

# “Evaluación sísmica del concreto de alta resistencia para la optimización preliminar del acero de refuerzo en edificaciones de pórticos regulares según NBDS2023”

Cuéllar, M.<sup>a</sup>, Rojas, M.<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Docente e Investigador en el área de estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: cuellar.mirko@usfx.bo

<sup>b</sup> Estudiante de Maestría, Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Centro de Estudios de Posgrado e Investigación, Sucre, Bolivia. E-mail: marianarojasmon@gmail.com

Recibido: 06/10/2024

Aceptado: 12/10/2024

Publicado: 10/11/2024

## RESUMEN

Este estudio preliminar sobre la optimización del acero de refuerzo en estructuras de concreto de alta resistencia (CAR) revela una significativa reducción en el área de acero necesario al incrementar la resistencia del concreto. Las ventajas del CAR incluyen la disminución de la sección de columnas, mejorando la funcionalidad arquitectónica y aumentando la durabilidad debido a su menor porosidad. La comparación técnica entre los modelos con concreto convencional y concreto de alta resistencia establecido por la norma del hormigón boliviano, muestra que la optimización del acero depende en gran medida de la configuración estructural y debe cumplir con los requisitos normativos. En Bolivia, donde el precio del acero ha aumentado un 50% en los últimos seis meses, el uso de CAR, junto con el cemento IP40 cuyo costo se ha mantenido estable, ofrece una solución viable. Los resultados indican una reducción del 30% en la cuantía de acero en columnas, manteniendo prestaciones similares en términos de durabilidad, ductilidad y rigidez, cumpliendo con la normativa sísmica NBDS2023. Este trabajo propone nuevas líneas de investigación para explorar las aplicaciones del concreto en la construcción civil y reducir la dependencia de materiales con precios variables.

**Palabras clave:** alta resistencia, optimización de acero, concreto estructural, diseño sísmico.

## ABSTRACT

This preliminary study on the optimization of reinforcement steel in high-strength concrete (HSC) structures reveals a significant reduction in the required steel area by increasing the concrete's strength. The advantages of HSC include the reduction of column sections, thereby improving architectural functionality and increasing durability due to its lower porosity. The technical comparison between models with conventional concrete and high-strength concrete, as established by the Bolivian concrete standard, shows that steel optimization largely depends on the structural configuration and must comply with regulatory requirements. In Bolivia, where the price of steel has increased by 50% in the last six months, the use of HSC, along with IP40 cement whose cost has remained stable, offers a viable solution. The results indicate a 30% reduction in the steel quantity in columns, maintaining similar performance in terms of durability, ductility, and stiffness, in compliance with the NBDS2023 seismic standard. This work proposes new lines of research to explore the applications of concrete in civil construction and reduce dependence on materials with variable prices.

**Key words:** high strength, steel optimization, structural concrete, seismic design.

## INTRODUCCIÓN

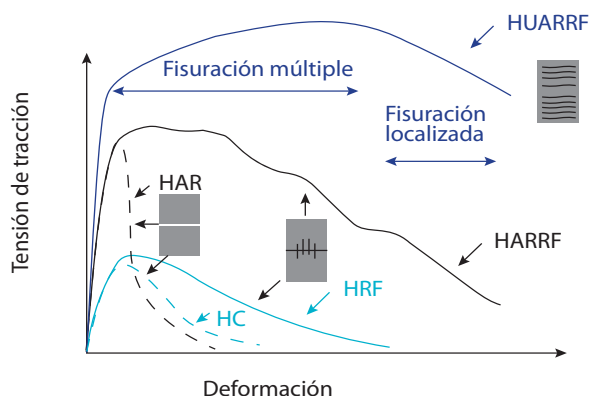
En los últimos meses en Bolivia, el sector de la construcción ha enfrentado un desafío significativo debido al aumento abrupto de los precios de los materiales de construcción, particularmente el acero de refuerzo, cuyo costo ha incrementado en más del 50% (c. Este fenómeno ha generado una búsqueda urgente de alternativas que permitan optimizar el uso de estos materiales sin comprometer la calidad y seguridad de las estructuras. En este contexto, el uso de concretos de alta resistencia (CAR) se presenta como una opción viable y eficiente. A diferencia del acero, el precio del cemento en Bolivia no ha experimentado cambios significativos, lo que posiciona al CAR como una solución económica y técnica para la construcción de diversas obras civiles, en comparación al concreto convencional (CC).

Existen diferentes tipos de cemento, pero en el contexto local se usan cementos IP30 e IP40 para llegar a resistencias desde los 20 a 40 Mpa, por lo que las normativas sísmicas refieren concretos con resistencias mayores a 21Mpa (Grandi, 2024). Estas resistencias son de acuerdo con la dosificación del concreto y los materiales empleados, pero también depende del tipo de cemento usado para su elaboración y pueda llegar a tener mejores prestaciones para el diseño y construcción de las edificaciones en nuestro medio.

Las edificaciones principalmente se construyen de concreto armado, siendo el más usado y empleado para la construcción formal e informal en las diferentes ciudades de Bolivia. Comúnmente estas edificaciones se construyen en base a pórticos y se trabaja con cuantías iguales o menores a las mínimas, donde el acero de refuerzo juega un papel fundamental para buscar una correcta ductilidad en los elementos y estos puedan tener un mejor comportamiento sísmico.

Según (Zerbino, 2016), cuando se elaboran hormigones con muy elevada resistencia a compresión (alta y ultra alta resistencia), la resistencia a tracción también crece, pero en menor medida. Por lo que se debe tomar en cuenta ya que tener excedentes de tracción implica mayor fragilidad en el elemento, por lo que se debe revisar exhaustivamente el diseño de los aceros de refuerzo.

**Figura 1.1:** Gráfica Esfuerzo de tracción y Deformación del concreto sometido a tracción, para diferentes tipos de concretos. Concreto Convencional (HC), Concreto de alta resistencia (HAR), Concreto de ultra alta resistencia con fibras de carbono (HUARRF)



En la figura 1.1 se puede observar que los concretos en masa sin refuerzo o fibras especiales tienen menor deformación, es por eso que las normativas nos indican que el esfuerzo a tracción del concreto es el 10% de su resistencia a compresión. Por lo que para tener una mejor ductilidad es muy importante plantear de manera correcta los aceros de refuerzo, longitudinal y transversalmente en los elementos estructurales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El caso de estudio está especificado en base a parámetros de la Norma Boliviana del Cemento NB-644, quien indica las siguientes características que se incluirán en los modelos numéricos computacionales para las evaluaciones estructurales.

Categorías Resistentes Min. a 3 días		Resistencias a la compresión (MPa) – NB470 (1)		
		Min. a 7 días	Min. a 28 días	
Alta	40	17	25	40
Media	30	---	17	30
Convencional	21	---	13	21

**Tabla 1.1:** Relación de resistencias de concretos según el tipo de cemento (NB-644, 1995).

Para el análisis sísmico estructural se tomará en cuenta dos tipos de concretos anteriormente descritos, el concreto convencional (CC) con una resistencia de 21Mpa y un concreto de alta resistencia de 40Mpa, el módulo de elasticidad estará definido por la siguiente ecuación de la NBDS2023:

$$E_c = 3830 * \sqrt{f'_c} \text{ (Mpa)} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

## Análisis Sísmico Modal de Respuesta Espectral

Para realizar el análisis modal, es necesario tomar en cuenta la configuración inicial de los modelos, los cambios respectivos serán respecto a su inercia (Sección geométrica), su peso (masa sísmica) y su resistencia (Concreto CC y CAR), las características y parámetros sísmicos para la obtención del espectro de diseño serán tomados de manera igual para realizar la comparación

de las derivas y que estas estén dentro de la NBDS2023. Por lo que se deberá realizar el análisis de derivas de entrepiso con la siguiente ecuación:

$$\gamma = \Delta / H \quad (\text{Ec. 1.2})$$

El valor  $\gamma$  es llamado distorsión de entrepiso o deriva, y es el más empleado en cuantificar la respuesta de edificios, comparar el comportamiento entre diferentes sistemas, y para estimar el grado de daño que puede representarse tanto en la estructura como en los componentes no estructurales. El desplazamiento máximo de la estructura  $\Delta$  medido a nivel del techo se utiliza como medida global de la respuesta del sistema.

### Diseño preliminar de columnas de hormigón armado

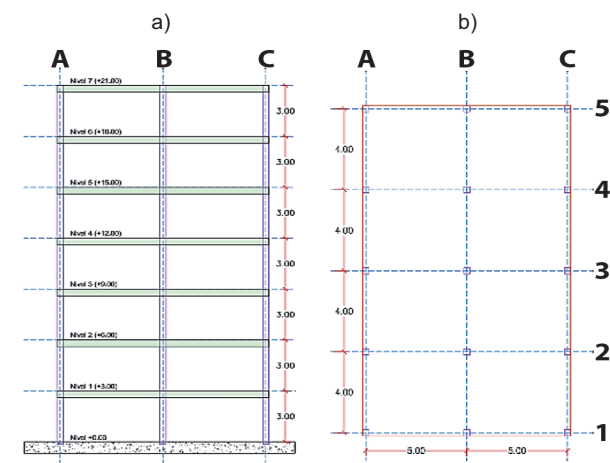
Para el análisis comparativo, se tomará en cuenta principalmente los elementos de soporte para este estudio, el cual comprende en un análisis y verificación de cuantías mínimas para la optimización de aceros de refuerzo en las secciones que lleguen a cumplir lo solicitado para el análisis sísmico y diseño sismorresistente de los elementos según la NBDS2023.

### MODELO DE ESTUDIO:

Se tomó en cuenta un modelo regular con simetría en ambas direcciones, además se debe tomar en cuenta que la estructura será analizada directamente para cumplir las solicitaciones estáticas y dinámicas asignadas, con un sistema estructural de Pórticos Intermedios de Concreto Armado.

### Modelo Tipo para ambos tipos de concreto

En los modelos para el análisis y verificación de la fiabilidad de los resultados se trabajó en base modelos numéricos que aplican el método de los elementos finitos, del cual se introdujeron los materiales, secciones y parámetros de análisis sísmico.



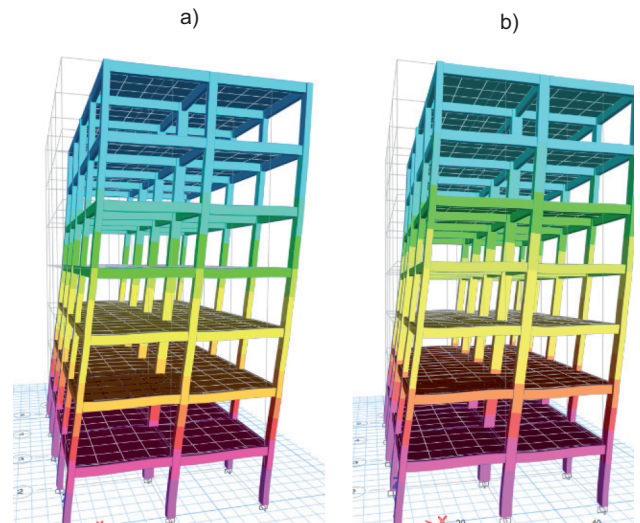
**Figura 1.2:** Configuración estructural inicial. a) Planimetría y ubicación de las columnas. b) Plano frontal para verificación de alturas de entrepiso.

En la figura 1.2, se puede observar los datos iniciales geométricos de la estructura a analizar, el cual tendremos un sistema de entrepiso de losa nervada reticular de 30 cm de espesor, y un sistema resistente a base a pórticos de columnas y vigas.

En la parte sísmica, los modelos tienen aceleración de la amenaza sísmica de 0.20g, según la NBDS2023. De igual manera se manejan parámetros de tipo de suelo, categoría de la edificación y reducción según el sistema estructural de iguales parámetros para ambos modelos estructurales.

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Realizados los análisis sísmicos se realizaron las siguientes comparaciones en los modelos de concreto convencional (MOD-CC) y el de concreto de alta resistencia (MOD-CAR), como se puede observar en la figura 1.3, los periodos de ambas estructuras tienen una mínima diferencia, el MOD-CC, tiene un periodo de vibración de 1.05 segundos, por lo que el MOD-CAR, tiene un periodo de vibración de 0.96 seg.



**Figura 1.3:** Periodos de vibración con las formas de traslación. a) Primer periodo de vibración MOD-CC de 1.05 seg. b) Primer periodo de vibración MOD-CAR de 0.96 seg.

Realizado la revisión de derivas, se obtuvieron los resultados para ambos modelos, los cuales fueron obtenidos variando solo las secciones de columnas, por una parte, para el modelo MOD-CC, se tienen columnas de 30x50 en el perímetro y 40x60 como columnas centrales, entre tanto el modelo MOD CAR, se optimizaron las secciones de las columnas que son de 30x35 en el perímetro y de 35x50 como columnas centrales. Estos datos se iteraron para obtener derivas cercanas al límite indicado en la norma boliviana de diseño sísmico NBDS2023, que establece un valor límite de 0.011, para sistemas de pórticos intermedios.

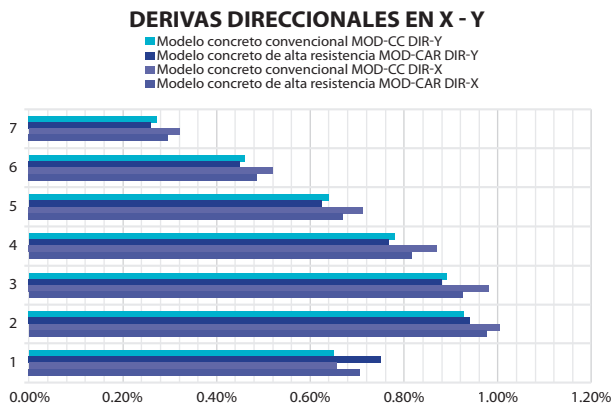
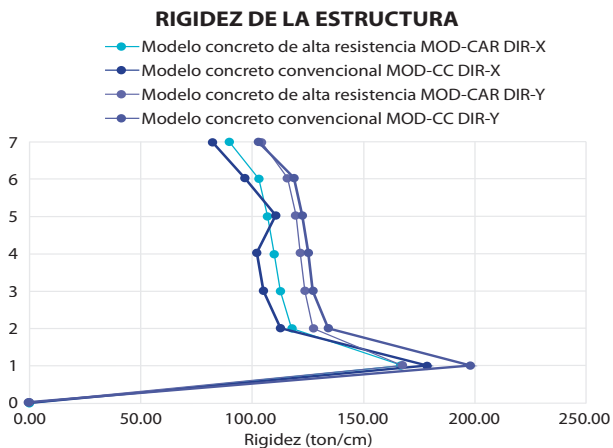


Figura 1.4: Derivas de los modelos MOD-CC y MOD-CAR.

Se puede observar en la figura 1.4, que todas las derivas están por debajo del límite 0.011 (1.1%). Entre tanto todas cumplen lo indicado en la norma NBDS2023.



La masa total de la estructura, el modelo MOD-CAR, tiene un peso total de 11191.08 KN, y el modelo MOD-CC su valor es de 11527.50 KN, por lo tanto, se tiene una diferencia del 3% de peso entre ambos modelos, lo que indica que existe una reducción del peso estructural solo por la disminución de columnas, sin perder rigidez global.

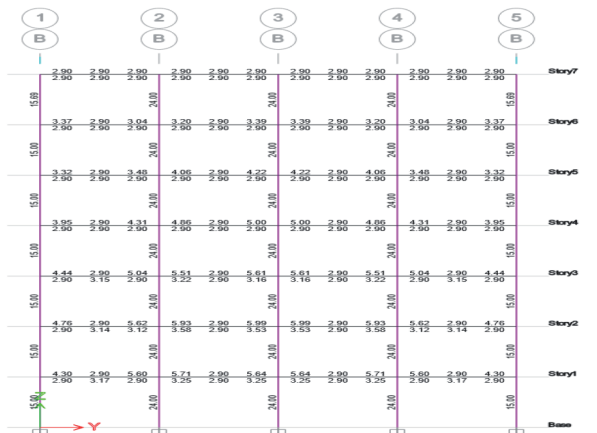


Figura 1.5: Rigidez Global de la estructura de los modelos MOD-CC y MOD-CAR.

Se tienen valores similares en cuanto a la rigidez global valores máximos que se tiene de ambas estructuras de las dos direcciones aplicando el sismo según la NBDS2023, como se muestra los valores máximos en la figura 1.5.

Para el diseño estructural de columnas y obtener cuantías por  $cm^2$ , se tomó en cuenta las combinaciones máximas indicadas en la norma ACI318-14 incluyendo cargas muertas (D), carga viva (L) y carga de sismo (S).

Para el modelo MOD-CC, se tienen cuantías mínimas del 1% en las secciones de columnas que serán nuestra referencia para obtener el porcentaje de optimización del acero entre ambos modelos, en la figura 1.6, se muestra cuantías de las columnas perimetrales de  $15cm^2$  y  $24cm^2$  para las columnas centrales.

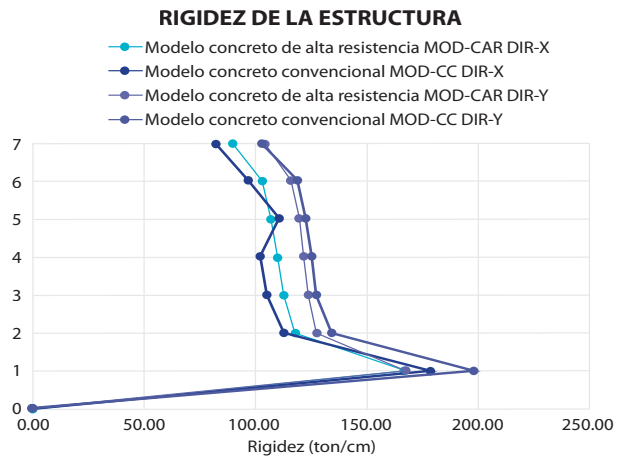


Figura 1.6: Cuantías en las columnas y vigas del Modelo MOD-CC (Concreto Convencional H21 Mpa.)

Entre tanto para el modelo MOD-CAR, las cuantías tienen una disminución debido a que las secciones de las columnas son de menor sección, se puede observar en la figura 1.6, que las cuantías están con  $10.50 cm^2$  para columnas perimetrales y  $17.50 cm^2$  para las columnas centrales, por la tanto existe una disminución, esto se puede observar en la figura 1.7.

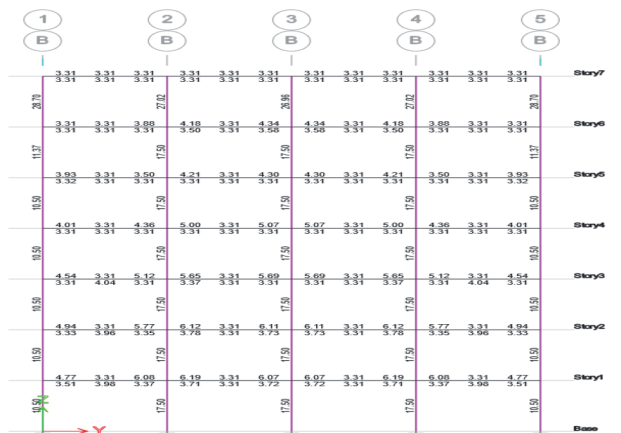


Figura 1.7: Cuantías en las columnas y vigas del Modelo MOD-CAR (Concreto Alta Resistencia H40 Mpa.)



Al hacer estas comparaciones entre ambos modelos se puede observar que tener estructuras con concretos de alta resistencia, la sección disminuye entre 10 a 15cm en un lado. Por lo tanto la cuantía de acero de los elementos disminuye en un 30 % aproximadamente, así como se puede observar en la tabla 1.2.

Cuantías (cm2)				
	Mod-CC	Mod-CAR	Diferencia	Porcentaje
<b>C-Perimetral</b>	15.00	10.50	4.50	30%
<b>C-Central</b>	24.00	17.50	6.50	27%

**Tabla 1.2:** Relación de cuantías para los modelos MOD-CC y MOD-CAR.

### CONCLUSIONES

Es necesario indicar que este análisis preliminar de optimización de aceros por cuantía debe complementarse con un trabajo de detallamiento sísmico y complementación de que elementos más se puede optimizar en cuanto a sección y áreas de acero. Pero este trabajo de investigación nos muestra que existe una tendencia de disminuye considerablemente el área de acero que requiere un elemento de soporte al aumentar la resistencia del concreto.

Las ventajas de usar concretos de alta resistencias (CAR) son muchos, entre ellos, disminuye la sección de las columnas por lo tanto la funcionalidad arquitectónica tiende a mejorar por si tiene más espacio libre en los ambientes, la durabilidad también es mayor debido a que estos concretos tienen menor porosidad, lo que hace que evite el ingreso de agentes corrosivos.

Realizando la comparación técnica de los Modelos MOD-CC y MOD-CAR, se concluye que el éxito de la optimización de cuantías de acero por área de sección de columnas bruta, dependerá mucho de la configuración estructural, que deberá iterarse hasta llegar a cumplir con los requisitos establecidos por la normativa y trabajar con cuantías mínimas de acero de refuerzo, esto debido a que en Bolivia, el acero de construcción que en la mayoría es importado de otros países, tuvo un ascenso de precios de un 50%, esto hace se busque soluciones como la propuesta en este trabajo de investigación donde se puede aprovechar el cemento IP40 que su costo se mantiene a pesar de la subida de otros materiales de construcción.

Por lo tanto la cuantía de acero bajo un 30% en las columnas, respecto al modelo MOD-CC, teniendo similares derivas y rigideces globales, y además buscando siempre el cumplimiento de la normativa sísmica NBDS2023, llegando a disminuir las columnas de 40x60 del MOD-CC, a secciones de 35x50 del MOD-CAR, esto establece una tendencia a tener iguales prestaciones en términos de durabilidad, ductilidad y rigidez, solo aumentado la resistencia del concreto.

El presente trabajo tiene como objetivo establecer líneas de investigación basadas en los problemas actuales de la sociedad boliviana. Dado que el concreto es un material relativamente económico, se propone realizar más estudios sobre sus diversas aplicaciones en obras civiles. Además, se busca explorar cómo el uso del concreto puede reducir la dependencia de otros materiales que frecuentemente experimentan fluctuaciones en sus precios.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Concrete Institute. (2014). ACI 318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- Estrada Córdoba, R. E., & Párraga Otálora, R. A. (2023). Evaluación sísmica de edificaciones existentes de concreto reforzado con base en el ASCE 41-17 Universidad de Antioquía, Medellín, Colombia.
- Hu, R.; Fang, Z.; Shi, C.; Benmokrane, B. and Su, J. (2020). "A review on seismic behavior of ultra-high performance concrete members", *Advances in Structural Engineering*, pp. 1-16.
- Instituto Boliviano de Normalización y Calidad. (2017). NB 011: Cementos. Definiciones, clasificación y especificaciones. La Paz, Bolivia: IBNORCA.
- Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda. (2023). Norma Boliviana de Diseño Sísmico (NBDS2023). La Paz, Bolivia: Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda.
- Young S. Cho (2003), "Non-destructive testing of high strength concrete using spectral analysis of surface waves", *Journal NDT&E International*, Vol. 36, pp. 229-235.
- Zerbino, R.; Giaccio, G.; Celeste and Torrijos M.A. (2016), "Hormigones de ultra alta resistencia reforzados con fibras", VII Congreso Interacional – 21ª Reunión técnica de la AATH.
- Zohrevand P and Mirmiran A (2013a) "Effect of column parameters on cyclic behavior of ultra-high-performance concrete-filled fiber-reinforced polymer tubes". *ACI Structural Journal* 110(5): 823–832.