

Diseño y evaluación de un muro prefabricado aligerado con refuerzo tridimensional Design and evaluation of a pre-casted lightened wall with a three-dimensional reinforcement

A. Jiménez-Montoya ^a, A. Ponce-Romero ^a, J. B. Pascual-Francisco ^{b,*}, J. Hernández-Pérez ^b, Y. Pérez-Jiménez ^a,
M. R. Mejía-Cuero ^a

^a Tecnológico Nacional de México, TES-San Felipe del Progreso, División de Ingeniería Civil, Avenida Instituto Tecnológico S/N, Ejido, Tecnológico, 50640, San Felipe del Progreso, Estado de México, México.

^b Universidad Politécnica de Pachuca, Departamento de Mecatrónica, Carretera Pachuca-Cd. Sahagún Km. 20, Ex-Hacienda de Santa Bárbara, C. P. 43830, Zempoala, Hidalgo, México

Resumen

Este estudio presenta el diseño de un muro aligerado prefabricado utilizando herramientas derivadas de la metodología de Despliegue de la Función de Calidad (QFD, por sus siglas en inglés). Los requisitos de diseño se determinaron mediante encuestas, las cuales fueron transformadas en especificaciones de ingeniería medibles. A través de una evaluación comparativa con muros existentes en el mercado, se depuraron los objetivos de diseño y se generó el concepto final mediante la aplicación de una matriz morfológica. El prototipo resultante es un panel de concreto con incorporación de poliestireno, uniones tipo macho-hembra y refuerzo metálico tridimensional. Se evaluaron su resistencia a la compresión y flexión, obteniendo resultados que indican que el prototipo cumple y supera los requisitos de resistencia dictados por la normativa vigente, siendo apto para su utilización como elemento de construcción.

Palabras Clave: QFD, muro aligerado, concreto reforzado, resistencia a la flexión, resistencia a la compresión.

Abstract

This study presents the design of a pre-casted lightweight wall using tools derived from the Quality Function Deployment (QFD) methodology. Design requirements were determined through surveys, which were transformed into measurable engineering specifications. Through a comparative evaluation with existing walls in the market, design objectives were refined, and the final concept was generated using a morphological matrix. The resulting prototype is a concrete panel incorporating polystyrene, tongue-and-groove joints, and three-dimensional metal reinforcement. Its compressive and flexural strength were evaluated, yielding results indicating that the prototype meets and exceeds the strength requirements set by current regulations, making it suitable for use as a construction element.

Keywords: QFD, lightened wall, reinforced concrete, flexural resistance, compression resistance.

1. Introducción

Los muros reforzados prefabricados son elementos constructivos empleados en ingeniería civil, tanto en aplicaciones estructurales como no estructurales, que cumplen diversas funciones. Entre ellas se destacan la división de espacios habitacionales, el soporte de cargas estructurales, el aislamiento térmico y acústico, y la protección contra incendios. El desarrollo de alternativas en el diseño de muros ha sido un área de constante innovación en la ingeniería civil.

La selección del tipo de muro adecuado depende de múltiples factores, como la función específica que debe cumplir, las características del material base, las dimensiones requeridas, la resistencia mecánica necesaria, el tipo de anclaje y las consideraciones estéticas.

Las técnicas para la construcción de muros varían según el método elegido: construcción in situ o montaje de paneles prefabricados. La selección entre estas opciones depende del propósito y la practicidad deseada, presentando una ambigüedad al intentar optimizar los recursos invertidos en su edificación.

*Autor para la correspondencia: jbpascualf@hotmail.com

Correo electrónico: adanjim28@hotmail.com (Adán Jiménez-Montoya), pora170702@gmail.com (Alejandro Ponce-Romero), juanpascual@upp.edu.mx (Juan Benito Pascual-Francisco), jahdez@upp.edu.mx (Javier Hernández-Pérez), yesenia_perezj@hotmail.com (Yesenia Pérez-Jiménez), mrmc.mejia@gmail.com (María del Rosario Mejía-Cuero).

Historial del manuscrito: recibido el 11/03/2025, última versión-revisada recibida el 09/07/2025, aceptado el 14/07/2025, publicado el 15/09/2025. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial2.14652>



Por ejemplo, los muros prefabricados son relevantes cuando se busca ahorrar tiempo, aunque con un incremento en costos (Fernández-Ordóñez & Fernández Gómez, 2009). Sin embargo, el uso de muros prefabricados elaborados con componentes ligeros como yeso, fibras o aglomerados de celulosa, adquiere gran importancia en la industria de la construcción cuando se desea una construcción rápida y estética. Estos muros se limitan principalmente a funciones divisorias de espacios habitacionales o de trabajo, enfocándose en mejorar sus propiedades termoacústicas, pero relegando a segundo plano la función de carga estructural (Sah et al., 2024; Yuk et al., 2023).

La elección de un panel para construcción puede resultar compleja debido a la amplia variedad de opciones disponibles en el mercado. Las técnicas de selección basadas en el desempeño son diversas, siendo una de las más comunes la evaluación comparativa o benchmarking. Sin embargo, su aplicación en la construcción a menudo omite criterios fundamentales de ingeniería, limitándose frecuentemente a comparaciones de tiempo y costo, sin considerar aspectos técnicos, funcionales y de calidad que son esenciales para garantizar la idoneidad del producto en función de los requerimientos específicos del proyecto (De Abreu et al., 2006).

La metodología de Despliegue de la Función de Calidad (QFD, por sus siglas en inglés) fue desarrollada en Japón por Yoji Akao en la década de 1960, inicialmente para la industria naval de Mitsubishi Heavy Industries (Akao, 2004). Actualmente, QFD se aplica en el diseño de nuevos productos mediante técnicas como la identificación de los requerimientos del cliente, la evaluación comparativa con productos similares en el mercado y la traducción de estos datos en especificaciones técnicas. Este enfoque busca garantizar que el producto final cumpla con las expectativas del consumidor y compita eficazmente en el mercado.

El Despliegue de la Función de Calidad (QFD, por sus siglas en inglés) ha sido aplicado en diversas disciplinas con fines distintos. En el ámbito de la ingeniería, se utiliza comúnmente como herramienta de apoyo para el desarrollo de modelos de negocio (Ju & Sohn, 2015), diseño de productos e integración de procesos (Germani et al., 2012).

No obstante, su aplicación en ingeniería civil ha sido limitada, con algunos antecedentes relacionados con el diseño y optimización de requerimientos en edificaciones, ya sea mediante enfoques de mitigación de problemas apoyados en herramientas computacionales (Singhaputtangkul et al., 2013) o a través de metodologías de modelado integrado de edificaciones (BIM por sus siglas en inglés) (Eleftheriadis et al., 2018).

A pesar de ello, la literatura reporta escasos estudios que apliquen esta metodología específicamente al diseño estructural, el cual continúa realizándose predominantemente mediante enfoques basados en la experiencia o heurísticos. Ejemplos recientes incluyen las propuestas de Franciosi et al. (2024) para diseño de vigas y de Hernández-Pérez et al. (2024) para el diseño de losas con refuerzos tridimensionales.

Esta brecha en la literatura destaca la necesidad de explorar cómo herramientas derivadas del QFD pueden optimizar el diseño de elementos estructurales, como paneles prefabricados, que integren funciones estructurales y no estructurales. En este contexto, el presente estudio se propone investigar: ¿Es posible desarrollar un prototipo de panel muro

aligerado que cumpla con los criterios de resistencia establecidos por la normativa vigente y satisfaga los requerimientos del cliente, mediante la aplicación de la metodología QFD?

2. Metodología

2.1. Diseño del panel

Se estableció como objetivo diseñar un muro panel prefabricado para usos habitacionales. Acorde a lo propuesto por Magrab et al. (2009) y Ullman (2010), los requerimientos de diseño se determinaron mediante la aplicación de encuestas a 35 usuarios potenciales (cuyo perfil son ingenieros civiles, instaladores y clientes con conocimiento en este tipo de tecnologías). Estos requerimientos se clasificaron en orden de importancia mediante ponderación (Cross, 2021), la cual se puede observar en la Tabla 1. Para ponderar, se ordena cada requerimiento y se le asigna una puntuación que va de + a - en caso de tener mayor importancia relativa (IR) sobre otro requerimiento en las encuestas. El criterio con mayor importancia es aquel que tiene mayor número de signos +. La importancia relativa se numera del al 5 y se asigna en una valoración porcentual respecto al total de requerimientos (100%).

Tabla 1: Matriz de ponderación de requerimientos.

Requerimiento	1	2	3	4	5	6	IR (%)
Facilidad de instalación	1	+	+	+	+	+	38
Vida útil	2	-	0	+	+	+	25
Resistencia del anclaje	3	-	-	0	+	+	18.75
Costo	4	-	-	-	0	+	12.50
Estética	5	-	-	-	-	0	6.25
Total							100

Teniendo clasificados los requerimientos de diseño en orden de importancia, a partir de una segunda encuesta se analizaron las características de los muros prefabricados existentes en el mercado: Panel de Tablaroca®, Multytecho®, Selenderwall®, Rocapanel®, Muro Til-up, Murotech®, Permabase, Megamuro® y Panel W®, considerando su mayor cercanía a los requerimientos de muro dictaminados por la primera encuesta. Se realizó un traslado de requerimientos de diseño a requerimientos técnicos considerando un objetivo deseable dictaminado por una evaluación comparativa de los competidores anteriormente mencionados. Los requerimientos técnicos se visualizan en la Tabla 2.

Tabla 2: Requerimientos técnicos a partir de las necesidades del cliente.

Requerimientos del cliente	Requerimientos técnicos
Facilidad de instalación	Tiempos de instalación no mayores a 15 minutos por panel
Vida útil	Tiempo de vida útil de la edificación
Resistencia del anclaje	Estructural (flexión de al menos 7MPa, compresión de al menos 19.61 MPa. (Arnal & Betancourt, 2023))
Costo	No mayor a \$550.00 mxn
Estética	Textura lisa color blanco mate

Para pasar de la función a la forma, se empleó el método morfológico de generación de conceptos, el cual consiste en descomponer un problema (función general) en conceptos asociados a estructuras básicas (o subfunciones) y asociarlos a una determinada forma (función a la forma), tomadas de los conceptos provenientes del benchmarking.

Las subfunciones básicas de un panel muro consisten en la forma, el tipo de anclaje, en la forma, el acabado superficial, el refuerzo, el tipo de aligeramiento, y la forma de fabricación o preparación. Como se mencionó previamente, a estas subfunciones se les asocian conceptos provenientes del benchmarking como alternativas que sean capaces de satisfacer la subfunción. Por ejemplo, para la subfunción de anclaje, los posibles conceptos o formas asociados son atornillados, macho-hembra, con adhesivo o unión soldada. Cada uno de los conceptos se evalúan en una matriz comparativa asignando una calificación relativa a los requerimientos técnicos y el peso relativo de ellos en el concepto final.

Tabla 3: Matriz morfológica.

Subfunción	Conceptos asociados	Criterios de evaluación e Importancia relativa (%)					Total (%)
		Facilidad de instalación	Vida útil	Resistencia al anclaje	Costo	Estética	
		38.00	25.00	18.75	12.00	6.25	100.0
Aislamiento termoacústico	Con Fibras	10	8	10	6	10	90.20
	Con Unicel	10	10	10	9	10	98.80
	Recubierto	8	8	8	6	10	78.85
	Sólido	10	10	10	10	5	96.88
	Poliestireno	10	8	10	10	10	95.00
Refuerzo	Lámina metálica	9	10	9	8	7	90.05
	Mezcla de poliestireno y Concreto	8	10	10	7	9	88.18
	Geotextil	7	8	7	9	9	76.15
	Metálico armado en mallas	9	10	10	7	10	92.60
Forma	Prismática	10	10	10	10	8	98.75
	Irregular	7	8	7	8	10	75.58
Tipo de mezcla de aligeramiento	Poliestireno	9	9	9	7	9	87.60
	Aireado	8	8	8	8	9	80.63
	Mixto armado	7	9	9	7	9	80.00
	Yeso	9	7	7	9	10	81.88
Preparación	Concreto puro	6	10	10	7	9	80.58
	In Situ	6	9	9	7	8	75.58
	Prefabricado	10	9	9	10	10	95.63
Anclaje	Macho-hembra	9	10	8	10	9	91.83
	Soldadura	6	10	10	7	8	79.95
	Atornillado	8	7	7	9	8	80.63
	Adhesivo	7	6	6	8	8	67.45
Acabado	Liso	10	10	10	8	8	96.35
	Rústico	10	8	10	9	9	93.18

Tomando como referencia el concepto de anclaje, un concepto que satisface esta función es un anclaje macho-hembra. Asignando una calificación de 9 de 10 asociado al criterio de facilidad de instalación (siendo 10 el mayor puntaje y 0 el menor), el puntaje sería 34.2 (considerando que el puntaje relativo de facilidad de instalación es 38, en cuanto a los requerimientos primarios). Esta calificación se otorga para cada uno de los criterios de evaluación según la importancia relativa de cada requerimiento, se suma y se selecciona aquella de mayor puntuación para cumplir con el concepto final. En la matriz morfológica de la Tabla 3, se puede observar la evaluación completa que conlleva al concepto de muro final.

A partir de los conceptos con mayor puntaje para cada subfunción, se obtienen los criterios morfológicos finales que integran el “concepto ganador”, el cual tiene las siguientes características:

- Prefabricado rectangular.
- Estructura de concreto reforzado con refuerzo metálico mallado bidireccional (tres dimensiones)
- Aislamiento termoacústico embebido de poliestireno
- Apariencia lisa, sin textura
- Anclaje Conectores Macho-hembra

El concepto final propuesto, se puede observar en la Figura 1, el cual es una representación CAD del prototipo de panel muro estructural con aplicaciones estructurales.

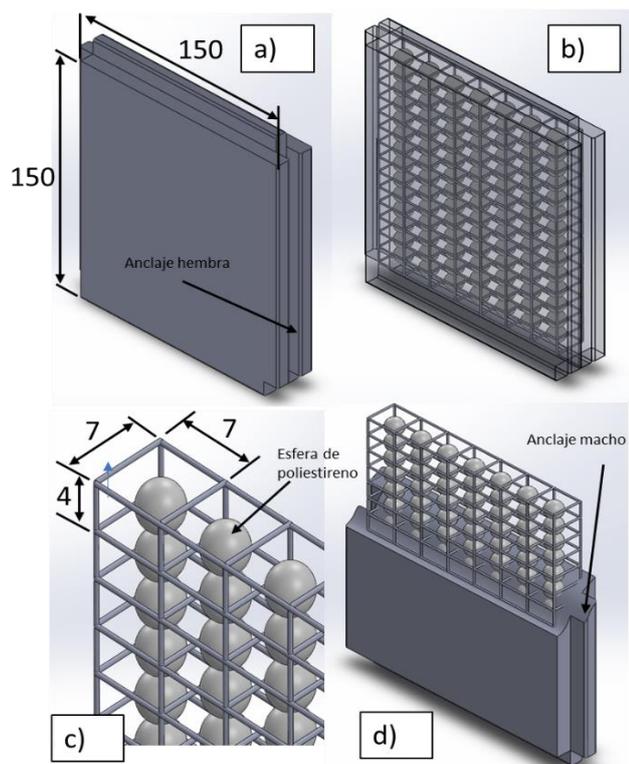


Figura 1: Concepto de panel-muro. En a) se observa el panel de medidas 1.5x1.5m. En b), se observa una transparencia del panel con el mallado y aislantes embebidos. En c) una imagen del mallado tridimensional con las respectivas dimensiones. En d), un corte parcial del panel con el mallado y el aislante expuesto.

2.2. Elaboración

Se elaboró un prototipo del concreto cuyo concepto se puede observar en la Figura 1. Para las pruebas experimentales, se elaboraron 3 especímenes para pruebas de flexión y 3 especímenes para las pruebas de compresión por categoría, siendo la categoría 1 los sujetos de control denominados C1 (Figura 2a), la segunda categoría son sujetos con refuerzo tridimensional denominados P1 (Figura 2b) y la tercera categoría son especímenes con refuerzo tridimensional y aislante de poliestireno denominados P2 (Figura 2c), dando lugar a 18 especímenes de ensayo en total, cuyas dimensiones se pueden observar en la Figura 2d. Para la elaboración de los sujetos de control se utilizó como refuerzo varilla corrugada de acero grado 4000 de 3/8 de pulgada, mientras que para los especímenes P1 y P2 se utilizó varilla de acero grado 6000 de 4mm de diámetro, electrosoldada.

El aislante utilizado para los especímenes P2, consistió en esferas de poliestireno de 4.5cm de diámetro, con distribución dentro de los especímenes se indica en la Figura 1b y 2c. Las mezclas de concreto utilizadas para los especímenes C, P1 y P2 son iguales, formuladas y elaboradas bajo el estándar de la ACI-211-22 (American Concrete Institute, 2022), cuya formulación puede observarse en la Tabla 4. Los especímenes se dejaron secar por 28 días en cámara de fraguado, a una temperatura de 20°C +2°C y en tina de agua en inmersión total.

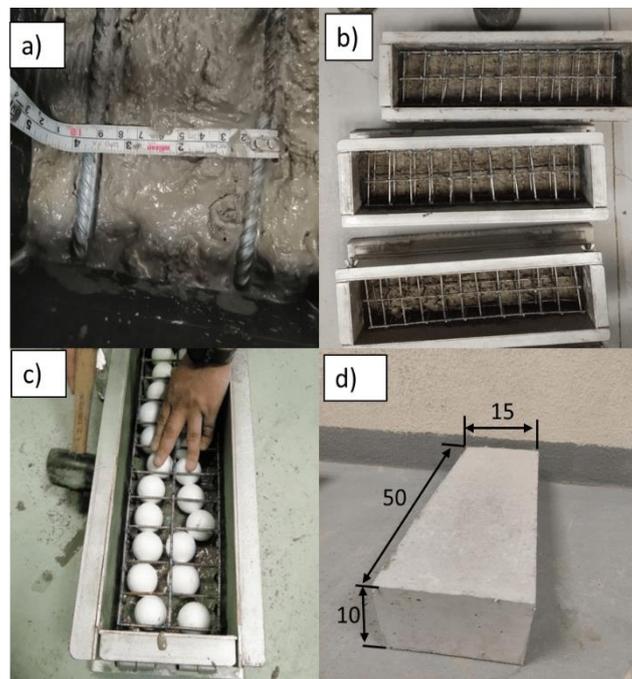


Figura 2: Elaboración de probetas de ensayo. En a) se observan el espécimen de control C1, en b), se observa el espécimen de prueba P1, en c) el espécimen de prueba P2, y en d), la imagen de una probeta fraguada después de 28 días, con sus respectivas dimensiones.

Tabla 4: Mezcla de concreto utilizada para la elaboración de las probetas.

Ingrediente	Cantidad
Cemento Portland CPC 30	385 kg/m ³
Agua	224 l/m ³
Agregado fino húmedo que pasa al 100 a través de un tamiz 4.75mm (considerando un porcentaje de humedad de 6.24% de laboratorio)	810.31 kg/m ³
Agregado grueso húmedo de tamaño nominal 12.7mm. (considerando un porcentaje de humedad de 10.97% de laboratorio)	816.056 kg/m ³
Aditivo inclusor de aire Eucomex ® AEA-92 D-10	1.108l/ m ³
Fibra Ecucomex® Fiberstand	440g/m ³

2.3. Pruebas experimentales

Se realizaron pruebas de flexión y compresión, bajo los estándares NMX-C-083-ONNCCE-14 (ONNCCE, 2015a) y NMX-C-191-ONNCCE-15 (ONNCCE, 2015b) respectivamente. Ambas se realizaron utilizando una máquina de ensayos ELE International 36-3095/02, tal como se puede observar en la Figura 3. Para el caso de las pruebas de compresión, se consideraron especímenes cúbicos de 0.15m de lado. Para determinar la resistencia a la compresión σ_c (MPa), se utilizó la fórmula:

$$\sigma_c = P_c/A \quad (1)$$

Donde P_c (kN) es la carga de ruptura a la compresión y A (m²) es el área de la sección transversal del espécimen. Los resultados y el análisis respectivo pueden observarse en la Tabla 5. Para el caso de las pruebas de flexión, para determinar la resistencia o Módulo de Ruptura Mo_R (MPa) se utilizó la expresión:

$$Mo_R = P_f L/bd^2 \quad (2)$$

donde P_f (N) es la carga de ruptura a la flexión, L (m) es la distancia entre apoyos, b (m) es el ancho de la viga y d (m) es el peralte de la viga. Se consideraron probetas de 0.5m de largo con distancia entre apoyos de 0.465m y 0.1m de peralte.

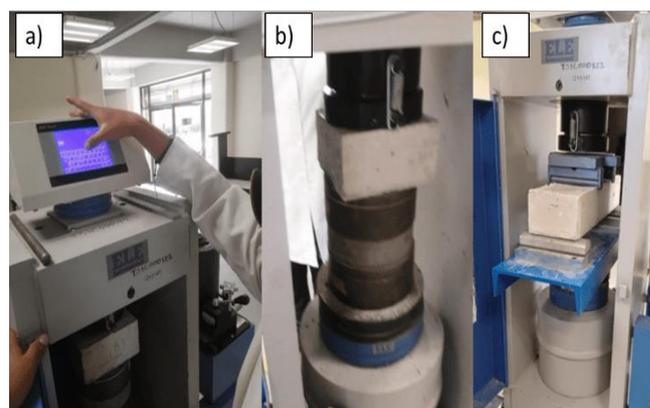


Figura 3: Ensayo de especímenes de prueba. En a) se observan la configuración de los especímenes en la máquina, en b), se observa la configuración de una prueba de compresión, en c) se observa la configuración de una prueba de flexión a cuatro puntos.

3. Resultados

Los resultados de las pruebas de resistencia a compresión y flexión pueden observarse en la Tabla 5. Se plasman los valores promedio de las cargas máximas a compresión P_c y flexión P_f y los coeficientes de variación COV (%) para dichos datos. También se indican los valores de Mo_R y σ_c calculados a partir de la aplicación de las ecuaciones (1) y (2) a los valores promedio de P_c y P_f .

Se observa que los valores máximos de P_c los obtuvieron los especímenes con refuerzos tridimensionales sin poliestireno, seguidos de los especímenes de control. Esta tendencia es la misma para los valores máximos de P_f . Al ser los especímenes ensayados de las mismas dimensiones, estas tendencias se extrapolan para los valores de Mo_R y σ_c . Respecto al espécimen de control, el incremento de resistencia a la compresión del espécimen P1 es del 19.70% y el incremento de resistencia a la flexión es del 5.31% apenas. Sin embargo, se observa que el panel P2 tiene una disminución de resistencia a la compresión respecto al sujeto de control del 18.66%, a la vez que registra un decremento de resistencia a la flexión del 10.73%.

La incorporación de poliestireno tiene una implicación directa en la reducción de peso. Mientras que los especímenes C tienen una densidad volumétrica de 2120.34 kg/m³, para el caso de los especímenes P1 es de 2119.27 kg/m³, en tanto que para los especímenes P2, con incorporación de poliestireno corresponde a 1717 kg/m³, lo que significa una reducción del 19% de masa, por lo que puede considerarse un concreto aligerado.

Tabla 5: Resultados promedio de las pruebas de flexión y compresión para los especímenes de muro.

Especímen	P_c (N), (COV %)	Mo_R (MPa)	P_f (N), (COV %)	σ_c (MPa)
C	27008.88 (3.92)	8.85	558384.08 (14.1)	24.81
P1	29503.30 (6.3)	9.32	669853.03 (4.5)	29.70
P2	25251.82 (25.7)	7.90	454091.33 (4.96)	20.18

4. Análisis

Los especímenes con mayor resistencia promedio tanto a la flexión como a la compresión son P1. Para el caso de la resistencia a la flexión, el incremento de resistencia de P1 respecto a C se debe a que la incorporación de refuerzos tridimensionales, tal como han señalado (Naaman, 2012) y (Abdellahi et al., 2018) en que los conectores entre capas de refuerzo disipan las cargas en los diferentes nodos de la malla. Sin embargo, algunos estudios como el realizado por (Mishra, 2018) y por (Al-Dala'ien et al., 2023), para algunos arreglos tridimensionales con materiales diversos, concuerdan que la resistencia a la compresión se ve reducida por este tipo de geometrías, generalmente atribuido a la disminución en la cantidad de concreto, aunque esta reducción de concreto es despreciable (6.2%). El incremento de σ_c observado para P1 respecto a C pudiera deberse a que los conectores se encuentran perpendiculares a la dirección de la carga, sin embargo, los especímenes P2 también se tiene un arreglo tridimensional metálico en esta orientación, por lo que el incremento de σ_c de P1 respecto a C no es atribuible a este factor. Además, se observa también que para el espécimen P2 respecto de C, descenso porcentual de masa es casi idéntico al porcentaje de descenso de σ_c . Pudiera ser atribuido al descenso en la cantidad de concreto, pero se observa que para el espécimen P1 no existe esta correlación. Por lo tanto, se debe estudiar en adelante la relación directa entre la cantidad de concreto y el índice de refuerzo para mejorar la resistencia a la compresión.

La implicación de la incorporación de poliestireno en la matriz de concreto tiene un efecto importante en el aligeramiento, pero también en la disminución de la resistencia. Dado que el presente estudio no contempla un análisis de adherencia entre la interfaz de concreto y poliestireno, no se puede inferir la correlación directa del uso de este material en la reducción de resistencia del material compuesto, y tal como se indicó anteriormente, esto sea probablemente una consecuencia de la reducción en la cantidad de concreto, más que un efecto de poliestireno per se.

Sin embargo, la inclusión del poliestireno, al menos para el presente estudio, no compromete el cumplimiento del muro como elemento estructural, pues la norma ACI 318S-19 (American Concrete Institute, 2020), en los capítulos 5 y 6 para resistencia a la compresión y en el capítulo 9 referente a la resistencia a la flexión, así como las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (Arnal & Betancourt, 2023) en las secciones 5 y 6 referentes a resistencia a la compresión flexión respectivamente, indican que la resistencia a la compresión debe superar los 20 MPa y la resistencia a la flexión debe encontrarse en valores comprendidos entre el 10% y 20% de la resistencia a la compresión, para elementos estructurales clase 2 (viviendas de hasta 2 niveles). Por lo que se observa que las probetas derivadas de la propuesta de diseño P1 y P2 cumplen satisfactoriamente estos dos criterios, por lo que pueden usarse como elementos estructurales, como losas, vigas, o muros de carga de alto desempeño.

A pesar de que el presente estudio no contempla pruebas de transferencia de calor o conductividad térmica, la incorporación de poliestireno como elemento de aligeramiento debería producir una reducción en la conductividad térmica (Chikhi et

al., 2016; Dissanayake et al., 2017; Sah et al., 2024), generando un panel que no solamente cumple con la resistencia estructural demandada, sino que es ligero y térmico, ideal para aplicaciones en vivienda, industria y milicia.

5. Conclusiones

Se diseñó un prototipo de panel de muro prefabricado con aplicaciones estructurales en vivienda, industria y milicia usando herramientas de la metodología de despliegue de función de calidad. La metodología utilizada mostró ser de utilidad para generar un prototipo que satisface los requerimientos del cliente en aspectos de funcionalidad, estética, tiempos de instalación, costo y resistencia. Las pruebas mecánicas efectuadas muestran que el muro cumple y supera los criterios establecidos por norma para fungir como elemento estructural de construcción. Se espera ahondar en el futuro en la realización de pruebas para determinar otras propiedades físico-mecánicas.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto, a la Red Nacional de Minerales Estratégicos del Tecnológico Nacional de México por el apoyo técnico brindado y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación SECIHTI por la beca posdoctoral número 8107509.

Referencias

- Abdellahi, S. B., Hejazi, S. M., & Hasani, H. (2018). Investigation of flexural behavior of 3D textile reinforced concrete using both experimental tests and finite element method. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 20(5), 578–594. <https://doi.org/10.1177/1099636216665300>
- Akao, Y. (2004). *Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements Into Product Design*. Massachusetts: Productivity Press.
- Al-Dala'ien, R. N., Syamsir, A., Usman, F., & Abdullah, M. J. (2023). The effect of the W-shape stirrups shear reinforcement on the dynamic behavior of RC flat solid slab subjected to the low-velocity impact loading. *Results in Engineering*, 19, 101353. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101353>
- American Concrete Institute. (2022). *ACI PRC-211.1-22: Selecting Proportions for Normal-Density and High-Density Concrete- Guide*.
- Chikhi, A., Belhamri, A., Glouannec, P., & Magueresse, A. (2016). Experimental study and modeling of hygro-thermal behavior of polystyrene concrete and cement mortar. Application to a multilayered wall. *Journal of Building Engineering*, 7, 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.job.2016.06.007>
- Arnal, S., & Betancourt, M. (2023). *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y Normas Técnicas Complementaria*. Trillas.
- Cross, N. (2021). *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design*, 5th Edition (5th ed.). Wiley.
- De Abreu, F., Giuliani, A., Pizzinatto, N., & Alves, C. (2006). Benchmarking como instrumento dirigido al cliente. *Invenio*.
- Dissanayake, D. M. K. W., Jayasinghe, C., & Jayasinghe, M. T. R. (2017). A comparative embodied energy analysis of a house with recycled expanded polystyrene (EPS) based foam concrete wall panels. *Energy and Buildings*, 135, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.044>
- Eleftheriadis, S., Duffour, P., & Mumovic, D. (2018). Participatory decision-support model in the context of building structural design embedding BIM with QFD. *Advanced Engineering Informatics*, 38, 695–711. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.10.001>

- Fernández-Ordóñez, D., & Fernández Gómez, J. (2009). Industrialización para la construcción de viviendas. Viviendas asequibles realizadas con prefabricados de hormigón. *Informes de La Construcción*, 61(514), 71–79. <https://doi.org/10.3989/ic.09.003>
- Franciosi, M., Savino, V., Lanzoni, L., Tarantino, A. M., & Viviani, M. (2024). Structural design of reinforced earthcrete (ReC) beams. *Engineering Structures*, 306, 117739. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117739>
- Germani, M., Mengoni, M., & Peruzzini, M. (2012). A QFD-based method to support SMEs in benchmarking co-design tools. *Computers in Industry*, 63(1), 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2011.10.007>
- Hernández-Pérez, J., Jiménez-Montoya, A., Pascual-Francisco, J. B., Contreras-Ramírez, J. C., López-Segundo, N., & Miramar-Mena, T. (2024). Propuesta y análisis de deflexión de losas aligeradas con arreglo metálico tridimensional embebido. *Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, 12(Especial), 68–74. <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial.12140>
- Ju, Y., & Sohn, S. Y. (2015). Patent-based QFD framework development for identification of emerging technologies and related business models: A case of robot technology in Korea. *Technological Forecasting and Social Change*, 94, 44–64. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.04.015>
- Magrab, E. B., Gupta, S. K., McCluskey, F. P., & Sandborn, P. (2009). *Integrated Product and Process Design and Development*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420070613>
- Mishra, R. (2018). FEM based prediction of 3D woven fabric reinforced concrete under mechanical load. *Journal of Building Engineering*, 18, 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.03.003>
- Naaman, A. E. (2012). Evolution in Ferrocement and Thin Reinforced Cementitious Composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37(2), 421–441. <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0187-4>
- ONNCCE. (2015a). NMX-C-083-ONNCCE-2014. *Industria de la Construcción – Concreto – Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes – Método de Ensayo*.
- ONNCCE. (2015b). NMX-C-191-ONNCCE-2015, *Industria de la construcción–Concreto–Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro*.
- Sah, T. P., Lacey, A. W., Hao, H., & Chen, W. (2024). Prefabricated concrete sandwich and other lightweight wall panels for sustainable building construction: State-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, 89, 109391. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109391>
- Singhaputtangkul, N., Low, S. P., Teo, A. L., & Hwang, B.-G. (2013). Knowledge-based Decision Support System Quality Function Deployment (KBDSS-QFD) tool for assessment of building envelopes. *Automation in Construction*, 35, 314–328. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.05.017>
- Ullman, G. D. (2010). *The Mechanical Design Process* (4th ed.). McGraw Hill.
- Yuk, H., Choi, J. Y., Kim, Y. U., Chang, S. J., & Kim, S. (2023). Historic building energy conservation with wooden attic using vacuum insulation panel retrofit technology. *Building and Environment*, 230, 110004. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110004>