

Evaluación de masa volumétrica y control del concreto especial para escudo antirradiación en una obra hospitalaria en Sinaloa

Evaluation of bulk density and quality control of special concrete for radiation shield walls in a hospital project in Sinaloa

M.C. Julio César González-Félix*¹, Dr. Miguel Antonio Cruz Carrillo¹, M.I. Olimpia Alvarado Fierro¹, M.C Andrea Alejandra Padilla Lafarga¹

RESUMEN

Se utilizó concreto especial como blindaje contra la radiación en una edificación hospitalaria ubicada en el estado de Sinaloa, México. El control de calidad ejecutado durante el estudio técnico fue fundamental para detectar una deficiencia en la masa volumétrica del concreto, cuyo valor inicial fue de 2360 kg/m³, por debajo del mínimo requerido de 2400 kg/m³, establecido por la Comisión de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS). En respuesta a esta no conformidad, se prepararon mezclas de prueba en obra aplicando el concepto de máxima densidad, y se emitió un dictamen técnico solicitando ajustes en la dosificación al proveedor. Posteriormente, se llevaron a cabo ensayos de campo que incluyeron la medición de temperatura, el ensayo de revenimiento y la preparación de especímenes cilíndricos para evaluar la resistencia a compresión conforme a la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014. Adicionalmente, se supervisaron los procesos de colocación, vibrado y el curado del concreto corregido. Los resultados mostraron una mejora significativa en la cohesión, densidad y calidad del concreto aplicado. Este estudio demuestra la importancia de realizar un control sistemático y una respuesta técnica oportuna para garantizar la idoneidad del concreto en estructuras críticas, como los escudos de protección radiológica en infraestructura hospitalaria.

Recibido: Mayo 2025
Aceptado: Junio 2025
Publicado: Junio 2025

Palabras Clave:

masa volumétrica, Control de calidad de concreto, Ensayos para aceptación del concreto

Keywords:

bulk density, quality of concrete, Testing for acceptance of concrete

ABSTRACT

Special concrete was employed as radiation shielding in a hospital construction project located in Sinaloa, Mexico. Quality control performed during the technical evaluation was essential in identifying a deficiency in the volumetric mass of the concrete. The initial value was 2,360 kg/m³, which falls below the minimum requirement of 2,400 kg/m³ established by the Nuclear Safety and Safeguards Commission (CNSNS). In response, test mixtures were prepared on site using the maximum density concept, and a technical report was issued to request dosage adjustments from the supplier. Subsequently, field tests were then conducted, including temperature and slump measurements and concrete cylinder samples to verify compressive strength in accordance with NMX-C-083-ONNCCE-2014 standard. Moreover, the placing, vibration, and curing processes of the adequate concrete mix were closely supervised. The results of this study evidenced substantial improvements in the cohesion, density, and overall quality of the concrete. These findings underscore the critical importance of systematic monitoring and timely technical interventions to ensure the suitability of concrete for high demand applications, such as radiation shielding in hospital infrastructure.

*Autor para correspondencia. MC. Julio Cesar González-Félix
Direccion de correo electrónico: juliogonzalez@uas.edu.mx, Facultad de Ingeniería Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Sinaloa, C.P. 80040, Culiacán, Sinaloa, México.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando pensamos en concreto, lo asociamos comúnmente con columnas, puentes o carreteras. Sin embargo, este material también desempeña un papel silencioso pero crucial en otro tipo de construcciones: los escudos antirradiación.

El empleo de dispositivos generadores de radiación ionizante, como los rayos X y γ , ha aumentado significativamente en los ámbitos industrial, médico y nuclear como resultado de los avances tecnológicos. No obstante, la exposición prolongada a este tipo de radiación puede ocasionar serios daños a la salud humana, incluidos cáncer y alteraciones en el ADN, así como impactos negativos en el medio ambiente. En consecuencia, el desarrollo de materiales de blindaje para la protección radiológica se ha vuelto esencial. Estos materiales, diseñados para absorber o disminuir la radiación, salvaguardan tanto a las personas como a su entorno, lo que ha motivado una amplia investigación científica. Entre los materiales más comunes se encuentran el concreto, ladrillo, metales, polímeros, caucho natural, fibras y vidrios enriquecidos con boro[1]. Agregados como la barita, ferrofósforo, magnetita y acero[2] son añadidos a este tipo de elementos, pero por cuestiones de la geología de la región no se encuentran disponibles para este proyecto, se utilizarán materiales de la región y se tomarán en cuenta las buenas prácticas constructivas dadas por el Instituto Americano del Concreto y el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

Este es el caso de la reciente actualización del Instituto de Cancerología, ubicado en el Hospital General de Culiacán, supervisada por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS). El proyecto contempla la incorporación de un nuevo acelerador lineal para tratamientos de radioterapia, el cual, por sus especificaciones técnicas y potencia operativa, requiere condiciones de blindaje más estrictas que las previstas originalmente en el búnker existente.

De acuerdo con el dictamen emitido por físicos especialistas, el escudo de concreto debía incrementar su espesor en al menos 15 centímetros, utilizando concreto hidráulico con una masa unitaria aparente lo más cercana posible a $2,400 \text{ kg/m}^3$, en cumplimiento con la norma NMX-C-162-ONNCCE-2014[3], emitida por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación para la Construcción y la Edificación.

Por la complejidad técnica del procedimiento de colocación y el margen reducido de tolerancia en la

masa unitaria, la Secretaría de Obras Públicas del Gobierno del Estado de Sinaloa, a través de su división de infraestructura para salud, solicitó asesoría técnica especializada. Esta fue proporcionada por el Departamento de Laboratorios de la Facultad de Ingeniería Culiacán de la Universidad Autónoma de Sinaloa, el cual respondió con total compromiso académico, rigor técnico y apego a las buenas prácticas de la construcción.

Este ejemplo ilustra cómo la ingeniería civil, cuando se conjuga con la investigación aplicada y el servicio institucional, trasciende lo estructural para convertirse en una herramienta al servicio de salud pública y la protección radiológica.

2. DESARROLLO TÉCNICO: CONCRETO COMO BLINDAJE DE PRECISIÓN

En el diseño y construcción de escudos antirradiación, el concreto actúa como una barrera física cuya eficacia depende de su capacidad para atenuar radiaciones ionizantes[4], principalmente rayos X y rayos gamma. Esta capacidad está directamente relacionada con su masa volumétrica: a mayor densidad, mayor capacidad de absorción.

Para cumplir con los requisitos de seguridad nuclear, el concreto utilizado debe ser evaluado no solo en cuanto a su resistencia mecánica, sino también en cuanto a su masa unitaria aparente en estado endurecido. En este caso, se establece como referencia un valor objetivo de $2,400 \text{ kg/m}^3$, valor que representa una media óptima entre manejabilidad en obra y capacidad de atenuación.

La idea original de producción fue elaborar mezclas de concreto de aproximadamente 80 litros por vez. Mediante la revisión de las características de los agregados, se empleó el concepto de empaquetamiento para identificar la relación grava-arena que produjera el concreto con la mayor masa unitaria posible. Con ayuda de básculas, moldes cilíndricos y herramientas menores, se realizaron pruebas in situ y se preparó una mezcla de prueba utilizando aditivos excluidores de aire[5], logrando una masa volumétrica de $2,230 \text{ kg/m}^3$.

Este valor relativamente bajo se atribuyó a que la grava disponible presentaba una distribución granulométrica deficiente, con un tamaño máximo cercano a $3/8''$, lo que afecta negativamente el empaquetamiento y eleva el contenido de aire incluido durante el amasado. Según la literatura clásica de tecnología del

concreto y los manuales de diseño y dosificación ACI 211.1[6] para mezclas normales, ligeras y pesadas, a menor tamaño máximo del agregado, mayor es el contenido de aire, y con ello, menor la masa unitaria.

En función de estas limitaciones, se preparó una nueva mezcla considerando la resistencia a la compresión requerida ($f'c$) de 300 kgf/cm², utilizando un cemento Portland tipo CPC 30R, conforme al estándar mexicano NMX-C-414-ONNCCE [1], vigente. Este

cemento es característico por alcanzar los 30 MPa de resistencia a la edad especificada y es comúnmente empleado en elementos estructurales como castillos, columnas, traveses y losas.

La masa unitaria obtenida en la mezcla optimizada fue de 2,260 kg/m³ como se aprecia en la Figura 1. Sin embargo, al realizar el transporte del concreto mediante carretilla hasta el punto de colocación y al observar la cantidad total necesaria, se identificaron riesgos de



Figura 1. Mezcla de concreto Industrial, Masa volumétrica de 2360kg/m³

segregación, pérdida de homogeneidad y aireación adicional. Ante esta situación, y en apego a las buenas prácticas de construcción sugeridas por el Instituto Americano del Concreto (ACI), se efectuaron ajustes logísticos: se mejoraron los procedimientos de colocación, vibrado y curado, siguiendo los lineamientos del Manual del Supervisor para Estructuras de Concreto del ACI. Estas acciones permitieron asegurar no solo la calidad estructural del concreto colocado, sino también la efectividad del blindaje radiológico requerido por las autoridades especializadas.

En la Figura 2 se muestra el proceso de diseño y elaboración de concreto con materiales en obra de la manera proyectada por el contratista, queda evidencia de que dichos materiales no eran los adecuados para lograr la masa unitaria objetivo y el efecto de colocar concreto en muchas mezclas individuales pequeñas genera incertidumbre en cuanto a la continuidad y formación de juntas frías, grietas o fisuras. Con esto, se replanteo el proceso constructivo en función de las estrictas especificaciones solicitadas y bajo la responsabilidad de proteger la inversión de la sociedad sinaloense y la seguridad de los especialistas del área de la salud que harán empleo de las instalaciones.



Figura 2. Mezcla preliminar de prueba in situ

3. ADAPTACIÓN INDUSTRIAL DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

A partir de la experiencia en campo y las restricciones de calidad impuestas, se decidió escalar el proceso de mezclado a nivel industrial. Se optó por una planta dosificadora automatizada ubicada estratégicamente cerca del sitio de obra para minimizar tiempos de traslado y riesgo de pérdida de trabajabilidad. Se presentó la solicitud a la empresa 2H Concretos con la indicación que el concreto especial debería tener una resistencia a compresión antes señalada, la masa volumétrica aparente lo más cercana a 2400 kg/m^3 y esta mezcla debería ser bombeable. Si bien el método de Diseño de mezclas del ACI 211.1[6] afirma que fácilmente un concreto con un tamaño máximo de agregado de $1 \frac{1}{2}$ pulgadas podría dar esa masa unitaria ese tamaño no es apropiado para bombearse, ya que las máquinas de bombeo están diseñadas para un tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ pulgadas, bajo ese tenor se decide que el Tamaño máximo del agregado será para este proyecto de 19 mm o $\frac{3}{4}$ de pulgada.

Se solicito a las partes interesadas a una reunión en obra para especificar el procedimiento de bombeo,



Figura 3. Revenimiento 18.5 cm, según NMX-C-156-ONNCCE[8]

revisión de apuntalamiento de cimbras y métodos de colocación, vibrado y curado.

En cumplimiento con las recomendaciones establecidas por el American Concrete Institute (ACI), específicamente las contenidas en el Manual del Supervisor de Concreto[7], se ha controlado cuidadosamente la altura de caída del concreto durante el proceso de colocación, asegurando que no exceda los 1.20 metros. Esta medida tiene como objetivo prevenir la segregación de los componentes del concreto y garantizar una distribución uniforme del mismo dentro del encofrado.

Se implementó una logística de mezclas por lote con control digital de humedad y calidad granulométrica de los agregados permitiendo uniformidad en la producción y cumplimiento sistemático de la masa volumétrica objetivo. Cada lote fue verificado con pruebas de asentamiento, temperatura y masa unitaria antes de su traslado en camiones revolvedores. El concreto fue muestreado in situ por parte del Departamento de Laboratorios de la Facultad de Ingeniería Culiacán.



Figura 4. Determinación de temperatura en concreto fresco[9]

El concreto era vertido directamente en el elemento utilizando tubería rígida y flexible, utilizando vibrado mecánico simultáneo para garantizar la compactación óptima del material dentro del molde para facilitar la integración de la capa nueva, se utiliza anclas de varillas de #4, con gancho a 90° para generar unión mecánica e incorporar mecánicamente al muro preexistente. En la Figura 5 es el enlace al video del momento de la colocación del concreto y podrá observarse lo anteriormente descrito.

Este ajuste industrial no solo mejoró la eficiencia constructiva, sino que también permitió documentar el desempeño real del concreto en condiciones controladas, brindando evidencia científica y técnica para futuros proyectos de protección radiológica en instalaciones hospitalarias del país.

Las buenas prácticas del concreto recomiendan descimbrar luego de 24 horas, antes de realizar un descimbrado total se realizó mediante un penetrómetro de bolsillo marca Controls la determinación de la resistencia del concreto y fácilmente supero los 500



Figura 5. Proceso de Colocación y Vibrado.

psi, por ello con seguridad se inicia el descimbrado y curado inmediato (Fig. 2).

El proceso de colocación fue mejorado al sugerir colocar malla electrosoldada 6-6-10/10 como refuerzo por temperatura ya que el volumen de concreto colocado era tal que el calor producido por la hidratación del cemento era sensible a los sentidos. Al observar el calor producido se revisó la masa unitaria de testigo que se encontraba curado y su resistencia a compresión ya que surgió la hipótesis de que contenía una cantidad elevada de cementante y que fácilmente el concreto superaría la resistencia solicitada y su masa unitaria aparente subiría.

El proceso constructivo se muestra en la Figura 7, obsérvese que para lograr una adecuada colocación y vibrado los espesores se limitaron a la caída máxima permitida del concreto antes de generar segregación que es 1.20 m [10]

4. REVISIÓN DE RESULTADOS: RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y MASA UNITARIA APARENTE

Para validar la calidad del concreto colocado, se realizaron ensayos de resistencia a compresión y determinación de masa unitaria aparente conforme a los procedimientos establecidos por las norma NMX-C-083-ONNCCE[11] y bajo la definición de masa volumétrica aparente; masa entre volumen aparente.

Se muestrearon cilíndricos de 7.5 x 15 cm de elementos representativos del blindaje, y se sometieron a pruebas de compresión a 7 días, obteniendo valores promedio que superaron ligeramente los 300 kgf/cm² y luego de solicitar las resistencias de compresión a la planta se verificó que las resistencias a compresión sobrepasaron los 400 kgf/cm².

Autores como Neville [12] en sus obras han expresado que a mayor cantidad de cemento mayor can-



Figura 6. Verificado de fraguado in situ.



Figura 7. Muro interior cara Oeste en proceso de cimbrado

tividad de calor exotérmico debido a la hidratación de los productos hidratados del cemento, por ello la observación de calor de los elementos y la solicitud de refuerzo por temperatura fue una práctica adecuada que mínimo cualquier potencia grieta por contracción plástica.

Simultáneamente, se determinaron las masas unitarias aparentes de los testigos, logrando valores que oscilaron entre los 2,370 y 2,385 kg/m³. Estos resultados fueron validados mediante pruebas paralelas en laboratorio con mezclas patrón, confirmando que la densidad alcanzada cumple con los requisitos establecidos por el dictamen técnico de blindaje radiológico, se obtuvieron las masas unitarias aparentes en su estado saturado superficialmente seco ya que esa área estará en una humedad relativa de operación mayor al 90%.



Figura 8. Evidencia de determinación de masa unitaria de testigos en laboratorio.

Conforme a la normativa se determinó la resistencia a compresión a 7 días del testigo del primer lote, en la Figura 9 se aprecia una falla tipo 1 o reloj de área siendo evidencia de una prueba aceptable.

Esta validación integral aseguró no solo la resistencia mecánica mínima del concreto, sino la conformidad como escudo frente a radiación ionizante, según solicitado por la Comisión Nacional Nuclear y Salvaguarda permitiendo bajo la emisión del informe técnico favorable la autorización para la puesta en marcha del acelerador lineal del Instituto de Cancerología de Culiacán.

En las Figuras 10 y 11, se aprecia el acabado y apariencia final de los muros escudo no se presentó segregación, fisura ni imperfección perceptiva a la vista humana.



Figura 9. Evidencia de resistencia a la compresión a 7 D de lote 1[11]

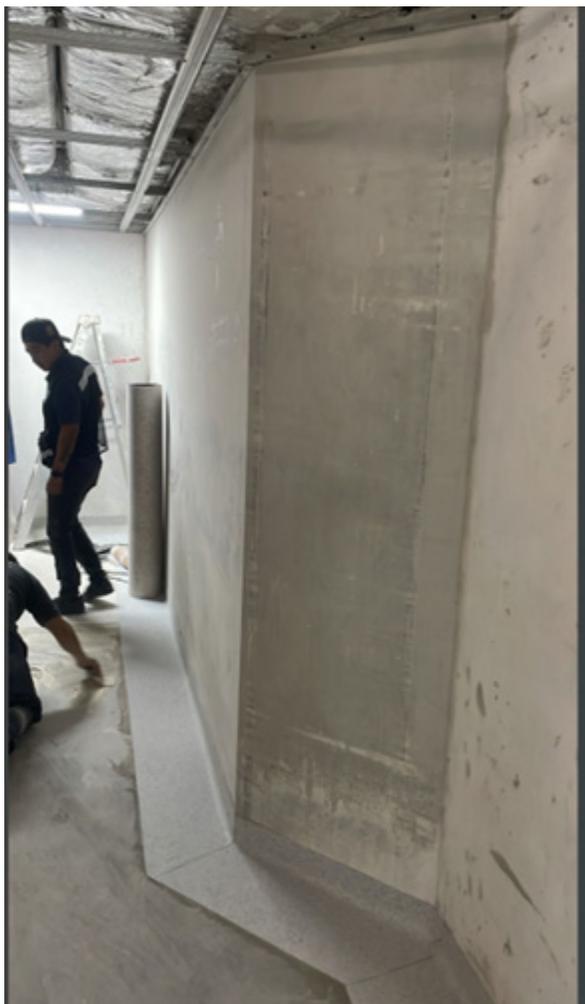


Figura 10. Muro de escudo antirradiación interior terminado



Figura 11. Muro exterior con preparación para pintura

5. CONCLUSIONES

Este proyecto representa una experiencia exitosa en la aplicación de las buenas prácticas internacionales de construcción, en combinación

con un control estricto y constante en todo el proceso de colocación, vibrado y retiro de cimbras. La experiencia acumulada en este trabajo refuerza el papel del ingeniero civil como un actor clave en la toma de decisiones críticas que impactan tanto la calidad estructural como la seguridad funcional de una obra especializada.

Desde la elaboración de mezclas de prueba hasta la colocación final, cada etapa requirió observación cuidadosa, evaluación técnica y capacidad de respuesta. Se tomaron decisiones técnicas como la inclusión de refuerzo por temperatura, la realización de juntas frías controladas, el ajuste logístico de vaciado, y la coordinación de reuniones previas con todas las partes involucradas. El trabajo en equipo, el liderazgo técnico y la visión multidisciplinaria permitieron cumplir con los estándares de seguridad radiológica exigidos y asegurar que el concreto utilizado fuese verdadera-

mente un blindaje eficaz. Este caso de estudio es la evidencia que es posible generar escudos antirradiación efectivos sin la necesidad de utilizar agregados de alta densidad como la barita, basalto, granito entre otras.

Este caso demuestra que la ingeniería civil no es solo diseño y cálculo, sino también una disciplina que exige sensibilidad social, compromiso con la calidad, y una actitud proactiva ante los desafíos constructivos más exigentes. Se exhorta a seguir generando investigación sobre los procedimientos constructivos que permitan elaborar estos elementos de concreto reforzado con materiales depositados de la región.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece profundamente al equipo del Departamento de Laboratorios de la Facultad de Ingeniería Culiacán de la Universidad Autónoma de Sinaloa, por su invaluable apoyo técnico y compromiso en la supervisión y aseguramiento de la calidad del concreto durante.

Asimismo, se reconoce al Ing. Sebastián Corrales Inzunza, por su liderazgo y supervisión directa en campo, velando por el cumplimiento riguroso de cada fase constructiva. Al Gobierno del Estado de Sinaloa por depositar su confianza y permitir buscar la excelencia en este proceso constructivo tan especial.

Por parte de la empresa Concretos 2H, se expresa un especial agradecimiento al Ing. Jorge González Bojórquez, al Ing. Amado Quiñónez, encargado de calidad, y al Ing. Erick Candelario, representante de la empresa, por su entrega, colaboración y compromiso con alcanzar la máxima calidad en este proyecto de alto impacto para la salud pública.

“Per aspera ad Astra”

REFERENCIAS

[1] A. A. Mahmoud et al., “Investigating the effects of granite, marble, granodiorite, and ceramic waste powders on the physical, mechanical, and radiation shielding performance of sustainable concrete,”

Ann Nucl Energy, vol. 216, p. 111274, Jun. 2025, doi: 10.1016/J.ANUCENE.2025.111274.

[2] H. Ramírez Yusti, “Aplicación del concreto en blindaje contra radiación,” Rev. Fuerzas Armadas, vol. no. 19, 1963.

[3] ONNCCE, “NMX-C-162-ONNCCE-2014-Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación de la Masa Unitaria, Cálculo del Rendimiento y Contenido de Aire del Concreto Fresco por el Método Gravimétrico,” 2014.

[4] J. O. Páez López, W. Rodríguez, and D. Cano, “Estudio de la atenuación en concreto para un haz de un acelerador a 6 MV,” Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, no. 6, Aug. 2022, doi: 10.32685/2590-7468/invapnuclear.6.2022.660.

[5] ONNCCE, “NMX-C-255-ONNCCE-2013 Industria de la Construcción - Aditivos Químicos para Concreto - Especificaciones y Métodos de Ensayo,” 2013.

[6] ACI, “ACI PRC-211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete,” 2009.

[7] ACI, “Manual para supervisar obras de concreto: ACI 311-07,” 2009.

[8] ONNCCE, “NMX-C-156-ONNCCE-2010 Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco,” 2010.

[9] ONNCCE, “NMX-C-435-ONNCCE-2010 Industria de la Construcción - Concreto hidráulico - Determinación de la temperatura del concreto fresco.”

[10] ACI, “ACI 318S-14: Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural e ACI 318RS-14 Comentario de Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural,” 2009.

[11] ONNCCE, “NMX-C-083-ONNCCE-2014 Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes - Método de Ensayo,” 2014.

[12] A. Neville, Tecnología del concreto, Cuarta edición. Cd de México: IMCYC, 2013.