

Análisis mediante elementos finitos de cargas de impacto sobre el irradiador de Cobalto 60 de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador.

Finite element analysis of impact loads on the irradiator of Cobalt 60 of Escuela Politécnica Nacional del Ecuador.

EÍDOS N°19.
Revista Científica de Arquitectura y Urbanismo
ISSN: 1390-5007
revistas.ute.edu.ec/index.php/eidos

¹Juan Pablo Defaz Chulde, ²Nicolay Bernardo Yanchapanta Gómez,
³William Estuardo Villacis Oñate, ⁴Edgar David Mora Martínez

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, juan.defaz@epn.edu.ec, ORCID: 0000-0002-5363-6227,
²Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, nicolay.yanchapanta@epn.edu.ec, ORCID: 0000-0002-2215-4786,
³Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, william.villacis@epn.edu.ec, ORCID: 0000-0001-8653-7586,
⁴Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, edgar.mora@epn.edu.ec, ORCID: 0000-0002-2629-0769.

Resumen:

En el presente trabajo se determinó el posible agrietamiento en los muros estructurales y efectos en el funcionamiento del Irradiador Gamma Panorámico Categoría IV con Fuente de Cobalto 60 que se encuentra en el interior del Edificio n.º 7 de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), en Quito. El estudio consistió en analizar el impacto de una parte del techo que está sobre el irradiador de la instalación denominada "CASAMATA", puesto que gracias a un estudio previo de esta estructura se demostró que es vulnerable debido a sus características, construcción y deterioro a lo largo del tiempo. El estudio se realizó en función de requisitos de normas de análisis y evaluación de estructuras existentes, mediante la utilización del software denominado "SAP2000" para la modelación del irradiador. Se realizaron seis modelaciones con diferentes características en cuanto a hormigón y acero de refuerzo para determinar el comportamiento de la estructura bajo los casos asumidos. De los resultados obtenidos mediante SAP2000 se observó que en algunos lugares del irradiador se tienen valores mayores a los máximos permitidos en el American Concrete Institute 349 (ACI 349), correspondientes a la deformación unitaria del hormigón el cual es de 0.003 m/m. Además, los requisitos de resistencia señalados en la misma norma, no cumplieron con los parámetros establecidos, lo cual provoca que exista un peligro radiológico debido a que la cámara de radiación no cumpliría con el blindaje para la cual fue diseñada y liberaría una tasa de dosis mínima de 1.13×10^6 [mSv/año]

Palabras clave: irradiador, impacto, deformaciones, requisitos de resistencia, tasa de dosis.

Abstract:

The present work determines the possible cracking in the structural walls and effects on the operation of the Category IV Panoramic Gamma Irradiator with Cobalt 60 Source, which is located inside Building No. 7 of the National Polytechnic School (EPN) in Quito. The analysis consisted of an alleged (supposed) impact of a roof section that is on the irradiator in the facility called "CASAMATA", since a previous study of this structure showed that it is vulnerable due to its characteristics, construction, and deterioration throughout the time. The study was carried out based on the requirements of analysis and evaluation standards of existing structures by using the software called SAP2000 for modeling the irradiator. Six models with different characteristics in terms of concrete and reinforcing steel were made to determine the behavior of the structure under the assumed cases. From the results obtained through SAP2000, it was observed that in some places of the irradiator there are values greater than the maximum allowed in the American Concrete Institute 349 (ACI 349) corresponding to the unitary deformation of the concrete, which is 0.003 m/m. In addition, the resistance requirements indicated in the same standard did not meet the established parameters, which causes a radiological hazard because the radiation chamber would not comply with the shielding for which it was designed and would release a minimum dose rate of 1.13×10^6 [mSv/year].

Keywords: Irradiator, impact, strains, strength requirements, dose rate

1. INTRODUCCIÓN

A menudo, todo tipo de estructura está sujeta a determinados análisis para establecer si se encuentra diseñada y construida de un modo apropiado, para de esta manera garantizar su correcto comportamiento bajo la acción de eventos severos tales como sismos de gran magnitud.

En este lineamiento, es habitual la modelación de estructuras mediante elementos finitos, los cuales permiten representar de una forma más precisa y eficiente el comportamiento del material compuesto de hormigón armado (Greeshma, Jaya y Annilet Sheeja, 2001). Además, es importante enfatizar el caso más desfavorable al que estará sujeta la estructura a analizar, como, por ejemplo, cargas de impacto producidas por el colapso de edificaciones aledañas o externas, en cuanto a dichas cargas, constituyen solicitaciones dinámicas de interés especial, ya que, aunque por lo general su probabilidad es más baja que otros tipos de acciones, su efecto es potencialmente catastrófico (Lynn y Isobe, 2006).

A nivel mundial, el análisis con la aplicación de la teoría de elementos finitos a estructuras de carácter esencial es catalogado como imprescindible, ya que como es el caso del análisis no lineal realizado a un recinto de contención de un reactor nuclear VVER 440 en Japón (Králík, 2012), el análisis sísmico de un reactor nuclear de potencia para Chile, en el cual se utilizó el método de elementos finitos (Milla, 2008) y la evaluación de vulnerabilidad en una zona sísmica alta de un puente oblicuo en Alemania (Pottatheere y Renault, 2008), han sido desarrollados con este método y arrojado resultados fundamentales para la toma de decisiones importantes.

En cuanto a países del continente americano, se puede mencionar el análisis de vulnerabilidad sísmica de construcciones patrimoniales históricas de mampostería en Chile (Sánchez Cárdenas, 2013), el análisis de respuesta sísmica de una estructura colonial típica de México (Chávez y Meli, 2011) y el estudio de vulnerabilidad sísmica estructural

y diseño del refuerzo sismo resistente de la Catedral Basílica de Manizales en Colombia (Cardona, 2002).

En Ecuador, los análisis con el uso de elementos finitos, han sido frecuentes para el estudio de estructuras existentes, como es el caso del proceso de modelización de estructuras complejas para análisis con elementos finitos (Marín y Yungán, 2010), el análisis estructural del galpón denominado "CASAMATA" de la Escuela Politécnica Nacional (Barragán y Reinoso, 2017), esta última estructura, de tipo esencial ya que contiene el denominado "Irradiador Gamma Panorámico Categoría IV con Fuente de Cobalto 60", el cual será estudiado en el presente documento debido a la alta vulnerabilidad que el galpón posee (Barragán y Reinoso, 2017) y además debido a que últimamente la cantidad de eventos sísmicos aumentó de forma considerable desde el 16 de abril de 2016, después del terremoto que tuvo una magnitud de momento Mw 7,8 (Jumbo, 2017).

La cantidad de eventos registrados y localizados desde 2016 hasta 2019 son 22581, siendo 541 de magnitudes mayores o iguales a 4 (Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional, 2019a). Por esta razón, es preciso tomar todas las medidas necesarias para prevenir cualquier tipo de falla en edificaciones esenciales, especiales y demás estructuras.

En cuanto al Irradiador Gamma Panorámico Categoría IV con Fuente de Cobalto 60, este no es vulnerable debido a las características estructurales que posee (Salazar, Barros, Santos, & Ávila, 2014), pero como se mencionó anteriormente, la alta vulnerabilidad del galpón hace que esta estructura pueda ser afectada por una carga de impacto producida por una parte del techo de la "CASAMATA".

2. METODOLOGÍA

2.1 Recolección de información

El trabajo se lo realizó en Quito-Ecuador en el Edificio 7 de la Escuela Politécnica Nacional. Se revisó los planos arquitectónicos y estructurales, además de la tesis realizada por Barragán y Reinoso,

2017, para determinar las características tanto del Irradiador de Cobalto 60 como del Edificio 7.

Para tener una visión más amplia y entender de mejor manera el problema, se realizó una inspección del lugar para determinar problemas existentes. Se encontraron ciertas patologías constructivas como planos de falla horizontal, posibles efectos de columna corta, fisuras en columnas y vigas de la "CASAMATA". En cuanto al Irradiador, se observó fisuras que no comprometían al comportamiento de dicha estructura.

Además, se hicieron ensayos de esclerómetro según la norma ASTM C-805-18, con el equipo Concrete Test Hammer R-7500 del cual se obtuvo resultados de resistencia a la compresión del hormigón. Adicionalmente se ejecutó un ensayo de pachómetro con el equipo Profometer 600 Cover Meter, para determinar la localización y determinación de los diámetros de acero de refuerzo.

Finalmente, se revisaron reglamentos como la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), ya que la estructura se encuentra en el Ecuador, American Concrete Institute (ACI), debido a que el ACI presenta un capítulo para analizar estructuras de carácter nuclear, y American Society of Civil Engineers (ASCE), ya que en dicha norma se pueden encontrar métodos de análisis para estructuras existentes.

2.2 Características actuales de las estructuras

Para tener una visualización de la estructura que se analizó, en la figura 1 se detalla un dibujo en 3D del Irradiador de Cobalto 60 y sus respectivos componentes.

Previo a la modelación se realizó un levantamiento del irradiador para así poder trabajar con las dimensiones con las que está construida la estructura. En la figura 3 se observa una vista en planta del irradiador, así como la identificación de los muros que se utilizó para los análisis respectivos. En la figura 4 se observa una vista en elevación. Ambas figuras son el resultado de la digitalización de los planos y modificación debido al levantamiento In Situ realizado.

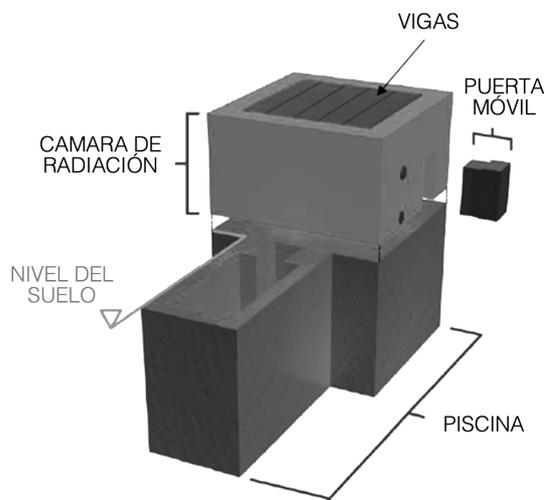


Figura 1. Irradiador de Cobalto 60, Fuente: (Salazar, Barros, Santos, y Ávila, 2014)



Figura 2. Estado del Irradiador de Cobalto 60, Fuente: (Défaz, 2020)

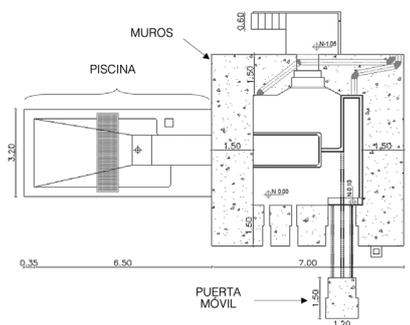


Figura 3. Vista en planta del Irradiador de Cobalto 60 de la Escuela Politécnica Nacional, Fuente: (Défaz, 2020)

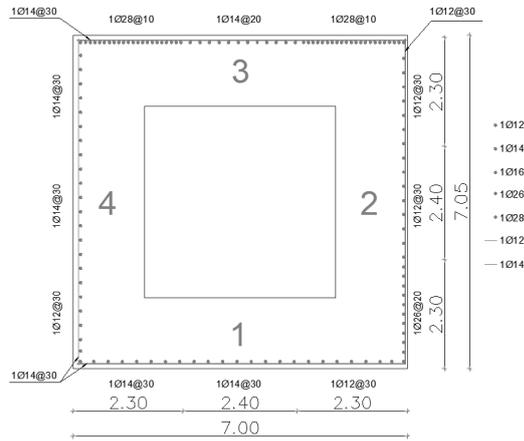


Figura 4. Vista en elevación del Irradiador de Cobalto 60 de la Escuela Politécnica Nacional, Fuente: (Défaz, 2020)

2.3 Resultado de ensayos realizados

El ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión del hormigón (f'_c) mediante el uso de esclerómetro, se lo realizó bajo la norma ASTM C-805-18, dio como resultado una resistencia de 178 (kg/cm²) y 174 (kg/cm²) para muros y vigas, respectivamente. Adicionalmente, se tomó un valor de 210 (kg/cm²) ya que el f'_c del hormigón para este tipo de estructuras no debe ser inferior a 3000 psi (American Concrete Institute, 2001), finalmente se asumió una resistencia de 240 (kg/cm²) para las modelaciones respectivas.

Figura 5. Opción 1 del acero de refuerzo de muros del Irradiador de Cobalto 60
Fuente: (Défaz, 2020)



Del ensayo del pachómetro se seleccionaron dos opciones para el acero de refuerzo, la primera de estas, se muestra en la figura 5 y la segunda en la figura 6. La existencia de una sola capa de armadura, corresponde a la limitación para realizar ensayos internos del Irradiador de Cobalto 60, la propiedad del módulo de elasticidad del hormigón corresponde al indicado en el ACI 318.

En las figuras 7 y 8 se muestra el acero de refuerzo longitudinal y transversal para vigas, respectivamente.

2.4 Modelación

Para lograr que el modelo se acerque más a la realidad se optó por realizar una modelación con elementos tipo SOLID, los cuales permiten tener una estructura tridimensional sólida.

Cabe recalcar que estos elementos permiten: tener cargas por gravedad (en cualquier dirección); presión superficial en las caras; presión de poro dentro del elemento; y cargas debido al cambio de temperatura (Computers and Structures, Inc., 2017).

Figura 6. Opción 2 del acero de refuerzo de muros del Irradiador de Cobalto 60
Fuente: (Défaz, 2020)

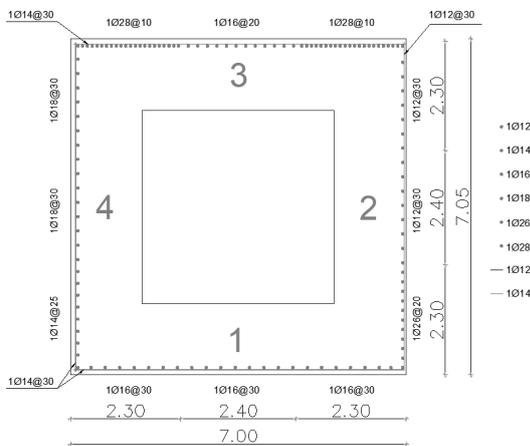


Figura 7. Acero de refuerzo longitudinal en vigas.
Fuente: (Défaz, 2020)

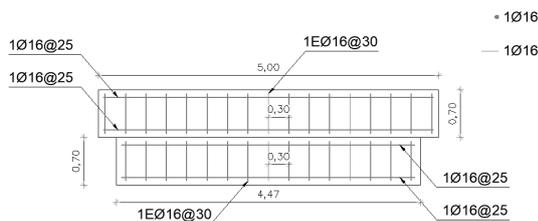
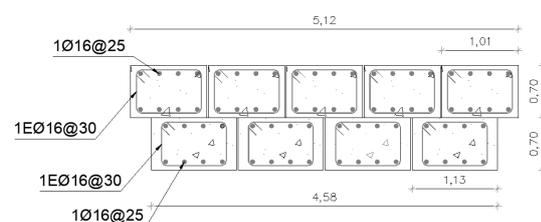


Figura 8. Acero de refuerzo transversal en vigas.
Fuente: (Défaz, 2020)



Al igual que una modelación con elementos tipo FRAME o SHELL, se debe definir sus propiedades y características, por ende, es importante mencionar que este documento no es una guía de como modelar con elementos sólidos, sino que su fin es analizar la estructura ya conocida bajo las condiciones propuestas de manera que se indiquen los aspectos más importantes y resultados obtenidos.

Se realizaron seis modelaciones con sus respectivas características en SAP2000, las cuales se detallan a continuación:

Modelación 1:

$$f'c_{muros} = 178,00 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$f'c_{vigas} = 174,00 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Acero de refuerzo, opción 1

Modelación 2:

$$f'c_{muros} = 178,00 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$f'c_{vigas} = 174,00 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Acero de refuerzo, opción 2

Modelación 3:

$$f'c = 210 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Acero de refuerzo, opción 1

Modelación 4:

$$f'c = 210 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Acero de refuerzo, opción 2

Modelación 5:

$$f'c = 240 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Acero de refuerzo, opción 1

Modelación 6:

$$f'c = 240 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Acero de refuerzo, opción 2

En cada una de las modelaciones con los datos mostrados anteriormente, se dividió al irradiador en hexaedros de 20x20x20 (cm) de lado como se detalla en la figura 9, excepto en lugares en los cuales esto no era posible, como, por ejemplo, en huecos circulares, en dichas partes se dividió en elementos más pequeños, pero siempre se garantizó que los nodos

de todos los elementos estén conectados para tener una correcta transmisión de efectos en la estructura.

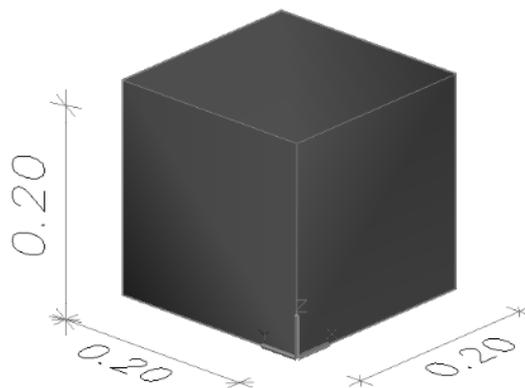


Figura 9. Exaedros 20x20x20 (cm).
Fuente: (Défaz, 2020)

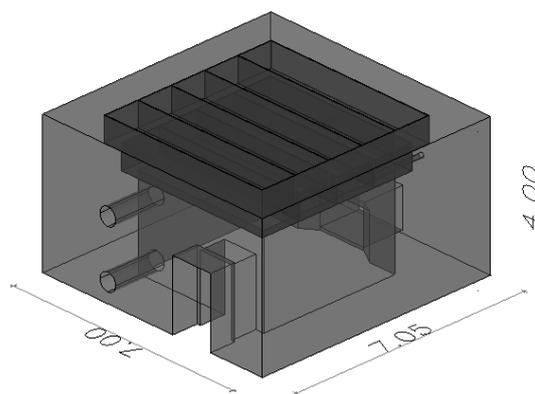


Figura 10. Dimensiones de la estructura a analizar
Fuente: (Défaz, 2020)

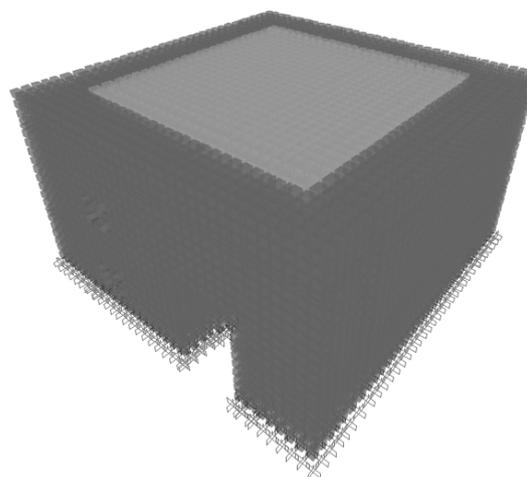


Figura 11. Irradiador de Cobalto 60
Fuente: (Défaz, 2020)

En la figura 10 se observa las dimensiones de la estructura a modelar y en la figura 11 se muestra dicha estructura ya dividida en los exaedros antes expuestos.

Debido a que el irradiador no posee una irregularidad discontinua en un plano, una irregularidad discontinua fuera de un plano, una irregularidad débil de piso y una irregularidad en cuanto a la torsión, se pueden utilizar procedimientos lineales para el análisis de la estructura (ASCE/SEI 41-13, 2013)

Para los análisis respectivos, en cuanto a los requisitos de resistencia que se deben cumplir, y según el ACI 349, el cual es una norma específica para este tipo de estructuras, se trabajará con la combinación más desfavorable, en este caso la combinación mostrada en la ecuación 1. Según el ASCE/SEI 7-16 se puede usar esta combinación para efectos de cargas de impacto. Estas cargas de impacto, constituyen solicitaciones dinámicas de interés especial, ya que, aunque por lo general su probabilidad es más baja que otros tipos de acciones, su efecto es potencialmente catastrófico (Lynn y Isobe, 2006).

$$U=(0,9 \text{ o } 1,2)D+A_k+0,5L+0,2S \quad (1)$$

2.5 Carga de impacto

Para el cálculo de la carga de impacto se utilizaron dos métodos.

Método 1.

Mediante conservación de energía.

“La energía es una cantidad que se puede convertir de una forma a otra, pero no puede crearse ni destruirse” (Young y Freedman, 2009), y se puede expresar como se detalla en las Ecuaciones 2 y 3.



Figura 12. Detalle de puntos seleccionados para la aplicación de la ecuación de conservación de energía, Fuente: (Défaz, 2020)

$$E_{c1}+E_{g1}+E_{e1}=E_{c2}+E_{g2}+E_{e2}+E_{Hf} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} 1/2mv_1^2+mgh_1+1/2kx_1^2= \\ 1/2mv_2^2+mgh_2+1/2kx_2^2+E_{Hf} \end{aligned} \quad (3)$$

Donde:

- E_{c1} : Energía cinética [J]
- E_{g1} : Energía potencial gravitatoria [J]
- E_{e1} : Energía potencial elástica [J]
- E_{Hf} : Energía térmica (calor) [J]
- m : Masa [kg]
- v : Velocidad [m/s]
- g : Gravedad (9,81 [m/s²])
- h : Altura [m]
- k : Rigidez [N/m]
- x : Desplazamiento [m]

En la figura 12, se muestra los puntos que se tomaron para la aplicación de la Ecuación 2 que trata de la conservación de energía.

Es transcendental indicar que para los puntos 1 y 2 se calcula la velocidad con la que impacta parte de la losa de “CASAMATA” debido al colapso de la misma. Para los puntos 2 y 3 se calcula la máxima deformación que producirá ese impacto, dicha deformación será comparable con la obtenida en el software donde se realizará la modelación.

Mediante el análisis de la Ecuación 3, se evalúa la fuerza de impacto en colisiones y se usa el impulso de la fuerza para determinar la carga de impacto (Young y Freedman, 2009), la cual se muestra en la Ecuación 4. Dicha fuerza se utilizará para la modelación. La masa correspondiente al techo desprendido, se calcula al considerar una losa alivianada de 30 cm de espesor.

$$F_{\text{impacto}}=v_i^* \sqrt{(m*k)} \quad (4)$$

Donde:

- v_i : Velocidad de impacto obtenida [m/s]
- m : Masa de una parte de la losa que cae debido al colapso [kg]
- k : Rigidez de la estructura [N/m]

Método 2.

Cargas dinámicas

Con este método se realizará una idealización de la estructura a una de un grado de libertad vertical, como se

muestra en la Figura 13, y se tomará una carga estática que representará la carga dinámica de impacto (Fliess, 2010).

Se considera el trabajo que realiza la carga “Q” como consecuencia del impacto, el trabajo realizado se indica en la Ecuación 5.

$$W_1 = Q(h + \delta) \quad (5)$$

Donde:

- W_1 : Trabajo que realiza una carga [t*m]
- Q : Carga de impacto [t]
- h : Altura de impacto [m]
- δ : Deformación provocada por la carga de impacto [m]

Luego se selecciona una carga estática “P” que origina la misma deformación “ δ ”. “P” sería una carga “estáticamente equivalente”. El trabajo desarrollado por esta carga se lo determinará como se muestra en la Ecuación 6:

$$W_2 = 1/2 P\delta \quad (6)$$

Donde:

- W_2 : Trabajo que realiza una carga [t*m]
- P : Carga “estática equivalente” [t]
- δ : Deformación provocada por la carga “estática equivalente” [m]

Para los dos casos, el trabajo producido es el mismo, por lo tanto, se aplica la Ecuación 7.

$$W_1 = W_2 \quad (7)$$

La ley de Hooke es válida utilizar, ya que se considera que el material no va a superar el límite de proporcionalidad, tal como se muestra en la Ecuación 8.

$$F = K * x \quad (8)$$

Donde:

- F : Fuerza [t]
- K : Rigidez [N/m]
- x : Deformación “ δ ” [m]

La deformación se la puede calcular mediante la Ecuación 9, la cual es la ecuación de la deformación axial (Fliess, 2010).

$$\delta = PL/AE \quad (9)$$

Donde:

- P : Carga “estática equivalente” [t]
- L : Longitud [m]
- A : Área [m²]
- E : Módulo de elasticidad [t/m²]

De la Ecuación 9 se despeja “P” y se obtiene la Ecuación 10.

$$P = AE\delta/L \quad (10)$$

Luego se reemplazan las Ecuaciones 5 y 6 en la Ecuación 7 y se tiene la Ecuación 11.

$$Q(h + \delta) = 1/2 P\delta \quad (11)$$

Luego de reemplazar “P” de la Ecuación 10 en la Ecuación 11 se despeja “ δ ” para obtener la Ecuación 12 con la que se determinará la deformación máxima producida por el impacto de un cierto peso “Q” a una altura “h”.

$$\delta = QL/AE \pm \sqrt{(QL/AE)^2 + 2(QL/AE)h} \quad (12)$$

El valor “ δ ” obtenido por la Ecuación 12 también será comparable tanto con el obtenido en el Método 1 como con el obtenido en SAP2000.

De la Ecuación 11 se despeja “P”, la cual será nuestra fuerza de impacto y se aprecia en la Ecuación 13.

$$P = (2Q(H + \delta))/\delta \quad (13)$$

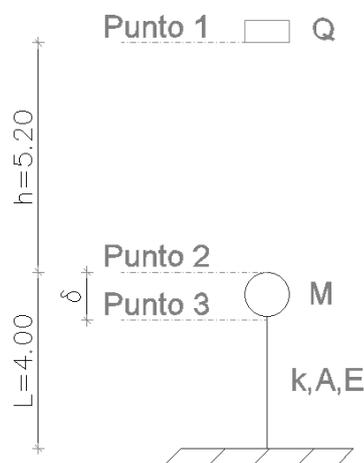


Figura 13. Idealización de la estructura, Fuente: (Défaz, 2020)

Para la aplicación de la fuerza de impacto sobre el Irradiador de Cobalto 60 se debe dividir la fuerza calculada por el Método 1 y Método 2 para el número de nodos que se tenga en la parte superior de la estructura, ya que de esta manera se tendrá una fuerza equivalente que representará la carga de impacto sobre toda la superficie del irradiador. El número de nodos que se tiene sobre el área donde ocurrirá el impacto es 1445.

Adicionalmente, tanto para el Método 1 como para el Método 2, se deberá comprobar que la deformación provocada por una carga estática, sea el doble que la deformación provocada por una carga dinámica a una altura "h" igual a cero (Fließ, 2010), como de detalla en la Ecuación 14.

	Método 1	Método 2
Deformación	5.3E-03	5.3E-03
Fuerza	61.33	61.36

Tabla 2. Deformaciones y cargas de impacto, f'c = 210 (kg/cm²)

	Método 1	Método 2
Deformación	5.3E-03	5.3E-03
Fuerza	61.33	61.36

Tabla 1. Deformaciones y cargas de impacto, f'c = 178 (kg/cm²)

	Método 1	Método 2
Deformación	5.3E-03	5.3E-03
Fuerza	61.33	61.36

Tabla 3. Deformaciones y cargas de impacto, f'c = 240 (kg/cm²)

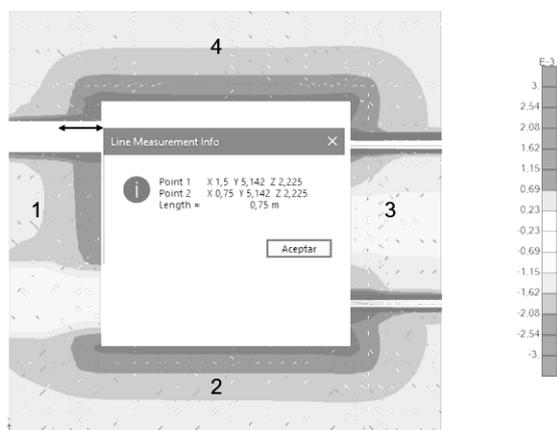


Figura 14. Deformaciones en el Irradiador de Cobalto 60 Fuente: (Défaz, 2020)

$$\delta/\delta_{est.} = 2 \quad (14)$$

Donde:

δ : Deformación provocada por una carga dinámica [m]

$\delta_{est.}$: Deformación provocada por una carga estática [m]

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Deformaciones y cargas de impacto

Las fuerzas y deformaciones obtenidas para la idealización mostrada en la figura 13 para el método de conservación de energía y el método de cargas dinámicas y con la aplicación de la combinación más desfavorable mostrada en la Ecuación 1 se muestran en las tablas 1, 2 y 3.

La deformación y la fuerza están expresadas en (m) y (T) respectivamente.

Cabe mencionar que la fuerza mostrada en las tres tablas anteriores es por nodo, es decir que este valor está repartido sobre todos los nodos de la superficie más alta del irradiador.

Para la modelación, y análisis de resultados es válida la selección de la fuerza del Método 1 o Método 2, ya que el porcentaje de error entre las dos es menor del 1 %.

Para los análisis respectivos establecidos en el ACI349 se eligió la fuerza del Método 2 de cada tabla.

3.2 Agrietamiento

El agrietamiento se lo determinó bajo la acción de la combinación más desfavorable. Dicha combinación fue la expuesta en la Ecuación (1).

Cabe mencionar que deformación máxima en la fibra de compresión de hormigón extrema se supondrá igual a 0,003 (American Concrete Institute, 2001), es decir, que en los sectores que supere esta deformación, se empezará a tener fisuras en el hormigón. Estas fisuras pueden causar una reducción en el espesor del blindaje del Irradiador de Cobalto 60, tal como se puede observar en la Figura 14. Esto simplemente para

observar las deformaciones que se obtuvieron en el software utilizado. Cabe recalcar que no se revisa el estado límite de servicio en este trabajo sino sus requisitos de resistencia que se deben cumplir según la misma norma (ACI349).

3.3 Tasa de dosis

La tasa de dosis ambiental es la cantidad de dosis que puede generarse por la expansión del campo de radiación alrededor de una fuente radioactiva (International Atomic Energy Agency, 2000). El International Atomic Energy Agency (IAEA), es uno de los más importantes organismos gubernamentales del mundo, que trabaja en colaboración científica y técnica en el campo nuclear.

En varias zonas de la estructura se observó una deformación mayor a la establecida en la norma, es por eso que se calculó la tasa de dosis con la Ecuación (15), para determinar si por agrietamiento existe peligro alguno.

$$\dot{D} = \frac{A \cdot CF_7 \cdot 0.5 \cdot \frac{d}{d_{1/2}}}{X^2} \quad (15)$$

Donde:

- D : Tasa de dosis [mGy/h]
- A : Actividad de la fuente [kBq]
- CF_7 : Factor de conversión de la Tabla E1 [(mGa/h)/(kBq)]
- X : Distancia desde la fuente puntual [m]
- $d_{1/2}$: Mitad del valor de la tabla E2 [cm]
- d : Espesor del blindaje [cm]

La actividad de la fuente de 10712 días de edad tomada el 30 de marzo de 2020 es de 859.7 (Ci), además, se tomó en cuenta 50000 (Ci), debido a la repotenciación que tendrá la fuente, para los factores CF_7 y $d_{1/2}$ se toma 3.60E-07 y 2.60, respectivamente, X toma un valor de 4.5 ya que es la distancia a la que se encuentran las personas de la fuente de Cobalto 60 y d se toma de 75, que es el caso más desfavorable de afectación de blindaje de los muros.

Para una actividad de la fuente de 859.7 (Ci), y un espesor de 0.75 (m), se obtuvo un valor de tasa de dosis de 2.34E-04 (rem/año).

Para una actividad de la fuente de 50000 (Ci), y un espesor de 0.75 (m), se obtuvo un valor de tasa de dosis de 1.36E-02 (rem/año).

Es importante mencionar el límite de la dosis máxima permitida para las personas que realizan actividades en la edificación donde se encuentra la Fuente de Cobalto 60 es de 50 (mSv/año) (Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica, 1979). o 20 (mSv/año) (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2016)

A modo de referencia, se calcula la tasa de dosis en el caso que el espesor del blindaje sea afectado completamente, es decir, sea cero, el cual arroja valores de 1.13E+05 y 6,58E+06 (mSv/año) para una actividad de la fuente de 859.7 (Ci) y 50000 (Ci) respectivamente, dando como resultado valores muy por encima de los permitidos por la Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica y el Organismo Internacional de Energía Atómica.

3.4 Revisión estructural

Según el ACI 349, se deben cumplir requisitos en cuanto a corte, flexión y carga axial para los elementos más críticos de la estructura analizada. Para los muros del irradiador se tomará en cuenta el Capítulo 14 del ACI 349-01 y para las vigas del irradiador se remitirá al Capítulo 10 del ACI 349-01.

Cabe mencionar que para la revisión estructural igualmente se utilizó la combinación más desfavorable, es decir la expuesta en la ecuación (1).

4. CONCLUSIONES

La resistencia a la compresión del hormigón del Irradiador de Cobalto 60 obtenida del procesamiento de datos derivados de un ensayo de esclerómetro, resultó ser de 178 [kg/cm²] para muros y 174 [kg/cm²] para vigas, además se tomó el valor de resistencia del hormigón mínimo recomendado por el ACI 349 de 210 [kg/cm²], finalmente, y para fines comprobatorios, también se trabajó con una resistencia de 240 [kg/cm²].

Para el caso donde la resistencia a la compresión del hormigón fue de 178

[kg/cm²] para muros y 174 [kg/cm²] para vigas, los requisitos de resistencia de estos elementos bajo la acción de la combinación más desfavorable no cumplieron.

Para el caso donde la resistencia a la compresión del hormigón fue de 210 [kg/cm²] para muros y vigas, los requisitos de resistencia bajo la acción de la combinación más desfavorable no cumplieron.

Para el caso donde la resistencia a la compresión del hormigón fue de 240 [kg/cm²] para muros y vigas, los requisitos de resistencia bajo la acción de la combinación más desfavorable no cumplieron.

Las tasas de dosis ambiental con una actividad de la fuente de Cobalto 60 de 859.7 [Ci] y 50000 [Ci] para el peor escenario generado por el incumplimiento de los requisitos de resistencia que afectan completamente al blindaje del irradiador, resultó 1.13E+06 [mSv/año] y 6.58E+07 [mSv/año], lo cual representa un riesgo radiológico para el personal ocupacional del Edificio 7 por sobrepasar el máximo permitido de 20 [mSv/año].

5. AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, por el apoyo al proyecto de investigación PIS-18-07 realizado y a todos los profesionales que formaron parte del mismo.

6. REFERENCIAS

American Concrete Institute. (2001). Code for Nuclear Safety Related Concrete Structures (ACI 349-01). Farmington Hills, Michigan.

ASCE/SEI 41-13. (2013). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. Reston, Virginia, United States.

ASCE/SEI 7-16. (2016). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. United States.

Barragán, I., y Reinoso, L. (2017). Análisis estructural y reforzamiento del galpón n.º 7 "Casa Mata" correspondiente al departamento de ciencia nucleares de

la Escuela Politécnica Nacional (Tesis de Pregrado). Quito, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.

Cardona, O. D. (2002). Vulnerabilidad Sísmica Estructural y Diseño del Refuerzo Sismorresistente de la Catedral Basílica de Manizales, Colombia. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 7(1).

Chávez, M., y Meli, R. (2011). Shaking Table Testing and Numerical Simulation of the Seismic Response of a Typical Mexican Colonial Temple. *Earthquake Engineering* 41: 233-253.

Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica. (1979). Reglamento de Seguridad Radiológica. Decreto Supremo 3640.

Computers and Structures, Inc. (2017). CSI Analysis Reference Manual. United States of America.

Défaz, J. (2020). Estudio del comportamiento estructural del irradiador de Cobalto 60 de la Escuela Politécnica Nacional debido al colapso de una parte del techo de la "Casamata" provocado por un evento sísmico. Quito, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.

Fliess, E. (2010). *Estabilidad*. Editorial Kapelusz.

Greeshma, S., Jaya, K., y Annilet Sheeja, L. (2001). Analysis of Flanged Shear Wall Using Ansys Concrete Model. *Presented at International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2(2): 464-465.

Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional. (2019a). *Informe sísmico para el año 2019*. Quito.

International Atomic Energy Agency. (2000). *Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency*. The IAEA.

Jumbo, B. (2017). La actividad sísmica creció en Ecuador. *El Comercio*. 9 de diciembre. <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador-sismos-geofisico-incremento-placastectonicas.html>

Králik, J. (2012). *Applied Mechanics and Materials*. Obtenido de Nonlinear

Probabilistic Analysis of the Reinforced Concrete Structure Failure of a Nuclear Power Plant Considering Degradation Effects: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.249-250.1087>

Lynn, K. M., y Isobe, D. (2006). Structural Collapse Analysis of Framed Structures Under Impact Loads Using ASI-Gauss Finite Element Method. *International Journal of Impact Engineering*, 34(9): 1500-1516.

Marín, J., & Yungán, M. (2010). Proceso de modelización de estructuras complejas para análisis con elementos finitos. Guayaquil, Ecuador.

Milla, F. (2008). *Estructuración y análisis sísmico de un reactor nuclear de potencia para Chile, utilizando el método de análisis finitos*. Santiago de Chile.

Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015c). Peligro sísmico diseño sismo resistente. Ecuador.

Organismo Internacional de Energía Atómica. (2016). Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: normas básicas internacionales de seguridad. Viena.

Pottatheere, P., & Renault, P. (2008). Seismic Vulnerability Assessment of Skew Bridges. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing.

Salazar, A., Barros, L., Santos, R., y Ávila, C. (2014). Análisis de comportamiento sísmico del irradiador de Cobalto 60 de la Escuela Politécnica Nacional. *Revista EPN*, 34(1), 87. https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/312

Sánchez Cárdenas, M. I. (2013). *Vulnerabilidad Sísmica de Construcciones Patrimoniales Históricas de Mampostería en Chile: Aplicación a los Torreones Españoles de Valdivia*. Tesis de Grado. Universidad Austral de Chile Valdivia, Chile.

Young, H. D., y Freedman, R. A. (2009). *Física Universitaria* (Vol. 1). Naucalpan de Juárez. Pearson Educación de México.