

**MODELO DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y DEL RIESGO
SÍSMICO BASADO EN EL PUNTO DE DESEMPEÑO PARA UNA
EDIFICACIÓN EN CONCRETO REFORZADO**

GERMAN CAMILO PARRA BALLESTEROS

FREDY SEBASTIAN TOLOZA PIMIENTO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

**MODELO DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y DEL RIESGO
SÍSMICO BASADO EN EL PUNTO DE DESEMPEÑO PARA UNA
EDIFICACIÓN EN CONCRETO REFORZADO**

GERMAN CAMILO PARRA BALLESTEROS

FREDY SEBASTIAN TOLOZA PIMIENTO

**Trabajo de investigación para optar por el título de
Especialista en Estructuras**

DIRECTOR

Alvaro Viviescas Jaimes

Ph.D en Ingeniería de la Construcción

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	12
1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACION DEL PROBLEMA	14
2. OBJETIVOS	15
2.1. OBJETIVO GENERAL	15
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	15
3. ALCANCE.....	16
4. METODOLOGIA	17
5. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	18
5.1. GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA.....	18
5.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	20
5.3. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	21
6. ACCIÓN SÍSMICA	22
6.1. NIVEL DE AMENAZA SÍSMICA	22
6.2. COEFICIENTE DE IMPORTANCIA DE LA ESTRUCTURA.....	25
6.3. ESPECTRO ELÁSTICO DE ACELERACIONES DE DISEÑO	26
6.4. DERIVAS.....	27
7. MODELO DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y DEL RIESGO SÍSMICO	28
7.1. ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL Y CURVA DE CAPACIDAD	28
7.2. ESPECTRO DE CAPACIDAD.....	30
7.3. ESTADOS DE DAÑO ESTRUCTURAL	31
7.4. CURVAS DE FRAGILIDAD	32
7.5. DEMANDA SÍSMICA	34
7.6. APROXIMACIÓN LINEAL EQUIVALENTE.....	35

7.7. PROCEDIMIENTO QUE CONSIDERA LA DUCTILIDAD DE LA ESTRUCTURA.....	35
7.8. INDICE DE DAÑO ESPERADO Y CURVA DE VULNERABILIDAD	38
8. ANALISÍS DE RESULTADOS	40
8.1. INDICE DE DAÑO ESPERADO.....	40
8.2. MATRICES DE PROBABILIDAD DE DAÑO	41
9. CONCLUSIONES.....	43
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	45
BIBLIOGRAFÍA.....	47

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Elevación edificación en estudio.....	18
Fig. 2. Planta estructural típica de la edificación en estudio.....	19
Fig. 3. Espesor equivalente para modelamiento en Etabs.	20
Fig. 4. Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de g	26
Fig. 5. Derivas de estructura ante efectos sísmicos en sentido X.....	27
Fig. 6. Derivas de estructura ante efectos sísmicos en sentido Y.....	27
Fig. 7. Representación del método adaptativo para obtener la curva de capacidad de la estructura.....	29
Fig. 8. Curva de capacidad	30
Fig. 9. Espectro de capacidad y representación bilineal	31
Fig. 10. Curvas de fragilidad.....	34
Fig. 11. Espectro en formato S_a - S_d y representación gráfica aproximación lineal equivalente (ALE)	35
Fig. 12. Factores de reducción espectral SRA y SRV	37
Fig. 13. Valores de k a partir del amortiguamiento espectral	37
Fig. 14. Espectro en formato S_a - S_d reducido y espectro de capacidad determinista.....	38
Fig. 15. Curva de vulnerabilidad a partir de las curvas de fragilidad como función del desplazamiento espectral.....	39
Fig. 16. Índice de daño para los desplazamientos espectrales esperados obtenidos con la ALE y con el ATC-40 capítulo 8.	40
Fig. 17. Matrices de probabilidad de daño para los desplazamientos espectrales esperados obtenidos con la ALE y con el ATC-40 capítulo 8.	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores de A_a y A_v para las ciudades capitales de departamento ..	23
Tabla 2. Clasificación de los perfiles de suelo	24
Tabla 3. Valores de coeficiente F_a	24
Tabla 4. Valores de coeficiente F_v	25
Tabla 5. Valores de coeficiente de importancia I	25
Tabla 6. Parámetros espectro de capacidad bilineal	31
Tabla 7. Valor medio, desviación estándar y coeficiente de variación para cada estado de daño	33
Tabla 8. Tipo comportamiento estructural	36
Tabla 9. Índice de daño de Park & Ang	41
Tabla 10. Matrices de probabilidad de daño asociada al desplazamiento espectral	42



RESUMEN

TITULO: MODELO DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y DEL RIESGO SÍSMICO BASADO EN EL PUNTO DE DESEMPEÑO PARA UNA EDIFICACIÓN EN CONCRETO REFORZADO*

AUTORES: Fredy Sebastian Toloza Pimiento **
German Camilo Parra Ballesteros **

PALABRAS CLAVE Índice de daño, vulnerabilidad, riesgo sísmico, punto de desempeño, desplazamiento espectral.

DESCRIPCIÓN:

El modelo de evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico, tiene como objetivo evaluar la respuesta de una estructura en concreto reforzado frente a la amenaza sísmica, basado en el índice de daño (ID). Se utilizará la metodología descrita en el Applied Technology Council 40 (ATC-40) para la determinación de los umbrales de daño a partir de la curva de capacidad de la estructura, aplicando el método estático no lineal pushover. Para el método pushover, se utilizará el software ETABS, obteniendo cortantes en la base y desplazamientos umbrales, y verificando que el modelo de estudio cumpla derivas según el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente NSR-10.

Se definirán las curvas de fragilidad de la estructura a partir de los umbrales de daño, utilizando la función de probabilidad log-normal acumulativa para obtener puntos sobre la gráfica, y construir las curvas a partir del método numérico de mínimos cuadrados. Se definirá la curva de vulnerabilidad a partir de las curvas de fragilidad según la probabilidad de ocurrencia de cada estado de daño, y finalmente se obtendrá el ID de la estructura utilizando el punto de desempeño de la estructura obtenido a partir del espectro de capacidad y el espectro de diseño. Se definirá el grado de daño a partir del ID obtenido.

* Trabajo de investigación

** Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director. Alvaro Viviecas Jaimes, Ing. Civil, Ph.D.



ABSTRACT

TITLE: VULNERABILITY AND SEISMIC RISK ASSESSMENT MODEL BASED ON THE PERFORMANCE POINT FOR A REINFORCED CONCRETE BUILDING*

AUTHORS: Fredy Sebastian Toloza Pimiento**
German Camilo Parra Ballesteros **

KEYWORDS Damage index, vulnerability, seismic risk, performance point, spectral shift.

DESCRIPTION:

The vulnerability and seismic risk assessment model aims to evaluate the reinforced concrete structure response to seismic hazard, based on damage index (ID). By the determination of damage thresholds, the methodology described in the Applied Technology Council 40 (ATC-40) will be used, taking on account the capacity curve of the structure, applying the non-linear pushover method. For the pushover method, the ETABS software will be used, obtaining base shear and spectral displacements, and fulfilling drifts according with NSR-10.

Using the log-normal cumulative probability function, the fragility curves of the structure will be defined, based in damage thresholds, obtaining points over the graph, and generating the curves with least square method. The vulnerability curve will be defined based on the probability of occurrence of each damage state, and finally, the structure damage index will be obtained using the performance point of the structure obtained from capacity spectrum and design spectrum. Damage grade will be defined in base of ID.

* Research work

** Physical-Mechanical Engineering Faculty. Department of Civil Engineering. Director. Alvaro Viviescas Jaimes, Civil Engineer, Ph.D.

INTRODUCCIÓN

El término daño pretende representar el deterioro físico de los diferentes elementos estructurales y no estructurales o el impacto económico asociado. En este contexto, es común referirse a un daño físico el cual puede ser calculado de manera local identificando los posibles daños en elementos como vigas, columnas y muros estructurales a partir de valores medidos y característicos como la presencia de grietas, deformaciones excesivas, rotulación plástica, fatiga del material, entre otros.

De manera global puede ser representado con índices de daño para diferentes grados de daño observados a partir de modelos de combinación lineal debidos a la máxima incursión inelástica y a la historia de deformaciones [1]. Mientras más irregular sea la estructura, tiene mayor dificultad para determinar la incidencia que puede presentar el deterioro de un elemento estructural en la respuesta global, representado por medio de curvas de daño [2].

La respuesta global depende del comportamiento de cada uno de sus elementos, tanto en geometría como en el comportamiento de los materiales. Una estructura puede tener una respuesta inelástica como consecuencia de las grandes deformaciones que se pueden presentar durante un sismo de gran intensidad [3]. Estas deformaciones inelásticas asociadas a un nivel de daño someten a la estructura a altas demandas de ductilidad como forma de disipar energía [4].

En la evaluación del daño en estructuras intervienen dos variables, la capacidad de la estructura y la acción sísmica. La primera variable describe los posibles daños en edificios a partir de un cálculo determinista considerando los valores medidos y característicos de las variables implicadas en el cálculo. La segunda variable evalúa el daño sísmico probabilista, al ser la acción sísmica una consecuencia de la máxima

respuesta de la estructura y del daño acumulado a través de los ciclos histeréticos de deformaciones [4].

El estudio está enfocado en aplicar el método de evaluación determinista de la vulnerabilidad y riesgo sísmico con el fin de determinar el índice de daño de una estructura de concreto reforzado.

1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACION DEL PROBLEMA

Entre las principales causas de pérdidas humanas y económicas se encuentra el daño y colapso de las estructuras civiles producidas por los efectos de la acción sísmica. Para estimar el daño que se va a producir en una estructura, es necesario considerar dos variables fundamentales, la amenaza sísmica a la que está expuesta y la vulnerabilidad de la estructura ante cargas horizontales [5]. Esta amenaza o comúnmente conocida como la acción sísmica, es la principal fuente de incertidumbre en el cálculo del daño estructural esperado.

Los criterios de diseño actuales involucran esta incertidumbre, usando coeficientes de seguridad que aumentan las acciones, en algunas ocasiones hasta el doble, y disminuyen la resistencia de los materiales hasta menos del 60% [5]. El diseño estructural está basado en un modelo simplificado, con la hipótesis de que la estructura se deforme inelásticamente para disipar energía; por esto en los códigos de diseño estructural se disminuyen las fuerzas sísmicas por un coeficiente de reducción R , el cual está asociado a la ductilidad. Este uso de coeficientes de seguridad en la metodología de diseño no estima de manera confiable la respuesta estructural, difiriendo considerablemente del comportamiento real, ya que se basa en cálculos lineales.

Por esta razón es importante mejorar el comportamiento ante acciones sísmicas de las estructuras que se van a construir, y en las estructuras existentes evaluar la necesidad de reforzar, a través de metodologías para evaluar el daño, permitiendo así, la protección de la vida y la elección de los niveles de desempeño para un comportamiento estructural esperado.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Aplicar el método de evaluación determinista de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico basado en el punto de desempeño para obtener el índice de daño (ID) para una edificación de cinco pisos en concreto reforzado.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Aplicar la metodología del Applied Technology Council 40 (ATC 40) para la determinación de los umbrales de daño de la estructura, a partir de la curva de capacidad de la estructura.
- Definir las curvas de fragilidad de la estructura a partir de la función de probabilidad log-normal acumulativa.
- Definir la curva de vulnerabilidad a partir de la probabilidad de ocurrencia del estado de daño.
- Obtener el índice de daño global de la estructura usando el desplazamiento espectral máximo a partir del punto de desempeño de la estructura.

3. ALCANCE

En el estudio se aplicará el método de evaluación determinista de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico basado en el punto de desempeño para la obtención del índice de daño de una edificación de cinco pisos en concreto reforzado.

Para la obtención de las curvas de capacidad necesarias para el método se seguirá la metodología descrita en el ATC 40 usando el método estático no lineal pushover, sin tener en cuenta los efectos P-Delta asumiendo una estructura geoméricamente regular. Los umbrales de daño de la estructura se obtendrán siguiendo la metodología del ATC 40.

Las curvas de fragilidad se definirán asumiendo que el daño sísmico en el edificio se ajusta a una distribución binomial, y que las curvas siguen una función de probabilidad log-normal acumulativa.

La curva de vulnerabilidad se definirá a partir de la probabilidad de ocurrencia de cada estado de daño obtenido a partir de las curvas de fragilidad.

El índice de daño (ID) se determinará a partir del desplazamiento espectral máximo a partir del punto de desempeño de la estructura.

4. METODOLOGIA

Para alcanzar los objetivos descritos, es necesario realizar una revisión bibliográfica en artículos, tesis de grado y revistas de ingeniería, enfocado en el estudio de la metodología y aplicaciones del modelo para la evaluación del daño estructural.

Para el estudio se seleccionó una edificación regular de cinco pisos en concreto reforzado, y se propuso su distribución estructural.

Se debe obtener la curva de capacidad de la estructura aplicando el método estático no lineal pushover, a partir de los desplazamientos de techo y los cortantes en la base.

Se determinan los umbrales de daño de la estructura a partir de la curva de capacidad de la estructura, siguiendo el procedimiento descrito en el ATC-40, calculando cuatro umbrales de daño.

Definir las curvas de fragilidad de la estructura a partir de los umbrales de daño y asumiendo que las curvas se acomodan a una función de probabilidad log-normal acumulativa.

Es necesario definir la curva de vulnerabilidad de la estructura a partir de la probabilidad de ocurrencia de cada umbral de daño.

Finalmente, a partir del punto de desempeño de la estructura, superponiendo los espectros de diseño y de capacidad, se obtiene el máximo desplazamiento espectral, con el cual se determina el índice de daño global de la estructura.

El software que se usará para la obtención de la curva de capacidad de la estructura a partir del análisis estático no lineal pushover, será el programa de cálculos de estructuras Etabs 2015, versión 15.2.2, de Computers and Structures, Inc.

5. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

5.1. GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA

Para el caso de estudio, se utilizará una edificación de uso vivienda, que consta de 5 pisos, ver figura 1, y tiene una estructura en concreto reforzado, ver figura 2.

Fig. 1. Elevación edificación en estudio.

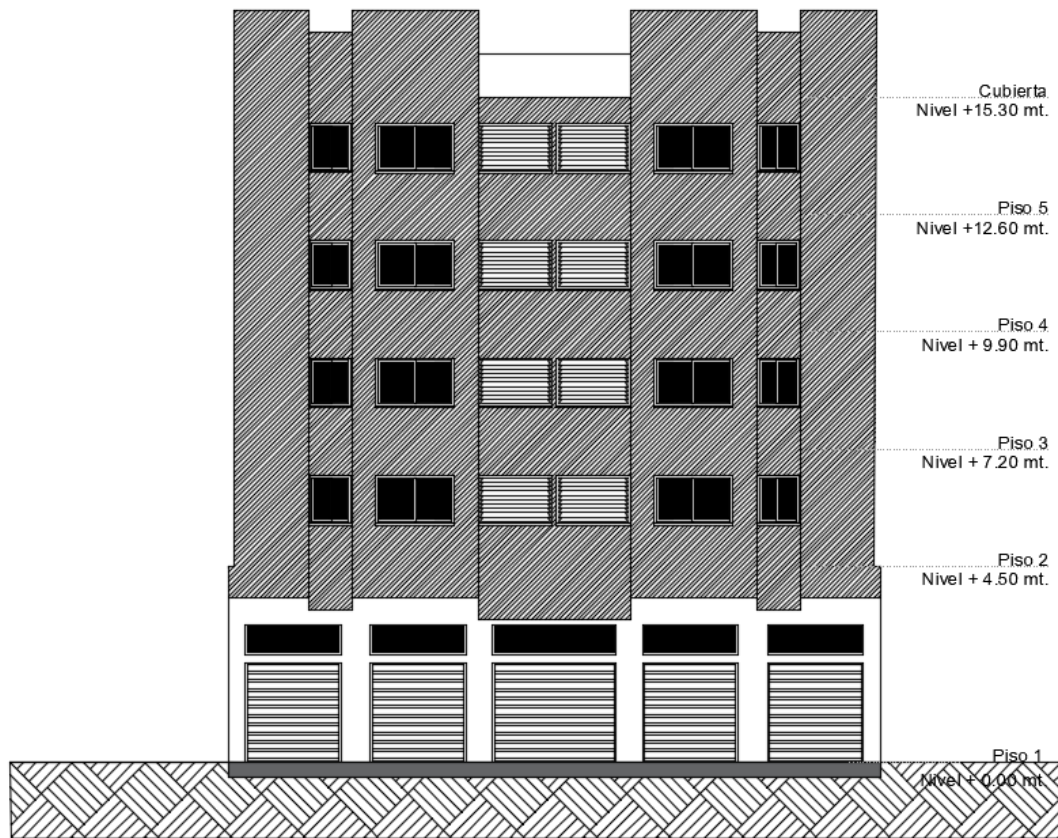
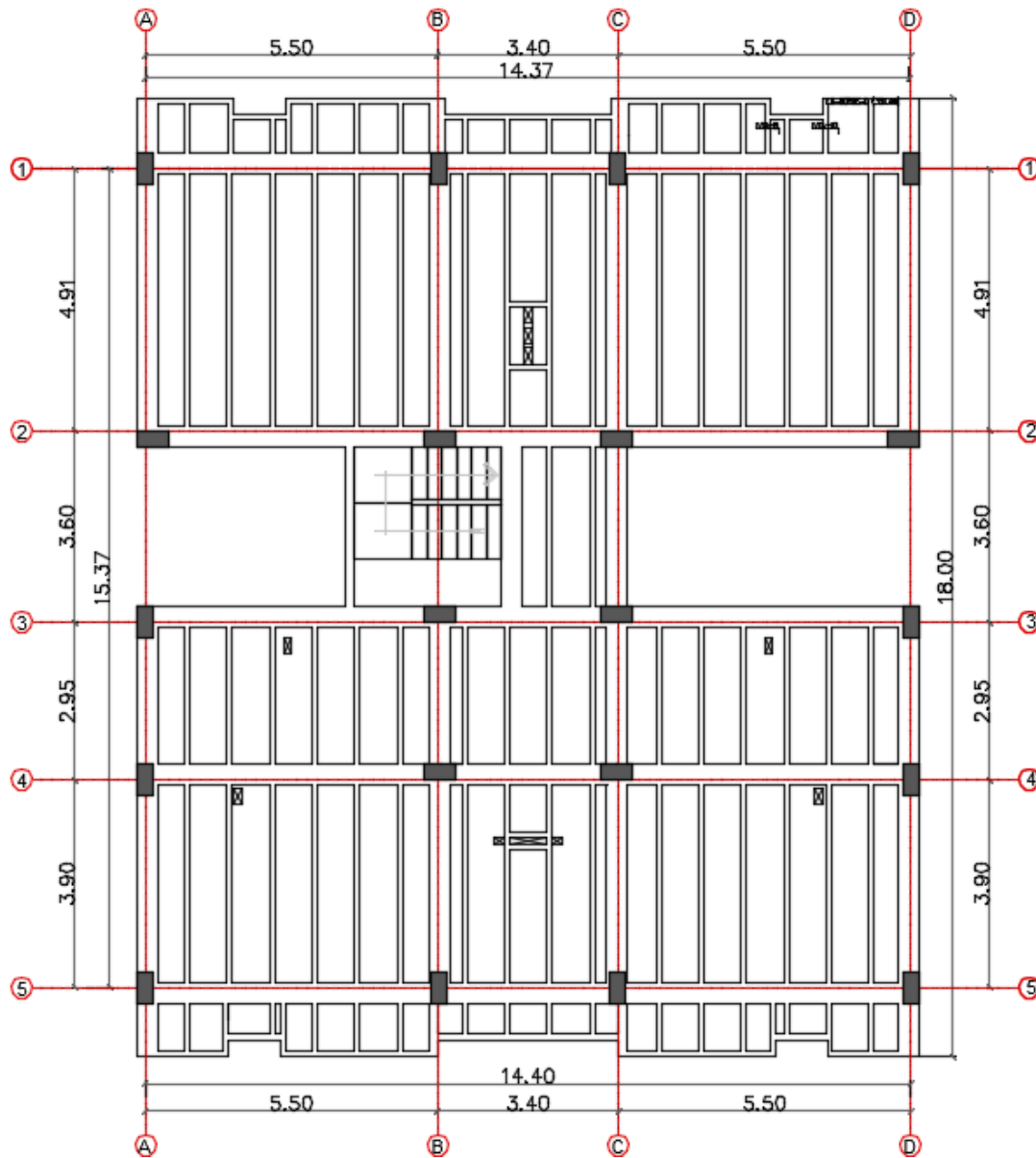


Fig. 2. Planta estructural típica de la edificación en estudio.



Las dimensiones de los elementos estructurales están dadas a continuación:

Columnas de 30x60 nivel N+0.00 a N+12.60

Columnas de 30x30 nivel N+15.30

Vigas 40x40 nivel N+4.50 a N+7.20

Vigas 30x40 nivel N+9.90 a N+15.30

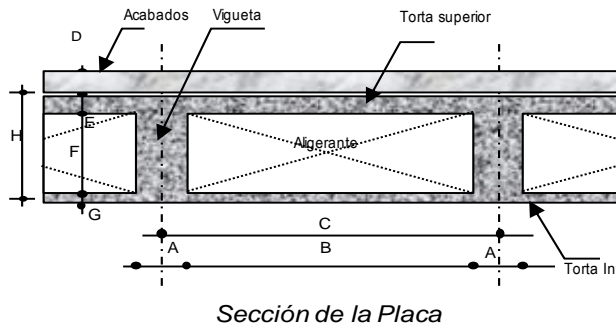
5.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Para estimar la respuesta dinámica de la estructura se ha hecho un modelo en tres dimensiones, en el software Etabs, utilizando elementos tipo Frame y Shell. Los elementos tipo Frame son utilizados para modelar vigas y columnas; para considerar la placa de entrepiso se usan elementos tipo Shell. De acuerdo al tipo de cimentación, la rigidez y la capacidad de los suelos que sirven de apoyo se considerará para efectos del modelo que el edificio se encuentra empotrado en la base.

Debido a que se tiene una placa aligerada, se realizó el cálculo de un espesor equivalente para la facilidad en el modelamiento. Ver figura 3.

Fig. 3. Espesor equivalente para modelamiento en Etabs.

Placa Aligerada / PLACA TIPO



A = 0.10
B = 0.70
C = 0.80
D = 0.05

E = 0.05
F = 0.320
G = 0.03
H = 0.40

CONSUMO = 0.120 m³/m²

Sentidos de armado de viguetas:
1 dirección

PLACA TIPO

Carga muerta

Peso propio.....	288.0 kgf/m ²
Afinado de piso.....	110.0 kgf/m ²
Fachada y particiones.....	300.0 kgf/m ²
Aligerante.....	0.0 kgf/m ²
Instalaciones.....	5.0 kgf/m ²
Otros.....	5.0 kgf/m ²
	708 kgf/m²

Carga viva Es Parqu No

72.2 kg/m²	N.S.R.-10 Secc. B.4.2.1	200 kgf/m²
------------------------------	-------------------------	------------------------------

Datos para el archivo de ETABS

Peso del material :	2,400 kg{f}/m ³	Espesor Equivalente:	0.30 m	Carga Muerta :	708 kg{f}/m ²
Masa equivalente del material :	244.65 kg{m}/m ³	Masa adicional 25% Qv :	0.0 kg{m}/m²	Carga Viva :	200 kg{f}/m ²

5.3. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Para realizar el modelo de matemático y obtener la respuesta sísmica de la estructura, es necesario definir los materiales que se van a usar y sus propiedades.

La estructura de la edificación estará hecha en concreto reforzado, por lo que es necesario definir dos materiales:

Concreto: Es un material de amplio uso en el país debido a su alta resistencia a la compresión; su desventaja es la baja resistencia a la tensión. A continuación, se definen las principales propiedades del concreto.

- Resistencia a la compresión: $f'_c = 21 \text{ MPa}$
- Módulo de elasticidad: Suponiendo agregado normal según la NSR-10. $E_c = 3900 * \sqrt{f'_c} = 17872 \text{ MPa}$

Acero: Para el concreto reforzado, se utiliza acero corrugado para aportar resistencia a la tensión. A continuación, se definen las principales propiedades del acero:

- Esfuerzo de fluencia: $f_y = 420 \text{ MPa}$
- Módulo de elasticidad: $E_s = 200000 \text{ MPa}$

6. ACCIÓN SÍSMICA

La demanda sísmica de la estructura será evaluada a través del espectro elástico de aceleraciones de diseño para Colombia, siguiendo la metodología descrita en el Capítulo A del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

6.1. NIVEL DE AMENAZA SÍSMICA

El edificio se encuentra localizado en la ciudad de Bucaramanga, en el departamento de Santander, la cual es zona catalogada de amenaza sísmica alta por la NSR-10.

Los movimientos sísmicos se definen a través de parámetros que representan la aceleración pico efectiva (A_a) y la velocidad pico efectiva (A_v), los cuales se definen para las principales ciudades del país en la tabla 1.

$$A_a = 0.25 \quad A_v = 0.25$$

Los efectos locales se deben tener en cuenta, dependen del perfil de suelo, y son representados por dos factores que afectan el espectro F_a y F_v . Dichos factores dependen del tipo de suelo según la clasificación dada en la tabla 2, y de los parámetros A_a y A_v , como se puede ver en la tabla 3 y tabla 4.

$$F_a = 1.15 \quad F_v = 1.55$$

Tabla 1. Valores de A_a y A_v para las ciudades capitales de departamento.

Ciudad	A_a	A_v	Zona de Amenaza Sísmica
Arauca	0.15	0.15	Intermedia
Armenia	0.25	0.25	Alta
Barranquilla	0.10	0.10	Baja
Bogotá D. C.	0.15	0.20	Intermedia
Bucaramanga	0.25	0.25	Alta
Cali	0.25	0.25	Alta
Cartagena	0.10	0.10	Baja
Cúcuta	0.35	0.30	Alta
Florencia	0.20	0.15	Intermedia
Ibagué	0.20	0.20	Intermedia
Leticia	0.05	0.05	Baja
Manizales	0.25	0.25	Alta
Medellín	0.15	0.20	Intermedia
Mitú	0.05	0.05	Baja
Mocoa	0.30	0.25	Alta
Montería	0.10	0.15	Intermedia
Neiva	0.25	0.25	Alta
Pasto	0.25	0.25	Alta
Pereira	0.25	0.25	Alta
Popayán	0.25	0.20	Alta
Puerto Carreño	0.05	0.05	Baja
Puerto Inírida	0.05	0.05	Baja
Quibdó	0.35	0.35	Alta
Riohacha	0.10	0.15	Intermedia
San Andrés, Isla	0.10	0.10	Baja
Santa Marta	0.15	0.10	Intermedia
San José del Guaviare	0.05	0.05	Baja
Sincelejo	0.10	0.15	Intermedia
Tunja	0.20	0.20	Intermedia
Valledupar	0.10	0.10	Baja
Villavicencio	0.35	0.30	Alta
Yopal	0.30	0.20	Alta

Fuente: Reglamento Colombiano de construcción sismo-resistente NSR-10.

Capítulo A.2

Tabla 2. Clasificación de los perfiles de suelo.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > $\bar{v}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s > $\bar{v}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s > $\bar{v}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) > $\bar{s}_u \geq 50$ kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²)
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	180 m/s > \bar{v}_s
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	IP > 20 w $\geq 40\%$ 50 kPa (≈ 0.50 kgf/cm ²) > \bar{s}_u
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F₁ — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F₂ — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F₃ — Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con Índice de Plasticidad IP > 75) F₄ — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)	

Fuente: Reglamento Colombiano de construcción sismo-resistente NSR-10.
Capítulo A.2

Tabla 3. Valores de coeficiente Fa.

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_a \leq 0.1$	$A_a = 0.2$	$A_a = 0.3$	$A_a = 0.4$	$A_a \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Nota: Para el perfil tipo **F** debe realizarse una investigación geotécnica particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda de acuerdo con A.2.10.

Fuente: Reglamento Colombiano de construcción sismo-resistente NSR-10.
Capítulo A.2

Tabla 4. Valores de coeficiente F_v .

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_v \leq 0.1$	$A_v = 0.2$	$A_v = 0.3$	$A_v = 0.4$	$A_v \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Nota: Para el perfil tipo **F** debe realizarse una investigación geotécnica particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda de acuerdo con A.2.10.

Fuente: Reglamento Colombiano de construcción sismo-resistente NSR-10.

Capítulo A.2

6.2. COEFICIENTE DE IMPORTANCIA DE LA ESTRUCTURA

Para definir el espectro elástico de aceleraciones es necesario clasificar la estructura dentro de uno de los grupos de uso definidos en la NSR-10. Los grupos de uso clasifican las estructuras dependiendo de la importancia de la edificación después de la ocurrencia de un sismo. La edificación usada en este estudio es de vivienda, por lo tanto, se clasifica en el Grupo I – Estructuras de ocupación normal, y su Coeficiente de Importancia se puede obtener de la tabla 5.

Tabla 5. Valores de coeficiente de importancia I.

Grupo de Uso	Coeficiente de Importancia, I
IV	1.50
III	1.25
II	1.10
I	1.00

Fuente: Reglamento Colombiano de construcción sismo-resistente NSR-10.

Capítulo A.2

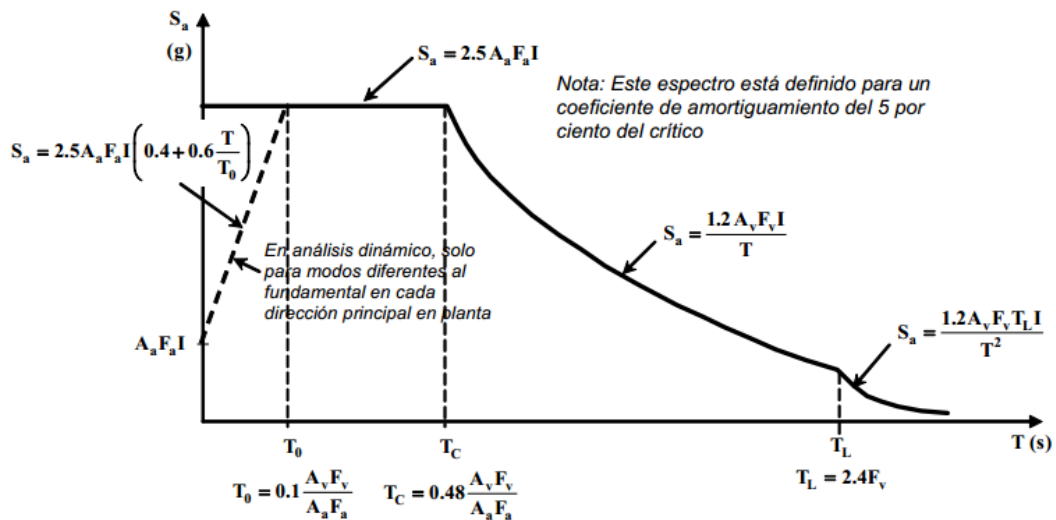
$$I = 1.00$$

El Coeficiente de Importancia I modifica el espectro elástico de aceleraciones de diseño.

6.3. ESPECTRO ELÁSTICO DE ACELERACIONES DE DISEÑO

El espectro elástico de aceleraciones de diseño está definido por las ecuaciones de la figura 4, donde el valor del espectro de aceleraciones (S_a) depende del periodo de vibración de la estructura.

Fig. 4. Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de g.



Fuente: Reglamento Colombiano de construcción sismo-resistente NSR-10.
Capítulo A.2

$$T_0 = 0.135 \text{ seg} \quad T_C = 0.647 \text{ seg} \quad T_L = 3.720 \text{ seg}$$

$$S_a = 2.5 * A_a * F_a * I = 0.719$$

$$S_a = \frac{1.2 * A_v * F_v * I}{T} = 0.465/T$$

$$S_a = \frac{1.2 * A_v * F_v * T_L * I}{T^2} = 1.730/T$$

6.4. DERIVAS

Con la descripción de la estructura y la determinación del espectro elástico de aceleraciones, es posible determinar el comportamiento de la estructura ante acciones sísmicas, a través de derivas en dos sentidos de estudio, X y Y. Ver figura 5 y figura 6.

Fig. 5. Derivas de estructura ante efectos sísmicos en sentido X.

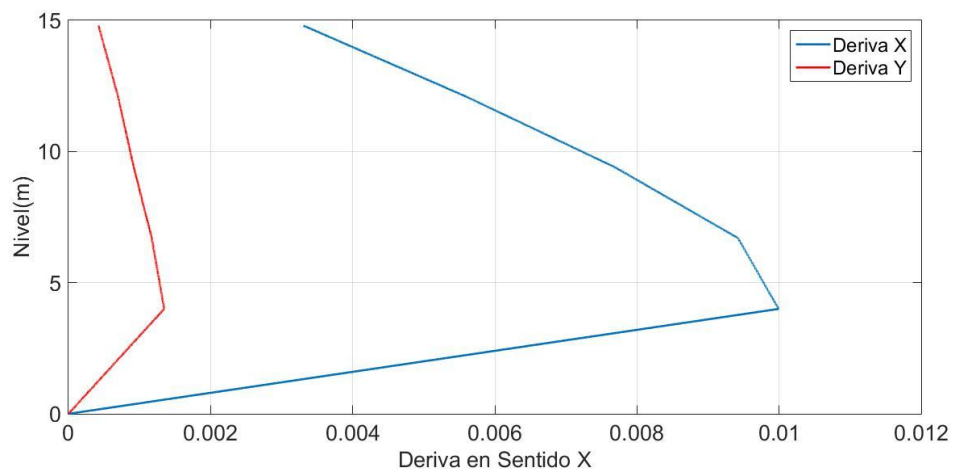
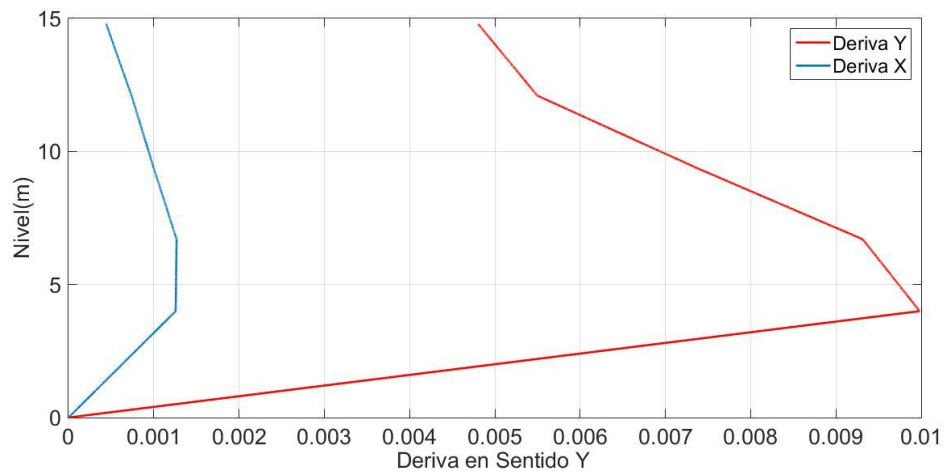


Fig. 6. Derivas de estructura ante efectos sísmicos en sentido Y.



Las derivas son menores al 1% y cumplen con lo exigido en la NSR-10.

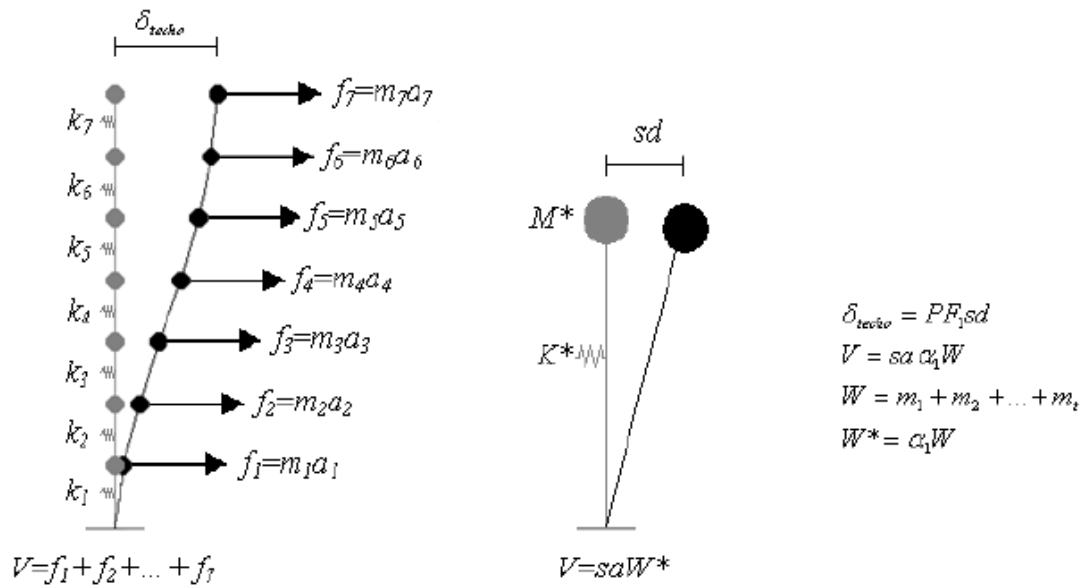
7. MODELO DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y DEL RIESGO SÍSMICO

7.1. ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL Y CURVA DE CAPACIDAD

El análisis estático no lineal de carga incremental, llamado pushover analysis (PA), permite evaluar el comportamiento de las estructuras frente a cargas horizontales, la forma de la carga es proporcional al primer modo de vibración. Este método consiste en aplicar una carga horizontal determinado a la estructura e ir incrementando su valor hasta que, de acuerdo con algún criterio prefijado, se considere que la estructura ha colapsado.

En este trabajo se implementó el análisis no lineal incremental adaptativo, en este procedimiento la respuesta de la estructura es independiente del patrón de carga aplicada, ya que los incrementos de carga dependen de la masa de la estructura, la frecuencia equivalente y la función de la forma desplazada de la estructura. El desplazamiento en el techo producido por un patrón de cargas es equivalente al desplazamiento espectral del sistema de vibración de un grado de libertad, ver figura 7.

Fig. 7. Representación del método adaptativo para obtener la curva de capacidad de la estructura.

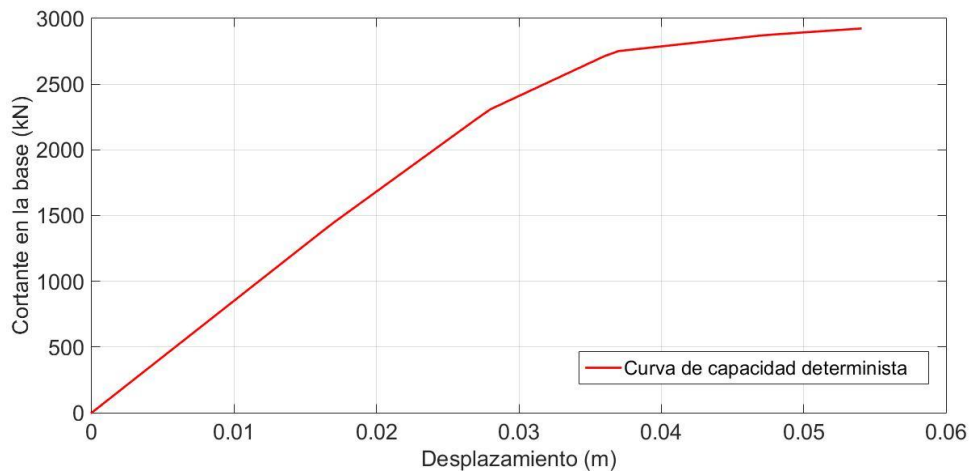


Fuente: Y. F. Vargas Alzate, «Análisis estructural estático y dinámico probabilista de edificios de hormigón armado. Aspectos metodológicos y aplicaciones a la evaluación del daño.,» Barcelona, 2013.

Donde a_i es la aceleración a la que está sometida la masa m_i , V es el cortante en la base de la estructura, K_i es la rigidez por piso, δ_{techo} es el desplazamiento en el techo de la estructura después de aplicar las fuerzas f_i , Sa y Sd son la aceleración y el desplazamiento espectral respectivamente.

En este análisis se consideran dos variables de control que son el desplazamiento en el techo de la estructura δ , y el cortante en la base V , que dependen de las fuerzas aplicadas. La relación entre δ y V , es la curva de capacidad, ver figura 8.

Fig. 8. Curva de capacidad.



En la figura 8, se muestra los resultados obtenidos mediante procedimiento tradicional para carga según el primer modo de vibración. La estructura en estudio soporto un cortante de 2927.05 kN asociado a un desplazamiento en el techo máximo de 5.45 cm.

7.2. ESPECTRO DE CAPACIDAD

Para comparar la demanda con la respuesta estructural, la curva de capacidad calculada en el numeral anterior, debe ser transformada en un espectro de capacidad, el cual relaciona el desplazamiento espectral con la aceleración espectral mediante las siguientes ecuaciones:

$$sd_i = \frac{\delta_i}{PF_i} \quad (1)$$

$$sa_i = \frac{V_t W}{\alpha_i} \quad (2)$$

Esta transformación se realiza mediante un cambio, punto a punto, de variable, donde el cortante en la base se transforma en aceleración espectral sa_i y el desplazamiento en el techo en desplazamiento espectral sd_i . Para la correcta realización de esta transformación es necesario conocer las

propiedades dinámicas de la estructura, ya que, en la ecuación de transformación se utiliza el peso total de la estructura W , el coeficiente de masa modal para el primer modo natural de la estructura α_1 , el cortante en la base V_t , el factor de participación modal PF_1 , el desplazamiento en el techo de la estructura δ_i . En la figura 9 se puede ver en espectro de capacidad y la representación bilineal, y en la tabla 6, se pueden ver los parámetros del espectro de capacidad bilineal.

Fig. 9. Espectro de capacidad y representación bilineal.

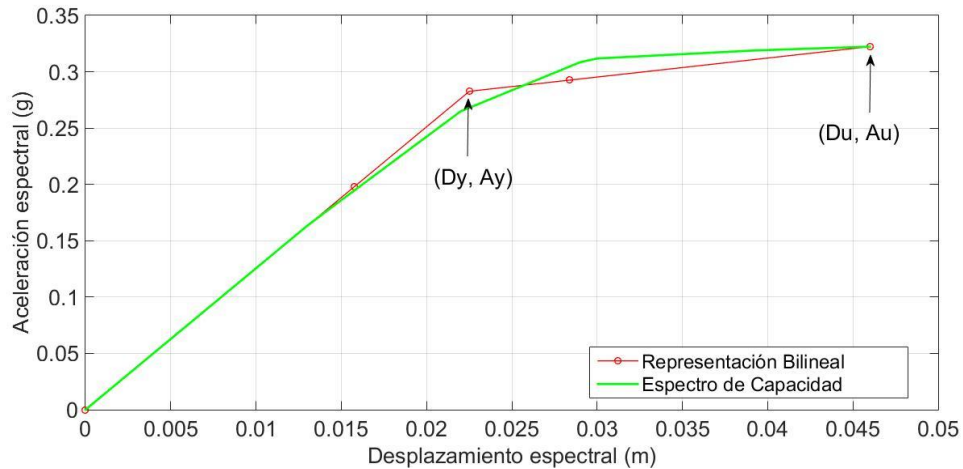


Tabla 6. Parámetros espectro de capacidad bilineal.

Punto de Fluencia		Capacidad Última	
Dy (m)	Ay (g)	Du (m)	Au (g)
0.0225	0.2827	0.046	0.3223

7.3. ESTADOS DE DAÑO ESTRUCTURAL

El daño de una estructura puede ser definido a partir de unos estados de daño (ds), que son una descripción del daño sísmico en la estructura para un desplazamiento espectral dado [5]. Autores como [1], [8], [9] definen 4 estados de daño: leve, moderado, severo y completo, que depende de la tipología estructural; en el caso de estructuras de hormigón armado, el ds leve se describe como el inicio de fisuras por momento flector o por cortante

en las vigas y columnas; en el ds completo se considera que la estructura colapsa o que hay un inminente riesgo de colapso [9].

En las referencias [3], [9] proponen definir los ds, de forma simplificada, a partir del espectro de capacidad en su representación bilineal, definiendo los desplazamientos espectrales correspondientes a los umbrales de los cuatro estados de daño dsi (leve, moderado, extensivo y colapso). A partir de los valores (Dy, Ay) y (Du, Au), como se ve en las ecuaciones 3 a 6:

$$ds_1 = 0.7Dy \quad (3)$$

$$ds_2 = Dy \quad (4)$$

$$ds_3 = Dy + 0.25 Du - Dy \quad (4)$$

$$ds_4 = Du \quad (6)$$

Los valores (Dy, Ay) están asociados al desplazamiento de fluencia y (Du, Au) al desplazamiento último del espectro de capacidad, ver figura 9.

De estas ecuaciones se obtiene los siguientes estados de daño:

$$ds_1 = 1.58 \text{ cm}, ds_2 = 2.25 \text{ cm}, ds_3 = 2.84 \text{ cm}, ds_4 = 4.60 \text{ cm}.$$

7.4. CURVAS DE FRAGILIDAD

Las curvas de fragilidad, ver figura 10, representan la probabilidad que se alcance o exceda un estado de daño, como una función del desplazamiento espectral [3].

Para construir las curvas de fragilidad, autores como [3], [5] han considerado las siguientes hipótesis:

1) La probabilidad de que se iguale o exceda el estado de daño en los desplazamientos espectrales de los umbrales de cada estado de daño es del 50%.

2) El daño sísmico esperado en los edificios sigue una distribución de probabilidad binomial.

3) Las curvas de fragilidad siguen una función de probabilidad log-normal acumulativa descrita por la ecuación 7:

$$P ds_i \leq sd = \frac{1}{\beta_{dsi}} \text{Ln} \frac{sd}{ds_i} \quad (7)$$

Donde sd es el desplazamiento espectral y β_{dsi} es la desviación estándar del logaritmo natural de la variable ds_i .

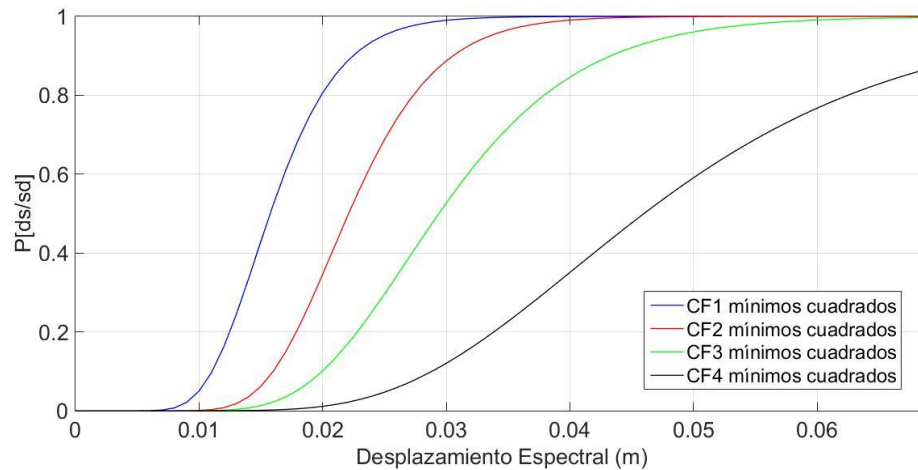
En la tabla 7 se muestra los valores medios, la desviación estándar y el coeficiente de variación para los cuatro estados de daño. Se observa que los umbrales de daño tienen baja dispersión ya que el coeficiente de variación es menor al 10%. Los umbrales de daño ds_1 , ds_2 están correlacionados con la aceleración espectral, ya que los desplazamientos espectrales asociados están dentro del rango lineal de la estructura.

Tabla 7. Valor medio, desviación estándar y coeficiente de variación para cada estado de daño.

Parámetros	ds_1	ds_2	ds_3	ds_4
$\mu_{ds}(cm)$	1.580	2.225	2.840	4.600
$\sigma_{ds}(cm)$	0.140	0.200	0.250	0.410
$c.v$	0.089	0.090	0.088	0.089

Las curvas de fragilidad se generan a partir de la lluvia de puntos obtenidos por la ecuación 7, utilizando el método numérico de mínimos cuadrados.

Fig. 10. Curvas de fragilidad.



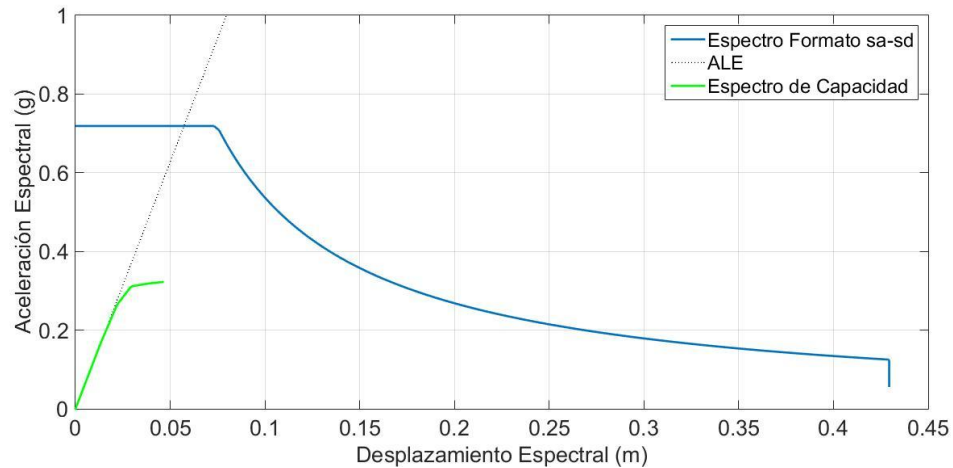
7.5. DEMANDA SÍSMICA

Para el cálculo del desplazamiento espectral esperado se ha hecho un estudio comparativo sobre los enfoques deterministas con los métodos simplificados del ATC-40, como la aproximación lineal equivalente y el que tiene en cuenta la reducción por la ductilidad de la estructura.

Para que el índice de daño, ID, dependa de la acción sísmica, se debe calcular el punto de desempeño, el cual representa el desplazamiento máximo de una estructura representado en términos del espectro de respuesta para una demanda sísmica dada. En este trabajo se utilizan 2 de estos métodos, la aproximación lineal equivalente y el procedimiento que considera la ductilidad de la estructura.

7.6. APROXIMACIÓN LINEAL EQUIVALENTE

Fig. 11. Espectro en formato Sa-Sd y representación gráfica aproximación lineal equivalente (ALE).



El primero es la aproximación lineal equivalente (ALE), que consiste en prolongar el tramo elástico del espectro de capacidad y cruzarlo con el espectro elástico de demanda en formato Sa-Sd, ver figura 11. La proyección de este punto de cruce sobre la curva de capacidad será el punto de capacidad por demanda. Para el edificio en estudio usando la ALE, el desplazamiento espectral esperado que se obtiene es $S_d = 0.057$ m.

7.7. PROCEDIMIENTO QUE CONSIDERA LA DUCTILIDAD DE LA ESTRUCTURA

El segundo es un método iterativo en el que el espectro de demanda es reducido debido a la ductilidad de la estructura que se calcula a partir de la forma bilineal del espectro de capacidad, ver figura 9. Este método se describe en [11]. El método utilizado para estimar el punto de capacidad por demanda, se considera el amortiguamiento equivalente de la estructura para reducir el espectro de demanda. Los pasos a seguir para el desarrollo de este procedimiento son:

1. Obtener la respuesta elástica espectral para el 5% del amortiguamiento.

2. Transformar la curva de capacidad en un espectro de capacidad, mediante las ecuaciones 1 y 2.
3. Seleccionar un punto de capacidad por demanda de partida dentro de la curva de capacidad. En el ATC-40 se propone que se considere el punto de capacidad por demanda obtenido con la ALE.
4. Desarrollar la representación bilineal del espectro de capacidad tomando el punto de desempeño como el punto de capacidad última, ver figura 11.
5. Calcular los factores de reducción espectral mediante las ecuaciones 8 y 9 y reducir el espectro por estos valores, ver figura 14.

$$SR_A = \frac{3.21 - 0.68 \ln \frac{63.7k a_y d_{pi} - a_{pi} d_y}{a_{pi} d_{pi}} + 5}{2.12} \quad (8)$$

$$SR_r = \frac{3.21 - 0.41 \ln \frac{63.7k a_y d_{pi} - a_{pi} d_y}{a_{pi} d_{pi}} + 5}{1.65} \quad (9)$$

Donde k es un factor de modificación por amortiguamiento que depende del tipo de comportamiento estructural que se describe en [11].

Tabla 8. Tipo comportamiento estructural.

Shaking Duration	Essentially New Building	Average Existing Building	Poor Existing Building
Short	Type A	Type B	Type C
Long	Type B	Type C	Type C

Fuente: A. T. Council, «ATC-40 Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings,» California, 1996.

Teniendo en cuenta una estructura de clasificación tipo A para la edificación en estudio, ver tabla 8, se tomaron como base los valores mínimos de los factores de reducción del espectro de diseño 0.44 para SRA y 0.57 para SRV, según la figura 12, asociado a un factor de modificación del amortiguamiento K igual a 0.93, o un amortiguamiento del 25%, ver figura 13.

Fig. 12. Factores de reducción espectral SRA y SRV.

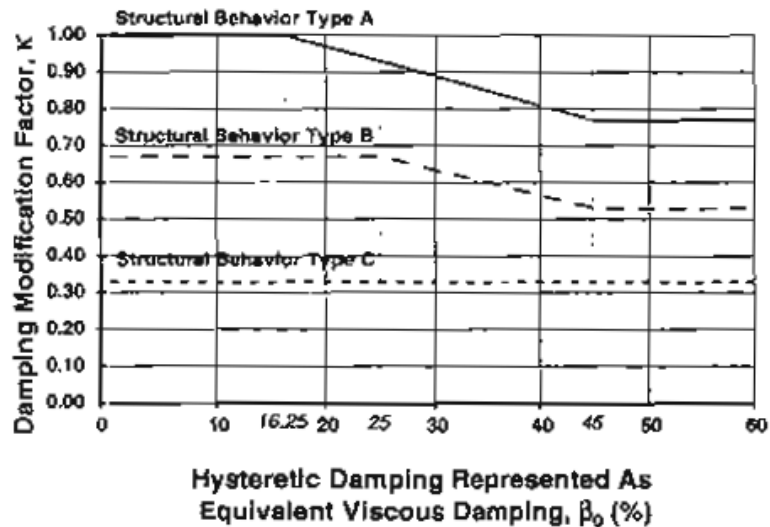
Table 8-3. Spectral Reduction Factors, $SR_A = 1/B_d$ and $SR_V = 1/B_v$

β (percent)	Behavior Type A ¹			Behavior Type B ¹			Behavior Type C ¹		
	β_{eff}	SR_A ($1/B_d$)	SR_V ($1/B_v$)	β_{eff}	SR_A ($1/B_d$)	SR_V ($1/B_v$)	β_{eff}	SR_A ($1/B_d$)	SR_V ($1/B_v$)
0	5	1.00	1.00	5	1.00	1.00	5	1.00	1.00
5	10	0.78	0.83	8	0.83	0.87	7	0.91	0.93
15	20	0.55	0.66	15	0.64	0.73	10	0.78	0.83
25	28	0.44	0.57	22	0.53	0.63	13	0.69	0.76
35	35	0.38	0.52	26	0.47	0.59	17	0.61	0.70
≥45	40	0.33	0.50 ²	29	0.44	0.56	20	0.56	0.67 ²

1. Structural behavior type, see Table 8-4.
2. Controlled by minimum allowable value for SR_V , see Table 8.2

Fuente: A. T. Council, «ATC-40 Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings,» California, 1996.

Fig. 13. Valores de k a partir del amortiguamiento espectral.



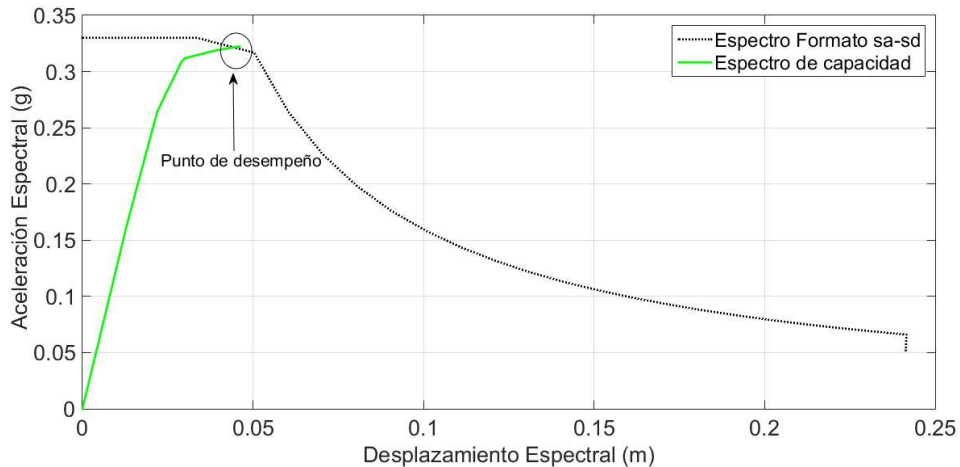
Fuente: A. T. Council, «ATC-40 Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings,» California, 1996.

6. Determinar si el espectro de la demanda se cruza con el espectro de la capacidad en el punto encontrado en el paso 3, o si el desplazamiento en que se cruzan los espectros está dentro de una tolerancia aceptable.

7. Si el espectro de la demanda no se cruza con el espectro de capacidad dentro de la tolerancia aceptable, se selecciona un nuevo punto de desempeño y se repiten los pasos a partir del paso 5.

8. Si el espectro de la demanda se cruza con el espectro de capacidad dentro de la tolerancia aceptable, entonces el punto seleccionado como prueba se considera como el punto de desempeño.

Fig. 14. Espectro en formato Sa-Sd reducido y espectro de capacidad determinista.



Si se escala el espectro de demanda tipo se obtiene el punto de capacidad por demanda para el edificio. El desplazamiento espectral esperado que se obtiene es $sde = 0.049$ m, a partir de un amortiguamiento de 25%. Este desplazamiento espectral es menor que el obtenido con la ALE.

7.8. INDICE DE DAÑO ESPERADO Y CURVA DE VULNERABILIDAD

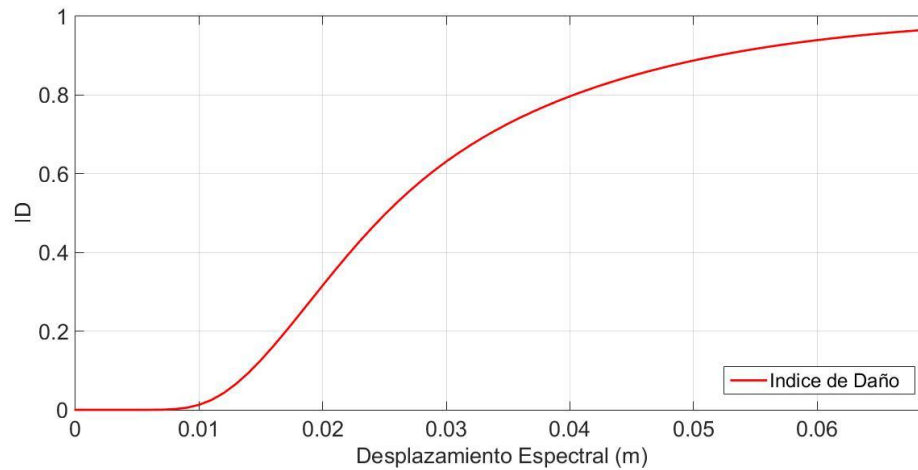
En el caso de las curvas de vulnerabilidad, estas dependen del desplazamiento espectral sin tener en cuenta la acción sísmica, ver figura 15. El índice de daño global, ID, se calcula a partir de las probabilidades de

ocurrencia de cada estado de daño que se obtiene a partir de las curvas de fragilidad [3], usando la ecuación 10:

$$ID = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n iP(ds_i) \quad (10)$$

Donde n es el número de los estados de daño considerados no nulos y $P(ds_i)$ es la probabilidad de ocurrencia de ds_i . La figura 6, muestra el índice de daño, ID, calculado a partir de las curvas de fragilidad.

Fig. 15. Curva de vulnerabilidad a partir de las curvas de fragilidad como función del desplazamiento espectral.

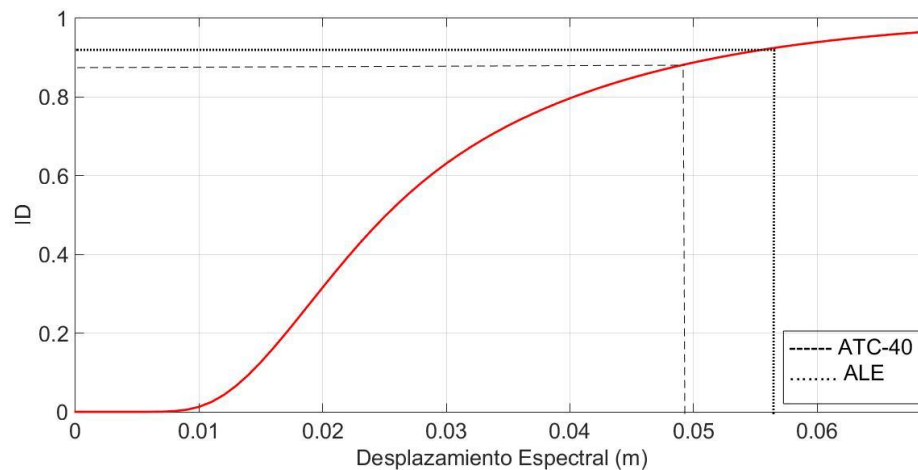


8. ANALISIS DE RESULTADOS

8.1. INDICE DE DAÑO ESPERADO

El índice de daño medio se define como una medida del daño global de la estructura y como el estado de daño medio normalizado, en la figura 16, se muestra los índices de daño obtenidos para los desplazamientos espectrales de los puntos de desempeño para el método de aproximación lineal y el método descrito en el capítulo 8 del ATC-40.

Fig. 16. Índice de daño para los desplazamientos espectrales esperados obtenidos con la ALE y con el ATC-40 capítulo 8.



La proyección del desplazamiento espectral sobre la curva de vulnerabilidad será el índice de daño esperado. Para el edificio en estudio usando la ALE, el índice de daño esperado es $ID (...) = 0.89$ y usando el método descrito en el capítulo 8 del ATC-40, el índice de daño esperados es $ID (---) = 0.92$.

A continuación, se presenta la clasificación del nivel de daño que permite definir el estado de la estructura.

Tabla 9. Índice de daño de Park & Ang.

ID	Daño Observado
0-0.1	Sin daño - pequeñas grietas localizadas
0.1-0.25	Daño menor - bajo agrietamiento
0.25-0.4	Daño moderado - agrietamiento severo
0.4-1.0	Daño severo - aplastamiento del hormigón, armaduras expuestas
1.0 y más	Colapso

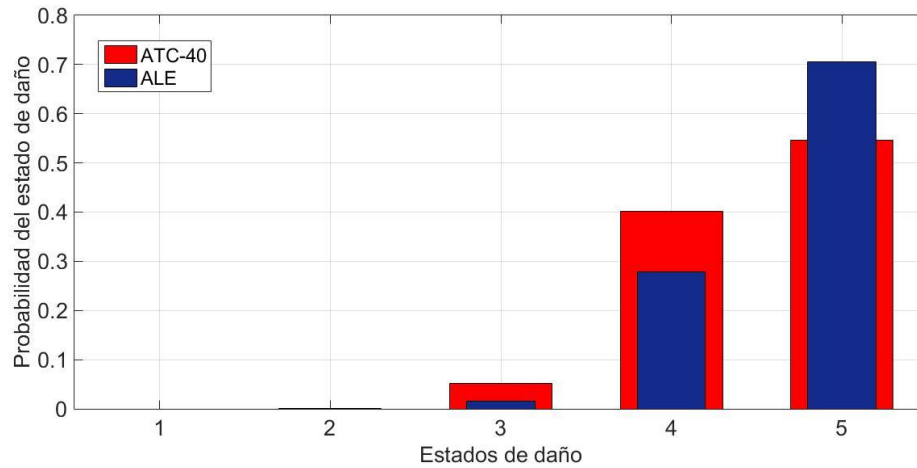
Fuente: Y. M. R. Ángeles, «Comparación entre el análisis determinista y probabilista del riesgo sísmico de estructuras,» Barcelona, 2013.

En la tabla 9, se presentan valores que adopta este índice de daño para diferentes grados de daño. Para la estructura en estudio, un índice de daño de 0.89 y 0.92 significa que la estructura sufre un daño severo.

8.2. MATRICES DE PROBABILIDAD DE DAÑO

Las matrices de probabilidad de daño muestran la probabilidad de que se iguale un estado de daño, estas se obtienen a partir de la intersección del desplazamiento del punto de demanda por capacidad con las curvas de fragilidad y representan la probabilidad de excedencia de un estado generalizado de daños.

Fig. 17. Matrices de probabilidad de daño para los desplazamientos espectrales esperados obtenidos con la ALE y con el ATC-40 capítulo 8.



En la figura 17, se muestran de manera gráfica las matrices de probabilidad de daño para para los desplazamientos espectrales mediante el método de aproximación lineal y el método descrito en el capítulo 8 del ATC-40. Para los dos métodos, los desplazamientos espectrales se encuentran muy próximos a los desplazamientos últimos de la estructura, es por esto que los valores de la probabilidad de excedencia obtenidos para el estado de daño extensivo son del 28% al 40% y para el estado de daño de colapso son del 55% al 70%.

En la tabla 10, se muestra el resumen de los resultados obtenidos para ambos procedimientos.

Tabla 10. Matrices de probabilidad de daño asociada al desplazamiento espectral.

Método	Sd	ID	1	2	3	4	5
	[m]		Nulo	Leve	Moderado	Extensivo	Colapso
ATC-40	0.049	0.89	0	0.001	0.0513	0.4011	0.5465
ALE	0.057	0.92	0	0	0.0163	0.278	0.7055

9. CONCLUSIONES

- El cumplimiento de los requisitos de deriva para el nivel de comportamiento de Seguridad de Vida (LS) que presenta la NSR-10, no es suficiente para que la estructura tenga un comportamiento adecuado ante acciones sísmicas. En el edificio en estudio se da cumplimiento al límite establecido de deriva, pero de acuerdo con el análisis de daño, este tiene una probabilidad alta de colapso.
- Los efectos sísmicos producen un daño considerable en la estructura al superar los estados de daño (D_y , A_y) y (D_u , A_u) que corresponden a la fluencia y al colapso de la estructura, respectivamente. El desplazamiento espectral obtenido del punto de desempeño para los dos procedimientos supera el desplazamiento último (D_u) del espectro de capacidad.
- En las curvas de fragilidad se observa la probabilidad de que se alcance o exceda un estado de daño en función del parámetro que representa la acción sísmica, que en este trabajo es el desplazamiento espectral. Para los dos procedimientos de obtención del desplazamiento espectral, se observa que cuando el desplazamiento espectral aumenta, la estructura tiene una mayor probabilidad de superar los estados de daño.
- En el caso de la curva de vulnerabilidad, el efecto del desplazamiento espectral aumenta el índice de daño global, ID, presentando un mayor índice de daño para el procedimiento de aproximación lineal equivalente, que, para el procedimiento simplificado con base en la reducción del espectro de demanda por la ductilidad de la estructura. Sin embargo, las 2 metodologías simplificadas están del lado de la seguridad.
- El índice de daño medio se define como una medida del daño global de la estructura y como el estado de daño medio normalizado. La proyección

del desplazamiento espectral sobre la curva de vulnerabilidad es el índice de daño esperado para el edificio en estudio. Usando la ALE y el método descrito en el capítulo 8 del ATC-40, el índice de daño esperado es mayor al 0.80, es decir que la estructura presenta un daño severo como aplastamiento del concreto y exposición del acero refuerzo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Y.-J. P. a. A. H.-S. Ang, «Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete,» ASCE, 1985.
- [2] L. G. Pujades , Y. F. Vargas Alzate , A. H. Barbat y J. R. Gonzáles Drigo , «Parametric model for capacity curves,» Springer , 2014.
- [3] A. Barbat , Y. Vargas , L. Pujades y J. Hurtado , «Evaluación probabilista del riesgo sísmico de estructuras en base en la degradación de rigidez,» ELSEVIER, Barcelona, 2015.
- [4] Y. M. R. Ángeles, «Comparación entre el análisis determinista y probabilista del riesgo sísmico de estructuras,» Barcelona, 2013.
- [5] Y. F. Vargas Alzate, «Análisis estructural estático y dinámico probabilista de edificios de hormigón armado. Aspectos metodológicos y aplicaciones a la evaluación del daño.,» Barcelona, 2013.
- [6] K. Poljanšek y P. Fajfar, «A NEW DAMAGE MODEL FOR THE SEISMIC DAMAGE ASSESSMENT OF REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES,» de *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China , 2008.
- [7] R. Aguilar , «Daño sísmico global en edificios con muros de cortante,» *Monografías de ingeniería sísmica*, 1997.
- [8] RISK-UE, «An advanced approach to earthquake risk scenarios, with applications to different European cities,» 2001-2004.
- [9] F. E. M. A. (FEMA), «Earthquake Loss Estimation Methology Hazus 2.1,» Washington, D.C, 2015.
- [10] Y. F. Vargas, L. G. Pujades, A. H. Barbat y J. E. Hurtado , «Evaluación

probabilista de la capacidad, fragilidad y daño sísmico de edificios de hormigón armado,» *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería ELSEVIER*, pp. 63-78, 2013.

- [11] A. T. Council, «ATC-40 Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings,» California, 1996.
- [12] T. Yin, H.-f. Lam y H.-p. Zhu, «Statistical detection of structural damage based on model reduction,» Shanghai University and Springer-Verlag, 2009.

BIBLIOGRAFÍA

A. Barbat , Y. Vargas , L. Pujades y J. Hurtado , «Evaluación probabilista del riesgo sísmico de estructuras en base en la degradación de rigidez,» ELSEVIER, Barcelona, 2015.

A. T. Council, «ATC-40 Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings,» California, 1996.

F. E. M. A. (FEMA), «Earthquake Loss Estimation Methology Hazus 2.1,» Washington, D.C, 2015.

K. Poljanšek y P. Fajfar, «A NEW DAMAGE MODEL FOR THE SEISMIC DAMAGE ASSESSMENT OF REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES,» de *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China , 2008.

L. G. Pujades , Y. F. Vargas Alzate , A. H. Barbat y J. R. González Drigo , «Parametric model for capacity curves,» Springer , 2014.

R. Aguilar , «Daño sísmico global en edificios con muros de cortante,» *Monografías de ingeniería sísmica*, 1997.

RISK-UE, «An advanced approach to earthquake risk scenarios, with applications to different European cities,» 2001-2004.

T. Yin, H.-f. Lam y H.-p. Zhu, «Statistical detection of structural damage based on model reduction,» Shanghai University and Springer-Verlag, 2009.

Y. F. Vargas Alzate, «Análisis estructural estático y dinámico probabilista de edificios de hormigón armado. Aspectos metodológicos y aplicaciones a la evaluación del daño.,» Barcelona, 2013.

Y. F. Vargas, L. G. Pujades, A. H. Barbat y J. E. Hurtado , «Evaluación

probabilista de la capacidad, fragilidad y daño sísmico de edificios de hormigón armado,» *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería ELSEVIER*, pp. 63-78, 2013.

Y.-J. P. a. A. H.-S. Ang, «Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete,» ASCE, 1985.

Y. M. R. Ángeles, «Comparación entre el análisis determinista y probabilista del riesgo sísmico de estructuras,» Barcelona, 2013.