fluencia en los muros</i>	70
<i>Paso 4.- Perfil de desplazamiento de diseño</i>	72
<i>Paso 5.- Desplazamiento de diseño del sistema equivalente</i>	79
<i>Paso 6.- Altura efectiva</i>	79

<i>Paso 7.- Amortiguamiento equivalente</i>	80
<i>Paso 8.- Espectro de desplazamiento</i>	82
<i>Paso 9.- Periodo efectivo</i>	85
<i>Paso 10.- Masa efectiva</i>	86
<i>Paso 11.- Rigidez efectiva</i>	86
<i>Paso 12.- Cortante basal</i>	86
<i>Paso 13.- Fuerzas de diseño en marcos y muros estructurales</i>	86
<i>Paso 14.- Verificación del método</i>	88
<i>Evaluación del método</i>	90
Capítulo V	91
Conclusiones	91
Recomendaciones	92
Referencias.....	93

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Características del edificio</i>	60
Tabla 2 <i>Parámetros del espectro de aceleraciones</i>	63
Tabla 3 <i>Valores para el método estático</i>	64
Tabla 4 <i>Propiedades de los materiales</i>	65
Tabla 5 <i>Distribución del cortante basal en cada piso</i>	66
Tabla 6 <i>Perfil de momentos</i>	69
Tabla 7 <i>Desplazamiento de fluencia para $H_i < H_{CF}$</i>	71
Tabla 8 <i>Desplazamiento de fluencia para $H_i > H_{CF}$</i>	72
Tabla 9 <i>Tabla de resumen del análisis lineal</i>	76
Tabla 10 <i>Perfil de desplazamiento</i>	78
Tabla 11 <i>Datos para el espectro de diseño</i>	83
Tabla 12 <i>Fuerza de diseño</i>	87
Tabla 13 <i>Resultados obtenidos de ETABS</i>	88
Tabla 14 <i>Nivel de desempeño</i>	89
Tabla 15 <i>Desplazamientos máximos y niveles de daño</i>	89

Índice de figuras

Figura 1 <i>Esquema simplificado del DBD</i>	24
Figura 2 <i>Niveles de desempeño sísmico</i>	26
Figura 3 <i>Fundamentos del DDBD</i>	32
Figura 4 <i>Formas de respuesta</i>	33
Figura 5 <i>Objetivos de desempeño según visión 2000</i>	34
Figura 6 <i>Representación</i>	38
Figura 7 <i>Reglas de histéresis</i>	46
Figura 8 <i>Sistemas estructurales</i>	53
Figura 9 <i>Niveles de desempeño</i>	55
Figura 10 <i>Sistema equivalente de un grado de libertad</i>	56
Figura 11 <i>Planta del edificio de 12 pisos (análisis estático)</i>	62
Figura 12 <i>Modelo 3D del edificio de 12 pisos</i>	62
Figura 13 <i>Espectro de aceleraciones del edificio de 12 pisos</i>	64
Figura 14 <i>Gráficos de cortantes y momentos</i>	68
Figura 15 <i>Deformación plástica de un muro</i>	73
Figura 16 <i>Deriva máxima ESPx</i>	76
Figura 17 <i>Perfil de desplazamientos</i>	79
Figura 18 <i>Espectro de diseño basado en desplazamientos</i>	84
Figura 19 <i>Seguridad de vida</i>	88
Figura 20 <i>Aceleración y desplazamiento espectral</i>	89

Resumen

Para el presente trabajo de Integración Curricular, pondremos en práctica el método de diseño sísmico conocido como Diseño Directo Basado en Desplazamientos (DDBD) desarrollado por Priestley y otros (2007) en edificios de tipo dual, es decir una edificación compuesta por pórticos de acero y muros de concreto. Presentamos una breve descripción en lo que se refiere a los conceptos más elementales, así como la metodología utilizada en la aplicación del método presentado.

Una vez que se ha analizado los conceptos básicos, se presenta todo el procedimiento paso a paso con el que se aplica el DDBD. Este trabajo busca analizar el desempeño sísmico de una estructura dual aplicando el método de los desplazamientos directos y poder comprender de forma muy cercana a la realidad cual va a ser el comportamiento que se espera en una edificación sometida a cargas sísmicas, de forma que los desplazamientos determinados sean el resultado de someter nuestra estructura a las demandas de diseño, estos desplazamientos nos indican el daño aceptable a la par que se considera la ductilidad y el amortiguamiento en nuestra estructura de análisis.

Al finalizar nuestro trabajo de integración curricular, identificaremos la eficiencia que el método nos ofrece, así como el desempeño que tiene nuestra estructura, y con los diferentes resultados obtenidos se plantean las conclusiones correspondientes.

Palabras claves: desempeño sísmico, diseño con desplazamientos, muros de corte.

Abstract

For the present work of Curricular Integration, we will put into practice the seismic design method known as Direct Displacement Based Design (DDBD) developed by Priestley et al. (2007) in dual type buildings, that is to say a building composed of steel frames and concrete walls. We present a brief description of the most elementary concepts, as well as the methodology used in the application of the presented method.

Once the basic concepts have been analyzed, the entire step-by-step procedure by which DDBD is applied is presented. This work seeks to analyze the seismic performance of a dual structure by applying the method of direct displacements and to be able to understand very closely to reality what will be the expected behavior of a building subjected to seismic loads, so that the displacements determined are the result of subjecting our structure to the design demands, these displacements indicate the acceptable damage while considering the ductility and damping in our analysis structure.

At the end of our curricular integration work, we will identify the efficiency that the method offers us, as well as the performance of our structure, and with the different results obtained, we will draw the corresponding conclusions.

Keywords: seismic performance, design with displacements, shear walls

Capítulo I

Generalidades

Planteamiento del problema

Como se menciona en la NEC-15 Ecuador es un país con un alto riesgo sísmico, tal y como se ha visto demostrado a lo largo de la historia, como en 1906 con el sismo de Mw 8,8 en Esmeraldas, el más reciente evento de gran magnitud ocurrido en Pedernales el 16 de abril de 2016 con una magnitud Mw 7,8, eventos que han provocado pérdidas humanas y materiales, está es una de las razones para buscar mecanismos que disminuyan los daños que estos provocan (Moncayo, Vargas , Moncayo, & Barzola, 2017).

La implementación de nuevas tecnologías y técnicas constructivas basadas en ensayos del laboratorio e investigaciones que se han desarrollado desde la antigüedad, en la actualidad son de uso común para cumplir estándares de seguridad y calidad de vida en las estructuras.

Debido a todas las afectaciones que han producido los diferentes sismos a las estructuras en nuestro país, la necesidad de que este daño sea minimizado o controlado ha ido creciendo de una forma muy importante, debido a los costos elevados que significaría reemplazar o reconstruir estructuras, se dio inicio a diferentes ensayos para establecer nuevos métodos de diseño como el Diseño basado en Desplazamientos.

Tener presente que nuestra estructura sufrirá daños ante un evento sísmico, es parte importante de la teoría del desempeño sísmico, este daño tiene que ser controlado y su evaluación debe estar enmarcada con la frecuencia con que ocurren dichos eventos, este denominado desempeño es medido de acuerdo al grado de afectación que sufre la estructura, así como todas las actividades posteriores al evento que deben ser realizadas previo a que la estructura vuelva a ser utilizada por los usuarios de la misma. (Hernández, 2003).

En la actualidad nuestra normativa de diseño sismorresistente, NEC-SE-DS utiliza la filosofía tradicional de diseño, buscando que el objetivo planteado al iniciar un diseño sea el

evitar que se pierdan vidas, esto se logra con impedir que nuestra estructura colapse producto de un sismo, también busca que nuestras estructuras puedan ser nuevamente habitadas y tengan una garantía de ocupación posterior al evento sísmico.

El método de Diseño Directo Basado en Desplazamientos (DDBD) propuesto por Priestley y otros en 2007 se basa en una estructura que debe ser necesariamente regular, ya que para la aplicación de dicho método nosotros debemos establecer una estructura equivalente de un grado de libertad, de aquí partimos con la problemática de establecer si dicha estructura cumple o no con los requisitos que establece la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

Partiendo de esta premisa debemos establecer según el DDBD si una estructura regular de mediana altura, en este caso 12 pisos, reforzada con muros estructurales y cuyas vigas y columnas son de acero, cumple con los requisitos mínimos de diseño que establece nuestra norma.

El Diseño Directo Basado en Desplazamientos tiene como punto de partida en su análisis un desplazamiento impuesto por el diseñador, el mismo que se convierte en el objetivo a cumplir en los diferentes cálculos, el desempeño de la estructura analizada se relaciona de forma directa con el desplazamiento impuesto, el método de las fuerzas se relaciona con esta metodología, ya que se determinan las fuerzas en los elementos al momento de diseñar los mismos, así como cada uno de los desplazamientos que se producen con los mencionados elementos de la estructura. (Moreno, Bairan, & Huaman, 2011).

Mediante la elaboración de una guía práctica que muestre de forma ordenada como se aplica el método de Diseño Basado en Desplazamientos, se realizará la evaluación de una edificación de 12 pisos de tipo dual con marcos de acero y muros de hormigón reforzado, logrando establecer cuál será el nivel de daño que va a presentar la estructura ante un sismo.

Tomando como base una estructura de acero con muros de concreto reforzado, que es nuestra edificación planteada, y como este método tiene como fundamento el concepto de una estructura equivalente para lo cual empezaremos con el respectivo modelo matemático que describe todos los pasos a seguir, asignamos los respectivos esfuerzos a nuestros muros de concreto y marcos de acero, con esto buscamos establecer un amortiguamiento a través de la cual se buscaremos reducir este sistema complejo a uno de un solo grado de libertad.

Antecedentes

El Ecuador es un país expuesto a un peligro sísmico elevado, ya que nos encontramos dentro del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico, Excluyendo el sismo de Bahía de Caráquez del año 1997, en nuestro país no se registraron eventos sísmicos catastróficos, lo que dio lugar a que no se le preste demasiada atención a la problemática que representa un evento sísmico de gran magnitud, todo esto cambió a partir del 16 de abril del año 2016, con el terremoto de pedernales, el mismo que puso en evidencia las falencias que se tiene al momento de construir nuestra edificaciones y estructuras, este evento han causado pérdidas humanas, materiales y económicas, lo que ha provocado que se tomen medidas en el diseño que ayuden a disminuir los efectos negativos que provocan los sismos, uno de ellos es determinar cuál sería el comportamiento probable que tendrá una edificación frente a estos eventos (Moncayo, Vargas , Moncayo, & Barzola, 2017).

Actualmente las estructuras son diseñadas para que se comporten de forma inelástica durante un sismo, el mismo que concentra todas sus fuerzas en rótulas plásticas, que son los sitios de nuestra estructura que sufrirán diferentes tipos de daños durante un evento sísmico, estos daños suelen ser permanentes, pero al ser controlados y establecidos durante el periodo de diseño evitan que nuestra estructura colapse (Condori & Quispe, 2022).

También se producen daños que no afectan directamente a la estructura los cuales son dependientes de la fuerza o magnitud de las derivas inelásticas, estos daños deben mantener a nuestra estructura dentro del límite de seguridad de vida y su costo de reparación debe ser menor que el costo de construcción de estructuras diseñadas para comportarse ante un sismo de forma elástica, es decir que una vez que pase el evento sísmico sus elementos estructurales recuperen sus dimensiones originales (Suárez, 2018).

Cuando se diseña una estructura , siempre se lo hace tomando como punto de control la normativa vigente para el efecto, verificando que se cumpla con los parámetros de

desempeño que aseguren una seguridad de vida principalmente, sin embargo, el poder corroborar estos parámetros establecidos en la norma requieren de un amplio conocimiento computacional, así como la ayuda de otro ente profesional especializado o capacitado en el manejo de los diferentes software existentes para el efecto, ya que es imprescindible realizar un análisis lineal, no lineal tanto estático como dinámico para comprobar que nuestro parámetros de diseño sean los correctos.

Diferentes autores, en varias publicaciones entre ellos Andrade & Carrillo (2018), han demostrado con un elevado éxito que el método basado en desplazamientos determina de forma correcta cual va a ser el comportamiento no lineal de la estructura analizada, lo cual nos daría una gran ventaja al conocer ante un evento sísmico cual va a ser su comportamiento desde la etapa de diseño de la mismas.

El DDBD desarrollado por Priestley y otros, 2007, es un método establecido debido a las diferentes falencias que han sido detectadas en el método de las fuerzas, el mismo que para su aplicación requiere que sea estimada una rigidez del sistema estructural, pero esta rigidez no puede ser conocida hasta que se complete el diseño total de la estructura, por lo cual al ser esta rigidez establecida en el paso inicial y posterior determinación del periodo fundamental de la estructura y la respectiva distribución de esfuerzos estaríamos trabajando con datos que son producto de una estimación no cercana a la real.

Si bien en un principio el análisis diseño y evaluación se lo realizaría en una estructura dual de concreto reforzado de mediana altura, en la elaboración ya del presente proyecto se eligió realizar un cambio en esta perspectiva y basarnos en un sistema dual de muros de concreto con pórticos de acero, ya que en este tipo de estructuras el análisis del desempeño mediante este método a sido poco explorado, la mayoría de autores han realizado investigaciones en estructuras de tipo dual en concreto reforzado.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el desempeño sísmico de una edificación dual tipo de muros de concreto y pórticos de acero de mediana altura mediante el Método Directo Basado en Desplazamientos.

Objetivos específicos

- Realizar el modelamiento estructural de una edificación tipo que será evaluada con el método de los desplazamientos.
- Mantener el control del objetivo de desempeño sísmico (seguridad de vida) ante el sismo de diseño.
- Desarrollo de una guía práctica para evaluar el objetivo de desempeño sísmico (seguridad de vida) de edificaciones duales de muros de concreto reforzado y pórticos de acero mediante el Método Directo Basado en Desplazamientos.

Descripción del contenido

Capítulo 1

Generalidades y antecedentes. Realizamos una descripción que nos dé una visión general del tema, enfocándonos en el problema que se nos plantea al inicio de la investigación, así como en la importancia de realizar el presente trabajo.

Capítulo 2

Marco teórico. Aquí detallaremos la metodología que empleamos en la investigación, daremos a conocer los conceptos más relevantes que nos permitan entender el método de análisis propuesto, con el único fin de poder realizar un análisis de la estructura planteada en la investigación y entender su comportamiento ante un evento sísmico.

Capítulo 3

Marco Metodológico En esta sección de nuestro trabajo se explicará a fondo y paso a paso en que consiste el DDBD, tanto sus consideraciones como sus diferentes etapas de análisis, con el fin de dejarlos en claro previo a la elaboración de una guía práctica que permita poner en uso todas las consideraciones que demanda este método.

Capítulo 4

Elaboración de una Guía. Con esta guía práctica se pretende entregar al usuario un mecanismo que permita evaluar el desempeño de una estructura de tipo dual mediante el Método de los desplazamientos, para que así se logre diseñar estructuras de este tipo y que ante un evento sísmico se mantengan dentro del rango de seguridad de vida.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones. Las conclusiones presentadas en este apartado, así como las recomendaciones nos darán una visión más precisa de las ventajas y desventajas que ofrece el aplicar el método del DDBD, dándonos así una pauta para ampliar este tipo de análisis a estructuras que sean diferentes tanto en forma como en composición estructural.

Capítulo II

Marco teórico

Consideraciones de diseño sismorresistente

Un ingeniero civil tiene como objetivo profesional el ser capaz de diseñar estructuras que una vez realizados todos los procesos necesarios constructivos, analíticos y de experimentación puedan soportar eventos sísmicos de gran magnitud, logrando así salvar la mayor cantidad de vidas evitando que la estructura colapse sin dar tiempo a sus habitantes a ponerse a salvo; en este contexto podemos tomar como ejemplo el coliseo romano, que al haber sido diseñado como una estructura que trabaja como una sola pieza, ha soportado sismos de grandes magnitudes, manteniéndose aun de pie, esto nos demuestra que para la época , hubo un excelente análisis de parte de sus constructores y diseñadores (Francisco, 2014).

Para garantizar el nivel de seguridad de vida en una estructura, esta debe ser diseñada de tal forma que ninguno de los componentes estructurales como son las columnas y las vigas presenten daños considerables en su resistencia y rigidez, permitiendo que una edificación pueda ser ocupada por los usuarios después de la evaluación sísmica a la que será sometida posterior a un evento sísmico.

Son numerosos los criterios que requieren ser estudiados por el diseñador, ya sea para el DBF o para DDBD, el desempeño de nuestra estructura debe cumplir con los límites y parámetros que se establecen para diferentes acciones sísmicas, por otro lado, el DDBD se tiene como criterio el daño que sufre la estructura, su ductilidad y el desplazamiento que sufre la estructura que es sometida a análisis.

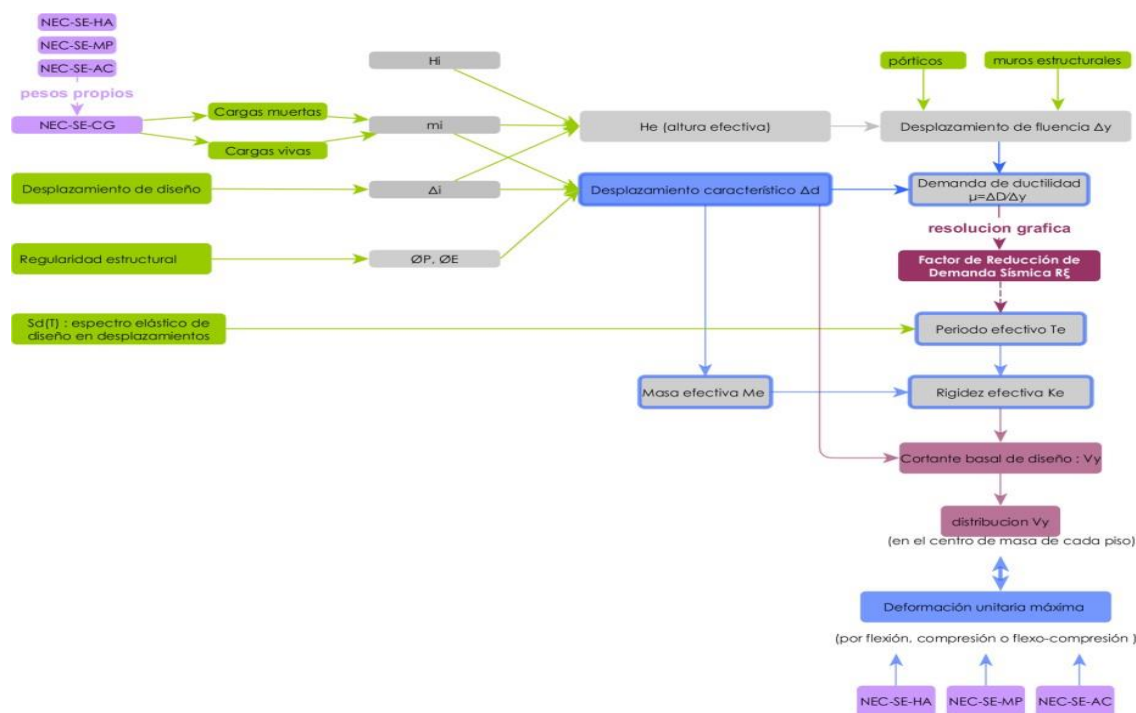
Diseño directo basado en desplazamientos

De acuerdo a la metodología presentada por Priestley, Calvi, & Kowalsky (2007) en su libro “Displacement-Based Seismic Desing of Structures” como un paso inicial se plantea que

es necesario determinar la rigidez y resistencia que nos permitan lograr alcanzar un desplazamiento objetivo, el mismo que fue fijado al iniciar nuestro diseño, este desplazamiento objetivo es nuestro punto inicial ya que está relacionado de forma directa con los desplazamientos y deformaciones de la estructura que es sujeto de nuestro análisis.

Figura 1

Esquema simplificado del DBD



Nota. Tomado de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-DS, 2015.

Constructivamente las edificaciones en la actualidad son diseñadas con una configuración irregular tanto en planta como en elevación, sus materiales son muy variados y cumplen con diferentes parámetros para diseño y construcción, con esta gran variedad de componentes se busca que el desempeño de la estructura ante un sismo sea el mejor, y se mantenga dentro de los parámetros para los cuales fue diseñado, para cumplir con este objetivo existen diferentes métodos utilizados para el diseño, uno de ellos es el método basado

en desplazamientos que tiene un particular enfoque en el nivel de daño que se espera va a alcanzar la estructura al ser sometida a un sismo.

En 1993 se establece el Diseño Directo Basado en Desplazamientos o DDBD, como menciona Kunjan & Jignesh (2017), el objetivo de este método es diseñar las estructuras para que cumplan un nivel de desempeño específico, tomando como punto de partida las deformaciones y las derivas que establece la norma.

El método basado en desplazamientos DDBD tiene sustento en la metodología de la Linearización Equivalente Estocástica que fue creada por Shibata y Sozen (1970), porque es un análisis no lineal que se puede evaluar a través de un espectro de aceleraciones, aquí aparece también el concepto de amortiguamiento viscoso equivalente que fue formulado por Jacobsen (1930), logrando resolver sistemas de un grado de libertad sometidos a cargas sísmicas.

Como menciona Priestley, Calvi, & Kowalsky (2007), el DBF es un método que presenta una estimación inicial de la rigidez de la estructura, que permite calcular el periodo natural y la distribución de los esfuerzos de cada elemento estructural, pero como la rigidez de cada elemento depende de la resistencia de dichos elementos, y esta rigidez no es conocida hasta completar el proceso de diseño, para corregir estas deficiencias en el método de las fuerzas se desarrolla el método directo de diseño basado en desplazamientos.

La norma Ecuatoriana de la Construcción en su capítulo NEC-SE-DS (2015), desarrolla el DBD como una opción de diseño de estructuras sismorresistentes que tiene como punto de partida el desplazamiento de la estructura necesario para alcanzar el nivel de desempeño de seguridad de vida y se lo puede aplicar de forma paralela al DBF que en nuestro país se lo utiliza de forma obligatoria.

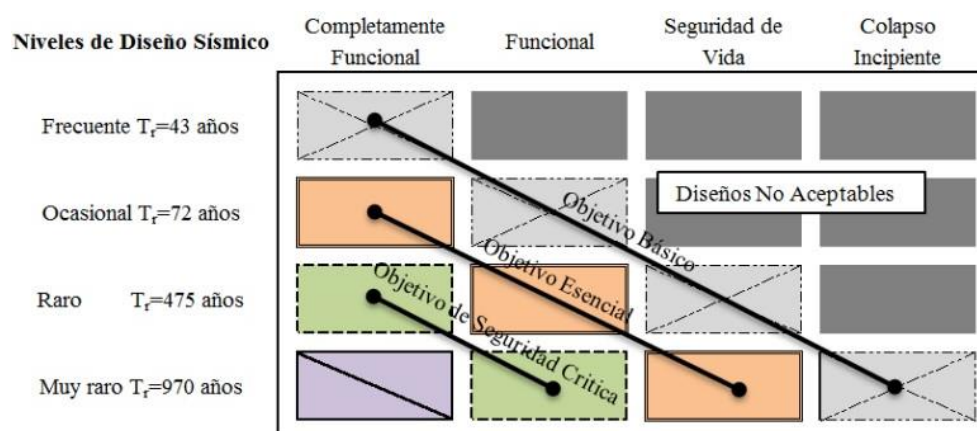
Diseño y niveles de desempeño

El comportamiento de la estructura puede ser expresado con el uso de esta metodología, así

como los puntos en los cuales la edificación llega a su capacidad máxima, del mismo modo se puede establecer la capacidad máxima a la cual pueden ser sometidos sus componentes tanto estructurales como no estructurales.

Figura 2

Niveles de desempeño sísmico



Nota. Tomado de Brief Comments on Elastic Flexibility por Priestley, 2007, Engineering.com

La norma ecuatoriana de la construcción establece tres niveles de desempeño que son analizados ante tres tipos de sismos: sismo menor, sismo moderado y sismo severo.

En el primer nivel de servicio con un periodo de retorno de 72 años y ante un sismo menor se prevé que tanto a nivel estructural como a nivel de elementos que no están directamente relacionados con la estructura los daños que se ocasionen por un sismo de este nivel sean prácticamente nulos.

Ante un sismo considerado moderado en un periodo de retorno igual al anterior de 72 años, en este segundo nivel de daño se tiene como principio la seguridad de vida, lo cual quiere decir que se brinda la respectiva cobertura a sus ocupantes y se garantiza que luego de ocurrido el evento telúrico y previo a una inspección se mantenga la funcionalidad total de la estructura.

Para el último nivel, que es el de colapso, el período de retorno es de 475 años y ante un sismo considerado severo se prevé que los daños estén en el rango inelástico, pero igualmente no se considera un colapso total de nuestra estructura, del mismo modo los daños serán graves en elementos no estructurales, pero en la parte netamente estructural de la edificación el daño será manejable y en rangos aceptables.

Ventajas del DDBD sobre el DBF

Con el DDBD se puede resolver y evaluar estructuras estáticamente indeterminadas y que no presenten irregularidades, es un proceso ordenado y lógico que permite evaluar el daño que presenta una edificación a través de las deformaciones y derivas, con esto se va a determinar el nivel de desempeño de una estructura y se puede comparar con un análisis no lineal como el Pushover.

El DBF es un proceso de cálculo que nos permite diseñar estructuras cuyo comportamiento ante fuerzas externas serán de tipo inelástico y el DDBD, realiza un análisis que se encuentra dentro del rango elástico, teniendo como premisa que ante un sismo la edificación que es producto del análisis presentará un comportamiento dentro del rango no lineal.

Una definición que se aplica al diseño sísmico basado en desplazamientos utiliza de forma directa el desplazamiento de la estructura para poder determinar su rendimiento. Cuando las estructuras de edificación convencionales se someten a fuertes sacudidas del suelo en áreas con actividad sísmica moderada a alta, su comportamiento se caracteriza por la respuesta del sistema estructural. Esta respuesta implica la absorción y disipación de entradas de energía sísmica, regulando en última instancia la magnitud de los desplazamientos y minimizando las fuerzas sísmicas.

Podemos considerar la ocurrencia de daño estructural en un muro dúctil, que se manifiesta como concreto fisurado y deformación del refuerzo debido a la formación de una

rótula de flexión. La gravedad de este daño corresponde al grado mencionado, que puede verse influida por el desplazamiento. Vale la pena señalar que las fuerzas ejercidas sobre el muro no son un indicador directo de daño, ya que estas fuerzas experimentan cambios mínimos una vez que se inicia la fluencia (Ordoñez, 2015).

Otra de estas ventajas del diseño basado en desplazamientos está en el tratamiento con sistemas compuestos de distintos elementos resistentes a fuerza lateral, el proceso de reacondicionamiento implica el refuerzo o el reemplazo de un sistema de marco débil preexistente con un sistema más robusto o flexible que pueda soportar mejor las fuerzas laterales. La eficacia de la modificación no está determinada por la resistencia que ofrece el nuevo sistema, sino por el desplazamiento de todo el sistema, incluida la pérdida de capacidad de carga vertical. El DBD se aplica de tal forma que los desplazamientos de la estructura permitan diseñar los elementos estructurales presentando una edificación nueva que cumpla con el amortiguamiento y ductilidad requeridas (Priestley, Brief Comments on Elastic Flexibility of Reinforced Concrete Frames and Significance to Seismic Design", 1998).

De manera similar, las limitaciones de los procedimientos basados en la fuerza para abordar el desplazamiento de sistemas no estructurales son evidentes. Contrariamente, al desarrollar el DDBD toman como prioridad dicho desplazamiento como un elemento prioritario y de gran importancia para el diseño.

Métodos existentes en la literatura

A lo largo de la década de 1990, han surgido numerosas sugerencias relacionadas con la técnica basada en el desplazamiento. Si bien se han propuesto diversos procedimientos, solo unos pocos han alcanzado los criterios necesarios para su implementación en los códigos de diseño contemporáneos

Según Méndez (2011), se puede clasificar a los métodos DBD considerando los criterios a continuación:

Criterio 1.- Desplazamiento en proceso de diseño (RDDP).

- Deformaciones calculadas (DCB).
- Cálculo iterativo de deformación (IDSB).
- Deformación directa (DDSB).

Criterio 2.- Tipo de análisis (TADP).

- Análisis Modal espectral con rigidez inicial (ME-RI).
- Análisis modal espectral con rigidez secante (ME-RS).
- Análisis de historia - tiempo.

Criterio 3.- Según las limitaciones que presentan los diferentes tipos de estructura (STL).

- Estructuras flexibles y con irregularidad.

Para el diseño del edificio aporricado y del edificio con muros estructurales, de los métodos disponibles en la literatura se aplicará el método de Priestley (2007), que también lo recomienda la actual Norma Ecuatoriana.

Requisitos para la aplicación del DDBD

Las diferentes deformaciones inelásticas deben ser comprobadas tomando como base para esta comprobación los establecidos en el método de diseño por capacidad, en el cual las rotulas plásticas que se forman, únicamente lo harán en puntos y en los elementos que ya han sido predeterminados en el diseño.

Los modos de vibración y sus efectos considerados altos también son incluidos en las fuerzas de diseño, ante lo cual se establece que estos efectos permanecerán dentro del rango elástico.

Todos los efectos y acciones $P-\Delta$ deben ser comprobados a fin de que no sean los causantes de inestabilidad en la estructura, y que sus parámetros de diseño se encuentren dentro de los establecidos en principio.

Proceso del diseño DDBD

A breves rasgos se pueden establecer los siguiente pasos claves para poder realizar el diseño basado en desplazamientos:

- Se establece una estructura equivalente de un grado de libertad, basada en el principio de que el modo de vibración que más demandas nos genera y el que es el causante de la formación de rotulas plásticas es el primero, aquí también reemplazamos la estructura en su estado inelástico con su desplazamiento máximo por un sistema en el rango elástico y con un grado de libertad.
- Establecemos un desplazamiento objetivo, el mismo que puede verse reducido por las condiciones propias de nuestra estructura como regularidad y la respectiva configuración estructural de nuestra edificación.
- Se establece cual va a ser nuestro espectro de diseño para el desplazamiento.
- El cortante basal se distribuye tanto a columnas como a muros de forma que el análisis posterior nos indica cual es la resistencia que se requiere cuando nuestro desplazamiento objetivo es alcanzado.

Capítulo III

Marco Metodológico

Método (DDBD)

La base de este enfoque es el procedimiento denominado “Diseño Directo Basado en Desplazamientos” (DDBD), que se introdujo por primera vez en 1993, el cual durante estos años ha sido objeto de considerable atención en investigaciones, en Europa, Nueva Zelanda y América del Norte, y que culmina en un enfoque de diseño viable y sencillo para una amplia gama de tipos estructurales presentados en Priestley, Calvi, & Kowalsky (2007) convirtiéndose así, en la referencia principal para la base teórica de este capítulo.

Fundamentos y descripción del método

El diseño basado en fuerzas de una estructura parte de la rigidez y las fuerzas internas y con estos datos se busca determinar el comportamiento de una edificación, por otro lado el diseño basado en desplazamientos desarrolla las fuerzas internas y momentos en cada piso de la estructura para calcular como parte final la rigidez y el cortante basal de la estructura considerando nuevamente la distribución a cada piso y poder diseñar los elementos estructurales (López, 2009).

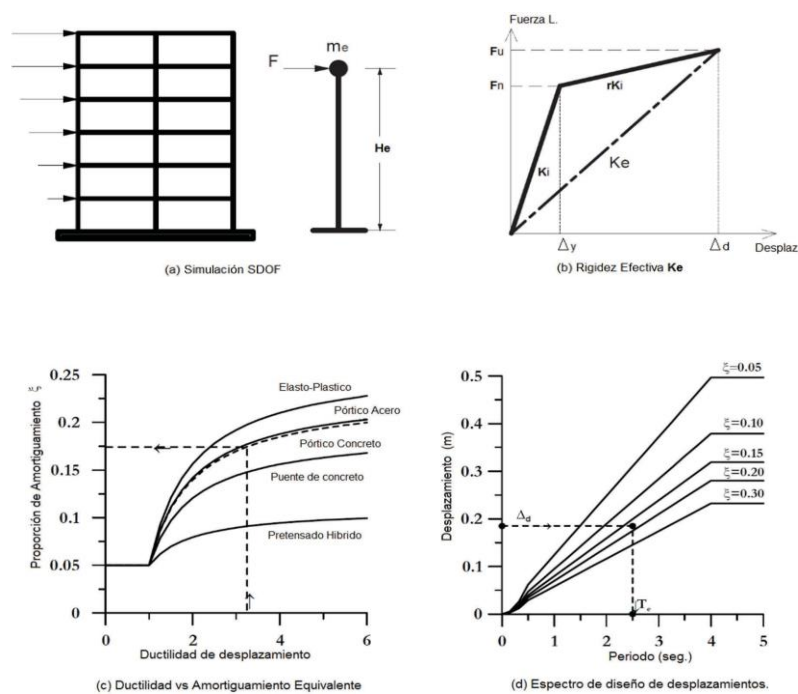
Como podemos apreciar en la figura 3(a), en el cual se representa un edificio de un sistema de un solo grado de libertad (SDOF). Es importante tener en cuenta que, si bien el ejemplo específico se refiere a edificios enmarcados, los principios subyacentes se pueden aplicar a varios tipos de estructuras. En la figura 3(b) podemos apreciar una representación del desplazamiento que surge ante una fuerza lateral en el SDOF con una envolvente bilineal. Inicialmente, el sistema exhibe una rigidez elástica denominada K_i , que posteriormente es seguida por una rigidez posterior a la fluencia de rK_i .

Un paso importante en el desarrollo del DBD se analiza las propiedades de cada material de los componentes estructurales, para establecer la elasticidad, fluencia, rigidez y

amortiguamiento elástico. Otros datos que se consideran en el diseño sísmico de una edificación son la rigidez secante (K) en el desplazamiento máximo de la edificación (Δ_d), así como establecer un equivalente del amortiguamiento viscoso (ξ). Todas estas propiedades se establecen en función del nivel de demanda de la ductilidad, dependiendo de la tipificación de la estructura se asigna un amortiguamiento viscoso el mismo que está influenciado por los ciclos de histéresis. Esta relación se puede observar en la Figura 3.

Figura 3

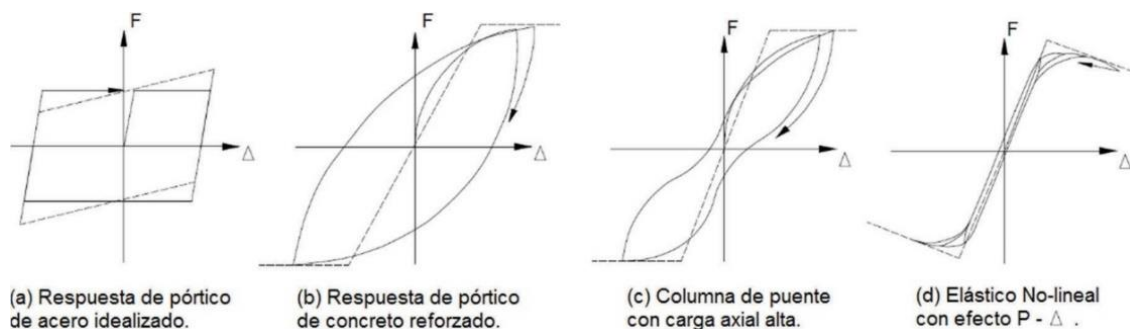
Fundamentos del DDBD



Nota. Tomado de Brief Comments on Elastic Flexibility por Priestley, 2007, Engineering.com.

Figura 4

Formas de respuesta



Nota. Tomado de Brief Comments on Elastic Flexibility por Priestley, 2007, Engineering.com.

Una vez que se establece el desplazamiento de diseño en su respuesta máxima y se estima el amortiguamiento correspondiente con base en la demanda de ductilidad proyectada, se puede calcular el período efectivo. Esto se hace midiendo la respuesta a la altura efectiva H_e (como se muestra en la Figura 4(a)) y analizando una serie de espectros de desplazamiento, como se muestra en la Figura 4(d). La rigidez efectiva K_e del sistema (SDOF) que se produce cuando llegamos al desplazamiento máximo se calcula utilizando la ecuación (1).

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m_e}{K}} \quad (1)$$

$$K_e = 4\pi^2 m_e / T_e^2 \quad (2)$$

Donde m_e es la masa efectiva de la estructura en el modo fundamental de vibración. A partir de la Fig. 4(b), la fuerza lateral de diseño es:

$$F = V_B = K_e \Delta_d \quad (3)$$

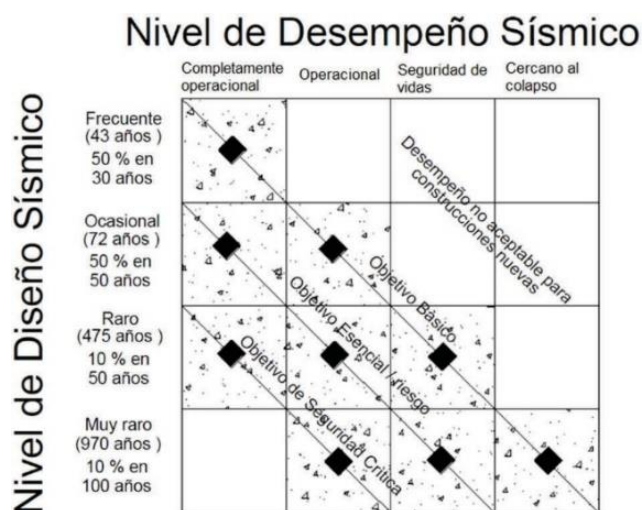
Una vez que se han identificado los atributos de la "estructura sustituta", se establecen el desplazamiento de diseño y el espectro de desplazamiento, lo que hace que el concepto de modelo sea extremadamente sencillo y sin complejidades adicionales.

Estados límite de comportamiento

Los estados límites, estos usan varias métricas para medir diferentes facetas del comportamiento. Los estándares existentes se esfuerzan por desarrollar un marco que pueda resistir un grado predeterminado de destrucción cuando se enfrenta a un nivel predeterminado de fuerza sísmica, integrando así los principios de la ingeniería basada en el desempeño.

Figura 5

Objetivos de desempeño según visión 2000



Nota. Tomado de Brief Comments on Elastic Flexibility por Priestley, 2007, Engineering.com

Los niveles de desempeño no incluyen un nivel de desempeño de "control de daños", que es claramente de importancia económica.

Por ejemplo, luego del sismo de Kobe en edificios aperticados de concreto reforzado diseñados de acuerdo con la filosofía "viga débil-columna fuerte" satisfaciendo el nivel de desempeño de "seguridad de vidas", el costo de reparación de muchos lugares de acción

inelástica, y por lo tanto de daños localizados, fue a menudo excesivo y antieconómico.

Actualmente, el nivel de desempeño implícito en la mayoría de los códigos de diseño sísmico es, de hecho, un nivel de desempeño de control de daños.

Estados límite de la sección

A continuación, se establecen los conceptos del estado límite de la estructura y los muros de concreto reforzado y cuál será la respuesta de la edificación.

Estado límite de agrietamiento. - La aparición del agrietamiento generalmente marca el punto para un significativo cambio de rigidez. El límite de agrietamiento es utilizado para el análisis de los miembros esperamos se comporten dentro del rango elástico para el nivel del sismo de diseño.

Estado límite de primera fluencia. – Cuando en nuestro análisis exista fluencia de tracción en nivel extremo provoca que la rigidez sufra cambios importantes. Debido a esta condición podemos establecer una rigidez en rango elástico para el análisis de nuestros sistemas flexibles con la ayuda de los rangos de histéresis simplificados.

Estado límite de estallamiento. – El hecho de que se produzca un estallamiento del recubrimiento resulta ser un punto significativo, en especial en secciones que soportan elevados niveles de comprensión axial, en las cuales este estallamiento se encuentra relacionado con el inicio de la rigidez negativa y la pérdida de resistencia repentina del sistema.

Estado límite de Pandeo. – Con la aparición del pandeo se deben incluir medidas que en muchos casos requieren un rediseño o reemplazo del elemento.

Estado límite último. – Este límite indica la nula capacidad para resistir cargas gravitacionales como la gravedad o el peso de la estructura sobre la viga y en columnas la incapacidad de resistir una carga axial. Debemos tener en cuenta que una rigidez negativa está relacionada con una pérdida en la capacidad de resistir y limita la respuesta dinámica de la estructura lo cual puede llevar a tener consecuencias potencialmente destructivas.

Estado límite de la estructura. – Los diferentes niveles de desempeño sísmico y estados límites que se pueden aplicar a la estructura para poder diseñar de acuerdo a lo que menciona Priestley *et al* (2007) se propone el estado límite de servicialidad, estado límite de control de daños y estado límite de supervivencia. Generalmente solo uno como es el “estado límite de control de daños”, o como máximo dos (con el “estado límite de servicialidad” como el segundo) serán distinguidos, excepto para circunstancias excepcionales. Donde más de un estado límite se considere, la resistencia requerida para satisfacer cada límite se determinará y con la más alta se ejecutará el diseño final.

Estado límite de servicialidad. - El nivel de "totalmente operativo" de Visión 2000 está asociado con ciertas expectativas. No es necesario realizar demasiadas correcciones para que las edificaciones alcancen el nivel de desempeño sísmico deseado. Específicamente, la cubierta de hormigón no debe experimentar ningún descascarillado y, si bien el refuerzo puede exhibir cierto grado de fluencia, el ancho de las grietas resultantes debe ser lo suficientemente mínimo como para obviar la necesidad de aplicar lechada. Las deformaciones de las fibras exteriores del hormigón y los esfuerzos de tracción del acero de refuerzo se relacionan de forma directa.

Estado límite de control de daños. - Aunque el documento Visión 2000 no aborda directamente este problema, sirve como base para la mayoría de las estrategias de diseño sísmico que se emplean actualmente, en este estado en particular, un cierto nivel de daño reparable se considera aceptable, siempre que el costo de las reparaciones sea significativamente menor que el costo de reemplazo, el daño puede implicar la necesidad de reemplazar la cubierta de concreto debido al estallido, así como la formación de grietas por flexión extensas que requieren lechada para evitar una mayor corrosión, es crucial que no se produzcan fracturas en el refuerzo transversal, así como pandeo del refuerzo longitudinal. Además, no se debe reemplazar el núcleo de hormigón en áreas con bisagras de plástico.

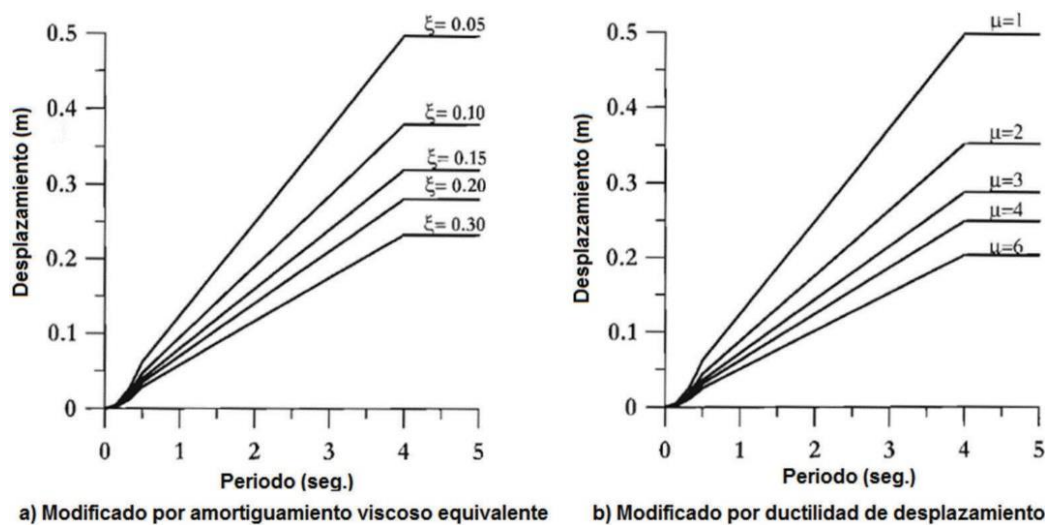
Espectro de diseño de desplazamientos

En lugar de utilizar un espectro de aceleración, se emplea el espectro de respuesta de desplazamiento, como se muestra en la Fig. 3(d), para determinar la resistencia a la corte basal necesaria, si bien es factible derivar el espectro de desplazamiento del de respuesta de aceleración actual suponiendo que el pico de respuesta está dictado por ecuaciones de estado estable sinusoidal, esta suposición se vuelve progresivamente menos precisa durante períodos prolongados. La correlación entre el desplazamiento y la aceleración se puede articular de la siguiente manera:

$$\Delta_{(T)} = \frac{T^2}{4\pi^2 S_{A(T)} g} \quad (4)$$

La aceleración causada por la gravedad, denotada como g , este juega un papel crucial en esta ecuación. El área superficial específica, $S_{A(T)}$, se cuantifica como un múltiplo de g .

Para implementar un diseño sísmico basado en el desplazamiento y representar con precisión la respuesta estructural, es necesario un enfoque de rigidez secante. Este factor requiere ajustar el espectro de respuesta para incorporar la respuesta dúctil, se puede capturar utilizando un amortiguamiento viscoso equivalente o considerando directamente el espectro de desplazamiento inelástico en varios niveles de ductilidad (como se muestra en la Figura 6), cuando se emplea el espectro modificado con diferentes niveles de amortiguamiento, es esencial establecer correlaciones entre la ductilidad y el amortiguamiento para diferentes características estructurales, sin embargo, este enfoque permite la utilización de un espectro de diseño único para todas las estructuras. Por otro lado, utilizar el espectro modificado basado en diferentes niveles de ductilidad puede ser más sencillo.

Figura 6*Representación*

Nota. Tomado de Brief Comments on Elastic Flexibility por Priestley, 2007, Engineering.com.

Para representar con precisión la conducta de las estructuras, es fundamental extender el espectro de desplazamiento más allá del rango típico representado en los espectros de aceleración, esto se debe a que el período de la estructura sustituta es más largo que el de la estructura elástica, adicionalmente, es recomendable establecer un límite máximo para los desplazamientos de respuesta pico, ya que, con el tiempo, estas variables tienden a disminuir y finalmente se alinean con el desplazamiento máximo del suelo subyacente. Si los porcentajes en el amortiguamiento son diferentes al 5% utilizaremos la ecuación (5) del Euro-Code.

$$R_{\xi} = \left(\frac{0,07}{0,02 + \xi} \right)^{\alpha} \quad (5)$$

En el cual el valor de α es igual a 0,50, y la variable ξ representa un coeficiente de amortiguamiento que está directamente asociado con el amortiguamiento de tipo crítico.

$$\Delta_{(T,\xi)} = \Delta_{(T,5)} \left(\frac{0,07}{0,02 + \xi} \right)^\alpha \quad (6)$$

Modelo equivalente de un solo grado de libertad

Una estructura convencional tiene numerosos grados de libertad en cada uno de sus pisos (MDOF), al iniciar con el proceso del análisis debemos convertir a esta estructura en una equivalente, pro esta estructura equivalente únicamente tendrá un grado de libertad (SDOF), al realizar esta sustitución debemos tener en cuenta todas las variables necesarias que permitan obtener un modelo correcto y equivalente. Con estas variables establecidas iniciamos calculando el cortante basal para el diseño de esta nueva estructura de un solo grado de libertad, este cortante basal es distribuido en cada uno de los pisos de esta estructura y se calcula los posibles lugares de aparición de rótulas plásticas al ser sometida a estas fuerzas a nuestra estructura.

Desplazamiento de diseño

Cuando diseñamos una estructura la fuerza sísmica produce cambios en nuestra edificación, uno de ellos se da con los desplazamientos que aparecen producto de una fuerza sísmica, estos desplazamientos corresponden a rangos inelásticos, que resultan de cualquier cambio en la rigidez de cada elemento de la estructura, o a su vez son producto de las rótulas plásticas que se forman posteriormente a la fuerza sísmica, estos cambios deben ser previsto en el análisis y diseño inicial de la estructura. El desplazamiento que se produce por lo anteriormente mencionado resulta más preciso al dejar de lado los rangos elásticos y tomando únicamente los rangos inelásticos que se producen con la rigidez secante de la estructura que es sometida al análisis.

El diseño de este se proporciona de la siguiente manera:

$$\Delta_d = \frac{\sum_i^n 1 (m_j \cdot \Delta_i^2)}{\sum_i^n 1 (m_j \cdot \Delta_j)} \quad (7)$$

Cuando las edificaciones tienen n número de pisos, los usuarios ocuparán todo el edificio. En el caso de edificios de varias plantas, es habitual que los ocupantes se sitúen en una de las n plantas. Con las fórmulas planteadas en la ecuación (7) los valores de, m_i y Δ_i son los que nos permiten representar tanto la masa como los desplazamientos que ocurren en puntos críticos y representativos.

Al establecer la deformación límite o máxima de la estructura que ocurre por la compresión del hormigón (ϵ_c), el desplazamiento objetivo puede establecerse de forma más rápida y precisa ya que esta deformación del hormigón resulta decisiva. En el estado límite, las deformaciones ϵ_c , ϵ_s y ϵ_{sl} ocurren para la compresión del concreto y la tracción del acero, es fundamental tener en cuenta que estas deformaciones no suelen ocurrir simultáneamente en la misma sección debido a que la profundidad del eje neutral está determinada por la relación de refuerzo y la carga axial en la sección. Del análisis de estos factores obtenemos dos curvas con límites en la compresión máxima del concreto y la tensión que ocurre debido al refuerzo de la estructura.

$$\phi_{l,c} = \frac{\epsilon_{c,l}}{c} \quad (\text{Compresión del concreto}) \quad (8a)$$

$$\phi_{l,s} = \frac{\epsilon_{sl}}{(d - c)} \quad (\text{Tensión del esfuerzo}) \quad (8b)$$

Para determinar el diseño estructural apropiado, es necesario considerar el menor de $\phi_{l,c}$ y $\phi_{l,s}$. Para estimar el desplazamiento de diseño, se puede utilizar el siguiente método:

$$\Delta_{dt} = \Delta_y + \Delta_p = \phi_y (H + L_s)^2 / 3 + (\phi_t - \phi_y) L_p H \quad (9)$$

El desplazamiento de diseño se determina comparando el desplazamiento dado por la siguiente ecuación con el límite de deriva no estructural especificado por el código ϕ_c .

Con la ecuación (9) obtenemos un desplazamiento que debe ser comparado con el desplazamiento que se obtiene con la deriva no estructural especificada en el código, de este resultado utilizaremos el menor para el diseño estructural. Las variables utilizadas en esta ecuación son las siguientes: ϕ_{ls} representa el valor más pequeño entre $\phi_{ls,c}$ y $\phi_{ls,s}$, Δy es el denominado desplazamiento de fluencia, H denota cual es la altura del elemento en análisis, L_s representa nuestra altura efectiva adicional que explica los efectos de tensión cuando ocurre la penetración, y L_p es la longitud a la cual ubicamos la rótula plástica.

$$\Delta_{d\theta} = \theta_c H \quad (10)$$

El desplazamiento que ocurre con la fluencia propia de los elementos estructurales nos permite obtener dos puntos de análisis que resultan muy útiles para nuestro diseño, como primer punto, cuando los elementos estructurales predeterminan un desplazamiento, se vuelve crítico que el diseñador sepa cuál va a ser su desplazamiento de fluencia y concatenado a ello su respectiva curvatura de fluencia. En segundo lugar, para calcular el amortiguamiento viscoso equivalente, es esencial tener en cuenta la ductilidad de desplazamiento $\mu\Delta$. En términos de elementos de hormigón armado, la curvatura de fluencia no se ve afectada principalmente por la cantidad de refuerzo presente o el nivel de carga axial. En cambio, depende únicamente de la tensión de fluencia y la profundidad de la sección.

$$\text{Columna Rectangular de concreto: } \phi_y = 2,10 \frac{\varepsilon_y}{h_c} \quad (11a)$$

$$\text{Muro Rectangular de concreto: } \phi_y = 2,00 \varepsilon_y / l_w \quad (11b)$$

Donde ε_y es la deformación de fluencia del refuerzo a flexión, h_c y l_w son las profundidades de la sección de la columna y muro rectangular respectivamente. Para un muro en voladizo de baja altura el desplazamiento de fluencia puede ser satisfactoriamente

aproximado para propósitos de diseño por la ecuación (Δ_y) y para un pórtico de concreto reforzado, la deriva de fluencia (θ_y), así:

$$\Delta_y = \phi_y (H + L_s)^2 / 3 \quad (12)$$

$$\theta_y = 0,50 \varepsilon_y L_b / h_b \quad (13)$$

Por otro lado, cuando aplican los límites de deriva del código, similares conclusiones se utilizan. Como ejemplo, las estructuras aporticados que se diseñan por el método de los desplazamientos se rigen en las derivas que se presentan en los primeros pisos.

Los desplazamientos que son producto de las masas individuales en piso se dan con la ecuación (14), como podemos apreciar a continuación:

$$\Delta_i = \delta_i \cdot (\Delta_c / \delta_c) \quad (14)$$

La ecuación δ_i representa la forma modal en el estado inelástico, mientras que Δ_c representa el desplazamiento de diseño en la masa crítica, c. Además, δ_c denota el valor de la forma del modo en la masa c. En el caso de edificios que excedan los diez pisos, existe una consideración significativa para la amplificación dinámica de las derivas, lo que requiere una reducción en el límite de deriva designado para fines de diseño.

Formas de desplazamiento

Edificios aporticados. – En este caso se aplican las siguientes ecuaciones:

$$\delta_i = \left(\frac{H_i}{H_n} \right) \quad \text{para } n \leq 4 \quad (15a)$$

$$\delta_i = \frac{4}{3} \cdot \frac{H_i}{H_n} \cdot \left(1 - \frac{H_i}{4H_n} \right) \quad \text{para } n > 4 \quad (15b)$$

La ecuación tiene en cuenta las alturas tanto del nivel i como del techo (nivel n), indicados como H_i y H_n respectivamente. Con los resultados obtenidos con las ecuaciones (15^a) y (15b) los desplazamientos calculados se acercan a los previstos en un análisis del rango inelástico dado en tiempo e historia. Esto es particularmente evidente en edificios más altos, donde las formas de desplazamiento derivadas de la ecuación producen un ajuste superior en comparación con el perfil lineal empleado para edificios más pequeños.

Edificios con muros en voladizo

En el caso de estas estructuras particulares, el mayor desplazamiento lo experimentará el piso superior, dicho desplazamiento es limitado por lo que establece la NEC o a su vez lo limita la rotación que puede llegar a experimentar las rótulas plásticas. La curvatura en el primer modo se relaciona con la altura de la edificación, considerando la tensión y la deformación tangencial, se puede determinar el desplazamiento de fluencia θ_y en la sección superior del muro.

$$\theta_y = \frac{\phi_y H_n}{2}, \text{ donde } \phi_y = \frac{2\varepsilon_y}{1_w}, \text{ luego; } \theta_y = \varepsilon_y H_n / 1_w \quad (16)$$

De forma muy acertada y matemáticamente correcta estas rótulas pueden ser ubicadas en la base de los muros de corte, con ella nuestra máxima deriva en la parte superior del mismo está dada por la ecuación (17) como se aprecia:

$$\theta_d = \theta_y + \theta_p = 1,0 \varepsilon_y H_n / 1_w + \left(\phi_m - \frac{2,0 \varepsilon_y}{1_w} \right) L_p \leq \theta_c \quad (17)$$

En el estado límite de diseño, la rotación plástica en la parte superior del muro, denotada como θ_p , es un factor significativo. Además, la curvatura en la base, representada por ϕ_m , y la longitud de la rótula plástica, conocida como L_p , juegan un papel crucial.

Para determinar el desplazamiento de rendimiento para una altura específica H_i , se utiliza la siguiente fórmula:

$$\Delta_y = \frac{E_y}{l_w} H_i^2 \left(1 - \frac{H_i}{3H_n}\right) \quad (18)$$

Luego, el perfil de desplazamiento de diseño se determinará a partir de la ecuación (19) para el caso de que la deriva de techo sea menor que el límite de deriva del código θ_c , mientras que la ecuación (20) se aplicará si el límite de deriva del código gobierna la deriva de techo, así:

$$\Delta_j = \Delta_y + \Delta_p = \frac{\varepsilon_y}{1_w} H_j^2 \left(1 - \frac{H_i}{3H_n}\right) + \left(\theta_c - \frac{\varepsilon_y H_n}{1_w}\right) H_i \quad (19)$$

$$\Delta_j = \Delta_y + (\theta_c + \theta_y) H_i = \frac{\varepsilon_y}{1_w} H_i^2 \left(1 - \frac{H_j}{3H_n}\right) + \left(\theta_c - \frac{\varepsilon_y H_n}{1_w}\right) H_i \quad (20)$$

Masa efectiva

Al examinar la participación de grandes grupos en el modo inicial de vibración con elasticidad limitada, podemos determinar la masa efectiva de la estructura sustituta de la siguiente manera:

$$m_e = \frac{\sum_j^n 1(m_i \cdot \Delta_i)}{\Delta_d} \quad (21)$$

En general, la proporción de masa efectiva puede diferir según el tipo de estructura. Para muros en voladizo de varios pisos, normalmente constituye alrededor del 70 % de la masa total, mientras que, para edificios enmarcados con más de 20 pisos, puede superar el 85 %.

La masa restante contribuye a los modos superiores de vibración. Si bien las reglas de combinación modal como la SRSS o la CQC pueden indicar un aumento notable en la fuerza de corte elástica basal más allá del primer modo inelástico.

Amortiguamiento viscoso equivalente

Nuestro amortiguamiento viscoso equivalente se relaciona con la ductilidad dada por el desplazamiento como podemos observar en la Figura 3(c). El factor de amortiguamiento general se determina combinando los componentes de amortiguamiento elástico e histérico.

$$\xi_e = \xi_e + \xi_h \quad (22)$$

El valor de ξ_h depende de los valores que se obtienen de la regla de histéresis específica que ha sido contemplada para la edificación que está sujeta a análisis. Un diseñador asigna generalmente un valor de 0,05 para el amortiguamiento dentro del rango elástico, el mismo que se relaciona de forma directa con el amortiguamiento crítico. Para derivar los niveles equivalentes de amortiguamiento viscoso, se realizaron dos estudios separados utilizando diferentes metodologías.

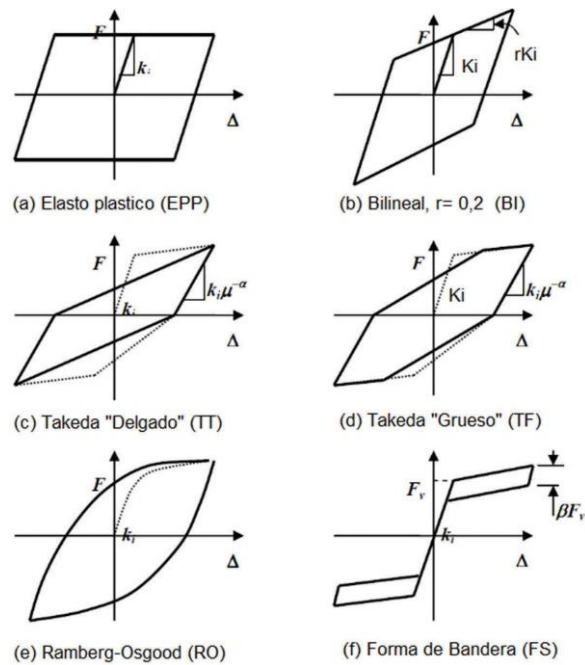
En el primer estudio, se empleó un número significativo de acelerogramas sísmicos reales. Para cada acelerograma individual, se calculó el amortiguamiento viscoso equivalente en función de las reglas de histéresis específicas, el nivel de ductilidad, el período efectivo, y luego se promedió entre todos los registros. En un segundo estudio se aplica los acelerogramas espectrales para lograr una aplicación de la regulación de histéresis.

Se compararon y promediaron los resultados de los análisis elástico e inelástico. El modelo de las curvas histéricas del sistema equivalente de un grado de libertad de la estructura se obtiene cuando se reajusta el amortiguamiento viscoso equivalente.

Las diversas regulaciones de histéresis, que se describen en la Figura 7, se tuvieron en cuenta en el segundo estudio.

Figura 7

Reglas de histéresis



Nota. Tomado de Priestley et al., 2007

El estudio de Dwairi y Kowalsky (2007), representó la componente de respuesta histerética en la forma siguiente donde el C depende de la regla de histéresis:

$$\xi_h = C \cdot \left(\frac{\mu - 1}{\mu \pi} \right) \quad (23)$$

El estudio de Grant *et al* (2005), que consideró una gama más amplia de reglas histeréticas, utilizando una formulación más compleja mediante:

$$\xi_h = a \left(1 - \frac{1}{\mu^b} \right) \left(1 + \frac{1}{(T_e + c)^d} \right) \quad (24)$$

Al reconocer que la ecuación simplificada produce resultados casi idénticos a la expresión más completa, se puede incorporar la dependencia de la ductilidad del amortiguamiento elástico en la estructura fundamental de la ecuación de amortiguamiento viscoso equivalente, incluso si se ignora la dependencia del período de la ecuación. Se debe asumir un amortiguamiento elástico del 5% como establece la normativa, la relación entre ductilidad y amortiguamiento es la siguiente:

$$\xi_e = 0,05 + C \cdot \left(\frac{\mu - 1}{\mu\pi} \right) \quad (25)$$

El coeficiente C está sujeto a variaciones entre 0,1 y 0,7, según la regla de histéresis más adecuada para la estructura y el tipo de material dados.

$$\text{Edificios con muros de concreto, (TT): } \xi_e = 0,05 + 0,444 \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \quad (26a)$$

$$\text{Edificios aperticidad de concetro, (TF): } \xi_e = 0,05 + 0,565 \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \quad (26b)$$

El factor de ductilidad es:

$$\mu = \frac{\Delta d}{\Delta y} \quad (27)$$

Amortiguamiento del sistema. – El amortiguamiento se relaciona con la ductilidad del desplazamiento. Para determinar la ductilidad de desplazamiento requerida para la estructura sustituta, es necesario calcular el desplazamiento de diseño Δd utilizando la ecuación que incorpora el desplazamiento de fluencia efectiva Δ .

El perfil de desplazamiento de rendimiento se utiliza para interpolar el valor de Δ . En el caso de los marcos, es conveniente suponer que la deriva de fluencia permanece constante con la altura, lo que resulta en un desplazamiento de fluencia constante.

$$\Delta_y = \theta_y \cdot H_e \quad (28)$$

La altura efectiva de la estructura substituta puede ser definida por:

$$H_e = \frac{\sum_{i=1}^n (m_j \cdot \Delta_i \cdot H_i)}{\sum_{i=1}^n (m_j \cdot \Delta_i)} \quad (29)$$

Distribución

Para establecer los momentos de diseño de las rótulas plásticas potenciales, es necesario distribuir el esfuerzo cortante basal como el esfuerzo de diseño para las diferentes masas discretizadas dentro de la estructura. Suponiendo una respuesta sinusoidal a la amplitud máxima, la distribución del corte basal debe ser proporcional a las masas y el desplazamiento en cada ubicación de masa individual. Por lo tanto, la fuerza de diseño para la masa i se puede determinar de la siguiente manera:

$$F_i = V_B (m_i \Delta_i) / \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i) \quad (30)$$

Análisis de la estructura

Para adherirse al concepto de estructura sustituta, que es la base del DDBD, la rigidez del miembro debe reflejar con precisión la rigidez secante efectiva en la respuesta de desplazamiento de diseño. Hay dos métodos recomendados para el análisis estructural cuando se considera el vector de fuerza lateral de diseño indicado por la ecuación y en línea con los principios de DDBD.

Cuando se emplea un diseño convencional basado en fuerzas, la estructura generalmente se evalúa utilizando aproximaciones de la rigidez elástica de sus componentes. Sin embargo, estas estimaciones pueden ser considerablemente inexactas ya que la rigidez depende de la resistencia, que permanece desconocida durante esta fase. Se puede lograr un método de análisis estructural más preferible y sin complicaciones únicamente considerando los principios de equilibrio.

Requerimientos de diseño por capacidad

Para adherirse al concepto de estructura sustituta, que es la base del DDBD, la rigidez del miembro debe reflejar con precisión la rigidez secante efectiva en la respuesta de desplazamiento de diseño. Hay dos métodos recomendados para el análisis estructural cuando se considera el vector de fuerza lateral de diseño indicado por la ecuación y en línea con los principios de DDBD.

Cuando se emplea un diseño convencional basado en fuerzas, la estructura generalmente se evalúa utilizando aproximaciones de la rigidez elástica de sus componentes. Sin embargo, estas estimaciones pueden ser considerablemente inexactas ya que la rigidez depende de la resistencia, que permanece desconocida durante esta fase. Se puede lograr un método de análisis estructural más preferible y sin complicaciones únicamente considerando los principios de equilibrio.

Otro factor que debe ser considerado es que las estimaciones conservadoras de la resistencia de los materiales normalmente se adoptarán cuando se determine el tamaño de los miembros, y la cantidad de acero de refuerzo. Si las resistencias de los materiales exceden los valores de diseño, como normalmente es el caso, entonces los momentos desarrollados en los lugares de la rótula plástica superarán los valores de diseño.

Puesto que la respuesta es inelástica, es la resistencia actual, no la resistencia teórica de diseño que se desarrollara bajo el nivel de diseño de intensidad sísmica.

Todos los momentos en toda la estructura correspondientes al primer modo inelástico serán entonces incrementados en esa proporción.

El diseño por capacidad nos indica cual va a ser la resistencia que se necesita para soportar las fuerzas de flexión. La resistencia básica S_E para estos lugares y acciones correspondientes a la distribución de la fuerza en el primer modo son en consecuencia amplificadas por un factor de sobre resistencia ϕ^u para tener en cuenta la máxima sobrecapacidad.

Factible de flexión en los lugares de rótulas plásticas, y por un factor de amplificación dinámica ω para representar el potencial incremento en las acciones de diseño debido a los efectos de los modos superiores. La relación entre resistencia de diseño S_D y la resistencia básica S_E es así:

$$\phi_s S_D = S_R = \phi^u \omega S_E \quad (31)$$

Donde, S_R es la resistencia requerida confiable de la acción de diseño S , y ϕ_s es el correspondiente factor de reducción de resistencia, un valor de $\phi_s = 1$ debe ser adoptado para diseño a flexión de rotulas plásticas, pero valores de $\phi_s < 1$ son apropiados para otras acciones y ubicaciones.

Para estructuras aporticados, las fuerzas de corte y momento en vigas en otras posiciones que las de posibles rotulas plásticas son amplificadas por el factor de sobre resistencia a flexión. Ya que los modos superiores no son normalmente considerados para diseño de vigas, el factor de amplificación dinámica no es normalmente incluido. Sin embargo, se debe notar que la respuesta vertical es esencialmente un modo superior, y pueden amplificar los momentos de gravedad considerablemente.

Una formulación estricta del diseño por capacidad es muy oportuna para tomar esto en cuenta. La resistencia que se establece en el diseño previo, puede verse sobrepasada, lo que nos obliga a diseñar con un factor de seguridad nuestras fuerzas de flexión que se producen en las rótulas plásticas. Se debe considerar para el diseño el comportamiento de la rótula plástica. En adición a esto, el diseño básico para la rótula plástica puede ser basado en la estimación de la respuesta de un SDOF, como es el caso con el DDBD. La amplificación de la acción requerida para protección por capacidad debido a efectos de modos superiores debe también ser tomada en cuenta.

Comentarios sobre el método

El DDBD es un método sencillo y fácil de aplicar considerando que los niveles de desempeño de una estructura se describen en función de los desplazamientos que presenta y no con las fuerzas que actúan en cada elemento estructural. El objetivo de este método es determinar un perfil de desplazamientos considerando un espectro de aceleraciones.

Para la aplicación del método de los desplazamientos se parte de la deriva, estableciendo desde el inicio un valor establecido en la norma, toda estructura presenta una rigidez secante, el amortiguamiento equivalente para cada tipo de material, que se van a calcular aplicando un sistema equivalente de un grado de libertad, lo que produce que la rigidez esté en función de la resistencia de la estructura y no de la geometría del edificio.

De lo indicado anteriormente, el enfoque aplicado en este trabajo es el que proporciona al diseñador herramientas mejoradas para seleccionar la mejor alternativa estructural que satisfaga los estándares sociales de desempeño como los que actualmente se están definiendo en los códigos de diseño sísmico.

- Examina los desafíos involucrados en la definición de la rigidez inicial de las estructuras que se anticipa que exhibirán un comportamiento inelástico durante eventos sísmicos.

- Para mejorar la precisión del diseño basado en el desplazamiento, es necesario un examen exhaustivo de los datos sismológicos para garantizar el suministro de información más adecuada y relevante.
- En este análisis, revisaremos los principios básicos del análisis tiempo-historia inelástico, con un enfoque específico en el modelado.
- La formulación de ecuaciones relacionadas con la estimación del amortiguamiento viscoso.
- El avance de enfoques alternativos para calcular momentos de diseño en componentes estructurales basados en fuerzas de diseño laterales.
- El examen de ecuaciones relacionadas con el diseño por capacidad para varios sistemas estructurales, así como la creación de nuevas ecuaciones y metodologías centradas en la ductilidad.

Pero se puede evidenciar, una metodología de diseño sísmico práctica y simple, adecuada para su incorporación en los códigos en un formato razonablemente similar a los disponibles en la actualidad para el enfoque de “Fuerza Lateral Equivalente”, pero con una simulación de respuesta estructural mejorada.

Capítulo IV

Guía para la evaluación del desempeño sísmico basado en desplazamiento mediante el método propuesto por Priestley y otros (2007)

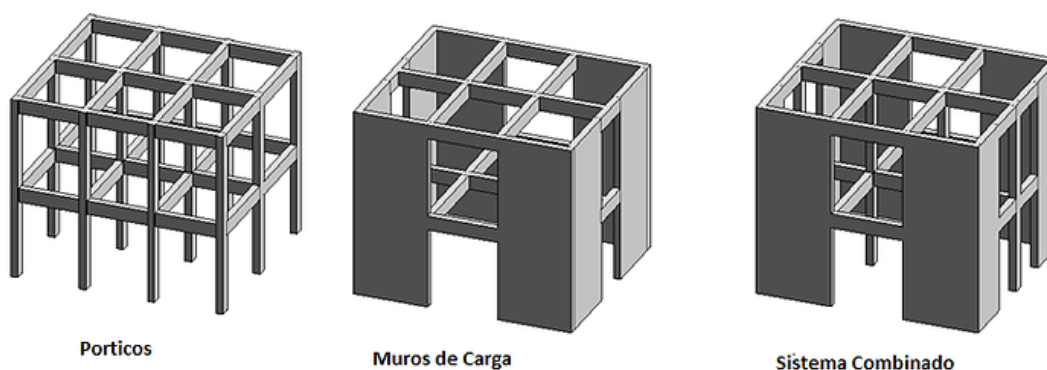
Estructura dual

Una estructura dual es conocida como un sistema constituido por marcos que pueden ser de hormigón armado o acero que van a permitir que la estructura soporte las cargas gravitacionales y los muros de hormigón o diagonales que van a soportar las fuerzas de corte que son producidas por un sismo, en muchos casos cuando las estructuras son de alturas considerables se deberá considerar las cargas del viento.

Cuando un edificio tiene más de 5 pisos, las estructuras duales son muy utilizadas ya que los pórticos, vigas y columnas se diseñan de tal manera que la estructura a evaluarse es bastante rígida. Un aspecto positivo es que al ser una estructura sólida se vuelve segura ante eventos sísmicos.

Figura 8

Sistemas estructurales



Nota. Tomado de Structural reliability of reinforced concrete buildings and dual system, 2022, Ingeniería sísmica.

Configuración estructural

La configuración está relacionada con la geometría de la estructura en planta y en elevación, la distribución de las cargas, y el tamaño que van a tener los elementos como columnas vigas y sus respectivas uniones. Los edificios que son asimétricos, es decir, las estructuras que presentan formas irregulares tanto en planta como en elevación son los que pueden verse más afectados ante la ocurrencia de un sismo., de acuerdo a la NEC-15 el diseño debe:

- Lograr que los daños que se producen en elementos no estructurales y estructurales sean los mínimos ante terremotos de magnitud menor y muy poco frecuentes.
- Cuando se presente un sismo de nivel moderado y poco frecuente los daños en la estructura principal que soporta a la edificación deben ser los mínimos posibles, los daños en elementos que no son críticos para la estructura deben ser controlados.
- Ante sismos que ocurren en forma muy poco probable y de nivel severo se debe diseñar con el fin de evitar que nuestra estructura colapse.

Límites de diseño y niveles desempeño sísmico

Es necesario determinar los diferentes niveles de comportamiento que tiene una estructura y cuál será el desempeño de toda la estructura y de los diferentes elementos estructurales tomando como referencia la seguridad y costo, este desempeño está asociado a un sismo severo y tiene diferentes niveles.

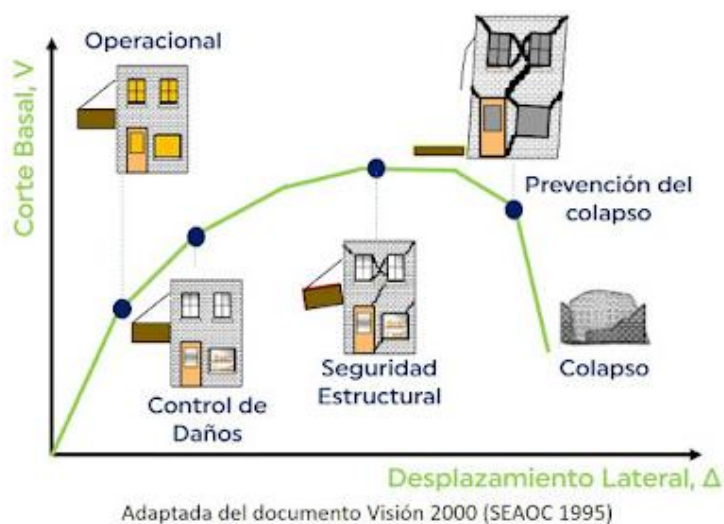
- *Ocupación inmediata:* La estructura presenta un daño limitado, mantiene significativamente su resistencia y casi toda su rigidez original.
- *Seguridad de vida:* La estructura presenta un daño sustancial y la pérdida significativa de su rigidez.

- *Prevención de colapso:* La estructura presenta un daño extremo, si la edificación se desplaza más de este límite se puede producir un colapso.

Para poder realizar este estudio se debe considerar el análisis no lineal para evaluar la estructura y obtener una relación desplazamiento-cortante basal bastante preciso para tomar decisiones precisas del comportamiento de la estructura.

Figura 9

Niveles de desempeño



Nota. Tomado de Determinación del nivel de desempeño de un edificio habitacional estructurado a base de muros de hormigón armado, 2018, Obras y proyectos.

Diseño basado en desplazamientos (DDBD)

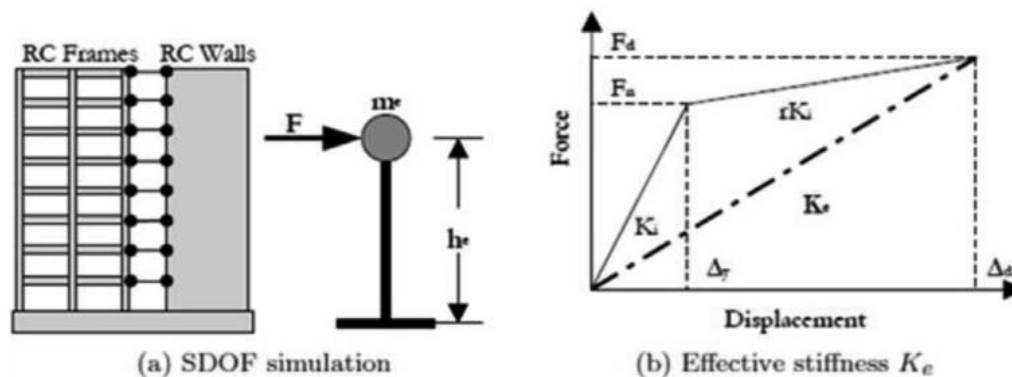
El diseño basado en desplazamientos se enfoca en el desplazamiento objetivo o de diseño, que se establece en función del nivel de desempeño que se espera tenga la estructura, además va a presentar la resistencia lateral que se requiere para alcanzar este nivel. Se debe utilizar de forma semejante lo establecido en el diseño por capacidad, para que los elementos cumplan con la ductilidad que se selecciona para la estructura.

Fundamentos para la aplicación del método

Es necesario establecer un sistema equivalente de un grado de libertad para obtener una rigidez secante K_e a través del desplazamiento máximo de la estructura (Δ_d), con estas propiedades se establece el amortiguamiento viscoso equivalente, que resulta de la relación del amortiguamiento elástico con la respuesta de la energía histerética que se presenta en la respuesta inelástica de la edificación.

Figura 10

Sistema equivalente de un grado de libertad



Nota. Tomado de Direct displacement-based Design method applied to reinforced concrete frame-wall systems, 2020, Obras y proyectos.

Formas de respuesta fuerza-desplazamiento

Con las propiedades antes mencionadas se puede calcular el periodo efectivo T_e en el desplazamiento máximo que se va a medir en la altura efectiva del sistema equivalente como se muestra en la Fig.3(a). Se obtiene también la rigidez efectiva K_e que corresponde al sistema equivalente SDOF, para lo cual se aplicara las ecuaciones 1 y 2.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m_e}{K}} \quad ; \quad K_e = \frac{4n2m_e}{T_e^2}$$

Donde:

m_e : es la masa efectiva del sistema

Dentro de la evaluación de la estructura se calcula la fuerza lateral o el cortante basal de diseño.

$$F = V_B = K_e * \Delta_d \quad (32)$$

Las propiedades resultan bastante sencillas de calcular al obtener una estructura equivalente.

Espectro de desplazamiento

Se va a utilizar el espectro de desplazamientos para poder calcular el cortante basal que requiere la estructura, este espectro se genera a partir del espectro de aceleraciones tomando como consideración que la respuesta está siendo gobernada por una respuesta estacionaria sinusoidal, esta aplicación es inexacta para los periodos largos, se aplica la ecuación 4.

$$\Delta_{(T)} = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_{A(T)}g$$

Donde:

g: aceleración por la gravedad

El periodo del sistema equivalente siempre será mayor al del análisis elástico, es recomendable establecer un límite a los desplazamientos porque los periodos grandes de los desplazamientos disminuyen hasta ser iguales que el desplazamiento del suelo y se utiliza la siguiente ecuación considerando $\alpha = 0.50$.

$$R_{\xi} = \left(\frac{0.07}{0.02 + \xi} \right)^{\alpha} \quad (33)$$

Sistema equivalente de un grado de libertad (SDOF)

Desplazamiento de diseño

El desplazamiento equivalente va a depender de los límites de desplazamiento y las derivas de piso reales aplicando la ecuación 7.

$$\Delta_d = \frac{\sum_i^n = 1 (m_j \cdot \Delta_i^2)}{\sum_i^n = 1 (m_j \cdot \Delta_j)}$$

Donde:

m_i es la masa.

Δ_i corresponde a los desplazamientos en los n pisos.

Se deberá considerar dentro de la evaluación de la estructura la deformación máxima del hormigón y del acero de refuerzo, considerando compresión y tensión respectivamente para cada material.

Masa efectiva

La masa efectiva del sistema equivalente dentro del primer modo elástico debe estar entre el 70% y 95% de la masa total, para lo cual se aplicará la ecuación 21.

$$m_e = \frac{\sum (m_i * \Delta_i)}{\Delta_d}$$

Amortiguamiento viscoso equivalente

Al ser una estructura dual, es decir está conformada por diferentes sistemas estructurales como muros y marcos de acero se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$\xi_{sys} = \frac{\varepsilon_W M_{OTM,W} + \varepsilon_F M_{OTM,F}}{M_{OTM}} \quad (34)$$

Donde:

M_{OTM} es el momento de volteo que se produce en la base de la estructura

$M_{OTM,W}$ es el momento de volteo de los muros

$M_{OTM,F}$ es el momento de volteo de los marcos

$\varepsilon_W, \varepsilon_F$ corresponden a los amortiguamientos de muros y pórticos respectivamente

Altura efectiva

Para la evaluación se obtendrá la altura efectiva del sistema de múltiples grados de libertad con la ecuación 29.

$$H_e = \frac{\sum m_i \Delta_i H_i}{\sum m_i \Delta_i}$$

Donde:

Δ_i corresponde al desplazamiento lateral

H_i es la altura de cada nivel

m_i corresponde a la masa de cada nivel

Distribución del cortante basal

Se debe distribuir las fuerzas en todos los niveles de la estructura que se evalúa, este paso se asemeja al método basado en fuerzas como se expresa en la ecuación 30.

$$F_i = V_s \frac{m_i \Delta_i}{\sum m_i \Delta_i}$$

Diseño por capacidad

Factible de flexión en los lugares de rotulas plásticas, y por un factor de amplificación dinámica ω para representar el potencial incremento en las acciones de diseño debido a los efectos de los modos superiores. La relación entre resistencia de diseño S_D y la resistencia básica S_E como se muestra en la ecuación 31.

$$\phi_S S_D = S_R = \phi^U \omega S_E$$

Donde:

SR es la resistencia requerida confiable de la acción de diseño

S, y ϕS es el correspondiente factor de reducción de resistencia, un valor de $\phi S = 1$ debe ser adoptado para diseño a flexión de rotulas plásticas, pero valores de $\phi S < 1$ son apropiados para otras acciones y ubicaciones.

Geometría de la estructura

Como ejemplo de la estructura que se evaluará en la presente guía se consideró los siguientes datos:

Tabla 1

Características del edificio

Características del Edificio	
Altura de piso planta baja	4.00 mts
Altura de piso 1-11	3.20 mts
Número de pisos	12 pisos
Altura total	35.300 mts
Distancia entre columnas eje "X"	8.00 mts
Distancia entre columnas eje "Y"	8.00 mts
Dimensiones en planta	32.00*24.00 mts

Con estos datos se debe modelar la estructura a través de los diferentes softwares de análisis estructural y dimensionamiento de edificios, en este caso práctico se utilizó ETABS, para obtener el análisis por fuerzas, para que las variables utilizadas en el DDBD disminuyan.

Propiedades de los materiales

Se debe establecer la resistencia que van a tener los materiales de los elementos estructurales como se detalla a continuación.

- Hormigón

$$f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$$

- Módulo de elasticidad del hormigón

$$E \text{ hormigón} = 4.7 * \sqrt{f'c} * 10000 = 4.7 * \sqrt{30} * 10000 = 257430 \text{ Kg/cm}^2$$

Acero refuerzo

$$fy = 4200 \text{ kg/cm}^2$$

- Acero estructural

$$fy = 3500 \text{ kg/cm}^2$$

Cargas impuestas

$$\text{Carga/m}^2 = \frac{\text{Peso}}{\text{Área de piso}}$$

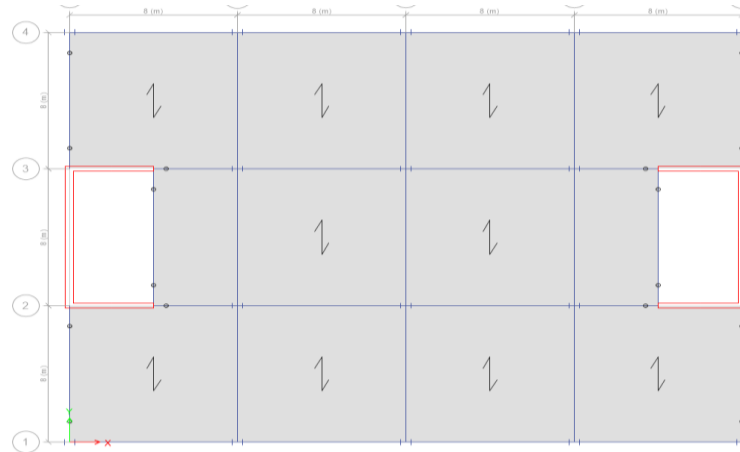
$$\text{Piso 1} = \frac{770 \text{ T}}{704 \text{ m}^2} = 1.09 \text{ T/m}^2$$

$$\text{Piso 2 - 11} = \frac{700 \text{ T}}{704 \text{ m}^2} = 0.99 \text{ T/m}^2$$

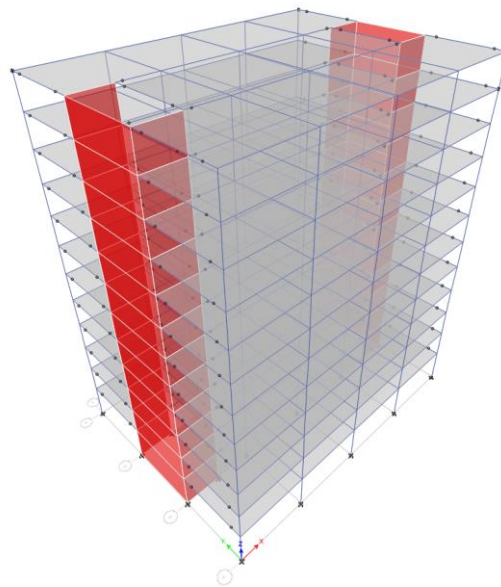
$$\text{Piso 12} = \frac{500 \text{ T}}{768 \text{ m}^2} = 0.65 \text{ T/m}^2$$

Figura 11

Planta del edificio de 12 pisos (análisis estático)

**Figura 12**

Modelo 3D del edificio de 12 pisos



Espectro de aceleraciones

Como uno de los pasos previos a la evaluación por el método de los desplazamientos se debe realizar el espectro de aceleraciones, que nos permitirá establecer aceleración, el periodo y el cortante basal del edificio.

Para el edificio de 12 pisos se consideró los parámetros establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15, como se muestra en la Tabla 2, como resultado se determina el valor de la carga sísmica que se va a imponer a la estructura.

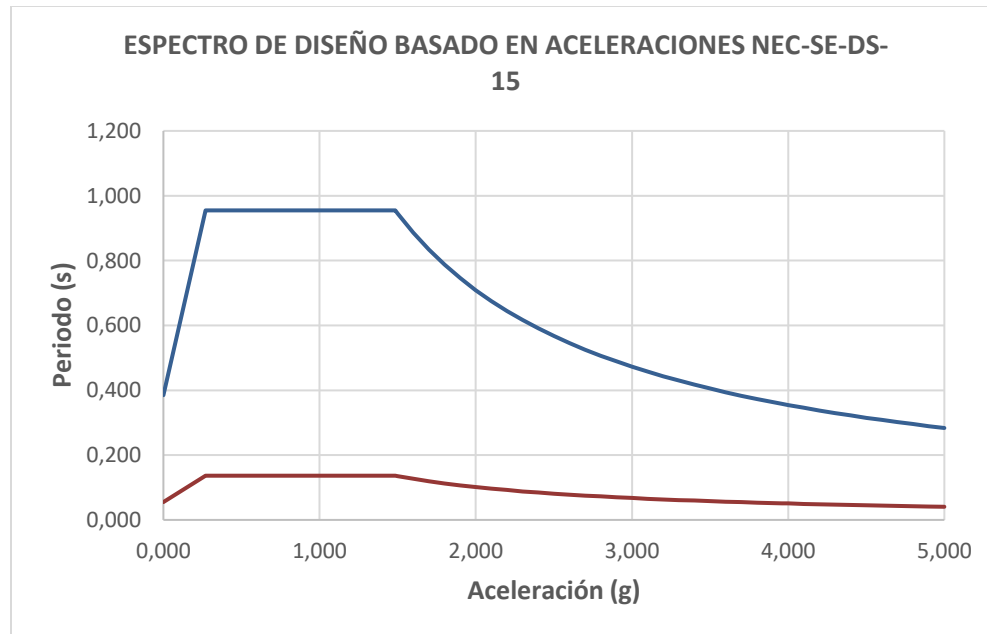
Tabla 2

Parámetros del espectro de aceleraciones

ESPECTRO ELÁSTICO DE DISEÑO EN ACELERACIONES				
Parámetro	Variable	Valor	Unidades	Referencia
Factor de importancia	I	1.00	s.u	Tabla 6, Sec.4.1
Factor de reducción de respuesta	R	7.00	s.u	Tabla 15, Sec.6.3.4
Zonificación Sísmica		V		Tabla 1, Sec.3.1.1
Región del Ecuador		Sierra, Esmeraldas y Gal+apagos		Sec.3.3.1
Factor de aceleración de la zona sísmica	Z	0.35	s.u	Tabla 1, Sec.3.1.1
Relación de amplificación espectral	n	2.48	s.u	Sec.3.3.1
Coefficiente Ct	Ct	0.072	s.u	Sec.6.3.3
Altura total del elemento	hn	39.20	m	Planos
Coefficiente para Calculo de Periodo	α	0.80	s.u	Sec.6.3.3
Tipo de Suelo		E		Tabla 2, Sec.3.2.1
factor de sitio Fa	Fa	1.10	s.u	Tabla 3, Sec.3.2.2
factor de sitio Fd	Fd	1.65	s.u	Tabla 4, Sec.3.2.2
factor de comportam. inelástico suelo	Fs	1.80	s.u	Tabla 5, Sec.3.2.2
Factor asociado al periodo de retorno	r	1.00	s.u	Sec 3.3.1
Factor de irregularidad en planta	ϕ_p	1.00	s.u	Tabla 13, Sec.5.2.3
Factor de irregularidad en elevación	ϕ_e	1.00	s.u	Tabla 14, Sec.5.2.3
Aceleracion de la gravedad	g	9.81	m/s ²	
Período teórico método 1	T1	1.355	seg.	Sec.6.3.3
Período teórico método 1 mayorado	T2	1.762	seg.	Sec.6.3.3
Período fundamental direccion x	Tx	1.03	seg.	ETABS
Período fundamental direccion y	Ty	0.99	seg.	ETABS
Periodo Límite en T=To	To	0.270	seg.	Sec.3.3.1
Periodo Límite en T=Tc	Tc	1.485	seg.	Sec.3.3.1
Periodo Límite en T=TL	TL	3.960	seg.	Sec.3.3.1
Aceleración en T=0	Sa	0.385	g	Sec.3.3.1
Aceleración en T=To	Sa_o	0.955	g	Sec.3.3.1
% de reduccion de respuesta	f	0.14	s.u	% energia R. LINEAL

Tabla 3*Valores para el método estático*

Terminología	Valor	Unidad
Ta	1.03	seg
Sa(Ta)	1.190	adimensional
I	1.00	adimensional
R	7.00	adimensional
ϕ_p	1.00	adimensional
ϕ_e	1.00	adimensional
Cv	0.170	adimensional
k	1.265	adimensional

Figura 13*Espectro de aceleraciones del edificio de 12 pisos*

Aplicación del método DDBD

Para evaluar el desempeño sísmico del edificio de 12 pisos se aplicará el método de desplazamientos para lo cual se muestra en la Tabla 4 las propiedades de los materiales de la estructura de una forma resumida.

Tabla 4

Propiedades de los materiales

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES				
	HORMIGÓN		ACERO DE REFUERZO	
Resistencia a la compresión	Modulo de elasticidad	Peso volumétrico	Esfuerzo nominal de fluencia	Módulo de elasticidad
$f'_c=210\text{kg/cm}^2$	$E_c=173896.5\text{ kg/cm}^2$	$\lambda_c=2400\text{ kg/m}^3$	$f_y=4200\text{ kg/cm}^2$	$E_s=2040000\text{ kg/cm}^2$

Paso 1.- Asignación del porcentaje del cortante basal

Para determinar el porcentaje de cortante basal que se debe asignar a la edificación es necesario distribuir el cortante basal de la base a cada uno de los pisos para esto tomaremos el peso de cada piso del modelo del edificio en ETABS.

Peso total de la estructura:

$$W = 843.017\text{ ts}^2/m$$

Cortante basal:

$$V = \frac{I * S_a(T_a)}{R * \phi_P * \phi_E} * W \quad (35)$$

De la Tabla 3 obtenemos:

$$V = \frac{1 * 1.190}{7 * 1 * 1} * 843.017\text{ ts}^2/m$$

$$V = 143.312\text{ ts}^2/m$$

La fuerza sísmica es distribuida en cada piso:

En la tabla (5) obtenemos los resultados de la distribución de las fuerzas sísmicas:

- (1) Pisos de la estructura
- (2) Altura de cada piso
- (3) Es la altura acumulada en cada piso
- (4) Es la masa que tiene cada nivel de la estructura
- (5) Se encuentra multiplicando (3) *(4)

$$W_i * H_i^k \quad (36)$$

$$k = 0.1265 \text{ (Tabla 3)}$$

- (6) Se encuentra el coeficiente de fuerza sísmica α

$$\alpha_i = \frac{W_i * H_i^k}{\sum W_i * H_i^k} \quad (37)$$

- (7) Se calcula la distribución multiplicando (6) * V (cortante basal)

Tabla 5

Distribución del cortante basal en cada piso

Piso	Altura	Hi	Masa (tn.s2/m)	Wi*Hi^k	α	Fi
12	3.2	39.20	50.968	80.920	0.067	9.562
11	3.2	36.00	71.356	112.079	0.092	13.244
10	3.2	32.80	71.356	110.772	0.091	13.090
9	3.2	29.60	71.356	109.348	0.090	12.921
8	3.2	26.40	71.356	107.783	0.089	12.736
7	3.2	23.20	71.356	106.043	0.087	12.531
6	3.2	20.00	71.356	104.078	0.086	12.299
5	3.2	16.80	71.356	101.816	0.084	12.031
4	3.2	13.60	71.356	99.141	0.082	11.715
3	3.2	10.40	71.356	95.846	0.079	11.326
2	3.2	7.20	71.356	91.507	0.075	10.813
1	4	4.00	78.491	93.472	0.077	11.045
0	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
Sumatoria		259.20	843.017	1212.81	1.00	143.31

De acuerdo a lo establecido en Priestley et al. 2007, hay que elegir una proporción del cortante en la base que va a tomar cada sistema.

$$B_F = B_{fy} * V_{base} \quad (38)$$

$$V_w = (1 - B_f) * V_{base} \quad (39)$$

Donde:

V_f= Es el cortante sísmico tomado por el sistema de marcos

V_w=Es el cortante sísmico tomado por los muros

V_{base}=Cortante sísmico total

Tomando en consideración la distribución del edificio se considera una asignación del 30% del cortante basal ya que este debe ser asignado del 15%-50%, de acuerdo a la estructura si se considera menos del 30% el punto de inflexión se encontraría en los pisos 11 y 12 por lo tanto se asigna ese porcentaje para el cálculo de altura de inflexión.

$$B_F = 0.30$$

$$V_w = (1 - 0.3) * V_{base}$$

$$V_w = 0.7 V_{base}$$

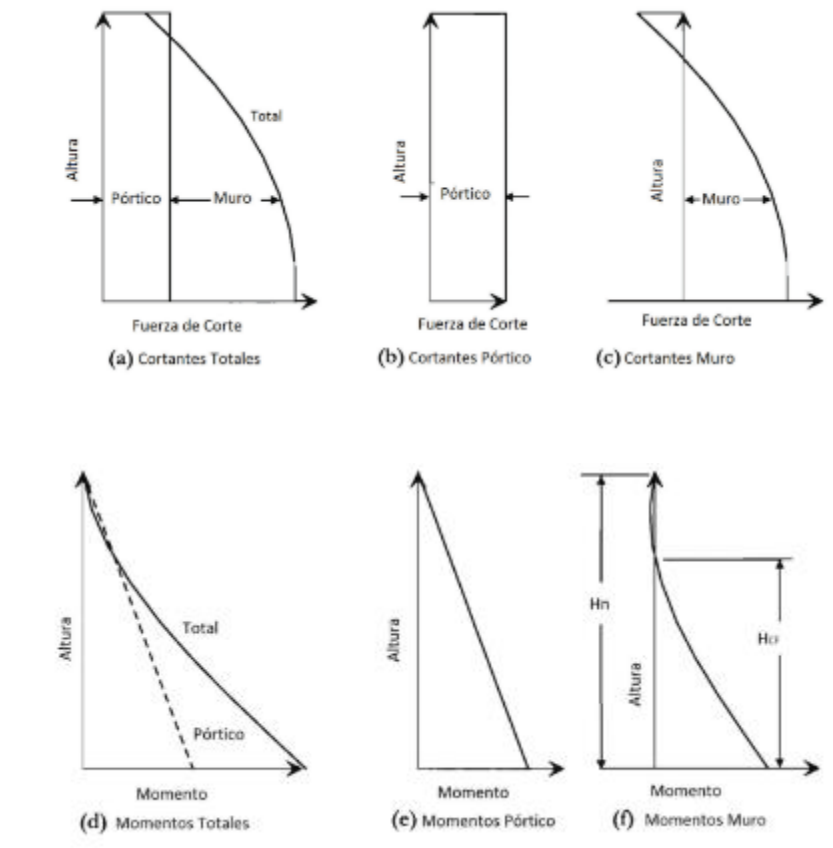
Paso 2.- Definición de la altura de inflexión

Distribución de fuerzas y momentos en edificaciones con muros

En la Figura 27 se muestra el esquema de las fuerzas de corte y momentos para el muro y los pórticos, considerando fuerzas y momentos totales para la evaluación.

Figura 14

Gráficos de cortantes y momentos



Nota. Tomado de Direct displacement-based Design method applied to reinforced concrete *frame-wall* systems, 2020, Obras y proyectos.

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos del perfil de momentos en la dirección "X" los cuales se obtienen de la siguiente manera:

- (1) Nivel de la estructura
- (2) Altura de cada piso
- (3) Es el peso sísmico de cada piso
- (4) Se logra multiplicando (2) *(3)
- (5) Es la fuerza sísmica horizontal relativa aplicando la ecuación 30:

$$m_i = 500\text{ton}; H_i = 39.2\text{m}; n = 12$$

$$F_i = \frac{(m_i \cdot H_i)}{\sum_{i=1}^n m_i \cdot H_i}$$

(6) Cortante horizontal acumulado en cada piso

(7) Momento de volteo relativo en cada piso, en el piso 12 el momento es 0, y se calcula con la siguiente ecuación:

$$M_{OTM} = [V_{t_{i+1}} * (H_{i+1} - H)] + M_{OTM\ i+1} \quad (40)$$

(8) Cortante relativo tomado en este caso el 30%

(9) Es el cortante de los muros que se obtiene (6) - (8)

(10) Es el perfil vertical de los momentos de los muros

$$M_w = [M_{i+1} + V_{i+1} * (H_{i+1} - H_i)] \quad (41)$$

Tabla 6

Perfil de momentos

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Nivel	Hi (m)	m (Ton)	m*Hi	Fi (rel)	Vti (rel)	Motm	Vf	Vw	Mw
12	39.2	500	19600	0.112721	0.112721	0.000	0.3	-0.18728	0.0000
11	36	700	25200	0.144928	0.257649	0.361	0.3	-0.04235	-0.5993
10	32.8	700	22960	0.132045	0.389694	1.185	0.3	0.08969	-0.7348
9	29.6	700	20720	0.119163	0.508857	2.432	0.3	0.20886	-0.4478
8	26.4	700	18480	0.106280	0.615137	4.061	0.3	0.31514	0.2205
7	23.2	700	16240	0.093398	0.708535	6.029	0.3	0.40853	1.2290
6	20	700	14000	0.080515	0.789050	8.296	0.3	0.48905	2.5363
5	16.8	700	11760	0.067633	0.856683	10.821	0.3	0.55668	4.1013
4	13.6	700	9520	0.054750	0.911433	13.563	0.3	0.61143	5.8826
3	10.4	700	7280	0.041868	0.953301	16.479	0.3	0.65330	7.8392
2	7.2	700	5040	0.028986	0.982287	19.530	0.3	0.68229	9.9298
1	4	770	3080	0.017713	1.000000	22.673	0.3	0.70000	12.1131
0	0	0	0	0	1.000000	26.673	0.3	0.70000	14.9131
Sumatoria	259.2	8270	173880	1					

De la columna 10 de la tabla es fácil observar que el punto de inflexión está en el piso 8 y 9 para lo cual se aplica la siguiente formula:

$$H_{CF} = H_i + (H_{i+1} - H_i) * \left(\frac{M_{wi}}{M_{wi} - M_{wi+1}} \right) \quad (42)$$

Donde:

H_i Es la altura de piso donde el momento M_w es por primera vez positivo.

H_{i+1} Es la altura de piso superior donde el momento M_w es por primera vez positivo.

M_{wi} Es el momento del piso superior M_w donde es positivo por primera vez.

M_{wi+1} Es el momento del piso superior donde el momento M_w es positivo.

$$H_{CF} = 26.4 + (29.60 - 26.40) * \left(\frac{0.221}{0.221 - (-0.448)} \right)$$

$$H_{CF} = 27.465 \text{ m}$$

Paso 3.- Desplazamiento de fluencia en los muros

Inicialmente la resistencia de fluencia que se espera del acero de refuerzo es:

$$F_y = 4200 \frac{kg}{cm^2}; E_s = 2040000 \frac{kg}{cm^2} \quad (43)$$

$$F_{ye} = 1.1 f_y$$

Obteniendo:

$$\varepsilon_y = \frac{1.1 f_y}{E_s} \quad (44)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1.1 * 4200 \frac{kg}{cm^2}}{2040000 \frac{kg}{cm^2}}$$

$$\varepsilon_y = 0.00299$$

Curvatura de fluencia en los muros: $L_w = 8m$

$$\phi_y = \frac{2\varepsilon_y}{l_w} \quad (45)$$

Donde:

L_w es la longitud del muro y para este edificio es 8m

$$\phi_y = \frac{2 * 0.00229}{8}$$

$$\phi_y = 0.000575$$

Para presentar el perfil de curvatura del muro al ser de forma lineal desde la fluencia que se produce en la base a distancia cero en el punto de nominado de inflexión (H_{CF}) se puede asumir que la curvatura que se encuentra sobre el punto de inflexión es cero cuando los desplazamientos que son producto de fluencia de cada piso lo determinen. Este desplazamiento de fluencia se obtiene con los valores dados por la ecuación (46) en el análisis del área y momento:

(46)

Para $H_i < 27.456 m$

$$\Delta_d = \phi_y * \left(\frac{H_i^2}{2} - \frac{H_i^3}{6 * H_{CF}} \right)$$

Tabla 7

Desplazamiento de fluencia para $H_i < H_{CF}$

Δy_1	0.004373772
Δy_2	0.013592375
Δy_3	0.027152103
Δy_4	0.044367151
Δy_5	0.064551719
Δy_6	0.087020003

Δy_7	0.111086201
Δy_8	0.136064512

Para $H_i > 27.456 \text{ m}$

$$\Delta_d = \phi_y * \left(\frac{H_{CF} * H_i}{2} \right) - \left(\frac{H_{CF}^2}{6} \right) \quad (47)$$

Tabla 8

Desplazamiento de fluencia para $H_i > H_{CF}$

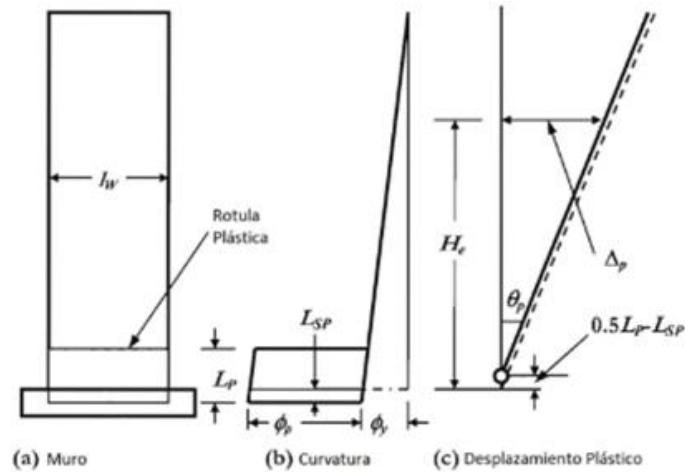
Δy_9	0.16130351
Δy_{10}	0.186546616
Δy_{11}	0.211789721
Δy_{12}	0.237032827

Paso 4.- Perfil de desplazamiento de diseño

Para estructuras duales, la longitud e la rótula plástica es probable que sea influenciada por los efectos de cambios de tensión que son las vigas y columnas, por lo que se considera la longitud el muro. Se debe verificar las deformaciones de los materiales de los elementos estructurales y las derivas de la estructura a fin de determinar que gobierna el diseño de la edificación.

Figura 15

Deformación plástica de un muro



Nota. Tomado de *Structural reliability of reinforced concrete buildings and dual system*, 2022

Deformaciones del material del muro

Como se utiliza un diámetro de varilla N° 5 la longitud de penetración de la deformación unitaria es:

$$d_b = 0.0022m.$$

$$L_S = 0.022 * f_y * d_b$$

(48)

$$L_S = 0.022 * 462 * 0.0022$$

$$L_S = 0.224m$$

Factor para la longitud de la rótula plástica

El factor (K) depende de la relación que existe entre el esfuerzo producido por la tensión y el esfuerzo que obtenemos debido a la fluencia del acero de refuerzo en nuestro muro:

$$f_u = 550 \text{ Mpa}$$

$$k = 0.2 * \left(\frac{f_u}{f_y} - 1 \right)$$

(49)

$$k = 0.2 * (1.35 - 1)$$

$$k = 0.07 < 0.08 \text{ OK}$$

En este paso se desconoce la altura efectiva por lo que se aplica la siguiente fórmula como un valor promedio para los muros:

$$H_n = 39.2m$$

$$H_e = 0.75 * H_n \quad (50)$$

$$H_e = 0.75 * 39.2$$

$$H_e = 29.4m$$

El punto de inflexión calculado resulta menor que la altura efectiva calculada $H_{CF} < H_e$, y se utiliza este valor para el perfil de desplazamientos.

Longitud de la rótula plástica

$$L_p = k * H_{CF} + 0.1 * l_w + l_s \quad (51)$$

$$L_p = 0.07 * 27.456 + 0.1 * 8 + 0.224$$

$$L_p = 2.95m$$

Desplazamiento de fluencia en la azotea

$$\Delta_y = \frac{\phi_y * (H_n + L_s)^2}{3} \quad (52)$$

$$\Delta_y = \frac{0.000575 * (39.2 + 0.224)^2}{3}$$

$$\Delta_y = 0.30m$$

Deriva de fluencia en la azotea

$$\phi_y = \frac{\phi_y * (H_n + L_s)}{2} \quad (53)$$

$$\phi_y = \frac{0.000575 * (39.2 + 0.224)}{2}$$

$$\phi_y = 0.011m$$

Deriva de fluencia en el punto de inflexión

$$\phi_y = \frac{\phi_y * H_{CF}}{2} \quad (54)$$

$$\phi_y = \frac{(0.000575 * 27.456)}{2}$$

$$\phi_y = 0.008m$$

Rotación plástica en base a la deformación unitaria

$$\phi_p = \left(\frac{0.072}{l_w} - \phi_y \right) * L_p \quad (55)$$

$$\phi_p = \left(\frac{0.072}{8} - 0.00575 \right) * 2.95$$

$$\phi_p = 0.024$$

Deriva al nivel H_{CF} en base a la deformación unitaria

$$\phi_c = \phi_y + \phi_p \quad (56)$$

$$\phi_c = 0.008 + 0.024$$

$$\phi_c = 0.033$$

Según lo que establece la NEC-15 es la deriva máxima es de 0.02 (2%), es decir que la deformación unitaria del material no es la que gobierna la respuesta cuando realizamos el diseño del muro de corte de concreto de 8m. En edificios que superan la altura de seis pisos con muros de concreto los desplazamientos producidos por estos muros son los que establece la normativa ecuatoriana.

Límites de derivas

Como se presenta una edificación de 12 pisos se realiza la corrección por amplificación de derivas, del análisis estático se obtuvieron las siguientes derivas como se muestra en la Tabla 9, los valores de derivas están dentro de los límites que se especifica en la NEC-15 correspondiente al 2%.

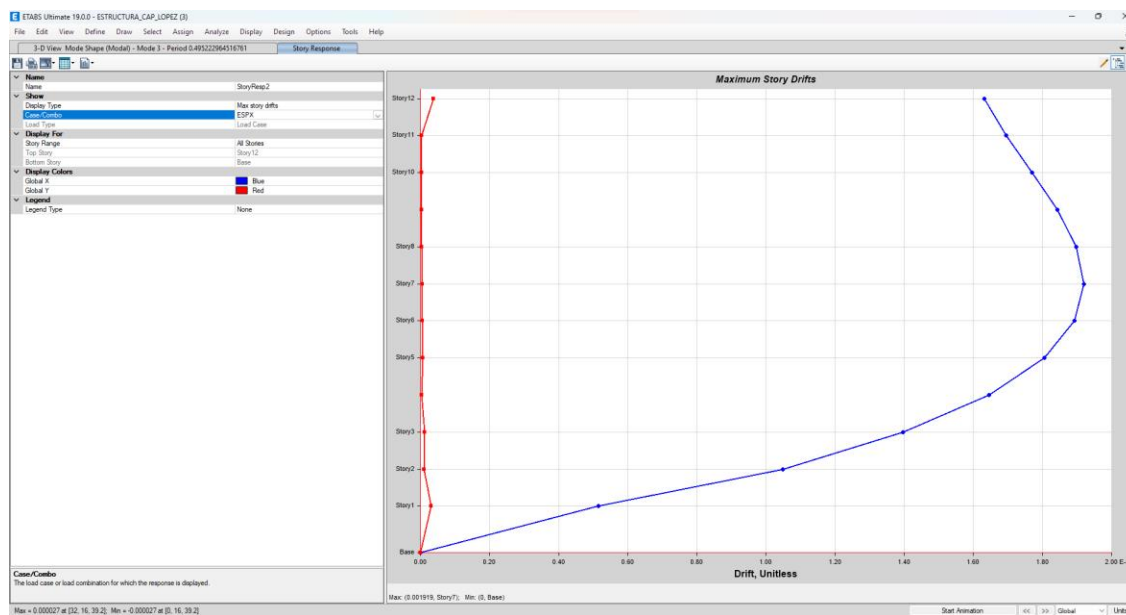
Tabla 9

Tabla de resumen del análisis lineal

ANÁLISIS	ESTÁTICO		DINÁMICO	
	SX	SY	ESPX	ESPY
DESPLAZAMIENTO	0.06	0.04	0.06	0.03
DERIVAS INELÁSTICA	0.002	0.001	0.002	0.001
DERIVAS ELÁSTICAS (0.75*R*DI)	0.01	0.005	0.01	0.005
DERIVA ELÁSTICA %	1%	0.5%	1%	0.5%

Figura 16

Deriva máxima ESPx



Para obtener el momento de volcamiento de base se realiza utiliza los datos de la tabla obtenida en el paso 2.

$$M_{OTMF} = M_{OTMF} - M_W \quad (57)$$

$$M_{OTMF} = 26.673 - 14913$$

$$M_{OTMF} = 11.76$$

$$\omega_A = \left(1 - \left(\frac{n-5}{100} \right) * \left(\frac{M_{OTMF}}{M_{OTM}} + 0.25 \right) \right)$$

$$\omega_A = \left(1 - \left(\frac{12-5}{100} \right) * \left(\frac{11.76}{26.673} + 0.25 \right) \right)$$

$$\omega_A = 0.952$$

Con esto la deriva de diseño se reduce a:

$$\theta_c = 0.952 * 0.02$$

$$\theta_c = 0.019$$

La máxima deriva plástica admisible es:

$$\theta_p = \theta_c - \theta_y \quad (58)$$

$$\theta_p = 0.019 - 0.008$$

$$\theta_p = 0.011$$

Con estos datos se procede a calcular el perfil de desplazamiento de la estructura para cada piso, a continuación, se detalla cómo se obtienen los valores de la tabla:

- (1) Nivel de la estructura
- (2) Altura de cada piso
- (3) Es el peso sísmico de cada piso
- (4) Es el perfil de desplazamiento en cada piso Δ_y
- (5) Es el perfil de desplazamiento;

$$\Delta_y = 0.2370; H_i = 39.2 \text{ m} \quad (59)$$

$$\Delta_{di} = \Delta_{yi} + \left(\phi_c - \left(\frac{(\phi_y * H_{CF})}{2} \right) \right) * H_i$$

(6) Se calcula multiplicando (3) *(5)

(7) Se encuentra multiplicando (3) *(5)²

(8) Se multiplica (2) *(3) *(5)

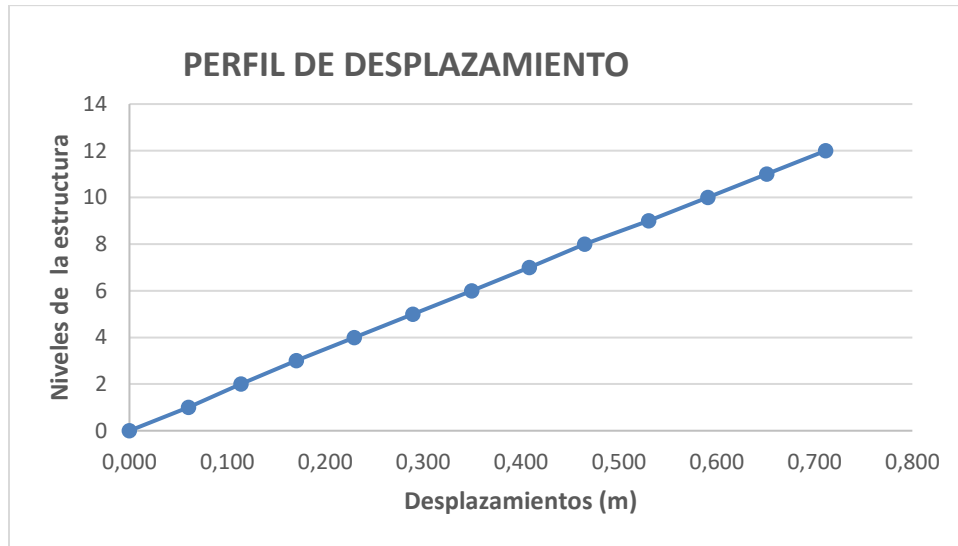
Tabla 10

Perfil de desplazamiento

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Piso	Hi	Masa (tn.s2/m)	Δy	Δdi	$mi * \Delta di$	$mi * \Delta di^2$	$mi * \Delta di * Hi$
12	39.2	50.9684	0.2370	0.6739	34.3470	23.1461	1346.4032
11	36	71.3558	0.2118	0.6130	43.7399	26.8119	1574.6372
10	32.8	71.3558	0.1865	0.5521	39.3940	21.7486	1292.1236
9	29.6	71.3558	0.1613	0.4912	35.0481	17.2147	1037.4239
8	26.4	71.3558	0.1361	0.4303	30.7025	13.2105	810.5457
7	23.2	71.3558	0.1111	0.3696	26.3755	9.7493	611.9111
6	20	71.3558	0.0870	0.3099	22.1135	6.8531	442.2710
5	16.8	71.3558	0.0646	0.2518	17.9656	4.5233	301.8227
4	13.6	71.3558	0.0444	0.1959	13.9807	2.7392	190.1373
3	10.4	71.3558	0.0272	0.1431	10.2076	1.4602	106.1593
2	7.2	71.3558	0.0136	0.0938	6.6954	0.6282	48.2068
1	4	78.4913	0.0044	0.0490	3.8422	0.1881	15.3689
0	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SUMA	259.2	843.0173293			284.4121	128.27317	7777.01077

Figura 17

Perfil de desplazamientos



Paso 5.- Desplazamiento de diseño del sistema equivalente

Se aplica la ecuación 7.

$$\Delta_d = \frac{\sum_{i=1}^n 1 (m_j \cdot \Delta_i^2)}{\sum_{i=1}^n 1 (m_j \cdot \Delta_j)}$$

$$\Delta_d = \frac{128.27}{248.41}$$

$$\Delta_d = 0.451 \text{ m}$$

Paso 6.- Altura efectiva

Se aplica la ecuación 29.

$$H_e = \frac{\sum_{i=1}^n 1 (m_j \cdot \Delta_i \cdot H_i)}{\sum_{i=1}^n 1 (m_j \cdot \Delta_i)}$$

$$H_e = \frac{7777.010}{248.41}$$

$$H_e = 27.34m$$

Paso 7.- Amortiguamiento equivalente

El amortiguamiento viscoso equivalente que va a ser utilizado para continuar con los cálculos es un promedio entre el amortiguamiento que se produce en los pórticos y el que se obtiene de nuestros muros de concreto, ya que cada uno de estos elementos presenta demandas diferentes de ductilidad en sus desplazamientos.

Muros

El desplazamiento de fluencia de la estructura es la siguiente:

Para $H_i < H_{CF}$

$$\Delta_{yi} = \theta_y * \left(\frac{He^2}{2} - \frac{He^3}{6H_{CF}} \right) \quad (60)$$

$$\Delta_{yi} = 0.00575 * \left(\frac{27.34^2}{2} - \frac{27.34^3}{6 * 27.456} \right)$$

$$\Delta_{yi} = 0.144m$$

La deriva de fluencia del sistema de muros es la siguiente:

$$\phi_y = \frac{\phi_y * H_{CF}}{2} \quad (61)$$

$$\phi_y = \frac{(0.000575 * 27.456)}{2}$$

$$\phi_y = 0.008m$$

La ductilidad del sistema de muros se obtiene con la siguiente fórmula aplicando la ecuación 27:

$$\mu = \frac{\Delta_D}{\Delta_y}$$

$$\mu = \frac{0.451}{0.144}$$

$$\mu = 3.143$$

El amortiguamiento del sistema de muros se encuentra de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{eq} = 0.05 + 0.444 * \left(\frac{\mu - 1}{\mu - \pi} \right) \quad (62)$$

$$\varepsilon_{eq} = 0.05 + 0.444 * \left(\frac{3.143 - 1}{3.143 - \pi} \right)$$

$$\varepsilon_{eq} = 0.146$$

Marcos

La deriva de fluencia de los marcos, se calcula con el peralte de la viga que es:

$$L_b = 8m; H_b = 0.6m$$

$$\theta_{yF} = 0,60 \varepsilon_y * \frac{L_b}{h_b} \quad (63)$$

$$\theta_{yF} = 0,60 * 0.00229 * \frac{8}{0.6}$$

$$\theta_{yF} = 0,0066$$

El desplazamiento de fluencia del sistema de marcos es:

$$\Delta_{yF} = \theta_{yF} * H_e \quad (64)$$

$$\Delta_{yF} = 0.0066 * 27.34$$

$$\Delta_{yF} = 0.181$$

La ductilidad de los marcos se encuentra con la ecuación 29:

$$\Delta_D = 0.451m$$

$$\mu = \frac{\Delta_D}{\Delta_y}$$

$$\mu = \frac{0.451}{0.181}$$

$$\mu = 2.492$$

El amortiguamiento en los muros es:

$$\varepsilon_{eq} = 0.05 + 0.577 * \left(\frac{\mu - 1}{\mu - \pi} \right) \quad (65)$$

$$\varepsilon_{eq} = 0.05 + 0.577 * \left(\frac{2.492 - 1}{2.492 - \pi} \right)$$

$$\varepsilon_{eq} = 0.160$$

Amortiguamiento del sistema

$$\varepsilon_{sys} = \frac{(\varepsilon_{eq} * M_{OTM} + \varepsilon_{eq} * M_{OTMF})}{M_{OTM}} \quad (66)$$

$$\varepsilon_{sys} = \frac{(0.146 * 14.91 + 0.160 * 11.76)}{26.673}$$

$$\varepsilon_{sys} = 0.152$$

Ductilidad del sistema

$$V_{wbase} = 0.7$$

$$V_{fbase} = 0.3$$

$$\mu_{sys} = \frac{(\mu * V_{wbase} + \mu * V_{fbase})}{V_{wbase} + V_{fbase}} \quad (67)$$

$$\mu_{sys} = \frac{3.143 * 0.7 + 2.492 * 0.3}{0.7 + 0.3}$$

$$\mu_{sys} = 2.947$$

Paso 8.- Espectro de desplazamiento

El espectro de desplazamiento obtenido debe considerar los efectos del amortiguamiento inelástico y se lo reduce utilizando la ecuación 33: $\varepsilon = 0.152$

$$R_e = \left(\frac{0,07}{0,02 + \varepsilon} \right)^{0.5}$$

$$R_e = \left(\frac{0,07}{0,02 + 0.152} \right)^{0.5}$$

$$R_e = 0.637$$

Los datos del espectro de desplazamiento y el espectro de desplazamientos inelásticos se presenta a continuación:

Tabla 11

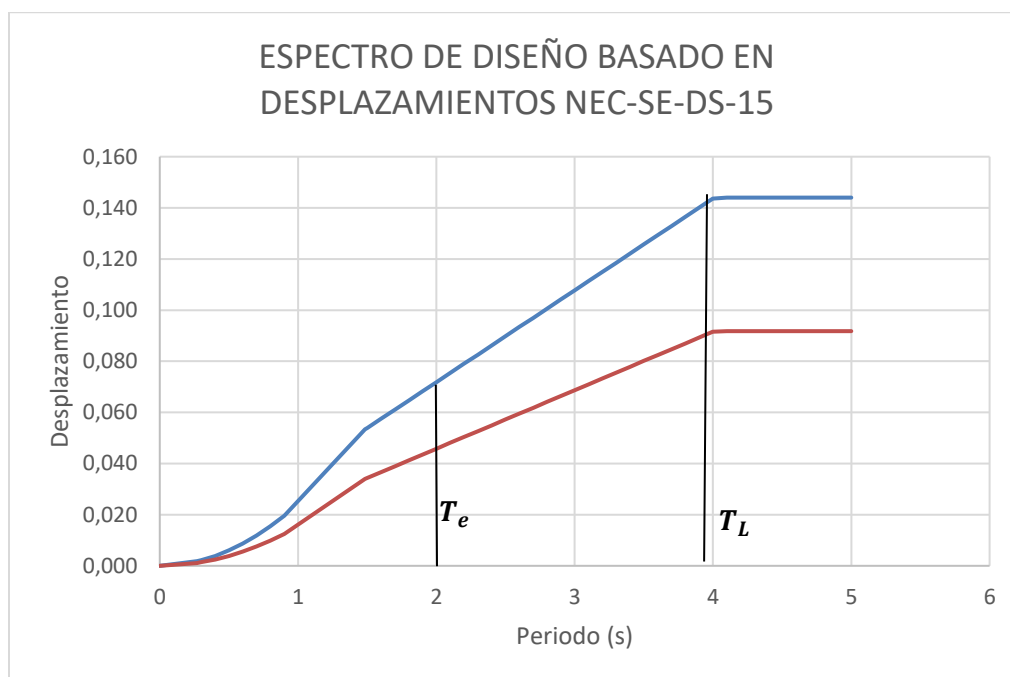
Datos para el espectro de diseño

ESPECTRO DE DISEÑO				
	ESP. ELASTICO		ESP. REDUCIDO	
<i>T (s)</i>	<i>Sa (g)</i>	<i>Sd</i>	<i>Sa (g)</i>	<i>Sd</i>
	0.00	0.38500	0.00000	0.38500
To	0.27	0.95480	0.00176	0.95480
	0.30	0.95480	0.00218	0.95480
	0.40	0.95480	0.00387	0.95480
	0.50	0.95480	0.00605	0.95480
	0.60	0.95480	0.00871	0.95480
	0.70	0.95480	0.01185	0.95480
	0.80	0.95480	0.01548	0.95480
	0.90	0.95480	0.01959	0.95480
Tc	1.49	0.95480	0.05333	0.95480
	1.50	0.94525	0.05387	0.94525
	1.60	0.88617	0.05746	0.88617
	1.70	0.83405	0.06106	0.83405
	1.80	0.78771	0.06465	0.78771
	1.90	0.74625	0.06824	0.74625
	2.00	0.70894	0.07183	0.70894
	2.10	0.67518	0.07542	0.67518
	2.20	0.64449	0.07901	0.64449
	2.30	0.61647	0.08260	0.61647
	2.40	0.59078	0.08620	0.59078
	2.50	0.56715	0.08979	0.56715
	2.60	0.54534	0.09338	0.54534
	2.70	0.52514	0.09697	0.52514
	2.80	0.50639	0.10056	0.50639
	2.90	0.48892	0.10415	0.48892

	3.00	0.47263	0.10775	0.47263	0.06867
	3.10	0.45738	0.11134	0.45738	0.07095
	3.20	0.44309	0.11493	0.44309	0.07324
	3.30	0.42966	0.11852	0.42966	0.07553
	3.40	0.41702	0.12211	0.41702	0.07782
	3.50	0.40511	0.12570	0.40511	0.08011
	3.60	0.39386	0.12929	0.39386	0.08240
	3.70	0.38321	0.13289	0.38321	0.08469
	3.80	0.37313	0.13648	0.37313	0.08698
TL	3.96	0.35805	0.14222	0.36356	0.09064
	4.00	0.35447	0.14366	0.35447	0.09155
	4.10	0.34582	0.14400	0.35447	0.09177
	4.20	0.33759	0.14400	0.35447	0.09177
	4.30	0.32974	0.14400	0.35447	0.09177
	4.40	0.32225	0.14400	0.35447	0.09177
	4.50	0.31508	0.14400	0.35447	0.09177
	4.60	0.30823	0.14400	0.35447	0.09177
	4.70	0.30168	0.14400	0.35447	0.09177
	4.80	0.29539	0.14400	0.35447	0.09177
	4.90	0.28936	0.14400	0.35447	0.09177
	5.00	0.28358	0.14400	0.35447	0.09177

Figura 18

Espectro de diseño basado en desplazamientos



Paso 9.- Periodo efectivo

Para determinar el periodo efectivo se debe calcular el periodo límite de vibración T_L con la siguiente ecuación: (68)

$$T_L = 2.4 * F_d$$

$$T_L = 2.4 * 1.65$$

$$T_L = 3.95$$

Donde $F_d = 1.65$ y es el factor de sitio tomado de la Tabla 2.

En $T_L = 3.96s$ el espectro de desplazamiento para el 5% de amortiguamiento es de 0.142 s y el mismo desplazamiento para el 15.2% de amortiguamiento es:

$$0.142 * 0.64 = 0.091 \text{ g}$$

$$T_e = 3.96 * \frac{0.451}{0.091 * 9.81}$$

$$T_e = 2.00 \text{ seg}$$

Paso 10.- Masa efectiva

Aplicando la ecuación 21.

$$m_e = \frac{\sum_j^n = 1(m_i \cdot \Delta_i)}{\Delta_d}$$

$$m_e = \frac{284.412}{0.451}$$

$$m_e = 630.609 \text{ ton}$$

Paso 11.- Rigidez efectiva

$$K_e = \frac{4 * \pi^2 * m_e}{T_e^2} \quad (69)$$

$$K_e = \frac{4 * \pi^2 * 630.609}{2.00^2}$$

$$K_e = 6203.419 \text{ KN/m}$$

Paso 12.- Cortante basal

$$F = K_e * \Delta_e \quad (70)$$

$$F = \frac{6203.41}{10} * 0.451$$

$$F = 279.77 \text{ ton}$$

Paso 13.- Fuerzas de diseño en marcos y muros estructurales

Con los datos obtenidos se procede a calcular las fuerzas en marcos y muros de la siguiente manera:

- (1) Mismo valor de la Tabla 6
- (2) Se coloca el mismo valor de la Tabla 6
- (3) Es la fuerza sísmica relativa y se calcula multiplicando $F * (5)$ (de la Tabla 6)

$$F_{piso} = 279.77 * 0.112 = 31.53$$

(4) Es el cortante acumulado en cada piso del edificio

(5) Es el momento de volteo relativo en cada piso y se debe multiplicar

$F * (7)$ (de la Tabla 6)

$$M_{OTM} = 279.77 * 0.361 = 100.99$$

(6) Es el cortante relativo de los marcos que al inicio de la evaluación se consideró el 30% y se calcula multiplicando $F * (8)$ (de la Tabla 6)

(7) Es el cortante en los muros y se calcula multiplicando $F * (9)$ (de la Tabla 6)

(8) Es el perfil de los momentos que se aplican a los muros para calcular se multiplica

$F * (10)$ (de la Tabla 6)

(9) Es el perfil de los momentos que se aplican a los marcos y se debe restar (5) -(9)

Tabla 12

Fuerza de diseño

Piso (1)	Hi (2)	Fi (rel) (3)	Vti (rel) (4)	Mtom (5)	Vf (6)	Vw (7)	Mw (8)	Mf (9)
12	39.20	31.5365	31.5365	0.0000	83.9323	-52.3957	0.0000	0.0000
11	36.00	40.5470	72.0835	100.9169	83.9323	-11.8487	-167.6663	268.5832
10	32.80	36.9428	109.0263	331.5842	83.9323	25.0941	-205.5822	537.1664
9	29.60	33.3386	142.3650	680.4685	83.9323	58.4327	-125.2812	805.7496
8	26.40	29.7345	172.0994	1136.0363	83.9323	88.1672	61.7035	1074.3328
7	23.20	26.1303	198.2297	1686.7545	83.9323	114.2974	343.8384	1342.9160
6	20.00	22.5261	220.7558	2321.0895	83.9323	136.8235	709.5902	1611.4993
5	16.80	18.9219	239.6777	3027.5080	83.9323	155.7455	1147.4255	1880.0825
4	13.60	15.3177	254.9955	3794.4767	83.9323	171.0632	1645.8110	2148.6657
3	10.40	11.7136	266.7090	4610.4622	83.9323	182.7768	2193.2133	2417.2489
2	7.20	8.1094	274.8184	5463.9311	83.9323	190.8862	2778.0990	2685.8321
1	4.00	4.9557	279.7742	6343.3501	83.9323	195.8419	3388.9348	2954.4153
0	0	0.0000	279.7742	7462.4468	83.9323	195.8419	4172.3025	3290.1443

Para compara los resultados se obtiene del análisis estático inicial los datos del cortante en los muros y el momento de volteo que se detallan a continuación.

Tabla 13

Resultados obtenidos de ETABS

TABLE: Story Forces					
Story	Output Case	Case Type	Step Type	VX	MY
Story1	ESPX	LinRespSpec	Max	120,2645	5539,4212

Se puede verificar que los datos iniciales son menores a los obtenidos por el método de los desplazamientos es decir la estructura cumple con el nivel de desempeño de seguridad de vida y se podría optimizar el diseño inicial de la estructura.

Paso 14.- Verificación del método

Figura 19

Seguridad de vida



Nota. Tomado de Structural reliability of reinforced concrete buildings and dual system, 2022, Ingeniería sísmica.

Una forma de comprobar si los datos obtenidos con este método son correctos podemos utilizar un análisis no lineal con la ayuda de cualquier software que nos permita

someter a nuestra estructura aun análisis Pushover con el objetivo de obtener una curva de capacidad representativa de la edificación.

Tomando como referencia la Noma ATC-40 se muestra los valores límites de deriva para los niveles de desempeño.

Tabla 14

Nivel de desempeño

DERIVAS MÁXIMAS Y NIVEL DE DESEMPEÑO				
Límite de deriva	Ocupación inmediata	Control de daños	Seguridad de vida	Estabilidad estructural
Máxima deriva total %	1%	1%-2%	2%	$0.33 \frac{V_i}{P_i} / 100$
Máxima deriva inelástica %	0.5%	0.5%-1.5%	Sin límite	Sin límite

De acuerdo a la Tabla 13 se establecen los valores máximos de derivas para la evaluación del desempeño sísmico de la estructura a continuación se presentan los valores obtenidos en el análisis estático inicial y en la evaluación por el método de los desplazamientos.

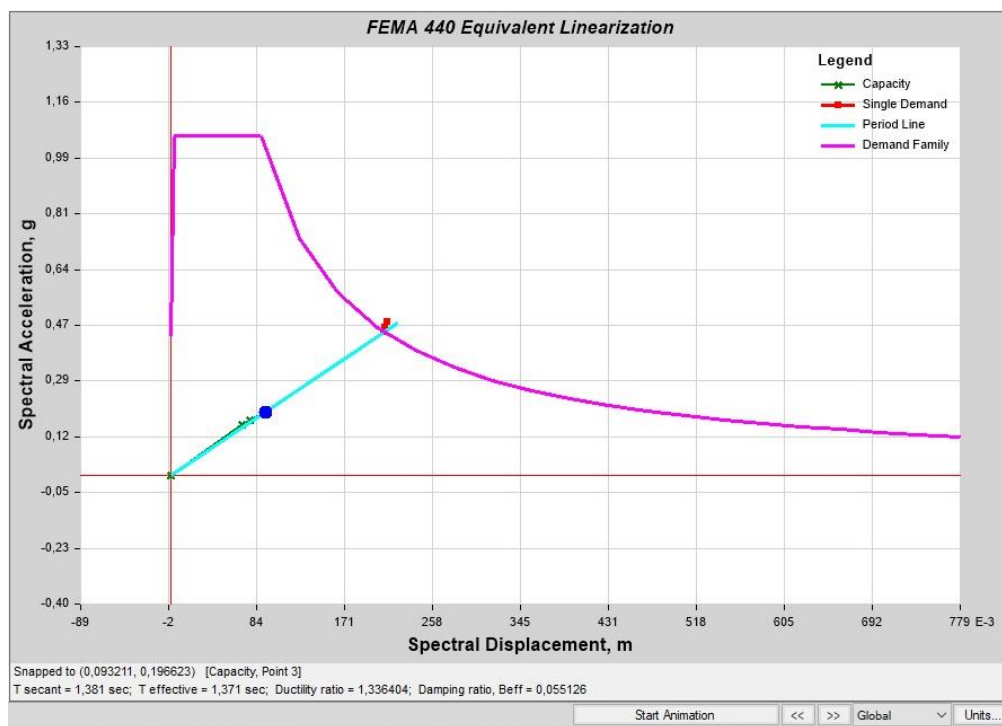
Tabla 15

Desplazamientos máximos y niveles de daño

Derivas y niveles de desempeño		
Análisis estático (x)	DDBD	Conclusión
1%	1.9%	Con los valores obtenidos de las derivas la estructura está dentro de los límites de control de daños y estos valores se encuentran dentro de lo establecido en la norma para deriva máxima que es el 2%.

Figura 20

Aceleración y desplazamiento espectral



Evaluación del método

Una estructura de tipo dual de pórticos de acero y muros de concreto presentan deformaciones y desplazamientos que pueden ser calculados con el DDBD, las mismas que pueden ser evaluadas de acuerdo a la forma en que interactúan los pórticos de acero con los muros estructurales de concreto, esta interacción entre elementos estructurales nos da una ventaja al momento de diseñar utilizando este método.

Su aplicación es bastante práctica ya que permite determinar el comportamiento sísmico de una edificación mediante una evaluación en el rango inelástico y los resultados son comparables con el método de las fuerzas, se puede aplicar fácilmente cumpliendo con la secuencia de 14 pasos que son lógicos y ordenados.

Con los datos obtenidos del Pushover se obtiene la curva de capacidad que permite evaluar de forma directa los límites de desempeño de una estructura tomando como consideración el desplazamiento de diseño, amortiguamiento y ductilidad del sistema equivalente, porque el DDBD permite analizar una estructura utilizando el denominado sistema

equivalente de un grado de libertad.

A través de las derivas obtenidas del 1% y del 1.9% se determina que los desplazamientos serían 39.2cm y 74.48cm respectivamente para lograr el nivel de desempeño de seguridad de vida, sin embargo, en la evaluación el resultado obtenido corresponde a un desplazamiento de 45cm lo que nos indica que la estructura está por debajo del límite de desplazamiento.

Capítulo V

Conclusiones

- Con los resultados que obtuvimos al concluir este proyecto, podemos concluir que nuestros objetivos planteados al iniciar con esta investigación fueron alcanzados de forma satisfactoria, y en lo que respecta al método DDBD para nuestra estructura, nos damos cuenta que este método resulta un poco más sencillo que el método de las fuerzas, pudiendo incentivar su utilización ya que en primera instancia el DDBD logra reemplazar a la estructura principal por una equivalente de SDOF.
- En nuestro análisis podemos evidenciar que el valor obtenido en el DDBD es de 45cm y el valor que nos presenta el Pushover de la edificación es de 21cm, los dos valores se encuentran en el rango de los límites de ocupación inmediata de la estructura, con esto se puede mejorar el diseño de la estructura.
- El método del desplazamiento permite trabajar con las derivas de piso de acuerdo a lo que establece la norma, lo que provoca que la rigidez de la estructura sea mayor

logrando que el diseño de una estructura sea seguro y eficiente.

- El DDBD nos presenta resultados con un nivel de exactitud muy elevado, pero no debemos dejar de mencionar que esto está muy relacionado con la regularidad de la distribución geométrica de nuestra estructura.
- Según la NEC la seguridad de vida busca proteger la vida de los ocupantes de una estructura para un terremoto que ocurra dentro del rango de tiempo de retorno de 475, con una probabilidad de que esto suceda cada año del 0.002 de acuerdo a las curvas de peligro sísmico.
- Con relación a ese enfoque, el procedimiento denominado (DDBD), en el cual, se busca alcanzar un nivel de desempeño especificado, dispone de aplicabilidad a una amplia gama de tipos estructurales incluyendo edificios aporricados, edificios con muros, edificios duales muros/pórticos, puentes, estructuras sísmicamente aisladas, muelles, y un rango de materiales estructurales, incluyendo concreto reforzado y pretensado, acero estructural, mampostería y madera.

Recomendaciones

- En la actualidad no existen muchos tipos de estructuras que han sido analizadas utilizando el DDBD, por lo que se recomienda se amplíen el tipo de estructuras analizadas bajo este procedimiento, así como incluir estructuras en otros tipos de materiales para poder estudiar sus resultados combinados con diferentes niveles de demandas sísmicas.
- A nivel local se debería realizar trabajos experimentales para poder comprobar todos los parámetros que utiliza el DDBD, y así poder generar más confianza para que la aplicación de este método sea más común.
- El uso de un software externo para poder someter a la estructura a las diferentes

cargas por las que se ve afectada es de suma importancia para comparar resultados y establecer los parámetros de diseño, por lo cual se debe escoger de forma muy minuciosa dicho software y verificar de forma muy eficiente que cumpla con su objetivo.

Referencias

- Andrade, J., & Carrillo, F. (2018). *Análisis comparativo entre los diseños sismorresistentes de la norma ecuatoriana de la construcción*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Barbat, H., Oller, S., & Vielma, J. (2005). *Cálculo y diseño sismorresistente de edificios, Aplicación de la norma NCSE-02*.
- Condori, A., & Quispe, G. (2022). *“Respuesta sísmica mediante el método convencional (E-030) y el método basado en desplazamientos, edificación de vivienda, Cusco-2021”*. Lima: Escuela Profesional de Ingeniería Civil.
- Francisco, G. (2014). *Obtenido de Análisis comparativo de los métodos de diseño sismorresistente basado en fuerzas y basado en desplazamientos para edificaciones en Ecuador*.
- Hernández, J. (2003). *Desempeño estructural y espectros de diseño*.
- Kunjan, D., & Jignesh, A. (2017). Application of DDBD and FBD Methodology. *Kalpa Publications in Civil Engineering*, 69-79.

- López, S. (2009). *Diseño por desplazamientos de estructuras de concreto*. Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de Un.
- Mendez, T. (2011). *Estudio comparativo de métodos de diseño sísmico basados en desplazamientos aplicados a estructuras reticulares de concreto reforzad*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Méndez, T. (2011). *Estudio comparativo de métodos de diseño sísmico basados en desplazamientos aplicados a estructuras reticulares de concreto reforzado*. México.
- Moncayo, M., Vargas, J., Moncayo, G., & Barzola, I. (2017). *Análisis sobre la recurrencia de*.
- Moreno, R., Bairan, J., & Huaman, V. (2011). *Estudio comparativo del diseño sísmico basado en fuerzas y desplazamientos aplicados a un edificio de hormigón armado de mediana altura*.
- Ordoñez, J. (2015). *Diseño Sísmico basado en desplazamientos de estructuras de hormigón armado aporticads y estructuras con muros de corte*. Quito.
- Priestley, M. (1998). *Brief Comments on Elastic Flexibility of Reinforced Concrete Frames and Significance to Seismic Design*". Engineering.
- Priestley, M., Calvi, G., & Kowalsky, M. (2007). *Displacement Based Seismic Design of structures*. Pavia, Italia: IUSS Press.
- Suárez, J. (2018). *Análisis sísmico comparativo entre el método de diseño basado en fuerzas y el método de diseño directo basado en desplazamientos*. Jipijapa.