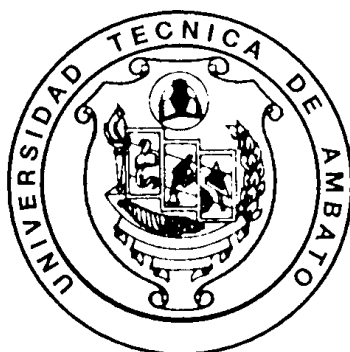


UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

UNIDAD ACADÉMICA DE TITULACIÓN

MAESTRÍA EN ESTRUCTURAS SISMO RESISTENTES

Resolución del Problema Profesional

SISMO RESISTENCIA EN EDIFICIOS DE HORMIGÓN Y ACERO PARA
ZONAS DE ALTA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN EL ECUADOR

Previo a la obtención del Grado Académico de Magister en
Estructuras Sismo-Resistentes a través del Examen Complexivo

Autor: Ing. Patricio Marcelo Vasco López

Ambato - Ecuador

2016

La Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica

El Tribunal receptor del Problema Profesional integrado por el Ing. Segundo Francisco Pazmiño Gavilanes, Mg. Presidente y Miembro del Tribunal y Grado Académico así como el Ing. Byron Genaro Cañizares Proaño, Mg. y la Ing. Maritza Elizabeth Ureña Aguirre, M.Sc. Miembros del Tribunal y Grado Académico designados por la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica en la Maestría en Estructuras Sismo Resistentes, de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor la Resolución al Problema Profesional con el tema **“Sismo Resistencia en Edificios de Hormigón y Acero para zona de Alta Peligrosidad Sísmica en el Ecuador”**; elaborado y presentando por el Ing. Patricio Marcelo Vasco López, para optar por el Grado Académico de Magister en Estructuras Sismo Resistentes a través del Examen Complexivo; una vez escuchada la defensa oral el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en la bibliotecas de la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Segundo Francisco Pazmiño Gavilanes, Mg.
Presidente y Miembro del Tribunal

Ing. Byron Genaro Cañizares Proaño, Mg.
Miembro del Tribunal

Ing. Maritza Elizabeth Ureña Aguirre, Msc.
Miembro del Tribunal

AUTORÍA DEL PROBLEMA PROFESIONAL

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en la Resolución del Problema Profesional presentado bajo el tema: “**SISMO RESISTENCIA EN EDIFICIOS DE HORMIGÓN Y ACERO PARA ZONA DE ALTA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN EL ECUADOR**”; previo la obtención del Título de Magister en Estructuras Sismo-Resistentes corresponde exclusivamente a Patricio Marcelo Vaso López autor del presente trabajo.

Ing. Patricio Marcelo Vaso López
AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que la Resolución del Problema Profesional presentado bajo el tema: “**SISMO RESISTENCIA EN EDIFICIOS DE HORMIGÓN Y ACERO PARA ZONA DE ALTA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN EL ECUADOR**”; sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de Investigación según las normas de la institución.

Cedo los derechos del presente trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.

Ing. Patricio Marcelo Vasco López
C.C. 1802865202

Para mi querida y amada esposa Claudia Magdalena Molina Silva quien me enseñó que hay batallas que solo se ganan orando.

Patricio M. Vasco L.

RESUMEN

Las lecciones dejadas por los terremotos y la tecnología en el área de la ingeniería sísmo resistente, colocan de manifiesto la vulnerabilidad sísmica de muchas edificaciones, aún cuando éstas hayan sido diseñadas cumpliendo las normas vigentes, se puede concluir que es relativamente poco lo que se sabe en profundidad del éxito del diseño y la construcción sísmo resistente, esto lo ratifican varios edificios colapsados. Por esta razón la investigación tiene como principal objetivo estudiar la Sismo Resistencia de los Edificios de Hormigón y Acero mediante el diseño sísmo resistente y el análisis del comportamiento estructural en el rango no lineal de dos edificios uno en Estructura de Acero y otro en Estructura de Hormigón.

En el CAPÍTULO 1 se plantea el problema, que está ligado a la realidad del Ecuador, la Aplicabilidad de la Norma Ecuatoriana de la Construcción a zonas de alta peligrosidad sísmica.

En el CAPÍTULO 2 se incluye información que fundamenta el tema, basadas en investigaciones previas y que han servido de referencia para este y otros trabajos similares, además de los fundamentos legales y las definiciones que clarifiquen los conceptos que se manejan en la investigación propuesta.

En el CAPÍTULO 3 se hace referencia a los procedimientos que se seguirán para iniciar la investigación, tales como el enfoque, la modalidad básica, el nivel y tipo de investigación que se utiliza.

En el CAPÍTULO 4 se describe la investigación realizada se incluyen los conceptos de algunos estudios realizados anteriormente y se presentan los resultados de los análisis realizados además de las comparaciones del comportamiento sísmo resistente de los edificios de Acero y Hormigón.

En el CAPÍTULO 5 se establecen las conclusiones de los resultados obtenidos en la investigación.

SUMMARY

The lessons left by the earthquakes and technology in the area of earthquake resistant engineering, placed demonstrate the seismic vulnerability of many buildings, even if they have been designed in compliance with current standards, it can be concluded that relatively little is known in depth of successful design and earthquake-resistant construction, this is ratified several collapsed buildings. For this reason this research has as main objective to study the Resistance Earthquake Concrete and Steel buildings by the earthquake resistant design and analysis of structural behavior in the non linear range of two buildings in Steel Structure and one in Concrete Structure.

CHAPTER 1 the problem, which is linked to the reality of Ecuador, arises, the applicability of the Ecuadorian Standard Construction to high seismic hazard zones.

CHAPTER 2 the information underlying the subject based on previous research and has served as a reference for this and other similar work, in addition to the legal basis and definitions to clarify the concepts used in the proposed research is included.

CHAPTER 3 references to the procedures to be followed to initiate research, such as focus, the basic mode, the level and type of research is used.

CHAPTER 4 the investigation concepts of some previous studies and the results of analyzes in addition to behavioral comparisons earthquake resistant buildings Steel and Concrete made are presented include described.

CHAPTER 5.the conclusions of the results of the investigation are set out.

CONTENIDO

TRIBUNAL DE GRADO.....	ii
AUTORÍA.....	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
DEDICATORIA.....	v
RESUMEN.....	vi
SUMARY.....	vii
CONTENIDO.....	viii

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1.- SISMO RESISTENCIA EN EDIFICIOS DE HORMIGÓN Y ACERO PARA ZONAS DE ALTA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN EL ECUADOR.....	1
1.2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2.1.- Contextualización.....	1
1.2.2.- Analisis Crítico.....	3
1.2.3.- Prognosis.....	3
1.2.4.- Formulación del Problema.....	4
1.2.5.- Preguntas Directrices.....	4
1.2.6.- Delimitación de la Investigación.....	5
1.3.- JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
1.4.- OBJETIVOS.....	6
1.4.1.- Objetivo General.....	6
1.4.2.- Objetivo Específicos.....	6
CAPÍTULO II.....	7
MARCO TEÓRICO.....	7
2.1.- ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	7
2.2.- FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	9
2.2.1.- Objetivos de diseño sísmico.....	11

2.2.2.- Respuesta de los edificios a la acción sísmica	13
2.2.3.- Comportamiento frágil y comportamiento dúctil.....	14
2.2.4.- El hormigón estructural y la ductilidad	14
2.2.5.- El acero estructural y la ductilidad	14
2.2.6.- Características de la acción sísmica	15
2.2.7.- Diseño Elástico.....	16
2.2.8.- Diseño Plástico.....	16
2.2.9.- Diseño Sismo Resistente	16
2.2.10.- Estructura Sismo Resistente	17
2.3.- PRINCIPIOS DE SISMO RESISTENCIA EN ESTRUCTURAS	18
2.3.1.- Estructura	18
2.3.2.- Forma regular	18
2.3.3.- Bajo peso	18
2.3.4.- Mayor rigidez	19
2.3.5.- Buena estabilidad	19
2.3.6.- Suelo firme y buena cimentación	19
2.3.7.- Estructura apropiada.....	19
2.3.8.- Materiales competentes	20
2.3.9.- Calidad en la construcción	20
2.3.10.- Implantación de la construcción:.....	20
2.4.- FUNDAMENTACION FILOSÓFICA	21
2.5.- FUNDAMENTACION LEGAL	22
2.6.- CATEGORIAS FUNDAMENTALES	22
2.7.- HIPÓTESIS	23
2.8.- SEÑALAMIENTO DE LAS VARIABLES	23
2.8.1.- Variable Independiente	23
2.8.2.- Variable Dependiente.....	23
CAPÍTULO III	24
METODOLOGÍA.....	24
3.1.- ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	24
3.2.- MODALIDAD BASICA DE LA INVESTIGACIÓN.....	24
3.3.- TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	25
3.4.- POBLACIÓN Y MUESTRA.....	25
3.4.1.- Población.....	25
3.4.2.- Muestra.....	26
3.4.- OPERACIONALIZACION DE VARIABLES	26
3.4.1.- Variable Dependiente.....	26
3.4.2.- Variable Independiente	27
3.5.- PLAN DE RECOLECCION DE INFORMACIÓN	28
3.6.- PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS.....	28

CAPÍTULO IV	29
COMPORTAMIENTO SISMO RESISTENTE DE EDIFICIOS DE HORMIGÓN Y ACERO PARA ZONAS DE ALTA PELIGROSIDAD SÍSMICA APLICANDO LA NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN.....	29
4.1.- ANTECEDENTES	29
4.2.- ESTRUCTURAS SISMO RESISTENTES	31
4.2.1.- Sistemas Estructurales Convencionales	32
4.3.- DISEÑO SÍSMICO	36
4.3.1.- Análisis Sísmico Estático Lineal.....	37
4.3.2.- Análisis Sísmico Dinámico Lineal.....	37
4.3.3.- Análisis Sísmico Estático No Lineal.....	38
4.3.4.- Análisis Sísmico Dinámico No Lineal.....	39
4.3.4.- Análisis Sísmico Basado en Desplazamiento.....	39
4.3.5.- Diseño Sísmico Basado en Espectros de Energía	40
4.3.6.- Diseño Sísmico Basado en el Comportamiento	41
4.4.- DISEÑO SÍSMICO POR COMPORTAMIENTO	42
4.4.1.- Vulnerabilidad Sísmica	42
4.4.2.- Peligrosidad Sísmica	42
4.4.3.- Ductilidad Estructural	43
4.4.4.- Propósitos del Diseño Sísmico por Comportamiento	44
4.4.5.- Recomendaciones del Comité Visión 2000	45
4.4.6.- Comportamiento esperado.....	46
4.5.- COMPORTAMIENTO SISMO RESISTENTE DE EDIFICIOS DE HORMIGÓN Y ACERO.....	49
4.5.1.- Diseño Conceptual y Objetivos de desempeño	50
4.5.2.- Analisis Diseño y Comportamiento Estructural.....	51
4.5.3.- Control de calidad de ejecución y mantenimiento de la Estructura	51
CAPÍTULO V	76
CONCLUSIONES.....	76
5.1.- CONCLUSIONES.....	76
CAPÍTULO VI	79
BIBLIOGRAFÍA.....	79
6.1.- BIBLIOGRAFÍA.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1.- Curva de capacidad sísmica y factores de reducción R_{μ} R_{ρ}	34
Figura 4.2.- Estructura Flexo-Rígida Mixta a Nivel de Planta.....	36
Figura 4.3.- Parámetros para Diseño Sísmico por Comportamiento de Estructuras.	49
Figura 4.4.- Diseño Conceptual de Edificio para Diseño en Hormigón y Acero.	50
Figura 4.5.- Curvas de Peligro Sísmico NEC para Ambato y Sismos de Analisis.....	51
Figura 4.6.- Espectros para Ambato (a) Sismos de Análisis (b) Elástico e Inelastico	52
Figura 4.7.- Secciones Sismo Resistentes de Edificios (a) Acero (b) Hormigón.....	54
Figura 4.8.- Desplazamiento para Modelos sentidos X y Y (a) Acero (b) Hormigón.....	55
Figura 4.9.- Modelos Edificio y derivas de piso (a) Acero (b) Hormigón.	56
Figura 4.10.- Curva de Capacidad Edificio Acero (a) Sentido XX (b) Sentido YY	58
Figura 4.11.- Curva de Capacidad Edificio Hormigón (a) Sentido XX (b) Sentido YY.....	59
Figura 4.12.- Curva de Capacidad Edificio Acero (a) Sentido XX (b) Sentido YY	60
Figura 4.13.- Curva de Capacidad Edificio Hormigón (a) Sentido XX (b) Sentido YY.....	61
Figura 4.14.- Curva de Capacidad y Umbrales de Daño Edificio de Acero.....	64
Figura 4.15.- Curva de Capacidad y Umbrales de Daño Edificio de Hormigón.....	65
Figura 4.16.- Rotulas plásticas para Edificios (a) Acero (b) Hormigón.....	66
Figura 4.17.- Fuerza-Deformación y forma de degradación elementos estructurales.....	67
Figura 4.18.- Curva de Capacidad Bilineal y Desplazamiento asociado a límite de Daño...68	
Figura 4.19.- Niveles de Daño asociado al Desplazamiento Edificio de Acero.....	71
Figura 4.20.- Niveles de Daño asociado al Desplazamiento Edificio de Hormigón	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.- Estados Límite para Diseño Sísmico.....	13
Tabla 4.1.- Sismos de Análisis establecidos por el COMITÉ VISIÓN 2000.....	46
Tabla 4.2.- Amenaza Sísmica según Norma Ecuatoriana de la Construcción	46
Tabla 4.3.- Definiciones del desempeño estructural según NEHRP y VISIÓN 2000.....	47
Tabla 4.4.- Sismos de Análisis y Comportamiento en edificaciones VISIÓN 2000.....	48
Tabla 4.5.- Cargas y Sobrecargas utilizadas en el Análisis Estructural	53
Tabla 4.6.- Coeficientes determinados según los Procedimientos mejorados Modificación de desplazamientos para los edificios en análisis.....	62
Tabla 4.7.- Derivas de Piso recomendadas por el Comité Visión 2000	63
Tabla 4.8.- Desplazamiento asociado a cada límite de Daño	69
Tabla 4.9.- Descripción de los estados de daño.....	70
Tabla 4.10.- Comparación Aspectos Técnicos	74
Tabla 4.11.- Comparación Aspectos Financieros	75

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.- SISMO RESISTENCIA EN EDIFICIOS DE HORMIGÓN Y ACERO PARA ZONAS DE ALTA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN EL ECUADOR

1.2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1.- Contextualización

La competitividad de un país está en correlación directa con el desarrollo que posee, la ciencia, la tecnología y la innovación, actualmente la tecnología de la información es un factor desencadenante de este desarrollo, hoy, considerables bases de datos sobre clima, corrientes marinas, actividad sísmica, entre otros temas son alimentadas día a día y puestas a disposición de los investigadores de todo el mundo, a través de herramientas computacionales compartidas en línea.

Gracias a las tecnologías de la información es posible el uso en procesos de investigación y desarrollo, equipos de gran capacidad, cuyos elevados costos dificultan su disponibilidad, son viables por ejemplo la comunicación de datos en tiempo real, las imágenes de telescopios, las bases de datos de sensores sismológicos, resultados de microscopios electrónicos, aceleradores de partículas, que pueden ser accedidos desde pequeñas estaciones de trabajo instaladas en lugares distantes.

Este significativo avance del conocimiento, junto con las lecciones dejadas por los terremotos y la tecnología en el área de la ingeniería sismo resistente, colocan de manifiesto la vulnerabilidad sísmica de muchas edificaciones, aún cuando éstas hayan sido diseñadas cumpliendo las normas vigentes para la época por lo que se puede concluir que es relativamente poco lo que se sabe en profundidad del éxito de la construcción sismo resistente, esto lo ratifican varios edificios colapsados.

Estos edificios se diseñaron empleando normativas de diseño sismo resistente de su época y que sufrieron daños considerables durante terremotos como el de 1989 en Loma Prieta que ocurrió el 17 de Octubre en la Bahía de San Francisco California debido al deslizamiento de la falla de San Andrés, el de 1994 en Northridge que ocurrió el 17 de Enero en el Valle de San Fernando en la ciudad de los Ángeles o el de 1995 en Kobe que ocurrió el 17 de Enero en Hanshin Awaji Daishinsai Japón.

Esto indica que el avance de la investigación no se refleja tanto en la práctica, en particular en las normativas de diseño sismo resistente, ya que existe una necesidad importante de prevenir los efectos destructivos de los terremotos utilizando y mejorando las diferentes técnicas de diseño actual. A partir de 2010 importantes eventos tectónicos mayores a 7.5 Mw en la escala sismológica de magnitud de momento (Mw) han dejado cuantiosa perdidas, el 27 febrero 2010, Chile: un sismo de 8,8 Mw, el 26 octubre 2010, Isla de Sumatra (Indonesia): un sismo de 7,5 Mw y el posterior tsunami, el 11 marzo 2011, Japón: un sismo de 9 Mw y el tsunami que afectó la central nuclear de Fukushima, el 11 de abril 2012, Indonesia: un sismo de magnitud 8,6 el 24 septiembre 2014, Provincia de Baluchistán (Pakistán): un sismo de 7,7 Mw; el 25 de abril 2015, Nepal: un sismo de 7,9 Mw el 16 de septiembre 2015, Chile: Sismo de 8,4 el 16 de Abril de 2016; Ecuador: Sismo de 7.8 Mw sacudió todo nuestro territorio.

Sobre este conocimiento son necesarios los estudios de sismo resistencia de los edificios dirigidos a reducir la vulnerabilidad de las edificaciones, para anticipar daños, pérdidas y niveles de riesgo sísmico, con la finalidad de priorizar la intervención y refuerzo de las estructuras más vulnerables mediante planes de prevención y mitigación del riesgo. Sabemos que los terremotos son fenómenos naturales que interminablemente ocasionaran cuantiosos daños humanos y materiales, sabemos que los terremotos severos son capaces de colapsar estructuras e interrumpir la actividad económica, las líneas de comunicación y los servicios públicos, una substancial causa de estas grandes pérdidas es el comportamiento sismo resistente inadecuado de las estructuras y especialmente de los edificio, consecuencia del principal objetivo de este proyecto es estudiar varias técnicas avanzadas sobre el diseño sismo resistente de edificios.

1.2.2.- Analisis Crítico

Es de nuestro conocimiento que los eventos sísmicos ocurridos en años pasados han causado daños importantes en las estructuras de los edificios en algunos casos daños en elementos estructurales y no estructurales, y en otros produciendo fallas que conllevaron al colapso total, impidiendo en todos los casos el uso de la edificación en un tiempo considerable, estas catástrofes han expuesto la inseguridad y la confiabilidad del diseño sismo resistente ya que la respuesta de las edificaciones fue menor que la esperada.

Es necesario replantear las metodologías actuales de sismo resistencia, con la actualización de conocimientos y de normas vigentes de diseño sismo resistente para edificaciones, además del estudio de materiales alternativos para la construcción de edificios donde en la actualidad se utiliza básicamente hormigón estructural por la facilidad de su proceso constructivo, sin embargo es necesario realizar estudios de diseño sismo resistente de edificios con materiales alternativos como es el caso del acero estructural.

1.2.3.- Prognosis

La experiencia ha demostrado que la aplicación de los códigos sísmicos no garantiza el buen comportamiento de las edificaciones, la falla de edificios diseñados de acuerdo a los códigos confirma que no podemos evaluar adecuadamente las características del movimiento del terreno y que las solicitaciones sísmicas pueden ser mayores que las deducidas de los espectros de diseño.

El diseño sismo resistente es una disciplina llena de incertidumbres que demanda del ingeniero estructural la capacidad de intuir el comportamiento de las estructuras, además del criterio para seleccionar un sistema resistente eficiente y la pericia para satisfacer requerimientos arquitectónicos y estructurales.

También demanda de inteligencia para dejar un lado la excesiva confianza a los resultados de un análisis y diseño en algún software especializado, sin olvidar que nuestra habilidad para analizar las estructuras excede mucho más a nuestra capacidad para predecir la demanda sísmica.

En caso de una acción sísmica, el daño estructural y no estructural es admisible, siempre que no comprometa el colapso y pérdida de vidas humanas, estos motivos son de carácter económico, la tendencia del diseño sismo resistente, reconoce la necesidad de evaluar la vulnerabilidad de las estructuras, la actualización, el desarrollo y la aplicación de diversas normas para el análisis y diseño estructural sismo resistente, ha permitido establecer de un mejor comportamiento estructural, que redundan en la minimización del riesgo sísmico

1.2.4.- Formulación del Problema

¿En zonas de alta peligrosidad sísmica del Ecuador que parámetros se deben utilizar para diseñar un edificio sismo resistente en la actualidad?

1.2.5.- Preguntas Directrices

- La *actualización* de la norma ecuatoriana de la construcción define nuevos parámetros de diseño sismo resistente?
- La *aplicación de normas* extranjeras han sido utilizadas a la falta de una norma legalmente establecida?
- La *respuesta estructural* de edificios depende directamente del diseño sismo resistente?
- El *procedimiento* de diseño sismo resistente debe ser adecuado para edificios de hormigón y acero?

- El *comportamiento* de edificaciones depende del diseño basado en fuerzas y basado en desplazamientos?

1.2.6.- Delimitación de la Investigación

La investigación a efectuar en el presente trabajo se desarrollará en el campo de la ingeniería estructural sismo resistente, en las áreas de Análisis Estructural, Diseño Sismo Resistente, Diseño de edificios de Hormigón, Diseño de edificios de Acero, en el aspectos de modelos estructurales de diseño sismo resistente.

Los trabajos a desarrollarse en la presente investigación se los realizará en las oficinas de ASING Cia. Ltda. en donde se estudiarán y realizarán modelaciones y se efectuarán los diseños concernientes al estudio.

La ejecución del presente trabajo de investigación está prevista para el periodo comprendido del mes de Marzo de 2016.

1.3.- JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Los procedimientos y requisitos descritos en la Norma Ecuatoriana de Construcción se determinan considerando la zona sísmica del Ecuador donde se va a construir la estructura, las características del suelo del sitio de emplazamiento, el tipo de uso, destino e importancia de la estructura y el tipo de sistema y configuración estructural a utilizarse.

Para estructuras de uso normal, estas deberán diseñarse para una resistencia tal que puedan soportar los desplazamientos laterales inducidos por el sismo de diseño, considerando la respuesta inelástica, la redundancia y sobre resistencia estructural inherente y la ductilidad de la estructura. Para estructuras de ocupación especial y edificaciones esenciales, se aplican verificaciones de comportamiento inelástico para diferentes niveles de terremotos. La resistencia mínima de diseño para todas las estructuras deberá basarse en las fuerzas sísmicas de diseño establecidas.

Para diseñar estructuras seguras que soporten los embates naturales como son los sismos debido a que Ecuador posee en su territorio varias zonas catalogadas de alta peligrosidad, al aplicar la nueva Norma Ecuatoriana de la Construcción el estudio permitirá emitir valiosas recomendaciones ya que su aplicabilidad es escasa al ser Ley de la República del Ecuador deberá ser aplicada de acuerdo a todos los parámetros que esta considera por lo tanto es necesario que se estudie su aplicabilidad a profundidad.

1.4.- OBJETIVOS

1.4.1.- Objetivo General

Diseño Sismo Resistente en Edificios de Hormigón y Acero para Zonas de Alta Peligrosidad Sísmica Aplicando la Norma Ecuatoriana de Construcción

1.4.2.- Objetivo Específicos

Analizar el comportamiento sismo resistente en edificios de hormigón de varios pisos, para obtener parámetros de cálculo en modelos estructurales.

Identificar los parámetros al aplicar la Norma Ecuatoriana de la Construcción para el diseño de edificios de hormigón y acero.

Emplear el coeficiente de reducción de respuesta estructural sistemas estructurales dúctiles para verificar el comportamiento estructural de los edificios

Estudiar el comportamiento sismo resistente en edificios de hormigón y de Acero de varios pisos para aplicar las configuraciones en elevación y en planta

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.- ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Los terremotos son fenómenos naturales que se presentan por el movimiento de placas tectónicas o fallas geológicas, ubicadas dentro de la corteza terrestre. También se producen por actividad volcánica. Cuando en un lugar existe la probabilidad de que se presenten sismos de cierta severidad se denominan “*zonas de alta peligrosidad sísmica*”, es decir; lugares donde se espera que se presenten sismos con mayor frecuencia y fuerte intensidad.

Cuando un edificio se concibe con una adecuada configuración estructural, con componentes de dimensiones apropiadas y materiales con resistencia suficientes para soportar la acción de fuerzas causadas por sismos frecuentes se lo provee de “*sismo resistencia*” que es una propiedad o capacidad empleada con el objeto de proteger la vida y los bienes de las personas que ocupan el edificio.

Si estudiamos el edificio con cierto nivel de complejidad superior tomando en cuenta las solicitaciones propias, las características del sismo, los mecanismos de falla, la disipación de energía, y, demás propiedades que simplifican la incertidumbre sobre la respuesta y el comportamiento de la estructura, se denomina “*diseño sismo resistente*”.

Además de las solicitaciones se debe tomar en cuenta la heterogeneidad de la calidad de los materiales, la interacción con los elementos no estructurales, la variación de las diferentes cargas de uso, las variaciones presentadas en la construcción, y el costo social asociado a una posible falla del edificio.

Los códigos de diseño estructural contemplan varios de estos problemas estudiados por medio de fórmulas cuantitativas sobre seguridad global o local. A menudo el seguimiento irreflexivo de estas normas, en el diseño habitual de estructuras, hace que se realicen simplificaciones en el contenido de fondo de las normas, tales simplificaciones son frecuentes que tornan al tema desconocido u olvidado.

Sin embargo, en el diseño de cualquier edificio y en especial en el de aquellos que deban permanecer en el mejor estado posible después de un sismo, se deben tener presentes las implicaciones de cada decisión importante, de acuerdo con los principios y avances de la ingeniería sismo resistente, y bajo la óptica de la presencia de la construcción en un medio social.

Aún cuando se diseñe el edificio cumpliendo con todos los requisitos que indican en los códigos de diseño y de construcción sismo resistente, siempre existe la posibilidad de que se presente un terremoto aún más fuerte que los previstos y que deben ser resistidos por la edificación, sin que ocurran colapsos totales o parciales de la estructura, por ésta razón, no existen edificios totalmente sismo resistentes.

En edificio en el cual los efectos sísmicos no son considerados es vulnerable, ya que se es una estructura dispuesta a dañarse en forma grave o a colapsar fácilmente en caso de producirse un terremoto. El mayor costo que implica la construcción de una estructura del tipo sismo resistente es mínimo, si la materialización se efectúa correctamente. Dicho costo es totalmente justificable, dado que implica la seguridad de las personas y la protección de su patrimonio en caso de terremoto.

2.2.- FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En la década de los años 50 se hacía uso de un manuscrito de la American Society of Civil Engineers [ASCE] titulado “*Lateral Forces of Earthquake and Wind*” que contenía el informe del Lateral Forces Committee, conformado por delegados de la Sociedad de Ingenieros Civiles de San Francisco y de la Structural Engineers Association of Northern California, en donde proponía la ecuación (1), para evaluar la acción sísmica en una estructura se consideraba que actúa una fuerza horizontal.

$$V = c \times W \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

- V Cortante basal de diseño
- c Coeficiente de vibración de la estructura
- W Peso total del edificio

El coeficiente c variaba con el período fundamental de la vibración del edificio entre los límites 0.02 y 0.06, estos valores límites se adoptaron como consecuencia de resultado de las revisiones de las historias de daños producidos por sismos precedentes.

Para la década de los años 60 aparece “*Recommended Lateral Force Requirements*”, preparado por The Seismology Committee of the Structural Engineers Association of California, July 1959. En este trabajo se proponía la ecuación (2) con un nuevo factor que dependía del tipo del sistema estructural a usarse y estaba basado en investigaciones, experiencias y estudios de daños por sismos. Se bonificaba cierto tipo de sistemas. Sin embargo, al definir el tipo de estructura a la que corresponde K dependía del tipo de configuración de los elementos resistentes y se asignan valores de 0.067, 0.08 y 1.33.

$$V = K \times c \times W \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

- V Cortante basal de diseño
- K Factor de fuerza horizontal para edificios
- c Coeficiente de resonancia del suelo
- W Peso total del edificio

En el año 1962 los ingenieros estructurales tuvieron la oportunidad de disponer de la publicación de la Portland Cement Association titulada “*Design of Multistory Reinforced Concrete Buildings for Earthquake Motions*” por John Blume, Nathan Newmark y Leo Corning; así se pudo conocer con bastante amplitud los fundamentos de las normas americanas sobre las fuerzas laterales de sismos y sobre todo los conceptos de respuesta sísmica, principios de diseño sismo resistente, consideraciones sobre el diseño, los requisitos de código, y la relación de resistencia y ductilidad respecto a la absorción de la energía impresa a un edificio por el sismo.

En cuanto al diseño de los elementos de concreto reforzado, hasta el año 1965, los ingenieros utilizaban las normas vigentes del “Building Code Requirements for Reinforced Concrete ACI 318-63” del American Concrete Institute [ACI], este no contemplaba disposiciones especiales para estructuras en regiones de actividad sísmica.

Posteriormente aparece las norma ACI 318-71 que incluía el Apéndice A con provisiones especiales para el diseño sismo-resistente. Eran de especial interés las disposiciones para obtener pórticos dúctiles especiales y muros de corte especiales que permitían la reducción de la fuerza V en la base. Además, el cuerpo principal del código incluía una nueva sección sobre provisiones especiales para el control del corte en muros, como los utilizados en resistir la acción del sismo.

Posteriormente han aparecieron las normas ACI 318-77 y las ACI 318-83. Con respecto a las disposiciones especiales para estructuras en regiones de actividad sísmica, las del año 1977 prácticamente son similares en su contexto a las del año 1971. Las del año 1983 dejan de referirse a pórticos dúctiles especiales y muros de corte especiales y en su lugar se refieren a estructuras ubicadas en regiones de alto riesgo sísmico y ubicado en regiones de moderado riesgo sísmico.

Es evidente que los códigos y normas de construcción han sufrido cambios radicales en la parte sísmica, por lo cual al momento de aplicarlos se debe tener cuidado de confundir sus conceptos, producto de una mala aplicación de códigos y normas de la construcción, específicamente en los requerimientos de diseño sismo resistente, han llevado en algunos casos a subdimensionar o sobredimensionar las estructuras, por lo que es necesario estudiar las actuales Normas Ecuatorianas de la Construcción con la realización de un análisis estructural profundo de las estructuras en acero y hormigón.

La concepción adecuada de una estructura sismo resistente, redonda en un lógico planteamiento de sus mecanismos de absorción de energía, el cuidado en el diseño de los detalles, la acertada fijación de los elementos no estructurales y por último una buena ejecución, son de primordial importancia para obtener una edificación que responda eficientemente a las acciones sísmicas esperadas.

2.2.1.- Objetivos de diseño sísmico

El diseño de las estructuras para resistir sismos difiere del que se realiza para el efecto de otras acciones el problema sísmico no consiste en la complejidad de la respuesta estructural a los efectos dinámicos de los sismos, sino sobre todo, se deriva de lo poco predecible que es el fenómeno y de las intensidades extraordinarias que pueden alcanzar sus efectos, asociado a que la probabilidad de que se presenten dichas intensidades en el periodo de vida útil de la estructura.

Mientras que en el diseño para otras acciones se pretende que el comportamiento de la estructura permanezca dentro de su intervalo lineal y sin daño, aun para los máximos valores que pueden alcanzar las fuerzas actuantes, en el diseño sísmico se reconoce que no es económicamente viable diseñar las edificaciones en general, para que se mantengan dentro de su comportamiento lineal ante el sismo de diseño.

El problema se plantea en forma rigurosa como uno de optimación, en que debe equilibrarse la inversión que es razonable hacer en la seguridad de la estructura con la probabilidad del daño que puede ocurrir.

La mayoría de los reglamentos modernos de diseño sísmico establecen como objetivos, por una parte, evitar el colapso, pero aceptar daño, ante un sismo excepcionalmente severo que se pueda presentar en la vida útil de la estructura; y, por otra, evitar daños de cualquier tipo ante sismos moderados que tengan una probabilidad significativa de presentarse en ese lapso.

Estos objetivos pueden plantearse de manera más formal en términos de los estados límites siguientes:

Estado límite de servicio.- Para el cual no se exceden deformaciones que ocasionen pánico a los ocupantes, interferencia con el funcionamiento de equipos e instalaciones, ni daños en elementos no estructurales.

Estado límite de integridad estructural.- Para el cual se puede presentar daño no estructural y daño estructural menor, como agrietamiento en estructuras de concreto, pero no se alcanza la capacidad de carga de los elementos estructurales.

Estado límite de supervivencia.- Para el cual puede haber daño estructural significativo, y hasta en ocasiones más allá de lo económicamente reparable, pero se mantiene la estabilidad general de la estructura y se evita el colapso.

En términos generales, pueden establecerse como objetivos del diseño sísmico:

- Evitar que se exceda el estado límite de servicio para sismos de intensidad moderada que pueden presentarse varias veces en la vida de la estructura.
- Que el estado límite de integridad estructural no se exceda para sismos severos que tienen una posibilidad significativa de presentarse en la vida de la estructura.
- El estado límite de supervivencia no debe excederse ni para sismos extraordinarios que tengan una muy pequeña probabilidad de ocurrencia.

Estas probabilidades pueden manejarse en términos de periodos de retorno como se indica en la Tabla 2.1 que muestra un esquema de este planteamiento e incluye periodos de retorno considerados aceptables para cada uno de los tres casos. Los reglamentos en general, no establecen métodos explícitos para alcanzar estos objetivos, que estrictamente requerirían de análisis para tres niveles de sismos; tratan de cumplirlos de manera indirecta mediante un conjunto de requisitos que supuestamente conlleven a ello.

Tabla 2.1.- Estados Límite para Diseño Sísmico

ESTADO LÍMITE	INTENSIDAD SÍSMICA	PERIODO RETORNO
Servicio	Moderada	20 - 30
Integridad Estructural	Severa	50 - 100
Supervivencia	Extraordinaria	500 - 1000

2.2.2.- Respuesta de los edificios a la acción sísmica

La intensidad de la vibración inducida en un edificio depende tanto de las características del movimiento del terreno como de las propiedades dinámicas de la estructura. Para sismos moderados la estructura se mantiene, normalmente, dentro de su intervalo de comportamiento elástico.

A medida que la intensidad de la excitación aplicada al edificio aumenta, se generan cambios en las propiedades dinámicas del mismo, las que alteran su respuesta. En términos generales, el comportamiento deja de ser lineal, la rigidez tiende a bajar y el amortiguamiento tiende a aumentar.

La magnitud de estas modificaciones es muy distinta para diferentes tipos de sistemas y de materiales. El acero, por ejemplo, mantiene su comportamiento lineal hasta niveles muy altos de esfuerzos, correspondientes a la fluencia.

El concreto tiene una reducción significativa en su rigidez cuando los esfuerzos de compresión exceden a cincuenta por ciento de la resistencia, pero sobre todo, la rigidez de estructuras de este material se ve disminuida por el agrietamiento de las secciones que están sujetas a momentos flexionantes elevados.

2.2.3.- Comportamiento frágil y comportamiento dúctil

La habilidad que tienen ciertos materiales, como el acero, de admitir deformaciones importantes luego de alcanzado su esfuerzo máximo se conoce como comportamiento dúctil. Estos materiales por su gran deformación avisan su próximo colapso. Los otros, como el concreto, se dice que tienen comportamiento frágil, siendo su colapso brusco y por lo tanto sin aviso.

2.2.4.- El hormigón estructural y la ductilidad

La incorporación íntima de refuerzo de acero en el concreto hace factible la construcción de miembros estructurales de hormigón estructural con cierto grado de ductilidad. Los últimos códigos dan especial importancia a esta característica en los miembros de concreto reforzado que van a soportar cargas de gravedad y lo hacen requiriendo que se diseñen para falla dúctil, es decir, con presencia de deformaciones elevadas.

2.2.5.- El acero estructural y la ductilidad

En el caso particular de los aceros para armaduras pasivas, la ductilidad es la capacidad del acero para admitir deformaciones importantes una vez superado el límite elástico, manteniendo al mismo tiempo su capacidad mecánica, este concepto, está pues, directamente relacionado con el comportamiento no lineal de las estructuras, en el cual la ductilidad desempeña un papel importante.

2.2.6.- Características de la acción sísmica

El movimiento sísmico del suelo se transmite a los edificios que se apoyan sobre éste, la base del edificio tiende a seguir el movimiento del suelo, mientras que por inercia, la masa del edificio se opone a ser desplazada dinámicamente y a seguir el movimiento de su base, se generan entonces fuerzas de inercia que ponen en peligro la seguridad de la estructura.

La flexibilidad de la estructura ante el efecto de las fuerzas de inercia hace que ésta vibre de forma distinta a la del suelo mismo. Las fuerzas que se inducen en la estructura no son función solamente de la intensidad del movimiento del suelo, sino dependen en forma preponderante y de las propiedades de la estructura misma. Por una parte, las fuerzas son proporcionales a la masa del edificio y, por otra, son función de algunas propiedades dinámicas que definen su forma de vibrar.

Los movimientos del suelo son amplificados en forma importante por la vibración de la estructura, de manera que las aceleraciones que se presentan en la misma llegan a ser varias veces superiores a las del terreno. El grado de amplificación depende del amortiguamiento propio de la edificación y de la relación entre el periodo de la estructura y el periodo dominante del suelo. De esta manera, cuando los movimientos del suelo son bruscos con predominio de ondas de periodo corto, resultan más afectadas las construcciones rígidas y pesadas. Cuando el movimiento del terreno es lento, con periodos dominantes largos, son en las estructuras altas y flexibles donde se amplifican las vibraciones y se generan aceleraciones más elevadas y por ende fuerzas de inercia mayores.

Las fuerzas de inercia que se generan por la vibración en los lugares donde se encuentran las masas del edificio se transmiten a través de la estructura por trayectorias que dependen de la configuración estructural. Estas fuerzas generan esfuerzos y deformaciones que pueden poner en peligro la estabilidad de la construcción. Pueden resultar críticas las fuerzas en las uniones entre los elementos estructurales, las fuerzas cortantes en las columnas y la transmisión de estas fuerzas a la cimentación.

2.2.7.- Diseño Elástico

En un principio, las estructuras se diseñaron empleando esfuerzos permisibles o de trabajo, que limitaban el esfuerzo normal o tangencial de una pieza o una fracción del esfuerzo de fluencia del material, razón por la cual se le denomina comúnmente “diseño elástico” aunque es más correcto el término: “*diseño por esfuerzos permisibles o de trabajo*”, si se aprovecha la resistencia del material más allá de su punto de fluencia y se define el esfuerzo permisible en función del esfuerzo de falla se estará diseñando plásticamente.

2.2.8.- Diseño Plástico

Actualmente las estructuras se diseñan teniendo en cuenta separadamente las cargas se multiplican por un factor de carga que amplifica las cargas, y por otro lado la resistencia del elemento se obtiene nominalmente considerando su capacidad última de falla para conseguir secciones económicas, se reduce con factores de resistencia menores a uno este diseño denominado comúnmente “diseño plástico” pero debe llamarse “*diseño por factores de carga y resistencia*”, pues si en lugar de elegir la resistencia a la ruptura tomamos el esfuerzo de fluencia obtenemos un diseño elástico.

2.2.9.- Diseño Sismo Resistente

La intención de un procedimiento de diseño sismo resistente sirve para que, al cumplir con los requisitos detallados, se proporcione a una estructura de edificación, un adecuado diseño que cumpla con la siguiente filosofía:

- Prevenir daños en elementos no estructurales y estructurales, ante terremotos pequeños y frecuentes, que pueden ocurrir durante la vida útil de la estructura.

- Prevenir daños estructurales graves y controlar danos no estructurales, ante terremotos moderados y poco frecuentes, que pueden ocurrir durante la vida útil de la estructura.
- Evitar el colapso ante terremotos severos que pueden ocurrir rara vez durante la vida útil de la estructura, procurando salvaguardar la vida de sus ocupantes.

Esta filosofía de diseño se consigue diseñando la estructura para que:

- Tenga la capacidad para resistir las fuerzas especificadas por los códigos de diseño sismo resistente.
- Pueda disipar energía de deformación inelástica, haciendo uso de las técnicas de diseño por capacidad o mediante la utilización de dispositivos de control sísmico.

2.2.10.- Estructura Sismo Resistente

En términos generales, podemos establecer los cuatro requisitos siguientes para el sistema estructural de edificios en zonas de alta peligrosidad sísmicas:

- El edificio debe poseer una configuración de elementos estructurales que le confiera resistencia y rigidez a cargas laterales en cualquier dirección, esto se logra generalmente, con sistemas resistentes en dos direcciones ortogonales.
- Evitar las amplificaciones de las vibraciones, las concentraciones de solicitaciones y las vibraciones torsionales que pueden producirse por la distribución irregular de masas o rigideces en planta o en elevación.
- Los sistemas estructurales deben disponer de redundancia y de capacidad de deformación inelástica que permita disipar la energía introducida por sismos de excepcional intensidad, mediante un elevado amortiguamiento inelástico y sin la presencia de fallas frágiles locales y globales.

2.3.- PRINCIPIOS DE SISMO RESISTENCIA EN ESTRUCTURAS

2.3.1.- Estructura

Una estructura físicamente es un cuerpo o un conjunto de cuerpos en el espacio que forman un sistema capaz de soportar acciones exteriores denominadas cargas. La ingeniería estructural es la rama de la ingeniería que estudia el proyecto de estructuras y el cálculo de su equilibrio y resistencia.

Dentro de los ámbitos específicos de la ingeniería civil, se conoce con el nombre de estructura a todo elemento construido con el destino específico de soportar la presencia de cargas, y entre ellas de manera preponderante su propio peso y el de la construcción que sustenta, sin perder las condiciones de funcionalidad para las que fue concebida.

2.3.2.- Forma regular

La geometría de la edificación debe ser sencilla en planta y en elevación. Las formas complejas, irregulares o asimétricas, causan un mal comportamiento cuando la edificación es sacudida por un sismo. Una geometría irregular favorece que la estructura sufra torsión o que intente girar en forma desordenada. La falta de uniformidad facilita que en algunas esquinas se presenten intensas concentraciones de fuerzas, que son en general, difíciles de resistir.

2.3.3.- Bajo peso

Entre más liviana sea la edificación, menor será la fuerza que tendrá que soportar cuando ocurra un terremoto. Grandes masas o pesos se mueven con mayor severidad al ser sacudidas por un sismo y, por lo tanto, la exigencia de la fuerza actuante será mayor sobre los componentes de la edificación.

2.3.4.- Mayor rigidez

Es deseable que la estructura se deforme poco cuando se mueva ante la acción de un sismo. Una estructura flexible o poco sólida, al deformarse exageradamente, favorece la presencia de daños en paredes o divisiones no estructurales, acabados arquitectónicos e instalaciones que, usualmente, son elementos frágiles que no soportan mayores distorsiones.

2.3.5.- Buena estabilidad

Las edificaciones deben ser firmes y conservar el equilibrio cuando son sometidas a las vibraciones de un terremoto. Estructuras poco sólidas e inestables se pueden volcar o deslizar, en caso de una cimentación deficiente. La falta de estabilidad y rigidez favorece que edificaciones vecinas se golpeen en forma perjudicial, si no existe una suficiente separación entre ellas.

2.3.6.- Suelo firme y buena cimentación

La cimentación debe ser competente para transmitir con seguridad el peso de la edificación al suelo. También, es necesario que el suelo sea duro y resistente. Los suelos blandos amplifican las ondas sísmicas y facilitan asentamientos nocivos en la cimentación, que pueden afectar la estructura y facilitar el daño en caso de sismo.

2.3.7.- Estructura apropiada

Para que una edificación soporte un terremoto, su estructura deberá ser sólida, simétrica, uniforme, continua y bien conectada. Cambios bruscos de sus dimensiones, de su rigidez, falta de continuidad, una configuración estructural desordenada o voladizos excesivos, facilitan la concentración de fuerzas nocivas, torsiones y deformaciones que pueden causar graves daños o el colapso de la edificación.

2.3.8.- Materiales competentes

Los materiales deben ser de buena calidad para garantizar una adecuada resistencia y capacidad de la estructura para absorber y disipar la energía que el sismo le otorga a la edificación cuando se sacude. Materiales frágiles, poco resistentes, con discontinuidades se rompen fácilmente ante la acción de un terremoto. Muros o paredes de tierra o adobe, de ladrillo o bloque sin refuerzo, sin vigas y columnas, son muy peligrosos.

2.3.9.- Calidad en la construcción

Se deben cumplir los requisitos de calidad y resistencia de los materiales, acotando las especificaciones de diseño y construcción. La falta de control de calidad sobre la obra y la ausencia de supervisión técnica, ha sido la causa de daños y colapsos de edificaciones que aparentemente cumplen con otras características o principios de la sismo resistencia.

2.3.10.- Implantación de la construcción:

La obra no debe construirse sobre suelos sueltos en ladera, ya que durante un sismo se pueden desprender fácilmente, arrastrando a su paso a la construcción. Si la pendiente de la ladera es mayor al 30 % se debe buscar la asesoría de un ingeniero de suelos y de un ingeniero estructural.

Los lugares que se encuentran cerca de la ribera de los ríos o planicies inundables deben evitarse, ya que los sismos podrían causar deslizamientos que pueden represar el río y dar origen a avalanchas. Después de un sismo se debe estar siempre atento a cambios repentinos del nivel del río. Si un río disminuye notablemente su caudal después de un sismo, pudo haberse represado. Atento a ello, resulta conveniente siempre ubicarse en zonas altas, fuera del alcance de inundaciones o avalanchas

2.4.- FUNDAMENTACION FILOSÓFICA

La investigación se encuentra establecida en un paradigma critico-propositivo, razón por la cuál es necesario demostrar el comportamiento estructural que brindarán las edificaciones después de la etapa constructiva indicando los rangos de vulnerabilidad sísmica para los diferentes niveles de daño, por consiguiente en la presente investigación se realizará modelos estructurales de edificios de hormigón y acero con un correcto diseño sismo resistente aplicando la norma ecuatoriana de la construcción.

La fundamentación ontológica de la investigación se fundamenta en un problema real que presentan las estructuras que se ubican en zonas de alta peligrosidad sísmica en el Ecuador y que se deben diseñar con las normas actuales, las que se pretenden investigar y plantear un correcto diseño sismo resistente de edificios de hormigón y acero, mediante el desarrollo de modelos estructurales de edificios que varíen su configuración en planta y elevación, de esta manera evaluar el comportamiento estructural sismo resistente.

Por otro lado la fundamentación epistemológica tendrá que apoyarse en el presente estudio mediante la obtención de fuentes de información primarias, que se derivan de los análisis y estudios que se realizan en el proceso de modelos estructurales, así también de fuentes secundarias como normas, manuscritos, journals, libros, tesis de estudios anteriores, todos relacionados con las variables que se estudian y otros, que permitirán a dar soporte al objeto de estudio.

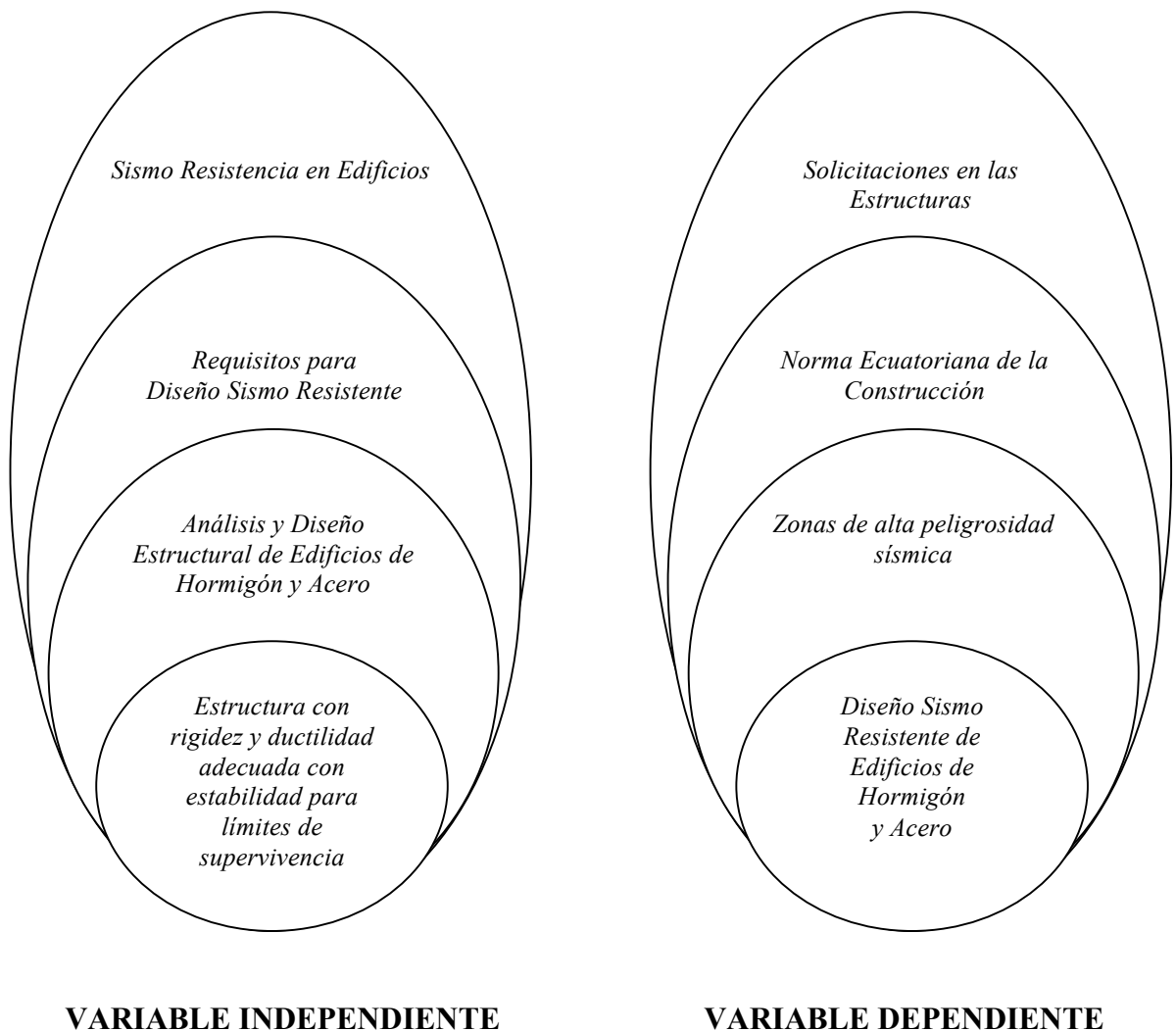
De manera que la fundamentación axiológica del proyecto se basa en valores éticos, profesionales y morales como se encuentran definidos entre los primordiales el respeto, honestidad, puntualidad, responsabilidad, y compromiso con el fin de crear una herramienta de apoyo, consulta y verificación de datos obtenidos dentro del análisis y diseño sismo resistente de edificios en el Ecuador.

2.5.- FUNDAMENTACION LEGAL

Mediante Decreto Ejecutivo N° 705 del 24 de Marzo de 2011, según el Art. 4 se expide la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

Art. 4.- Disponer al Comité Ejecutivo que expida la norma ecuatoriana de la construcción (NEC) la misma que contemplara los requisitos mínimos que deberán observarse al momento de realizar los diseños, al construir y controlar la ejecución de obras y estará orientada a promover la necesidad de mejorar la calidad de las edificaciones y, sobre todo, a proteger la vida de la gente.

2.6.- CATEGORIAS FUNDAMENTALES



2.7.- HIPÓTESIS

H1: Los avances de la ingeniería estructural relacionados con la sismo resistencia permite desarrollar técnicas que facilitan el estudio de los sismo, el impacto en las estructuras y la forma de minimizar los daños generados. Ante esto es importante diseñar correctamente los edificios para zonas de alta peligrosidad sísmica con la aplicación de la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

H0: Los avances de la ingeniería estructural relacionados con la sismo resistencia no permite desarrollar técnicas que facilitan el estudio de los sismo, el impacto en las estructuras y la forma de minimizar los daños generados. Ante esto es importante diseñar correctamente los edificios para zonas de alta peligrosidad sísmica con la aplicación de la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

2.8.- SEÑALAMIENTO DE LAS VARIABLES

2.8.1.- Variable Independiente

Avances de la ingeniería estructural relacionados con la sismo resistencia permite desarrollar técnicas que facilitan el estudio de los sismo, el impacto en las estructuras y la forma de minimizar los daños.

2.8.2.- Variable Dependiente

Diseñar correctamente los edificios para zonas de alta peligrosidad sísmica con la aplicación de la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1.- ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación está enmarcada en el campo analítico ya que se requieren realizar modelos estructurales para su análisis sísmo resistente a fin de llegar a determinar la sísmo resistencia y su comportamiento estructural, de esta manera verificar los parámetros permisibles en la norma ecuatoriana de la construcción, mediante el análisis de edificios en hormigón y acero con los diferentes tipos de modelos estructurales para cumplir con los objetivos de la investigación de esta manera verificar la hipótesis.

3.2.- MODALIDAD BASICA DE LA INVESTIGACIÓN

De conformidad con el tema propuesto, predomina el análisis cuantitativo y está estructurada por la preferente utilización de los datos numéricos, con un enfoque cualitativo, se realizará investigación bibliográfica, que nos permitirá aproximarnos al fenómeno y explicar científicamente los diseños a través de fuentes bibliográficas actualizadas.

Debido a que la sísmo resistencia se evalúa mediante técnicas numéricas es necesario desarrollar modelos realistas para el análisis y el comportamiento de las estructuras y simulación ante sismos reales, el presente trabajo se desarrolla en la base de una investigación experimental.

3.3.- TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El tipo es una investigación sustantiva ya que trata de revelar problemas particulares específicos, en tal sentido, está orientada, a describir, explicar, la realidad, con la búsqueda de principios y leyes generales que permitan organizar una teoría científica. En este sentido, podemos afirmar que la investigación sustantiva al perseguir la verdad nos encamina hacia la investigación básica o pura.

El nivel es una investigación descriptiva debido a que tiene como objetivo la descripción de los fenómenos a investigar, tal como es y cómo se manifiesta en el momento de realizar el estudio se utiliza la observación como método descriptivo, buscando especificar las propiedades importantes para medir y evaluar aspectos, dimensiones o componentes.

3.4.- POBLACIÓN Y MUESTRA

Definido el problema a investigar, formulados los objetivos y delimitadas las variables es necesario determinar los elementos con los que se va a llevar a cabo la investigación, esta consideración nos conduce a delimitar el ámbito de la investigación definiendo una población y seleccionando la muestra.

Debido a que la investigación de sismo resistencia en edificios de hormigón y acero es un proceso que consiste en realizar modelos y simulaciones, se procederá a construir modelos que permitan observar el comportamiento sismo resistente de edificios de hormigón y acero de esta manera llegar a la propuesta investigativa, objeto del presente estudio.

3.4.1.- Población

La población es un conjunto definido, limitado y accesible del universo que forma el referente para la elección de la muestra. Es el grupo al que se intenta generalizar los resultados, en la investigación de sismo resistencia en edificios de hormigón y acero se estudiarán edificios de cuatro a doce pisos.

3.4.2.- Muestra

Es la parte representativa de la población debidamente elegida, que se someterá a la observación científica en representación de la población, con el propósito de obtener resultados válidos, debido a que las formulas arrojan una muestra extensa donde se obtendrán resultados redundantes e infructuosos, se ha delimitado la muestra a cuatro irregularidades en planta y en elevación de edificios de hormigón y acero, tamaño de muestra que se considera apropiada para cumplir los objetivos de la investigación.

3.4.- OPERACIONALIZACION DE VARIABLES

3.4.1.- Variable Dependiente

Diseñar correctamente los edificios para zonas de alta peligrosidad sísmica con la aplicación de la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	ITEMS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
<p>Estudio de edificios con cierto nivel de complejidad superior tomando en cuenta las solicitaciones propias, las características del sismo, los mecanismos de falla, la disipación de energía, y, demás propiedades que simplifican la incertidumbre sobre la respuesta y el comportamiento de la estructura, se denomina “diseño sismo resistente” el proceso de diseñar un modelo de un sistema real en un sistema virtual y someterlo a solicitaciones sísmicas, con la finalidad de analizar el comportamiento estructural.</p>	<p>Analisis Estructural</p>	<p>Solicitaciones Configuración Estructuración</p>	<p>¿Cómo se realiza el analisis estructural de un edificio?</p>	<p>Metodos Numericos Recursos Informáticos</p>
	<p>Diseño Sismo Resistente</p>	<p>Metodo Basado en Fuerzas Metodo basado en Desplazamientos</p>	<p>¿Qué método de calculo de la demanda sísmica es correcto aplicando la norma?</p>	<p>Aplicación de Norma Ecuatoriana de la Construcción</p>
	<p>Hormigón Estructural AceroEstructural</p>	<p>Diseño por factores de carga y resistencia de elementos</p>	<p>¿Las secciones finales del diseño son adecuados?</p>	<p>Envoltentes de Diseño de elementos estructurales</p>

3.4.2.- Variable Independiente

Avances de la ingeniería estructural relacionados con la sismo resistencia permite desarrollar técnicas que facilitan el estudio de los sismo, el impacto en las estructuras y la forma de minimizar los daños.

CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	ITEMS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
<p>Cuando un edificio se concibe con una adecuada configuración estructural, con componentes de dimensiones apropiadas y materiales con resistencia suficientes para soportar la acción de fuerzas causadas por sismos frecuentes se lo provee de “sismo resistencia” que es una propiedad o capacidad empleada con el objeto de proteger la vida y los bienes de las personas que ocupan el edificio, los avances en la Ingeniería Estructural Sismo Resistentes emplea técnicas numéricas que permite desarrollar estudios y modelos más realistas para el análisis del comportamiento de las estructuras, evitando de esta manera las simplificaciones que se imponían al idealizar un modelo básico de cálculo.</p>	Técnica Numérica	Aplicación del cálculo matricial de estructuras	¿Cómo aplicamos el cálculo matricial de las estructuras?	Metodos Numericos de calculo
	Modelo Estructural	Elástico lineal o no-lineal, Inelástico	¿Cómo se analizan las respuestas elástica o inelástica de las estructuras?	Fichas Teoría de Modelos
	Resistencia	Elástica Frágil Plástica	¿Determinar el comportamiento frágil, plástico, elástico?	Recursos Informáticos
	Diseño	Elastico Plastico Desempeño	¿Cuáles es el diseño correcto aplicado a edificios?	Fichas Teoría de Modelos

3.5.- PLAN DE RECOLECCION DE INFORMACIÓN

El trabajo permitirá dar a conocer y aprovechar las herramientas computacionales orientadas a la ingeniería sísmo resistente las que podremos observar en formato de gráficos y animaciones, el comportamiento de los modelos en análisis y estudio permitiendo de esta manera observar los fenómenos de deformación, dilatación, fractura del material entre otras para asimilar de una mejor manera su comportamiento sísmo resistente.

Con la revisión crítica de la información acerca de las variables a estudiar, es decir, de los métodos que permitan diseñar correctamente los edificios para zonas de alta peligrosidad sísmica, la aplicación de la Norma Ecuatoriana de la Construcción y la revisión de los avances de la ingeniería estructural relacionados con la sísmo resistencia aplicando técnicas que facilitan el estudio de los sísmo, el impacto en las estructuras y la forma de minimizar los daños, mas la aplicación práctica de dichos métodos, obteniendo resultados que serán tabulados y graficados para que faciliten su interpretación y evaluación, con el fin de lograr los objetivos planteados.

3.6.- PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

El trabajo permitirá dar a conocer y aprovechar los conocimientos actuales en diseño sísmo resistente con el uso de la norma ecuatoriana de la construcción además del uso y aplicación de herramientas computacionales orientadas a la ingeniería sísmo resistente en las que podremos observar en formato de gráficos y animaciones, el comportamiento de la estructura en análisis y estudio permitiendo de esta manera observar los fenómenos de deformación, dilatación, fractura del material entre otras para asimilar de una mejor manera su comportamiento.

Mediante la tabulación y representación gráfica de los resultados tales como desplazamientos, se hará un análisis, evaluación e interpretación de datos obtenidos, que nos permitan verificar la hipótesis y emitir conclusiones y recomendaciones a cerca de la investigación desarrollada; para ello nos ayudaremos también con una apropiada identificación de los resultados a ser evaluados.

CAPÍTULO IV
COMPORTAMIENTO SISMO RESISTENTE DE EDIFICIOS DE
HORMIGÓN Y ACERO PARA ZONAS DE ALTA
PELIGROSIDAD SÍSMICA APLICANDO LA NORMA
ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN

4.1.- ANTECEDENTES

La filosofía de diseño sismo resistente de la Norma Ecuatoriana de la Construcción permite comprobar el nivel de seguridad de vida, por esta razón, el diseño estructural se realiza para el sismo de diseño, evento sísmico que tiene una probabilidad del 10% de ser excedido en 50 años, equivalente a un período de retorno de 475 años.

El sismo de diseño se determina a partir de un análisis de la peligrosidad sísmica del sitio de emplazamiento de la estructura o a partir de un mapa de peligro sísmico, los efectos dinámicos del sismo de diseño pueden modelarse mediante un espectro de respuesta para diseño, el procedimiento a seguir se encuentra establecido en NEC-SE-DS.

Por la sismicidad histórica la Norma Ecuatoriana de la Construcción ha considerado sismos de mediana magnitud y formas espectrales que consideran los efectos de sitio; estas gráficas constan en la NEC-SE-DS, es importante anotar que conforme se tenga mayor información sísmica se actualizarán los mapas de peligro sísmico y la forma de los espectros.

De la misma manera el Comité Visión 2000 de 1992 a 1993, desarrolló los lineamientos para la siguiente generación de códigos de construcción basados en el comportamiento de las estructuras, con el objetivo de definir un nuevo código antes del año 2000.

Luego del terremoto de 1994 en Northridge, la Asociación de Ingenieros Estructurales de California (SEAOC) desarrolló un informe con recomendaciones para el diseño basado en el comportamiento y a se denominó como “Performance Based Seismic Engineering” (PBSE).

El diseño sísmico que proponía el PBSE era tal que las estructuras fueran diseñadas y construidas a fin de que pudieran resistir sismos de diferente severidad dentro de unos niveles específicos de daño límite. Para llevar a cabo los objetivos del PBSE, el ingeniero necesitaba predecir el comportamiento de las estructuras ante diferentes escenarios de riesgo sísmico. A este fin hay varias fuentes de incertidumbre:

1. La identificación y definición del riesgo potencial que podría existir.
2. El uso de métodos y modelos precisos para analizar la respuesta estructural durante el sismo, especialmente en el rango no lineal.
3. El conocimiento sobre la resistencia, la deformación y la capacidad de disipar energía de los elementos estructurales bajo la carga dinámica.
4. La identificación y cuantificación de los parámetros de demanda para definir el daño en elementos estructurales y sus criterios de aceptabilidad.
5. El uso de aproximaciones para lograr la definición del sistema estructural con comportamiento sísmico predecible.
6. El procedimiento de análisis de aceptabilidad para verificar si se exceden los niveles de comportamiento.

En consecuencia, es necesario datos experimentales para conocer mejor la fiabilidad de los elementos estructurales en los que las deformaciones inelásticas son esperadas además de información suficiente para establecer los valores límites para cada nivel de comportamiento [Bujalance 2014].

Actualmente las metodologías de diseño basadas en comportamiento son útiles para reforzar las estructuras para soportar sismos, además de la implementación de los sistemas de disipación de energía son una alternativa para el diseño estructural sísmo resistente de nuevos edificios y para la rehabilitación de los existentes con el fin de asegurar los objetivos de comportamiento.

Entre todas las posibles aproximaciones de diseño basadas en el comportamiento, las metodologías basadas en energía han sido probadas como herramientas fiables para el diseño y el cálculo de nuevas estructuras y las existentes.

4.2.- ESTRUCTURAS SISMO RESISTENTES

Las estructuras sísmo resistentes pueden clasificarse en base a cómo la energía aportada es distribuida en su todo, en dos grupos:

Estructuras dispersadoras de energía: En este grupo la energía es distribuida por los elementos de toda la estructura como vigas, columnas, muros arriostramientos.

- a) Sistemas Duales
- b) Pórticos resistentes a momentos
- c) Otros Sistemas Estructurales

Estructuras concentradoras de energía: En este grupo la energía es intencionadamente disipada y concentrada en elementos concretos especialmente diseñados para ello.

- a) Estructuras aisladas sísmicamente
- b) Estructuras con sistemas de control activo
- c) Estructuras flexo-rígidas combinadas.

4.2.1.- Sistemas Estructurales Convencionales

El diseño de edificios con dispersión de energía está basado en dos objetivos principales:

1. Proveer a la estructura de una resistencia suficiente para comportarse en el rango elástico para el sismo con un período de retorno similar a la vida del edificio.
2. Diseñar el edificio para superar las deformaciones plásticas sin comprometer vidas humanas para los sismos de mayor período de retorno.

Estas dos directrices, que son fundamentales, requieren que la estructura sea capaz de resistir las cargas gravitacionales y una resistencia lateral mayor para resistir la acción sísmica en el escenario del primer caso. Además, la estructura debe disipar la energía introducida por un terremoto, por medio de deformaciones plásticas de los elementos estructurales, en el escenario del segundo caso.

En la fase de diseño, estos objetivos son conseguidos usando el factor de reducción de ductilidad R que reduce la demanda de fuerza lateral y, por tanto, la resistencia de los elementos estructurales. Pero esta reducción también requiere un diseño razonable de la estructura global para evitar la concentración de daño y el correcto detalle de los elementos estructurales para asegurar la disipación de energía que en ellos se produce y su ductilidad, especialmente en las regiones con rótulas plásticas, donde las deformaciones inelásticas son esperadas.

En las últimas dos décadas se ha realizado un gran trabajo para cuantificar el factor de reducción de las fuerzas sísmicas R y se tienen varias formulaciones con sustento teórico y experimental. Una de ellas reconoce que el factor R es igual al producto de cuatro factores. [Bertero et al. 1991] [Uang 1991] [Miranda 1997] [Whittaker et al.1999]

$$R = R_{\mu} \times R_{\Omega} \times R_{VG} \times R_R \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

R_{μ} factor de reducción de resistencia por ductilidad de un sistema de un grado de libertad.

R_{Ω} factor de sobre resistencia definida como la capacidad última de la estructura con respecto a la capacidad de diseño.

R_{VG} factor de reducción que toma en cuenta que el sistema tiene múltiples grados de libertad.

R_R factor de redundancia que indica la eficiencia de los elementos estructurales para transmitir cargas en el rango no lineal.

Existen otras propuestas, muy similares a la Ec. 3, en la que cambian el factor R_{VG} por el factor de amortiguamiento. [Mwafy y Elnashai 2002].

$$R = R_{\mu} \times R_{\Omega} \times R_{\xi} \times R_R \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

R_{ξ} factor de reducción de amortiguamiento cuando la estructura ingresa al rango no lineal, disipa energía por histéresis.

Cuando la estructura ingresa al rango no lineal, disipa energía por histéresis, el factor de amortiguamiento ξ se incrementa conforme más se daña la estructura.

El ATC-19 (1995) considera que el factor R es igual al producto de tres factores, pasando de la Ec. 3 a:

$$R = R_{\mu} \times R_{\Omega} \times R_R \quad \text{Ec. (5)}$$

Si en una estructura se aplican cargas monotónicas crecientes en cada uno de los pisos y se analiza con teoría elástica, la relación entre el cortante basal V y el desplazamiento lateral en el tope del edificio Δ es lineal y esto se lo ha representado en la Figura 4.1, con líneas entrecortadas. Analizar con teoría elástica significa que la rigidez del sistema nunca cambia por más que la estructura experimente desplazamientos considerables.

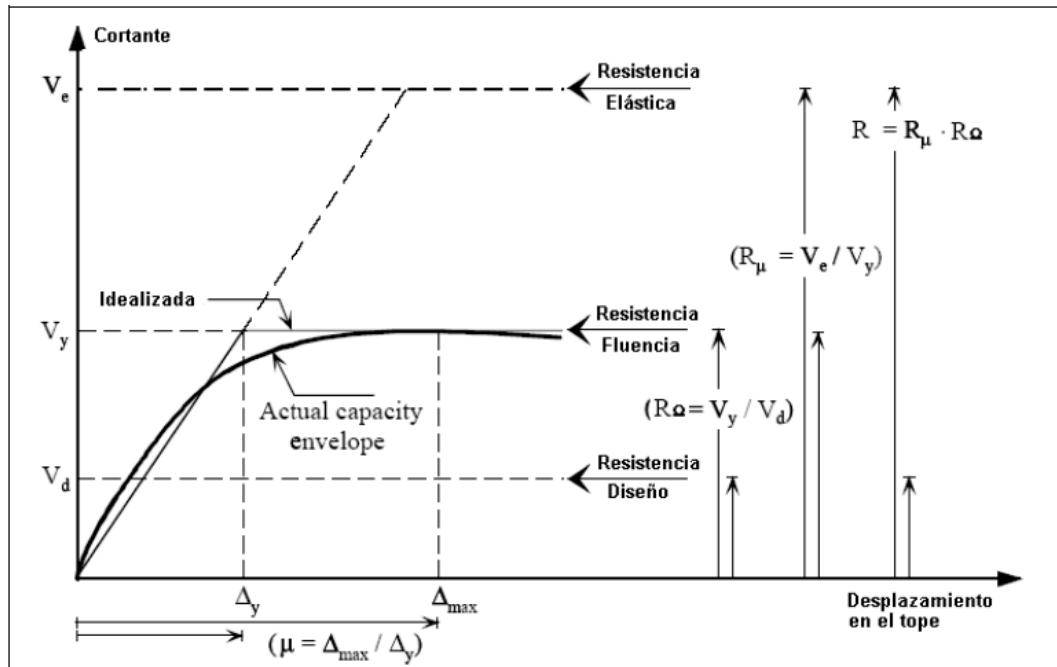


Figura 4.1.- Curva de capacidad sísmica y factores de reducción R_μ R_ω . [Mwafy y Elnashai 2002]

Para inducir regiones con rótulas plásticas, donde las deformaciones inelásticas son esperadas por medio de deformaciones plásticas de los elementos estructurales un principio sencillo son los sistemas estructurales columna fuerte-viga débil.

Los principales objetivos de este tipo estructural son:

1. Asegurar un mecanismo de colapso que distribuya uniformemente la energía plástica en los elementos estructurales de todos los pisos.

2. Forzar la formación de rótulas plásticas al final de las vigas, que presentan una mayor capacidad de disipación que las columnas debido a la ausencia de carga axial.
3. La formación de rótulas plásticas en las columnas están exclusivamente permitidas en su base para establecer el mecanismo de fallo.

4.2.2.- Sistemas Estructurales de Control

Entre los diferentes tipos de estructuras concentradoras de energía, la estructura flexo-rígida combinada con concentración de daño en todas las plantas es un sistema estructural que combina en paralelo en cada planta de la estructura dos partes claramente diferenciadas:

1. La parte flexible tiene una reducida rigidez que permite grandes deformaciones laterales dentro del rango elástico y su principal función es resistir las cargas gravitacionales.
2. La parte rígida tiene mayor rigidez y gran capacidad de deformación inelástica y su principal función es resistir las cargas laterales y concentrar el daño ejercido por el sismo en cada nivel de la estructura.

La Figura 4.2 muestra la típica curva de capacidad idealizada por ejemplo, fuerza Q frente a desplazamiento δ para la parte flexible, la rígida y el sistema combinado, en la figura ${}_f Q_y$ y ${}_s Q_y$ son las resistencias laterales de las partes flexible y rígida respectivamente, mientras que ${}_f \delta_y$, y ${}_s \delta_y$, son las correspondientes desviaciones entre plantas en la fluencia. [Bujalance 2014]

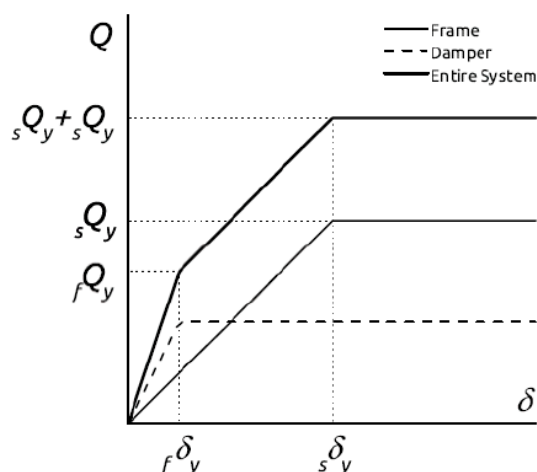


Figura 4.2.- Estructura Flexo-Rígida Mixta a Nivel de Planta [Bujalance 2014]

El uso de estrategias de disipación pasiva de energía EDD por sus siglas en inglés Energy Dissipating Devices para el diseño sísmico de estructuras ha crecido exponencialmente en los últimos años, tanto para edificios nuevos como existentes. Las EDD concentran la demanda de disipación de energía causada por el sismo, reduciendo el daño producido al sistema estructural.

Las EDD son capaces de minimizar las desviaciones entre plantas e incrementar el total de la resistencia del edificio frente al sismo para conseguir los objetivos de diseño basados en comportamiento. Hay diferentes tipos de EDD pasivas. Los más comunes en diseño sísmico son los amortiguadores fluidos viscosos, los sólidos viscoelástico, los de fricción y los metálicos.

4.3.- DISEÑO SÍSMICO

La mayoría de los códigos para diseño sismo resistente están basados en el análisis elástico de las estructuras. Estos procedimientos incluyen análisis estático y dinámico, los cuales son utilizados en los análisis de la fuerza lateral equivalente, el análisis del espectro de respuesta, en el análisis modal y en el análisis elástico de historia en el tiempo la Norma Ecuatoriana de la Construcción los considera en NEC-SE-DS.

Para tener en cuenta la incursión de la estructura en el rango no lineal, los códigos sísmicos incluyen un factor de reducción o de comportamiento para reducir el espectro elástico equivalente, el cual depende del tipo de estructura. Estos métodos están bien documentados en la literatura de la ingeniería sísmica y son extensamente usados. Cuando la respuesta inelástica o no lineal es importante, el análisis elástico debe usarse con precaución. [SEAO 1995]

En un análisis lineal, las propiedades estructurales, tales como la rigidez y el amortiguamiento, son constantes, no varían con el tiempo. Todos los desplazamientos, esfuerzos, reacciones, son directamente proporcionales a la magnitud de las cargas aplicadas.

En un análisis no lineal las propiedades estructurales pueden variar con el tiempo, la deformación y la carga. La respuesta suele no ser proporcional a las cargas, ya que las propiedades estructurales suelen variar. En el análisis no lineal no es aplicable el principio de superposición, por lo tanto, sólo es posible realizar análisis estáticos paso a paso o de historia en el tiempo.

4.3.1.- Análisis Sísmico Estático Lineal

La estructura es modelada como un sistema equivalente de uno o varios grados de libertad con una rigidez elástica lineal y un amortiguamiento viscoso equivalente. La acción sísmica de entrada es modelada por una fuerza lateral equivalente, con el objetivo de producir los mismos esfuerzos y deformaciones que el sismo de diseño. Basados en el primer modo de vibración del edificio, la fuerza lateral es distribuida en la altura del edificio y las correspondientes fuerzas y desplazamientos internos son calculados usando el análisis elástico lineal.

4.3.2.- Análisis Sísmico Dinámico Lineal.

En este análisis la estructura es modelada como un sistema de varios grados de libertad, con una matriz de rigidez elástica lineal y una matriz de amortiguamiento viscoso equivalente.

La acción sísmica de entrada es modelada usando un análisis modal o un análisis de historia en el tiempo. Este análisis toma en cuenta los movimientos del suelo durante el sismo y los modos de vibrar de la estructura, el análisis modal supone que la respuesta dinámica de un edificio puede ser estimada a partir de la respuesta independiente de cada modo natural de vibración usando el espectro de respuesta elástico lineal. Solamente se consideran los modos que contribuyen de forma significativa a la respuesta de la estructura.

La mayoría de los códigos sísmicos requieren que se incluyan suficientes modos de vibración como para movilizar un 90% de la masa efectiva. El análisis de historia en el tiempo implica una evaluación paso a paso de la respuesta del edificio, usando registros reales o acelerogramas artificiales como movimientos de entrada. En ambos casos, tanto las correspondientes fuerzas como los desplazamientos internos se calculan usando un análisis lineal elástico.

4.3.3.- Análisis Sísmico Estático No Lineal

Se basa en el análisis estático considerando la respuesta no lineal de los materiales. Existen muchos métodos para efectuar este tipo de análisis por ejemplo los procedimientos iniciales se encuentran en ATC-40, FEMA-273 pero todos ellos tienen en común que las características no lineales fuerza-deformación de la estructura, son representadas por una curva de capacidad.

El máximo desplazamiento que probablemente, puede ser experimentado durante el sismo dado, es determinado usando espectros de respuesta inelásticos. La gran ventaja de este método con respecto al análisis lineal es que directamente tiene en cuenta los efectos de la respuesta no lineal del material mientras que en el análisis lineal esto se debe tener en cuenta de forma aproximada, mediante el factor de comportamiento o de reducción del espectro y, por lo tanto, el cálculo de las fuerzas internas y desplazamientos serán más representativos de los esperados durante un sismo.

4.3.4.- Análisis Sísmico Dinámico No Lineal

Con este método la estructura es modelada de manera similar al análisis dinámico lineal, pero incorporando directamente la respuesta inelástica del material. La principal diferencia es que el sismo de entrada sólo puede ser modelado usando una función histórica-temporal, en la cual implica una evaluación paso a paso en el tiempo de la respuesta del edificio. Es la técnica de análisis más sofisticada disponible. Es posible incluir la participación de los componentes no estructurales y, además, se puede incluir la interacción suelo-estructura.

Esta técnica requiere el uso de programas computacionales sofisticados 2D o 3D y los resultados deben ser utilizados cuidadosamente, debido a las posibles incertidumbres existentes en el modelo, así como también, en la representación de la acción sísmica.

La respuesta puede ser muy sensible a las características del sismo de entrada, por lo tanto, se requieren varios análisis histórica-temporal usando diferentes registros de acelerogramas. Este tipo de análisis para predecir las fuerzas y desplazamientos bajo un movimiento sísmico es muy costoso. El principal valor de un análisis dinámico no lineal es que constituye una potente herramienta de investigación, que permite simular el comportamiento de una estructura en detalle, es decir, para describir los desplazamientos esperados así como la distribución y propagación del daño, la distribución de esfuerzos verticales y de cortante y la forma de la curva histerética.

4.3.4.- Análisis Sísmico Basado en Desplazamiento

A diferencia de las metodologías usadas por el diseño basado en fuerzas, los procedimientos basados en desplazamientos usan desplazamientos en lugar de fuerzas como parámetros de diseño. El comportamiento sísmico de la estructura es controlado por los desplazamientos de las plantas o derivas, dado que está directamente relacionado con el daño.

Según varios estudios, la relación existente entre el desplazamiento inelástico y el elástico basado en análisis no lineales dependientes del tiempo en estructuras perfectamente elasto-plásticas SDOF (sistema de un grado de libertad). Ambos concluyeron que para estructuras de período corto el desplazamiento inelástico excede el del SDOF elástico, mientras que para estructuras de medio-largo período, el desplazamiento era casi igual.

El límite entre los períodos de SDOF corto y largo podía definirse en términos del período característico del terreno, T_g , que es el período límite entre los rangos de velocidad constante y aceleración constante del espectro de respuesta elástica del movimiento del terreno. Dependiendo de cómo el sistema SDOF equivalente, que representa el sistema real MDOF (sistema de múltiples grados de libertad), sea definido, hay varias propuestas para el diseño sísmico basado en desplazamientos.

El diseño sísmico basado en esas propuestas es comúnmente denominado “Diseño Directo Basado en Desplazamientos” (Direct Displacement-Based Design, DDBD). En estos procedimientos, un sistema inelástico equivalente SDOF se define mediante un análisis de capacidad de la estructura real MDOF, en términos de período efectivo, rigidez, masa y amortiguamiento para un desplazamiento máximo determinado.

4.3.5.- Diseño Sísmico Basado en Espectros de Energía

Desde que Housner y Akiyama sentaron las bases del método basado en la energía en la segunda mitad del siglo XX, ha habido un creciente interés entre los investigadores por éstas metodologías.

Como ningún otro procedimiento de diseño, los métodos basados en la energía se enraízan en la premisa de que la capacidad de la estructura (en términos de absorción/disipación de energía) debería exceder la demanda sísmica (en términos de energía sísmica aportada). El problema ahora es determinar la energía ejercida por un sismo sobre la estructura y cómo se distribuye la energía en las plantas y cómo es disipada por los elementos estructurales.

De acuerdo con Housner la energía aportada a la estructura es disipada parte por el amortiguamiento y el resto, almacenada o disipada en la estructura como energía cinética en el movimiento de la masa y energía potencial elástica/plástica de los elementos estructurales. Si la estructura no es capaz de absorber la parte de energía aportada por el sismo no disipada por el amortiguamiento en el rango elástico las tensiones en los componentes estructurales excederá el límite elástico, incurriendo en tensiones plásticas y deformaciones permanentes que pueden llevar al colapso la estructura. Si la estructura está provista con suficiente capacidad para disipar energía a través de deformaciones inelástica sin colapsar, superará el terremoto.

Akiyama demostró que la energía total aportada por un sismo es una cantidad estable que depende principalmente de la masa total del sistema y del período fundamental de vibración de la estructura.

4.3.6.- Diseño Sísmico Basado en el Comportamiento

La ingeniería basada en comportamiento (PEB) fue creada por el comité Vision 2000 [SEAOC 1995] inicia con la concepción de un proyecto y dura toda la vida del edificio, es decir, comienza con la selección de los objetivos de comportamiento y con la identificación del peligro sísmico. Los objetivos de comportamiento se seleccionan y expresan en términos de los niveles esperados de daño. La ingeniería sísmica basada en comportamiento, involucra el diseño completo y permite que el edificio sea construido para resistir sismos de diferentes magnitudes, permitiendo ciertos límites de daño. La limitación de los estados de daño se refiere al término de niveles de comportamiento.

En la ingeniería basada en comportamiento, sirve para la verificar si el diseño sísmico es adecuado es el análisis de aceptabilidad. Los valores límite de los diferentes parámetros de respuesta estructural completan los criterios de aceptabilidad del diseño. Los parámetros de respuesta son medidas de la respuesta estructural que pueden estar correlacionados con los niveles de daño y con los objetivos del comportamiento. Los parámetros más críticos son la deriva, el desplazamiento, la ductilidad de demanda, la energía de demanda y la aceleración.

4.4.- DISEÑO SÍSMICO POR COMPORTAMIENTO

El comportamiento sísmico resistente de edificios determina el nivel de desempeño deseado de un edificio para una o varias demandas sísmicas. El comportamiento sísmico puede estar descrito por el máximo estado de daño permitido, para un nivel de demanda sísmica.

El diseño por comportamiento se realiza eligiendo ciertos elementos del sistema estructural, que serán diseñados y estudiados en detalle de manera apropiada para asegurar la disipación energética bajo el efecto de deformaciones importantes, mientras todos los otros elementos estructurales resisten suficientemente para que las disposiciones elegidas para disipar la energía estén aseguradas.

4.4.1.- Vulnerabilidad Sísmica

La vulnerabilidad sísmica de una edificación es un conjunto de parámetros capaces de predecir el tipo de daño estructural, el modo de fallo y la capacidad resistente de una estructura bajo ciertas condiciones probables de sismo. La vulnerabilidad sísmica no solo depende del edificio de estudio en cuestión, sino también del lugar. Es decir, dos edificios iguales tendrán mayor o menor vulnerabilidad dependiendo del lugar, por esto la importancia de las zonas de alta peligrosidad sísmica.

La Vulnerabilidad Sísmica también se puede definir como la cuantificación del daño o grado de daño que se espera sufra una determinada estructura o grupo de estructuras, sometida o sometidas a la acción dinámica de una sacudida del suelo de una determinada intensidad.

4.4.2.- Peligrosidad Sísmica

La peligrosidad sísmica, es la probabilidad de ocurrencia, dentro de un periodo específico de tiempo y dentro de una región determinada, movimientos de suelo cuyos parámetros; aceleración, velocidad, desplazamiento, magnitud o intensidad son cuantificados.

Para la evaluación se debe considerar los fenómenos que se producen desde el hipocentro hasta el sitio de interés.

Para el diseño sísmico de estructuras, fundamentalmente se necesita conocer cuál es la aceleración máxima del suelo que se espera en la zona que se va a implantar el proyecto el que deberá cumplir con la filosofía de diseño durante la vida útil de la estructura.

4.4.3.- Ductilidad Estructural

La ductilidad es una propiedad básica en las estructuras sometidas a cargas sísmicas, esta propiedad es una descripción de su capacidad de soportar deformaciones no lineales sin pérdida considerable de resistencia, además de la capacidad para disipar energía sísmica a través de histéresis. La ductilidad es una propiedad deseable en elementos de hormigón armado y en conexiones de acero dado que induce a la redistribución de tensiones y puede dar indicios de una posible falla.

Para valorar la ductilidad de un elemento estructural se usa el factor de ductilidad, que se define como el cociente entre la deformación última de un análisis de capacidad y la deformación en la fluencia:

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde:

- μ Ductilidad Estructural
- Δu Deformación de pérdida de resistencia
- Δy Deformación para alcanzar la fluencia

Lo más importante del factor de ductilidad de una estructura es que a través de su conocimiento se sea capaz de determinar hasta qué punto la estructura es segura frente a un sismo dado o en qué momento puede colapsar. Para asegurar la ductilidad de un elemento estructural se requiere que los materiales posean ductilidad.

Una fuente deseable de deformación inelástica en una estructura o elemento estructural es la rotación en potenciales rótulas plásticas.

4.4.4.- Propósitos del Diseño Sísmico por Comportamiento

Los objetivos básicos de diseño sísmo resistente son el de evitar colapsos de estructuras durante sismos de gran intensidad que se presentan durante la vida útil de estas estructuras y que además éstas no presenten daños de consideración durante sismos moderados, es decir aquellos que son frecuentes en la mencionada vida útil.

Es así que, como parte de este propósito, la comunidad internacional de Ingeniería Estructural ha resaltado la importancia de complementar la fase numérica del diseño sísmico con una fase conceptual y de implementación basadas en el control de la respuesta dinámica de las estructuras sísmo resistentes.

A partir del año de 1992, la filosofía de diseño por desempeño se ha constituido dentro de este contexto como la alternativa más viable para el planteamiento de metodologías de diseño sísmico que den lugar a estructuras que satisfagan las cada vez más complejas necesidades de las sociedades modernas. Los avances logrados hasta el momento han permitido alcanzar los requerimientos de diseño sísmico basados en esta filosofía y toda la nueva generación de códigos está basada en ella.

Con este fin la Sociedad de Ingenieros Estructurales de California SEAOC estableció el Comité Visión 2000 el cual describe el concepto de Diseño por Comportamiento como: *“La selección de los objetivos de diseño, sistemas estructurales y configuración apropiados en el dimensionamiento y detallado de una estructura, así como de sus elementos no estructurales y contenido lo que se entiende como la fase numérica de esta filosofía de diseño y la garantía del control de la calidad durante la construcción y del mantenimiento a largo plazo de manera que a niveles especificados de movimiento sísmico, y con niveles predefinidos de confiabilidad, la estructura no se dañe más allá de ciertos estados límite de daño a otros estados de daño sin que esto ponga en riesgo su estabilidad”*.

Esto significa controlar el daño e interrupción del servicio de la estructura durante un sismo mediante la consideración explícita de las deformaciones, para esto se debe contar, con procedimientos más confiables para la determinación de las demandas máxima y acumulada de deformación plástica.

4.4.5.- Recomendaciones del Comité Visión 2000

Las normas sismo resistentes que están vigentes tienen un objetivo principal, cual es que la estructura tenga un buen comportamiento inelástico ante un sismo severo, el mismo que se define mediante estudios de peligrosidad sísmica, considerando una vida útil de la estructura de 50 años y con un 10% de probabilidad de excedencia.

Este sismo tiene un periodo de retorno que esta alrededor de los 475 años. Para este evento que tiene muy poca probabilidad de registrarse durante la vida útil de la estructura, se desea que la edificación disipe la mayor cantidad de energía y no colapse. De tal forma que el objetivo principal de la mayor parte de los códigos es salvar vidas para el sismo severo.

Por este motivo es fundamental una vez que se ha terminado de diseñar los elementos estructurales verificar el comportamiento que va a tener la edificación ante sismos de menor intensidad y que de seguro se van a registrar durante la vida útil de la estructura, hay que verificar el desempeño en términos estructurales y si se cree conveniente en términos económicos.

Es por eso que la misión que tiene el Comité Visión 2000 es *“mirar al futuro y desarrollar un marco de referencia para procedimientos que condujesen a estructuras de desempeño sísmico predecible”*. Concretamente, saber cuál es el comportamiento que se espera de una estructura ante un determinado evento sísmico, comportamiento que está en función de uso que tenga la edificación.

El comité Visión 2000, definió cuatro sismos de análisis, que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.1.- Sismos de Análisis establecidos por el COMITÉ VISIÓN 2000

SISMO	VIDA ÚTIL T	PROBABILIDAD EXCEDENCIA P*	PERIODO DE RETORNO tr	TASA ANUAL EXCEDENCIA p1
Frecuente	30 años	50%	43 años	0.02310
Ocasional	50 años	50%	72 años	0.01386
Raro	50 años	10%	475 años	0.00211
Muy raro	100 años	10%	970 años	0.00105

En donde la tasa anual de excedencia p1 se obtiene en función de la probabilidad de excedencia P*, durante la vida útil t.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción, define igual cuatro sismos de amenaza sísmica, que son los siguientes:

Tabla 4.2.- Amenaza Sísmica según Norma Ecuatoriana de la Construcción

NIVEL DE SISMO	SISMO	PROBABILIDAD EXCEDENCIA 50 años	PERIODO DE RETORNO tr	TASA ANUAL EXCEDENCIA p1
1	Frecuente (Menor)	50%	72 años	0.01389
2	Ocasional (Moderado)	50%	225 años	0.00444
3	Raro (Severo)	10%	475 años	0.00211
4	Muy raro (Extremo)	10%	2500 años	0.00040

4.4.6.- Comportamiento esperado

En la Tabla 4.3 se indica una descripción resumida de las definiciones utilizadas por el Comité Visión 2000 para los diferentes niveles de desempeño, expresado en términos de los efectos que un sismo puede dejar en las edificaciones.

De acuerdo al uso que va a tener una estructura, el comité Visión 2000, ha presentado un nivel mínimo de desempeño, el mismo que se indica en la Tabla 4.3, para tres tipos de edificaciones: básica, esencial y de seguridad crítica.

Tabla 4.3.- Definiciones del desempeño estructural según NEHRP y VISIÓN 2000.

VISIÓN 2000	NEHRP	DESCRIPCIÓN
OPERACIONAL	COMPLETAMENTE OPERACIONAL	La edificación permanece en condiciones aptas para su uso normal, se esperan daños mínimos. Todos los sistemas de abastecimiento y líneas vitales deben estar en funcionamiento, de tal manera que el edificio entra en funcionamiento inmediatamente
INMEDIATAMENTE OCUPACIONAL	OCUPACIONAL	No hay daño significativo a la estructura la misma que se mantiene muy cerca de la resistencia y la rigidez que tenía antes del sismo. Los componentes estructurales son seguros y mantienen su función. El edificio puede ser utilizado luego de pequeños arreglos.
SEGURIDAD DE VIDA	SEGURIDAD DE VIDA	Daño significativo a los elementos estructurales con reducción sustancial en la rigidez pero tienen un margen de seguridad antes del colapso. Elementos no estructurales seguros pero con daño. La edificación podrá funcionar luego de ser reparada y reforzada
PREVENCIÓN DE COLAPSO	CERCA DEL COLAPSO	Daño sustantivo estructural y no estructural. Existe gran degradación de resistencia y rigidez de la estructura, solo queda un pequeño margen para llegar al colapso.

El diseño sísmico de estructuras por comportamiento, consiste en verificar el desempeño en términos estructurales y económicos que va a tener la edificación para cada uno de los sismos indicados en la Tabla 4.4 de acuerdo al uso de la misma. Esta verificación se la realiza sobre la base de las distorsiones máximas permitidas, en base al grado de daño local y global de la estructura y en base al Índice de Comportamiento.

Tabla 4.4.- Sismos de Análisis y Comportamiento en edificaciones VISIÓN 2000.

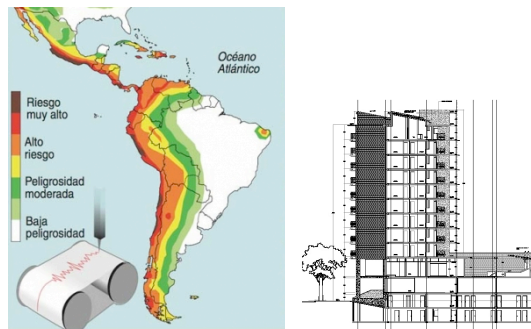
SISMO	Operacional	Inmediatamente Ocupacional	Seguridad de Vida	Prevención de Colapso
Frecuente	▲		-	-
Ocasional	●	▲		-
Raro	■	●	▲	-
Muy Raro		■	●	▲

- ▲ Edificios Básicos
- Edificios Esenciales
- Edificios Especiales

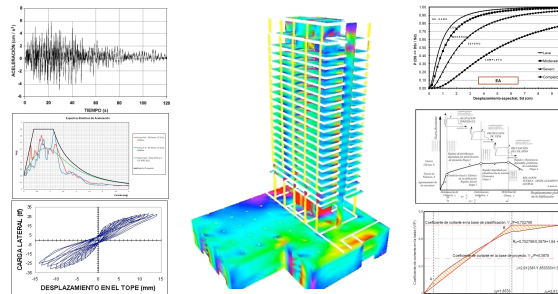
4.5.- Comportamiento Sismo Resistente de Edificios de Hormigón y Acero

Para iniciar el diseño sísmico por comportamiento de estructuras, se deben considerar parámetros iniciales que comúnmente no se toman en cuenta para otros procedimientos de diseño, esto garantiza un análisis completo a nivel estructural en base al servicio que brindan las estructuras, y la importancia de las mismas, de acuerdo a esto se deben tomar en cuenta los siguientes parámetros:

Diseño Conceptual y Objetivos de desempeño



Análisis Diseño y Comportamiento Estructural



Control de calidad de ejecución y mantenimiento de la Estructura



Figura 4.3.- Parámetros para Diseño Sísmico por Comportamiento de Estructuras.

4.5.1.- Diseño Conceptual y Objetivos de desempeño

La ingeniería estructural conceptual es la elaboración de propuestas de solución en términos de conceptos generales, es decir ideas que permitan resolver el problema de la existencia de la estructura. Se refiere a la posibilidad del equilibrio y de la estabilidad que debe existir mucho antes de cualquier comprobación numérica.

Es importante definir el objetivo de comportamiento de acuerdo al nivel de amenaza sísmica y tipo de estructura, definir una estructura sismo resistente, eligiendo elementos estructurales y organizándolos en el espacio. Es la etapa más importante del proceso de análisis y diseño, pues una vez definido el sistema resistente el resto del proceso es una consecuencia.



Figura 4.4.- Diseño Conceptual de Edificio para Diseño en Hormigón y Acero.

El edificio en estudio que se ilustra en la Figura 4.4 se implantará en una zona de alta peligrosidad sísmica en un perfil de suelo Tipo D, es un edificio que requiere operar continuamente por lo que se cataloga como una estructura esencial.

4.5.2.- Analisis Diseño y Comportamiento Estructural

Para realizar los análisis estructurales y el diseño de los elementos de la solución elegida es importante considerar que las dimensiones de los componentes estructurales deben ser aceptables para los espacios funcionales de la construcción al igual que para su economía.

Para realizar un análisis y diseño existen muchos programas de ingeniería estructural que incorporan las previsiones de los códigos de diseño, perfectamente estos procesos se deben realizar manualmente, tomando en cuenta que es muy importante un modelo estructural para realizar varios análisis y la verificación de la estructura y su comportamiento.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción indica que se deberá verificar un correcto desempeño sísmico en el rango inelástico prevención de colapso ante un terremoto de una probabilidad anual de excedencia 0.00004. La evaluación de la la estructura según los cuatro sismos propuestos por Visión 2000, requiere la aplicación de las curvas de peligrosidad sísmica de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, tomando la correspondiente a la ciudad de Ambato, por ser la ciudad con la cual se estableció el análisis inicialmente la Figura 4.5 contiene las curvas de Peligro Sísmico.

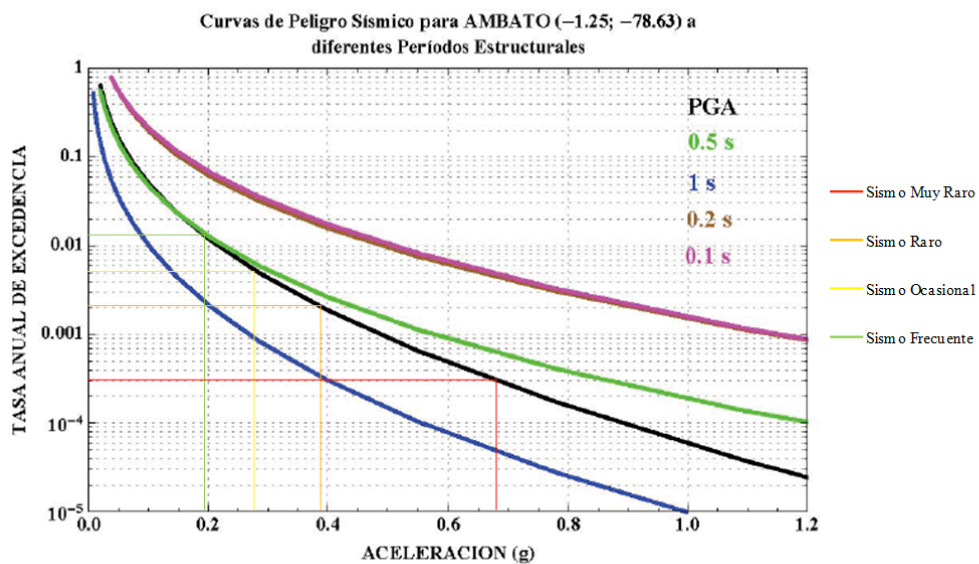
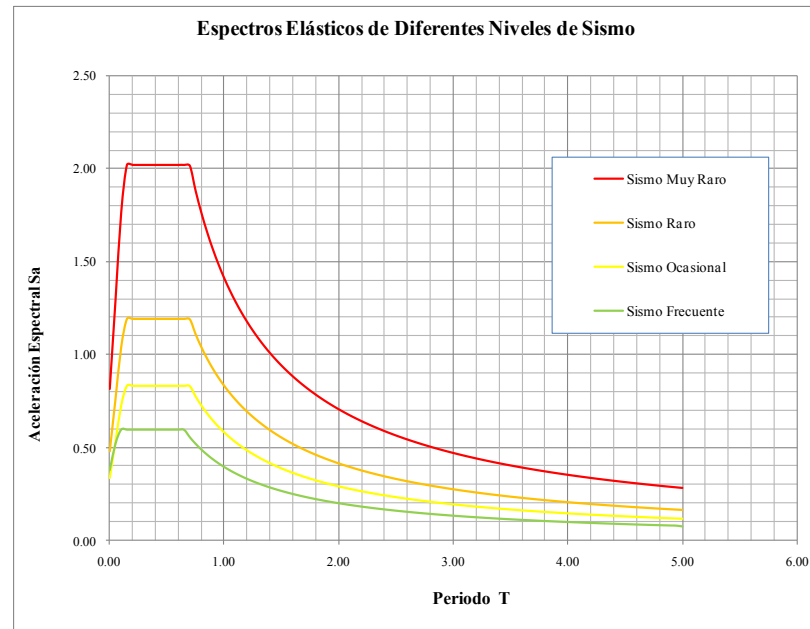
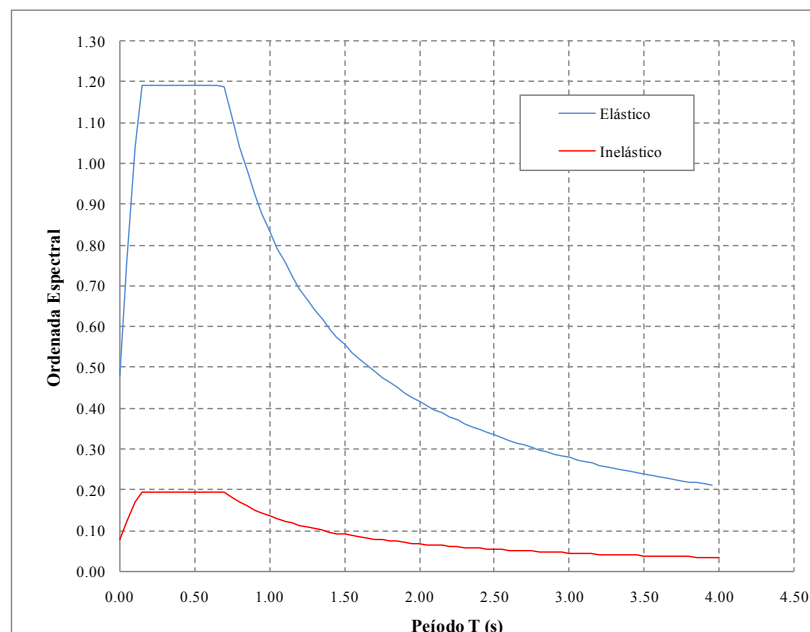


Figura 4.5.- Curvas de Peligro Sísmico NEC para Ambato y Sismos de Analisis.

De esta manera podemos construir los espectros elásticos para los sismos frecuente, sismo ocasional, sismo raro y sismo muy raro, como se ilustra en la Figura 4.6 con el procedimiento descrito en NEC-SE-DS, los mismos resultados se obtiene calculando un factor correspondiente para las aceleraciones en roca partiendo del sismo de diseño que corresponde a un sismo raro con un período de retorno de 475 años.



(a)



(b)

Figura 4.6.- Espectros para Ambato (a) Sismos de Análisis (b) Elástico e Inelástico

Para los análisis se utiliza lo establecido en la Norma Ecuatoriana de la Cosntrucción, la misma que indica los requisitos mínimos de cálculo y procedimientos de diseño sismo resistente, para el cortante basal, cálculo de fuerzas horizontales, control de las derivas de piso y otros efectos que deben ser tomados en cuenta en un análisis y diseño estructural.

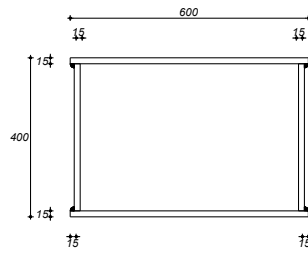
Tabla 4.5.- Cargas y Sobrecargas utilizadas en el Análisis Estructural

Niveles	Carga Muerta (Kg/m²)	Carga Viva (Kg/m²)	Carga Pared (Kg/m²)
Cubiertas	450	150	00
Entrepisos	450	250	150

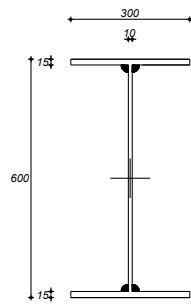
Realizando los análisis de cada edificio se obtienen las secciones de los elementos estructurales del sistema sismo resistente que se resumen en los siguientes gráficos contienen las secciones de columnas tipo su armado, las secciones de las vigas, su armadura positiva y negativa además y el detalle de la armadura utilizada, la Figura 4.7 indica las secciones sismoresistentes de los edificios en análisis.

Realizando las verificaciones de sismo resistencia de los elementos propuestos se evalúa el modelo estructural para verificar inicialmente si desde su concepción estructural la edificación presentará problemas en su comportamiento, luego se analiza si la estructura propuesta absorberá los esfuerzos presentados ante las sollicitaciones verificando el comportamiento de los elementos.

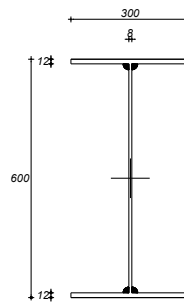
Los resultados de los modelos estructurales además de los cálculos presentan una estructura con una configuración estructural estable, esto se puede verificar al graficar el comportamiento de los edificios ante la demanda sísmica en el primer modo de vibración con un análisis estático lineal y un análisis dianámico lineal.



COLUMNA HSS 600x400

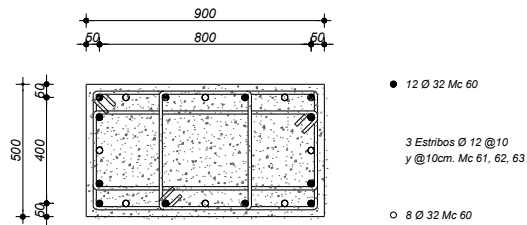


VIGA TIPO 1

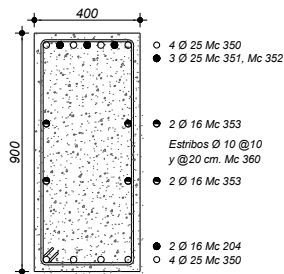


VIGA TIPO 2

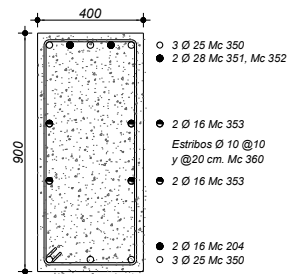
(a)



SECCIÓN COLUMNA 90x50



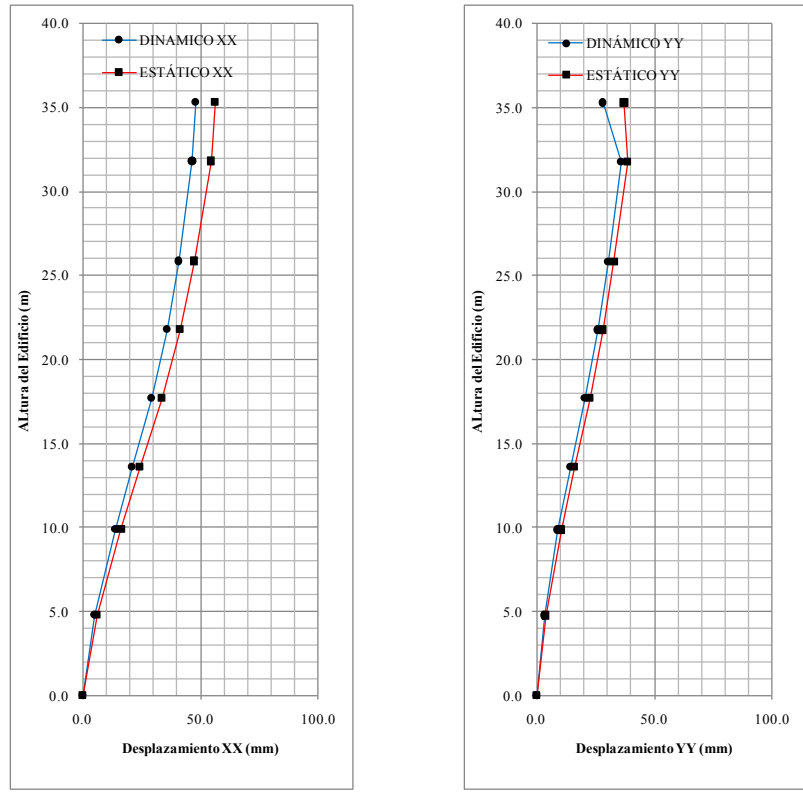
VIGA TIPO 1



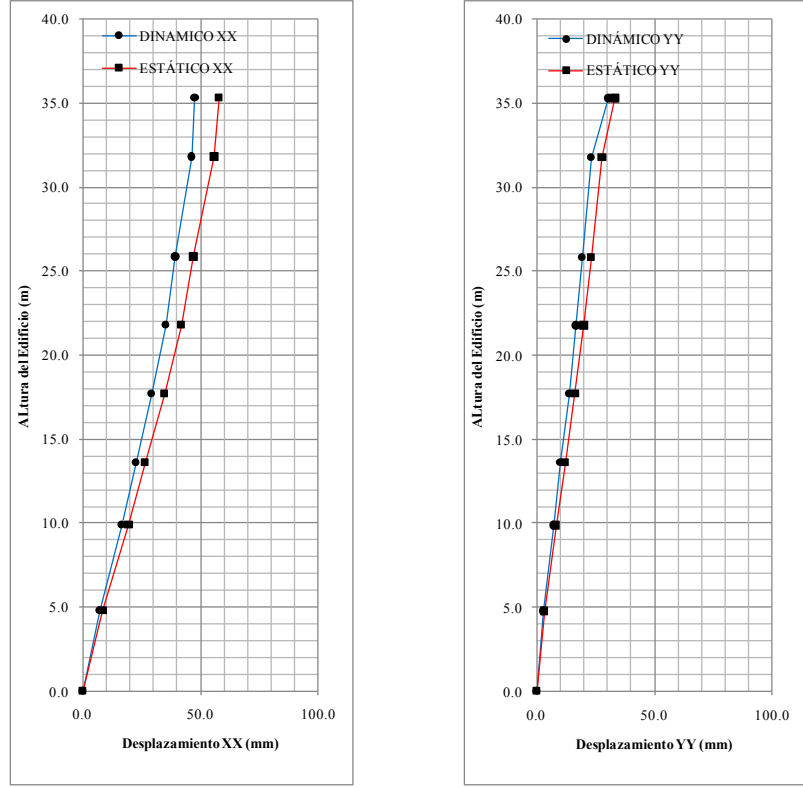
VIGA TIPO 2

(b)

Figura 4.7.- Secciones Sismo Resistentes de Edificios (a) Acero (b) Hormigón.

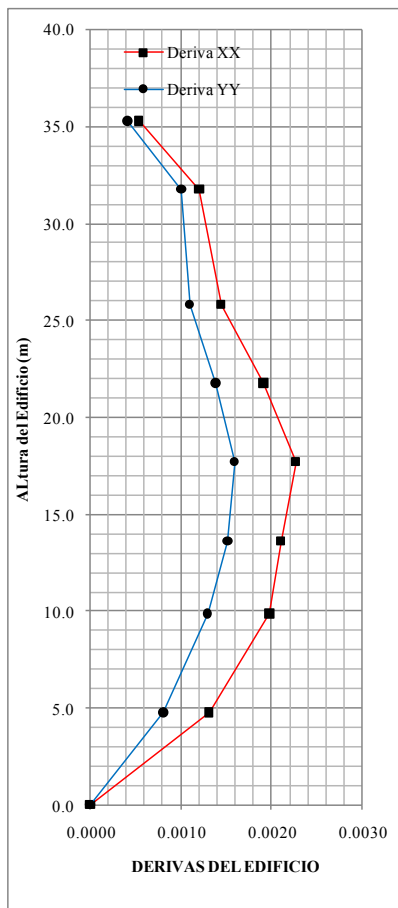
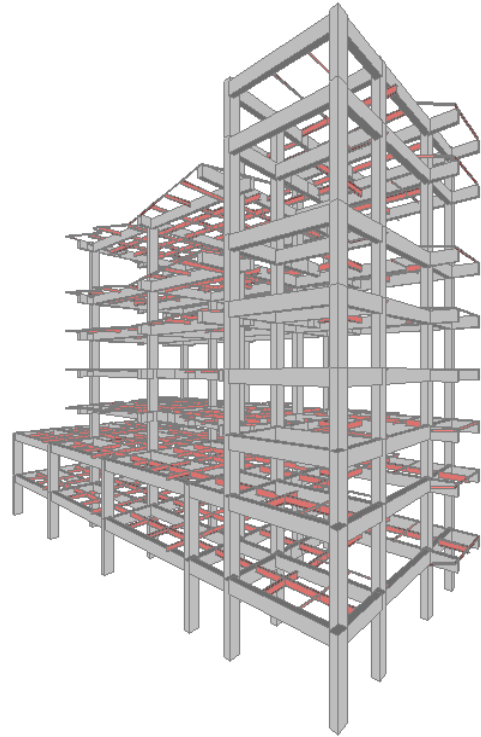
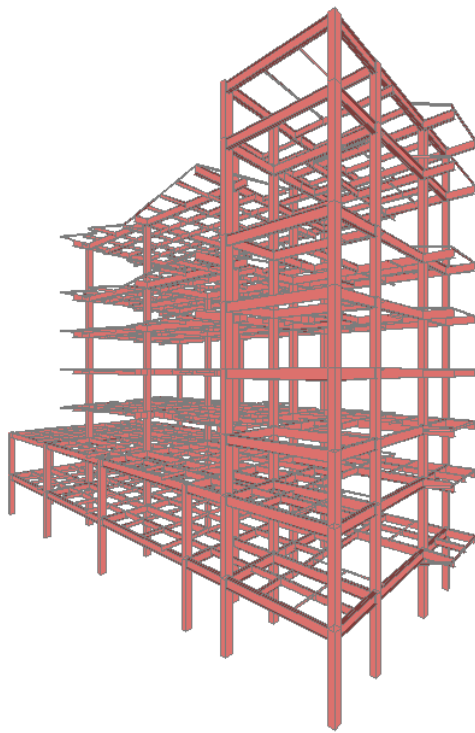


(a)

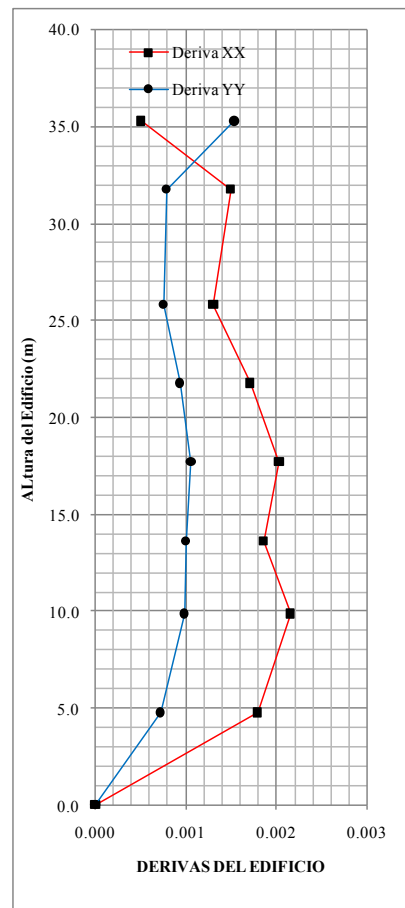


(b)

Figura 4.8.- Desplazamiento para Modelos sentidos X y Y (a) Acero (b) Hormigón.



(a)



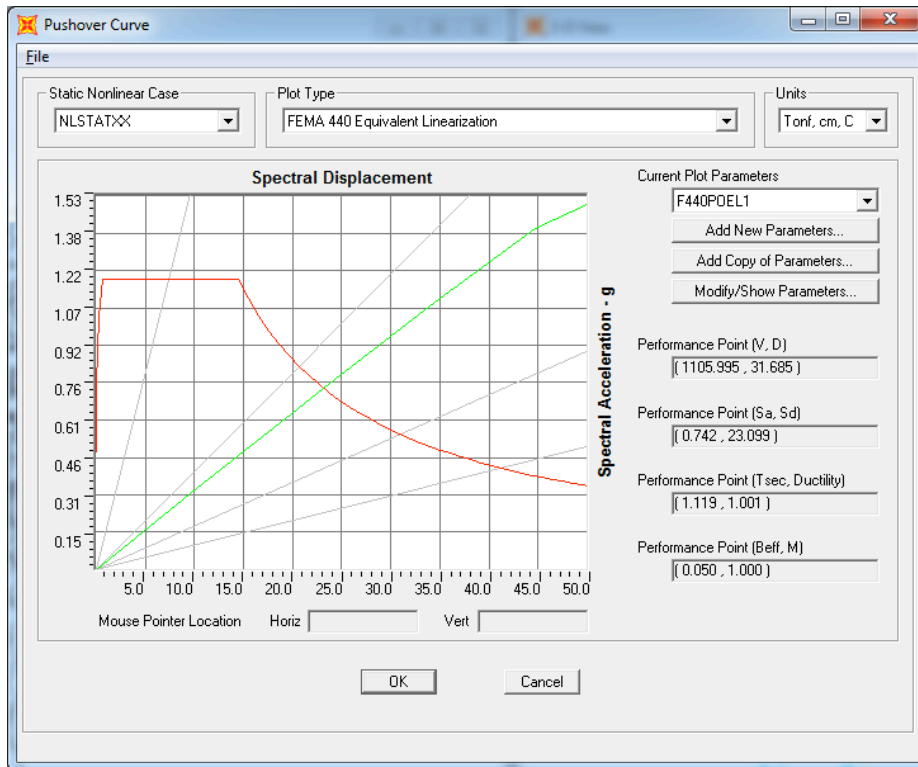
(b)

Figura 4.9.- Modelos Edificio y derivas de piso (a) Acero (b) Hormigón.

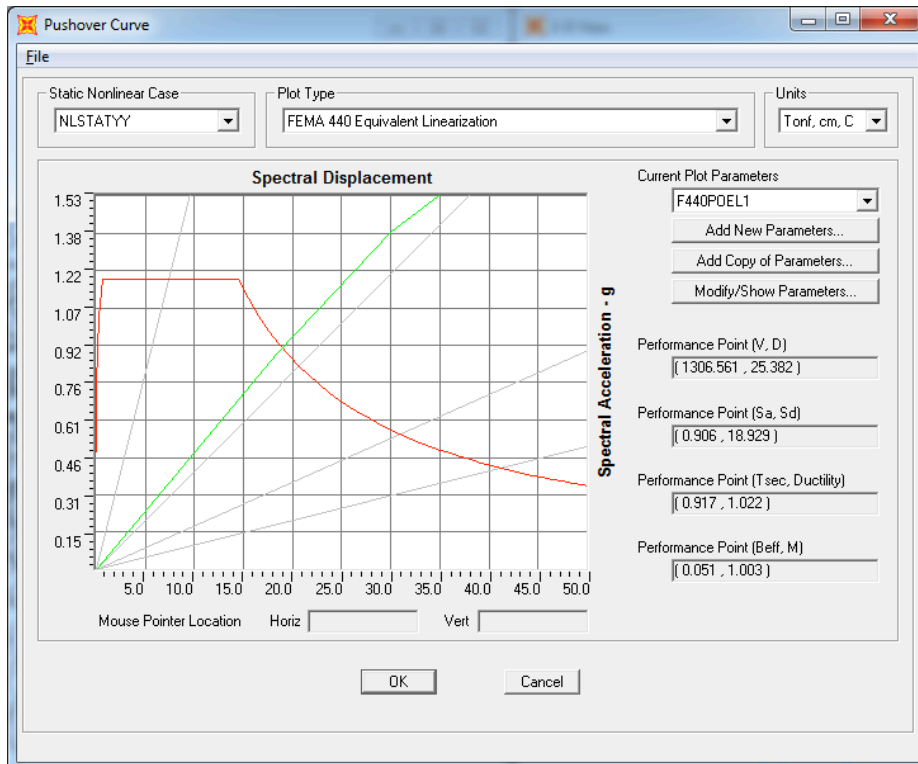
Para verificar el comportamiento de los edificios de hormigón y acero procedemos a ingresar en el modelo estructural las secciones finales y el mecanismo de rótulas para evaluar su comportamiento es importante definir un nudo de control de desplazamiento ubicado en el último piso. Los estados de cargas no lineales que conformarán las cargas gravitacionales y las cargas laterales, éstas pueden ser dos distribuciones diferentes para definir la curva de capacidad, se utilizará el caso más crítico para la verificación del comportamiento de la estructura, de acuerdo a *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures FEMA 440*.

Para obtener el punto de desempeño es necesario utilizar programas de calculo y así obtener la curva de capacidad la misma que se puede graficar con los espectros de demanda inelásticos, según *Improved Procedures for Equivalent Linearization* basados en ATC-40 que consiste en determinar la capacidad de la estructura considerando las propiedades inelásticas de las secciones de cada elemento del modelo, mediante un análisis estático no-lineal. La capacidad es representada por la relación entre la fuerza cortante basal y el desplazamiento lateral del último piso. La curva de capacidad por lo general representa la respuesta del primer modo basándose en la suposición de que éste sea el que predomina. La curva de demanda sísmica sobre la estructura se determina a partir del espectro de pseudo-aceleración del movimiento sísmico, escalado de acuerdo al amortiguamiento efectivo del sistema.

Para encontrar el punto de fluencia efectiva es necesario utilizar programas de calculo y así obtener la curva de capacidad y el modelo bilineal que está formado por dos rectas en donde el punto de intersección de las mismas es el punto de fluencia efectiva del sistema estructural, según *Improved Procedures for Displacement Modification* basados en FEMA 356, que es una curva de capacidad que define el límite entre el rango elástico e inelástico del comportamiento estructural. Se obtiene a partir del desplazamiento del sistema elástico de un grado de libertad que se corrige para estimar el desplazamiento en el último piso de una estructura de multiples grados de libertad. Se genera la curva de capacidad de la estructura mediante un análisis estático no-lineal y se construye una representación bilineal, calculándose el período fundamental efectivo y la fuerza cortante basal en fluencia.

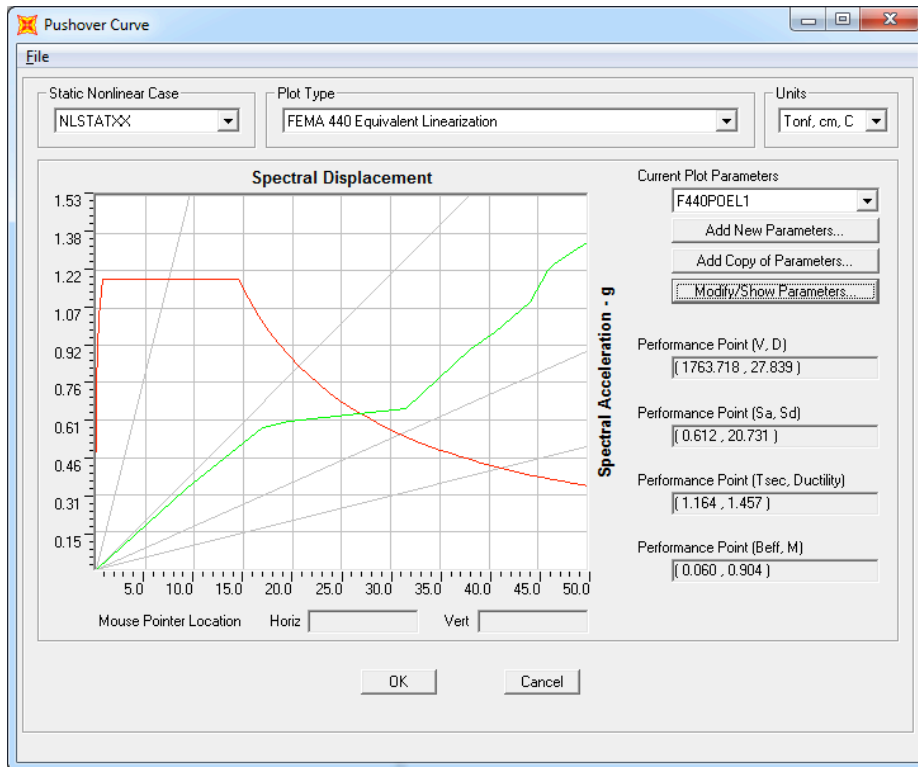


(a)

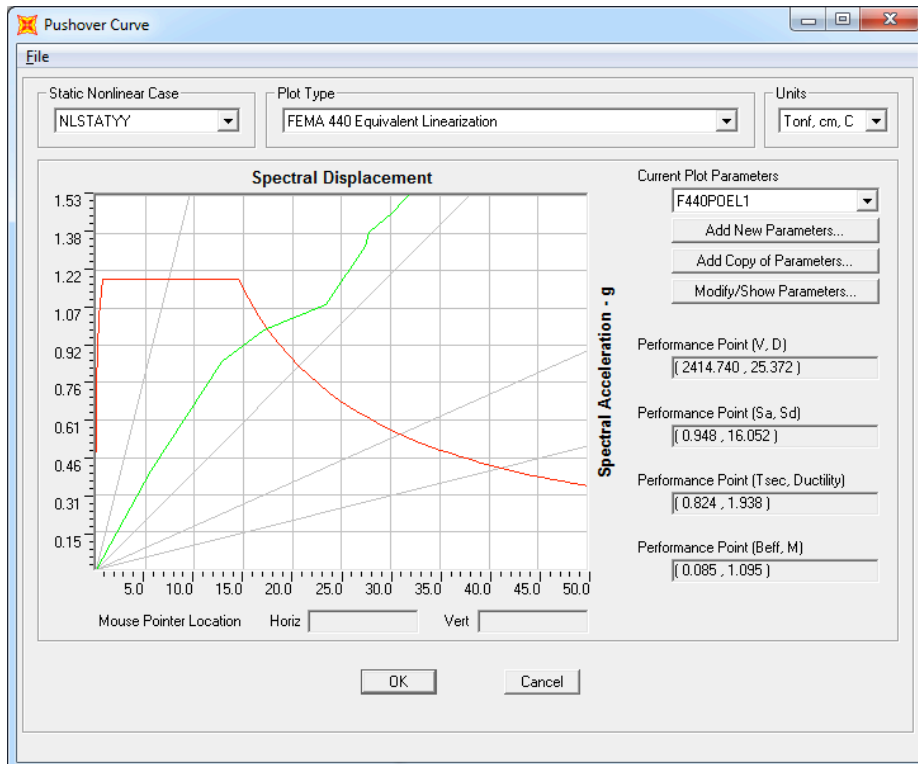


(b)

Figura 4.10.- Curva de Capacidad Edificio Acero (a) Sentido XX (b) Sentido YY
 Procedimientos mejorados para la linealización Equivalente

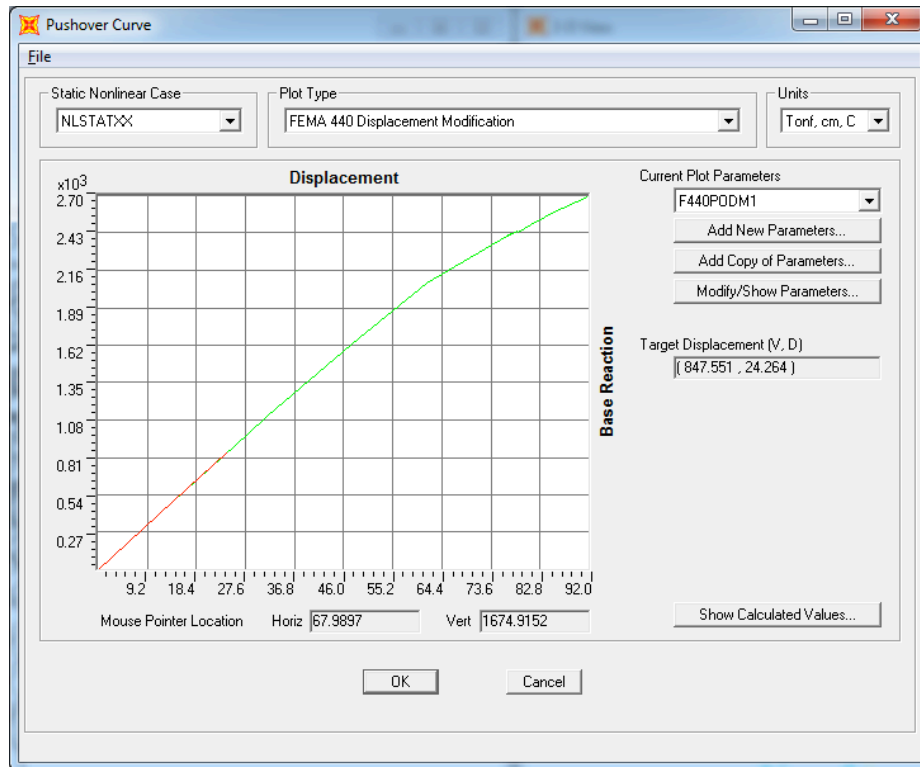


(a)

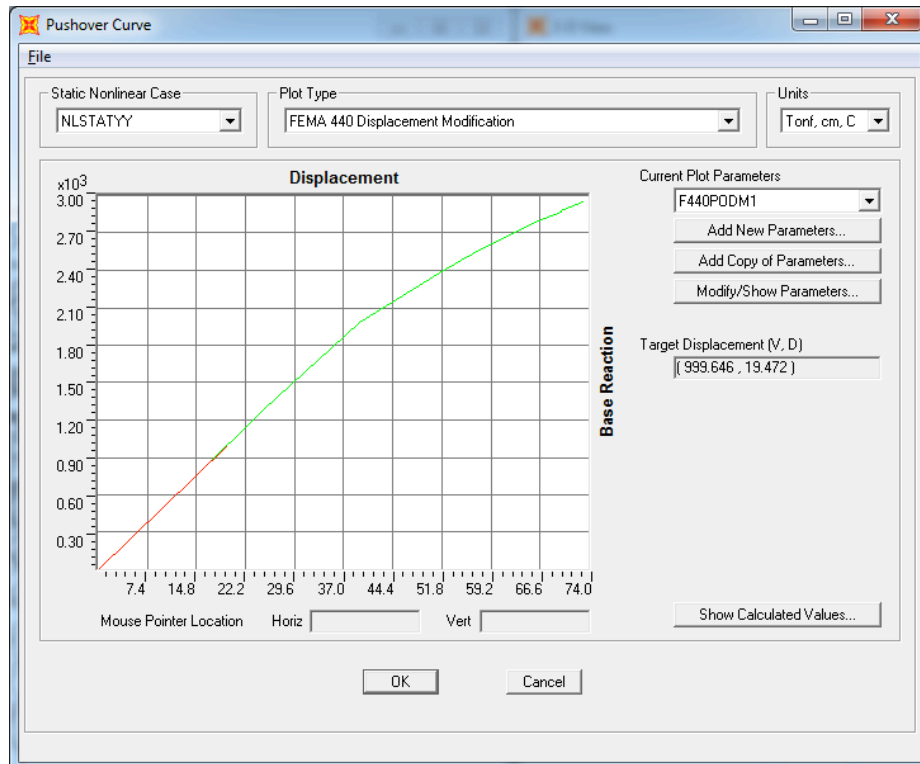


(b)

Figura 4.11.- Curva de Capacidad Edificio Hormigón (a)Sentido XX (b)Sentido YY
 Procedimientos mejorados para la linealización Equivalente



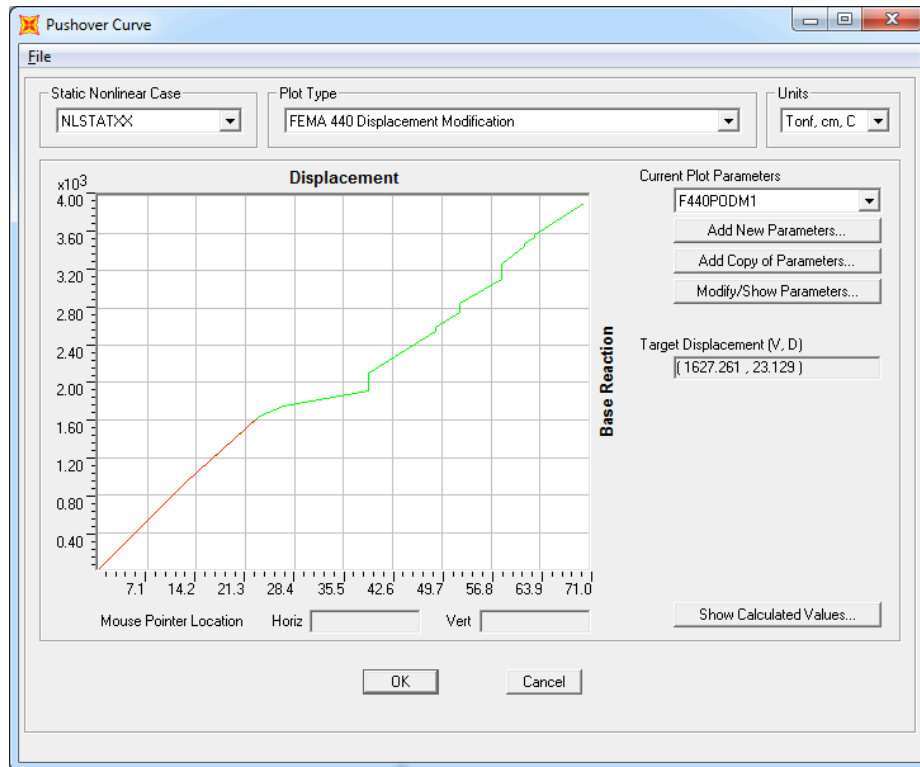
(a)



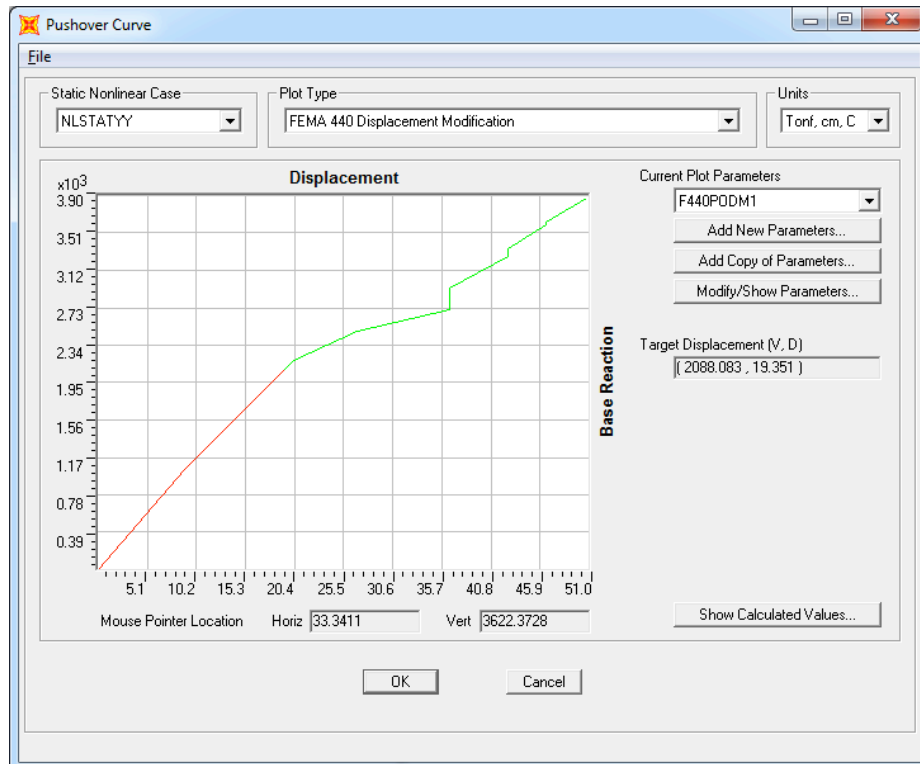
(b)

Figura 4.12.- Curva de Capacidad Edificio Acero (a) Sentido XX (b) Sentido YY

Procedimientos mejorados para modificación de desplazamientos



(a)



(b)

Figura 4.13.- Curva de Capacidad Edificio Hormigón (a)Sentido XX (b)Sentido YY
Procedimientos mejorados para modificación de desplazamientos

Tabla 4.6.- Coeficientes determinados según los Procedimientos mejorados
Modificación de desplazamientos para los edificios en análisis

Edificio	ACERO		HORMIGÓN	
	XX	YY	XX	YY
C0	1.37	1.32	1.38	1.55
C1	1.00	1.02	1.00	1.06
C2	1.00	1.00	1.00	1.00
Sa	0.57	0.70	0.60	0.86
Te	1.12	0.92	1.06	0.75
Ti	1.12	0.92	1.06	0.75
Ki	35.00	51.00	73.25	116.17
Ke	35.00	51.00	73.25	116.17
Alpha	1.00	1.03	0.91	0.87
R	2.34	1.90	2.38	3.04
Vy	491.67	738.40	932.32	1039.24
Dy	14.05	14.48	12.73	8.95
Weight	2007.70	2007.70	3684.92	3684.92
Cm	1.00	1.00	1.00	1.00

Los coeficientes calculados para la representación bilineal, de los edificios en análisis son: *C0* es un factor que relaciona el desplazamiento espectral de un sistema de un grado de libertad con el desplazamiento en el techo del sistema de varios grados de libertad. *C1* es un factor que relaciona el desplazamiento inelástico con el desplazamiento del sistema elástico. *C2* es un factor que representa el efecto de degradación de rigidez y deterioro de resistencia ó histéresis en el desplazamiento. *Sa* es la aceleración espectral del sistema elástico para el período *Te* y el amortiguamiento correspondiente. *Te* es el valor del periodo efectivo del sistema. *Ti* es el valor del periodo inicial. *Alpha* factor de rigidez post elástica. *R* factor de reducción de resistencia. *Vy* cortante basal de fluencia. *Dy* el desplazamiento de fluencia

Según los sismos de análisis el comportamiento esperado en las edificaciones, de tipo esencial deberá alcanzar un Nivel Totalmente Operacional para el Sismo Frecuente, un nivel Inmediatamente Ocupacional para un Sismo Ocasional, un Nivel de Seguridad de Vida para el Sismo Raro y Prevención del Colapso para el Sismo Muy Raro.

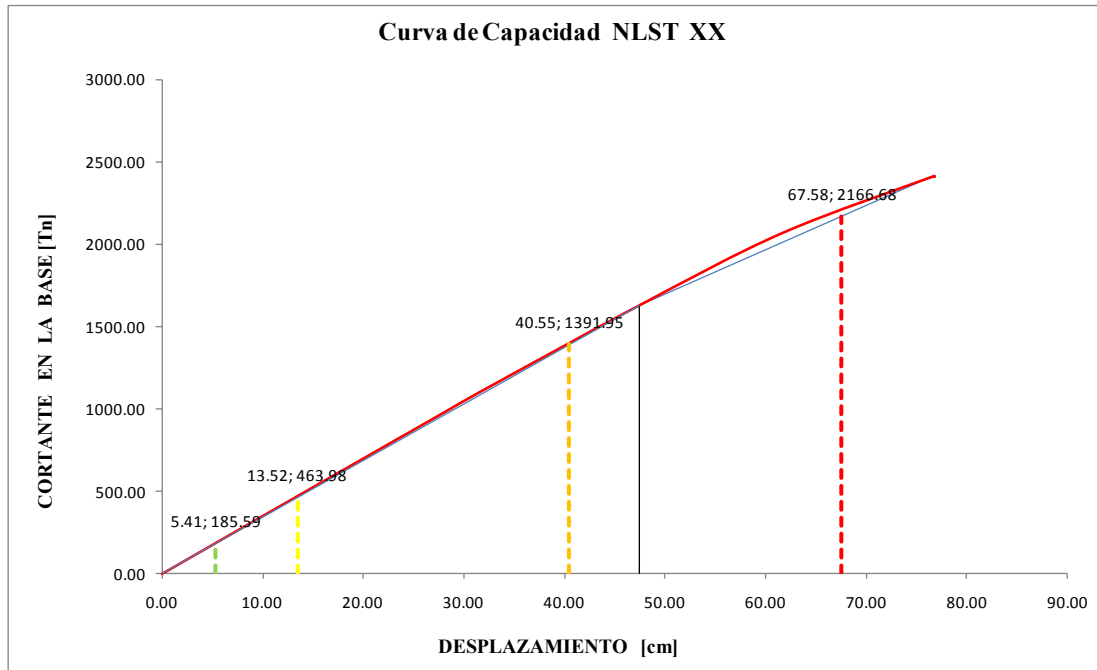
Para los sismos de análisis aplicando la Norma Ecuatoriana de la Construcción encontramos que la respuesta de la estructura ante los eventos sísmicos será elástica por tal motivo es necesario obtener los puntos de desempeño con el procedimiento de la demanda sísmica que propone el ATC-40 partiendo de las características del sitio de emplazamiento de la estructura en estudio, obteniendo resultados que desde el punto de vista estructural son coherentes en cuanto al comportamiento del edificio ya que es muy probable que al actuar un Sismo Raro sobre la edificación esta entrará al rango inelástico.

Ante la ocurrencia de Sismos Frecuentes la edificación alcanzará un punto de desempeño notable cumpliendo el objetivo de diseño de ser Totalmente Operacional, se aprecia que los edificios se comportarían en la zona elástica permanenciando en condiciones aptas para su uso normal, se esperan daños mínimos. Todos los sistemas de abastecimiento y líneas vitales estarán en funcionamiento de tal manera que el edificio entra en funcionamiento inmediatamente.

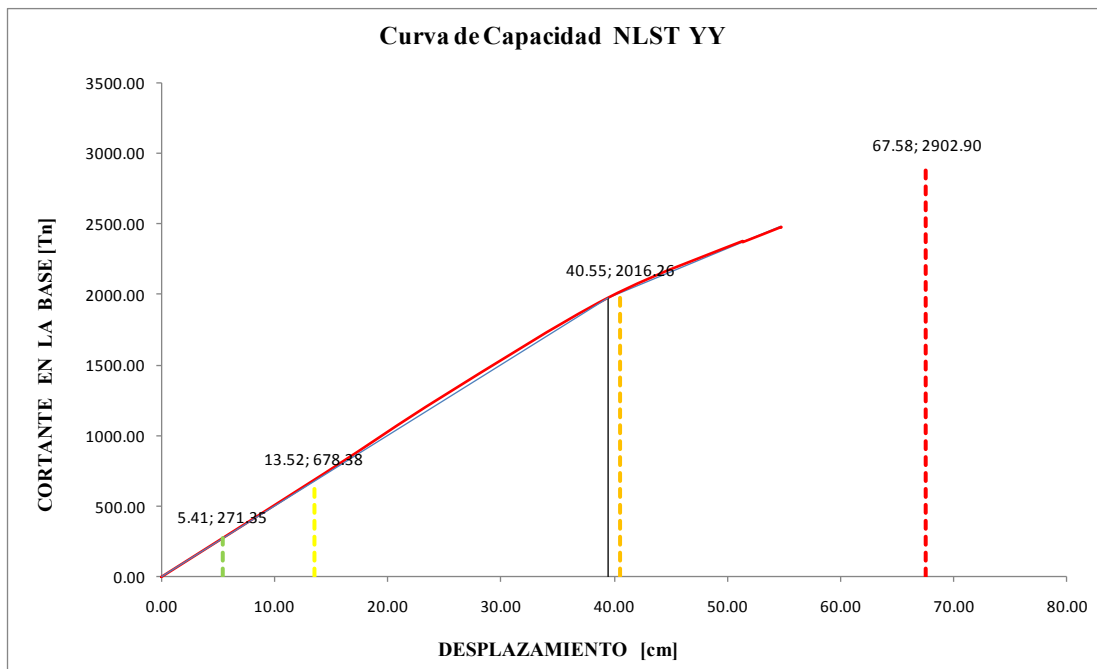
Tabla 4.7.- Derivas de Piso recomendadas por el Comité Visión 2000

Operacional	Inmediatamente Ocupacional	Seguridad de Vida	Prevención de Colapso	Colapso
< 0.2% +/-	< 0.5% +/-	< 1.5% +/-	< 2.5% +/-	> 2.5% +/-

Se presenta el resumen de las derivas obtenidas en nuestro modelo en comparación con las del Comité Visión 2000.

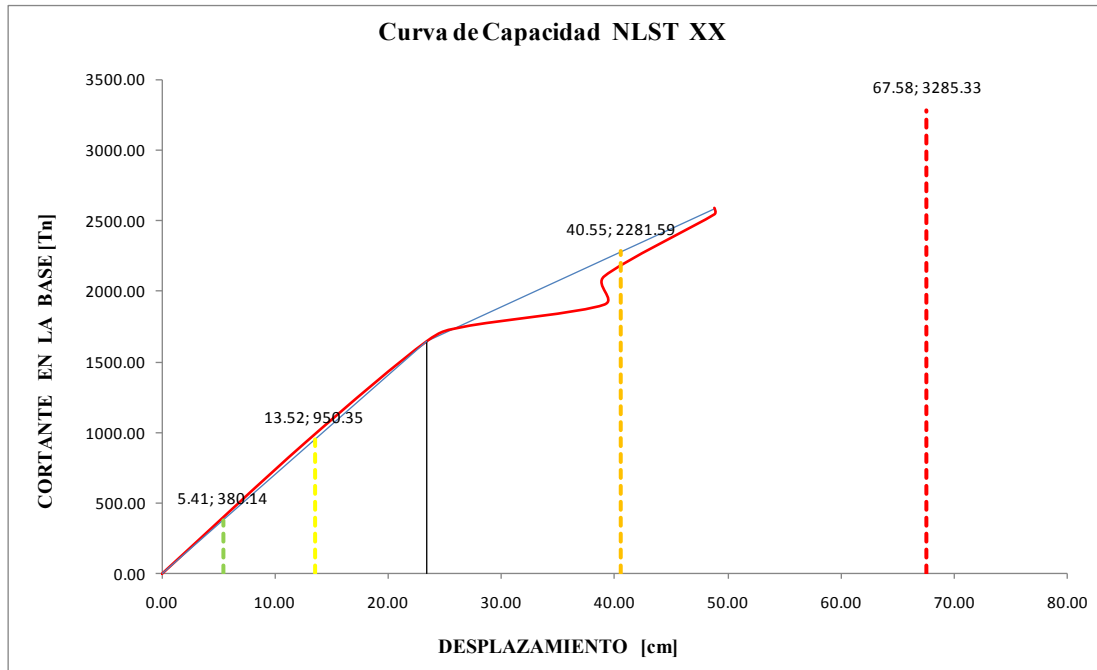


(a)

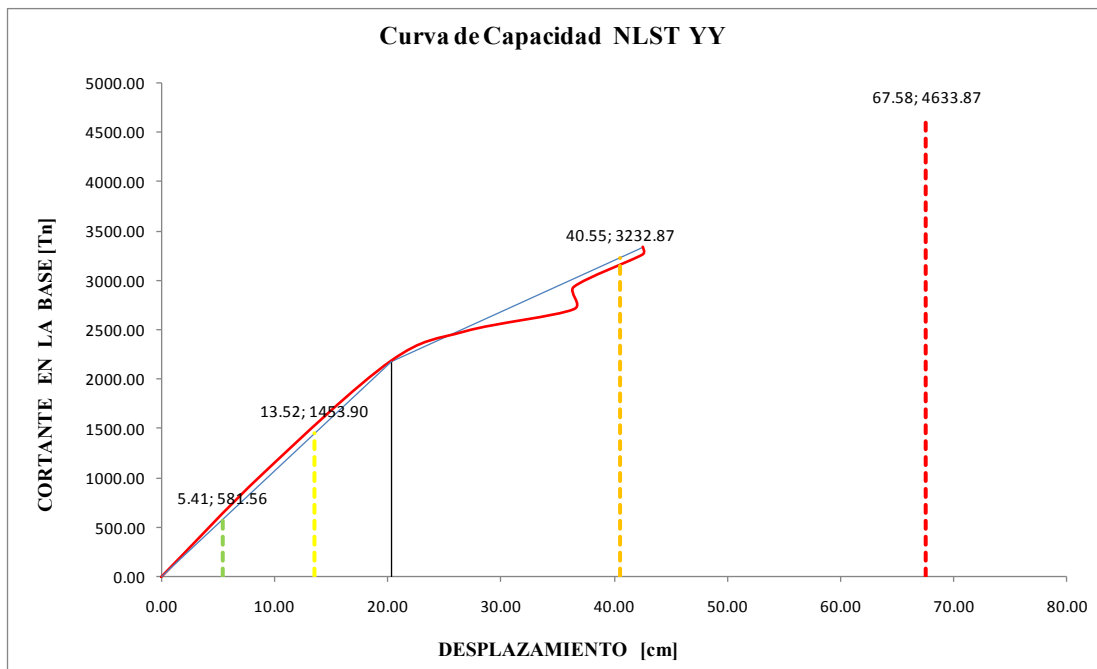


(b)

Figura 4.14.- Curva de Capacidad y Umbrales de Daño Edificio de Acero
(a) Sentido XX (b) Sentido YY



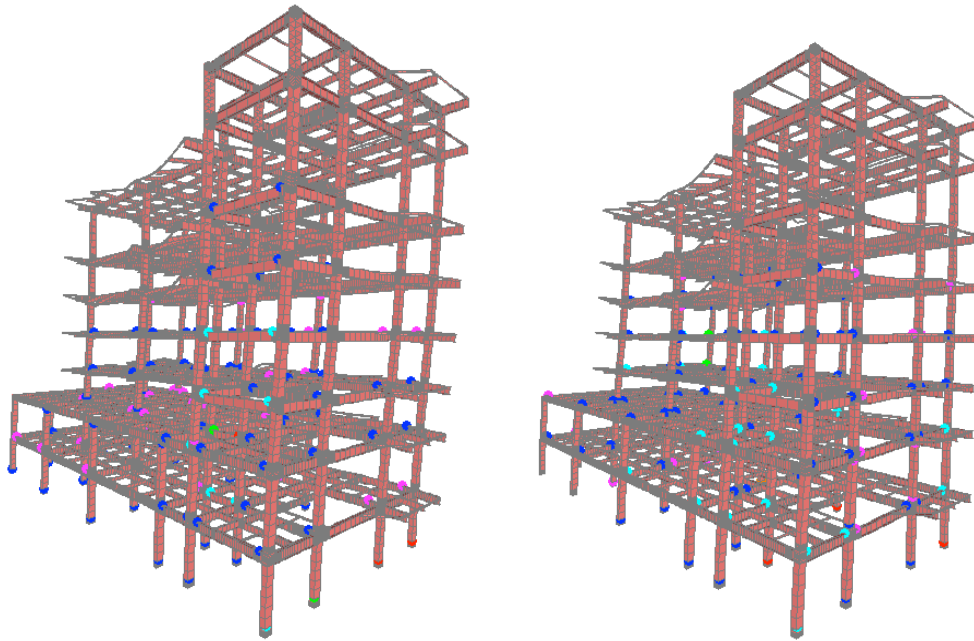
(a)



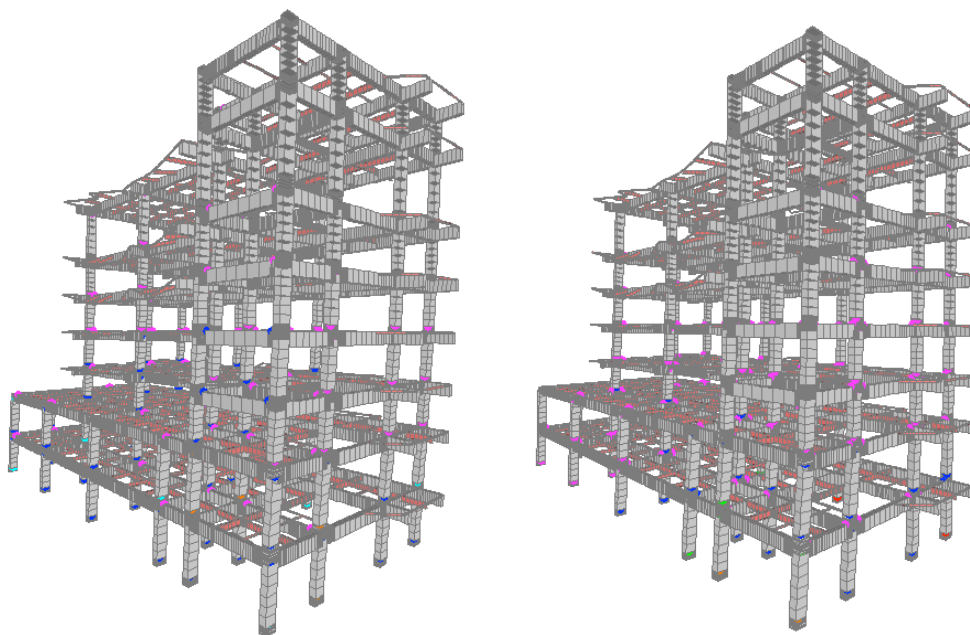
(b)

Figura 4.15.- Curva de Capacidad y Umbrales de Daño Edificio de Hormigón
(a) Sentido XX (b) Sentido YY

Para conocer la secuencia con que los elementos van sobrepasando el momento de fluencia e ingresando al rango no lineal utilizaremos una de las herramientas del programa con el objetivo de visualizar las deformaciones y la secuencia de la formación de las rotulas plásticas en los diferentes elementos estructurales.



(a)



(b)

Figura 4.16.- Rotulas plásticas para Edificios (a)Acero (b) Hormigón

La evolución de la falla de los elementos estructurales en los modelos es posible visualiza en pasos de formación y el progreso de las rótulas plásticas en los elementos estructurales, de esta manera es posible crear la secuencia de falla de los elementos de la estructura.

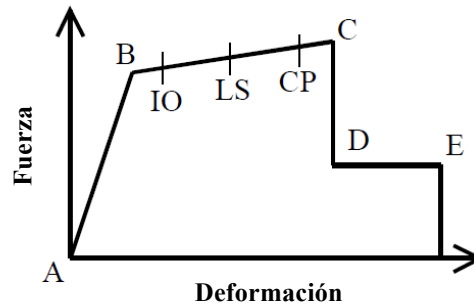


Figura 4.17.- Fuerza-Deformación y forma de degradación elementos estructurales

Analizando la Figura 4.17 que representa la curva de deformación plástica, en la que se ilustra el comportamiento fuerza-deformación en una rótula plástica, se identifican cinco puntos denominados A, B, C, D y E; entre B y C, se definen tres puntos marcados como IO Immediate Occupancy, LS Life Safety y CP Colapse Prevention.

- A** = Origen corresponde a la condición sin carga lateral.
- B** = Límite de fluencia nominal que corresponde al inicio de deformaciones.
- C** = Límite de seguridad estructural, punto de máxima capacidad.
- D** = Esfuerzo residual del elemento.
- E** = Colapso.

El tramo entre B y C tienen una pendiente entre el 5 y el 10%, pero como el punto C es difícil de predecir, puede considerarse una línea recta horizontal. La abscisa en C corresponde a la deformación en que comienza una degradación significativa de la resistencia. Para los elementos frágiles como el hormigón, esta deformación está muy cerca de la deformación a la que se alcanzó la fluencia. Para los elementos dúctiles como el acero, esta deformación es mayor que la deformación de fluencia.

Los tramos C-D y D-E pueden tener una pendiente especificada. La caída en la resistencia de C a D representa la falla inicial del elemento estructural. Puede estar asociado con fenómenos como la fractura del refuerzo longitudinal, desprendimiento del hormigón, o fallas en el confinamiento del refuerzo transversal. Más allá del punto C por lo general no es confiable la resistencia a cargas laterales. Por lo tanto no se admite deformación más allá de este punto.

El punto E es un punto que define la máxima deformación más allá de la cual el elemento ya no puede admitir la carga gravitacional. En algunos casos, la falla inicial en C puede resultar en la pérdida de resistencia gravitacional, en cuyo caso el punto E puede tener una deformación igual que en C.

De la misma manera que es posible asociar el daño de los elementos con la deformación, el comportamiento estructural de los edificios está asociado al daño que sufre la estructura luego de un evento sísmico, varias investigaciones han definido cinco estados de daño denominados:

- 0) Sin Daño Estructural
- 1) Daño Leve
- 2) Daño Moderado
- 3) Daño Severo
- 4) Daño Completo

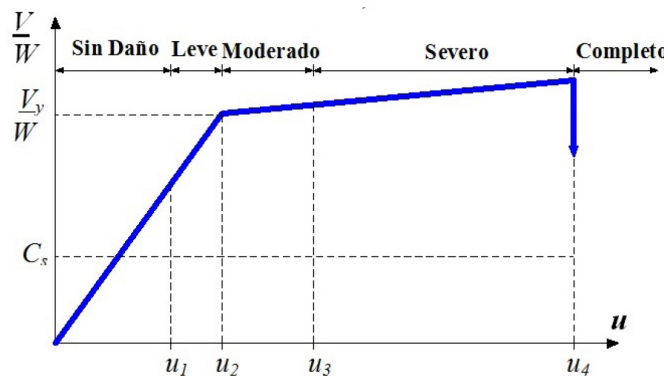


Figura 4.18.- Curva de Capacidad Bilineal y Desplazamiento asociado a cada límite de Daño [Coronel G. 2013]

El inicio de cada estado de daño está asociado con los desplazamientos $u1$, $u2$, $u3$ y $u4$ respectivamente como se ilustra en la Figura 4.18, los cuales son función del desplazamiento de fluencia uy y el desplazamiento último uu los rangos permisibles se ilustran en la Tabla 4.8, los límites indicados fueron tomados de los propuestos inicialmente en Directrices para la aplicación de la metodología de la vulnerabilidad de nivel II [Lagomarsino 2003] para su incorporación al proyecto de la comisión Europea [Risk UE Project 2004] que incluye un desplazamiento plástico definido por la Ec. 7.

$$\Delta uy = 0.90 \times uu - 0.70 \times uy \quad \text{Ec. (7)}$$

Tabla 4.8.- Desplazamiento asociado a cada límite de Daño





GRADO DE DAÑO	DEFINICIÓN	LÍMITE DE DESPLAZAMIENTO
0	Sin Daño Estructural	$\Delta < 0.70 \times uy$
1	Daño Leve	$0.70 \times uy < \Delta < 0.70 \times uy + 0.05 \times \Delta uy$
2	Daño Moderado	$0.70 \times uy + 0.05 \times \Delta uy < \Delta < 0.70 \times uy + 0.20 \times \Delta uy$
3	Daño Severo	$0.70 \times uy + 0.20 \times \Delta uy < \Delta < 0.70 \times uy + 0.50 \times \Delta uy$
4	Daño Completo	$0.70 \times uy + 0.50 \times \Delta uy < \Delta < 0.70 \times uy + \Delta uy$

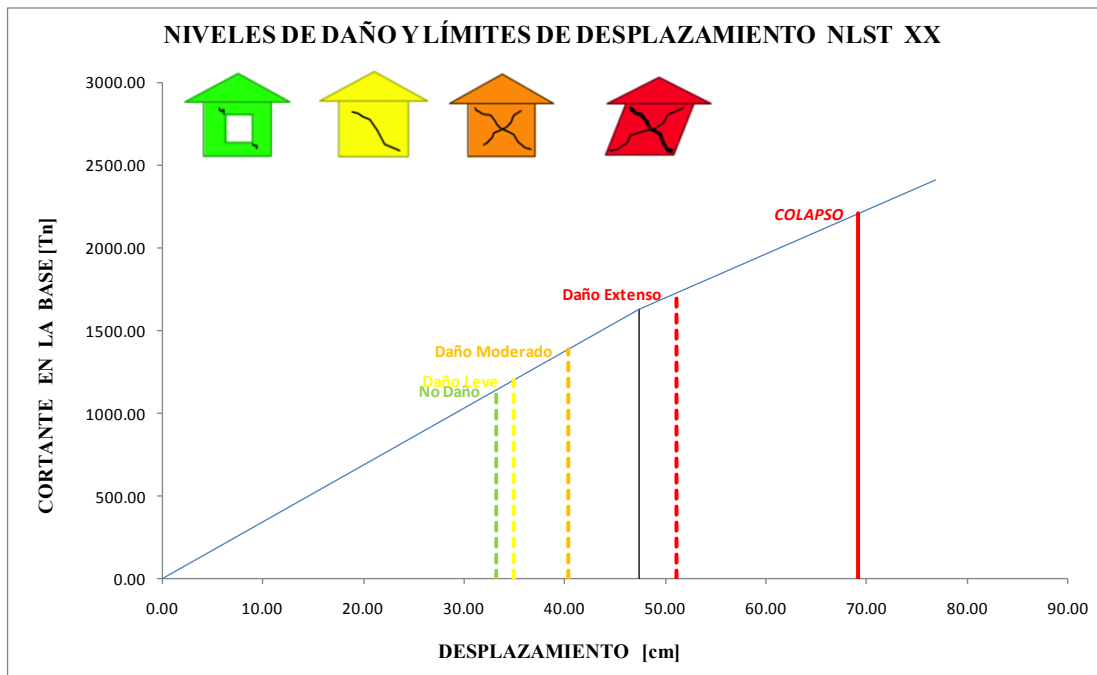
Estos estados de daño nos proporcionan una comprensión de la condición física del edificio y varios parámetros de pérdidas.

Es posible entonces definir un Factor de Pérdida (Fi) como el porcentaje (%) del costo de la obra que se pierde durante el evento sísmico y que se puede correlacionar de manera aproximada con el estado de daño. En la Tabla 4.9 se muestran estos valores, para cada estado de daño, según la experiencia internacional [FEMA-NIBS 2009].

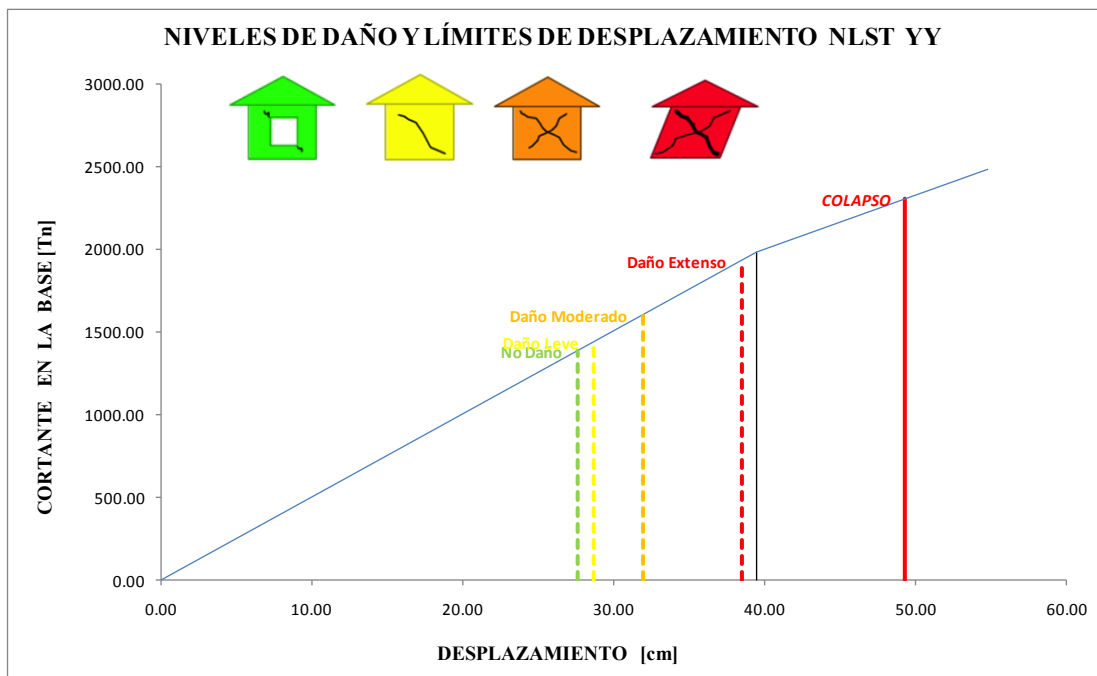
Con estas consideraciones es posible representar en las curvas de capacidad bilineal de los edificios analizados el estado de daño esperado.

Tabla 4.9.- Descripción de los estados de daño

ESTADO DE DAÑO		DESCRIPCIÓN
	LEVE Fi=2%	Pequeñas grietas en las esquinas de las aberturas de puertas y ventanas y las intersecciones de pared y techo; pequeñas grietas en las paredes de mampostería.
	MODERADO Fi=10%	Pequeñas grietas diagonales localizadas en elementos estructurales y en los paneles de muros de corte, grandes grietas en las esquinas de las aberturas de puertas y ventanas grietas en las paredes de mampostería con riesgo de estabilidad.
	SEVERO Fi=50%	Fallas localizadas de algunos elementos estructurales o sus conexiones, grietas evidentes en elementos estructurales sin pérdida de la estabilidad vertical del sistema, grandes grietas diagonales a través de paneles de muros de corte deformación lateral permanente de pisos y techo; derrocamiento de la mayoría de paredes de mampostería; grietas en los cimientos; separación de placas de conexión deslizamiento de la estructura sobre cimientos.
	COMPLETO Fi=100%	Estructura con gran desplazamiento lateral permanente, pérdida de estabilidad vertical peligro inminente de colapso debido al fallo del sistema resistente por carga lateral; algunas estructuras pueden deslizarse y caer de la fundación; grandes grietas en cimientos. Colapso parcial o total de los edificios.

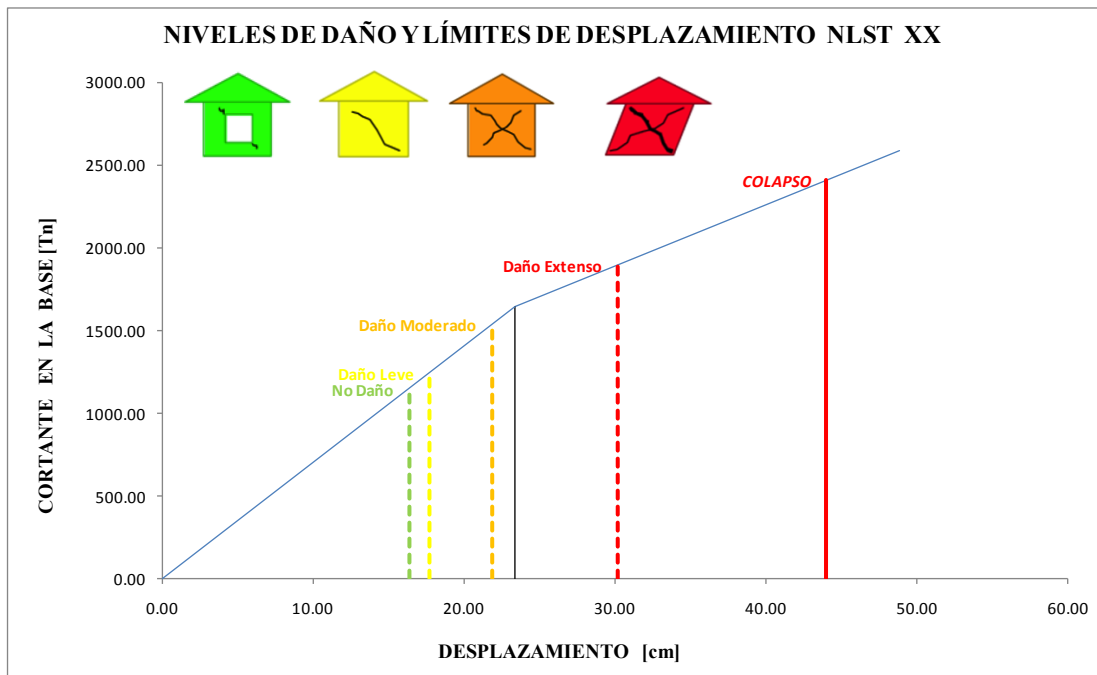


(a)

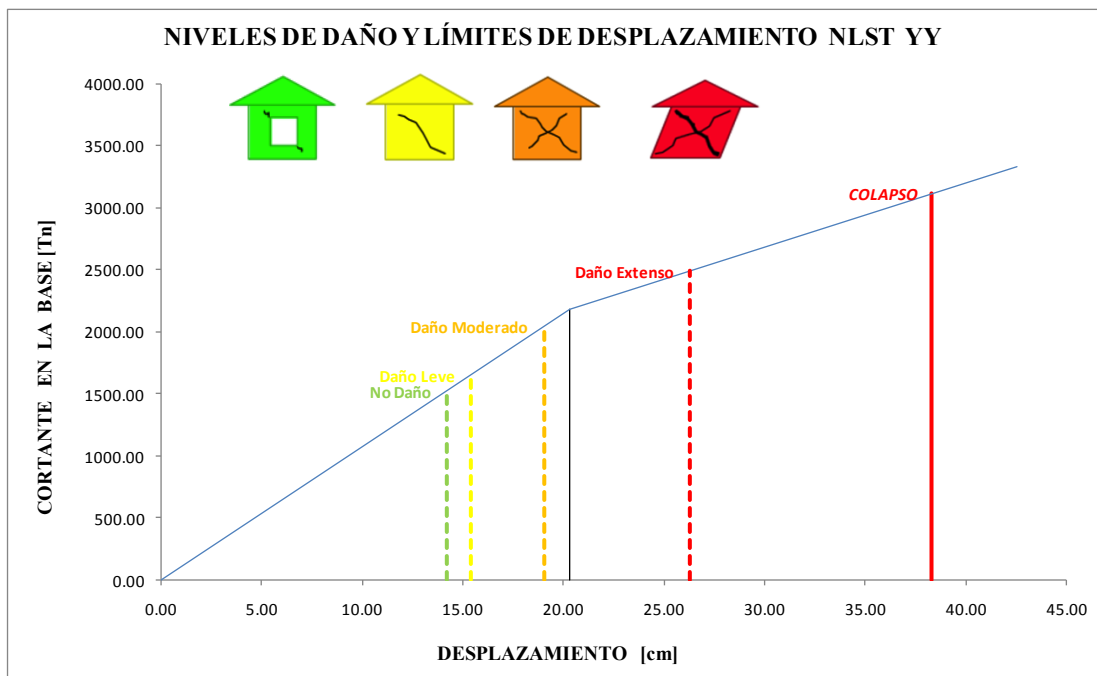


(b)

Figura 4.19.- Niveles de Daño asociado al Desplazamiento Edificio de Acero



(a)



(b)

Figura 4.20.- Niveles de Daño asociado al Desplazamiento Edificio de Hormigón

4.5.3.- Control de calidad de ejecución y mantenimiento de la Estructura

Una de las actividades más importantes luego del análisis diseño y estudio del comportamiento de los edificios es el control de calidad que se deberá llevar a cabo durante su ejecución el control de calidad de los materiales así como el control de la ejecución de las estructuras además de las pruebas de funcionamiento de instalaciones, aspectos importantes para garantizar el comportamiento numérico del edificio, la Norma Ecuatoriana de la Construcción preparó un CAPITULO 11 Administración y Cumplimiento de las disposiciones de la Norma Ecuatoriana de la Construcción durante las etapas de Diseño y Construcción de edificaciones.

Se definió como Autoridades de control a los Municipios responsables de la aplicación de esta normativa y el Aseguramiento de la Calidad para verificar que los usuarios cumplan con las disposiciones de la norma, así pues se proponía un organismo de gobierno local encargado de regular las construcciones, el Control de calidad y el cumplimiento de todas las disposiciones normativas que involucra al Profesional autor de diseños de arquitectura o ingeniería y a otro Profesional que haya obtenido la certificación de sus competencias técnicas del programa de certificación del Comité Ejecutivo de la NEC, además del Constructor Responsable otro Profesional Arquitecto o Ingeniero que asume la responsabilidad ante la Autoridad Municipal por la ejecución de la obra de acuerdo a los estudios aprobados y en cumplimiento a las disposiciones de la norma.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción no publicó el CAPITULO 11 siendo muy importante su alcance para la seguridad de los edificios más se pueden abordar temas más extensos con investigaciones para el control y mantenimiento de las estructuras como:

- Control de los materiales
- Control de la ejecución
- Pruebas de carga y funcionamiento
- Mantenimiento

4.5.4.- Comparación Técnica Económica de los Edificios

Tabla 4.10.- Comparación Aspectos Técnicos

ACERO ESTRUCTURAL	HORMIGÓN ARMADO
Material producido industrialmente bajo explotación en minas. Se obtienen perfiles normalizados.	Material monolítico producido con material de cantera. Se fabrica en obra de acuerdo a las dimensiones requeridas.
El control de calidad de la materia prima se efectúa en taller. La certificación de origen satisface los requerimientos.	El control de calidad se debe hacer en obra. Depende de la calidad del material y de la habilidad de los operarios.
La forma es un esqueleto. La acción estructural se aproxima a las idealizaciones lineales.	El resultado es una construcción maciza. La simulación de la acción estructural es incierta.
Las formas y tamaños están limitados por las facilidades de transporte entre fábrica y obra.	No hay limitaciones en cuanto a formas y tamaños que se pueden obtener.
El aumentar la exigencia se puede controlar la respuesta de manera proporcional.	El aumentar la exigencia se aumenta el tamaño o la calidad de los materiales.
Es menos sensible a los asentamientos diferenciales.	Los asentamientos diferenciales son perjudiciales.
Tolera la acción sísmica debido a su flexibilidad.	La acción sísmica es de cuidado debido a su rigidez.
Se conoce mejor la conducta y es más conocido el comportamiento.	La conducta del comportamiento se sigue estudiando y su respuesta es aleatoria.
Una falla de estabilidad puede llevar a deformación permanente.	Una falla de estabilidad puede llevar al colapso.
La capacidad bruta en todos los estados de tensión es equivalente. Debe controlarse la esbeltez para la comprensión	La conducta en tracción es deficiente. Debe usarse acero de refuerzo para mejorarla.
La estructura es propicia a redistribuir cargas en condición de falla.	El ajuste de la estructura en condición de falla es impredecible.
La resistencia en las uniones afecta la capacidad por esbeltez es apreciable	No influye por separado la resistencia en las uniones.

Tabla 4.11.- Comparación Aspectos Financieros

ACERO ESTRUCTURAL	HORMIGÓN ESTRUCTURAL
El costo asociado con mano de obra está relacionado con la especialización, es decir; debe ser personal formado técnicamente.	El costo en la mano de obra no está relacionado con especialización, es decir; la mano de obra no es calificada.
El material utilizado es muy susceptible al efecto del ambiente.	Con relación al efecto del ambiente es casi invulnerable, solamente lo afectan algunos medios ácidos.
Es escaso el ofrecimiento de los materiales para su uso y la asesoría para la implementación son un poco costosas.	El mercado ofrece el comportamiento y el uso de los materiales con frecuencia, incluso asesoría gratuita para su uso.
El costo del material es producto del mercado externo controlado por oferta y demanda ajena.	El costo del material utilizado es el resultado de la interacción de insumos ofrecidos en el mercado.
La disponibilidad del material limita la posibilidad del uso.	La disponibilidad del material no es limitante del uso.
Es necesario el transporte especializado por su carácter técnico de diseño.	El costo del transporte es negociable por ser de libre oferta.
La tasa de interés de oportunidad es relativamente alta por estar asociada al riesgo por su exclusividad.	La tasa de interés de oportunidad es relativamente moderada por estar asociada a bajo riesgo.
No disminuye costos relativamente en economías de escala pero incrementa el rendimiento.	En economías de escala es de fácil utilización para disminuir costos.
El tiempo es menor por su fácil aplicación en la obra.	El tiempo es más largo en la construcción por ser fruto de varias etapas.
La mejor calidad permite obtener menores relaciones entre longitud y la sección.	La calidad del material impone relaciones altas entre longitud y su sección transversal.
Los costos en mano de obra con relación al tiempo son menores.	Aumenta costos en mano de obra por requerir más tiempo.
No se pueden ahorrar costos en el diseño	Los costos en el ahorro de diseño es muy común

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

5.1.- CONCLUSIONES

El espectro de diseño de la Norma Ecuatoriana de la Construcción para zonas de alta peligrosidad sísmica tiene techos más altos de aceleración espectral por los factores de amplificación del suelo que finalmente incide en la demanda estructural.

Los edificios analizados cumplen con un comportamiento de un Edificio Básico, con un nivel totalmente operacional para un sismo frecuente, operacional para un sismo ocasional y raro y seguridad de vida para un sismo muy raro cumpliendo con el comportamiento esperado según VISION 2000.

En el análisis estructural de los edificios se obtuvieron derivas de piso menores a las máximas permitidas por la Norma Ecuatoriana de la Construcción y modos de vibración que no presentan desplazamiento tanto traslacional como torsional, comportamiento que indica que las secciones propuestas en el diseño son apropiadas para un comportamiento sísmico resistente.

El estudio del comportamiento de los edificios determinará si las secciones de hormigón y/o acero adoptadas en el diseño son aceptadas como definitiva, puesto que en el caso de no cumplir con los niveles de comportamiento esperados el edificio deberá ser rediseñado hasta satisfacer los objetivos de diseño.

Se determinó el punto de desempeño de la estructura mediante *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures FEMA 440*, los edificios diseñados se comportan adecuadamente para los cuatro eventos sísmicos descritos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

Se concluye que el análisis por desempeño es una alternativa muy práctica para encontrar la respuesta de una estructura ante las diferentes acciones sísmicas, además es una gran herramienta de análisis no lineal la cual permite explorar el comportamiento en el rango inelástico de las estructuras, llevándolas a desarrollar su máxima capacidad.

Una vez que se ha evaluado el comportamiento estructural de los edificios es imprescindible que en la construcción se lleve un estricto control en la calidad de los materiales además de la correcta ejecución de los elementos estructurales sismo resistentes debido a que deberán cumplir con requisitos especiales de aceptación que permitirán el correcto comportamiento de la estructura real.

Para determinar la carga máxima y la capacidad de desplazamiento de los edificios diseñados en modelos estructurales que consideran el comportamiento no lineal de los materiales ante la aplicación de fuerzas estáticas incrementales, los métodos de análisis propuestos por FEMA son más sensibles para las estructuras de hormigón que para las de acero.

Para determinar el punto de desempeño de la estructura se utilizan los espectros de demanda y capacidad sísmica, el espectro de demanda es el espectro definido en las normas y la curva de capacidad definida en un análisis estático o dinámico no lineal la determinación del punto de desempeño, requiere de un proceso iterativo de ensayo y error para satisfacer los dos criterios especificados.

Al obtener las curvas de capacidad de los edificios que permitieron definir el punto de desempeño permite al diseñador comprender mejor el comportamiento de una estructura sometida a movimientos sísmicos de diferente intensidad que puede ser de ayuda para incrementar los niveles de seguridad de los edificios al identificar los como los elementos estructurales van sobrepasando el momento de fluencia e ingresando al rango no lineal.

Al estudiar el comportamiento y capacidad estructural de los edificios analizados la sismo resistencia de cada uno depende de la resistencia y de la capacidad de deformación de sus componentes individuales, por lo que es importante determinar sus capacidades más allá del límite elástico, el análisis estático no lineal realizado mediante una serie de análisis elásticos secuenciales permitió obtener para cada edificio en análisis un diagrama conocido con el nombre de curva de capacidad.

Es importante tomar en consideración el comportamiento sismo resistente de las edificaciones ya que se analizan la estructuras para sismos con una probabilidad de ocurrencia alta como los Sismos Frecuentes y Ocasionales al igual que sismos de gran magnitud como el Sismo Muy Raro, mientras que el diseño basado en fuerzas presenta limitaciones debido a que solo se considera el sismo de diseño que tiene una baja probabilidad de ocurrencia.

Evaluando el comportamiento de los edificios la ductilidad obtenida en el diseño en acero es mucho mayor a la del edificio en hormigón, si bien es cierto los diseños cumplen con los requerimientos de sismo resistencia, cumplen con un comportamiento estructural adecuado; es decir son elegibles pero los costos de ejecución definen que estructura deberá implementarse, luego de esta etapa de selección la supervisión durante la construcción es muy imprescindible.

En zonas de alta peligrosidad sísmica es importantísimo el análisis y diseño estructural sismo resistente además de verificar el comportamiento de los edificios diseñados en el rango no lineal, pero el control de calidad de los materiales así como el control de la ejecución de las estructuras y las pruebas de funcionamiento son aspectos muy importantes para garantizar el comportamiento numérico del edificio ante el sismo de diseño.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

6.1.- BIBLIOGRAFÍA

La siguiente Bibliografía en su momento sirvió como fuente de consulta para el desarrollo de la investigación.

ACI 318-14, 2014.
“Building Code Requirements for Structural Concrete”.
American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, United States.

AISC 2010(a).
“Specification for Structural Steel Buildings”.
ANSI/AISC 341-10, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, United States.

AISC 2010 (b).
“Seismic Provisions for Structural Steel Buildings”.
ANSI/AISC 341-10, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, United States.

AISC 2010 (c).
“Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications”. ANSI/AISC 358-10, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, United States.

ATC-40 1996
“Seismic evaluation and retrofit of concrete building”
Applied Technology Council, Redwood City, California
Report N° SSC 96-01 Volume 1 and 2 Appendices

Bertero V. V., Anderson J., Krawinkler H. y Miranda E., 1991
“Desing guidelines for ductility and drift limits: Review of state-of-the-practice and state-of-the-art in ductility and drift-based earthquake-resistant desing of buildings”
Report N° UCB/EERC-91/15, University of California, Berkeley

Bonett, R. L. 2003

Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Aplicación a Entornos Urbanos en Zonas de Amenaza Alta y Moderada. Tesis Doctoral.

Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Bujalance Javier 2014

Diseño sísmico de una torre de control para el Aeropuerto de Puerto Príncipe (Haití) y su estudio de prestaciones para el terremoto de servicio mediante análisis no lineal tipo push-over.

Dep. Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla

FEMA-273 1996

“NEHRP Guidelines for the seismic Rehabilitation of Building”

Report FEMA 273 Guidelines y Reporte FEMA 274 Comentary

Federal Emergency Management Agency Washington, D.C.

FEMA-NIBS 2009

“Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model HAZUS-MH MR4, Advance Engineering Building Module, Technical and User's Manual,” Federal Emergency Management Agency (FEMA) and National Institute of Building Sciences (NIBS). Washington D.C.

Gustavo Coronel D. Oscar A. López 2013

Metodología para la estimación de daños por sismos en edificios escolares de Venezuela mediante curvas de fragilidad

Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela versión impresa ISSN 0798-4065

Rev. Fac. Ing. UCV vol.28 no.2 Caracas jun. 2013

Habibullah, A., Wilson, E. 1997

“SAP2000: Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures”.

Computers and Structures Inc., Berkeley, CA, United States

Lagomarsino, S. y Penna, A. 2003

Guidelines for the implementation of the II level vulnerability methodology. WP4: Vulnerability assessment of current buildings. RISK-UE project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different European towns.

Miranda E. 1997

“Strength reduction factors in performance base desing”

Report N° UCB/EERC-97/05, University of California, Berkeley

Mwafy A. y Elnashai A. 2002
“Calibration of force reduction factors of RC buildings”
Journal of Earthquake Engineering 6(2)

NEC 2015.
“Norma Ecuatoriana de la Construcción”.
Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI), República del Ecuador.

Pujades, L. G., Barbat, A. H. (2004).
“Metodología de Estimación de la Vulnerabilidad Sísmica de las Construcciones Clasificadas de
“Importancia Especial” en la NCSE-02”
Informe Técnico N° IT-438 Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Universidad
Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Risk-UE Project 2001-2004.
An advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different European towns.,
European Commission, contract EVK4-CT-2000-00014.

SEAOC 1995
"Vision 2000 - A Framework for Performance Based Earthquake Engineering"
Vol. 1, January, 1995.

Uang C 1991
“Establishing R or R_w an CD factor building seismic provisions”
Journal of Structural Engineering ASCE 117(1)

Whittaker A., Hart G., y Rojahn C. 1999
“Seismic response modification factor”
Journal of Structural Engineering ASCE 125(4)

