

Análisis de Comportamiento Sísmico del Irradiador de Cobalto 60 de la Escuela Politécnica Nacional

Andrés Salazar*; Liliana Barros*; Roque Santos**; Carlos Ávila***

*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil, Quito, Ecuador
andessalazar@outlook.com; liliana.mbb@hotmail.com

** Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ciencias Nucleares, Quito, Ecuador
roqueantonio.santos@gmail.com

*** Proyecto PROMETEO, SENESCYT, Quito, Ecuador
cavila67@caltech.edu

Resumen: Se utilizó tecnología de elementos finitos no lineales en la evaluación sísmica de una estructura existente de hormigón armado con potencial peligro radiactivo. La estructura objeto del análisis, fue el irradiador de cobalto 60 de la Escuela Politécnica Nacional, que consiste en una estructura de concreto tipo búnker que funciona como blindaje de la radiación contenida en su interior. El potencial peligro sísmico del Ecuador es la razón por la que fue necesario realizar el análisis de comportamiento de esta estructura, ya que de fisurarse significativamente ante un evento sísmico, mientras la fuente esté en operación, podrían ocasionarse fugas de radiación en niveles mayores a los permisibles. Para la representación del material hormigón armado se utilizó un elemento finito que tiene la particularidad de desplegar gráficamente las fisuras ocasionadas en una estructura debido a la acción de las cargas correspondientes. Se procedió a indicar el criterio de falla utilizado, necesario para definir el dominio elástico del material a partir del cual se establece la ejecución de un análisis no lineal en la simulación. Se asignaron las restricciones de desplazamiento, la acción sísmica y se ejecutó la simulación. Los resultados finales indicaron, dentro del marco de análisis establecido, que la cámara de radiación no presenta fisuras ante el evento sísmico propuesto.

Palabras clave: Análisis no lineal, Comportamiento Sísmico, Elemento finito, Criterio de falla.

Abstract: Nonlinear finite element technology was used in seismic evaluation of existing reinforced concrete structure with potential radioactive hazard. The structure object of analysis was the cobalt-60 irradiator of National Polytechnic School, which consists of a concrete structure like a bunker that functions as radiation shielding contained therein. The seismic hazard potential of Ecuador is the reason why it was necessary to do the analysis of this structure. In the case of cracking significantly as a result of a seismic event, while the source is in operation, could cause radiation leaks that exceed permissible levels. For the representation of the reinforced concrete material, it is used a finite element which has the distinction of displaying graphically the fissures caused in a structure due to the action of the corresponding loads. We proceeded to indicate the failure criterion used, the latter needed to define the elastic domain of the material, from which the execution of a nonlinear analysis of finite element model was established. Displacement restrictions and the seismic action were assigned, then the simulation ran. The final results indicated, within the established framework of analysis, that the radiation chamber does not crack, with the proposed seismic event.

Keywords: Nonlinear analysis, Seismic Behavior, Finite element, Failure criterion.

1. INTRODUCCION

Continuamente se requiere a nivel mundial en el tema de infraestructura, que se profundice la investigación científica en el área de evaluación de estructuras existentes de hormigón armado. En esta línea, se ha vuelto común la simulación de modelos basados en tecnología de elementos finitos no lineales, los cuales permiten representar con eficiencia y precisión, el comportamiento del material compuesto hormigón armado [16]. Ejemplo de esto es la evaluación estructural ante cargas sísmicas de una estructura de hormigón armado en una planta nuclear en Estados Unidos [10], el análisis no lineal de un recinto de contención de un reactor nuclear VVER 440 en Japón [19], la evaluación

de vulnerabilidad de un puente oblicuo ubicado en una alta zona sísmica en Alemania [24], este último estudio elaborado en conjunto por institutos educativos de India y Alemania, y presentado en la 14ta conferencia mundial de ingeniería sísmica en China. Entre otros proyectos recientes en este ámbito.

En el caso de países latinoamericanos, se puede citar el análisis de vulnerabilidad sísmica de construcciones patrimoniales históricas de mampostería en Chile [26], el estudio de vulnerabilidad sísmica estructural y diseño del refuerzo sismo resistente de la Catedral Basílica de Manizales en Colombia [11], el análisis de respuesta sísmica de una estructura colonial típica de México [13], entre otros.

Refiriendo el tema al Ecuador, es necesario aplicar y fortalecer esta herramienta tecnológica, como un recurso para profundizar la investigación científica en el ámbito de evaluación de estructuras existentes de hormigón armado. Por ello, el presente estudio analizará el denominado: Irradiador gamma panorámico categoría IV con fuente de Co-60 [6], ubicado en la Escuela Politécnica Nacional (EPN) en la ciudad de Quito, único en su tipo en el país, y mostrado en la Figura 1. El irradiador de cobalto 60, construido en hormigón armado, es una estructura conformada por una parte que se encuentra bajo el nivel del suelo denominada piscina, y otra sobre el nivel del suelo denominada cámara de radiación, tal como se muestra en la Figura 2. Su diseño inicial se realizó en la ciudad de Grenoble al sudeste de Francia y data en el año 1965.



Figura 1.- Irradiador gamma panorámico categoría IV con fuente de Co-60. (Fotografía por: Estefanía Montesdeoca)

Esta estructura es utilizada principalmente para estudios de investigación en el área de alimentos y materiales, servicio para esterilización de productos médicos, preservación de obras de arte patrimonial [6], entre otros. Además de lo anterior, es importante mencionar acerca de la planificación de uso de esta estructura a futuro, que se han identificado y priorizado valiosas oportunidades de apertura de nuevos mercados en cuanto a diversas aplicaciones médicas y agrícolas [18], todo esto con miras a la creación en Ecuador de un Centro de Irradiación Multipropósito, donde se aproveche al máximo esta tecnología.

Bajo la perspectiva de una amplia gama de análisis científicos que pueden realizarse en esta estructura, es importante acentuar que el presente estudio se centra en determinar si ante un sismo, la cámara de radiación va a fisurarse significativamente conformando grietas por donde pueda salir la radiación contenida, en niveles mayores a los permisibles.

Resaltando el enfoque anterior, se puede acotar que es de trascendental importancia considerar el potencial peligro sísmico del país, esto debido a su ubicación en el denominado cinturón de fuego del Pacífico. Dicho peligro sísmico, junto a la vulnerabilidad de estructuras de alta importancia, podrían ocasionar en el futuro desastres muy grandes, que se pueden prevenir.

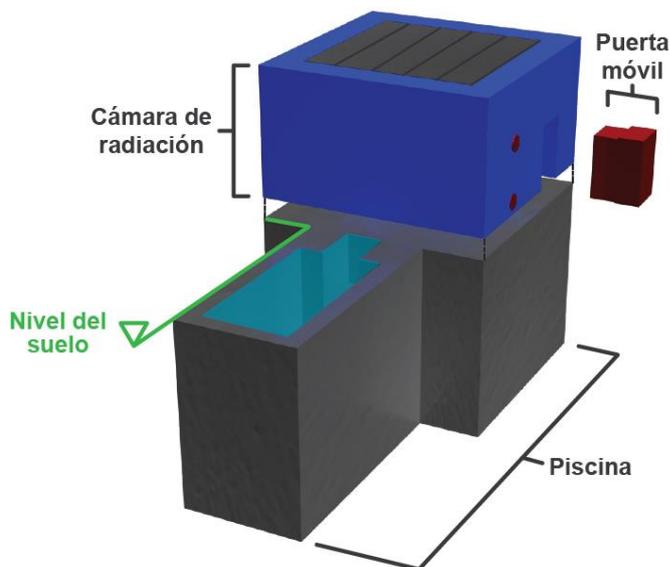


Figura 2.- Geometría en 3D de la estructura del irradiador; Nivel del suelo. (3D realizado por: Estefanía Montesdeoca)

Objetivamente, la esencia del presente estudio radica en la evaluación sísmica de una estructura existente de hormigón armado con potencial peligro radiactivo, mediante una simulación basada en tecnología de elementos finitos no lineales. Este proyecto, además de ejecutarse como un aporte para fortalecer los sistemas y planes de seguridad del irradiador, tiene potencial de abrir líneas de investigación alineadas con la mecánica computacional de estructuras, y se proyecta a la implementación de mejores herramientas tecnológicas al país, que en conjunto con la profundización y estructuración de bases legales, sociales, ambientales, económicas y tecnológicas, aporten al desarrollo de infraestructura eficiente, encaminando adecuadamente al Ecuador a la construcción de proyectos de mayor envergadura, y consecuentemente a la mejora de la calidad de vida de sus habitantes.

2. DESARROLLO

Se procedió a describir la configuración y criterios estructurales pertinentes, para después realizar una simulación basada en tecnología de elementos finitos no lineales, donde se incluyeron todos los parámetros necesarios para el análisis de la cámara de radiación ante la acción sísmica correspondiente.

2.1. INFORMACIÓN DISPONIBLE

De la información existente en el Departamento de Ciencias Nucleares (DCN) de la EPN, se pudo determinar, mediante un plano de origen francés del año 1965, que el primer diseño estructural del irradiador data de esa misma fecha, además, en dicho plano consta la geometría de la estructura junto con ciertos detalles del armado de acero de refuerzo, entre los que cabe aclarar que no se encuentra el detalle del acero de refuerzo en la cámara de radiación.

Luego, en los años 1973 y 1974 se registran planos arquitectónicos realizados en Ecuador, en los que se aprecia cambios en la configuración geométrica de la estructura con respecto al plano del año 1965, cambios tales como la reubicación de la puerta móvil del irradiador que se muestra en la Figura 3. Además, existe un plano digital del año 2009 con un levantamiento en planta de la estructura, que concuerda en sus dimensiones con los planos del año 1973 y 1974. Finalmente, existe una memoria de cálculo, diseño estructural e informe de suelos del proyecto de talleres y servicios generales de la EPN del año 2009, documento que se refiere a una edificación cercana a la estructura del irradiador, y que tiene información acerca del tipo de suelo de esta zona.

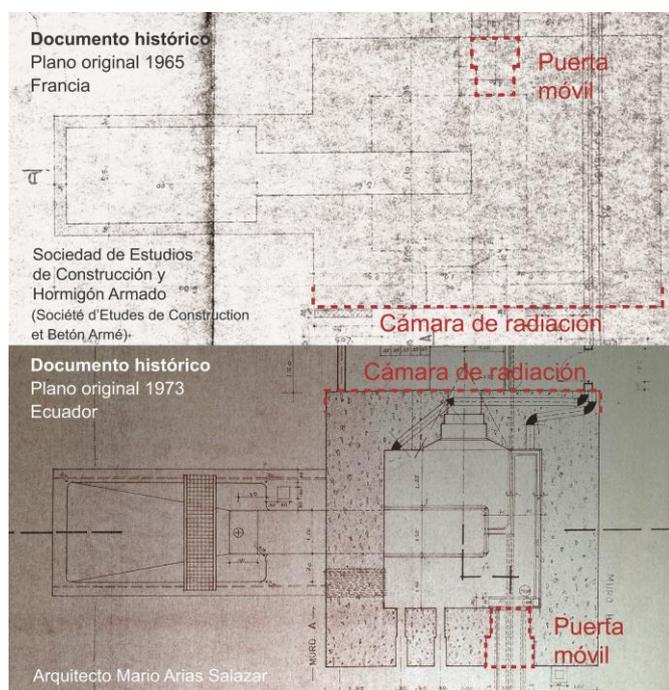


Figura 3.- Cambio en la ubicación de la puerta móvil de la cámara de radiación; Plano del año 1965 (superior); Plano del año 1973 (inferior).

Así, los cambios geométricos del diseño del irradiador en el año 1973 con respecto a 1965, implican una reformulación en los planos y detalles estructurales del irradiador en 1973, información con la que no se cuenta, y que consecuentemente implica que en el presente estudio se debió estimar de manera conservadora una cuantía de acero para la simulación del modelo. Tampoco se cuenta con memorias técnicas de la estructura del irradiador, ni con información adicional a la presentada en esta sección.

2.2. CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL

En el presente estudio se analizó la parte de la estructura denominada cámara de radiación, indicada en la Figura 4, ya que ésta es la masa de hormigón que se encuentra sobre el nivel del suelo y se va a mover libremente de presentarse un evento sísmico. La parte de la estructura que se encuentra

bajo el nivel del suelo, está confinada por el mismo en un sistema tipo cajón.



Figura 4.- Cámara de radiación del Irradiador de Cobalto 60. (Fotografía por: Estefanía Montesdeoca)

La cámara de radiación es un paralelepípedo, con 4 muros o paredes de 1.50m de ancho en su base, que disminuyen el espesor en su parte superior a manera de gradas, en las que se apoyan 9 vigas que conforman el techo de la cámara de radiación, esta geometría se indica en la Figura 5 junto con los nombres que se les ha asignado a cada una de las paredes en el presente estudio.

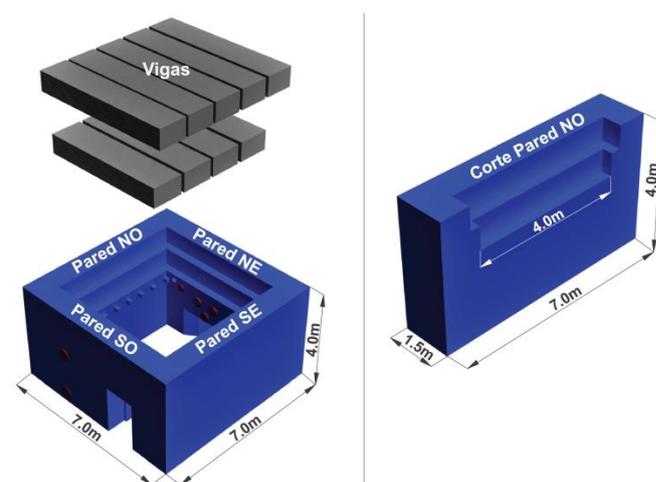


Figura 5.- Vigas que conforman el techo de la cámara de radiación, y nombre de paredes (izquierda). Pared tipo del irradiador (derecha). (3D realizado por: Estefanía Montesdeoca)

Las paredes NE y SO del irradiador tienen partes huecas como se puede apreciar en la Figura 6, dichas partes están cubiertas por tapas metálicas circulares.

En cuanto a las restricciones de desplazamiento, la cámara de radiación puede considerarse una estructura empotrada en su base, ya que las paredes de 1.50m de espesor se unen hacia abajo del nivel del suelo, con un volumen de hormigón perteneciente a la piscina, de casi el doble de dicha dimensión, y que a su vez está confinado por el suelo.

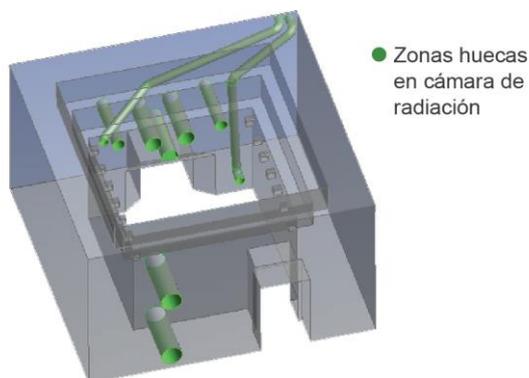


Figura 6.- Geometría en 3D de las zonas huecas de la cámara de radiación.

Además, un dato particular es que en la pared NE, la cámara de radiación se une a una losa de 0.30m de espesor, indicada en la Figura 7, elemento que a su vez se conecta a la estructura de la “Casa Mata”, que es el nombre de la edificación dentro de la que está ubicada la estructura del irradiador de cobalto 60.

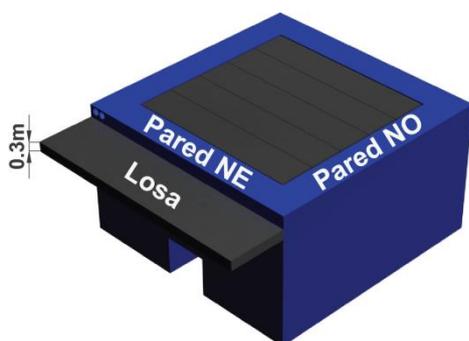


Figura 7.- Losa de 0.30m de espesor unida a la pared NE. (3D realizado por: Estefanía Montesdeoca)

2.3. ESTIMACIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

Para la estimación del acero de refuerzo, se realizó una revisión de información referente a las cuantías mínimas de acero, exigidas por varios códigos históricos, para muros de hormigón armado. Cabe aclarar, que esto no implicó una mezcla de diferentes códigos en el presente estudio, sino que los valores consultados, sirvieron como indicadores comparativos del acero mínimo que debió tener la estructura para cumplir con las normas de la época. Se revisaron códigos desde el año 1971, ya que en el año 1973 hubo cambios en el diseño de la estructura, y uno de los códigos vigentes al que se debieron remitir los calculistas ecuatorianos en ese entonces debió ser el ACI 318-71. Además, se supuso que dichos calculistas tuvieron como base para su rediseño el armado de acero de los planos franceses de 1965.

En función de lo anteriormente expuesto, se definió que, el proceso de estimación de acero consiste en asumir una cuantía de acero base, y comparar con los valores mínimos exigidos por códigos entre los años 1971 y 2011. Así, si la cuantía de acero base fuese menor o igual al acero mínimo

exigido en esa época para muros, la estimación es conservadora, ya que el irradiador sería analizado con una cantidad de acero de refuerzo menor al real.

El acero base se estimó en función del único plano estructural existente, que es el del año 1965, en el cual se indica el armado de acero de la estructura bajo el nivel del suelo, mas no de la cámara de radiación. Así, el acero base estimado en la cámara de radiación, se obtuvo extrapolando el armado de acero ubicado en la parte inferior.

Se precisa una tabla comparativa de cuantías de acero que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.- Cuadro comparativo de cuantías de acero base estimado, en función del acero mínimo exigido en diferentes épocas.

	Cuantía de refuerzo vertical mínimo exigido en código	Cuantía de refuerzo horizontal mínimo exigido en código
	ρ mín.	ρ mín.
ACI 318-71 [1]	0.0015	0.0025
ACI 318-87 [2]	0.0012	0.0020
ACI 318-11 [3]	0.0012	0.0020
ACI 349-01 [4]	0.0012	0.0020
	Refuerzo Vertical	Refuerzo Horizontal
	ρ	ρ
Acero estimado base	≈ 0.001	≈ 0.001

Así, la cuantía de acero correspondiente al acero base estimado, resultó ser menor que los mínimos exigidos por los códigos analizados, por lo que se asumió dicho acero para la elaboración del modelo, como se indica en la Figura 8.

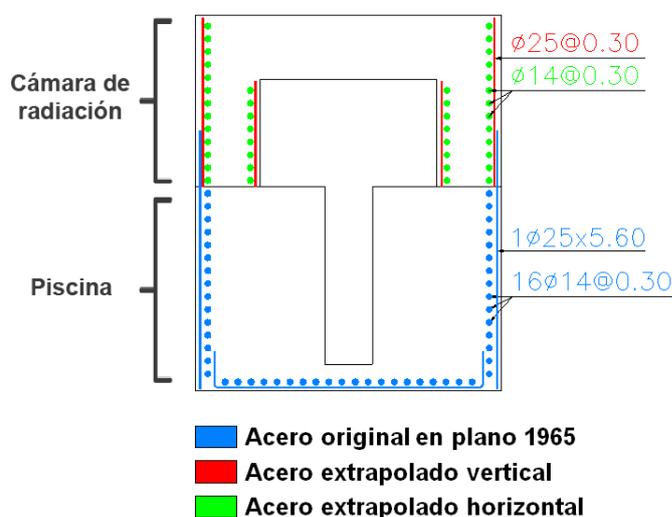


Figura 8.- Acero base estimado para cámara de radiación.

2.4. TIPO DE SUELO

De acuerdo a un reciente estudio de microzonificación sísmica de Quito [5], se catalogó como tipo q2s al suelo de la zona donde se ubica el irradiador. La velocidad de onda de corte de dicho suelo, corresponde a un suelo tipo D, según la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2011 (NEC-11) [22].

Para complementar este punto con un dato adicional, fue necesario referirse al documento denominado memoria de cálculo, diseño estructural e informe de suelos, del proyecto de talleres y servicios generales de la EPN, mencionado en la sección 2.1. Documento que indica que el suelo considerado para el cálculo estructural de una edificación cercana al irradiador, corresponde a un tipo de suelo S3 según el Código Ecuatoriano de la Construcción 2000 (CEC-2000) [12], por lo que se toma un suelo tipo E según la norma NEC-11.

De todo lo anterior y con referencia al suelo que soporta la estructura del irradiador de cobalto 60, en el presente estudio se determinó un suelo tipo E (NEC-11), para los cálculos posteriores.

2.5. SISMO A CONSIDERARSE

Un fenómeno sísmico, es descrito principalmente por los siguientes parámetros: fecha y tiempo de origen, posición geográfica, magnitud e intensidad del sismo [21]. En Ecuador, existe una red de sismógrafos y acelerógrafos, que registran toda esta información para luego ser debidamente analizada.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-11), permite cuantificar valores de acciones sísmicas para el análisis de estructuras en diferentes zonas del país. Para ello, determina un mapa de zonas sísmicas, proveniente de un completo estudio de peligro sísmico del país, donde fueron considerados los siguientes parámetros: Análisis de los catálogos sísmicos históricos, las principales fuentes sísmicas conocidas, modelación de la ocurrencia de los sismos, utilización de ecuaciones de predicción, estudio sobre incertidumbres de los diferentes parámetros, entre otros.

Es así que, para la consideración de la acción sísmica que se aplicó en la simulación del presente estudio, fue necesario remitirse a la NEC-11 [22], donde se calcula:

$$V = \frac{I \times Sa}{R \times \phi_p \times \phi_e} \times W \quad (1)$$

Donde,

I= 1.5; Factor de importancia.

Sa = 1.13g; Aceleración espectral.

R= 1.0; Factor de reducción de respuesta estructural.

$\phi_p=1$; Factor de configuración estructural en planta

$\phi_e=0.9$; Factor de configuración estructural en elevación.

Así,

$$V = \frac{1.5 \times 1.13}{1 \times 0.90 \times 1} * W = 1.88 \times W$$

La expresión $1.88 \times W$ significa que, la acción sísmica a asignarse en la simulación de la cámara de radiación, equivale a un 188% del peso de la cámara de radiación aplicado lateralmente.

El peso total de la cámara de radiación, considerando un peso específico del hormigón de 2400 kg/m^3 es $350 \times 10^3 \text{ Kg}$, tal como se desglosa en la Tabla 2:

Tabla 2.- Peso total de la cámara de radiación

Elemento	Volumen [m ³]	Peso x10 ³ [Kg]
Pared NE	26.56	63.74
Pared SE	30.18	72.42
Pared SO	26.30	63.12
Pared NO	30.21	72.49
Vigas	32.64	78.32
Total		350.10

2.6. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Se realizó la simulación basada en tecnología de elementos finitos no lineales, para ello, se estableció el elemento finito a utilizarse, las propiedades de los materiales, las restricciones de desplazamiento. Se indicó el criterio de falla con el cual se define el dominio elástico del hormigón, a partir del cual se establece la ejecución de un análisis no lineal del modelo. Se asignó a la estructura la acción sísmica correspondiente, y se desplegó el resultado final. Este proceso se realizó en el software Ansys.

2.6.1. ELEMENTO FINITO PARA CONCRETO ARMADO

Un elemento finito puede ser definido como una representación matemática matricial, de la interacción entre los grados de libertad y acciones de un conjunto de nudos. Éstos pueden ser puntuales, lineales, superficiales o volumétricos. [14] Los elementos finitos hacen posible: “la transformación de un sistema físico, con un número infinito de incógnitas, a uno que tiene un número finito de incógnitas relacionadas entre sí por elementos de un tamaño finito” [14].

Para la representación del hormigón armado en el presente estudio, se utilizó un elemento finito hexaédrico, el cual tiene 8 nudos con 3 grados de libertad cada uno. La particularidad de este elemento finito es que permite visualizar fisuras por agrietamiento y por aplastamiento en el hormigón. Este elemento finito además permite considerar barras de refuerzo en su interior tal como se indica en la Figura 9. Dichas barras trabajan a tensión y compresión, pero no a corte, y representan las varillas de acero de refuerzo del hormigón armado.

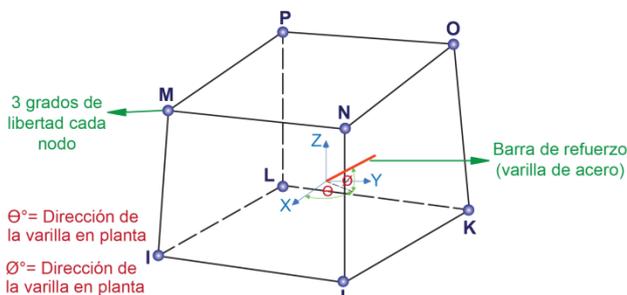


Figura 9.- Elemento finito hexaédrico [7].

2.6.2. CONSIDERACIONES PARA LA SIMULACIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO

Para la determinación del inicio de la respuesta inelástica de la estructura, es necesario definir un apropiado criterio de falla que se compare con el estado multiaxial de esfuerzos del elemento finito [8]. El criterio de falla utilizado, para un estado de esfuerzos multiaxial del hormigón, se fundamenta en el modelo constitutivo de William y Warnke [7]. En el caso de una falla a tensión, se utiliza el criterio del esfuerzo máximo de tensión. [15]

Al aplicar la acción sísmica en el modelo, se establecen dos enfoques de cálculo: de producirse esfuerzos en la estructura que mantengan un comportamiento elástico de la misma, el hormigón se trata como un material elástico lineal, mientras que, si se producen fisuras por agrietamiento o aplastamiento en los elementos finitos, la matriz elástica esfuerzo-deformación es ajustada para representar cada modo de falla del elemento finito. La presencia de una fisura por tensión es representada mediante la introducción de un plano de debilidad en dirección normal a la cara de la grieta y de un coeficiente β_t de reducción de resistencia al corte para fisuras abiertas indicado en la Tabla 4, si la grieta se cierra, todos los esfuerzos de compresión normales al plano de la grieta se transmiten a través de la misma y se introduce un coeficiente β_c de transferencia de esfuerzo cortante para una grieta cerrada [7], indicado en la Tabla 4.

En el presente estudio se contempla la no linealidad del material, específicamente en los ajustes implementados a la matriz esfuerzo deformación del elemento finito una vez que se han producido fisuras por tensión en el hormigón [7], dichos ajustes tratan eficazmente el agrietamiento como "smeared band" [7] o lo que se puede entender como un modelo de fisuración en banda [23]. Si el material falla a compresión, se supone que la resistencia del material se ha degradado hasta tal punto, que la contribución a la rigidez del elemento finito en el punto de falla, puede ser ignorada [7].

2.6.3. MATERIALES

Se realizó un ensayo no destructivo con esclerómetro, el cual muestra de manera aproximada, la resistencia que puede

tener el hormigón de la cámara de radiación. De dicho ensayo se obtuvo una amplia gama de valores de resistencia a compresión del hormigón, por lo que, se tomó como valor conservador un $f_c=2,40 \times 10^7$ Pa. Una vez conocida la resistencia f_c del hormigón, se calculó el módulo de elasticidad, obteniéndose un valor $E_c = 2.33 \times 10^{10}$ Pa [3]. En cuanto al peso específico, se tomó un valor $\gamma = 2400$ kg/m³.

Para modelar apropiadamente el hormigón, se requirió definir las propiedades isotrópicas lineales del material, que se indican en la Tabla 3, y se obtuvo la curva multilínea esfuerzo deformación unitaria, indicada en la Figura 10, mediante las relaciones constitutivas descritas a continuación [20] [23]:

Si $0 \leq \epsilon \leq \epsilon_1$ $f_c = \epsilon \times E_c$ Tramo AB (2)

$\epsilon_1 \leq \epsilon \leq \epsilon_0$ $f_c = \frac{\epsilon \times E_c}{1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^2}$ Tramo BC (3)

$\epsilon_0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{cr}$ $f_c = f'_c$ Tramo CD (4)

Donde,

$\epsilon_0 = \frac{2 \times f'_c}{E_c}$ (5)

Para el punto B, se cumple que $f_c=0.30 \times f'_c$, dicho punto es parte del tramo AB que se considera lineal.

Tabla 3.- Hormigón - Isotrópico Lineal

E_c	2.33×10^{10}	Pa(N/m ²)
ν	0.2	

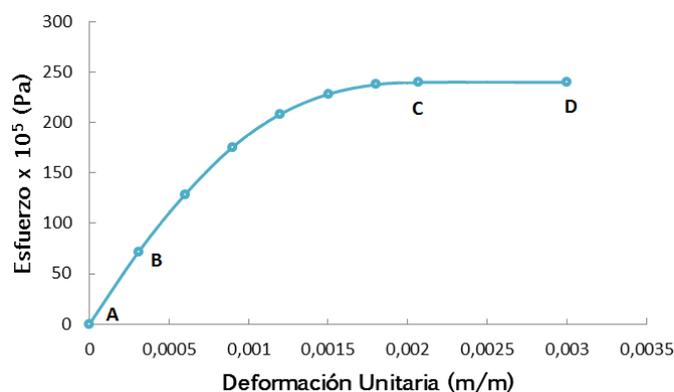


Figura 10.- Curva multilínea esfuerzo vs deformación unitaria, para un hormigón $f_c = 2.40 \times 10^7$ Pa.

La resistencia última a tracción del hormigón, se puede establecer como un valor del 10% o menos que cuando éste trabaja a compresión [25]. Adicional a los datos anteriores, en la Tabla 4, se presentan datos del hormigón requeridos para la ejecución del criterio de falla en Ansys.

Tabla 4.- Datos requeridos para la ejecución del criterio de falla. [9]

Coefficiente de transferencia a cortante fisuras abiertas (β_t)	0.4
Coefficiente de transferencia a cortante fisuras cerradas (β_c)	0.8
Resistencia última a la tensión del hormigón (f_t)	2.4×10^6 Pa
Resistencia última a la compresión del hormigón (f_c)	2.4×10^7 Pa

En cuanto al acero de refuerzo, en este estudio se consideró el acero A51 [17], establecido en la norma INEN-101 vigente en la década de los 70, época en la que se construyó el irradiador. Su comportamiento se consideró uniaxial y la curva esfuerzo deformación de este material fue representada mediante las siguientes ecuaciones constitutivas [9], con las que se obtuvo un modelo elasto-plástico del material, que se indica en la Figura 11:

$$\sigma_s = E_s \times \varepsilon_s, \quad \text{si } \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \quad \text{Tramo EF} \quad (6)$$

$$\sigma_s = F_y + E'_s \times \varepsilon_s, \quad \text{si } \varepsilon_s > \varepsilon_y \quad \text{Tramo FG} \quad (7)$$

En dichas ecuaciones se utilizó el módulo de elasticidad del acero, indicado en la Tabla 5, y los valores de esfuerzo de fluencia y módulo tangente indicados de la Tabla 6. Además, se tomó un peso específico $\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$.

Tabla 5.- Acero - Isotrópico Lineal

E_s	2.10×10^{11}	Pa(N/m ²)
ν	0.3	

Tabla 6.- Datos utilizados para la elaboración de la curva bilineal

Esfuerzo de fluencia del acero (F_y)	3.53×10^8	Pa(N/m ²)
Módulo Tangente (E'_s)	2.10×10^9	Pa(N/m ²)

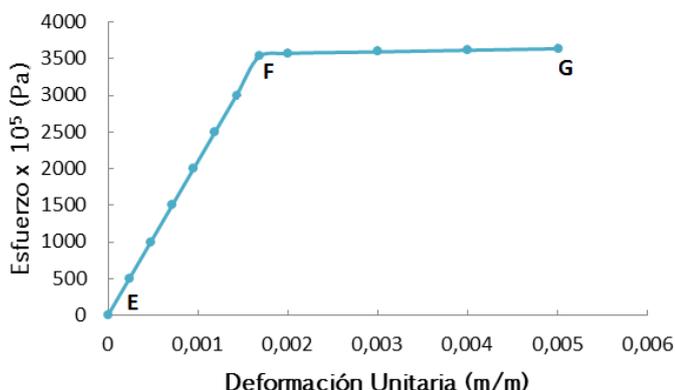


Figura 11.- Curva bilineal esfuerzo vs deformación unitaria, para el acero de refuerzo.

2.6.4 MALLADO Y RESTRICCIONES DE DESPLAZAMIENTO

La geometría de la cámara de radiación fue simplificada en las paredes NE y SO para optimizar tiempo computacional, la

simplificación más significativa se refiere a la no consideración de los huecos que representan las 2 tuberías más largas de la pared NE. Se realizó el mallado de la estructura en Ansys Workbench, obteniendo elementos finitos hexaédricos de un tamaño aproximado de 0.10m x 0.10m x 0.10m. Se exportó el mallado a Ansys APDL y se asignó el tipo de elemento finito indicado en la sección 2.6.1 a todos los elementos de la estructura. Se procedió a asignar las varillas de acero estimadas en la sección 2.3, a los elementos finitos correspondientes, tal como se muestra en la Figura 12.

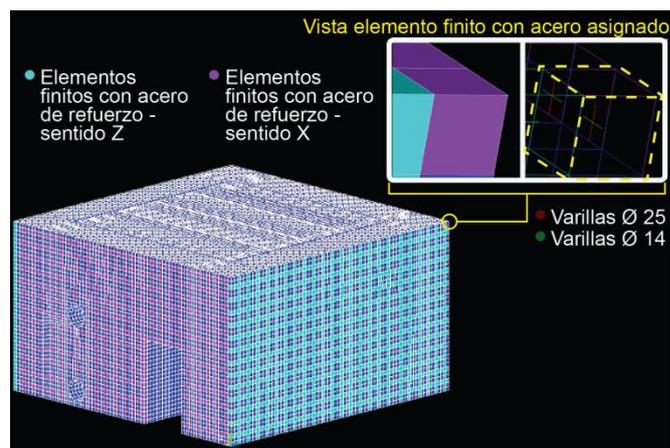


Figura 12.- Elementos finitos con acero de refuerzo en las zonas correspondientes; Detalle del acero de refuerzo dentro del elemento finito.

En cuanto a las restricciones a considerarse, y en función de lo explicado en la sección 2.2, se procedió a analizar la cámara de radiación como una estructura empotrada en su base y restringida a los desplazamientos traslacionales en la zona superior de la pared NE, tal como se indica en la Figura 13. Finalmente, se modeló la acción sísmica aplicando a la estructura una aceleración lateral de 18.8 m/s^2 .

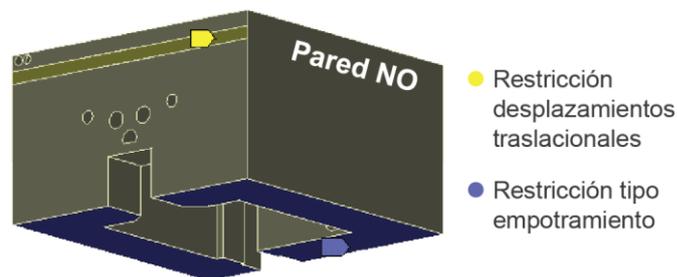


Figura 13.- Restricciones consideradas en la simulación.

3. RESULTADOS

Una vez aplicada la acción sísmica en dos direcciones perpendiculares, como se muestra en la Figura 14, se desplegó el resultado final, y se observó que ante la acción sísmica propuesta la estructura no presenta zonas con fisuras, como se indica en la Figura 15.

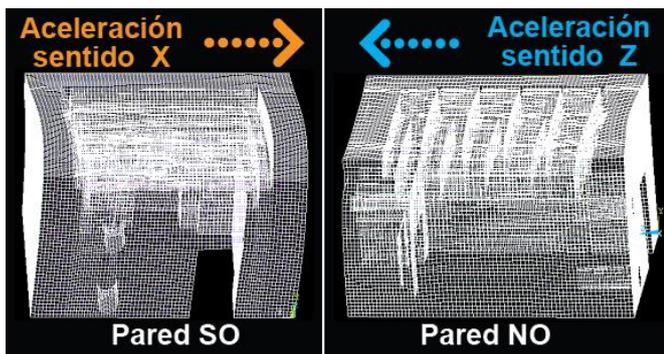


Figura 14.- Aplicación de acción sísmica en dos direcciones ortogonales.

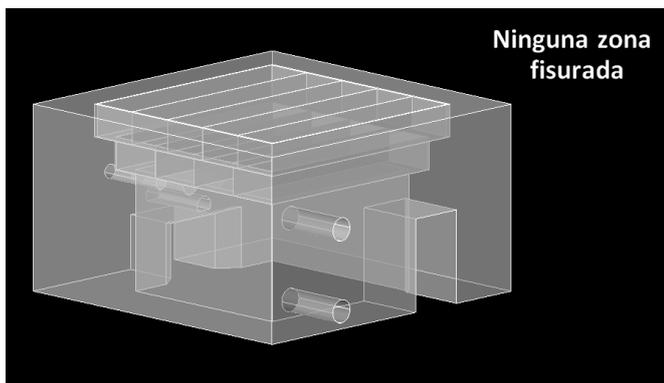


Figura 15.- Resultado final, no se presenta ninguna zona fisurada ante la acción sísmica propuesta.

4. DISCUSIÓN

Luego de ejecutada la simulación basada en tecnología de elementos finitos, se realizó un cálculo simplificado del comportamiento de un elemento representativo de la cámara de radiación. Dicho cálculo consistió en comparar la sollicitación por sismo de dicho elemento, con el momento de agrietamiento del mismo. Si el momento de agrietamiento fuese superado por el momento de sollicitación del elemento estructural analizado, significa que se comienzan a presentar fisuras en dicho elemento.

Se procedió a aplicar a la pared NO, una carga lateral distribuida equivalente al 188% de su peso propio. Tomando en cuenta que son cuatro las paredes que conforman la cámara de radiación, se dividió el peso total de la cámara entre 4, esto para obtener el peso aproximado de una pared; De dicho valor se obtuvo el 188%, dando como resultado 165 T de carga puntual, que aplicada como carga distribuida sobre el área de la pared en cuestión, resultó un valor de carga distribuida $q = 5.88 \text{ T/m}^2$.

Una vez distribuida la carga en el área de la pared NO, se tomó de dicha pared, una sección representativa tipo viga, de dimensiones 4.5m x 1.5m x 1.0m como se indica en la Figura 16, dicha sección se encuentra directamente en contacto con el espacio donde se localiza la radiación. Se procedió a analizar el comportamiento de este elemento como una viga, estimando además un empotramiento en sus extremos.

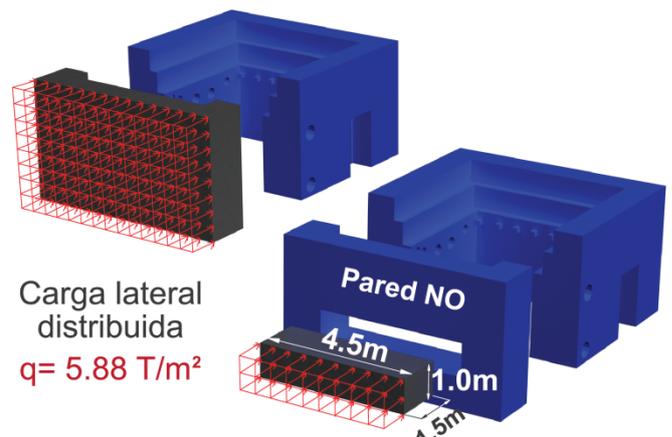


Figura 16.- Esquema de carga distribuida en la sección tipo viga, para cálculo simplificado. (3D realizado por: Estefanía Montesdeoca)

Solicitación por sismo del elemento tipo viga [27]:

$$M_{sol} = \frac{q \times l^2}{12} \quad (8)$$

$$M_{sol} = \frac{5.88 \times 4.50^2}{12} = 9.92 \text{ Tm}$$

Momento de agrietamiento del elemento tipo viga [3]:

$$M_{cr} = \frac{f_t \times I}{y_t} \quad (9)$$

$$M_{cr} = \frac{2 \times \sqrt{240} \times \frac{100 \times 150^3}{12}}{75} = 116.19 \text{ Tm}$$

El momento de sollicitación por sismo es significativamente menor al momento de agrietamiento de la sección del muro analizada. Por lo tanto, no se producen fisuras en la sección tipo viga ante la aplicación de la carga lateral propuesta. Así, la simulación de la estructura basada en tecnología de elementos finitos, junto con la comprobación simplificada, indicaron que la cámara de radiación de hormigón armado no presenta fisuras ante la acción sísmica propuesta.

En cuanto al permanente monitoreo que se le da a la estructura en la EPN, cabe mencionar que aún sin la presencia de eventos sísmicos, se realizan permanentes mediciones de la radiación que sale de la estructura del irradiador de cobalto 60 para verificar que ésta se encuentre dentro de los rangos permisibles. Además, es importante aclarar que en el presente estudio no se conoce de la existencia de zonas huecas en el hormigón adicionales a las presentadas en la Figura 6, ni tampoco de irregularidades en el hormigón en su forma y constitución debido a posibles errores constructivos tales como la no adecuada vibración del hormigón al fundir, entre otros. Dichos aspectos, junto con la presencia de pequeñas fisuras debidas a la propia naturaleza del material aún en ausencia de acciones externas, no han sido considerados en el presente estudio.

5. CONCLUSIONES

De la evaluación de la estructura mediante la simulación basada en tecnología de elementos finitos no lineales, se establece que el estado multiaxial de esfuerzos de los elementos finitos que conforman el modelo, se encuentra dentro de los dominios que el criterio de falla define como rango elástico, por lo tanto y dentro del marco de análisis establecido, la cámara de radiación no es vulnerable ante el sismo propuesto.

La estructura del irradiador de cobalto 60 de la EPN posee una configuración estructural sismo resistente. Esto debido a encontrarse incrustada en el suelo de manera similar a un sistema tipo cajón y a su regularidad en planta.

El resultado del cálculo simplificado de una sección tipo viga de la cámara de radiación, evidencia una significativa diferencia entre el momento de sollicitación y el momento de agrietamiento de la viga propuesta, esto implica que a dicho elemento estructural aún le queda una reserva de resistencia antes de fisurarse. Además, es importante adicionar en cuanto a criterios de rigidez en planta, que ante cualquier dirección en la que se dé un sismo en la cámara de radiación, dos de los cuatro muros de la cámara, aquellos que estén mayormente alineados con la dirección del sismo, absorberán la gran mayoría de los esfuerzos generados en la cámara debido a la acción sísmica, ya que la rigidez del muro en su sentido longitudinal es 20 veces mayor que en su sentido más corto.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un análisis dinámico de la estructura para obtener el corte basal máximo antes de que la estructura comience a fisurarse.

Se recomienda desarrollar e implementar en el análisis de la presente estructura, y de estructuras existentes en general, modelos matemáticos más eficientes y más precisos que los que vienen por default en los elementos finitos desarrollados por Ansys.

La parte de la estructura denominada piscina, posee robustas secciones de hormigón armado y está confinada por el suelo, características que permiten predecir su comportamiento sismo resistente. A pesar de esto, se recomienda realizar análisis que permitan estudiar a profundidad la respuesta estructural de la piscina ante un evento sísmico, y así determinar con certeza sus condiciones más críticas. Para los análisis que se realicen es importante considerar las características del suelo que confina la piscina, y el agua que está contenida en su interior.

Es recomendable que se optimice el mallado del modelo, utilizando criterios más profundos, y herramientas matemáticas al respecto o módulos especializados. De esta manera se podrá representar el modelo de elementos finitos

de la estructura, con mayor detalle al propuesto en el presente estudio.

Si se desea realizar una simulación más precisa en cuanto al comportamiento del hormigón que conforma la estructura, es recomendable realizar ensayos que permitan conocer características específicas del hormigón en cuestión, tales como radiografías con rayos X para la detección de armaduras de acero, ultrasonidos para determinar el grado de deterioro del hormigón, análisis químicos para la determinación de la propiedad de la mezcla y sus posibles constituyentes, entre otros.

Se recomienda analizar el caso en que, debido a un evento sísmico, una parte del techo de la Casa Mata caiga sobre la estructura del irradiador de cobalto 60.

Es recomendable que se profundice el análisis del desempeño sísmico de la estructura del irradiador de cobalto 60, utilizando criterios o métodos que permitan eliminar paulatinamente la incertidumbre de la falta de planos estructurales y de las propiedades de los materiales que la constituyen, así, se podrá utilizar menos criterios conservadores volviendo aún más eficiente y preciso el análisis en cuestión. Una vez disminuida al máximo posible la incertidumbre del armado de acero en el proyecto, es factible realizar un modelo del hormigón armado donde se utilicen elementos finitos independientes para cada uno de los materiales. Esto, además de representar una manera más realista de modelar las varillas de acero en cuanto a su ubicación espacial en el hormigón, permite considerar la no adherencia perfecta entre la varilla de acero y el hormigón [8], factor de trascendental importancia para obtener resultados cada vez más precisos. Además, se puede implementar en el análisis un modelo discreto de fisuración, para obtener mayor precisión en el comportamiento local a detalle de la estructura [8].

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias al Programa “Proyectos de Investigación Semilla” de la Escuela Politécnica Nacional; Un agradecimiento al Ing. Patricio Placencia; al Ing. William Venegas; Ing. Félix Vaca; Ing. Eduardo Márquez; Ing. Oswaldo Proaño; Arq. Jorge Salazar; Julio Pulpo; y a todas las personas que han aportado al desarrollo de este estudio.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ACI Committee 318, (1971), “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-71) and Commentary”, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1971.
- [2] ACI Committee 318, (1987), “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-87) and Commentary”, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1987.

- [3] ACI Committee 318, (2011), "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2011, 509 pp.
- [4] ACI 349-01 Committee 349, (2001), "Code for Nuclear Safety Related Concrete Structures (ACI 349-01)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001, 134 pp.
- [5] R. Aguiar, "Acopio de Trabajos de Suelos Realizados en Quito Tendientes a una Microzonificación Sísmica de la Ciudad", 2011.
- [6] M. Alcérrec, "América Latina, Situación Actual y Plantas de Irradiación en México", Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México, Toluca.
- [7] ANSYS (2011), "ANSYS User's Manual Revision 10", ANSYS, Inc.
- [8] Ávila, C., 2006, Modeling and Simulation of Precast Reinforced Concrete Structures by the Finite Element Method, PhD Thesis, Gunma, Japan.
- [9] S. Băetu and I. P. Ciongradi, "Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Slit Walls with ANSYS (I)", Faculty of Civil Engineering and Building Services, "Gheorghe Asachi" Technical University of Iași, 2011.
- [10] BECHTEL POWER Corp., "Seismic Analysis of Existing Reinforced Concrete Structure" Presentado en Bechtel Technology Journal, 2013, Disponible: http://www.i-juse.co.jp/doc/gtstrudl/05_Jia_Li_2013.pdf
- [11] O. Cardona, "Vulnerabilidad Sísmica Estructural y Diseño del Refuerzo Sismorresistente de la Catedral Basílica de Manizales, Colombia," Ingeniar Ltda., Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Disponible: http://idea.manizales.unal.edu.co/gestion_riesgos/descargas/gestion/Catedralm1.pdf
- [12] CEC-2000, (2000), "Código Ecuatoriano de la Construcción, Instituto Ecuatoriano de Normalización".
- [13] M. Chávez y R. Meli, (Mayo2011). "Shaking table testing and numerical simulation of the seismic response of a typical Mexican colonial temple" [Online]. Vol 41 (2012), pp. 233–253. Available: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eqe.1127/full>
- [14] J. J. del Coz y F.J. Surez, "Introducción al Programa ANSYS," Facultad de Ingeniería Técnica Industrial, Universidad de Oviedo, Gijón.
- [15] A. Gómez, J. M. Lizarazo, "Influencia de la no linealidad de material en la deflexiones inmediatas de vigas de concreto reforzado," Revista Ingeniería e Investigación, vol. 27, no. 2, pp. 92–99, Agosto 2007. Disponible: http://www.scielo.unal.edu.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092007000200013&lng=es&nrm
- [16] Greeshma S, Jaya K P and Annilet Sheeja L, "Analysis of Flanged Shear Wall Using Ansys Concrete Model". Presented at Intenational Journal of Civil and Structural Engineering, Vol 2, No. 2, 2011.
- [17] Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN-101, 1975.
- [18] Instituto Nacional de Preinversión, 2013, "Estudio básico para el aprovechamiento industrial de las tecnologías de irradiación en el Ecuador"; Primera edición; http://www.preinversion.gob.ec/wp-content/uploads/2013/11/Libro-6-INP-Cambios_finales.pdf
- [19] E. J. Králik. (2013). "Nonlinear Probabilistic Analysis of Reinforced Concrete Structure Failure of a Nuclear Power Plant Considering Degradation Effects" [Online]. Vols 249-250 (2013), pp. 1087–1098. Available: <http://www.scientific.net>; <http://www.scientific.net/AMM.249-250.1087>
- [20] S. Majeed, "Finite Element Analysis of Strengthened Reinforced Concrete Beams," Al-Rafidain Engineering Journal, vol. 21, no. 1, February 2013. Available: <http://www.alrafidain.engineering-coll-mosul.com/files/2013/no1/E/FE-10-1-2013.pdf>
- [21] J. L. Millones, "Localización de un Sismo Utilizando una Estación de tres Componentes," Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional de San Marcos, Lima, 2005.
- [22] NEC-11, (2011), "Norma Ecuatoriana de la Construcción", 2011.
- [23] P. A. López, "Simulación numérica de vigas en concreto reforzado con barras longitudinales, transversales y fibras cortas de acero mediante el método de los elementos finitos," M. S. tesis, Depto. Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2012.
- [24] P. Pottatheere and P. Renault, "Seismic Vulnerability Assessment of Skew Bridges". Presented at The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2013. Available: http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_06-0061.PDF
- [25] M. Romo. (2007). "Temas de Hormigón Armado", [Online]. Disponible: <http://publiespe.espe.edu.ec/librosvirtuales/hormigon/temas-de-hormigon-armado/hormigon04.pdf>
- [26] M. I. Sánchez, "Vulnerabilidad Sísmica de Construcciones Patrimoniales Históricas de Mampostería en Chile: Aplicación a los Torreones Españoles de Valdivia," Ing. tesis, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2013.
- [27] Gere y Timoshenko, "Mecánica de Materiales", 4ta ed, International Thomson Editores, 1998.