



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO NO LINEAL DE UNA ESTRUCTURA DE
HORMIGÓN ARMADO DE 4 PLANTAS CONSTRUIDA CON NORMA NEC 2000 Y
2015, UBICADO EN EL BARRIO FORESTAL MEDIA, PARROQUIA LA
FERROVIARIA, CANTÓN QUITO, PROVINCIA PICHINCHA 2022 - 2023**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniera Civil

AUTORA: Carol Denisse Astudillo Torres
TUTOR: Daniel Armando Valverde Castillo

Quito - Ecuador
2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carol Denisse Astudillo Torres con documento de identificación N° 1725588436 manifiesto que:

Soy la autora y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 20 de julio del 2023

Atentamente,



Carol Denisse Astudillo Torres

1725588436

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Carol Denisse Astudillo Torres con documento de identificación N° 1725588436, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del Proyecto Técnico: “Análisis del comportamiento no lineal de una Estructura de Hormigón armado de 4 Plantas construida con norma NEC2000 y 2015, ubicado en el barrio Forestal Media, Parroquia La Ferroviaria, Cantón Quito, Provincia Pichincha 2022 - 2023”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 20 de julio del 2023

Atentamente,



Carol Denisse Astudillo Torres

1725588436

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Daniel Armando Valverde Castillo con documento de identificación N° 1900467869, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO NOLINEAL DE UNA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN ARMADO DE 4 PLANTAS CONSTRUIDA CON NORMA NEC2000 Y 2015, UBICADO EN EL BARRIO FORESTAL MEDIA, PARROQUIA LA FERROVIARIA, CANTÓN QUITO, PROVINCIA PICHINCHA 2022 - 2023, realizado por Carol Denisse Astudillo Torres con documento de identificación N° 1725588436, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 20 de julio del 2023

Atentamente,



Ing. Daniel Armando Valverde Castillo, Msc.

1900467869

DEDICATORIA

Este proyecto de titulación se lo dedico a mi padre Enrique quien ha sido mi apoyo, fortaleza, mi inspiración y guía para cumplir con cada uno de mis objetivos planteados, de igual manera quiero dedicar mi trabajo a mi madre Silvia que en paz descansa quien me ha enseñado a ser perseverante y buena persona. Este logro lo dedico a mis padres que sin su ayuda no hubiera podido estar aquí, ellos han sido el motor que mueve mi vida, también quiero dedicar este logro a mis hermanos Matheus y Henry que han sabido estar conmigo en mis momentos más difíciles quienes con sus locuras me han ayudado a mantenerme de pie.

Carol D Astudillo T

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mis padres por darme la oportunidad de estudiar la carrera que me gusta, por siempre estar apoyándome con lo necesario.

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana que me ha abierto sus puertas para poder cumplir con un objetivo más en mi vida profesional y a los docentes que conforman la Carrera de Ingeniería Civil quienes me han impartido sus experiencias, enseñanzas y gracias a ellos ahora poder contar con un amplio conocimiento que me permitirá forjarme como una gran profesional. A mi tutor le agradezco por la paciencia, la enseñanza y el apoyo durante la ejecución de este trabajo de titulación, sin duda un excelente docente y un excelente ser humano.

Po ultimo quiero agradecer a mis amigos quienes ha sabido ser parte de esta formación académica.

Carol D Astudillo T

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I	3
ANTECEDENTES Y GENERALIDADES	3
1.1. Introducción	3
1.2. Problema de estudio	3
1.2.1. Antecedentes.....	3
1.2.2. Importancia y alcance	3
1.2.3. Delimitación	4
1.3. Justificación	5
1.4. Grupo objetivo	5
1.5. Objetivos.....	5
1.5.1. Objetivo general	5
1.5.2. Objetivos específicos.....	6
CAPÍTULO II	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1. Introducción.....	6
2.2. Descripción del proyecto	7
2.2.1. Definición geométrica.....	7
2.2.2. Materiales	10
2.2.3. Definición de cargas	10
2.2.4. Derivas inelásticas máximas.....	11
2.2.5. Cargas por viento	14
2.2.6. Cargas por granizo	15
2.3. Capacidad estructural	16
2.4. Componentes primarios y secundarios	16
2.4.1. Componente primario	17
2.4.2. Componente secundario	17
2.5. Ingeniería sismo - resistente	17
2.5.1. Diseño sísmico.....	18
2.5.2. Requisitos de diseño sísmico	18
2.5.3. Estructura.....	19
2.6. Métodos de análisis	20
2.6.1. Análisis estático	20
2.6.2. Análisis de espectros de respuesta.....	20

2.6.3.	Análisis dinámico lineal	23
2.6.4.	Análisis estático no lineal (pushover).....	23
2.7.	Espectro de diseño	23
2.8.	Metodología pushover	24
2.9.	Análisis no lineal pushover según la fema 356	24
2.10.	Origen de la metodología pushover.....	25
2.11.	Relaciones lineales y no lineales	26
2.12.	Cálculo no lineal de los materiales	27
2.13.	Definición del análisis estático no lineal (pushover).....	27
2.14.	Comportamiento no lineal de la edificación.....	28
2.15.	Tipos de comportamiento no lineal	28
2.15.1.	Comportamiento bajo geometría no lineal	29
2.15.2.	Comportamiento bajo materiales no lineales.....	29
2.16.	Tipos de comportamiento no lineal	30
2.17.	Tipologías estructurales	30
2.17.1.	Tipología estructural tipo I	30
2.17.2.	Tipología estructural tipo II.....	31
2.17.3.	Tipología estructural tipo III.....	31
2.17.4.	Tipología estructural IV.....	31
2.18.	Normas.....	31
2.18.1.	Normativa de la sociedad americana de ingenieros civiles asce 7-22.....	31
2.18.1.1.	Máximo sismo considerado	31
2.18.1.2.	Sismo de diseño	31
2.18.1.3.	Valores de movimiento sísmico en el suelo.....	31
2.18.1.4.	Tipos de suelos	31
2.18.1.5.	Coefficientes de sitio.....	31
2.18.2	Normativa ecuatoriana de la construcción NEC-SE-DS-15.....	33
CAPÍTULO III.....		37
METODOLOGÍA.....		37
3.1.	Criterios de definición de reducción sísmica (R)	37
3.2.	Ductilidad	37
3.3.	Histéresis	38
3.4.	Redundancia	38
3.5.	Regularidad y configuración estructural.....	39
3.6.	Métodos de diseño	39

3.6.1.	Determinación de la fuerza sísmica lateral.....	39
3.6.2.	Método 1: diseño basado en fuerzas (DBF)	40
3.6.3.	Método 2: diseño basado en desplazamientos (DBD).....	40
3.7.	Detallamiento y diseño por capacidad.....	41
3.7.1.	Grupos estructurales de acuerdo con el factor R.....	41
3.7.2.	Sistema estructural dúctil.....	43
3.7.3.	Requisitos generales para aplicar el DBD	43
3.8.	Demanda, capacidad y desempeño de una estructura.....	43
3.9.	Niveles de desempeño	44
3.10.	Rotulas plásticas en un análisis pushover.....	45
3.11.	Estados limite de elementos	47
3.11.1.	Estado de agrietamiento.....	47
3.11.2.	Estado de primera fluencia	47
3.11.3.	Estado de desprendimiento	47
3.12.	Patrones de carga lateral	47
3.12.1.	Patron modal.....	47
3.12.2.	Patron de fuerzas laterales adaptivas	48
3.13.	Hormigón.....	48
3.14.	Materiales del hormigón armado	49
3.15.	Factores que influyen en la resistencia del hormigón.....	50
3.15.1.	Cemento.....	50
3.15.2.	Relación agua/cemento	50
3.16.	Propiedades físicas mecánicas del hormigón endurecido.....	50
3.16.1.	Agregado fino	51
3.16.2.	Agregado grueso.....	51
3.16.3.	Densidad del hormigón endurecido	51
3.16.4.	Resistencia a la compresión simple	52
3.17.	Control de hormigón en obra.....	52
3.18.	Hormigón armado	53
3.19.	Módulo de elasticidad.....	53
3.20.	Tipos de investigación	56
3.21.	Métodos de investigación	56
3.22.	Técnicas e instrumentos de recolección de información	56
3.23.	Proceso técnico de ingeniería civil	57
3.23.1.	Estudio y análisis de la norma nec 2000 y nec 2015	57

3.23.2.	Recopilación de datos del método no lineal	57
3.23.3.	Prediseño de la estructura	57
3.23.4.	Análisis estático no lineal (pushover).....	57
3.23.5.	Modelación en software del comportamiento de la estructura	57
3.23.6.	Interpretación de los resultados	57
3.24.7.	Comparación entre las normas nec 2000 y nec 2015	57
3.24.8.	Análisis de resultados	58
CAPÍTULO IV		59
DISEÑO		59
4.1.	Descripción.....	59
4.2.	Determinación de cargas.....	60
4.3.	Propiedades estructurales	60
4.4.	Prediseño de elementos estructurales	61
4.5.	Carga sísmica.....	62
CAPÍTULO V		63
ANÁLISIS DE RESULTADOS		64
5.1.	Resultados de la estructura modelada.....	64
5.2.	Periodos de vibración	64
5.3.	Análisis de participación modal	65
5.4.	Verificación por torsión de la estructura.....	67
5.5.	Verificación por análisis dinámico	68
5.6.	Derivas de piso	69
5.7.	Rotulas plásticas	75
5.8.	Curva de desempeño.....	76
CONCLUSIONES		78
RECOMENDACIONES		79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes de corrección por viento σ	13
Tabla 2. Coeficientes de sitio f_a	31
Tabla 3. Coeficientes de sitio f_v	31
Tabla 4. Clasificación de sistemas estructurales por grupos.....	40
Tabla 5. Características arquitectónicas de la edificación	56
Tabla 6. Cargas no sísmicas que se aplicarán en el programa	57
Tabla 7 Propiedades de los materiales.	58
Tabla 8. Prediseño de elementos estructurales.....	59
Tabla 9. Parámetros geoténicos y de sitio de la edificación	59
Tabla 10. Periodo de vibración de la edificación.....	63
Tabla 11. Periodos fundamentales de vibración de la edificación.....	64
Tabla 12. Verificación del periodo natural de la estructura.....	65
Tabla 13. Verificación por torsión de la estructura.....	65
Tabla 14. Verificación del análisis dinámico.....	66
Tabla 15. Derivas de piso por pushover en X.....	68
Tabla 16. Verificación de derivas de piso por análisis pushover en X	68
Tabla 17. Derivas de piso por pushover en Y	69
Tabla 18. Verificación de derivas de piso por análisis pushover en Y	70
Tabla 19. Datos de análisis pushover.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Delimitación del predio	2
Figura 2. Planta baja	6
Figura 3. Primera planta arquitectónica.....	7
Figura 4. Segunda planta arquitectónica.....	7
Figura 5. Tercera planta arquitectónica	8
Figura 6. Implantación arquitectónica	8
Figura 7. Efecto p - delta en una estructura	11
Figura 8. Representación del espectro de respuesta.....	20
Figura 9. Representación péndulos con varios periodos.....	20
Figura 10. Proceso para el análisis no lineal pushover	23
Figura 11. Curva esfuerzo - deformación de estructuras de concreto reforzado	25
Figura 12. Comportamiento no lineal del concreto	28
Figura 13. Desempeño de la estructura bajo diferentes intensidades de sismo	33
Figura 14. Análisis pushover utilizando el principio de linealidad.....	34
Figura 15. Representación fuerza - deformación lineal y no lineal	36
Figura 16. Representación del desempeño del sistema	43
Figura 17. Nivel de desempeño de la estructura	44
Figura 18. Curva de madurez del hormigón	47
Figura 19. Curva esfuerzo - deformación del hormi3n endurecido	51
Figura 20. Espectro de dise1o basado en aceleraciones	60
Figura 21. Modelo de la edificaci3n utilizando el paquete computacional.....	61
Figura 22. Dise1o de cortante para la verificaci3n del an1lisis din1mico	67
Figura 23. Verificaci3n derivas de piso an1lisis pushover en direcci3n X.....	69
Figura 24. Verificaci3n derivas de piso an1lisis pushover en direcci3n Y	70
Figura 25. Curva demanda capacidad.....	71
Figura 26. Rotulas pl1sticas en vigas.....	73
Figura 27. Rotulas pl1sticas en columnas	74
Figura 28. Curva de desempe1o	75

RESUMEN

En la actualidad es muy habitual encontrar estructuras de hormigón que no cuentan con un proceso de diseño y construcción basadas en las normativas de construcción ecuatoriana, por lo que es necesario realizar un análisis del comportamiento estructural para determinar esfuerzos y deformaciones que se generan en la estructura al ser sometidas a estados de cargas.

En el Ecuador las construcciones de hormigón armado presentan dificultades cuando se encuentran bajo acciones elevadas de carga, por lo cual, es de gran importancia realizar un análisis no lineal. Esto debido a que varias estructuras se encuentran ubicadas en una de las zonas altamente sísmicas; además, es necesario aplicar el método de diseño sísmico que va a describir tanto el comportamiento como la interacción de los edificios sometidos a cargas sísmicas.

El análisis no lineal requiere de conocimientos previos de la estructura ya que se debe conocer su geometría y la cuantía balanceada para generar comprobaciones posteriores al dimensionamiento. por lo que para las construcciones de hormigón se debe hacer uso de las Normativas Ecuatorianas de Construcción.

Para las construcciones de hormigón armado se utilizan diversos métodos de análisis, que ayudarán a tener conocimiento del comportamiento de la estructura bajo cargas; como puede ser por medio de análisis estático y dinámico, dentro de un rango elástico e inelástico, que permitirán evaluar estructuras que sean capaces de soportar sismos sin presentar daños evitando así el colapso de la estructura diseñada.

Por lo tanto, se deberá realizar diseños adecuados basados en las Normativas Ecuatorianas de Construcción que evitarán futuros accidentes en las estructuras de hormigón armado ya que son las más comunes en Ecuador.

Este proyecto tiene como objetivo realizar un análisis del comportamiento no lineal en una estructura de hormigón armado de 4 plantas utilizando las normas NEC 2000 y NEC 2015 para determinar el comportamiento real de la edificación, empezando por un prediseño de cada uno de los elementos estructurales que conforman la estructura, así como también modelando en un paquete computacional para verificar los resultados obtenidos.

Palabras claves: colapso, análisis no lineal, cuantía

ABSTRACT

Currently it is very common to find concrete structures that do not have a design and construction process based on Ecuadorian construction regulations, so it is necessary to carry out an analysis of structural behavior to determine stresses and deformations that are generated in the structure. when subjected to states of charge.

In Ecuador, reinforced concrete constructions present difficulties when they are under high load actions, for which it is of great importance to carry out a non-linear analysis. This is because several structures are located in one of the highly seismic zones; In addition, it is necessary to apply the seismic design method that will describe both the behavior and the interaction of buildings subjected to seismic loads.

The non-linear analysis requires previous knowledge of the structure since its geometry and the balanced amount must be known to generate checks after dimensioning. Therefore, for concrete constructions, the Ecuadorian Construction Regulations must be used.

For reinforced concrete constructions, various analysis methods are used, which will help to have knowledge of the behavior of the structure under loads; such as through static and dynamic analysis, within an elastic and inelastic range, which will allow the evaluation of structures that are capable of withstanding earthquakes without presenting damage, thus avoiding the collapse of the designed structure.

Therefore, adequate designs must be carried out based on the Ecuadorian Construction Regulations that will avoid future accidents in reinforced concrete structures since they are the most common in Ecuador.

The objective of this project is to carry out an analysis of the non-linear behavior of a 4-story reinforced concrete structure using the NEC 2000 and NEC 2015 standards to determine the real behavior of the building, starting with a pre-design of each of the structural elements that make up the structure, as well as modeling in a computational package to verify the results obtained.

Keywords: collapse, nonlinear analysis, amount

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad es muy habitual encontrar estructuras de hormigón que no cuentan con un proceso de diseño y construcción basadas en las normativas de construcción ecuatoriana, por ello es necesario realizar un análisis de comportamiento estructural para determinar esfuerzos y deformaciones que se generan en la estructura al ser sometidas a estados de cargas.

1.2. PROBLEMA DE ESTUDIO

1.2.1. ANTECEDENTES

En la actualidad es muy habitual encontrar estructuras de hormigón que no cuentan con un proceso de diseño y construcción basadas en las normativas de construcción ecuatoriana, por lo que es necesario realizar un análisis de comportamiento estructural para determinar esfuerzos y deformaciones que se generan en la estructura al ser sometidas a estados de cargas.

Por lo que es indispensable realizar el diseño de edificaciones con un análisis dinámico que se encargará del comportamiento de la estructura en caso de tener vibraciones que puedan provocar el daño en algunos elementos estructurales.

1.2.2. IMPORTANCIA Y ALCANCE

En el Ecuador las construcciones de hormigón armado presentan dificultades cuando se encuentran bajo acciones elevadas de carga, por lo cual, es de gran importancia realizar un análisis no lineal. Esto debido a que varias estructuras se encuentran ubicadas en una de las zonas altamente sísmicas; además, es necesario aplicar el método de diseño sísmico que va a describir tanto el comportamiento como la interacción de los edificios sometidos a cargas sísmicas.

El análisis no lineal requiere de conocimientos previos de la estructura ya que se debe conocer su geometría y la cuantía balanceada para generar comprobaciones posteriores al dimensionamiento. por lo que para las construcciones de hormigón se debe hacer uso de las Normativas Ecuatorianas de Construcción.

Para las construcciones de hormigón armado se utilizan diversos métodos de análisis, que ayudarán a tener conocimiento del comportamiento de la estructura bajo cargas; como puede ser por medio de análisis estático y dinámico, dentro de un rango elástico e inelástico, que permitirán evaluar estructuras que sean capaces de soportar cargas sísmicas sin presentar daños evitando así el colapso de la estructura diseñada.

Por lo tanto, se deberá realizar diseños adecuados basados en las Normativas Ecuatorianas de Construcción que evitarán futuros accidentes en las estructuras de hormigón armado ya que son las más comunes en Ecuador.

1.2.3. DELIMITACIÓN

El proyecto para analizar se encuentra ubicado en la provincia de Pichincha, cantón Quito, parroquia La Ferroviaria; entre las calles Yangana y Jibarra, como se puede observar en la Figura 1.

Figura 1.

Delimitación del predio



Nota. El recuadro rojo representa los límites del predio que fueron obtenidos por los planos arquitectónicos. Elaborado por: La autora, a través de Google Earth (2022).

1.3. JUSTIFICACIÓN

Los diseños antitécnicos en el Ecuador que no se han basado en la adecuada utilización de las normativas ha tenido graves consecuencias ya que se han encontrado edificaciones con comportamiento estructural deficiente frente a diferentes estados de carga. Hay que considerar que el Ecuador es un país altamente sísmico y sus construcciones deben cumplir con diseño sismorresistente, para evitar pérdidas humanas y económicas.

El proyecto beneficiará a la población en general ya que gracias a los resultados que se obtendrán se podrán construir edificaciones más seguras. Así mismo, este proyecto beneficiará a los ingenieros civiles que se dedican al diseño estructural ya que se detallará el correcto análisis no lineal de estructuras de hormigón armado haciendo uso correcto de la normativa.

Este proyecto técnico se considera factible ya que se cuenta con recursos necesarios como son: los planos arquitectónicos de la estructura, software y una metodología de análisis no lineal, además de contar con las normativas NEC 2000 y NEC 2015.

Los resultados de este proyecto están planteados para un lapso de 6 meses durante el cual se obtendrá el correcto análisis comparativo entre las dos normas haciendo uso del análisis no lineal.

1.4. GRUPO OBJETIVO

La ejecución del proyecto beneficia de manera positiva a la comunidad en general ya que se obtendrán estructuras más seguras para su ocupación.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis del comportamiento no lineal en una estructura de hormigón armado de 4 plantas utilizando las normas NEC 2000 y NEC 2015 para determinar el comportamiento real de la edificación.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analizar el comportamiento de la ductilidad en la estructura de hormigón armado por medio de un programa computacional para establecer el comportamiento de la edificación.

Realizar un prediseño de la edificación de 4 plantas basado en las normativas NEC 2000 y NEC 2015, para obtener dimensiones adecuadas para comenzar el diseño.

Desarrollar el diseño de una edificación de 4 plantas por medio del análisis no lineal antes mencionado y realizar la comparación de la normativa NEC 2000 y NEC 2015.

Evaluar la tipología estructural por medio de una investigación realizada en la provincia de Pichincha para determinar el comportamiento de las cargas laterales en los elementos estructurales.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN

Como bien se sabe que las estructuras en el país en su mayoría no están construidas con normativa por lo que después de la ocurrencia de un sismo algunas de ellas quedan en estado inservible, en cambio otras que, si resisten, pero presentan cuarteaduras, fisuras o problemas estructurales; ocasionando pérdidas humanas y económicas.

Es por ello que en la actualidad para diseños sismo resistentes se debe aplicar métodos de análisis que permitan estudiar de manera más detallada el comportamiento de la estructura en etapas de diseño o evaluación haciendo uso de la normativa y además de los conocimientos para diseño de una estructura nueva o existente.

Existen dos métodos de análisis sísmico: método de análisis lineal y método de análisis no lineal; el cual para su correcta elección se deberá tomar en cuenta la tipología estructural que se va a diseñar, evaluar, o analizar. Además, otros de los métodos más utilizados es el método de la fuerza lateral y el método dinámico lineal el cual solo ayudara a verificar el comportamiento de las estructuras en un rango elástico; pero hay en estructuras que contengan una configuración estructural simétrica en planta y en elevación.

Por otra parte, una de las ventajas que tiene el análisis no lineal es la consideración del comportamiento y las deformaciones más allá de su rango elástico.

Esto quiere decir que la estructura pierde la rigidez a medida que los elementos estructurales que contiene la estructura se plastifican gradualmente esta es una gran ventaja ya que se tiene una mejor aproximación de la realidad y de esta manera se puede obtener una configuración más detallada que parte desde el agrietamiento hasta el colapso.

En este capítulo se tomará en cuenta de manera detallada el análisis no lineal (PUSHOVER) donde se describirá desde los conceptos básicos, parámetros a considerar para la aplicación de la metodología que prácticamente se basa en identificar fallas en la estructura para la ubicación de rotulas plásticas en los elementos estructurales como vigas o columnas.

Cuando se analiza una estructura se debe tomar en cuenta que se preside de un análisis lineal o no lineal es por esto que muchas de las estructuras, esto sirve para verificar como se originan las deformaciones en las estructuras y además el comportamiento que mantiene dicha estructura ante la acción sísmica.

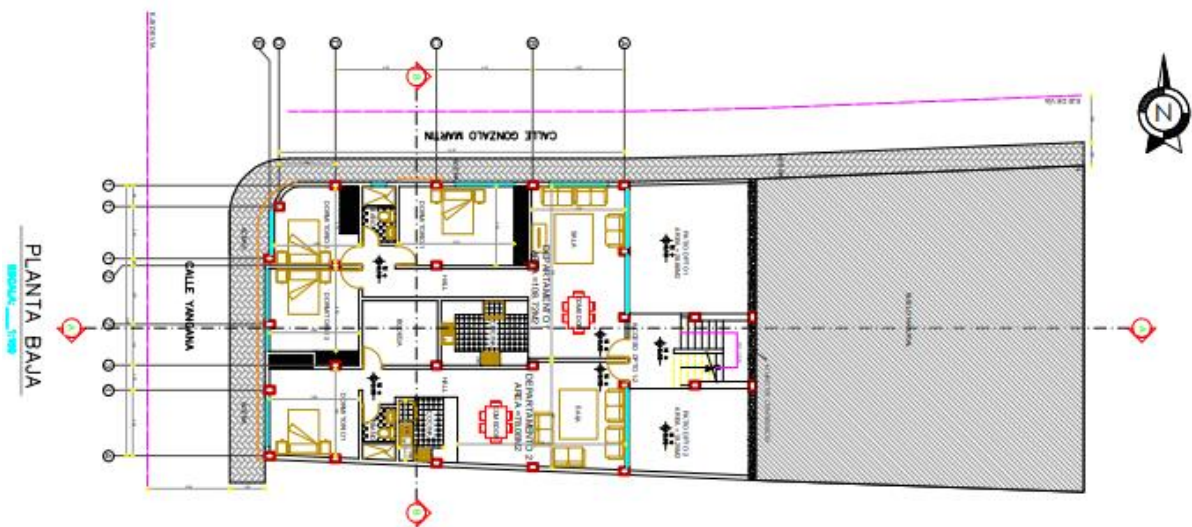
2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

2.2.1. DEFINICIÓN GEOMÉTRICA

La estructura analizada en el presente trabajo es de uso residencial ubicado en Ecuador, Provincia de Pichincha, Ciudad de Quito. Está compuesta por la planta baja y cuatro pisos aéreos, para un área total de 762,48 m²; la planta baja tendrá la utilidad de garaje para automóviles, el resto de las plantas serán de uso residencial exclusivamente mientras después del cuarto se dispondrá de una terraza accesible en la cual se ubicarán equipos de máquinas de lavado, etc.

Figura 2.

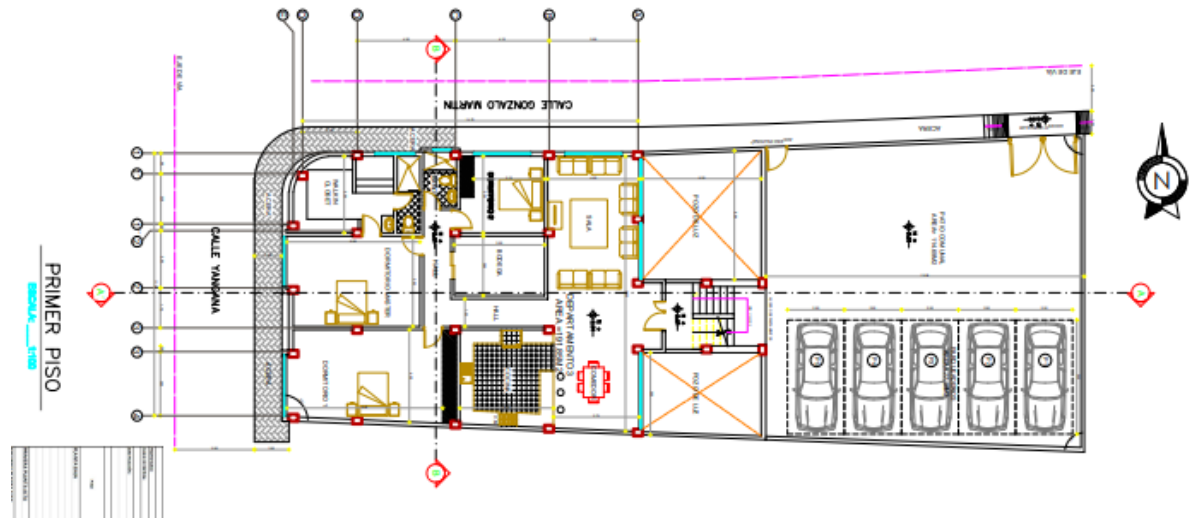
Planta baja



Nota. La figura representa la idealización de la planta baja de la edificación obtenido de los planos arquitectónicos. Elaborado por: La autora, a través de AutoCAD (2022).

Figura 3.

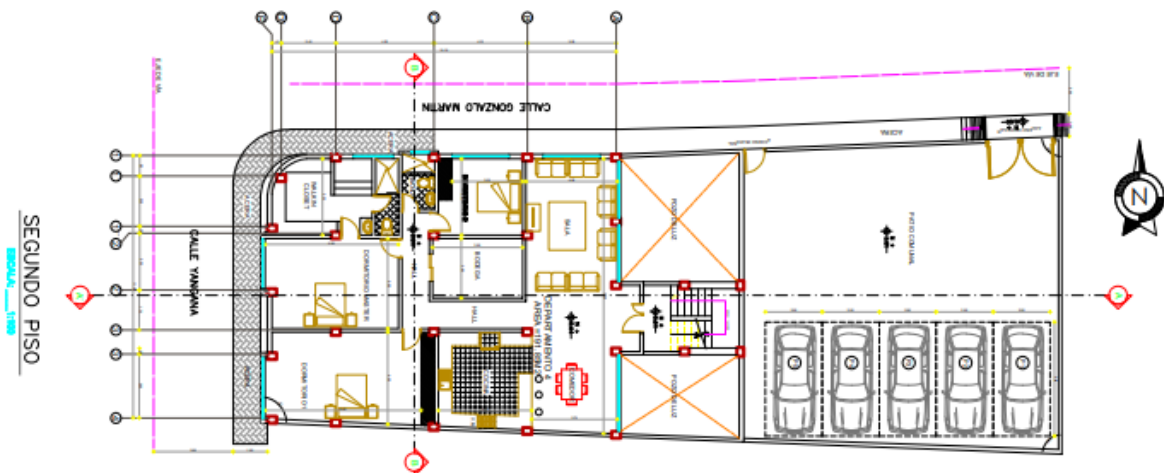
Primera planta arquitectónica



Nota. La figura representa la idealización del primer piso de la edificación obtenido de los planos arquitectónicos. Elaborado por: La autora, a través de AutoCAD (2022).

Figura 4.

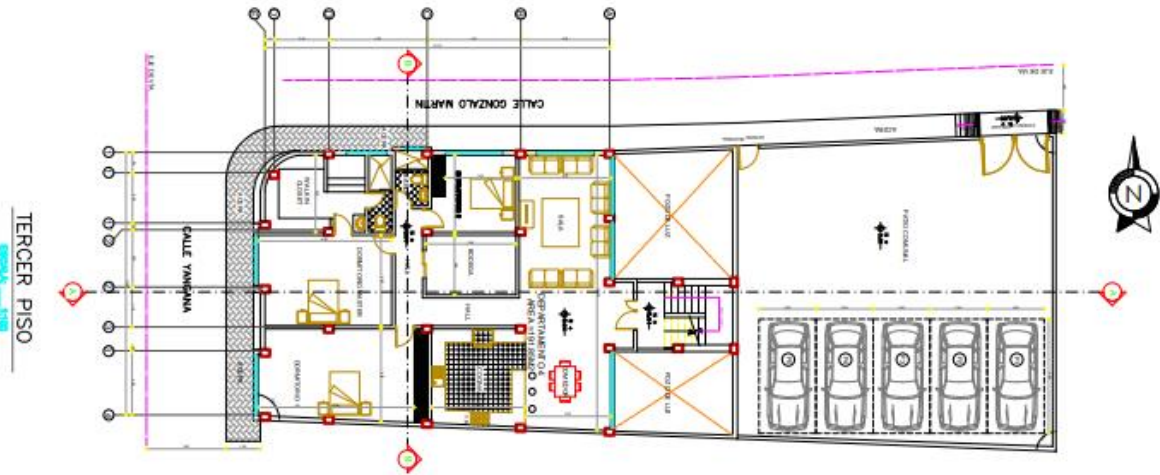
Segunda planta arquitectónica



Nota. La figura representa la idealización del segundo piso de la edificación obtenido de los planos arquitectónicos. Elaborado por: La autora, a través de AutoCAD (2022).

Figura 5.

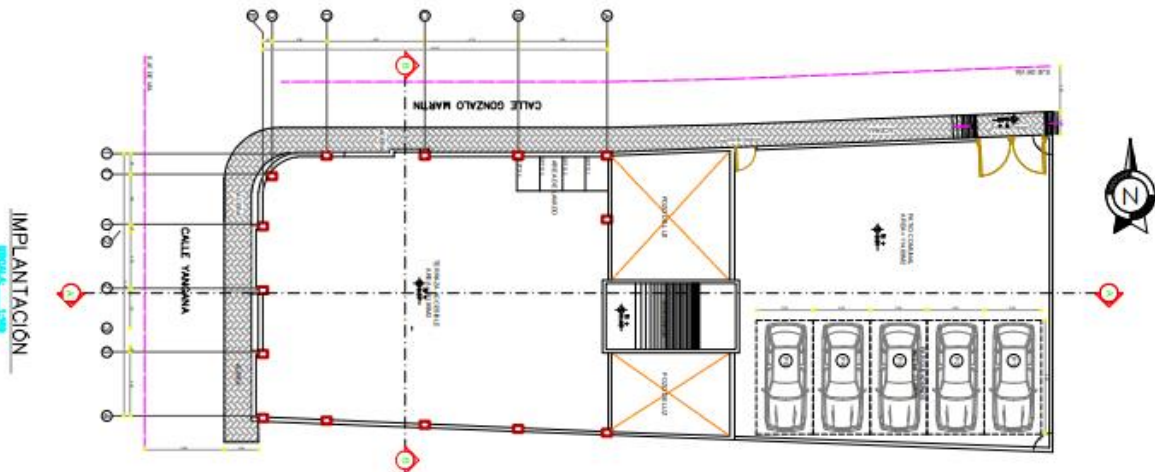
Tercera planta arquitectónica



Nota. La figura representa la idealización del tercer piso de la edificación obtenido de los planos arquitectónicos. Elaborado por: La autora, a través de AutoCAD (2022).

Figura 6.

Implantación arquitectónica



Nota. La figura representa la idealización de la implantación de la edificación obtenido de los planos arquitectónicos. Elaborado por: La autora, a través de AutoCAD (2022).

La altura de cada planta es de 2.55 metros medidos entre los niveles superiores, dando así una altura total de la edificación de 13.75 metros.

2.2.2. MATERIALES

Los materiales que se tomarán en cuenta en la realización de este proyecto deberán cumplir con las especificaciones técnicas de la norma de construcción NEC-15 ya que en esta se verificarán la calidad de los materiales que van a ser utilizados en la construcción de dicha edificación.

Otro de los parámetros que se debe tomar en cuenta en esta sección es el módulo de elasticidad de los materiales: acero de 200000 MPa, mientras que para el hormigón se puede utilizar la siguiente fórmula

$$E_c = 4700 * \sqrt{f'_c}$$

Ecuación 1.

2.2.3. DEFINICIÓN DE CARGAS

Para el análisis de este proyecto se utilizaron las combinaciones de carga establecidos en la NEC-15. Cargas no sísmicas en la sección 3.4.3. donde especifica los diseños de carga por última resistencia esta sección especifica que hay que tomar en cuenta los efectos como: sismo, viento tanto en la cimentación como en la estructura, por lo que surge las siguientes combinaciones de carga como son:

Combinación 1

1.4 D

Combinación 2

1.2 D + 1.6 L + 0.5 max [Lr; S; R]

Combinación 3

1.2 D + 1.6 max [Lr; S; R] + max [L; 0.5W]

Combinación 4

1.2 D + 1.0 W + L + 0.5 max [Lr; S; R]

Combinación 5

$$1.2 D + 1.0 E + L + 0.2 S$$

Combinación 6

$$0.9 D + 1.0 W$$

Combinación 7

$$0.9 D + 1.0 E$$

Combinaciones de carga para diseño (NEC-SE-DS-15, pág. 19)

2.2.4. DERIVAS INELÁSTICAS MÁXIMAS

Para el cálculo de las derivas inelásticas se tomará en cuenta la norma (NEC-SE-DS-15 Peligro Sísmico parte 2) donde señala que es responsabilidad del diseñador controlar las derivas inelásticas ya que las estructuras presentarán deformaciones. Menciona que los valores que se encuentran en la norma se han definido tomando en cuenta que el calculista asumirá secciones agrietadas en su diseño.

Para el cálculo de derivas máximas de piso se toma en cuenta la respuesta máxima inelástica de la estructura la cual es causada por el sismo de diseño.

En el cálculo de las derivas de piso se incluirán:

- ❖ Deflexiones debido a efectos torsionales y traslacionales.
- ❖ Efectos de segundo orden $P - \Delta$

Para este cálculo se debe tomar en cuenta los límites de la deriva máxima inelástica de cada piso:

$$\Delta_M = 0.75R\Delta_E$$

Ecuación 2.

Donde:

Δ_M : Deriva máxima inelástica

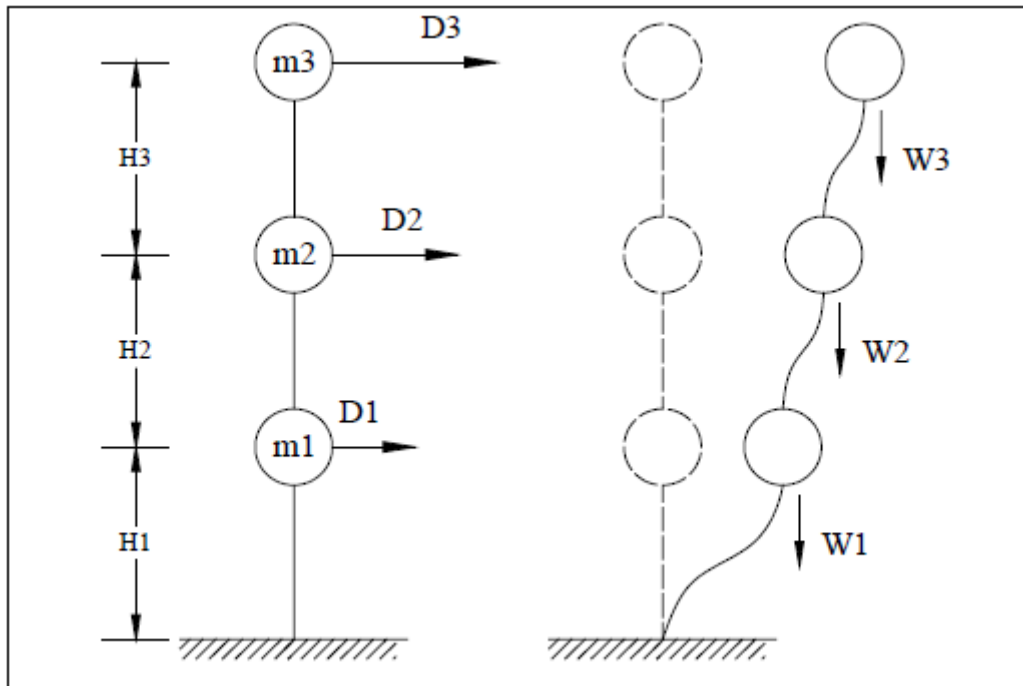
Δ_E : Desplazamiento obtenido en aplicación de las fuerzas laterales

R : Factor de reducción de resistencia

2.2.4.1. **EFEECTO P – DELTA.** Este efecto es de segundo orden ya que sufren las edificaciones el cual debe ser tomado en cuenta ya que este efecto se aplica en las dos direcciones en una estructura, como lo detalla la figura 7.

Figura 7.

Efecto P – delta en una estructura



Nota. La figura representa la idealización de un efecto P – delta en una edificación.

Fuente: Vasconez J., 2012

De este análisis se deberá obtener el índice de estabilidad de piso haciendo el uso de la ecuación 3, la cual se deberá tomar en cuenta que si este valor es menor que 0.10 no se deberá considerar este efecto.

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

Ecuación 3.

Donde:

Q_i : Índice de estabilidad en el piso i .

P_i : Es la suma de carga vertical por carga viva y muerta sin mayorar del piso i

Δ_i : Es la deriva del piso i

V_i : Cortante sísmico en el piso i

h_i : Altura del piso considerado

Por otro lado, cuando el índice de estabilidad es mayor a 0.30 significa que la estructura es demasiado flexible, por lo que se debe tener precaución ya que esto indicará que la estructura está próxima a colapsar.

Sin embargo, en el caso de que estos valores se encuentren en un rango entre 0.1 y 0.3 se deberá calcular un factor de mayoración utilizando la siguiente ecuación 4.

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

Ecuación 4.

El factor de mayoración obtenido deberá ser multiplicado por las fuerzas horizontales de cada piso.

2.2.5. CARGAS POR VIENTO

Como ya se menciona este proyecto se va a ubicar en la ciudad de Quito donde para su modelación se requiere tomar en cuenta la carga de viento tomada de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS-15, pág. 6) donde indica que la velocidad de viento hasta 10 m de altura tendrá una carga de 21 m/s, caso contrario se deberá hacer el uso de la siguiente ecuación donde indica que se multiplica el factor de corrección por viento dependiendo de la altura y de las características topográficas.

$$V_b = V * \sigma$$

Ecuación 5.

Donde:

V_b : Velocidad corregida del viento en m/s

V : Velocidad instantánea máxima del viento registrada a 10 m alto

σ : Coeficiente de corrección obtenido de la tabla 1

Las características topográficas se dividen en 3 categorías como son:

- ❖ Categoría A (sin obstrucción): edificios frente al mar, zonas rurales o espacios abiertos sin obstáculos topográficos.
- ❖ Categoría B (con obstrucción): edificios en zonas suburbanas rodeadas de edificaciones de baja altura con un promedio de hasta 10m.
- ❖ Categoría C (zona edificada): zonas urbanas con edificios de gran altura.

Tabla 1.

Coefficientes de corrección por viento σ

Altura (m)	Sin obstrucción (Categoría A)	Con obstrucción (Categoría B)	Zona edificada (Categoría C)
5	0.91	0.86	0.80
10	1.00	0.90	0.80
20	1.06	0.97	0.88
40	1.14	1.03	0.96
80	1.21	1.14	1.06
160	1.28	1.22	1.15

Nota. En la tabla se representa los coeficientes de corrección por viento a ser utilizados en la ecuación de corrección por viento. Elaborado por: la autora con datos de (NEC 15 Peligro Sísmico), a través del programa Excel (2022).

2.2.6. CARGAS DE GRANIZO

Para tomar en cuenta las cargas de granizo es necesario seguir algunas recomendaciones que la norma indica como que se debe tomar en cuenta esta carga en las regiones que sobrepase los 1500 msnm y se la va a determinar mediante la siguiente ecuación 6:

$$S = \rho_S * H_S$$

Ecuación 6.

Donde:

ρ_S : *Peso específico del granizo* $1000 \frac{kg}{m^3}$

H_S : *Altura de acumulación en (m)*

2.3. CAPACIDAD ESTRUCTURAL

Una vez que se ha llegado a determinar el riesgo sísmico se procede a analizar la capacidad de la estructura que dependerá de la configuración estructural tanto geométrica como también la resistencia de cada elemento que conforma la estructura y además de las deformaciones máximas producidas. Cabe recalcar que este análisis dependerá del rango elástico que experimente la edificación para evaluar la configuración estructural de un edificio o de un elemento estructural.

Para comprobar la capacidad estructural que sobrepasa el rango elástico, es necesario utilizar algún tipo de programa computacional en el cual se pueda verificar si las estructuras son más flexibles o en el caso de que este análisis deba considerar los modos de vibración de la estructura para que se pueda definir los periodos de vibración menores a 1 segundo.

La curva de capacidad define la respuesta estructural del primer modo de vibración de la estructura basada en la hipótesis que el primer modo de vibración fundamental de la estructura correspondiente a la respuesta predominante ante una sollicitación sísmica siendo esta válida para estructuras con periodos de vibración menores a 1 segundo.

En el caso de existir estructuras más flexibles en el análisis se deberá considerar los demás modos de vibración, de tal forma que si utilizamos una herramienta de análisis estructural asistido por computador como ETABS tomará en cuenta los modos de vibración de acuerdo con los requerimientos del usuario.

2.4. COMPONENTES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS

Es importante tomar en cuenta que, en una estructura, casi todos los elementos ya sean estructurales y no estructurales aportan masa, rigidez y amortiguamiento a la respuesta de la edificación. Por lo cual, no todos estos elementos son críticos al momento de abastecer de capacidad a la estructura al someterse a un colapso mediante un movimiento sísmico, es por esto por lo que se deberá clasificar a los elementos en componentes primarios y secundarios.

2.4.1. COMPONENTE PRIMARIO

Dichos componentes son aquellos que brindan a la estructura capacidad para resistir al colapso bajo la duración de un movimiento sísmico. Es permitido algo de daño y degradación de los elementos, pero sin perder de vista el objetivo fundamental que es evitar el colapso de la edificación.

2.4.2. COMPONENTE SECUNDARIO

Dichos componentes son aquellos que no contribuyen directamente a la resistencia de la estructura bajo sollicitaciones sísmicas. Por lo que para estos elementos se les permite un daño considerable con grandes deformaciones, pero es importante que de igual manera tengan la función de soportar cargas de gravedad.

Dichos componentes deben ser modelados y su comportamiento se incluirá en el análisis de esfuerzo – deformación para determinar la degradación de la resistencia en dichos elementos.

Las deformaciones de capacidad serán mayores a las deformaciones de demanda. Además de que es indispensable que la demanda de los componentes primarios se localice en un criterio dentro de la aceptación del nivel de desempeño.

2.5. INGENIERÍA SISMO - RESISTENTE

La ingeniería sismo – resistente es aquella que estudia, ejecuta y diseña el desarrollo constructivo con elementos estructurales previo a la aplicación de principios como la geometría, simetría, rigidez y resistencia que permita resistir cargas sísmicas las cuales estarán presentes en la vida útil del proyecto.

Por lo cual es una propiedad que atribuye que una edificación por medio de la aplicación de técnicas de diseño para su configuración estructural y la incorporación de componentes estructurales que ayudarán a que la estructura resista las fuerzas que presente durante un movimiento sísmico.

Los principales objetivos de Ingeniería Sismo – Resistente son:

- ❖ Predecir las posibles consecuencias al paso de un terremoto tanto en zonas urbanas como en zonas civiles.
- ❖ Diseñar, construir y salvaguardar las estructuras durante la exposición de un sismo para cumplir con las expectativas de diseño y los códigos de construcción.

Hay que tomar en cuenta que una estructura bien diseñada no necesariamente tiene que ser muy costosa o fuerte, lo importante es que el diseño cumpla con los requerimientos técnicos para que resista los movimientos sísmicos, tomando en cuenta un nivel de daño aceptable para evitar el colapso.

2.5.1. DISEÑO SISMICO

Este diseño se basa en la aprobación de procedimientos como criterios y principios propuestos para prevenir que las estructuras diseñadas se adapten a la exposición de sismos. Cabe recalcar que una edificación bien diseñada sigue los códigos de normativa sísmica (ACI-318-19, ATC 40, NEC 15, entre otros) las cuales garantizarán la seguridad y el evitarán el colapso de dicha estructura.

Es esencial que un ingeniero civil diseñe sus proyectos sísmicos bajo las siguientes condiciones que lo indican las normas mencionadas con anterioridad:

- ❖ Datos sísmicos dependiendo de la zona donde se ubique la edificación y criterios de diseño sísmico
- ❖ Características de los sistemas de ingeniería sísmica
- ❖ Fuerzas sísmicas
- ❖ Procedimiento de análisis sísmico
- ❖ Detallado sísmico para controlar la calidad de hormigón en la construcción

Por lo general las estructuras están diseñadas para resistir movimientos

telúricos, esto ocasiona que los diseñadores tengan la obligación de construir edificaciones evitando el colapso por lo que se evitará las pérdidas humanas.

2.5.2. REQUISITOS DE DISEÑO SÍSMICO

Los requisitos para este diseño dependerán del tipo de suelo, tipo de edificación, tipo de diseño, etc. donde se ubique el proyecto estableciendo; además de códigos de diseño sísmico y criterios que enfatizan la filosofía de diseño sismorresistente.

Una de las características principales de la filosofía de diseño sismorresistente se trata del paso de una evaluación mediante fuerzas a desplazamientos en la curva demanda – capacidad, por lo tanto, la evaluación sísmica se trata de la comparación entre la demanda de desplazamiento elástico y la capacidad de desplazamiento inelástico de los componentes garantizando una capacidad mínima en las rótulas plásticas.

Algunos de los requisitos de diseño sísmico indican que hay que tomar en cuenta la estabilidad del suelo debajo de la estructura ya que al momento en que ocurre el sismo por la vibración del suelo llega a fisurarse y surgen algunos inconvenientes como son:

La licuefacción

La dinámica de empujes laterales en los muros de contención

La estabilidad de taludes sísmicos

La solución de los terremotos inducidos

Los Requisitos de Diseño Sísmico (Vasconez J., 2012, pág. 15)

2.5.3. ESTRUCTURA

Están conformadas por el esqueleto de la edificación el cual soporta todas las cargas ya sean losas, columnas, vigas, etc. Dichas cargas son todas aquellas que inciden sobre la misma produciendo deformaciones, hay que tomar en cuenta que una estructura no solo soporta su peso propio sino también cargas de viento, cargas de granizo, cargas de sismo, etc.

Por lo que se debe considerar que estas cargas con el paso del tiempo llegan a deformar la estructura llegando a alterar su condición estructural.

Además, una estructura puede soportar diferentes distribuciones de carga en la cimentación y en sus revestimientos ocasionando la modificación de su tipología estructural.

En la actualidad las estructuras con mayor demanda en la construcción son las edificaciones de hormigón armado debido a que cuentan con flexibilidad y eficacia; pero no son las únicas que se pueden construir, también se pueden optar por las estructuras con muros portantes, estructuras metálicas, etc.

2.6. MÉTODOS DE ANÁLISIS

2.6.1. ANÁLISIS ESTÁTICO

Este análisis se define como la interacción de las fuerzas que actúan sobre una edificación con el fin de representar el efecto sísmico definido por un espectro de diseño. Por lo cual un edificio responde a un modo de vibración teniendo así: el primer modo de vibración o péndulo invertido, el cual consiste en que la edificación debe ser de baja altura y no debe ocasionar torsión en la sucesión de un sismo.

2.6.2. ANÁLISIS DE ESPECTROS DE RESPUESTA

En este tipo de análisis se toma en cuenta varios modos de vibración de la estructura, según Bonilla C., Chavarria M., Diaz J. (2017) “La respuesta de una estructura puede definirse como una combinación de muchas formas especiales (modos) que en una cadena vibratoria corresponden a los "armónicos"” (pág. 22).

Una estructura puede ser modelada en varios grados de libertad, con propiedades diseñadas para los tres primeros modos de vibración y el ángulo que representa a cada uno de ellos utilizando la ecuación del movimiento sísmico.

Para algunos tipos de amortiguamientos se representan de manera exacta ya que después de haber hecho un número de estudios. Se determina que el uso de análisis modal para una estructura con osciladores para un grado de libertad con amortiguamiento viscoso representa las respuestas de los modos estructurales, el cual afecta en el comportamiento lineal.

El objetivo del análisis modal espectral es obtener una respuesta máxima de la estructura en cada uno de los modos importantes y al sumarlos de manera adecuada permitirá obtener la respuesta máxima de la estructura; para esto se puede tomar en cuenta dos modelos para combinar los modos de vibración de cálculos:

El primer método SRSS el cual consiste en la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las respuestas modales.

$$R = \sqrt{\sum R_i^2}$$

Ecuación 7.

El segundo método CQC el cual consiste en la combinación cuadrática completa de las respuestas modales.

$$R = \sqrt{\sum_i \sum_j \varepsilon_{ij} R_i R_j}$$

Ecuación 8.

Donde:

ε_{ij} : coeficiente de correlación modal

EL método SRSS es un método que puede conllevar a errores ya que esto sucede cuando se tiene modos de vibración con periodos naturales muy cercanos.

Los factores de participación modal son definidos como una variable constante por cada modo de vibración que sea menor a la unidad, por lo cual las masas del sistema se multiplican para obtener la masa efectiva por cada modo considerado. Estos factores definen el grado de cada modo para verificar la participación de los periodos de toda la estructura.

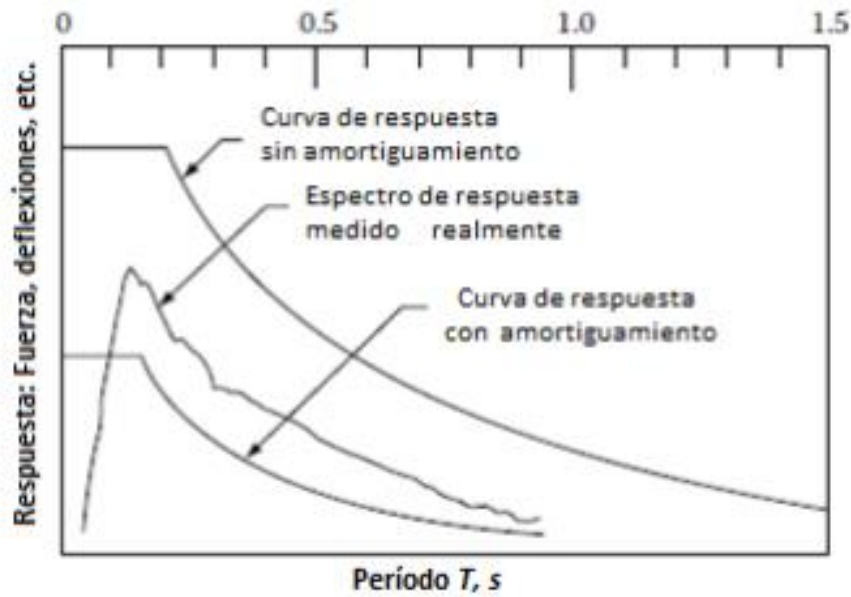
Toda estructura que requiera de un análisis modal es muy importante tomar en cuenta el desarrollo de un espectro de respuesta esta es una de las ventajas para los ingenieros civiles ya que de esta manera se puede analizar el suelo y el modo de vibración de la estructura.

En este análisis se determina un espectro de respuesta que contará con la representación máxima de aceleración, velocidad y desplazamiento para un sistema de

un grado de libertad sujeto a una fuerza definida como se puede visualizar en la figura 8 y 9.

Figura 8.

Representación del espectro de respuesta

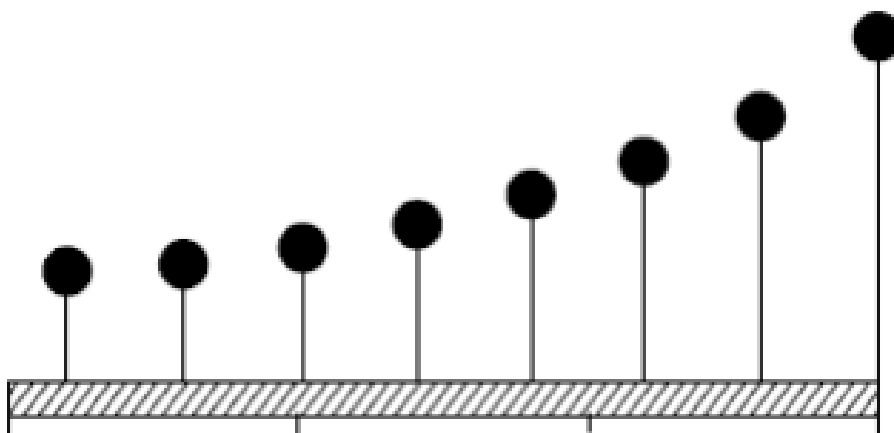


Nota. La figura representa la el espectro de respuesta máxima en una estructura.

Fuente: Bungale Taranath, 2010

Figura 9.

Representación péndulos con varios periodos



Nota. La figura representa la demostración de péndulos con varios periodos en una estructura. Fuente: Bungale Taranath, 2010

2.6.3. ANÁLISIS DINÁMICO LINEAL

Es un análisis apropiado para edificaciones de baja y mediana altura y que presenten formas regulares en planta y elevación, así como también regularidad estructural. En cambio, para edificaciones de gran altura y con asimetría estructural, se realiza un procedimiento dinámico.

Consiste en la aplicación de múltiples grados de libertad (MDOF), el cual para su diseño se realiza una matriz de rigidez elástica lineal y una matriz de amortiguamiento.

Para este diseño se requiere de un análisis modal espectral o un análisis tiempo historia, donde el comportamiento entre fuerzas y desplazamientos están determinados mediante análisis elástico lineal.

2.6.4. ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER)

Considera el comportamiento tenso-deformacional sin considerar el principio de superposición según Marí A. (2015) “El comportamiento estructural, especialmente bajo niveles avanzados de carga, difiere del comportamiento elástico-lineal supuesto en los cálculos usuales. Por lo que se debe a fenómenos como la fisuración en tracción, la fluencia y la retracción del hormigón, la plastificación y la relajación del acero y la adherencia imperfecta, entre otros. Por otra parte, cuando los esfuerzos axiales son importantes en estructuras esbeltas, los desplazamientos intervienen de forma no despreciable en el equilibrio, dando lugar a efectos de 2° orden y a un comportamiento geoméricamente no lineal. Dichos fenómenos interaccionan entre sí y con el proceso constructivo, afectando de forma considerable al estado de tensiones, esfuerzos y deformaciones.” (p. 12)

2.7. ESPECTRO DE DISEÑO

Se define como un gráfico representativo de respuesta máxima de (velocidad, aceleración, etc.) para distintos factores de amortiguamiento, los cuales producen una acción determinada en una estructura o un oscilador de grado de libertad.

Por lo que ayudará a calcular el cortante basal y las acciones a las que estarán sometidas la estructura por la presencia de un sismo de diseño, es necesario determinar

el espectro de diseño que para la NEC 15 estará determinado con un amortiguamiento del 5% del crítico, dependiendo de las condiciones geológicas que presente el proyecto como son:

El factor de zona sísmica Z .

El tipo de suelo donde se ubicará la edificación.

Los valores de los coeficientes de amplificación del suelo F_a , F_d , F_s .

La NEC 15 es una de las normas que suelen utilizar factores de importancia con el objetivo de reducir la posibilidad de excedencia posibilidad de diseño descrito en el numeral 3.1.1.1. donde especifica que se utiliza el 2% para un periodo de diseño de 50 años. En el caso del proyecto en estudio se encuentra en el grupo de estructuras de ocupación normal con un coeficiente de importancia de 1.00.

Este proyecto se asienta sobre un suelo tipo D que le corresponderá un valor de zona sísmica Z de 0.40 ya que se encuentra ubicado en Quito.

2.8. METODOLOGÍA PUSHOVER

Para comprender de mejor manera como funciona este método se revisarán dos de las normativas más importantes como son la FEMA 356 y ATC 40, las cuales ayudan a entender de mejor manera la aplicación de la ingeniería sísmica en el país.

El método PUSHOVER es un procedimiento que se lleva a cabo para determinar la resistencia de la estructura durante la ocurrencia de un sismo, en composición con el espectro de respuesta para un sistema de un grado de libertad; esto permitirá evaluar la capacidad y el comportamiento de los elementos estructurales que están sometidos a la acción de carga de un sismo.

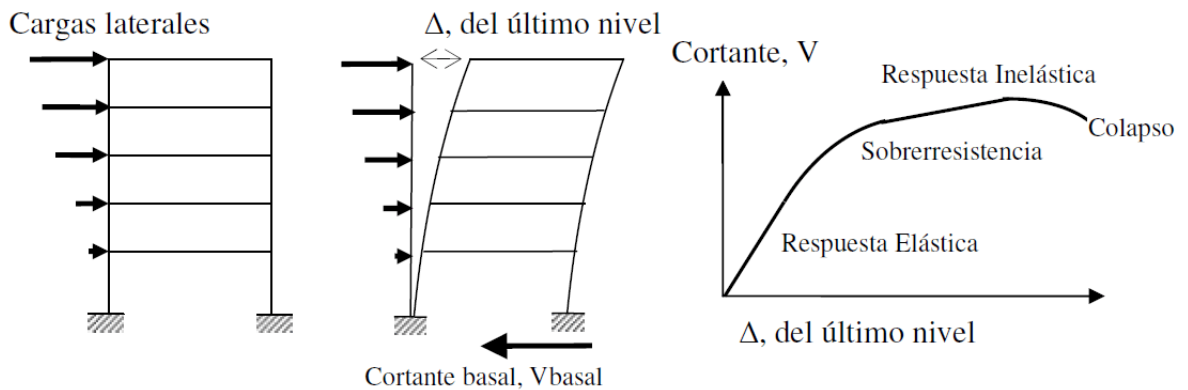
2.9. ANÁLISIS NO LINEAL PUSHOVER SEGÚN LA FEMA 356

Este método consiste en la aplicación de una distribución vertical de carga lateral en la estructura, la cual se irá incrementando paulatinamente hasta alcanzar el máximo desplazamiento o hasta llegar al colapso de la estructura bajo la combinación de cargas y los efectos de segundo orden $P - \Delta$. De este análisis se obtiene el cortante en la

base de la edificación y el desplazamiento en el último piso como muestra la figura 10.

Figura 10.

Proceso para el análisis no lineal Pushover



Nota. La figura representa la secuencia del análisis no lineal Pushover. Fuente: Anrango, Paz y Duque, 2009

Este análisis se utiliza para diversos fines ya que muestra las formas que no deberían formarse los mecanismos además que evalúa la capacidad máxima que tiene una estructura para deformarse y por último nos permite evaluar el daño que se produce en la edificación por el aumento de diferentes cargas de sismo produciendo deformaciones máximas.

2.10. ORIGEN DE LA METODOLOGÍA PUSHOVER

En el campo de Ingeniería Civil, especialización en estructuras se ha intentado interpretar el comportamiento inelástico que produce un efecto no lineal que se presenta en la estructura al ser sometida a cargas vivas y muertas. Esto ha ocasionado llevar a cabo un estudio de Análisis Estático No Lineal (PUSHOVER).

Es necesario tomar en cuenta que para este análisis se tomará en consideración las fuerzas laterales que sean proporcionales al peso del edificio que se va a aplicar a cada nivel del edificio; esta es una de las posturas que se adoptó en el apéndice de la Uniform Building Code (UBC), que fue utilizada en el norte oeste de Estados Unidos.

Luego de entender que las propiedades dinámicas afectaron directamente a la estructura durante un terremoto, se pudo tomar en cuenta el código de “Los Ángeles

Country Building and Safety” de 1943 propuso variar la carga basada en el número de niveles de piso (este análisis se basó en una investigación realizada en Caltech en colaboración con la “Universidad de Stanford” la cual fue iniciada en 1937 y con esto se dio formal aviso el concepto de espectros de respuesta que fue desarrollado en 1930.

Mientras que la Universidad de Berkeley de California iniciaba sus conocimientos en análisis no lineal el cual de una manera más fácil pensó en realizar un estudio computarizado haciendo uso del programa SAP 1970, para que de esta manera se pueda realizar un análisis más profundo tomando en cuenta un programa de elementos finitos.

2.11. RELACIONES LINEALES Y NO LINEALES

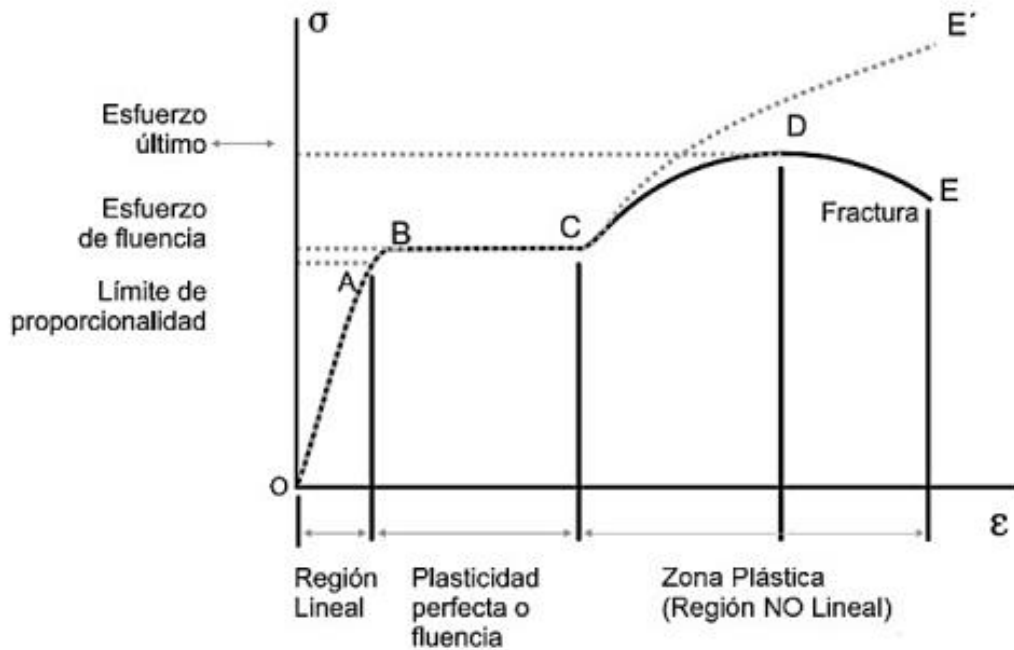
Para analizar una estructura hay que tomar en cuenta el análisis esfuerzo-deformación; en esta se observará dos tipos de deformaciones:

- Lineal en el que una de las variables es proporcional (deformación), es proporcional a los esfuerzos que se están formando en la estructura y su representación es una gráfica lineal.
- De los materiales que conforman la estructura que alcanzan un estado de fluencia y un comportamiento no lineal ya que es evidente el aumento del esfuerzo, mientras que su comportamiento se manifiesta con una ecuación de segundo orden tomando así la forma de una parábola.

Es por esta razón que es importante tomar en cuenta el comportamiento del hormigón en la estructura reforzada, ya que así se podrá verificar el comportamiento lineal o no lineal de los materiales, como lo indica la figura 11.

Figura 11.

Curva esfuerzo-deformación de estructuras de concreto reforzado



Nota. La figura representa la curva de esfuerzo-deformación en estructuras de concreto reforzado. Fuente: Duarte, Martinez y Santamaría, 2017

2.12. CÁLCULO NO LINEAL DE LOS MATERIALES

El cálculo no lineal permite realizar planteamientos de reparación y rehabilitación en la estructura.

Por lo tanto, es necesario aplicar este diseño en edificaciones en construcción o ya construidas por lo cual en el caso que el diseño supere algún estado limite; por la existencia de alguna rotura parcial, alguna fisura o deformación excesiva; se deberá tomar en cuenta.

2.13. DEFINICIÓN DEL ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER)

Cabe recalcar que para el uso de este análisis es importante tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- ❖ Características del material
- ❖ Geometría de secciones que contengan elementos estructurales y acero de refuerzo,

longitudinal y transversal: incluyendo el detalle de cada uno de ellos.

- ❖ Cargas permanentes y variables que actúan sobre la estructura.
- ❖ Resistencia en vigas y columnas.
- ❖ Ubicación de las rótulas plásticas en elementos estructurales.
- ❖ Verificar el esfuerzo-deformación en elementos estructurales donde fueron colocadas las rótulas plásticas.
- ❖ Cargas laterales ubicadas en el centro de masa de la estructura, esto quiere decir que el valor de carga en el piso será la misma a la del primer modo de vibración.

En este análisis actúa primero las cargas gravitacionales, empiezan a surgir las primeras deformaciones, luego actúan cargas laterales que son las que se van incrementando de manera secuencial. En esta dirección es donde se forma la primera rótula y es aquí donde surge la redistribución de rigidez de la estructura y es aquí donde se realiza iteraciones con el propósito de llegar a la falla de la edificación.

2.14. COMPORTAMIENTO NO LINEAL DE LA EDIFICACIÓN

Relaciona de manera proporcional la fuerza y la deformación en las estructuras de hormigón armado. Uno de los problemas más comunes es el sobredimensionamiento de alguno de los elementos estructurales que componen la edificación y por lo que están obligadas a trabajar en un rango elástico.

Este análisis obliga a los diseñadores a descartar la idea de utilizar la rigidez constante y en reemplazo a ello utilizar la rigidez durante todo el proceso de deformación.

La diferencia entre un análisis lineal y no lineal es “rigidez”, ya que se define como una medida cualitativa de la resistencia por deformaciones producidas debido al material. La rigidez depende de factores como son: la forma, el material y el soporte del elemento estructural. Es decir, cuando un elemento de hormigón armado presenta deformaciones por efecto de cargas externas se produce un cambio de rigidez.

2.15. TIPOS DE COMPORTAMIENTO NO LINEAL

El comportamiento no lineal en una estructura suele representarse de diferentes maneras, por lo que es necesario realizar la clasificación de análisis no lineales, basándose en el principio de no linealidad entre estos se puede mencionar los siguientes:

2.15.1.COMPORTAMIENTO BAJO GEOMETRÍA NO LINEAL

Este comportamiento ocurre con el cambio de rigidez de los elementos estructurales; en otras palabras, los elementos cambian de forma debido al aumento brusco de cargas en uno de los elementos estructurales, provocando deformación excesiva visible a simple vista. Para el caso de grandes deformaciones es importante tomar en cuenta que la dirección de la carga puede cambiar a medida que se deforma el modelo.

Como se explicó anteriormente el cambio de rigidez se lo realiza en función de los elementos estructurales que componen la estructura; por lo tanto, cuando se realice cambio de rigidez en función de la forma del elemento se lo llama linealidad geométrica según Bonilla C., Chavarria M., Diaz J. (2017) “Estos cambios de rigidez provocados por la forma pueden suceder cuando una pieza tiene grandes deformaciones que son visibles a simple vista. Una regla de aceptación general sugiere la realización de un análisis de geometría no lineal si las deformaciones son superiores a 1/20 de la cota más grande de la pieza”. (p. 29)

Por otro lado, el factor más importante que se debe tener en cuenta para grandes deformaciones es la dirección de la carga.

2.15.2.COMPORTAMIENTO BAJO MATERIALES NO LINEALES

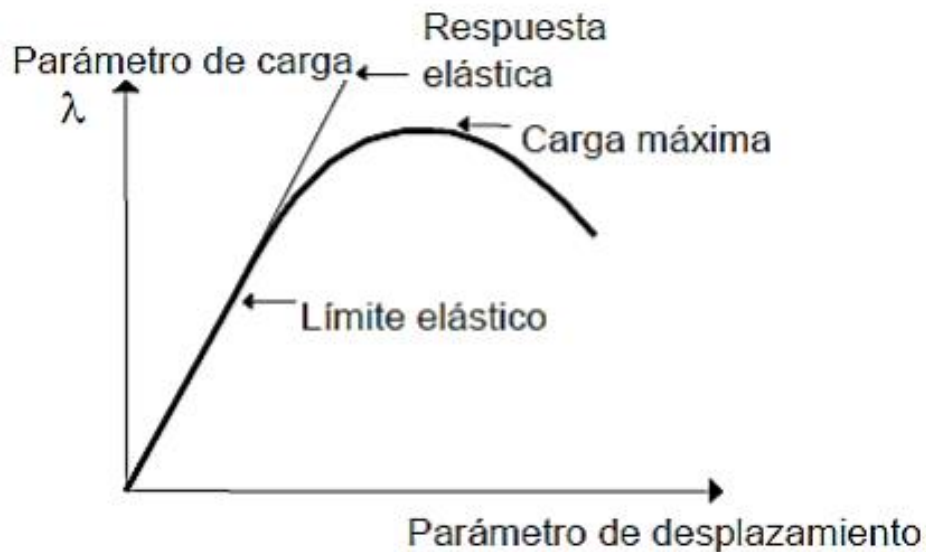
Este comportamiento ocurre al aplicar cargas externas las propiedades de los materiales se ven modificada, esto se ocasiona debido a los diseños no lineales donde los esfuerzos son proporcionales a las deformaciones unitarias, es decir que las deformaciones no son permanentes, estas volverán a su posición original no deformada.

En materiales donde no hay linealidad estos llegan a superar el estado de tensión límite, el material pierde rigidez y no puede seguir soportando el aumento paulatino de las cargas. Es importante tomar en cuenta que este comportamiento es

característico del hormigón ya que al momento de la falla este llega a fisurarse como muestra en la figura 12.

Figura 12.

Comportamiento no lineal del concreto



Nota. La figura representa el comportamiento no lineal del concreto. Fuente: Duarte, Martínez y Santamaría, 2017

2.16. TIPOS DE COMPORTAMIENTO NO LINEAL

Este análisis es muy importante en el diseño de las estructuras ya que según Pinzón E. (2015). “El análisis no lineal es una herramienta muy poderosa para los estudios de vulnerabilidad sísmica y reforzamiento estructural, ya que permiten “justificar” de una manera formal, que así no se cumplan a cabalidad todos los requerimientos de las normas vigentes, la edificación aún puede comportarse adecuadamente ante un evento sísmico”. (p. 29)

Esto es fundamental ya que por medio de las sollicitaciones que se le realiza a la estructura se puede salvaguardar vidas.

2.17. TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES

2.17.1. TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL TIPO I

Esta tipología estructural comprende estructuras de un piso con dimensiones entre ejes de 2,40 m a 3,20 m según el estudio realizado por Celi. C., Pantoja. J., Sosa. D., Ayala. C., (2018) abarca el 16% en el Distrito Metropolitano de Quito.

2.17.2. TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL TIPO II

Esta tipología estructural comprende estructuras de dos a tres pisos en forma asimétrica. Según el estudio realizado por Celi. C., Pantoja. J., Sosa. D., Ayala. C., (2018) esta estructura abarca el 85% en el Distrito Metropolitano de Quito, comprende la mayor cantidad ya que estas son las más usuales que se construyen de manera informal; por lo general su modelo son en L con entrepisos de hormigón.

2.17.3. TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL TIPO III

Esta tipología estructural comprende estructuras de dos a tres pisos con una forma simétrica estas estructuras según el estudio realizado por Celi. C., Pantoja. J., Sosa. D., Ayala. C., (2018) abarca el 85% en el Distrito Metropolitano de Quito, comprende la mayor cantidad ya que estas son las más usuales que se construyen de manera informal.

2.17.4. TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL TIPO IV

Esta tipología estructural comprende estructuras de cuatro a seis pisos con una forma rectangular en planta estas estructuras según el estudio realizado por Celi. C., Pantoja. J., Sosa. D., Ayala. C., (2018) abarca el 10% en el Distrito Metropolitano de Quito, ya que estos son construidos más para departamentos residenciales u oficinas.

2.18. NORMAS

Las normas utilizadas en este proyecto técnico es la normativa de construcción de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles ASCE (por si siglas en Ingles) 7-22, Normativa Ecuatoriana de la Construcción NEC 15. Adicionalmente se utilizaron otras normativas complementarias a las detalladas anteriormente que se citan más adelante.

2.18.1.NORMATIVA DE LA SOCIEDAD AMERICANA DE INGENIEROS CIVILES ASCE 7-22

Esta norma es de gran importancia ya que permite tomar en cuenta los criterios de diseño sismorresistente en especial se hizo el uso de la norma de Cargas mínimas de edificios. Esta norma presenta los criterios de diseño y construcción para edificios y otras estructuras que están sujetas al movimiento del suelo producto del sismo.

2.18.1.1. *Máximo sismo considerado.* Corresponde al máximo sismo de diseño con una probabilidad de excedencia del 2% en 50 años, esto representa el periodo de retorno de 2500 años. Según el código de la construcción es indispensable que las edificaciones sean diseñadas con el máximo sismo considerado ya que de esta así se controlarán las fallas leves y además nos dan facilidades esenciales.

2.18.1.2. *Sismo de diseño.* Este sismo equivale a los $\frac{2}{3}$ del sismo considerado, en esta norma indica que existe un límite inferior para diseñar estructuras de tipo normal manteniendo el riesgo controlado; teniendo un factor de $1,5 \left(\frac{1,0}{1,5} = \frac{2}{3} \right)$.

2.18.1.3. *Valores de movimiento sísmico en el suelo.* Este ítem da a conocer las aceleraciones espectrales del periodo corto SS, y a un segundo S1; estas deberán ser obtenidas de las curvas de peligro sísmico de la NEC 15.

2.18.1.4. *Tipos de suelos.* El tipo de suelo según la Normativa Ecuatoriana de la Construcción se clasifica en suelos tipo: A, B, C, D, E, F según las propiedades de cada uno de estos. Pero, en el caso de no conocerse las propiedades del suelo se lo denota como suelo tipo D, ya que es el más común en Ecuador.

2.18.1.5. *Coefficientes de sitio*. En relación con las aceleraciones espectrales, según la norma ASCE 7-22 determina los siguientes coeficientes de F_a y F_v como muestra las siguientes tablas 2 y 3.

Tabla 2.

Coefficientes de sitio F_a

TIPO DE SUELO	Parámetro de aceleración espectral a periodo corto para el máximo sismo considerado (MCER)				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	Ver sección 11.4.7				

Nota. En la tabla se representa los coeficientes de F_a a ser utilizados en el sismo considerado. Elaborado por: la autora con datos de (ASCE 7-10), a través del programa Excel (2022).

Tabla 3.

Coefficientes de sitio F_v

TIPO DE SUELO	Parámetro de aceleración espectral a de un segundo corto para el máximo sismo considerado (MCER)				
	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.5	1.3
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	Ver sección 11.4.7				

Nota. En la tabla se representa los coeficientes de F_v a ser utilizados en el sismo considerado. Elaborado por: la autora con datos de (ASCE 7-10), a través del programa Excel (2022).

2.18.2.NORMATIVA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN NEC-SE-DS-15

Tomando en cuenta el diseño basado en fuerzas DBF se puede observar que los métodos lineales y pseudo - dinámicos son obligatorios para el análisis de diseño en una estructura. Toda estructura debe estar diseñada para soportar fuerzas sísmicas sin llegar al colapso.

En este punto se asumirá que las fuerzas de diseño no actúan en la misma dirección del eje principal por lo tanto se tomaran los objetivos del DBF para determinar una correcta combinación de fuerzas que deben actuar en la estructura; estos son:

3.1.2.1.Tomar en cuenta la Filosofía de diseño.

3.1.2.2.Determinar fuerzas laterales equivalentes

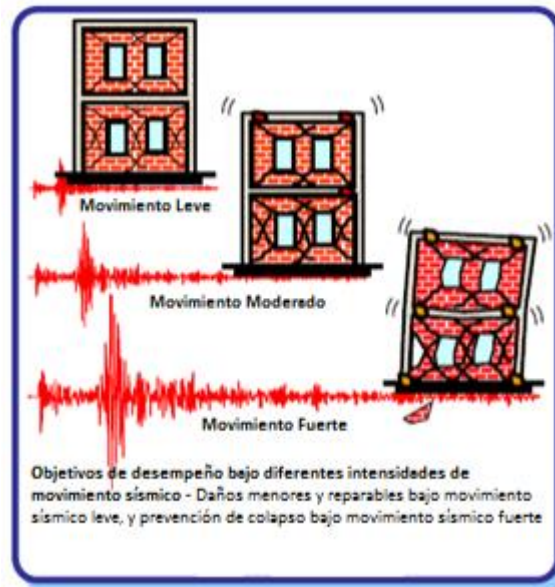
3.1.2.3.Verificar los efectos del sismo

2.18.2.1. *Filosofía del diseño sismorresistente.* Esta filosofía de diseño sismorresistente busca:

- ❖ Evitar daños en los elementos estructurales que conforman la infraestructura ante el curso de un sismo ya que estos pueden suceder durante la vida útil de la estructura; y su probabilidad de ocurrencia es del 50% en 62 años.
- ❖ Prevenir daños en elementos estructurales graves y poder controlar los daños no estructurales ante terremotos que pueden acontecer durante la vida útil de la estructura; su probabilidad de ocurrencia es del 10% correspondiente a 465 años.
- ❖ Evitar el colapso de la estructura ante la presentación de terremotos que pueden ocurrir durante la vida útil de la estructura; su probabilidad de ocurrencia es del 2% en 50 años.

Figura 13.

Desempeño de la estructura bajo diferentes intensidades de sismo



Nota. La figura representa el desempeño de la estructura bajo diferentes intensidades sísmicas. Fuente: Fernández y Subía, 2014

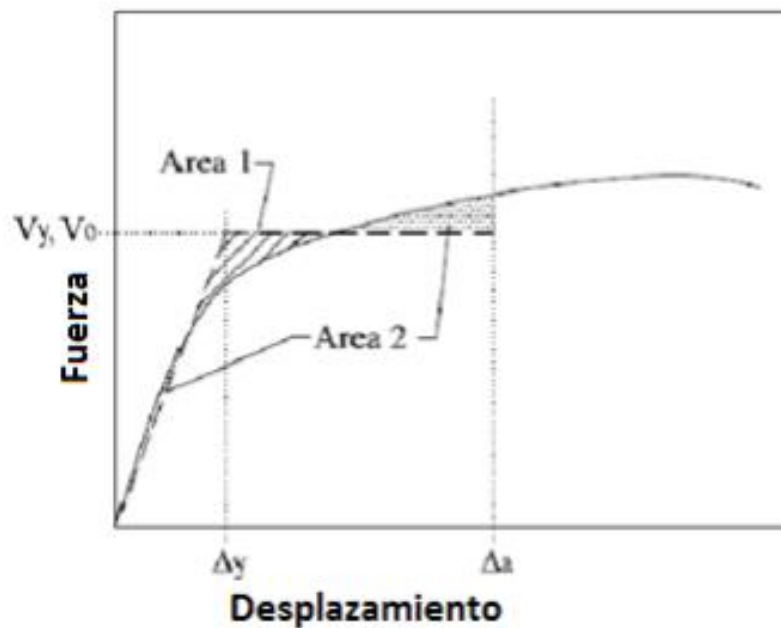
2.18.2.2. **Fuerzas laterales equivalentes.** El método de las fuerzas equivalentes es un método que sirve para determinar las fuerzas a las que estará sometida la edificación de tal manera que se llegue a tener una convención entre las fuerzas que se ejercen y las fuerzas que actúan en la edificación. Este método es un procedimiento de vibración de la estructura donde se asume que el coeficiente modal del primer modo de vibración es proporcional a la altura de la masa.

Las fuerzas laterales son aquellas que están producidas por cargas como sismo, viento o granizo y estas pueden determinarse de manera estática, utilizando la segunda ley de Newton la cual nos sirve para estimar la fuerza cortante en la base de la estructura.

2.18.2.3. *Factor de modificación de respuesta.* Se está considerando un modelo de análisis no lineal el cual trata de que la rigidez vaya cambiando en función del nivel de deformación de la estructura; es decir, existe una relación directa entre el cortante basal y el desplazamiento como se puede observar en la figura 14, donde usando el principio de linealidad se puede crear una aproximación bilineal de la curva para encontrar valores para el cálculo de R.

Figura 14.

Análisis Pushover utilizando el principio de linealidad



Nota. La figura representa el análisis Pushover utilizando el principio de linealidad.
Fuente: Fernández y Subía, 2014

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1. CRITERIOS DE DEFINICIÓN REDUCCIÓN SÍSMICA (R)

Los factores de reducción como ya lo anteriormente dependen de algunas variables como son:

- ❖ Tipo de edificación
- ❖ Tipo de cimentación, suelo
- ❖ Periodo de vibración máximo considerado
- ❖ Factores de ductilidad, sobre resistencia y amortiguamiento de la estructura en condiciones libres.

3.2. DUCTILIDAD

La ductilidad es una propiedad del material de abastecer resistencia durante la respuesta inelástica de la estructura, hasta llegar a la falla en muchas ocasiones ocurre que cuando se llega a la falla siguen aconteciendo deformaciones inelásticas sin llegar al colapso de la estructura. Por otra parte, las fallas frágiles provocan la pérdida de la resistencia de tal modo que provoca la desintegración del material.

El coeficiente para disipar la energía es el que la norma lo indica, el cual servirá para reducir acciones sísmicas de diseño:

$$E_x = \frac{F_x}{R}$$

Ecuación 9.

Dicho coeficiente se debe reducir por tres factores:

- ❖ Factor de irregularidad en altura (Φ_a)
- ❖ Factor de irregularidad en planta (Φ_p)
- ❖ Factor de irregularidad por ausencia de redundancia (Φ_r)

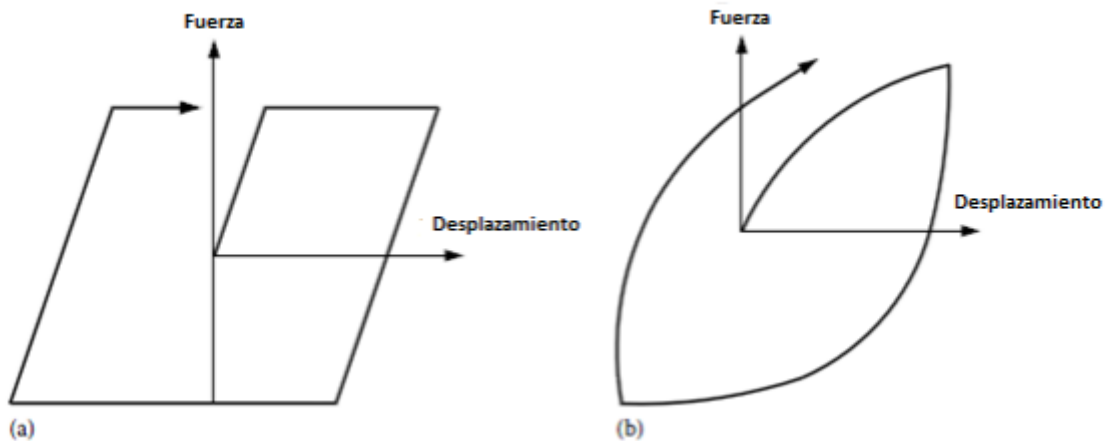
3.3. HISTÉRESIS

Es importante tomar en cuenta que una estructura que posee ductilidad es aquella que responde inelásticamente sin perder su resistencia inicial durante la ocurrencia de un sismo.

Como se mencionó anteriormente la ductilidad es definida mediante un modelo elasto-plástico como se muestra en la figura 15 en donde se detalla en dos modelos diferentes la representación de fuerza-deformación lineal y no lineal.

Figura 15.

Representación fuerza-deformación lineal y no lineal



Nota. Las figuras representan los diagramas de fuerza-deformación lineal y no lineal. Fuente: Reinforced Concrete Design Of Tall Buildings, Bungale Taranath, 2010

En la ilustración (a) se observa una estructura de comportamiento ideal; en la actualidad esto es totalmente teórico ya que las estructuras no son diseñadas con este criterio. Mientras que en la ilustración (b) se pueden concentrar deformaciones inelásticas en las rotulas plásticas; esto si ocurre en la actualidad ya que estas suceden en las vigas en donde bajo sollicitaciones de condiciones iniciales estas absorben entre un 70% a 80% de energía con respecto al modelo elasto-plástico ideal.

3.4. REDUNDANCIA

Para un sistema resistente lateral es esencial tomar en cuenta las siguientes consideraciones como por ejemplo contar con un grado de redundancia en estructuras que se encuentren en una zona altamente sísmica.

La redundancia en estructuras se refiere a más de una línea de defensa para cargas laterales una estructura que tiene redundancia se consigue tomando en cuenta sistemas de pórticos a momento como en columnas y vigas; es decir, con conexiones dúctiles o teniendo un sistema dual con muros de corte.

3.5. REGULARIDAD Y CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL

Por lo general se sabe que normalmente diseñadores y calculistas toman la opción de realizar estructuras simples y regulares ya que de este modo logran obtener un adecuado desempeño sísmico. En otros de los casos se realiza cambios escabrosos de rigidez y resistencia, los cuales es indispensable ya que estos provocarán daños en algunos elementos estructurales que perderán ductilidad esto ocasionará el derrocamiento de dicha estructura.

Por lo tanto, es indispensable tomar en cuenta el uso de un adecuado sistema estructural siguiendo los siguientes parámetros que nos da a conocer la norma NEC – 15:

Configuración en elevación: 1.00

Configuración en planta: 1.00

Ausencia de redundancia: 1.00

3.6. MÉTODOS DE DISEÑO

3.6.1. DETERMINACIÓN DE LA FUERZA SÍSMICA LATERAL

Para el cálculo de una estructura se realiza procedimientos para obtener las fuerzas laterales, estáticas o dinámicas. Pero hay que tomar en consideración que el procedimiento que se escoja dependerá de la configuración estructural en planta y en elevación.

Para cálculos de estructuras regulares tanto en planta como en elevación se

aplicará procedimientos estáticos para determinar las fuerzas laterales, a este cálculo se le aplica el método de diseño basado en fuerzas (DBF).

3.6.2. MÉTODO 1: DISEÑO BASADO EN FUERZAS (DBF)

Los métodos estáticos y pseudo-dinámico son de gran importancia para toda estructura con excepción de las edificaciones totalmente regulares.

Para esto es necesario partir de los objetivos principales de este método como son:

- ❖ Tomar en cuenta la filosofía de diseño como lo especificamos en la sección 3.1.2.1.
- ❖ Determinar fuerzas sísmicas de diseño
- ❖ Verificar los efectos del sismo tomando en cuenta la resistencia de los materiales

Una de las deficiencias con las que cuenta este método es que utiliza factores de reducción sísmica R se mantiene constantes para cada tipología estructural; esto consiste en hacer la demanda de ductilidad y la sobre resistencia son iguales para todas las estructuras dentro de la misma categoría, esto quiere decir que se asume un valor de R para todo periodo y tipo de suelo.

Para poder utilizar este método es indispensable tomar en cuenta el diseño de fuerzas internas esto implicará que dichas fuerzas actúan en cada elemento estructural por lo tanto es indispensable tomar en cuenta las siguientes solicitaciones:

- ❖ Deflexiones o deformaciones que presentan los elementos
- ❖ Derivas inelásticas y elásticas
- ❖ Fuerzas de piso en cada elemento
- ❖ Momentos que presentan los elementos estructurales
- ❖ Cortantes de piso de la edificación para encontrar el cortante máximo
- ❖ Cortantes en la base de la edificación para suministrar las deformaciones.

3.6.3. MÉTODO 2: DISEÑO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS (DBD)

Parte de un desplazamiento objetivo que se encuentra en función del nivel de daño, es aquel que suministra la resistencia lateral a la estructura para conseguir el nivel de desempeño deseado.

Para el cálculo del nivel de desempeño de la estructura se utilizará el diseño por capacidad para el detallamiento de las estructuras, el cual asegurará que el mecanismo dúctil seleccionado se desarrolle durante un evento sísmico severo.

El DBD puede ser utilizado para analizar una estructura regular e irregular como pueden ser: edificios aperticados de hormigón armado o acero y edificios con muros estructurales.

3.7. DETALLAMIENTO Y DISEÑO POR CAPACIDAD

El diseño de las estructuras nos indica que los elementos estructurales que se encuentran pre dimensionados son capaces de desarrollar una demanda dúctil. Este se relaciona directamente con el factor de R ya que nos indica el porcentaje de disipación de la estructura y los desplazamientos que ocurren, según Fernández y Subía, (2014) “El detallamiento es lo que convierte el diseño estructural en tanto una ciencia como un arte”. (p. 33). Por lo que el diseño por capacidad ayuda a la formación de nodos de deformación inelástica obteniéndose mediante la triangulación de las resistencias en los elementos y controlando las posibles fallas.

3.7.1. GRUPOS ESTRUCTURALES DE ACUERDO CON EL FACTOR R

En este ítem se debe seleccionar el grupo estructural que se va a utilizar en la edificación que se va a analizar, estos pueden ser:

- ❖ Sistemas estructurales dúctiles.
- ❖ Sistemas estructurales de ductilidad limitada.
- ❖ Sistemas estructurales combinados el cual se toma en cuenta el valor menor del factor de reducción.

Como se muestra en la tabla 4 donde se muestran los diferentes sistemas estructurales con su debido factor de respuesta.

Tabla 4.*Clasificación de sistemas estructurales por grupos*

SISTEMAS ESTRUCTURALES DÚCTILES	R
SISTEMAS DUALES	
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas y con muros estructurales de hormigón armado o con diagonales rigidizadoras (sistemas duales).	7
Pórticos especiales sismo resistentes de acero laminado con caliente, sea con diagonales rigidizadoras (excéntricas o concéntricas) o con muros estructurales de hormigón armado.	7
Pórticos con columnas de hormigón armado y vigas de acero laminado en caliente con diagonales rigidizadoras (excéntricas o concéntricas).	7
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas banda, con muros estructurales de hormigón armado o con diagonales rigidizadoras.	6
PÓRTICOS RESISTENTES A MOMENTOS	
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas.	6
Pórticos especiales sismo resistentes, de acero laminado en caliente o con elementos armados de placas.	6
Pórticos con columnas de hormigón armado y vigas de acero laminado en caliente.	6
OTROS SISTEMAS ESTRUCTURALES PARA EDIFICACIONES	
Sistemas de muros estructurales dúctiles de hormigón armado.	5
Pórticos especiales sismo resistentes de hormigón armado con vigas banda.	5
PÓRTICOS RESISTENTES A MOMENTO	
Hormigón armado con secciones de dimensión menor a la especificada en la NEC-SE-HA, limitados a viviendas de hasta 2 pisos con luces de hasta 4 metros.	3
Estructuras de acero conformadas en frío, aluminio, madera, limitados a 2 pisos.	3
MUROS ESTRUCTURALES PORTANTES	
Mampostería reforzada, limitada a 1 piso.	1
Mampostería reforzada, limitada a 2 pisos.	3
Mampostería confinada, limitada a 2 pisos.	3

Nota. La tabla 1 representa la clasificación de las edificaciones de acuerdo con el factor de reducción R. Elaborado por: la autora con datos de (NEC 2015), a través del programa Excel (2022).

3.7.2. SISTEMA ESTRUCTURAL DÚCTIL

Este valor de R que se detalló en la tabla 4 se utiliza para el cálculo del cortante basal, teniendo en cuenta que el diseño de la edificación debe estar bajo requisitos de diseño sismo resistente conforme con la filosofía de diseño.

3.7.3. REQUISITOS GENERALES PARA APLICAR EL DBD

La norma NEC 2015 (Norma Ecuatoriana de la Construcción) de Peligro Sísmico indica que se verificarán las deformaciones inelásticas de la siguiente manera:

- ❖ Rótulas plásticas en sitios predeterminados: estas rótulas se formarán solamente en sitios predeterminados utilizando el principio de diseño por capacidad.
- ❖ Efectos del modo de vibración encontrado: las fuerzas que están aplicadas en los mecanismos deben permanecer elásticas para amplificarse y de tal modo formar efectos en los modos de vibración altos.
- ❖ Efecto de segundo orden: al momento que estos llegan a cumplir su nivel de desempeño es necesario verificar los efectos de segundo orden de tal modo que no causen inestabilidad.

3.8. DEMANDA, CAPACIDAD Y DESEMPEÑO DE UNA ESTRUCTURA

Para este procedimiento se toma en cuenta el método de capacidad-espectro el cual ayuda a determinar el punto de desempeño se requiere de tres elementos que son: demanda, capacidad y desempeño.

Demanda: también conocida como los desplazamientos ya que representa los movimientos que hay en la tierra a causa de un sismo, esto ayudará a tener en cuenta la

demanda máxima esperada de la estructura durante el movimiento de suelo.

Capacidad: es la habilidad que tiene una estructura para soportar un sismo sin sufrir deformaciones en los elementos estructurales, es decir la capacidad de la estructura depende de la resistencia para determinar la capacidad de la estructura más allá del límite elástico.

Desempeño: depende en gran parte de la capacidad de demanda sísmica de la estructura. Esto ayudara a determinar la curva demanda - capacidad con el fin de evaluar el desempeño de la estructura, en este punto se podrá verificar cada uno de los elementos estructurales que tengan falla o no.

3.9. NIVEL DE DESEMPEÑO

El propósito de desempeño de una estructura es lograr un desempeño adecuado de las estructuras que ante los movimientos sísmicos a los que enfrentamos cada cierto tiempo, por lo que se ha creado 4 niveles para determinar el peligro sísmico, estos niveles son:

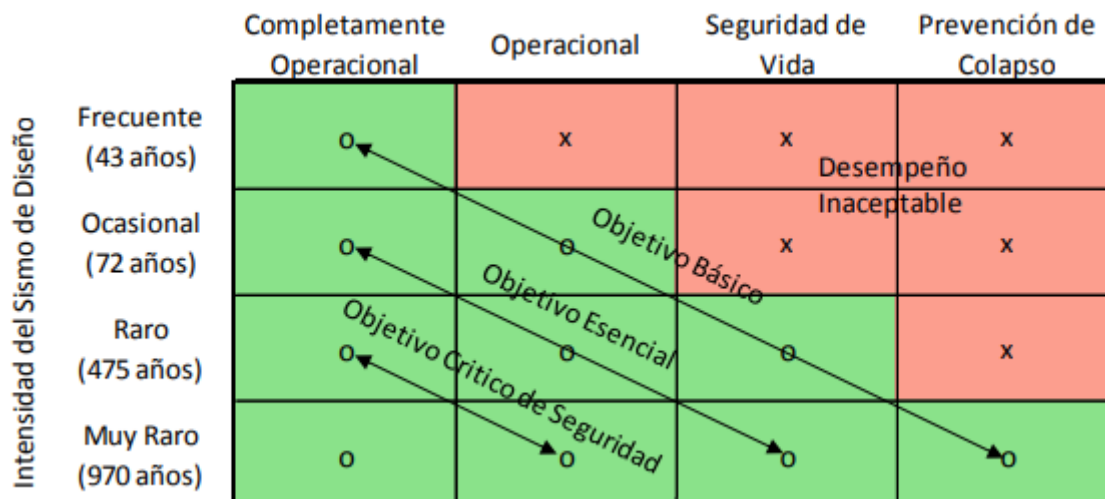
- ❖ Nivel 1 (Totalmente Operacional). La edificación sigue en funcionamiento con daños casi insignificantes.
- ❖ Nivel 2 (Operacional): La edificación sigue en funcionamiento, con daños menores.
- ❖ Nivel 3 (Seguridad de vida): En la estructura se asegura la protección de la vida y en este caso el daño es moderado.
- ❖ Nivel 4 (Prevención de colapso): Se previene el colapso y además los daños son severos.

Nivel de desempeño (*Fernández y Subía, 2014. Pág.)*

Los objetivos para el desempeño de una estructura surgen de la combinación de niveles de desempeño con el nivel de peligro sismorresistente como muestra la figura 16.

Figura 16.

Representación del desempeño del sistema



Nota. La figura representa el nivel de desempeño del sistema en una estructura.

Fuente: Fernández y Subía, 2014

Esta figura representa la línea de objetivo básico en el cual se encuentran los niveles de desempeño para edificaciones normales, la línea de objetivo esencial y la línea de objetivo crítico de seguridad representan los niveles de desempeño para hospitales que deben permanecer durante la duración de un sismo.

3.10. ROTULAS PLÁSTICAS EN UN ANÁLISIS PUSHOVER

Para poder entender de mejor manera el procedimiento o cómo actúan dichas estructuras es necesario tomar en consideración las Normativas el ATC 40 y FEMA 273 los cuales han desarrollado criterios de aprobación para el análisis pushover.

Es así como en la Normativa FEMA 273 se identifican puntos A, B, C, D y E los cuales son utilizados para determinar la actuación de las rotulas plásticas tanto en columnas, vigas y riostras.

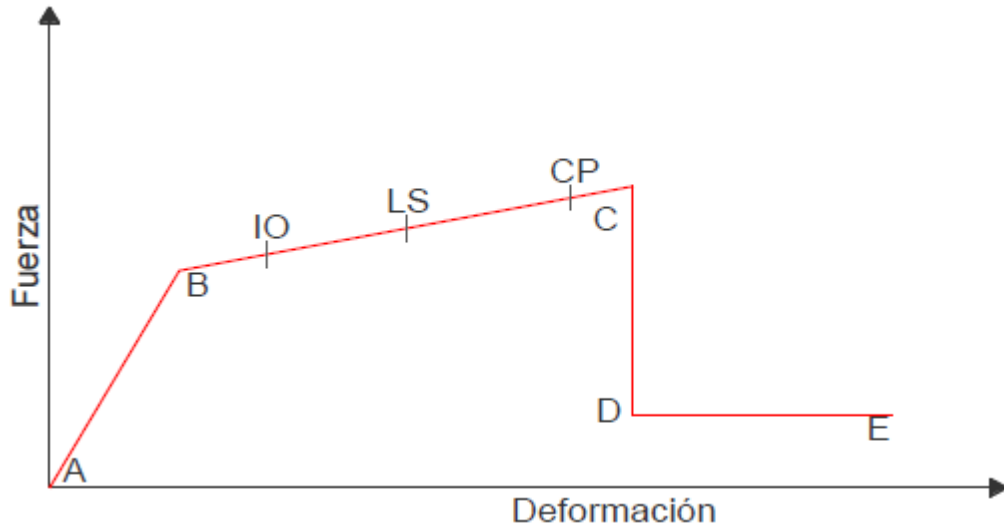
Cabe mencionar que dentro de esta gráfica se encuentran los puntos de: Ocupación Inmediata (IO), Seguridad de vida (LS) y Prevención de Colapso (CP), estos valores varían dependiendo el tipo de estructura; así como también del tipo de elemento

estructural que lo compone.

En la siguiente figura se podrá determinar la curva de deformación donde se indica la fuerza y deformación de la rotula plástica.

Figura 17.

Nivel de desempeño de la estructura



Nota. La figura representa el nivel de desempeño de una estructura aplicado un análisis pushover. Fuente: Vasconez J., 2012

Donde

A: Corresponde al punto 0,0 (sin ejecutar la carga lateral)

B: Indica el límite de fluencia nominal (inicia el daño estructural)

C: Este punto corresponde al límite de seguridad, el cual indica la capacidad máxima de la estructura. La línea horizontal entre B y C tendrá una pendiente entre el 5 – 10%, donde el cual determina la deformación de disipación de energía significativa.

D: Al llegar a este punto el elemento estructural ya perdió resistencia y se empieza a fracturar.

E: Colapso total (máxima deformación de un elemento).

3.11. ESTADOS LIMITE DE ELEMENTOS

3.11.1. ESTADO DE AGRIETAMIENTO

Los elementos de concreto y mampostería inician su agrietamiento cambiando su rigidez, así como las propiedades de los elementos que lo constituyen es decir son de gran importancia que estos se mantengan controlados y además realizara una debida composición en cada uno de los elementos mediante el uso de aditivos que ayudan a que el hormigón gane resistencia desde su fase inicial.

3.11.2. ESTADO DE PRIMERA FLUENCIA

Los elementos de concreto y mampostería inician su agrietamiento cambiando su rigidez, así como las propiedades de los elementos que lo constituyen, es de gran importancia que estos se mantengan controlados y además realizara una debida composición en cada uno de los elementos mediante el uso de aditivos que ayudan a que el hormigón gane resistencia desde su fase inicial.

3.11.3. ESTADO DE DESPRENDIMIENTO

Los elementos de concreto y mampostería inician su agrietamiento cambiando su rigidez, así como las propiedades de los elementos que lo constituyen, y es de gran importancia que estos se mantengan controlados y además realizara una debida composición en cada uno de los elementos mediante el uso de aditivos que ayudan a que el hormigón gane resistencia desde su fase inicial.

3.12. PATRONES DE CARGA LATERAL

Pertenece al conjunto de cargas laterales que será aplicado en el modelo analítico por medio del uso de un paquete computacional para el análisis de estructuras, el cual toma en cuenta las fuerzas inerciales que actúan en cada nivel de la edificación.

3.12.1. PATRON MODAL

Dentro de este ítem existen 3 distribuciones de fuerza lateral:

- ❖ Las fuerzas empleadas se toman en consideración cuando más del 75 % de la masa modal aplicada en el modo de vibración en el sentido de las fuerzas aplicadas.

- ❖ El reparto de las fuerzas verticales empleadas se toma en consideración cuando más del 75 % de la masa modal aplicada en el modo de vibración en el sentido de las fuerzas aplicadas.
- ❖ El reparto de las fuerzas verticales empleadas se toma en consideración cuando más del 90 % de la masa modal aplicada en el modo de vibración en el sentido de las fuerzas aplicadas y cuando el periodo de vibración excede a 1 segundo.

3.12.2.PATRON DE FUERZAS LATERALES ADAPTIVAS

Para el plan de fuerzas laterales, tenemos las reparticiones de fuerzas que se definen a continuación:

- ❖ En una distribución uniforme se obtiene la masa modal de cada piso.
- ❖ Una distribución uniforme de fuerzas laterales que cambian la medida de deformación de la estructura, el nuevo patrón de fuerzas toma la forma con el cambio de rigidez que toma la misma.

Este patrón de cargas es muy utilizado con el fin de que se pueda determinar los rangos de las acciones de diseño que podrán ocurrir durante una respuesta dinámica.

3.13. HORMIGÓN

El hormigón es un material compuesto que se utiliza en la mayoría de las construcciones, ya que su consistencia facilita su trabajabilidad durante el proceso de vertido. El hormigón está conformado por agregado fino, grueso, aglomerante (cemento Portland) y agua. Una de las ventajas más importantes del hormigón es su tiempo de fraguado a edades tempranas.

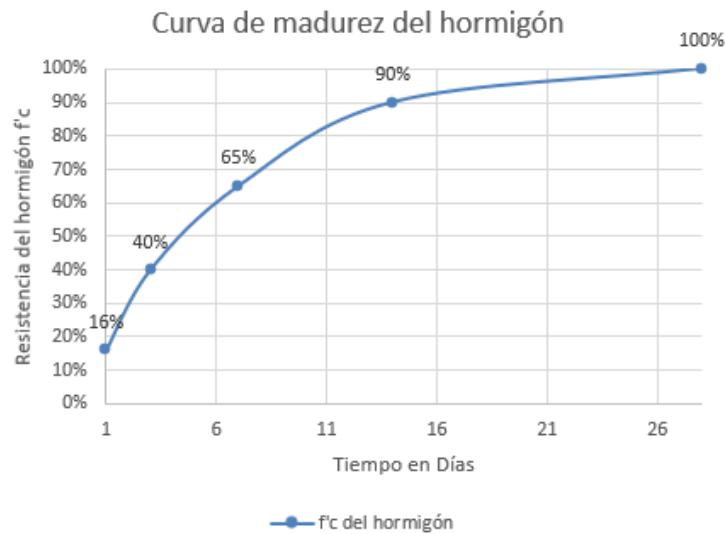
Es así como logra que la resistencia desde el día 1 obtenga un porcentaje del 16%, a los 7 días este debe cumplir con un 65% de su resistencia esperada, para la respectiva aprobación de fiscalización; posteriormente a los 14 días este debe llegar al 90% de su resistencia. Finalmente, a los 28 días este debe llegar al 100% de la resistencia con la que se realizó los cálculos como se muestra en la Figura 17 donde se puede observar la resistencia del hormigón vs el tiempo en días.

Es necesario aclarar que, el hormigón nunca deja de adquirir resistencia; con el

paso del tiempo este sigue incrementando su resistencia ya que está expuesto a la intemperie. Los cambios climáticos ayudan a que el hormigón en su etapa de curado siga adquiriendo más resistencia hasta llegar a una resistencia del 100%.

Figura 18.

Curva de madurez del hormigón



Nota. La figura representa la curva de madurez del hormigón durante 28 días.

Elaborado por: la autora con datos de (Luna, 2014), a través del programa Excel (2022).

3.14. MATERIALES DE HORMIGÓN ARMADO

Estas estructuras están compuestas por distintos materiales que trabajan de manera conjunta frente a la acción de cargas que se someten constantemente como son:

- Cargas de viento
- Cargas de sismo
- Cargas de granizo

La técnica que se lleva a cabo para la construcción de estructuras de hormigón armado es el hormigón reforzado con varillas de acero las cuales son utilizadas para la elaboración de armaduras.

Uno de los materiales más utilizados es el hormigón armado por lo cual se utiliza en la construcción de edificios, vías, puentes, obras hidráulicas y también obras marítimas.

3.15. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN

3.15.1.CEMENTO

El cemento según Cánoves, V. (2012) “es un material muy importante dentro de la obtención del concreto, encargado de aglutinar o cohesionar toda la masa y mantenerla compactada para que sea capaz de asumir su función estructural; ya que es un componente inorgánico molido que mezclado con agua forma una pasta que fragua y se endurece por medio de reacciones químicas y procesos de hidratación adecuados”. (p. 23)

Por lo tanto, a mayor contenido de cemento mayor resistencia; a menor contenido de cemento menor resistencia; siempre que la relación agua/cemento sea constante.

3.15.2.RELACIÓN AGUA/CEMENTO

Según (Osorio, 2020. p.) La relación agua/cemento es una de las propiedades importantes ya que tiene relación en la resistencia, durabilidad y retracción del hormigón; esta también depende de los materiales y las condiciones de ensayo.

$$\text{Relación agua cemento} = \frac{A}{C}$$

Ecuación 10.

3.16. PROPIEDADES FÍSICAS MECÁNICAS DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

Las propiedades del hormigón dependen en gran parte de las dosificaciones de cada uno de los materiales que lo conforman como son: agregado fino, agregado grueso, cemento y agua; así como también de su edad. Además de factores climáticos que intervienen durante su proceso de fabricación como son la temperatura, la humedad.

3.16.1.AGREGADO FINO

El árido fino consiste en arena natural, arena elaborada o una combinación de

ellas. De acuerdo con la normativa NTE INEN 872:2011 Primera revisión el árido fino no debe tener más de 45% pasante en cualquier tamiz y retenido en el siguiente consecutivo y su módulo de finura no debe ser menor que 2,3 ni mayor que 3,1.

3.16.2.AGREGADO GRUESO

El árido grueso consiste en grava, grava triturada, piedra triturada, o una combinación de estos. De acuerdo con la normativa NTE INEN 872:2011 Primera revisión el árido grueso debe cumplir con los requisitos para el número de tamaño especificado. Se puede permitir el uso de áridos que no cumplen con los estrictos requisitos de gradación siempre que el árido propuesto haya sido evaluado a través de preliminares de desempeño que demuestren que se obtienen resultados satisfactorios y que además se cuente con la aprobación expresa del especialista en hormigones y del responsable de la obra.

3.16.3.DENSIDAD DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

La densidad del hormigón es la relación entre el peso y el volumen del hormigón. La densidad del hormigón para edificaciones varía en un rango que va desde 2,24 hasta 2,4 kilogramo por metro cubico (kg/m³). Mientras que el peso unitario del hormigón varía dependiendo de la cantidad y de la densidad relativa del agregado. (Ulloa V. 2013).

Las densidades por lo general experimentan leves variaciones con el tiempo; esto depende de la densidad relativa del agregado, de la cantidad de aire y agua; así como también de la cantidad de cemento; y estos se ven influenciados por el tamaño de las partículas del agregado.

Existen hormigones que se encuentran por debajo del rango ya mencionado; estos llegan a clasificarse en:

- Hormigones livianos: estos hormigones oscilan con una densidad entre 300 kg/m³ y 1900 kg/m³; se obtienen mediante la incorporación de aire ya sea en la masa o en los áridos. Por lo general son utilizados en partes de aislamiento acústico.
- Hormigones pesados: para la obtención de este hormigón se lo hace mediante el uso de agregados mineralizados, donde su densidad real es mayor a la densidad

normal del agregado; es por esto que su peso específico supera los 2800 kg/m³. Son utilizados para aislamiento contra partículas radioactivas.

3.16.4.RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE

Esta es una de las propiedades más importantes, ya que es utilizada para medir la capacidad que tiene el elemento de hormigón para soportar cargas axiales hasta llegar a la falla. La resistencia a la compresión es la relación de la carga máxima de ruptura a compresión dividida para el área de la sección transversal del espécimen, generalmente se representa como f'_c y cuyas unidades son kg/cm² o MPa (Cagua & Nates, 2017).

Los cilindros sometidos a ensayo de aceptación y control de calidad se elaboran y curan siguiendo los procedimientos descritos en la norma ASTM C31 Práctica Estándar para Elaborar y Curar Probetas de Ensayo de Concreto en Campo/ NTP 339.033.

El hormigón en su calidad de constituyente en una vivienda o edificación según Galindo, R. (2022) “es el elemento más importante para analizar ya que es sometido a tensiones por parte de sollicitaciones externas que se encuentran sobre este; es decir que si sobrepasan su capacidad resistente llegará a la fractura”. (p. 12).

3.17. CONTROL DE HORMIGÓN EN OBRA

En el control de hormigón en obra es importante tomar en cuenta cada uno de los aspectos que los vamos a detallar a continuación:

- ❖ Primero hay que tomar en cuenta las proporciones del hormigón.
- ❖ Segundo es necesario tomar en cuenta el control de humedad de los materiales que componen el hormigón en la obra ya que de esta manera se podrá tener un mejor control de este hormigón.
- ❖ Tercero es necesario tomar en cuenta que no se debe utilizar agregados que contengan sales o minerales.
- ❖ Cuarto es necesario tomar en cuenta las recomendaciones con respecto a los cementos ya que esto ayudara a que fragüe de manera natural y así asegurar la

resistencia del hormigón

- ❖ Quinto es imprescindible controlar el asentamiento. Esto se lo realizara mediante un ensayo del cono de Abrahams, esto servirá para realizar las correcciones en el diseño en el caso de que los agregados hayan sufrido humedad.
- ❖ Sexto en el caso de que se usen aditivos es necesario tomar en cuenta que antes de ubicar en la mezcla los aditivos se realizará pruebas para evaluar su comportamiento.
- ❖ Séptimo con respecto al transporte del hormigón se lo debe realizar con mucha precaución ya que esto evitará segregación de este.

3.18. HORMIGÓN ARMADO

El hormigón armado es un material que consiste en la mezcla de hormigón y acero el cual se utiliza para estructuras como: edificaciones, puentes, caminos, presas, etc. Una de las características principales del hormigón es que siempre trabaja a compresión y muy poco a tracción.

Una de las ventajas que posee este hormigón es que el hormigón que rodea a las varillas de acero genera confinamiento, esto permitirá que el acero al momento de la ocurrencia de un sismo o con el pasar del tiempo no se pandee, cumpliendo así con la vida útil de dicha estructura.

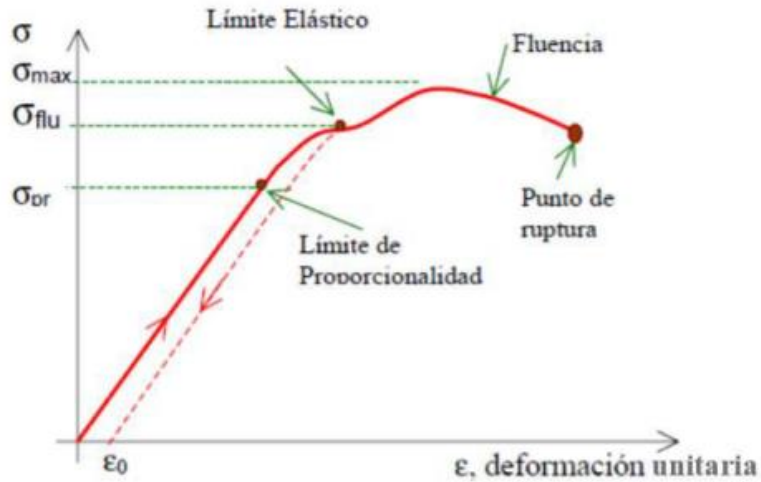
3.19. MÓDULO DE ELASTICIDAD

Hay que tener en cuenta que el hormigón no es un material elástico; pero al aplicarle una carga externa este se deforma lo que hace que presente una gráfica de esfuerzo – deformación. La mayor influencia en este reside en la relación agua/cemento, pues a menor valor de ésta, mayor será la resistencia; y por consiguiente el módulo de elasticidad incrementará. (Sánchez., B. 2019).

La figura 18 en su inicio presenta una línea recta y es aquí de donde se obtienes el módulo de elasticidad del hormigón de forma empírica; esta se puede encontrar trazando una tangente en la recta.

Figura 19.

Curva de esfuerzo – deformación del hormigón endurecido



Nota. La figura representa la curva de esfuerzo – deformación del hormigón endurecido. Fuente: Soto y Marín, 2019.

El módulo de elasticidad es uno de los datos más importantes para realizar el análisis de una estructura; se lo utiliza para el cálculo de las rigideces de los elementos estructurales propuestos. Tomando en cuenta la norma ASTM C469 (2014), donde menciona que el módulo de elasticidad y la correlación de los coeficientes de Poisson, son aplicados dentro de un rango de tensión que va desde 0% hasta 40% de la resistencia última del hormigón; esto se utiliza para diseñar elementos estructurales reforzados o no reforzados; además establecen la cantidad de refuerzo, así como también las presiones de cada uno de ellos.

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

Ecuación 11.

Donde:

$d\sigma$: tensión en kg/cm²

$d\varepsilon$: deformación longitudinal unitaria (%)

Los valores que se obtienen del módulo de elasticidad son menores a los valores que se obtienen bajo la aplicación de una carga estas en las estructuras pueden ser: sismo, viento, etc.

En relación con el ACI 318-19 (2019): Requisitos y reglamento para concreto estructural se obtiene que el módulo de elasticidad para hormigones normales varía entre 2200 hasta 2400 kg/m³.

3.20. TIPOS DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación empleado es de tipo Experimental. Según Silva, J. (2006) “La investigación experimental, se realiza mediante la manipulación de una o más variables experimentales no comprobadas, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o porque causa se produce una situación o acontecimiento particular”. (p.31). Obteniendo modelos matemáticos y de predicción que nos ayudan a determinar el comportamiento no lineal de la estructura bajos cargar.

3.21. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

El método de investigación utilizado es el Deductivo ya que parte de un razonamiento en general; es decir que se aplicará un método lógico, la cual se trata de observar e interpretar los resultados, hasta llegar a obtener conclusiones a partir de principios. Según Abreu, J. (2014) “El método deductivo permite determinar las características de una realidad particular que se estudia por derivación o resultado de los atributos o enunciados contenidos en proposiciones o leyes científicas de carácter general formuladas con anterioridad. Mediante la deducción se derivan las consecuencias particulares o individuales de las inferencias o conclusiones generales aceptadas”. (p. 17). Determinando un análisis no lineal mediante la utilización de un software para la obtención de resultados.

3.22. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La técnica o instrumento de recolección es la observación. Según Santos, D. (2022) “Es una forma discreta y sencilla de inspeccionar datos sin depender de un

intermediario. Este método se caracteriza por no ser intrusivo y requiere evaluar el comportamiento del objeto de estudio por un tiempo continuo, sin intervenir”. (p.14). Llegando a obtener una adecuada recolección de datos del objeto.

3.23. PROCESO TÉCNICO DE INGENIERÍA CIVIL

3.23.1. ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA NORMA NEC 2000 Y NEC 2015

En este ítem se procederá a extraer información de cada una de las normas para poder realizar el prediseño de la estructura.

3.23.2. RECOPIACIÓN DE DATOS DEL MÉTODO NO LINEAL

En este punto realizará la búsqueda del comportamiento no lineal de las estructuras aplicando las normas NEC 2000 y NEC 2015 para realizar el dimensionamiento de la estructura.

3.23.3. PREDISEÑO DE LA ESTRUCTURA

A partir de la búsqueda de información realizada en el punto anterior se procede con las hojas de cálculo correspondientes para el diseño de la estructura.

3.23.4. ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER)

En este punto se utilizará el método pushover para el comportamiento tenso-deformacional para proceder con la simulación de las cargas en la estructura.

3.23.5. MODELACIÓN EN SOFTWARE DEL COMPORTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

Se procederá a modelar la estructura por medio del uso de un software, con los datos obtenidos en los puntos anteriores.

3.23.6. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

En este punto se procederá a revisar los resultados obtenidos ya sean deformaciones, deflexiones y esfuerzos.

3.23.7.COMPARACIÓN ENTRE LAS NORMAS NEC 2000 Y NEC 2015

Por último, con los resultados obtenidos se procederá a realizar una comparación entre las normas para efectuar cuál de ellas trabaja de mejor manera con respecto a su última actualización.

3.23.8.ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se procederá a analizar la infraestructura con la utilización de un software con un nivel de confianza del 95%; con el cual se procederá a determinar los refuerzos en la estructura.

CAPITULO IV DISEÑO

4.1. DESCRIPCIÓN

Como se mencionó anteriormente para este proyecto se realizó un análisis no lineal tomando en consideración la base de diseño de la normativa NEC-SE-DS-15 Capítulo 6.3 para una edificación con sistema dúctil.

Los estudios que se aplicaran son los siguientes: análisis modal espectral y análisis estático, por medio de la utilización de un software para diseño estructural el cual ayudará a obtener de una manera detallada el rango no lineal en la edificación, teniendo así datos más confiables y seguros para el diseño de dicha edificación.

Para cargas sísmicas y no sísmicas que actúan en la estructura se utilizará lo descrito en el capitulo 3 de la NEC-SE-DS-15.

El análisis que vamos a analizar se establecerá en un prediseño de los elementos estructurales que se utilizará como una base que sobre los elementos que componen la estructura que posteriormente mediante ensayos se obtendrán las secciones óptimas para cumplir con la configuración estructural.

Tabla 5.

Características arquitectónicas estructurales

Características Arquitectónicas Estructurales		
Descripción		
Altura de entrepiso	2,73	m
Altura total	13,65	m
Área de construcción		m2
Uso de la edificación	Residencia	

*Nota. En la tabla se presenta las características arquitectónicas de la Edificación.
Elaborado por: la autora, a través del programa Excel (2022).*

4.2. DETERMINACIÓN DE CARGAS

En este punto se hará énfasis en las cargas vivas (Live Load) y la sobrecarga de uso (PP) peso propio de la estructura, pero para el análisis en el paquete computacional se hará uso del peso de la estructura y de los elementos ya que este software ya cuenta con un estado de carga muerta (Dead Load), por tal motivo se lo encuentra a este prescrito con un 1.

Tabla 6.

Cargas no sísmicas que se aplicarán en el programa

Carga Vertical en losa Planta Baja		Carga (kg/m²)
Descripción		
Sobrecarga de uso	Instalaciones, acabados, mampostería	100
Carga Viva	Parqueadero	550

Carga Vertical en losas de Entrepiso		Carga (kg/m²)
Descripción		
Sobrecarga de uso	Instalaciones, acabados, mampostería	400
Carga Viva	Residencias	200

Carga Vertical en losa de Terraza		Carga (kg/m²)
Descripción		
Sobrecarga de uso	Instalaciones, acabados, mampostería	300
Carga Viva	Terraza	150

Nota. En la tabla se representa las cargas no sísmicas. Elaborado por: la autora con datos de (NEC-DS-SE 2015), a través del programa Excel (2022).

4.3. PROPIEDADES ESTRUCTURALES

Las propiedades de los materiales que serán tomados en consideración en el cálculo de la estructura se procederán a detallar a continuación:

Tabla 7.

Propiedades de los materiales que componen la edificación

Descripción	Elemento	Datos	Unidades
Resistencia por compresión	Losas	280	kg/cm ²
	Columnas	280	kg/cm ²
	Vigas	320	kg/cm ²
	Diafragmas	180	kg/cm ²
Acero	Varillas	4200	kg/cm ²
	Columnas	252671.33	kg/cm ²
Módulo de Elasticidad del Concreto	Losas	270117.01	kg/cm ²
	Vigas	270117.01	kg/cm ²
	Diafragmas	202587.76	kg/cm ²
Peso Específico	Losas	1549.52	kg/m ³
	Vigas	2400	kg/m ³
	Columnas	2400	kg/m ³
	Diafragmas	2400	kg/m ³

Nota. En la tabla se representa los valores de las propiedades de los materiales que se utilizaran en el programa computacional. Elaborado por: la autora con datos de (NEC-DS-SE 2015), a través del programa Excel (2022).

4.4. PREDISEÑO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Para el prediseño de cada uno de los elementos estructurales que compone la edificación se procedió a utilizar el código ACI-318-19, las secciones que se obtuvieron por medio de hojas de cálculo se procederán a detallar en las siguientes tablas.

Tabla 8.*Prediseño de elementos estructurales*

Descripción	Base	Altura	Unidades
Vigas	25	30	cm
Columnas	40	40	cm
Losa	20		cm
Diafragmas	20		cm

Nota. En la tabla se representa los valores del prediseño de cada elemento que se utilizaran en el programa computacional. Elaborado por: la autora con datos de (ACI-318-19), a través del programa Excel (2022).

4.5. Carga Sísmica

Para considerar carga sísmica dentro del programa computacional se procedió a tomar en consideración las especificaciones de la (NEC-DS-SE 2015) en donde:

Tabla 9.*Parámetros geotécnicos y de sitio de la edificación*

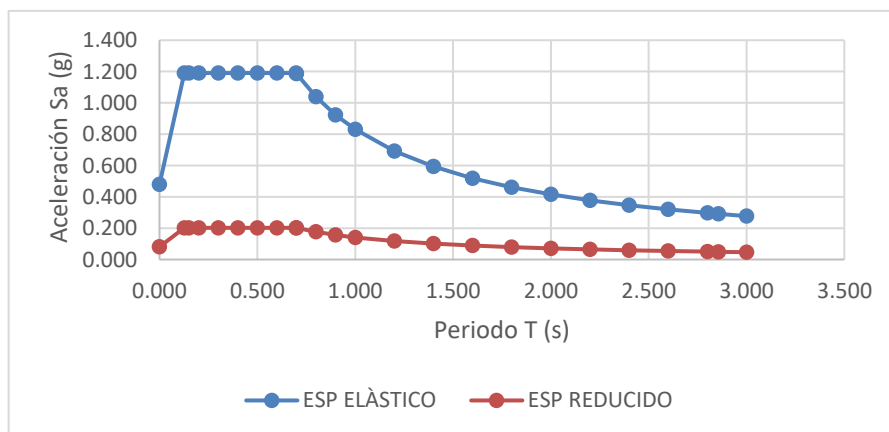
Descripción	Simbología	Datos	NEC-DS-SE-2015
Sitio		Quito	
Tipo de suelo		D	
Factor de zona sísmica	Z	0,40	3.1.1
Valor ETA de ubicación	η	2,48	3.3.1
Coefficiente de amplificación del suelo ordenadas de aceleración	Fa	1,20	3.2. 2.a
Coefficiente de amplificación del suelo ordenadas de desplazamiento en roca	Fd	1,19	3.2.2. b
Comportamiento no lineal del suelo	Fs	1,28	3.2.2.c
Coefficiente de suelo	r	1,00	3.3.1
Factor de importancia otras estructuras	I	1,00	4.1.

Factor de reducción de resistencia sísmica	R	8,00	6.3.4. b
Coefficiente de configuración en planta	ϕ_P	1,00	Tabla 13 5.2.3
Coefficiente de configuración en elevación	ϕ_E	1,00	Tabla 14 5.2.3
Altura total de la estructura	h (m)	13,65	
Factor de dependencia del sistema estructural	Ct	0,055	6.3. 3.a
Alpha	α	0,9	6.3. 3.a
Periodo de la estructura	T	0,578	
Periodo inicial	To	0,1269	
Periodo final	Tc	0,70	
Aceleración elástica	Sa	1,04	
Coefficiente de aceleración reducida	C	0,173	
Factor de distribución de fuerzas	k	1,15	6.35

Nota. En la tabla se representa los valores de los parámetros del suelo y de la edificación que se utilizaran en el programa computacional. Elaborado por: la autora con datos de (NEC-DS-SE 2015), a través del programa Excel (2022).

Figura 20.

Espectro de diseño basado en aceleraciones



Nota. La figura representa el espectro basado en aceleraciones. Elaborado por: la autora con datos de (NEC-DS-SE 2015), a través del programa Excel (2022).

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

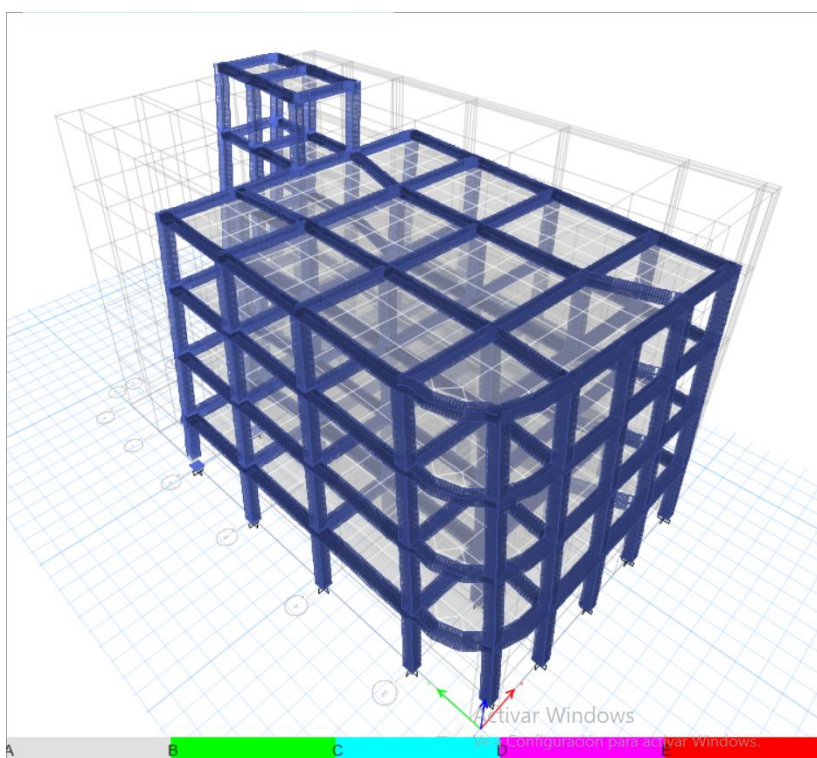
5.1. RESULTADOS DE LA ESTRUCTURA MODELADA

Mediante la utilización de un paquete computacional se realizó la modelación de la estructura de 4 pisos, haciendo uso de la información que descrita en la sección anterior este análisis se efectúa mediante criterios de diseño de la Norma Ecuatoriana de Construcción NEC-DS-SE-15.

La cual permitirá realizar verificaciones a partir de parámetros de diseño, de tal manera que las estructuras se diseñen de manera óptima y seguras.

Figura 21.

Modelo de la edificación utilizando el paquete computacional



Nota. La figura representa la modelación de la estructura a diseñarse. Elaborado por: la autora, a través del programa computacional.

5.2. PERIODOS DE VIBRACIÓN

Para verificar el periodo de vibración (T), es necesario comprobar dicho periodo que se obtiene en el método 2 de análisis lineal, como se presentará en la siguiente tabla a continuación; dicho valor no deberá superar el 30% del valor obtenido de T_a la cual se estimará con la siguiente fórmula

$$T = C_t * h_n^\alpha$$

Ecuación 12.

Donde:

C_t : coeficiente que depende del tipo de edificio

h_n : altura de la edificación en (m)

Tabla 10.*Periodo de vibración de la edificación*

Modo	Periodo (seg)
1	0,384
2	0,383
3	0,323
4	0,126
5	0,126
6	0,108
7	0,079
8	0,074
9	0,066
10	0,064
11	0,063
12	0,051

Elaborado por: la autora, a través del programa Excel (2022).

5.3. ANÁLISIS DE PARTICIPACIÓN MODAL

Para proceder a verificar la participación de la masa modal es importante considerar el capítulo 6 de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-DS-SE-15) sección 6.2.2., la cual indica que el porcentaje de la masa participativa acumulada es del 90% en sentido X y sentido Y.

Tabla 11.*Periodos fundamentales de vibración de la edificación*

Caso	Modo	Periodo (s)	SumUX	SumUY	SumRX	SumRY	SumRZ
Modal	1	0,384	0,3537	0,4618	0,1105	0,0931	0,0109
Modal	2	0,383	0,7624	0,8207	0,1992	0,21	0,0678
Modal	3	0,323	0,8286	0,8278	0,1999	0,2103	0,8195
Modal	4	0,126	0,8892	0,878	0,4813	0,5496	0,8248
Modal	5	0,126	0,93	0,942	0,8448	0,7803	0,8358
Modal	6	0,108	0,9487	0,9431	0,8504	0,8626	0,9317
Modal	7	0,079	0,9493	0,9687	0,8964	0,8636	0,937
Modal	8	0,074	0,9713	0,9691	0,897	0,9053	0,9507
Modal	9	0,066	0,9883	0,9691	0,897	0,9517	0,9693
Modal	10	0,064	0,9883	0,9916	0,9663	0,9517	0,9695
Modal	11	0,063	0,9896	0,9916	0,9663	0,9567	0,9704
Modal	12	0,051	0,9941	0,9917	0,9665	0,976	0,9891

Elaborado por: la autora, a través del programa Excel (2022).

Como se observa en el modelo diseñado utilizando el paquete computacional se verifica que la masa modal llega al 90% en su quinto modo de vibración tanto en dirección X como en Y.

Tabla 12.*Verificación del periodo natural de la estructura*

Descripción	Dato	Verificación
Ta1 (método 1)	0,578	
Ta2 (método 2)	0,384	
1.3*Ta1	0,751	
Condición	$Ta2 \leq (1.3*Ta1)$	
	0,384 ≤ 0,751	CUMPLE

*Elaborado por: la autora, a través del programa Excel (2022).***5.4. VERIFICACIÓN POR TORSIÓN DE LA ESTRUCTURA**

Para proceder a verificar si existe torsión en la estructura se procederá aplicar la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Torsión} = \frac{RZ}{\max(Ux; Uy)} * 100$$

Ecuación 13.

$$\% \text{ Torsión} \leq 30\% \text{ "Traslacional"}$$

Tabla 13.*Verificación por torsión de la estructura*

Modo	Ux	Uy	Rz	%	Verificación
1	0,3537	0,4618	0,0109	2,36	Traslacional
2	0,4088	0,3589	0,0569	13,91	Traslacional
3	0,7517	0,0071	0,0661	8,80	Traslacional

Elaborado por: la autora, a través del programa Excel (2022).

La tabla anterior presenta un comportamiento traslacional en sus tres modos de vibración, por lo que se determina que no existirá problemas de torsión en la edificación de diseño.

5.5. VERIFICACIÓN POR ANÁLISIS DINÁMICO

En este análisis se procederá a realizar una verificación del cortante dinámico, tomando como referencia la Normativa Ecuatoriana de la Construcción NEC-DS-SE-15 sección 6.2.2 donde indica que el cortante dinámico que se aplica en la base de la estructura no deberá superar el 85% para estructuras irregulares; el cual es el caso de estudio.

En el caso de que no se llegue a dicho porcentaje se procederá hacer uso de la fórmula para el reajuste de este, siendo una alternativa para que no falle la edificación.

Tabla 14.

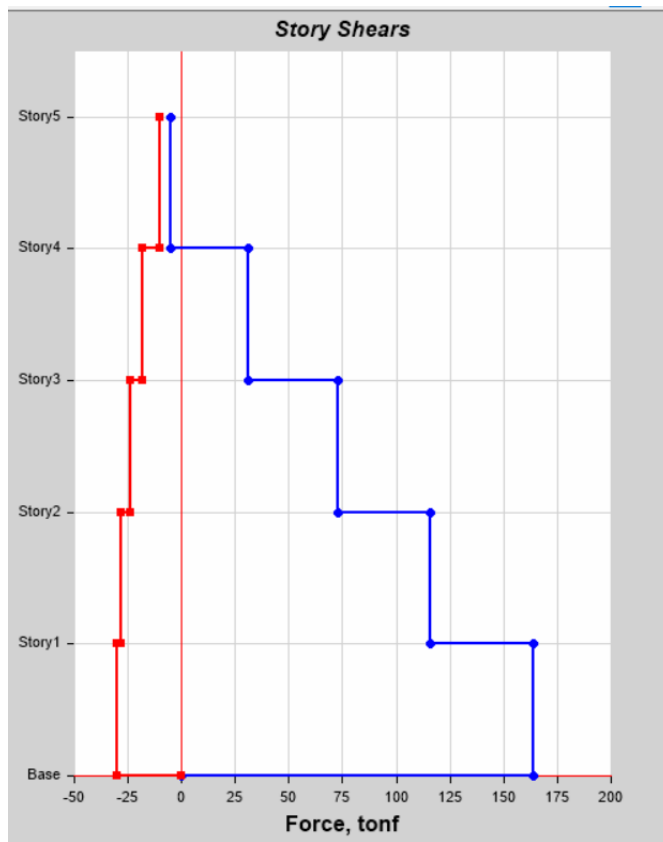
Verificación del análisis dinámico

Descripción	V Estático (ton)	V Dinámico (ton)	%	Verificación
Estructura	332,88	163,97	49,25	Cumple

Elaborado por: la autora, a través del programa Excel (2022).

Figura 22.

Diseño de cortante para la verificación del análisis dinámico



Nota. La figura representa el diseño de cortante para un análisis dinámico.

Elaborado por: la autora, a través del programa computacional.

En el siguiente gráfico se observa el diseño de cortante aplicando un análisis pushover, el mismo que sirvió para realizar la verificación anterior donde el cortante dinámico máximo es de 163,97 ton.

5.6. DERIVAS DE PISO

Para este análisis se hará uso de la Normativa Ecuatoriana de la Construcción NEC-DS-SE-15 en la sección 4.2.2. la cual especifica que para control de derivas en cada piso su valor máximo no deberá sobrepasar el 0,02 de la probabilidad de excedencia.

Tabla 15.*Derivas de piso por pushover en X*

Pisos	Elevación (m)	Location	Dirección X	Dirección Y
Piso 4	13,65	Top	0,000079	0,000411
Piso 3	10,92	Top	0,000485	0,000267
Piso 2	8,19	Top	0,000916	0,00032
Piso 1	5,46	Top	0,001234	0,000321
Base	0	Top	0	0

Elaborado por: la autora, a través del programa Excel (2022).

Con estos resultados se procede a realizar la verificación de derivas inelásticas utilizando la ecuación que se encuentra en la NEC 15, sección que ya lo se explicó anteriormente.

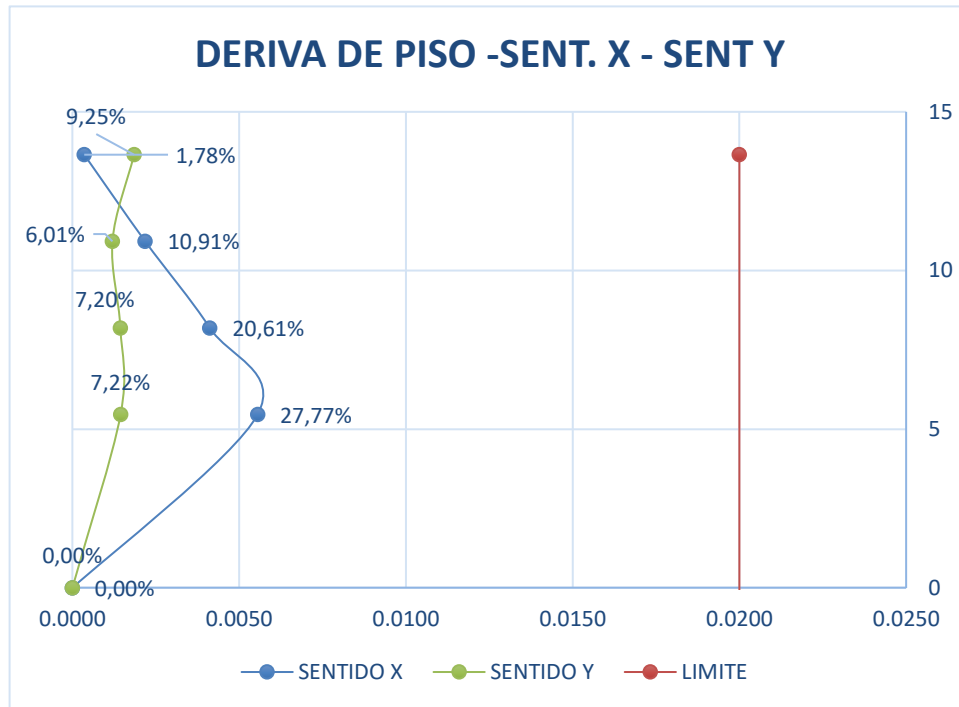
Tabla 16.*Verificación de derivas de piso por análisis pushover en X*

Pisos	ΔE en X	$\Delta Inelástico$	Verificación	ΔE en Y	$\Delta Inelástico$	Verificación
4	0,000079	0,0004	Cumple	0,000411	0,0018	Cumple
3	0,000485	0,0022	Cumple	0,000267	0,0012	Cumple
2	0,000916	0,0041	Cumple	0,00032	0,0014	Cumple
1	0,001234	0,0056	Cumple	0,000321	0,0014	Cumple
Base	0	0	0	0	0	0

Elaborado por: la autora, a través del programa Excel (2022).

Figura 23.

Verificación derivas de piso análisis pushover en dirección X



Nota. La figura representa la verificación de las derivas de piso para un análisis pushover en dirección X. Elaborado por: la autora, a través del programa Excel (2022).

Por otro lado, se realiza la verificación de la misma manera con los datos obtenidos del programa computacional para un análisis pushover en dirección Y para comprobar que cumplimos por los dos casos.

Tabla 17.

Derivas de piso por pushover en Y

Pisos	Elevación (m)	Location	Dirección X	Dirección Y
Piso 4	13,65	Top	0,000580	0,000082
Piso 3	10,92	Top	0,000508	0,000586
Piso 2	8,19	Top	0,000572	0,001044
Piso 1	5,46	Top	0,000569	0,001389
Base	0	Top	0	0

Elaborado por: la autora, a través del programa Excel (2022).

Tabla 18.

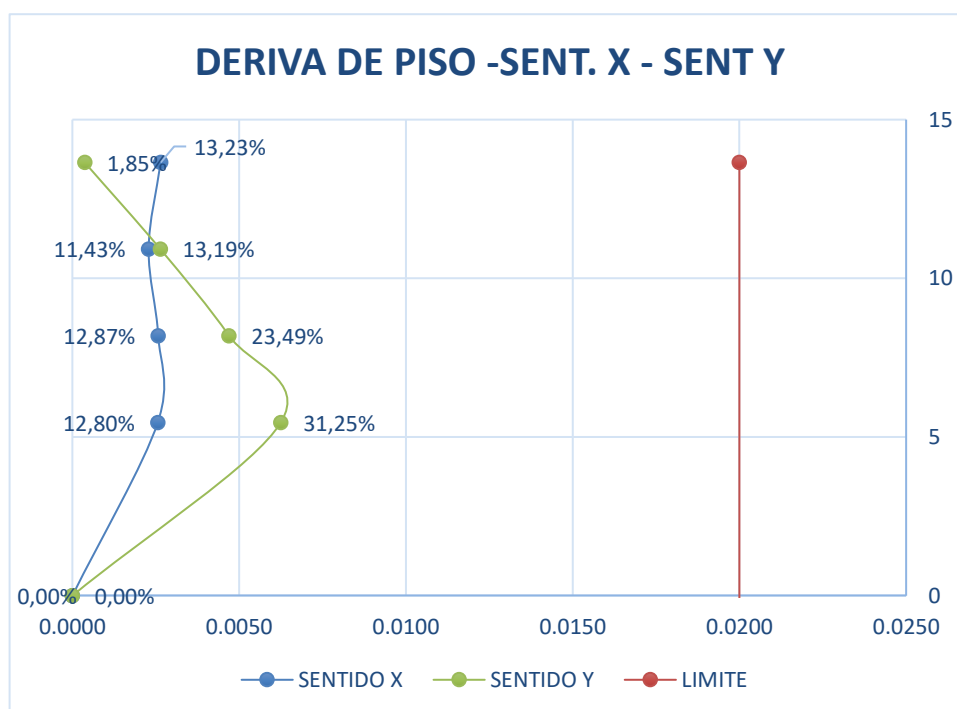
Verificación de derivas de piso por análisis pushover en Y

Pisos	ΔE en X	$\Delta Inelástico$	Verificación	ΔE en Y	$\Delta Inelástico$	Verificación
4	0,000580	0,0026	Cumple	0,000082	0,0004	Cumple
3	0,000508	0,0023	Cumple	0,000586	0,0026	Cumple
2	0,000572	0,0026	Cumple	0,001044	0,0047	Cumple
1	0,000569	0,0026	Cumple	0,001389	0,0063	Cumple
Base	0	0	0	0	0	0

Elaborado por: la autora, a través del programa Excel (2022).

Figura 24.

Verificación derivas de piso análisis pushover en dirección Y



Nota. La figura representa la verificación de las derivas de piso para un análisis pushover en dirección Y. Elaborado por: la autora, a través del programa Excel (2022).

Aplicando el mismo método anterior para determinar las derivas inelásticas se

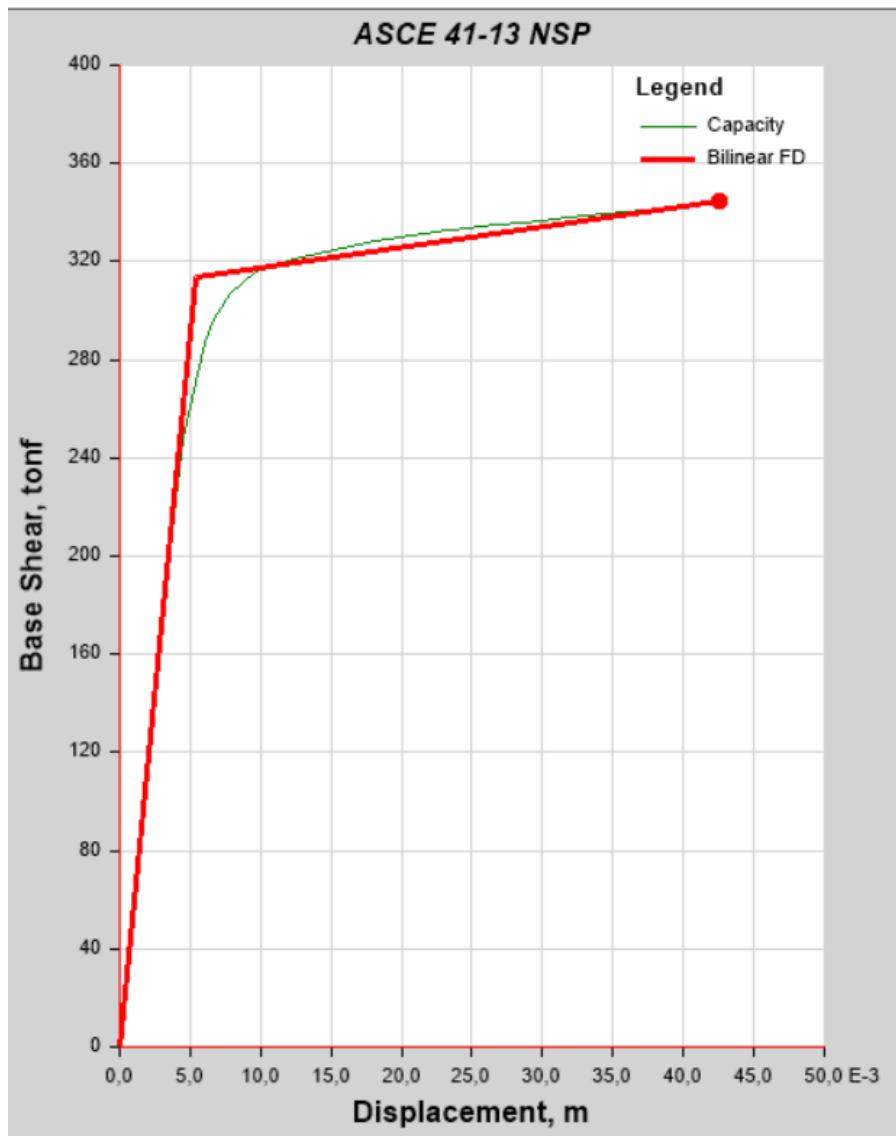
observa que con un análisis Pushover en el sentido Y también cumple con las derivas máximas permisibles.

5.7. ANÁLISIS NO LINEAL PUSHOVER

A partir del estudio de este método, mediante la aplicación de la normativa ASCE 41-13 permitió realizar la curva de demanda - capacidad y los puntos de falla que se produce en la estructura, la creación de las rotulas plásticas y los desplazamientos de los mismos.

Figura 25.

Curva demanda capacidad



Nota. La figura representa la curva de capacidad. Elaborado por: la autora, a través del programa computacional.

En el siguiente gráfico se observa que para una estructura de 4 pisos el valor de Pushover obtenido para un sismo raro es:

Tabla 19.

Datos de análisis pushover

Descripción	Valor	Unidades
Cortante	344,60	ton
Desplazamiento	4,50	m

Elaborado por: la autora, a través del programa Excel (2022).

Con los datos de esta tabla determinar que para un valor de cortante de 344 ton se tendrá un desplazamiento de 4,50 cm donde llegarán a fallar las rotulas plásticas también, tanto en columnas como en vigas.

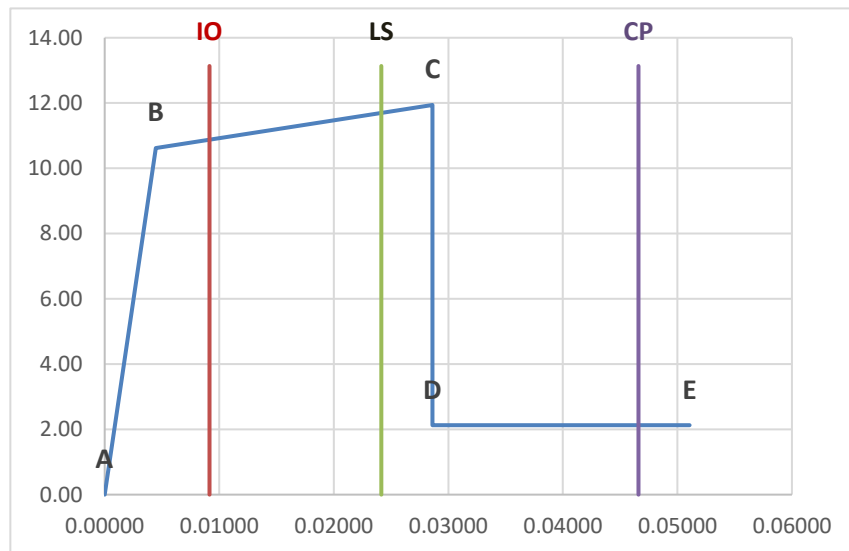
5.8. ROTULAS PLÁSTICAS

En este modelo las rotulas plásticas se asignaron en cada elemento con la finalidad de que resistan cargas laterales. Tomando en consideración la Normativa FEMA 356 donde indica que se deberán ubicar a un 5% y a un 95% para resistir la fluencia de los elementos estructurales que conforman la edificación.

Para verificar las mismas se realizó un gráfico de momento vs rotación para poder identificar de una manera más correcta las rotaciones que provoca la estructura.

Figura 26.

Rotulas plásticas en vigas

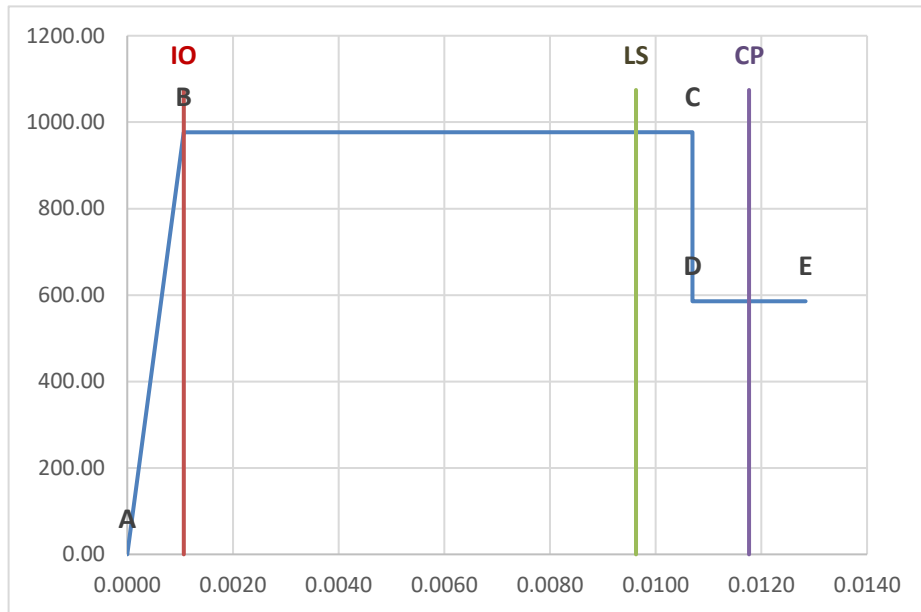


Nota. La figura representa la verificación de las rotulas plásticas para un análisis pushover en elementos estructurales vigas. Elaborado por: la autora, a través del programa Excel (2022).

Como se indica en la figura las rotulas plásticas para una viga se encuentran dentro de los límites de seguridad que indica la normativa FEMA 356.

Figura 27.

Rotulas plásticas en columnas



Nota. La figura representa la verificación de las rotulas plásticas para un análisis pushover en elementos estructurales columnas. Elaborado por: la autora, a través del programa Excel (2022).

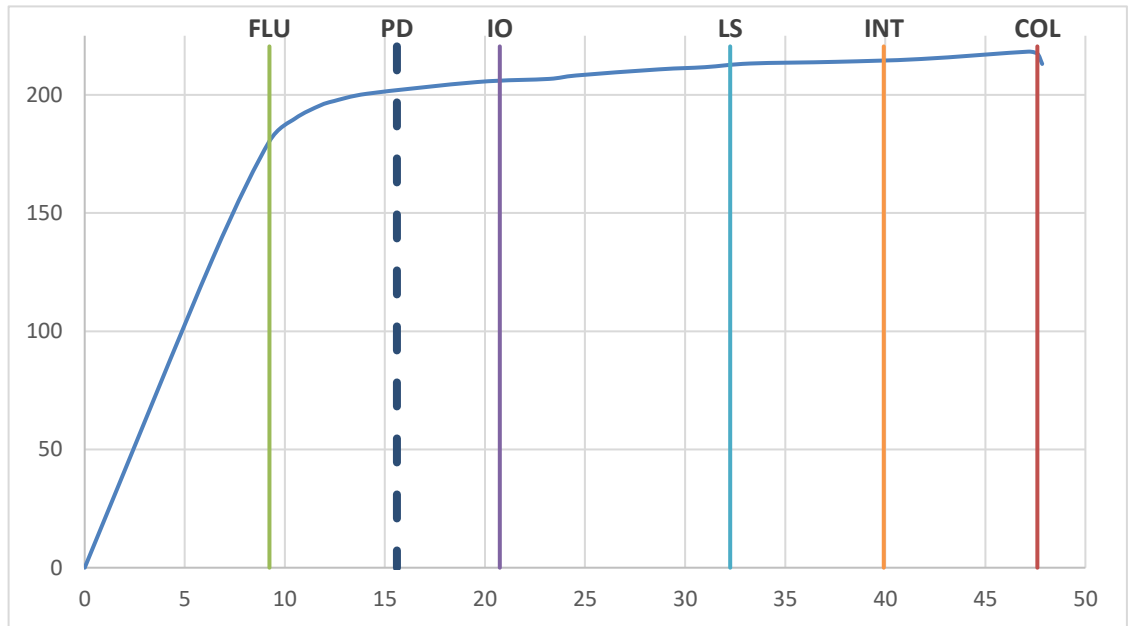
Como se indica en la figura las rotulas plásticas para una columna se encuentran dentro de los límites de seguridad que indica la normativa FEMA 356.

5.9. CURVA DE DESEMPEÑO

Por medio de esta curva de diseño se pueden obtener datos que ayudarán a identificar el criterio de aceptación de una estructura la cual se encuentra separada por sectores dependiendo el desplazamiento último de la curva; este criterio se enfoca más en los daños que son ocasionados en los elementos estructurales durante la intervención de un sismo.

Figura 28.

Curva de desempeño



Nota. La figura representa la curva de desempeño para un análisis pushover en la estructura. Elaborado por: la autora, a través del programa Excel (2022).

Utilizando esta gráfica se define el criterio de aceptación que indica en la norma AISC la cual divide la curva de capacidad por sectores estratégicos donde indica en que parte fallará mi estructura de diseño.

Interpretando estos resultados se observa que la estructura va a colapsar con una fuerza de 213,08 ton y un desplazamiento de 47,84 cm.

CONCLUSIONES

Se concluye que, en análisis lineal de la edificación, la estructura cumple con las verificaciones establecidas en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-DS-SE-15, donde el periodo de vibración es de 0,384 seg. siendo este menor que el 30% obtenido con el método 1.

En la verificación por torsión la estructura actúa de manera traslacional en los tres primeros modos de vibración fundamental, siendo este menor al 30% de la masa rotacional permitida por la normativa.

En la participación modal es importante mencionar que la estructura cumple con la acumulación de la masa modal en el quinto modo de vibración tanto en el sentido X como en el sentido Y.

Por otro lado, las derivas inelásticas son menores a lo permitido por la normativa (0,02) en los 4 pisos tanto en dirección X como en dirección Y.

La estructura de diseño corresponde a una tipología IV, ya que comprende a una edificación de 4 pisos con entrepisos de hormigón.

El método Pushover es un análisis riguroso ya que al realizar prediseños en vigas y columnas a través de un paquete computacional es esencial tomar en cuenta la colocación de aceros, de tal manera que se llegue a cumplir con las cuantías de diseño permitidas por la norma NEC-DS-SE-15.

En la Norma Ecuatoriana de la Construcción no se considera un diseño estructural considerando un empuje incremental, por lo que esto dificulta la realización de un diseño sismo resistente más completo. Debido a esto, se investigaron normas y artículos extranjeros para comprender como actúa este análisis dentro de una edificación.

Para este análisis es necesario tomar en cuenta los criterios de desempeño en los que se va a presentar la edificación ya que esto permitirá obtener de una manera aproximada el tiempo que tiene la estructura para deformarse antes de colapsar.

RECOMENDACIONES

Este análisis es recomendable para estructuras esenciales que se encuentren en zonas sísmicas altas, de tal modo que al realizar su diseño se mantengan en funcionalidad y operatividad ya que son de gran importancia.

Es recomendable que antes de iniciar este análisis se realice un buen prediseño de cada elemento estructural incluyendo aceros, ya que al ingresar los datos en el programa éste podrá ser erróneo y no se obtendrán los datos esperados.

Para este análisis es importante realizar un diseño de columna fuerte - viga débil ya que de esta forma se podrá resistir una mayor carga sísmica en los nodos y así disminuir los desplazamientos en los entrepisos de la edificación.

Es importante que antes de realizar un análisis por dicho método se obtenga una filosofía de diseño sísmico del lugar donde se va a ubicar la estructura, ya que de esta manera se podrá obtener una historia de los sismos que han ocurrido durante un periodo de tiempo para llegar a determinar datos más cercanos a la realidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, J. (2014). El Método de la investigación.
- ACI318-19. (2019). *Requisitos y Reglamento para Concreto Estructural (ACI318-19)*. Farmington Hills, USA: IHS
- Anrango, S., Paz, A., Duque, M. (2009). Propuesta metodológica para la evaluación del desempeño estructural de una estantería metálica. *Revista EIA*. Esc. Ing. Antioq no 12.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372009000200011
- ASCE 41-13. (2014). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. Estados Unidos de América (ASCE 41-13)*.
<https://pubs.asce.org/Product?isbn=970784414859>
- ASTM C469. (2014). *Determinación del módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson del concreto en compresión*.
https://www.academia.edu/35223661/ASTM_Designaci%C3%B3n_C_469_94_M%C3%A9todo_Est%C3%A1ndar_de_Ensayo_para_M%C3%93DULO_DE_ELASTICIDAD_EST%C3%81TICO_Y_RELACI%C3%93N_DE_POISSON_DEL_CONCRETO_EN_COMPRESI%C3%93N
- ATC 40. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Vol I y II. California Seismic Safety Comisión. Redwood city, California*.
<https://www.atcouncil.org/pdfs/atc40toc.pdf>
- Bonilla, C., Chavarria, M., Diaz, J. (2017). *Análisis Estático No Lineal (PUSHOVER) del cuerpo central del Edificio de la Facultad de Medicina de la Universidad de el Salvador*. [Tesis doctoral, Universidad de el Salvador]. Archivo Digital.
<https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/13405>
- Cagua, B. & Nates, D. (2017). *Influencia del potencial hidrógeno (pH) y la concentración de nitratos presentes en el agua de mezclado sobre el comportamiento físico-mecánico del hormigón: Estudio en laboratorio*. [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional], Repositorio Digital EPN.
<http://bidigital.epn.edu.ec/handle/1500/17062>.

- Cánoves Valiente, J. (2012). *Evolución de la resistencia del hormigón de obra. Métodos de predicción a partir de los ensayos de control de conformidad del hormigón*. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia], Repositorio Digital UPV. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/30171/tesisUPV4023.pdf?sequence=1>
- Celi. C., Pantoja. J., Sosa. D., Ayala. C., (2018). *Vulnerabilidad Sísmica de Quito Ecuador, Fase I: Curvas de capacidad de las tipologías estructurales, Proyecto GEM – SARA*. <https://www.revistapuce.edu.ec/index.php/revpuce/article/view/130>
- Galindo Reascos, K. A. (2022). *Análisis comparativo y correlación de los ensayos: esclerómetro, ultrasonido y extracción de núcleos, para determinar la resistencia a compresión y módulo de elasticidad del hormigón endurecido* (Bachelor's thesis, Quito: EPN, 2022). [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional], Repositorio Digital EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22547>
- Duarte. C., Martínez. M., Santamaria. J., (2017). *Análisis estático no lineal (PUSHOVER) del cuerpo central del edificio de la Facultad de Medicina de la Universidad de el Salvador*. [Tesis de grado, Universidad de el Salvador], Archivo digital. <https://ri.ues.edu.sv/13405/>
- FEMA. (1997). *NEHRP GUIDELINES FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS, FEMA 273*. Washington. <https://www.fema.gov/es/disaster/1997>
- FEMA 356. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Washington, DC, FEMA 356. <https://www.nehrp.gov/pdf/fema356.pdf>
- Fernández, J., Subía, M. (2014) *Análisis no lineal estático: Evaluación del desempeño de una estructura de hormigón y una de acero diseñada usando los códigos ASCE 7-10 y una NEC 11 mediante el código ASCE 41-06*. [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador], Repositorio digital PUCE. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/11188>
- Luna, G. (2014) *Estudio del hormigón: guía didáctica para el diseño de mezclas*.

- Edicumbre*. https://bibliotecas.educacion.gob.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=42252&shelfbrowse_itemnumber=50151
- Marí, A. (2015). Comportamiento y análisis no lineal de estructuras: estructuras de hormigón armado. ACE. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6358624>
- Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 2000). (2008). *Capítulo NEC-SE-HM (Cargas sísmicas: Diseño Sismorresistente)*
- Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 2015). (2014). *Capítulo NEC-SE-HM (Cargas sísmicas: Diseño Sismorresistente)*
- Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 2015). (2014). *Capítulo NEC-SE-HM (Peligro sísmico: Parte 2)*
- NTE INEN 1 573:2010 *Primera Revisión determina la evolución de la resistencia del hormigón a los 7, 14, 28 días a través de ensayos a compresión simple de los distintos cilindros de hormigón.*
- NTE INEN 3124:2017-03 *Hormigón. Elaboración y curado de especímenes de ensayo en el laboratorio.*
- Osorio, Jesús D. (2020). *Resistencia mecánica del concreto y resistencia a la compresión. 360 EN CONCRETO*. <http://360enconcreto.com/resistencia-mecanica-del-concreto-y-compresion/>
- Pinzón, E. (2015). *Análisis no lineal de edificaciones: Conceptos básicos e implementaciones*. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/7541>
- Sánchez Núñez, B. (2019). *Caracterización de la curva esfuerzo-deformación de prismas de mampostería con bloques de concreto de 120 mm y 150 mm de espesor bajo carga axial concéntrica*. [Tesis de grado, Universidad de Costa Rica]. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/xmlui/handle/123456789/9076>
- Santos, D. (2022). *Recolección de datos: métodos, técnicas e instrumentos*. <https://blog.hubspot.es/marketing/recoleccion-de-datos>
- Silva, J. (2006). *Metodología de la investigación: elementos básicos*. Madrid (España): Ediciones Cobo. https://www.ucm.es/metodologia-investigacion-etica-aplicada/file/guia-para-desarrollo-de-tfgm_issn-2

- Soto, M. & Marín, J.P. (2019). *Análisis del concreto con caucho como aditivo para aligerar elementos estructurales*. [Tesis de pregrado, Universidad Libre Seccional], Repositorio Digital Universidad Libre Seccional. <https://bit.ly/3u1tgJ4>
- Taranath, B. S. (2010). *Reinforced Concrete Design of Tall Buildings*. CRC Press. <https://civilengineering.files.wordpress.com/2014/10/reinforced-concrete-design-of-tall-building.pdf>
- Ulloa Jácome, V. X. (2013). *Módulo estático de elasticidad del hormigón en base a su resistencia a la compresión $f'c=21$ MPa, fabricado con materiales de la mina Villacrés ubicada en el sector de la península, cantón Ambato en la provincia de Tungurahua y cemento Holcim*. [Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador], Repositorio Digital UCE. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/2219>
- Vasconez Valencia, J. D. (2012). *Análisis del método “Modal Push – Over” y su incidencia el cálculo de pórticos de Hormigón Armado en el Cantón de Ambato*. [Trabajo estructurado de manera dependiente, Universidad Técnica de Ambato], Repositorio Digital UTA. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/2101>

GLOSARIO DE TÉRMINOS:

Análisis: proceso de cálculo, determinación de fuerzas, cargas que actúan en una estructura.

Dinámica: describe los cambios que produce un sistema en función del movimiento que provoca el mismo.

Resistencia: capacidad del material que se opone a las fuerzas de compresión que se les aplica sin presentar deformaciones o llegar a la rotura.

Compresión: aplicación de esfuerzos en la misma dirección provocando la disminución del volumen en la parte central y la reducción de la longitud.

Hormigón: material compuesto de arena, grava, cemento y agua utilizado para la construcción.