

Diseño y Análisis No-Lineal del Rendimiento de Edificio de Hormigón Armado Sometido a Cargas Sísmicas

*Carvic Carmona De Jesús
Maestría en Ingeniería en Ingeniería Civil
Balhan Alsaadi Altayeb, Ph. D.
Departamento Ingeniería Civil y Ambiental
Universidad Politécnica de Puerto Rico*

Resumen — *A pesar de los avances que han surgido en las ciencias, se han desarrollado un sinnúmero de indagaciones e investigaciones que a la misma vez son precedentes o escenarios de lo que fueron sucesos de nuestro pasado. Ahora partiendo de la premisa, yéndonos por un tema en específico, emerge cierta duda y antecede cierta pregunta. ¿Existe realmente en Puerto Rico una conciencia positiva de lo que pudiera generar un movimiento sismo, o mejor conocido como un terremoto? Este trabajo pretende evaluar, analizar e investigar el comportamiento de una estructura de hormigón armado, con uso residencial de tres pisos, sometido a un sismo, donde a su vez nos sirve de enseñanza y poder adquirir un discernimiento de lo que es un sismo terremoto en realidad. Como metodología de análisis hemos utilizado el método de “Espectro de Capacidad” y el “Pushover Analysis” para estimar el rendimiento de la estructura o sea su comportamiento ante un terremoto. Además, apreciaremos los análisis de forma directa o indirecta como un sismo podría afectar una estructura, en caso de que no se opte con una configuración correcta o la más adecuada.*

Términos Claves — *Cargas Laterales, Comportamiento No Lineal Cortante Basal, “Push Over Analysis”, Respuesta Estructural Sísmic.*

INTRODUCCIÓN

A continuación se mostrará, “Diseño y Análisis No-Lineal del Rendimiento de Edificio de Hormigón Armado Sometido a Cargas Sísmicas”. Este trabajo instituye una cualidad específica, que es la de aglomerar diversos estudios e investigaciones, que sean realizados a través de los tiempos sobre estructuras sometidas a cargas laterales, en este caso será de origen sísmico. Este

trabajo incluye, como base filosófica de diseño y análisis, implementaciones que han emanado por ingenieros de países como Europa, Estados Unidos, Japón, etc. A partir de este estudio obtendremos una comprensión de los procesos que se llevan a cabo del diseño estructural de un edificio de hormigón armado.

Como requisito de la maestría en ingeniería estructural, el trabajo contiene varios temas y permite al lector interprete que utilice los conocimientos de ingeniería estructural para llegar a sus propias conclusiones. Algunos de estos temas son: Estructuras Sometidas a Cargas Laterales, Cortante Basal, Propiedades del Hormigón, Comportamiento No Lineal, Respuesta Estructural Sísmica, “Push Over Analysis”, Rendimiento de la Estructura, etc. Para llevar a cabo el estudio se utilizaron varias herramientas, como programas estructurales que están hecho para el análisis y diseño de una estructura de hormigón: (Etabs), (Sap2000), (Safe), etc.

Este trabajo implicó seleccionar una estructura de hormigón armado, someterla a cargas laterales y entonces así poder evaluarla; donde luego utilizaremos el juicio ingenieril, que nos permite seleccionar una mejor configuración de sistema. Esta configuración tendrá que estar acorde con las normas ya establecidas y ostentar un rendimiento estructural adecuado.

La estructura tomará como referencia el pueblo de Vega Baja, donde ésta será ubicada. La estructura tendrá un uso tipo familiar, poseerá tres pisos con una altura de 12 pies por cada uno. El diseño de la estructura estará basado en los códigos: “Building Code Requirements for Structural Concrete” (ACI-318-11), “International Building Code” (IBC-2009), “Minimum Design Loads for Building and Others Structures” (ASCE/SEI 7-10).

La obtención del rendimiento o la evaluación del comportamiento estará basado en la normas federales de los Estados Unidos “Federal Emergency Management Agency”: “NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Building” (FEMA 273), “Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building” (FEMA 356) y “Improvement of Nonlinear static Seismic Analysis Procedures” (FEMA 440). Para llevar a cabo el análisis se utilizó de referencia y sugerencia el libro “SEISMIC DESIGN OF REINFORCED CONCRETE AND MASONRY BUILDINGS” y otros. El sistema estructural del edificio consistirá en un “Moment Resisting Frame System”. Las cargas gravitatorias y horizontales serán soportadas por un sistema de losas rígidas, vigas y columnas.

A continuación presentaremos “Diseño y Análisis No-Lineal del Rendimiento de Edificio de Hormigón Armado Sometido a Cargas Sísmicas”.

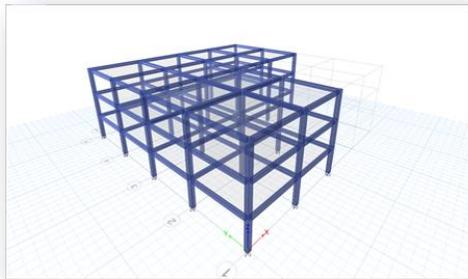


Figura 1
Sistema Estructural

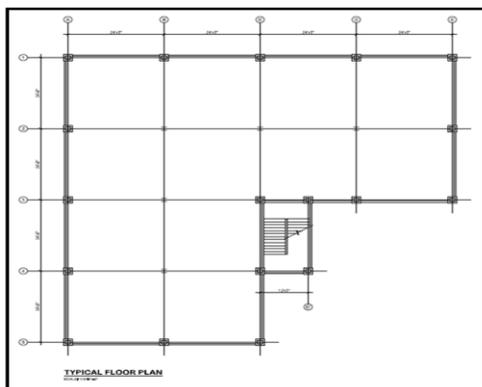


Figura 2
Vista de Tope

Objetivos Generales: Desarrollar un modelo estructural fundado en las normas de diseño existentes y posteriormente forjar una evaluación del desempeño sísmico y así nosotros conocer o poder cuantificar su rendimiento estructural.

Objetivos Principales:

- Diseñar y analizar la estructura sometido a cargas gravitacionales.
- Analizar la estructura sometida a cargas provenientes a terremoto.
- Re-analizar la estructura luego con las pérdidas de rigideces que son producto de la pérdida de inercia efectiva de conjunto de todos los elementos.
- Determinar la capacidad global de la estructura, usando el método de “Pushover Analysis”.
- Determinar los desplazamientos que son generado por la respuesta elástica de la estructura y generar un proceso iterativo, la cual nos indicará su rendimiento estructural.
- Generar las curvas de fragilidad y probabilidades de daños.
- Representar la capacidad estructura basado en su respuesta sísmica.
- Proponer métodos provisorios para rendimiento de la estructura, ya que ésta sea más eficiente y poder lograr un buen comportamiento estructural.

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Llevaremos a cabo los procesos de criterio, evaluación, diseño y análisis que un ingeniero estructural debe enfrentar en un diseño estructural de un edificio de hormigón armado. Antes de todo, el ingeniero debe tener antemano información del suelo, uso y ubicación de la estructura.

Hay que tener en mente o partir de la premisa que los códigos son una herramienta de diseño, pero no garantizan el mejor comportamiento de una estructura ante un evento sísmico. Estos reúnen especificaciones mínimas que ya fueron investigadas a través de los años, donde incluye propiedades mecánicas del material y

comportamiento que tiene una estructura mediante a cargas gravitacionales y cargas laterales que surgen de investigaciones realizadas de diferentes eventos sísmicos.

Se seleccionó un sistema estructural resistente a momentos o mejor conocida en inglés “Special Moments Resistance Frame”. Este sistema estructural tiene cierto grado de resistencia a cargas externas, que conserva todos sus elementos estructurales. Es un sistema resistente a sismo que comprende de vigas, columnas y a la misma vez proporcionan al pórtico resistencia a los momentos, fuerzas axiales y fuerzas en cortantes debido a resultado de fuerzas que son colectados por el uso de las estructuras y fuerzas laterales que pudiera provenir del terremoto.

Luego que se diseñe la estructura se pondrán en práctica el procedimiento Lineal Estático o “Pushover Analysis” para conocer el rendimiento de la estructura. Este procedimiento está definido por la agencia federal de manejo de emergencia FEMA 356 como procedimiento aproximado lineal estático de la repuesta estructural del edificio basado cuando la estructura está cargada dinámicamente por un sismo. La aproximación estática consiste en aplicarle a la estructura una fuerza distribuida vertical, que genere los desplazamientos necesarios para que la estructura pueda alcanzar la aceleración pico basada en espectro de capacidad.

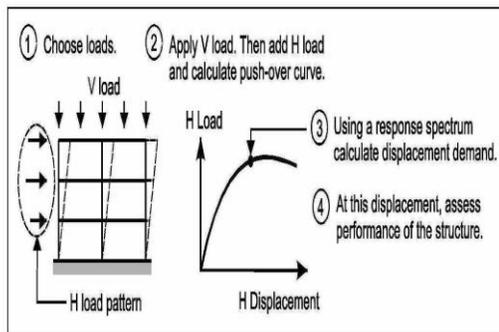


Figura 3
Método Estático Lineal

El espectro de capacidad nos da las máximas aceleraciones que puede experimentar la estructura sometido a movimiento de suelo debido a su

ubicación sísmica donde éste nos dá el periodo fundamental de vibración de la estructura.

El Espectro de Respuesta y el Cortante Basal vs. el Desplazamiento del último piso se grafica para obtener rendimiento de la estructura. El desplazamiento objetivo representa el desplazamiento máximo que la estructura puede experimentar durante un evento sísmico. Una vez hallamos este desplazamiento, podemos conocer el rendimiento de la estructura mediante la generación de articulaciones en los elementos verticales y horizontales.

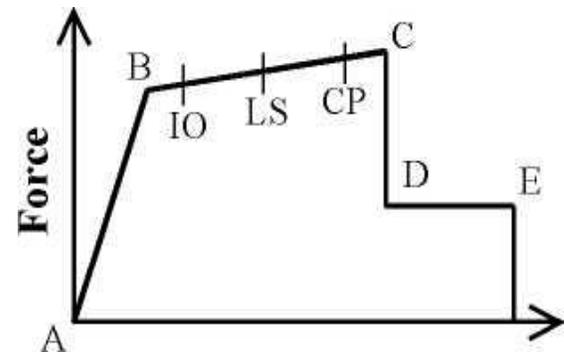


Figura 4
Capacidad del Elemento

Procedimiento:

- Determinar las fuerzas gravitacionales y la distribución de cargas verticales.
- Calcular el riesgo sísmico.
- Calcular el desplazamiento objetivo.

Cada paso esta descrito en la siguiente sección:

Determinar la distribución vertical de las cargas laterales:

Para determinar las fuerzas que se utilizan en el Método Lineal Estático o “Pushover Analysis” se debe realizar la distribución de fuerzas verticales dado por el FEMA 273.

$$Q_g = 1.1(Q_D + Q_L + Q_S) \tag{1}$$

Donde Q_g es igual a la cargas de fuerzas gravitacionales, Q_D es igual al efecto de la cargas muerta, Q_L es igual al 25% de la cargas viva.

Determinación del Rendimiento

El próximo objetivo es determinar el rendimiento de la estructura, basada en los daños que puede generar un sismo posteriormente. Estos daños son obtenidos de la respuesta sísmica de la estructura debido a la capacidad que tiene la estructura ante la demanda de un evento sísmico ya establecido.

Los niveles de rendimiento estructural son, S-1 Ocupación Inmediata, S-3 Vida Segura, y S-5 Prevención Colapso. Los rangos son S-2, lo cual es un rango entre S-1 y S-3, y S-4 lo cual es un rango entre S-3 y S-5.

El ingeniero estructural tiene la capacidad para determinar los posibles daños de las estructuras, después que ésta es sometida a la máxima aceleración de un movimiento sísmico. Refiriéndonos a la Tabla 1, A corresponde a nivel de rendimiento Operacional de un 50% de probabilidad de excedencia en un evento sísmico en 50 años, F corresponde a nivel de rendimiento de Ocupación Inmediata después de 20% de probabilidad de excedencia en un evento sísmico en 50 años. Los valores K y P ennegrecido en letra de molde corresponden al rendimiento que reúnen los diseños con los códigos existentes, “Internacional Building Code” (IBC2009). Esto corresponde para los niveles Vida Segura después de 10% de la probabilidad de excedencia para un evento sísmico de 50 años y Prevención Colapso después de un 2% de probabilidad de excedencia para un evento sísmico en 50 años.

Tabla 1
Rendimiento Estructural

Evento Sísmico	Rendimiento Estructural			
	1 - A	1 - B	3 - C	5 - E
50% / 50 Años	A	B	C	D
20% / 50 Años	E	F	G	H
10% / 50 Años	I	J	K	L
2% / 50 Años	M	N	O	P

Calcular Riesgo Sísmico

Es importante determinar con certeza los parámetros, ya que de esto dependen de las fuerzas que puede generar un evento sísmico. El riesgo sísmico está en función:

- Nivel de Rendimiento Estructural
- Los Parámetros de Aceleración

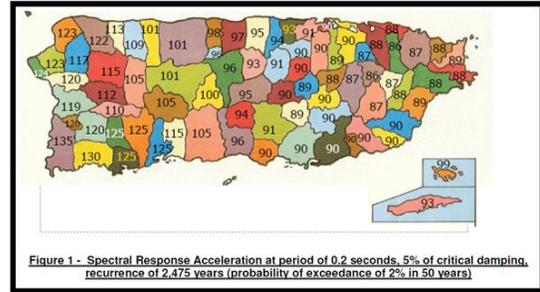


Figura 5
Respuesta de Aceleración Espectral

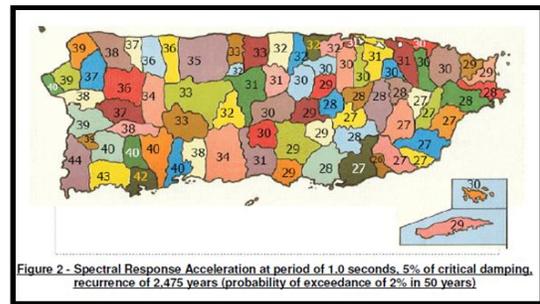


Figura 5
Respuesta de Aceleración Espectral

- Coeficiente de Suelo
- La Amortiguación Efectiva Estructural
- El Periodo Fundamental

Desplazamiento Objetivo es el máximo desplazamiento de una estructura que se puede esperar durante un evento sísmico y se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\delta_r = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left(\frac{T^2}{4\pi^2} g \right) \quad (2)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El método estático no lineal o “Push Over Analysis” como antes mencionado fue utilizado como herramienta de análisis para determinar el comportamiento real de la estructura. ¿Por qué es un método de aproximación? Este utiliza las características complejas del movimiento del suelo y predice con la formulación de articulaciones en los elementos estructurales la capacidad que estos

poseen para resistir momentos, antes de que el modo de vibración de la estructura o sea el periodo sea igual que las respuesta sísmica (demanda). Antes de todo, las estructuras como los edificios o puentes tiene que poseer cierta capacidad para poder lidiar con esa demanda que ellos estarán expuestos en caso de que ocurriese un terremoto de gran magnitud.

Para llevar a cabo el análisis se utilizó el programa “ETABS” que nos permite realizar el Método Lineal Estático y “Pushover Analysis”. El primer análisis se realizó con las secciones diseñadas con el código.

En las siguientes figuras se representa la capacidad de la estructura del edificio sometido a la máxima aceleración máxima. La figura presenta el espectro de capacidad que fue generada por el tipo de suelo donde estará ubicado la estructura.

Para llevar a cabo el análisis se utilizó el programa “ETABS” que nos permite realizar el Método Lineal Estático y “Pushover Analysis”. El primer análisis se realizó con las siguientes secciones.



Gráfica 1
Rendimiento Estructural

En la dirección X podemos apreciar que el eje más afectado por espectro de capacidad si ocurriese el evento sísmico es en esta dirección. Podemos notar que al llegar al desplazamiento máximo las columnas centrales del edificio, directamente las del primer piso pasa una degradación de más de un 75% de rigidez, esto indicando por las normas de Fema 356, pierde capacidad para resistir cargas gravitacionales y ocasionando un colapso en ellas.

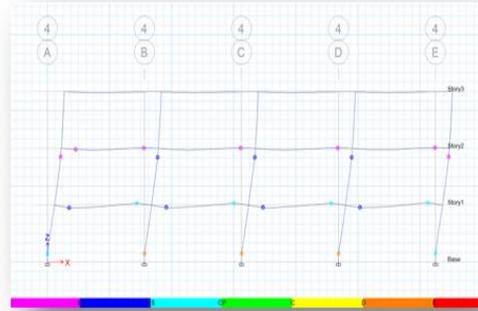
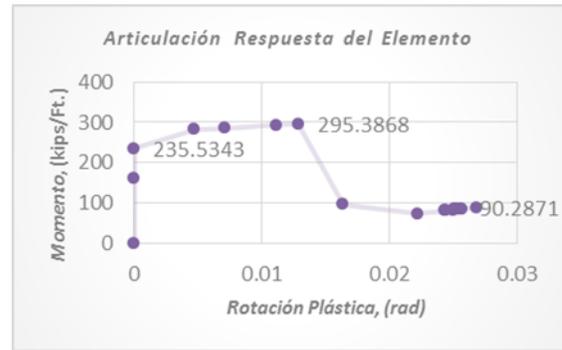
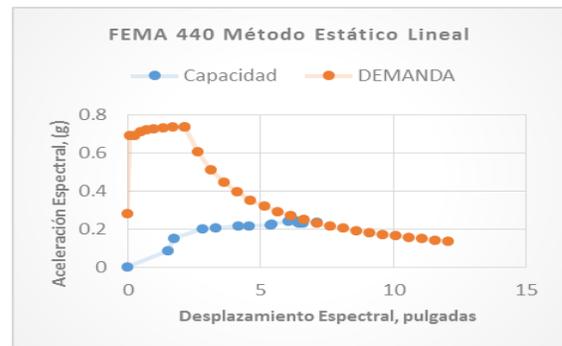


Figura 6
Articulaciones



Gráfica 2
Capacidad del Elemento



Gráfica 3
Curva de Fragilidad

En la dirección Y el comportamiento de la estructura va acorde con las normas de diseño basándose en la falla primero de las vigas y luego las columnas, este merma la capacidad de rigidez, pero mantiene un nivel seguro ante un evento sísmico, esto se debe a la configuración estructural

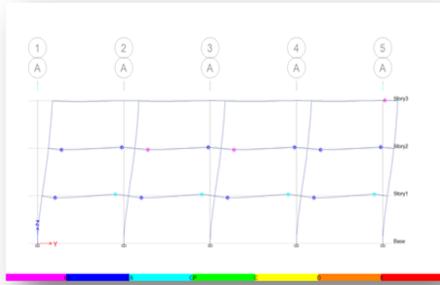
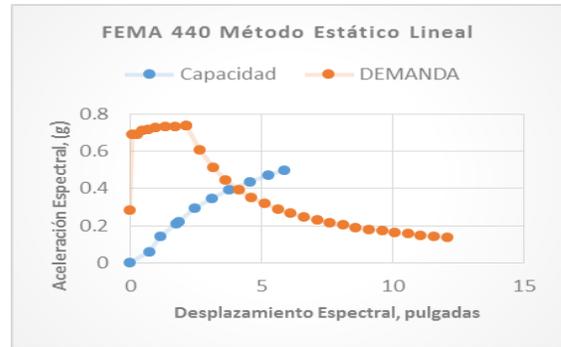
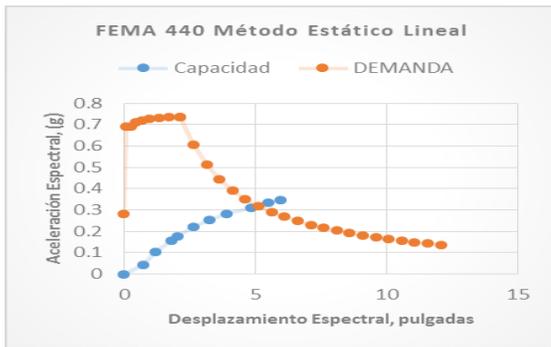


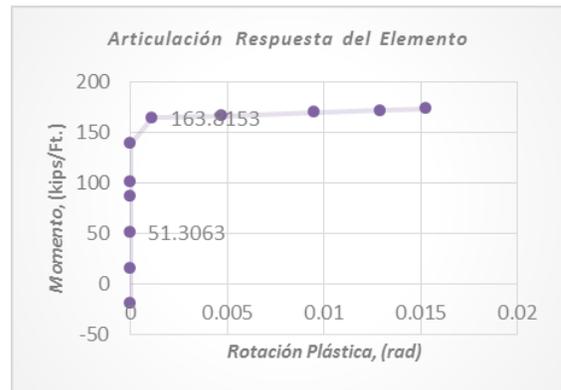
Figura 7
Articulaciones



Gráfica 6
Curva de Fragilidad

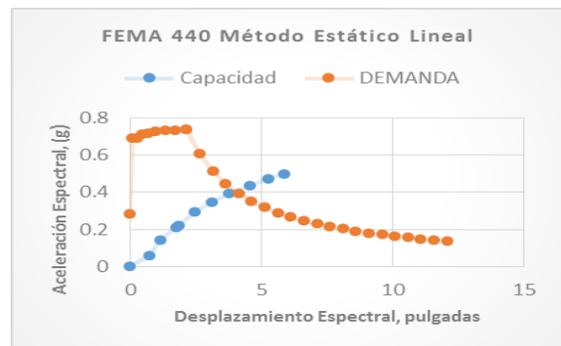


Gráfica 4
Curva de Fragilidad



Gráfica 7
Capacidad del Elemento

Para seleccionar un mejor rendimiento y tener en cuenta la base filosófica de diseño (columna fuerte y viga débil), se realizaron cambios en la configuración estructural. Columnas del primer piso y las columnas centrales se modificaron con un área 20" x 20". Al hacer esta modificación obtuvimos un mejor rendimiento estructural y mejoramos el comportamiento en la dirección X, las columnas centrales y las del primer piso pudieron resistir el desplazamiento generado por espectro de capacidad, sin tener un colapso.



Gráfica 8
Curva de Fragilidad

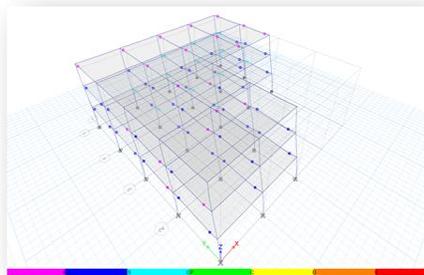


Figura 8
Articulaciones

CONCLUSIÓN

Hoy en día existen varias herramientas, que son de gran utilidad para los Ingenieros Estructurales. En el pasado los procesos de Ingeniería Estructural eran muy tediosos y realizar un análisis seguido por una evaluación conllevaba mucho tiempo. Ahora la tecnología va más a la vanguardia y el Ingeniero Estructural tiene la

herramienta para conocer como se comporta una estructura y así poder hacer un diseño seguro ante un evento sísmico.

El método Lineal Estático o “Pushes Over Analysis” identifica el comportamiento de una estructura produciendo así a modelos matemáticos con precisión. Este proceso facilita al Ingeniero Estructural en conocer el comportamiento de una estructura de hormigón armado, y este descifrar en donde la estructura esta deficiente ya sea en la geometría de sus elementos o configuración estructural.

REFERENCIAS

- [1] H. Arthur, D. Nilson, C. Darwin & W. Dolan, “Seismic Design”, *Design Concrete of Structure*, 14th ed., New York, 2010.
- [2] T. Paulay & M. J. N. Priestley, “Reinforced Concrete Ductile Frames,” *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, vol. 2, United States, 1992.
- [3] M. Dadim Hassoun and A. Al-Manaseer, “Seismic Design of Reinforced Concrete Structures”, *Structural Concrete*, 4th ed., New Jersey, 2008.
- [4] C. E. Reynolds & J. C. Steedman, *Reinforced Concrete Designer's Handbook*, 10th ed., India, 1988.
- [5] *Improvent of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures (Fema 440)*, Department of Homeland Security Federal Emergency Management Agency, California, 2005.
- [6] *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building (FEMA 356)*, American Society of Civil Engineers (Virginia) and Federal Emergency Management Agency (Washington D. C.), Washington D. C., 2009.
- [7] *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Building (FEMA 273)*, Department of Homeland Security Federal Emergency Management Agency, California, 1997.
- [8] *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI-318-11)*, ACI Committee 318 Structural Building Code, 2011.