



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIA DE LA INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE ESTRUCTURAS REDUNDANTES Y  
NO REDUNDANTES USANDO NORMAS ASCE-7 Y NEC-15**

**TRABAJO PRÁCTICO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERA CIVIL**

**Autor:**

JESSICA ESTEFANÍA SUÁREZ TOMALÁ

**Tutor:**

ING. JAIME FERNANDO ARGUDO RODRÍGUEZ, PHD.

**La Libertad, Ecuador**

**2021**

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TEMA:**

**“EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE ESTRUCTURAS REDUNDANTES Y  
NO REDUNDANTES USANDO NORMAS ASCE-7 Y NEC-15”**

**TRABAJO PRÁCTICO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERA CIVIL**

**Autor:**

**JESSICA ESTEFANÍA SUÁREZ TOMALÁ**

**Tutor:**

**ING. JAIME FERNANDO ARGUDO RODRÍGUEZ, PHD.**

**La Libertad, Ecuador**

**2021**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Jessica Estefanía Suárez Tomalá** como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

### TUTOR



Ing. Jaime F Argudo Rodríguez, Ph.D.

### DIRECTOR DE CARRERA

F.   
**ING. JUAN FRANCISCO GARCÉS VARGAS**

La libertad, a los 15 días del mes de marzo del 2021

## APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo del Componente práctico, modalidad Examen de carácter Complexivo denominado “**EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE ESTRUCTURAS REDUNDANTES Y NO REDUNDANTES USANDO NORMAS ASCE-7 Y NEC-15**”, elaborado por la señorita JESSICA ESTEFANÍA SUÁREZ TOMALÁ, estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, me permito declarar que luego de haber dirigido, estudiado y revisado , la apruebo en su totalidad.

TUTOR:



**Ing. Jaime F Argudo Rodríguez, Ph.D.**

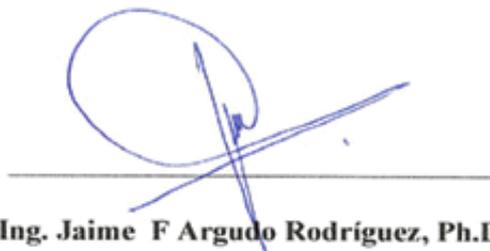
La libertad, a los 15 días del mes de marzo de 2021

## CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En mi calidad de Tutor del Trabajo del Componente práctico, modalidad Examen de carácter Complexivo denominado “EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE ESTRUCTURAS REDUNDANTES Y NO REDUNDANTES USANDO NORMAS ASCE-7 Y NEC-15”, elaborado por la señorita JESSICA ESTEFANÍA SUÁREZ TOMALÁ, estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio URKUND, luego de haber cumplido los requerimientos exigidos de valoración, el presente proyecto ejecutado, se encuentra con el 1% de la valoración permitida, por consiguiente se procede a emitir el presente informe.

Adjunto reporte de similitud

Atentamente



**Ing. Jaime F Argudo Rodríguez, Ph.D.**

La libertad, a los 15 días del mes de marzo de 2021

## Document Information

---

<b>Analyzed document</b>	TESINA para URKUND.docx (D98271876)
<b>Submitted</b>	3/14/2021 3:00:00 PM
<b>Submitted by</b>	JAIME F ARGUDO
<b>Submitter email</b>	jargudo@upse.edu.ec
<b>Similarity</b>	1%
<b>Analysis address</b>	jargudo.upse@analysis.arkund.com

## Sources included in the report

---

	<b>UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA / TESINA JESSICA SUAREZ TOMALÁ MARZO 2021.docx</b>	
<b>SA</b>	Document TESINA JESSICA SUAREZ TOMALÁ MARZO 2021.docx (D98051235) Submitted by: jessica.suareztomala@upse.edu.ec Receiver: lmoreno.upse@analysis.arkund.com	 1

---

## **DEDICATORIA**

Dedico el siguiente trabajo de titulación a mis padres Saúl Suárez y Flavia Tomalá también a mi primo Wither González, que ha sido como un padre también para mí, por su apoyo moral y económico a lo largo de mi carrera, a mi hermana Gisella por su comprensión a pesar que la deje sola en el trabajo logro salir adelante. Es una alegría haber llegado hasta el punto que me encuentro ahora y poder decir a mis padres y hermanos estoy logrando los objetivos planteados porque es así ustedes se han esforzado por darme lo mejor y es por esto que ahora les devuelvo el mismo esfuerzo y dedicación logrando las metas que uno se propone.

**Jessica Suárez**

## **AGRADECIMIENTO**

Primero agradecer a Dios quién es el que guía mi camino, dándome fuerzas para seguir y no rendirme, por permitirme llegar hasta este momento, segundo agradecer a mis padres y hermanos por su apoyo incondicional en cada instante de mi vida, tercero a mi tutor Ing. Jaime Argudo PHD, por su paciencia y haberse tomado el arduo trabajo de transmitir sus conocimientos y guiarme con éxito en el presente proyecto. También agradecer a Camilo Once que durante muchos años estuvo apoyándome para trabajar juntos durante el proceso de nuestra carrera. A todos ustedes gracias por ser la motivación para concluir este proyecto.

**Jessica Suárez**

## Índice General

CERTIFICACIÓN.....	i
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO.....	iii
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	x
INTRODUCCIÓN.....	xi
UNIDAD I.....	1
Planteamiento del Problema .....	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	1
1.2 Justificación de la Investigación.....	1
1.3 Objetivos .....	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos .....	2
UNIDAD II .....	3
Marco Teórico Referencial .....	3
2.1 Redundancia Estructural .....	3
2.2 Importancia de la redundancia y sobre-resistencia .....	4
2.3 Comportamiento de estructuras redundantes. ....	5
2.4 Comportamiento De Estructuras No Redundantes .....	5
2.4.1 Colapso Del Edificio Multifamiliar Juárez .....	5
2.4.2 Colapso De Edificio Durante El Sismo De Kobe .....	7
2.4.3. Colapso Edificio En Pisco, Perú .....	7
2.4.4. Colapso Edificio Caracas.....	8
2.4.5. Edificio en Laguna Beach.....	9
2.5 Comportamiento Inelástico de Estructuras Redundantes. ....	10
2.6 Comportamiento Inelástico de Estructuras no Redundantes. ....	11
2.7 Coeficiente Sísmico de Diseño.....	12
2.8 Cortante basal.....	14
UNIDAD III .....	15
Evaluación Y Comparación De Las Especificaciones Sobre Redundancia Del Sistema Estructural Con La Normas NEC-15 Y ASCE 7-16.....	15
3.1 Aplicación De Factor De Redundancia En Normas .....	15
3.1.1 Factor de Redundancia en ASCE 7-16.....	15

3.1.2 Efectos del factor de redundancia en el diseño sismorresistente. ....	19
3.1.3 Consideraciones de efecto de redundancia en norma NEC-15.....	20
3.2 Cálculo de coeficiente sísmico con ASCE 7-16 y NEC-15.....	21
3.2.1 Edificio en Santa Elena.....	21
3.2.2 Edificio de Guayaquil que colapsó en Sismo Pedernales 2016 .....	30
3.3 Propuesta de Reforma en NEC-15 para incluir verificación por falta de redundancia	36
CONCLUSIONES .....	37
RECOMENDACIONES.....	38
ANEXOS.....	39
BIBLIOGRAFÍA .....	41

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Estructura de Multifamiliar Juárez.....	6
<b>Figura 2</b> Colapso del Edificio Juárez.....	6
<b>Figura 3</b> Colapso de edificio durante sismo de Kobe, 1995.....	7
<b>Figura 4</b> Colapso de edificio poco redundante, sismo de Pisco, 2007.....	8
<b>Figura 5</b> Edificio Petunia durante el sismo de Caracas.....	8
<b>Figura 6</b> Edificio Laguna Beach durante el sismo de Caracas.....	9
<b>Figura 7</b> Curva de Capacidad Para Estructuras Redundantes $R=8$ .....	10
<b>Figura 8</b> Curva de Capacidad para Estructuras no Redundantes sin ductilidad ( $R=1$ ) y con ductilidad ( $R=3$ ).....	12
<b>Figura 9</b> Cálculo Del Factor De Redundancia, $\rho$ .....	18
<b>Figura 10</b> Estructura en Santa Elena con Baja Redundancia.....	22
<b>Figura 11</b> Deformación lineal de la estructura.....	23
<b>Figura 12</b> Deformación de Estructura sin rótulas plásticas.....	24
<b>Figura 13</b> Deformación de estructura con rótulas plásticas.....	25
<b>Figura 14</b> Centro de rigidez de la estructura.....	26
<b>Figura 15</b> Espectro de diseño para Santa Elena.....	29
<b>Figura 16</b> Edificio de Guayaquil.....	30
<b>Figura 17</b> Vista en planta del Edificio de Guayaquil.....	31
<b>Figura 18</b> Deformación de estructura aplicando rótulas plásticas.....	32
<b>Figura 19</b> Guayaquil, Estructura Colapsada Durante el Terremoto de Pedernales 2016, estaba Localizada en Aguacho y García Moreno, Tipo de Suelo E.....	33
<b>Figura 20</b> Espectro de diseño para Guayaquil.....	36

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Requisitos para cada piso que resista más del 35% del cortante basal.....	16
<b>Tabla 2</b> Coeficiente y Factores de diseño para Sistemas Resistentes a Fuerzas Sísmicas ...	28

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1</b> Tabla 12.2-1 de ASCE 7-16.....	39
<b>Anexo 2</b> Tabla 12.3-3 de ASCE 7-16.....	39
<b>Anexo 3</b> Figura C12.3-6 de ASCE 7-16.....	40
<b>Anexo 4</b> Espectro sísmico elástico de aceleraciones.....	40

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realiza un estudio de las especificaciones sobre redundancia estructural de las normas ASCE 7-16 y NEC-15, para realizar cálculos de los diferentes coeficientes sísmicos que se aplican a diversos sistemas estructurales con y sin redundancia. Este proceso tiene como finalidad establecer comparaciones entre las fuerzas de diseño sísmico aplicable y el déficit de seguridad resultante al usar una norma respecto de la otra. Como resultado de la evaluación y comparación de las normas sobre redundancia del sistema estructural, se propondrán cambios para actualizar la norma NEC-15 a fin de que se pueda mejorar el desempeño sísmico de las estructuras diseñadas en el Ecuador y que los futuros proyectos estructurales sean más seguros y se pueda reducir el riesgo de que las estructuras sufran daños y se llegue a enfrentar pérdidas humanas o económicas.

**Palabras claves:** Redundancia, coeficiente sísmico, ductilidad, sobre-resistencia.

## ABSTRACT

In this research work a study is carried out on the structural redundancy specifications from ASCE 7-16 and NEC-15 standards to perform calculations for seismic coefficients that are applied to various structural systems. The purpose of such calculations is to establish comparisons between applicable seismic design forces and the resulting safety shortcoming, when using one standard versus other. Comparison and evaluation of structural redundancy specifications for structural system may trigger an update to the NEC-15 standard, as changes will be proposed to enhance seismic performance of structures designed in Ecuador. Using such new code specifications, structural systems damage to buildings, and human or economic losses can be reduced and seismic safety increased.

**Keywords:** Redundancy, seismic coefficient, ductility, overstrength.

## INTRODUCCIÓN

La actividad sísmica del Ecuador y su impacto sobre las vidas humanas hace necesario realizar una evaluación de un factor relevante de la seguridad sismo-resistente, cual es la redundancia estructural. La baja redundancia estructural afecta negativamente el desempeño sísmico de una estructura y es abordado de manera diferente en las normativas americana ASCE 7-16 y ecuatoriana NEC-15.

Para que una estructura presente un desempeño sísmico aceptable debe cumplir con los criterios de diseño que se establecen en las normas y dichos criterios existen tanto en NEC 15 como en ASCE 7:16. Sin embargo, se plantea como hipótesis que la norma NEC-15 no se encuentre debidamente actualizada en lo relativo a sus especificaciones sobre redundancia estructural.

Para describir la necesidad de actualizar las provisiones de control de redundancia mínima en sistemas sismo-resistentes dentro de la norma NEC-15, se propone realizar una comparación entre las Normas NEC-15 y ASCE 7-16, usando diversos sistemas estructurales con diferente configuración. En este trabajo se propone realizar una comparación entre los diferentes coeficientes sísmicos que resultan de la aplicación de las especificaciones de la norma ecuatoriana con los que se tendrían al aplicar la norma americana o internacional para idénticos sistemas estructurales proyectados dentro de zonas sísmicas de alto y muy bajo peligro sísmico y tipos de suelo de igual clase. Se tendrá como finalidad evaluar la fuerza sísmica requerida sobre los distintos tipos de estructuras y establecer la brecha de seguridad que estaría implícita en el cálculo de fuerzas sísmicas diferentes (según cada norma) para zonas sísmicas y clase de suelos homologadas.

## **UNIDAD I**

### **Planteamiento del Problema**

#### **1.1 Planteamiento del Problema**

Alrededor de todo el mundo, se evidencia la existencia de eventos sísmicos los que dependiendo de su intensidad pueden provocar diversas consecuencias como el colapso total o parcial de las estructuras que no han sido diseñadas usando criterios y especificaciones de normas. El Ecuador no se aparta de dicha situación ya que se encuentra en una zona de alto peligro sísmico donde se han presentado un sinnúmero de eventos sísmicos de gran intensidad a lo largo de su historia y durante el más reciente terremoto de Pedernales (2016) se observó daños excesivos y colapsos de algunas estructuras de hormigón armado con las normas vigentes. Debido a aquello, surge la necesidad de actualizar las normas para el diseño sismo resistente.

Por lo expuesto anteriormente se plantea en este trabajo evaluar las especificaciones sobre redundancia del sistema estructural y los efectos del uso de dichas especificaciones sobre las fuerzas sísmicas de diseño en estructuras proyectadas con las Normas NEC-15 y ASCE 7-16. Se calcularán y compararán los diferentes coeficientes sísmicos obtenidos para distintos sistemas estructurales y se establecerán diferencias en la seguridad estructural al aplicar dichas normas en el diseño de estructuras.

#### **1.2 Justificación de la Investigación**

El Ecuador se encuentra en una zona con alto peligro sísmico y al considerar los daños que han provocado los diferentes eventos sísmicos a través de la historia, se plantea esta investigación con la finalidad de que futuras construcciones sean diseñadas con criterios que mejoren el desempeño sísmico que surge de aplicar la actual norma de construcción nacional.

La presente investigación justifica su importancia al proponer la actualización de los coeficientes y fuerzas sísmicas de diseño para prevenir los efectos adversos de la baja redundancia estructural sobre la resistencia, estabilidad y seguridad de la estructura si se presenta algún evento sísmico de una gran magnitud.

### **1.3 Objetivos**

#### ***1.3.1 Objetivo General***

Realizar un análisis comparativo de las especificaciones de las normas NEC-15 y ASCE 7 sobre Redundancia del Sistema Estructural y los efectos del uso de dichas especificaciones sobre las fuerzas sísmicas de diseño sísmico. Se evaluarán y compararán los coeficientes sísmicos que se calculan con dichas normas para distintos sistemas estructurales. De esta manera, se podrán sugerir cambios a la norma NEC-15 y su aplicación de una manera confiable al momento de ejecutar un proyecto estructural.

#### ***1.3.2 Objetivos Específicos***

- Describir y conceptualizar los diferentes coeficientes sísmicos que se aplican en cada norma para varios sistemas estructuras redundantes y no redundantes.
- Establecer semejanzas y diferencias que conlleven a realizar un cuadro comparativo entre ambas normas.
- Evaluar la fuerza sísmica que actúan en los distintos tipos de estructuras.
- Sugerir cambios para actualizar NEC-15 a fin de que se incorporen especificaciones adicionales para el control de estructuras No Redundantes.

## UNIDAD II

### Marco Teórico Referencial

#### 2.1 Redundancia Estructural

Es un término que se define en función del número de elementos estructurales necesarios para controlar la estabilidad de la estructura. La redundancia permite la redistribución de fuerzas internas a la que está sometida una estructura cuando incursiona en comportamiento inelástico, permitiendo de esta manera mantener equilibrio y estabilidad a cargas laterales, gracias a la redistribución de fuerzas internas desde los elementos cedentes hacia los elementos que aún no han cedido dentro de un sistema estructural hiperestático. La redundancia por lo tanto es directamente proporcional al grado de hiperestaticidad de la estructura.

Dentro de las normas de diseño se ha incorporado los efectos beneficiosos de la redundancia, pero los criterios empleados apuntan esencialmente a la selección correcta del factor de reducción de respuesta  $R$  por factores pequeños cuando la redundancia es escasa. En la mayoría de las normas, la selección del factor  $R$  *“es empírica y no favorecen la posibilidad de que el diseñador pueda modificar o seleccionar adecuadamente el factor de redundancia en base a las características del edificio que se encuentra analizando”* Vielma Pérez (2008).

Una estructura es redundante por tener gran cantidad de elementos estructurales capaces de redistribuir a otros elementos el exceso de cargas sobre los elementos que ceden primero y resistir las cargas cedentes dentro de dicha estructura. Así la característica esencial de una estructura redundante es que los elementos deben tener en su conjunto la capacidad de disipar energía en la estructura en el rango de deformación inelástica con sobre-resistencia, ductilidad y no fallar en modos frágiles de forma prematura a bajas deformaciones elásticas o incluso inelásticas.

## 2.2 Importancia de la redundancia y sobre-resistencia

En el diseño sísmico una de las consideraciones más importantes es proporcionar redundancia estructural para lograr sobre-resistencia a las cargas laterales.

El factor de sobre-resistencia se define como la relación entre el cortante basal último que es capaz de soportar la estructura con relación al cortante basal de diseño, se lo expresa de la siguiente manera:

$$\Omega_o = \frac{V_y}{V_d} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

Donde:

$V_y$  = Cortante basal a la plastificación completa de la estructura o formación de un mecanismo de falla dúctil a flexión con rótulas plásticas en los extremos de todas las vigas y en la base de las columnas.

$V_d$  = Cortante basal de diseño elástico

El factor de redundancia mide la capacidad de incursionar la estructura en el rango no lineal. La capacidad de una estructura en redistribuir las cargas de los elementos con mayor sollicitación a los elementos con menor sollicitación. Se evalúa como la relación entre el cortante basal máximo con respecto al cortante basal cuando se forma la primera articulación plástica. (NEC-SE-DS, 2015)

Si por alguna restricción fuese imprescindible utilizar un sistema estructural con poca redundancia, sería recomendable diseñar la estructura con elementos de mayor capacidad o resistencia para asegurar que en caso de alcanzar el límite elástico de la estructura está sea capaz de deformarse con baja demanda de ductilidad y sobre-resistencia, sin llegar al colapso.

La redundancia no tiene participación mientras las estructuras se mantienen intactas, sin embargo, puede convertirse en un factor esencial cuando alguno o

varios de los elementos de la estructura sufren suficiente daño que los vuelva incapaces de seguir recibiendo incrementos de carga o de mantener las cargas que les corresponda transmitir, provocando una redistribución de estas cargas hacia el resto de elementos. (ABAD and TORRES 2015)

### **2.3 Comportamiento de estructuras redundantes.**

En estudios experimentales realizados en sismos pasados, se concluyó que la ductilidad y redundancia estructural son los medios más adecuados para proporcionar seguridad contra la falla de una estructura, especialmente si las fuerzas laterales resultan más críticas que las consideradas en el diseño. Debido a que el diseño sismorresistente contempla la posibilidad de daño en algunos elementos estructurales durante la ocurrencia de algún sismo fuerte, la estructura deberá tener elementos que sean capaces de disipar las fuerzas y distribuir las de manera uniforme en cada uno de ellos sin experimentar colapso en la estructura global.

### **2.4 Comportamiento De Estructuras No Redundantes**

El poco conocimiento del concepto de redundancia ha conllevado al uso de estructuras vulnerables, en donde se tienen estructuras conformadas por un solo marco en la dirección más corta y que en muchas ocasiones no disponen de suficiente rigidez por poseer una estructuración alargada y esbelta.

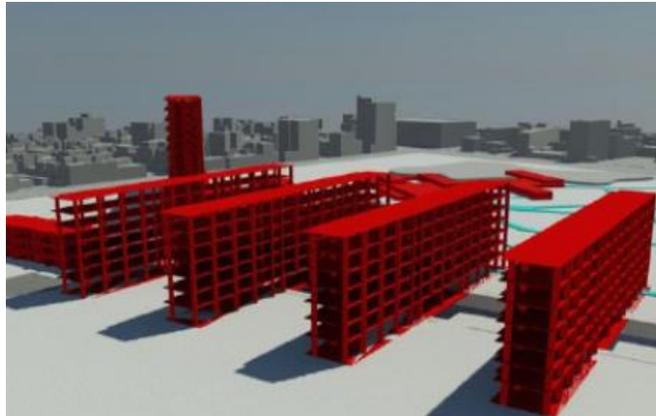
#### ***2.4.1 Colapso Del Edificio Multifamiliar Juárez***

- El edificio multifamiliar Juárez colapsó durante el sismo de Michoacán del 19 de septiembre de 1985. Era una estructura con una altura considerable que además contaba con plantas alargadas y carecía de redundancia estructural como se muestra en Figura 1. La estructura falló en la dirección corta del

edificio donde hay una sola luz y dos columnas y se tiene falta de rigidez, redundancia, sobre-resistencia y ductilidad. (Figura 2)

**Figura 1**

*Estructura de Multifamiliar Juárez*



Nota. Tomado de “FEMA 454”SECURITY(2006)

**Figura 2**

*Colapso del Edificio Juárez*



Nota. Tomado de “FEMA 454”(SECURITY2006)

### ***2.4.2 Colapso De Edificio Durante El Sismo De Kobe***

- En la Figura 3 se puede observar un edificio de estructura de acero poco redundante con un solo pórtico y que, durante el sismo de Kobe del 17 enero de 1995, falló en la dirección corta que tiene el menor grado de redundancia.

### **Figura 3**

*Colapso de edificio durante sismo de Kobe, 1995*



Nota. Tomado de “FEMA 454”(SECURITY2006)

### ***2.4.3. Colapso Edificio En Pisco, Perú***

- Durante el sismo de Pisco del 15 de agosto de 2007, se produjo la falla estructural de un edificio de tres niveles construida por personal poco capacitado y falta de concepto de estructuración, produciendo una baja redundancia en la dirección esbelta (estructura de un solo pórtico). Esta estructura falló en la dirección corta produciendo que las columnas estén expuestas a una mala distribución y que no resistan las fuerzas laterales como se observa en la Figura 4.

#### **Figura 4**

*Colapso de edificio poco redundante, sismo de Pisco, 2007*



*Nota. Tomado de “foto cortesía” de Javier Pique*

#### **2.4.4. Colapso Edificio Caracas**

Durante el sismo de Caracas del 29 de julio de 1967 el edificio Petunia (Figura 5), compuesto por un solo muro en la dirección corta, con una estructura esbelta y planta alargada, presentó severos daños estructurales en esa dirección.

#### **Figura 5**

*Edificio Petunia durante el sismo de Caracas.*



*Nota. Tomado de Steinbrugge (2010)*

#### **2.4.5. Edificio en Laguna Beach**

El edificio Laguna Beach (Figura 6) con una estructura de marco de un vano con muros diafragma en la dirección corta, esbelto y con planta alargada que presento similares daños que el edificio Petunia, evidenciándose un factor de daño común debido a la poca redundancia que presentaron sin llegar a un comportamiento sísmico adecuado.

#### **Figura 6**

*Edificio Laguna Beach durante el sismo de Caracas.*



Nota. Tomado de (Steinbrugge 2010)

Con base a los casos descritos anteriormente las normas sísmicas podrían prohibir el uso de sistemas estructurales con pórtico de una luz y solo 2 columnas en un solo vano o con un solo muro, y exigir un mínimo de tres columnas o dos vanos con configuración regular. ASCE 7-16 considera la falta de redundancia mediante el uso de un factor “ $\rho$ ” de amplificación del cortante de diseño por baja redundancia.

Pero lo más importante, es que la falta de redundancia en una estructura debe ser considerada al instante de elegir el factor de reducción de fuerza sísmica (R), debido a que si no existen elementos suficientes para disipar la fuerza sísmica para llegar a un comportamiento sísmico aceptable para la estructura, se deberá seleccionar un valor de R pequeño, por ejemplo  $R=3$ , en lugar del valor de  $R=8$ , mismo que solo

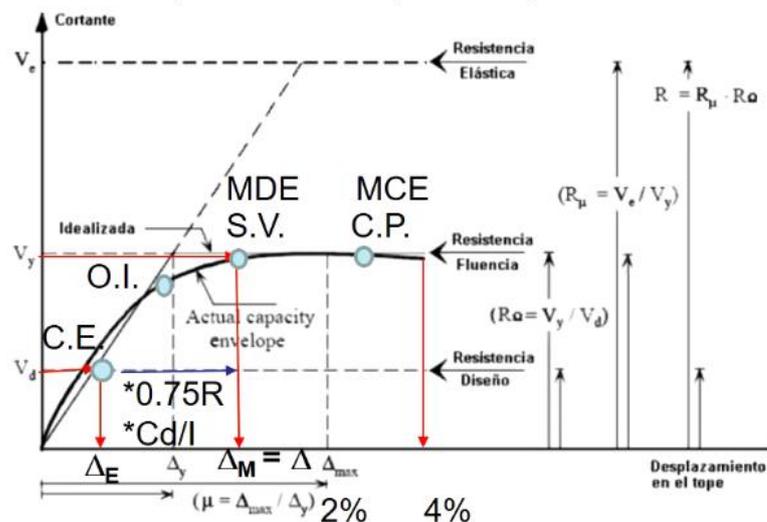
puede exitosamente ser adaptado para el diseño de estructuras regulares con 3 ejes de columnas o cualquier tipo de estructura con 4 o más ejes.

## 2.5 Comportamiento Inelástico de Estructuras Redundantes.

En el gráfico 7, se muestra la curva de capacidad o de fuerza cortante-deformación para una estructura con alta ductilidad ( $R=8$ ). Se puede considerar que posee 4 o más pórticos en cada dirección y que es diseñada para el cortante basal ( $V=V_d=C_s*W$ ) del sismo de servicio al cual corresponde un desplazamiento elástico. Si se incrementan las fuerzas más allá del nivel del sismo de servicio, la estructura puede redistribuir las cargas a otros elementos, es decir, si falla un elemento no se pierde la resistencia de sistema y la carga de corte resistente se incrementa poco a poco conforme otros elementos cedan, disipando energía con altas deformaciones inelásticas que satisfagan la deriva de diseño 2% y que pueda alcanzar la deriva del 4% al mecanismo completo de falla; con construcción de sobre-resistencia, todo lo cual es posible en estructuras muy redundantes

**Figura 7**

*Curva de Capacidad Para Estructuras Redundantes  $R=8$*



Nota. Tomado de "Tutoría J Suárez" (Argudo 2021)

Como consecuencia de la redistribución de carga entre los elementos, estos ceden uno tras otro, logrando alcanzar el nivel de desempeño de seguridad de vida (terremoto con periodo de retorno 475 años) con la formación de rótulas plásticas en las vigas y antes de la formación de la rótula en las bases de las columnas. Si el nivel del sismo aumenta hasta un mega terremoto (terremoto  $T_r= 2475$  años) cuando ya se han formado las rotulas plásticas en las vigas y en las bases de las columnas, que es cuando la estructura ya ha experimentado mucha ductilidad, sin exceder la falla por estabilidad; la estructura debe diseñarse al nivel de desempeño y prevención de colapso, con alta ductilidad y derivas inelásticas menores al 4% de deriva lateral.

Adicionalmente en la gráfica se refleja como una estructura con alta ductilidad, gana sobre-resistencia desde el nivel de resistencia elástico  $V_d$  hasta la resistencia cedente completa construyendo toda la sobre resistencia del sistema ( $\Omega_0 = 3$ ).

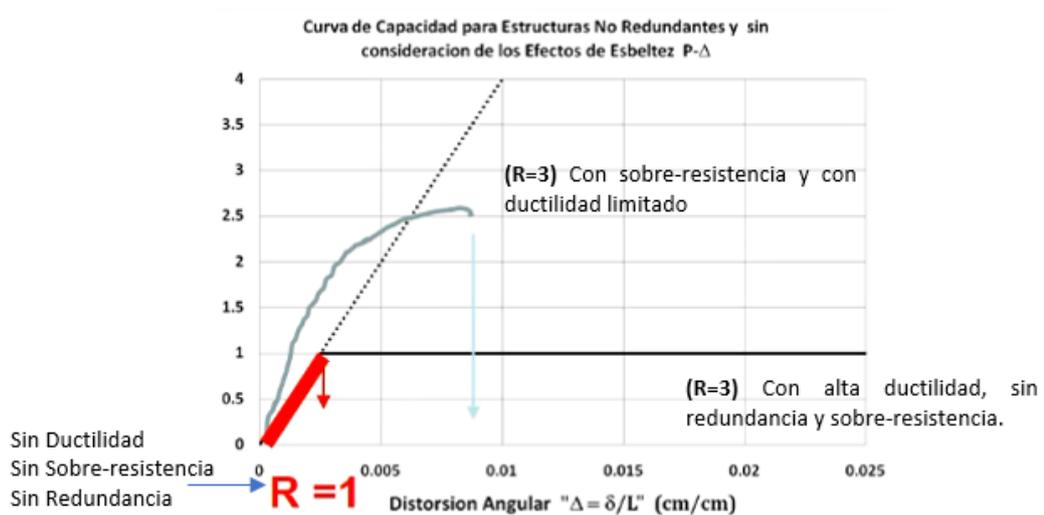
## **2.6 Comportamiento Inelástico de Estructuras no Redundantes.**

En la gráfica 8, se ilustra la curva de capacidad de un pórtico de un solo vano y que es sometido a un cortante de diseño, pero que no posee otros elementos que puedan ayudar con una redistribución de cargas dentro del sistema, llegando al límite de resistencia elástica cuando ya falló la única viga y frágilmente sus 2 únicas columnas sin construcción de sobre resistencia. Entonces lo que pasará es que la estructura fallará frágilmente sin disipar energía del terremoto si carece de ductilidad (línea roja  $R=1$ ) para mantenerse estable dicho tipo de estructura debe diseñarse elástica con alta capacidad de resistencia. En el mejor caso, si la estructura es dúctil después de exceder el límite de su resistencia gracias a la ductilidad de sus pocos elementos, podrá deformarse sin ganar sobre-resistencia. Este tipo de estructura requiere ser evaluadas con otro factor de reducción de fuerza sísmica, como, por

ejemplo, uno similar al usado para las estructuras de ductilidad limitada (curva azul R=3).

### Figura 8

*Curva de Capacidad para Estructuras no Redundantes sin ductilidad (R=1) y con ductilidad (R=3)*



Nota. Tomado de “Tutoría J Suárez” (Argudo 2021)

Entonces se tiene que lo que provee sobre-resistencia a un sistema estructural y la capacidad de disipar mucha energía por deformación plástica con alta ductilidad (R=8) es la existencia de redundancia, y que esto se da cuando existen estructuras con varios vanos que ayudan a disipar energía por deformación y la ductilidad se gana con la ganancia de sobre-resistencia. Así, en la metodología para diseñar estructuras con baja redundancia se debe especificar la selección mandatorio de un valor de R bajo y el diseño de estructuras con mayor resistencia elástica para compensar su ductilidad o sobre-resistencia limitada.

### 2.7 Coeficiente Sísmico de Diseño

El coeficiente sísmico define el porcentaje del peso total de la estructura que se debe considerar como cortante actuante en su base con fines de diseño elástico para

el denominado sismo de servicio. Para la construcción del sistema estructural en una región sísmica específica del sistema, el coeficiente sísmico se calcula en función de la característica del sistema estructural, del uso del inmueble y del tipo de suelo. (Iglesias 1989).

NEC-15 define de manera implícita el coeficiente sísmico con la siguiente expresión:

$$C_S = \frac{I S_a(T_a)}{R \Phi_P \Phi_E} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Donde:

I: Factor que depende de la importancia que tendrá la estructura, sección 4.1 de NEC-SE-DS, 2015

S<sub>a</sub>: Aceleración espectral obtenida a partir del periodo estimado de la estructura.

W: Peso sísmico de la estructura

Φ<sub>p</sub>: Factor que penaliza la irregularidad en planta y que puede tomar el valor de 0,9 cuando exista irregularidad por torsión, retrocesos excesivos en las esquinas, discontinuidades en el sistema de piso y ejes estructurales no paralelos según las condiciones mostradas en la tabla 13 de la sección 5.5.3 de NEC-SE-DS, 2015.

Φ<sub>e</sub>: Factor que penaliza la irregularidad en elevación y que puede tomar el valor de 0,9 cuando exista Piso flexible, variaciones en la distribución de masa en los pisos, irregularidad geométrica según las condiciones mostradas en la tabla 14 de la sección 5.5.3 de NEC-SE-DS, 2015.

R: Factor de reducción de fuerza sísmica que se considera dependiendo del tipo de sistema resistente a cargas sísmicas que se implemente en la estructura y que

se muestran en NEC-SE-DS, 2015 en la tabla 15 para sistemas estructurales dúctiles y en la tabla 16 para sistemas estructurales con ductilidad limitada.

A partir de la descripción anterior se evidencia que los factores considerados para hallar el cortante basal según norma NEC-15, no toman en cuenta la falta de redundancia como un factor que deba penalizar a la estructura.

El ASCE 7-16 a diferencia de la NEC-15 no usa los factores de penalización por irregularidad y define de forma explícita el coeficiente sísmico como se indica en Ec. (12.8-2) ASCE 7-16:

$$C_s = \frac{S_a(T_a)}{R} I_e \quad \text{Ec. (2.3)}$$

## **2.8 Cortante basal**

El cortante basal es la acumulación progresiva de las fuerzas equivalentes la cual se obtiene a partir de la distribución de  $V$  en varias fuerzas aplicadas a cada piso de la estructura, es decir que el cortante de basal es la fuerza sísmica total que se va incrementando a medida que se acerca a la base de la estructura. Se define el cortante basal de la siguiente manera Ec. (12.8-1) ASCE 7-16:

$$V = C_s * W \quad \text{Ec. (2.4)}$$

## UNIDAD III

### Evaluación Y Comparación De Las Especificaciones Sobre Redundancia Del Sistema Estructural Con La Normas NEC-15 Y ASCE 7-16

#### 3.1 Aplicación De Factor De Redundancia En Normas

##### 3.1.1 Factor de Redundancia en ASCE 7-16

En la sección 12.3.4 de las especificaciones ASCE 7-16 se establece que se asignará un factor de redundancia,  $\rho$ , al sistema de resistencia a la fuerza sísmica en cada una de las dos direcciones ortogonales de análisis según lo siguiente:

1. Se permite que el valor de  $\rho$  sea igual a 1.0 cuando:
  - La estructura se diseña con Categoría de Diseño Sísmico B o C, (aplica a estructuras en zonas de peligro sísmico bajo u moderado). En el Ecuador, la categoría de diseño C, equivale a la zona sísmica ( $z=0,15$ ).
  - Se calculen derivas y efectos P-delta;
  - Se diseñen componentes no estructurales;
  - Se diseñen estructuras diferentes a edificaciones;
  - Se diseñen elementos colectores, empalmes y sus conexiones para los cuales se utilizan los efectos de carga sísmica, sin reducción por el factor R.
  - Se diseñen muros estructurales para fuerzas fuera del plano, incluidos sus anclajes.
2. Se asignará el valor de  $\rho$  igual a 1.3 cuando:
  - Se proyecten estructuras con Categoría de Diseño Sísmico D (aplica a estructuras en zonas de peligro sísmico moderado a alto. En el Ecuador la categoría de diseño D equivale a zonas sísmicas con  $0.5 \geq z \geq 0.25$ ) y que tienen una irregularidad torsional tipo 1b (irregularidad torsional extrema donde el desplazamiento máximo de piso en un extremo de la estructura es más

de 1.4 veces el promedio de los desplazamientos de piso en los dos extremos de la estructura).

- Para las estructuras asignadas a las Categorías de Diseño Sísmico E o F (En el Ecuador las estructuras de uso especial y esencial diseñados con  $z > 0.5$ ),  $\rho$  será igual a 1.3, en el caso de que cumpla con una de las dos condiciones siguientes  $\rho$  puede ser tomado como 1:
  - a. Cada piso que resiste más del 35% del Cortante Basal debe cumplir con los requisitos de la tabla 12.3-3 de ASCE 7-16, traducida en tabla 1 del presente trabajo.

**Tabla 1**

*Requisitos para cada piso que resista más del 35% del cortante basal*

<b>Elemento Resistente a Fuerzas Laterales</b>	<b>Requerimiento</b>
Pórticos Arriostrados	La pérdida de una riostra individual, o la conexión a la misma, no daría como resultado una reducción mayor del 33% en la resistencia del piso, ni el sistema resultante tiene una irregularidad torsional extrema (irregularidad estructural horizontal Tipo 1b).
Pórticos a Momento	La pérdida de resistencia a momento de las conexiones viga-columna en ambos extremos de una sola viga no resultará en una reducción mayor al 33 % de la resistencia del piso, tampoco el sistema resultante tendrá irregularidad torsional extrema (irregularidad horizontal Tipo 1b).
Muros de corte o pilares de muro con una relación de altura a longitud superior a 1,0	La pérdida de un muro de corte o un pilar de muro con una relación altura-longitud mayor a 1.0 dentro de cualquier piso, o conexiones a los mismos, no resultará en una reducción mayor al 33 % de la resistencia del piso, tampoco el sistema resultante tiene irregularidad torsional extrema (irregularidad estructural horizontal Tipo 1b).
Columnas en voladizo	La pérdida de resistencia a momento a las conexiones base de una sola columna en voladizo no resultará en una reducción mayor al 33 % de la resistencia del piso, tampoco el sistema resultante tendrá irregularidad torsional extrema (irregularidad estructural horizontal Tipo 1b).
Otros	Sin requisitos.

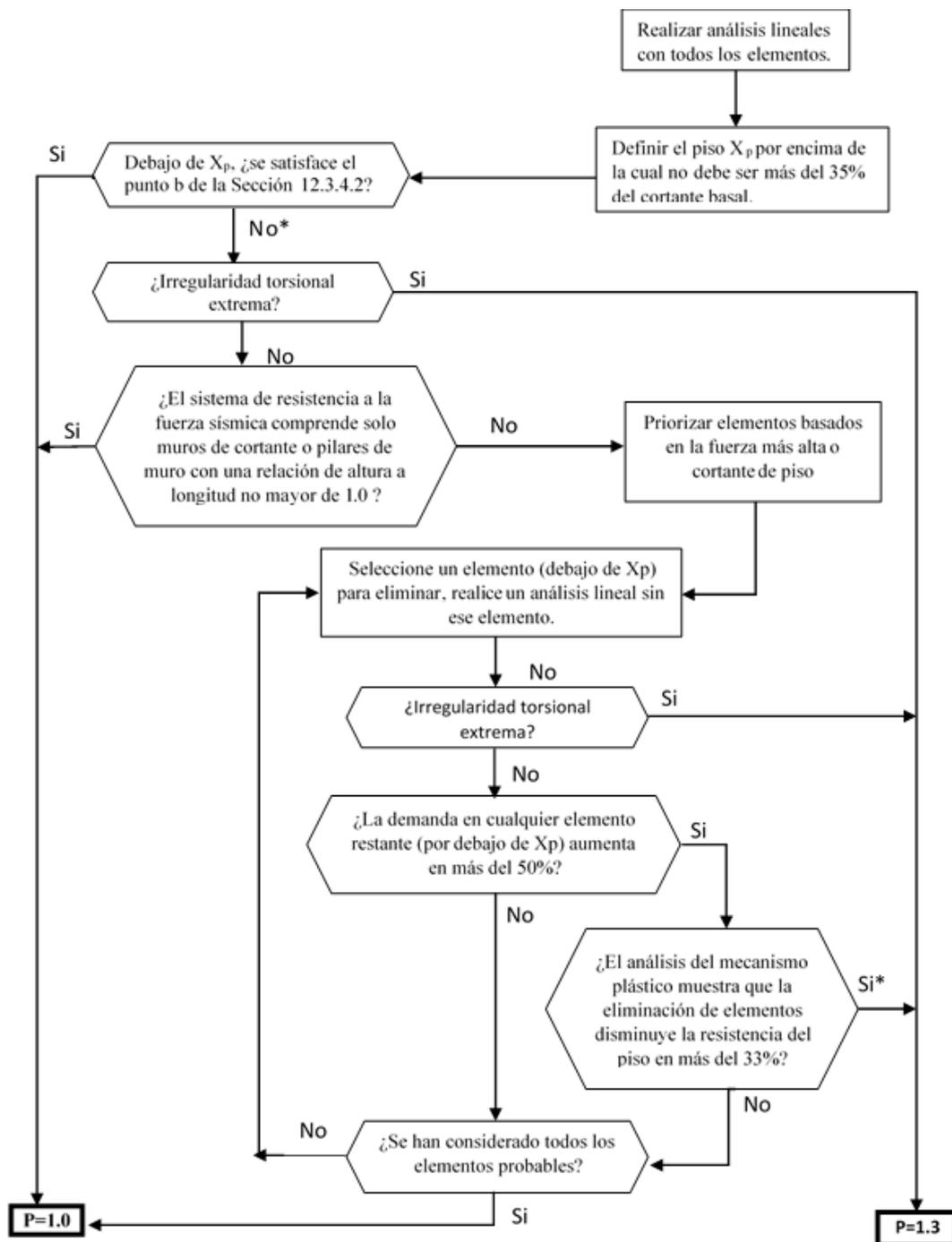
Nota. Tomado de Tabla 12.3-3 de ASCE7 (2016), traducido por J Suárez

- b. La estructura debe ser regular en planta y elevación con al menos dos pórticos perimetrales de 2 vanos sobre cada dirección ortogonal y que el cortante en cada piso resista más del 35% del cortante en la base.
- c. Si se analiza un modelo matemático ejecutando la eliminación de los elementos uno por uno cuando en ellos se han formado rótulas plásticas; para luego determinar el efecto sobre la estructura restante, y si se tiene como resultado una reducción de más del 33% de la resistencia del piso o presenta una irregularidad torsional extrema se considera un  $\rho = 1.3$

El ASCE 7-16 presenta un diagrama de flujo figura C12.3-6 de la norma para implementar los requisitos de penalización por falta de redundancia con  $\rho = 1.3$ .

**Figura 9**

*Cálculo Del Factor De Redundancia,  $\rho$ .*



Nota. Tomado de figura C12.3-6 de ASCE7 (2016), traducido por J Suárez

**3.1.1.1 Categorías de Diseño Sísmico E, F.** Se determinan a partir de la categoría de riesgo y dependen de 2 parámetros: la aceleración espectral de diseño para periodos cortos ( $S_{DS}$ ) y para periodos de 1 segundo ( $S_{D1}$ ).

- Las estructuras de Categoría de Riesgo (I: Estructura No Habitable, II: Estructura de uso no Habitable o III: Estructuras de uso especial) ubicadas donde el parámetro de aceleración de la respuesta espectral mapeada para un período de 1 segundo,  $S_1$ , es mayor o igual a 0,75
- Las estructuras de la Categoría de riesgo IV (Estructura de uso esencial) ubicadas donde el parámetro de aceleración de espectral de período corto 1 segundo,  $S_1$ , es mayor o igual a 0,75 se asignará a la Categoría de diseño sísmico F.

En homologación con NEC-15 el valor  $S_1=0.75$  generalmente equivale a un valor de  $S_a \geq 0.5$  que a un periodo de  $T=1$  segundo puede ser obtenido si se diseñan estructuras en la proximidad de fallas sísmicas con  $z > 0.5$

### **3.1.2 Efectos del factor de redundancia en el diseño sismorresistente.**

Según ASCE 7-16, todos los miembros de una estructura, que forman parte del sistema de resistencia a la fuerza sísmica, deben diseñarse utilizando los efectos del factor de redundancia en las combinaciones de carga que incluyen fuerzas sísmicas horizontales, a menos que estén exentos de otra manera por dicha especificación. De acuerdo a la siguiente expresión:

$$E_h = \rho Q_E \quad \text{Ec. (3.1)}$$

$Q_E$ : efectos de las fuerzas sísmicas horizontales

$\rho$  = factor de redundancia, según la descripción antes mencionada ( $\rho = 1$  o  $\rho = 1,3$ ).

Por lo tanto, debido a esta consideración se encuentra una diferencia entre la norma ASCE 7-16 y la NEC-15, en los cuales se refleja una modificación en las combinaciones que contienen cargas sísmicas:

ASCE 7-16

$$\text{Comb. 6} = 1.2D + L + \rho Q_E = 1.2 D + L \pm E$$

$$\text{Comb. 7} = 0.9 D + L + \rho Q_E = 0.9 D + L \pm E$$

En NEC-SE-CG-2015-Cargas-No-Sísmicas. Se define la combinación de cargas que involucran sismos así.

$$\text{Comb. 5} = 1.2 D + L \pm E$$

$$\text{Comb. 6} = 0.9 D + L \pm E = 0.9 D + L \pm E$$

Por lo tanto, en ASCE 7-16 con el factor  $\rho$  se castiga a la estructura afectada por la falta de redundancia aumentando la carga sísmica aplicada y con resultado de ello la resistencia del sistema estructural.

### **3.1.3 Consideraciones de efecto de redundancia en norma NEC-15**

NEC-15 en su sección 2.2 considera en sus bases de diseño lo siguiente:

Las estructuras de uso normal deberán diseñarse para una resistencia tal que puedan soportar los desplazamientos laterales inducidos por el sismo de diseño, considerando la respuesta inelástica, la redundancia, la sobre resistencia estructural inherente y la ductilidad de la estructura. La redundancia y sobre-resistencia deberán ser consideradas en la instancia de selección del valor de R, pero no especifica de qué manera habría que considerar. (NEC-SE-DS 2015)

NEC-15 define el concepto de redundancia como una propiedad importante del sistema estructural, aunque no especifica de qué manera se debe considerar su carencia en el sistema estructural.

En NEC-SE-DS, sección 6.3.4 se menciona que el factor R (factor de reducción de resistencia sísmica) depende de varios factores entre ellos menciona el factor de redundancia, pero no aclara de qué manera actúa en la elección de R, así como tampoco lo especifica ASCE 7-16. Sin embargo, el ASCE en la tabla 12.2-1 especifica el coeficiente de modificación de respuesta apropiado, R según con las limitaciones del sistema estructural. En la práctica de diseño de Estados Unidos, el diseñador sabe reconocer un sistema sin redundancia y elegir los factores R,  $\Omega$ ,  $C_d$ , que mejor definen las características de ductilidad y sobre-resistencia de la estructura.

### **3.2 Cálculo de coeficiente sísmico con ASCE 7-16 y NEC-15.**

Para el análisis y comparación de los coeficientes sísmicos se consideran 2 estructuras (casos de estudio) para determinar el coeficiente sísmico aplicable según las normas ASCE 7-16 y NEC-15.

#### ***3.2.1 Edificio en Santa Elena***

A continuación, se analiza la primera estructura que presenta la patología de escasa redundancia. La estructura está compuesta de 3 plantas con 1 vano de 3 m de luz en la dirección Y; y 3 vanos de 4m de luz la dirección X. La estructura presenta volados en las direcciones X y Y de 1 m y 0.60 m respectivamente.

## Figura 10

*Estructura en Santa Elena con Baja Redundancia*



Nota. Tomado “Fotografía”, (Suárez 2021)

### **Procedimiento para el cálculo del factor de redundancia, $\rho$ (Norma ASCE 7-16).**

*Definir los pisos que resistan más del 35% del cortante Basal.* Se analiza y determina en el primer paso del diagrama de flujo, que los pisos a considerar deben tener un cortante de piso mayor al 35% del cortante de la base.

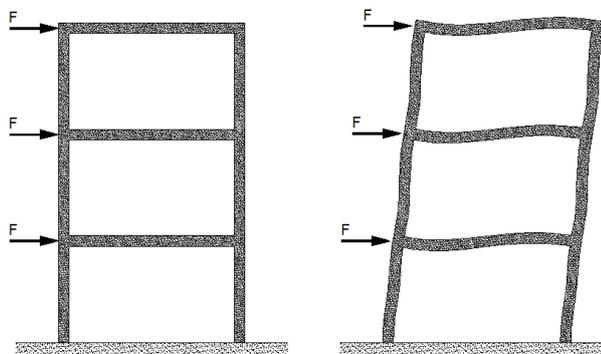
Para determinar los pisos que se incluyen en el análisis, se considera que los entrepisos ubicados en los primeros dos tercios de la altura de la edificación, están sometidos a fuerzas horizontales mayores al 35% del cortante basal; bajo esta consideración se encuentra que el primer y segundo entrepiso tienen un cortante mayor o igual al requerido.

**Los pisos que resistan más del 35% del cortante Basal ¿satisfacen el punto b de la sección 12.3.4.2 del ASCE 7-16?** Se identifica que la estructura posee 8 columnas, 1 vano en una dirección ortogonal el cual no genera redundancia; tampoco existe regularidad en todos sus pisos ya que presenta volados en dos direcciones, según los requerimientos de ASCE 7-16 sección 12.3.4.2-a-b, una estructura debe ser regular en todas sus plantas y para que el sistema se considere redundante debe tener al menos 2 vanos en cada dirección con 2 pórticos mínimos en sus extremos caso contrario la estructura se considerara no redundante y se prosigue con el análisis.

**Irregularidad Torsional Extrema.** Se realiza el análisis por torsión excesiva usando la tabla 12.3.3 del ASCE 7-16. En el caso de un pórtico a flexión se debe considerar que la pérdida de la resistencia a momento en la conexión viga columna en los dos extremos de una viga simple, no resulta en más del 33% de pérdida de la reducción de la resistencia del piso y tampoco resulta en el caso de torsión extrema del tipo 1b.

**Figura 11**

*Deformación lineal de la estructura*



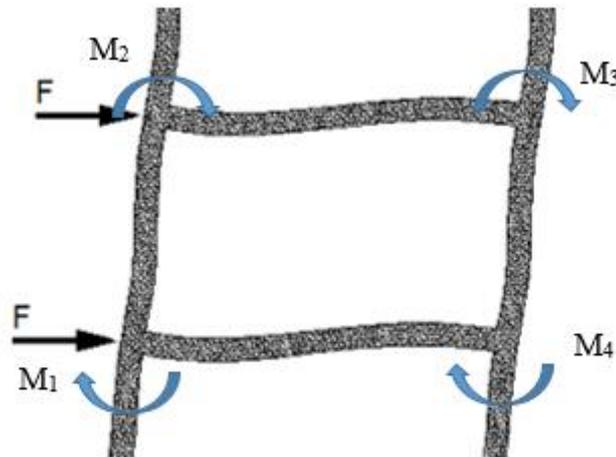
Nota. Elaborado por (Suárez 2021)

Para el análisis de torsión excesiva se toman 2 casos de comparación, analizamos el pórtico que tiene mayor demanda sísmica entonces se considera que el pórtico se ha deformado elásticamente considerando que los momentos tanto en vigas y columnas son iguales por motivo que tienen las mismas dimensiones y las mismas cantidades de acero entonces  $M_1 = M_2 = M_3 = M_4$ . No obstante, si la viga no presenta rótulas plásticas entonces se procede a calcular el cortante resistente de piso con la siguiente ecuación.

$$V_i = (M_1 + M_2 + M_3 + M_4)/(h_{si}) \quad \text{Ec. (3.2)}$$

**Figura 12**

*Deformación de Estructura sin rótulas plásticas*



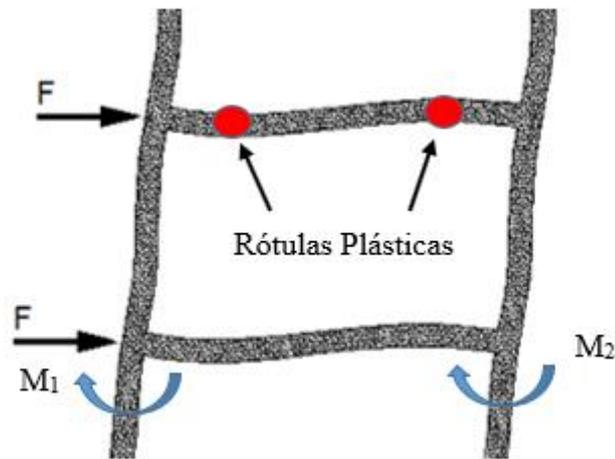
Nota. Elaborado por (Suárez 2021)

El segundo caso se analiza en el rango inelástico, cuando el pórtico genera rótulas plásticas en las vigas, al generar esta rotulas se pierde la acción de pórtico y el sistema resultante pasa a ser una columna en cantiléver que, al generar una fuerza lateral la única resistencia disponible es la que está en la base de las columnas, para ello el cortante resistente se calcula:

$$V_i = \left( \frac{M_1 + M_2}{h_{si}} \right) \text{ Ec. (3.3)}$$

**Figura 13**

*Deformación de estructura con rótulas plásticas*



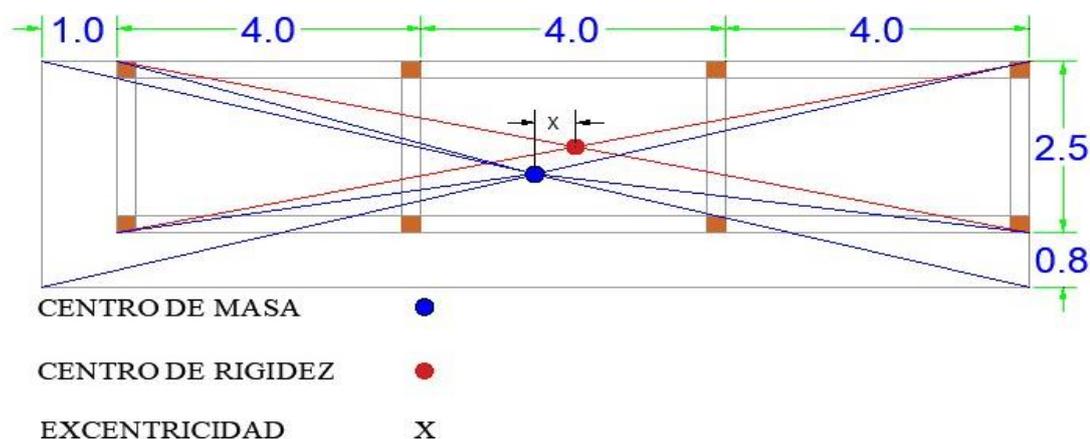
Nota. Elaborado por (Suárez 2021)

Considerando la formación de las rótulas plásticas se determina que la estructura pierde más del 33% de resistencia de piso, entonces no cumple con lo requerido en la tabla 12.3-3 del ASCE 7-16, traducida en tabla 1 del presente trabajo.

Se observa que el centro de rigidez de la estructura no concuerda con el centro de masa por una falta de simetría, entonces se considera que existe torsión, y al formar las rotulas en las vigas el centro de rigidez se desplaza aún más, formando una excentricidad importante y por tanto una torsión excesiva como se detalla en la tabla 12.3-3 del ASCE 7-16, traducida en tabla 1 del presente trabajo. Entonces la estructura es penalizada con  $\rho = 1,3$ .

**Figura 14**

*Centro de rigidez de la estructura*



Nota. Elaborado por (Suárez 2021)

### **Cálculo de coeficiente sísmico según NEC-15**

Para el cálculo del coeficiente sísmico según NEC-15, se asume que la estructura está en un tipo de suelo C en la provincia de Santa Elena.

Por tanto:

$z = 0.5$  como se especifica en la tabla 1 de NEC-SE-DS, 2015.

$n=1.8$  para provincias de la Costa

Para suelo tipo C según las tablas 3, 4, 5 de la sección 3.2.2 de NEC-SE-DS (2015), los coeficientes de perfil de suelo son:  $F_a = 1.18$ ;  $F_d = 1.06$ ; y  $F_s = 1.23$ .

De acuerdo con la sección 6.3.3 de NEC-SE-DS, 2015 se calcula el período fundamental de vibración de la estructura como sigue:

$$T_a = c_t (h_n)^\alpha \quad \text{Ec. (3.4)}$$

$$T_a = 0.055(9m)^{0.9}$$

$$T_a = 0,397$$

Sección 3.1.1. de NEC-SE-DS, 2015. Para el cálculo del coeficiente sísmico se selecciona  $I = 1$ , como factor de importancia de la estructura. Los coeficientes de irregularidad en planta y elevación se asumen ( $\phi_P = \text{tipo 1}$  considerando piso flexible) y ( $\phi_E = \text{tipo 1}$  considerando torsión excesiva), por lo tanto, se penaliza con  $\phi_p = \phi_E = 0,9$ . El valor de R se tomará como 5, ya que la estructura es un pórtico resisten a momento con vigas banda sin muros de corte sísmico.

El cálculo del espectro de respuesta  $S_a$  se determina de acuerdo a la sección 3.31 de NEC-SE-DS, 2015, se verifica cuáles son los periodos límites de vibración  $T_0$  y  $T_c$ .

- $T_0 = 0,1 F_S \frac{F_d}{F_a}$  Ec 3.5

$$T_0 = 0,1(1,23) \frac{(1,06)}{(1,18)}$$

$$T_0 = 0,11 \text{ seg}$$

- $T_c = 0,55 F_S \frac{F_d}{F_a}$  Ec 3.6

$$T_0 = 0,55(1,23) \frac{(1,06)}{(1,18)}$$

$$T_0 = 0,608 \text{ seg}$$

Como el periodo fundamental de la estructura T se encuentra en el rango entre ambos valores se utiliza la ecuación:

$$S_a = n z F_a \quad \text{Ec 3.7}$$

$$S_a = (1,8)(0,5)(1,18)$$

$$S_a = 1,062$$

Según NEC-15 el coeficiente sísmico se calcula:

$$C_s = \frac{I \cdot S_a}{R \cdot \phi_p \cdot \phi_e}$$

$$C_s = \frac{1 \cdot (1,062)}{(5) \cdot (0,9) \cdot (0,9)}$$

$$C_s = 0,262$$

### Cálculo de coeficiente sísmico según ASCE 7-16

Bajo los parámetros de la norma ecuatoriana se tiene un coeficiente sísmico (Cs) de 0.262; sin embargo, al llevar la misma estructura al procedimiento del ASCE, se penaliza la estructura por falta de redundancia, se toma el valor de R=2,5 de la tabla 12.2-1 del ASCE 7-16, traducida en tabla 2 del presente trabajo (para sistemas dúctiles en cantiléver tipo G).

**Tabla 2**

*Coeficiente y Factores de diseño para Sistemas Resistentes a Fuerzas Sísmicas*

Sistema Resistente a Fuerzas Sísmica	Sección de la ASCE 7-16 donde se especifican los requisitos del detallamiento	Coeficiente de Modificación de Respuesta, R <sup>a</sup>	Factor de Sobre resistencia, $\Omega_0^b$	Factor de Amplificación de Deflexiones, C <sub>d</sub> <sup>c</sup>
<b>G. SISTEMAS DE COLUMNA EN VOLADIZO DETALLADOS QUE SE AJUSTEN A LOS REQUISITOS PARA:</b>	12.2.5.2			
<b>1.</b> Sistemas especiales de columna en voladizo de acero	14.1	2 <sup>1/2</sup>	1 <sup>1/4</sup>	2 <sup>1/2</sup>
<b>2.</b> Sistemas ordinarios de columna en voladizo de acero	14.1	1 <sup>1/4</sup>	1 <sup>1/4</sup>	1 <sup>1/4</sup>
<b>3.</b> Pórticos a momento especiales de	12.2.5.1 y 14.2	2 <sup>1/2</sup>	1 <sup>1/4</sup>	2 <sup>1/2</sup>

hormigón armado <sup>m</sup>					
4.	Pórticos a momento intermedios de hormigón armado	14.2	1 <sup>1/2</sup>	1 <sup>1/4</sup>	1 <sup>1/2</sup>
5.	Pórticos a momento ordinarios de hormigón armado	14.2	1	1 <sup>1/4</sup>	1
6.	Pórticos de madera	14.5	1 <sup>1/2</sup>	1 <sup>1/2</sup>	1 <sup>1/2</sup>

Nota. Tomado de Tabla 12.2-1 del (ASCE7 2016), traducido por J Suárez

Por tanto:

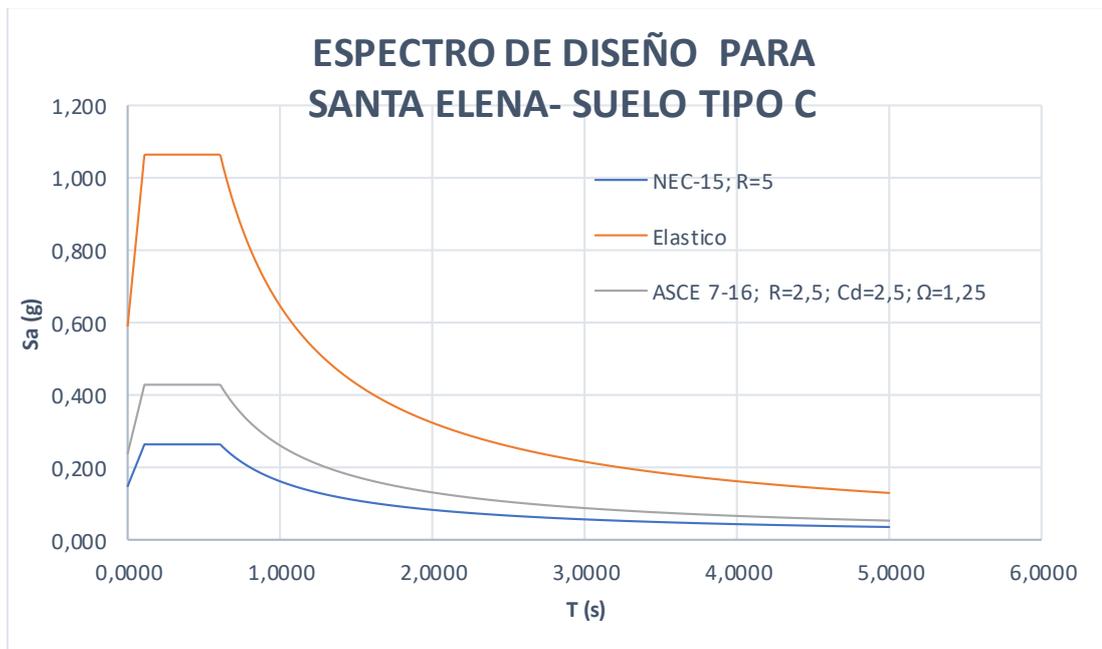
$$C_s = \frac{I \cdot S_a}{R/\rho}$$

$$C_s = \frac{1 \cdot (1,062)}{\frac{2,5}{1,3}}$$

$$C_s = 0,55$$

**Figura 15**

*Espectro de diseño para Santa Elena*



Brecha de seguridad (Bs) entre ambas normativas:

Si se define de manera numérica la diferencia entre los coeficientes sísmicos calculados por ambas normativas se puede determinar una brecha de seguridad (Bs) a través de la siguiente fórmula:

$$Bs = \frac{Cs-ASCE}{Cs-NEC} * 100\% \quad \text{Ec. (3.8)}$$

$$Bs = \frac{0,55}{0,262} * 100\%$$

$$\mathbf{Bs = 210\%}$$

### ***3.2.2 Edificio de Guayaquil que colapsó en Sismo Pedernales 2016***

Es una estructura de 4 plantas con 9 columnas y 2 volados grandes como se observa en la figura 16

#### **Figura 16**

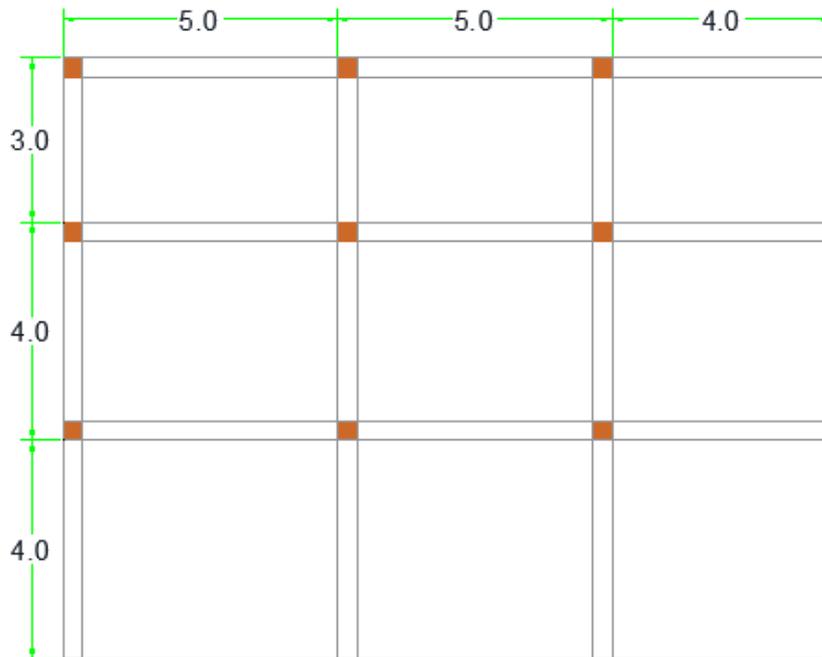
*Edificio de Guayaquil*



Nota. Tomado de Google Earth (2016)

**Figura 17**

*Vista en planta del Edificio de Guayaquil*



**Procedimiento para el cálculo del factor de redundancia,  $\rho$ .**

*Definir los pisos que resistan más del 35% del cortante Basal.* Se considera que los entrepisos ubicados en los primeros dos tercios de la altura de la edificación, están sometidos a fuerzas horizontales mayores al 35% del cortante basal; bajo esta consideración se incluyen en el análisis el primer y segundo entrepiso.

*Los pisos que resistan más del 35% del cortante Basal ¿satisfacen el punto b de la sección 12.3.4.2 del ASCE 7-16?* El edificio tiene 9 columnas 2 vanos en sus direcciones, esto inicialmente refleja una condición redundante, sin embargo, presenta 2 volados grandes como se observa en la figura, por ello su centro de masa no coincide con su centro de rigidez lo que otorga irregularidad y torsión. El sistema estructural consta de 4 niveles de pisos.

Según los requerimientos de ASCE 7-16 sección 12.3.4.2-b, una estructura debe ser regular en todas sus plantas, al no cumplirse este requerimiento, se prosigue con el análisis.

***Irregularidad Torsional Extrema.*** Se realiza el análisis visual por torsión excesiva, se encuentra que al perderse la resistencia a momento en las conexiones viga-columna, en los extremos de una viga, se genera la condición de cantiléver en las columnas, por tanto, el piso perderá su resistencia en un valor superior al 33%, esto por tener una elevación que provoca torsión extrema, el mismo efecto surgirá al articular la base de una columna.

Al cumplirse esta condición, el diagrama de flujo nos dirige al valor  $\rho=1,3$ .

### **Figura 18**

*Deformación de estructura aplicando rótulas plásticas*



Nota: Tomado de Google (Earth 2016)

### Figura 19

*Guayaquil, Estructura Colapsada Durante el Terremoto de Pedernales 2016, estaba Localizada en Aguacho y García Moreno, Tipo de Suelo E.*



### Cálculo de coeficiente sísmico según NEC-15

El edificio no cumple las condiciones para considerarse como una estructura de ocupación especial, ni como edificio esencial, por tanto, se asigna un factor de importancia  $I= 1$ .

Para el espectro de diseño  $S_a$  se consideran los factores:

- $z=0.4$  La provincia de Guayas se encuentra ubicada en la zona sísmica V como se especifica en la tabla 1 de NEC-15.
- $n= 1,8$  Provincias de la costa.
- Se considera un tipo de suelo E.
- Los coeficientes de perfil de suelo según la zona sísmica V y un tipo de suelo E son los siguientes:

$F_a=1, F_d=1.6$  y  $F_s=1.9$ .

- De acuerdo con la sección 6.3.3 de NEC-SE-DS, 2015 se calcula el período fundamental de vibración de la estructura como sigue:

- $T_a = c_t (h_n)^\alpha$

$$T_a = 0.055(12m)^{0.9}$$

$$\mathbf{T_a = 0,514}$$

- Se verifica cuáles son los periodos límites de vibración  $T_0$  y  $T_C$ .

- $T_0 = 0,1F_S \frac{F_d}{F_a}$

$$T_0 = 0,1(1,9) \frac{(1,6)}{(1)}$$

$$\mathbf{T_0 = 0,304seg}$$

- $T_C = 0,55F_S \frac{F_d}{F_a}$

$$T_C = 0,55(1,9) \frac{(1,6)}{(1)}$$

$$\mathbf{T_C = 1,672 seg}$$

Como el periodo fundamental de la estructura  $T$  se encuentra en el rango entre ambos valores se utiliza la ecuación:

$$S_a = nzF_a$$

$$S_a = 1.8 * 0.4 * 1$$

$$\mathbf{S_a = 0.72}$$

Los coeficientes de irregularidad en planta y elevación se asignan según el análisis normativo ecuatoriano:

$$\Phi_p = 0.9 \text{ (Presenta irregularidad torsional)}$$

$$\Phi_e = 0.9$$

R=8 (Sistema de pórtico dúctil especial sismo resistente, de hormigón armado con vigas descolgadas)

$$C_s = \frac{I S_a(T_a)}{R \phi_P \phi_E}$$

$$C_s = \frac{1(0.72)}{8(0.9)(0.9)}$$

$$C_s = 0.11$$

### Cálculo de coeficiente sísmico según ASCE 7-16

R= 2.5 según la tabla 12.2-1 considerando una viga en voladizo.

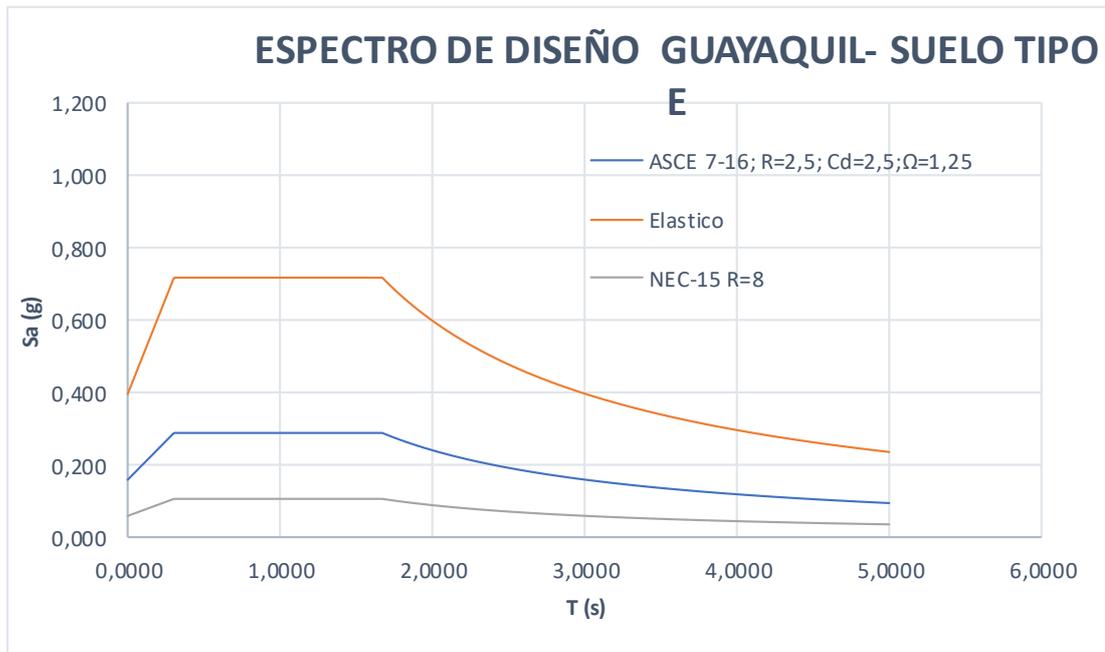
$$C_s = \frac{I S_a(T_a)}{R/\rho}$$

$$C_s = \frac{(1)(0.72)}{2.5/1.3}$$

$$C_s = 0.3744$$

**Figura 20**

*Espectro de diseño para Guayaquil*



**Brecha de seguridad (Bs) entre ambas normativas.**

Si se define de manera numérica la diferencia entre los coeficientes sísmicos calculados por ambas normativas se puede determinar una brecha de seguridad (Bs) a través de la siguiente formula:

$$Bs = \frac{Cs - ASCE}{Cs - NEC} * 100\%$$

$$Bs = \frac{0,3744}{0,111} * 100\%$$

$$Bs = 337\%$$

**3.3 Propuesta de Reforma en NEC-15 para incluir verificación por falta de redundancia**

A través del presente análisis se puede determinar que bajo los parámetros de la demanda sísmica de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15) los factores de regularidad, redundancia y torsión, generan un coeficiente sísmico que resulta

relativamente bajo en contraste con el procedimiento del mismo parámetro desarrollado bajo los procedimientos de la norma American Society of Civil Engineers (ASCE 7-16).

En los ejemplos calculados se determina que la brecha de seguridad, al realizar la comparación entre las normas ASCE 7-16 y NEC-15, resulta en un incremento del coeficiente sísmico en más del doble o del 200%. Esto genera un aumento considerable de la demanda sísmica, por lo tanto, la norma ecuatoriana debe considerar un factor de penalización para estructuras con poca redundancia, siendo viable el uso del factor  $\rho = 1,3$  para incrementar la fuerza de diseño sísmico.

Es necesario limitar el uso de estructuras irregulares con 3 ejes de columnas o menos; y las de todo tipo (regulares e irregulares) con solo 2 ejes de columnas en la dirección analizada y especificar el uso del valor máximo  $R=3$  para estructuras no redundantes.

## CONCLUSIONES

- Realizando el análisis entre las 2 estructuras de estudio se aprecia considerablemente la diferencia que existe entre las aceleraciones en un mismo periodo, como se puede diferenciar en figura 15 el coeficiente sísmicos  $C_s$  según la NEC-15 está mucho más por debajo del coeficiente del ASCE por lo

tanto la demanda incrementa la fuerza sísmica de diseño, elementos y cuantía de acero.

- La ASCE 7-16 por medio de categorías de diseño sísmica limita, condiciona y separa a las estructuras poco redundantes que son propensas a daños graves ante un evento sísmico, llegando a penalizar dichas edificaciones para aumentar la brecha de seguridad penalizando con  $\rho = 1,3$  para estructuras no redundantes.

### **RECOMENDACIONES**

- La inclusión del factor de redundancia ( $\rho = 1,3$ ) de diseño en la Norma Ecuatoria de Construcción (NEC-15) ayudará a separar a las estructuras en función a su poca redundancia que tienden a ser más vulnerables por un sismo, de este modo se podría limitar y priorizar un mejor diseño de este tipo de estructuras y así aumentar considerablemente la brecha de seguridad.
- Realizar una revisión de todos los parámetros que influyen en el espectro de diseño, como por ejemplo el coeficiente de modificación de respuesta R. Por ejemplo, para la tipología estructural utilizada como Caso de Estudio para Santa Elena (Pórtico de hormigón armado resistente a momento con vigas banda) se puede obtener el valor de  $R = 5$ , mismo que resulta muy alto. Se debe actualizar la norma NEC-15, para que se use otro valor de R, tal como el especificado en ASCE 7-16 ( $R = 2,5$ ).

# ANEXOS

## Anexo 1

Tabla 12.2-1 de ASCE 7-16

Table 12.2-1 (Continued) Design Coefficients and Factors for Seismic Force-Resisting Systems

Seismic Force-Resisting System	ASCE 7 Section Where Detailing Requirements Are Specified	Response Modification Coefficient, $R^a$	Overstrength Factor, $\Omega_o^b$	Deflection Amplification Factor, $C_d^c$	Structural System Limitations Including Structural Height, $h_u$ , (ft) Limits <sup>d</sup>				
					Seismic Design Category				
					B	C	D <sup>e</sup>	E <sup>e</sup>	F <sup>f</sup>
5. Steel and concrete composite special concentrically braced frames	14.3	5½	2½	4½	NL	NL	160	100	NP
6. Steel and concrete composite ordinary braced frames	14.3	3½	2½	3	NL	NL	NP	NP	NP
7. Steel and concrete composite ordinary shear walls	14.3	5	3	4½	NL	NL	NP	NP	NP
8. Ordinary reinforced concrete shear walls <sup>g</sup>	14.2	5½	2½	4½	NL	NL	NP	NP	NP
<b>F. SHEAR WALL-FRAME INTERACTIVE SYSTEM WITH ORDINARY REINFORCED CONCRETE MOMENT FRAMES AND ORDINARY REINFORCED CONCRETE SHEAR WALLS<sup>h</sup></b>	12.2.5.8 and 14.2	4½	2½	4	NL	NP	NP	NP	NP
<b>G. CANTILEVERED COLUMN SYSTEMS DETAILED TO CONFORM TO THE REQUIREMENTS FOR:</b>	12.2.5.2								
1. Steel special cantilever column systems	14.1	2½	1¼	2½	35	35	35	35	35
2. Steel ordinary cantilever column systems	14.1	1¼	1¼	1¼	35	35	NP <sup>i</sup>	NP <sup>i</sup>	NP <sup>i</sup>
3. Special reinforced concrete moment frames <sup>m</sup>	12.2.5.5 and 14.2	2½	1¼	2½	35	35	35	35	35
4. Intermediate reinforced concrete moment frames	14.2	1½	1¼	1½	35	35	NP	NP	NP
5. Ordinary reinforced concrete moment frames	14.2	1	1¼	1	35	NP	NP	NP	NP
6. Timber frames	14.5	1½	1¼	1½	35	35	35	NP	NP
<b>H. STEEL SYSTEMS NOT SPECIFICALLY DETAILED FOR SEISMIC RESISTANCE, EXCLUDING CANTILEVER COLUMN SYSTEMS</b>	14.1	3	3	3	NL	NL	NP	NP	NP

## Anexo 2

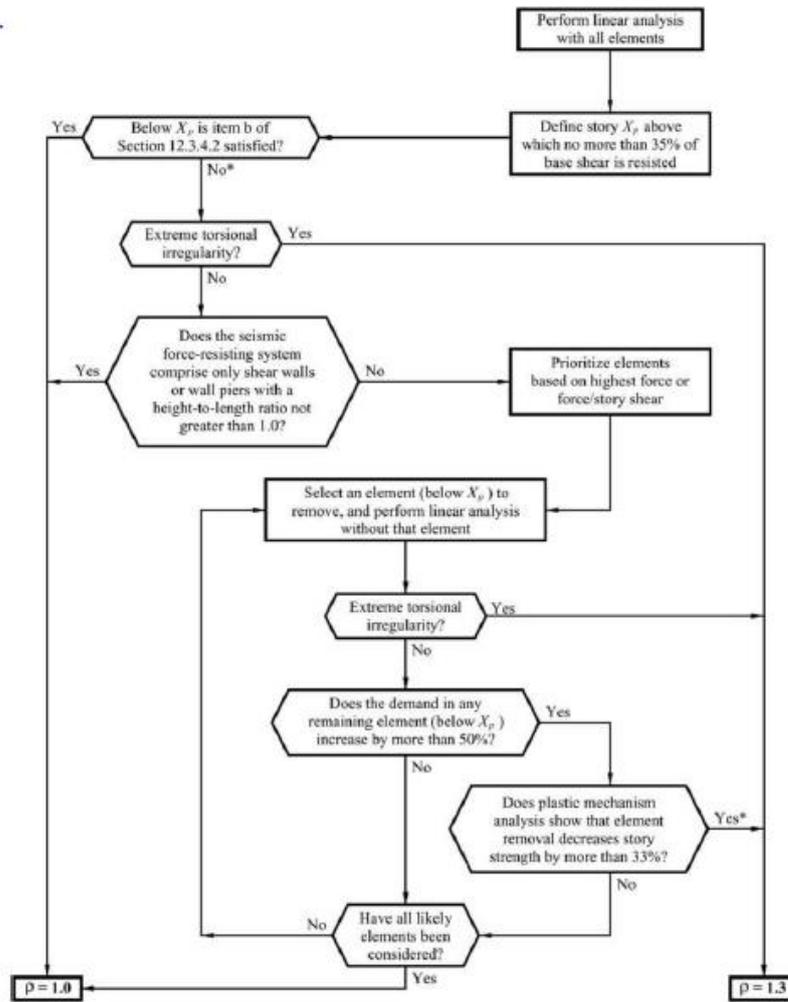
Tabla 12.3-3 de ASCE 7-16

Table 12.3-3 Requirements for Each Story Resisting More than 35% of the Base Shear

Lateral Force-Resisting Element	Requirement
Braced frames	Removal of an individual brace, or connection thereto, would not result in more than a 33% reduction in story strength, nor does the resulting system have an extreme torsional irregularity (horizontal structural irregularity Type 1b).
Moment frames	Loss of moment resistance at the beam-to-column connections at both ends of a single beam would not result in more than a 33% reduction in story strength; nor does the resulting system have an extreme torsional irregularity (horizontal structural irregularity Type 1b).
Shear walls or wall piers with a height-to-length ratio greater than 1.0	Removal of a shear wall or wall pier with a height-to-length ratio greater than 1.0 within any story, or collector connections thereto, would not result in more than a 33% reduction in story strength; nor does the resulting system have an extreme torsional irregularity (horizontal structural irregularity Type 1b). The shear wall and wall pier height-to-length ratios are determined as shown in Fig. 12.3-2.
Cantilever columns	Loss of moment resistance at the base connections of any single cantilever column would not result in more than a 33% reduction in story strength; nor does the resulting system have an extreme torsional irregularity (horizontal structural irregularity Type 1b).
Other	No requirements.

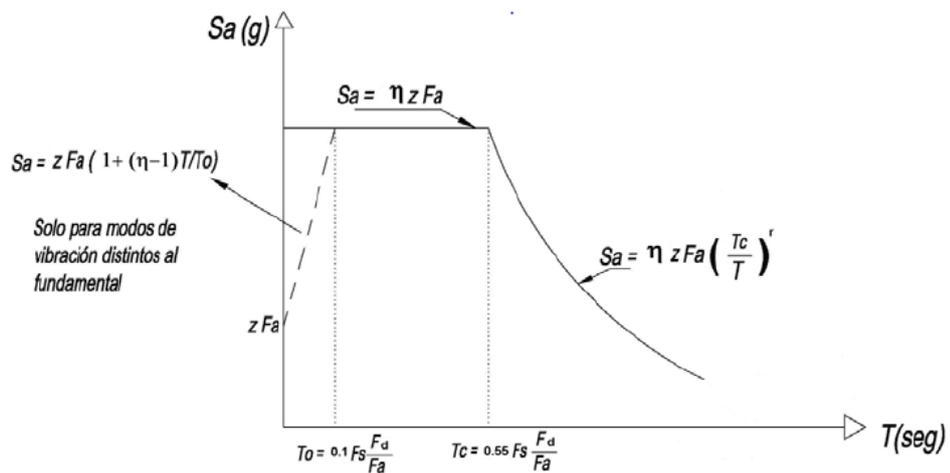
### Anexo 3

Figura C12.3-6 de ASCE 7-16



### Anexo 4

Espectro sísmico elástico de aceleraciones



## BIBLIOGRAFÍA

ABAD, J. C. and D. R. G. TORRES (2015). "ESTUDIO DE LOS COEFICIENTES DE REDUCCIÓN DE RESPUESTA ESTRUCTURAL R DE LA NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN." EI factor de redundancia: 51-56.

Argudo, I. J. (2021). Tutoría 8 de Febrero J Suarez Curva de Capacidad para Estructuras Redundantes R=8.

Argudo, I. J. (2021). Tutoría 8 Febrero J Suárez P. Point: Curva de Capacidad para Estructuras no Redundantes R=3.

ASCE7 (2016). "American Society of Civil Engineers."

Earth, G. (2016). Edificio de Guayaquil.

Iglesias, J. (1989). "Normas de diseño sismorresistente en america latina: Limitaciones." Seminario Internacional de Planeamiento, Diseño, Reparación y Administración de Hospitales en Zonas Sísmicas: 47-72.

NEC-SE-DS (2015). "NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCION NEC-SE-DS."

SECURITY, U. S. D. O. H. (2006). Designing for Earthquakes FEMA 454

Steinbrugge, K. (2010). Web-Berkeley

Suárez, J. (2021). "Fotografía."

Suárez, J. (2021). Vista en planta, edificio de Guayaquil.

Vielma Pérez, J. C. (2008). Caracterización del comportamiento sísmico de edificios de hormigón armado mediante la respuesta no lineal, Universitat Politècnica de Catalunya.