



UNIVERSIDAD  
CENTRAL  
DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA

# INGENIO

Vol.II, N°1 2019 / ISSN: 2588-0829



**Autoridades:**

Dr. Fernando Sempértegui Ontaneda, PHD  
Rector de la Universidad Central del Ecuador

Ing. Cecilia Flores Villalva, MSc.  
Decana Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática

Ing. César Morales Mejía, MSc.  
Subdecano Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática

**Consejo Editorial:**

Ing. Cecilia Flores Villalva, MSc Directora  
Ing. César Morales Mejía, MSc. Editor  
Ing. Mauricio Basabe Moreno, PHd  
Ing. Rodrigo Herrera Heredia, MSc  
Ing. Salomón Jaya Quezada, MSc  
Ing. José Augusto Rosero, PHd  
Ing. Gonzalo Sandoval, MSc  
Ing. Paulina Viera Arroba, MSc

**Consejo Asesor y Evaluador:**

Ing. Lauro Lara, MSc. Pontificia Universidad Católica  
Ing. Gustavo Yáñez, MSc. Pontificia Universidad Católica  
Ing. Carlos Celi, MSc. Pontificia Universidad Católica  
Ing. Oscar Jaramillo, MSc. Pontificia Universidad Católica  
Ing. Wilson Cando, MSc. Pontificia Universidad Católica  
Ing. Jorge Albuja, MSc. Pontificia Universidad Católica  
Ing. Fredi Paredes, MSc. Pontificia Universidad Católica  
Ing. Gonzalo Moya, MSc. Pontificia Universidad Católica  
Ing. Juan Merizalde, MSc. Pontificia Universidad Católica

**Revista Ingenio:**

Fundada en 2017

Este número 1 estuvo bajo coordinación editorial de Ing. César Morales Mejía, MSc

**Diseño Portada:**

Ing. Yuri García, MSc

**Diagramación:**

Editorial Universitaria / cxe

**Foto Portada:**

Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática – UCE

**Impresión:**

Editorial Universitaria

Universidad Central del Ecuador

Correo electrónico: vicedecanat.fing@uce.edu.ec

ISSN: 2588-0829

## ÍNDICE

Aprovechamiento de los residuos provenientes de cilindros y vigas de hormigón utilizados en el laboratorio de ensayo de materiales de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática de la Universidad Central del Ecuador para la fabricación de bloques huecos de hormigón con limadura de acero .....	5
<i>Guerra E.; Ñacata P.; Muñoz F.</i>	
Validación estructural de una vivienda de interés social mediante, estudios analítico - experimentales.....	11
<i>Herrera M.; Gómez C.; Parra G.; Arévalo D.; Hernández L.; Placencia P.</i>	
La construcción sostenible a partir del empleo de ladrillos tipo PET .....	24
<i>Ing. Juan Carlos Moya MSc., Sr. Esteban Cevallos., Sr. Erick Endára.</i>	
Diseño a flexión de vigas de hormigón simplemente apoyadas utilizando lógica difusa.....	33
<i>Santamaría J. L.; Morales L.</i>	
Competitividad en costos: postensado en losas.....	43
<i>Hurtado J.; Morales S.; Hernández L.</i>	
The pathway of concrete improvement via nano-technology .....	52
<i>Alvansazyazdi M.; Rosero José Augusto</i>	
Normas para publicar en la revista Ingenio .....	62



# Aprovechamiento de los residuos provenientes de cilindros y vigas de hormigón utilizados en el laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática de la Universidad Central del Ecuador para la fabricación de bloques huecos de hormigón con limadura de acero

Guerra E.\*; Ñacata P.\*\*; Muñoz F.\*\*\*

\*Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática,  
Carrera de Ingeniería Civil, Quito, Ecuador  
e-mail: estefy-g1021@hotmail.com

\*\*Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática,  
Carrera de Ingeniería Civil, Quito, Ecuador  
e-mail: paulync23@gmail.com

\*\*\*Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática,  
Carrera de Ingeniería Civil, Quito, Ecuador  
e-mail: fpmunoz@uce.edu.ec

Artículo recibido el XX de julio, 2018; revisado XX de julio de 2018.  
Autor para correspondencia: Freddy P. Muñoz Tobar. Correo electrónico: fpmunoz@uce.edu.ec; Teléfono: 0995822655. Quito-Ecuador

Freddy Paúl Muñoz Tobar  
Docente de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática de la Universidad Central del Ecuador.  
Ingeniero Civil graduado de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática de la Universidad Central del Ecuador.  
Master of Science (M.Sc.) in Municipal Water and Infrastructure specialization Drinking Water Supply del UNESCO-IHE Institute for Water Education. Delf-The Netherlands.

Estefanía Paola Guerra Granja. Estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática de la Universidad Central del Ecuador.

Paulina Elizabeth Ñacata Criollo. Estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática de la Universidad Central del Ecuador.

La preparación de este artículo fue posible gracias a la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Central del Ecuador que permitió realizar este trabajo técnico en las instalaciones del laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática.

## Resumen

El reciclaje del hormigón en la actualidad permite generar cambios positivos en el medio ambiente toda vez que éste permite reducir la contaminación y el uso innecesario de espacios que pueden ser destinados para usos productivos. El proceso de trituración reduce los escombros de hormigón dando paso a un nuevo agregado que puede ser utilizado para distintas obras civiles con respecto a la limadura de acero, la cual, en algunos casos, es descartada sin considerar el aporte de resistencia a productos elaborados con hormigón. Los bloques huecos de hormigón fabricados a partir de estos materiales, con la dosificación óptima, lograron obtener resistencias superiores a las establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 643 para bloque. Esta comparación se la realizó tanto para bloques fabricados de manera manual como para los fabricados de manera industrial. Su costo, en comparación con los ya existentes en el mercado, es relativamente similar. En cuanto a la resistencia a la compresión, los bloques elaborados con material reciclado poseen una resistencia superior a los bloques fabricados convencionalmente.

**Palabras clave:** Reciclaje de hormigón y acero, bloques, resistencia a la compresión, reducción de residuos de la construcción.

## Abstract

The recycling of concrete at the moment allows to generate positive changes in the environment, since this allows to reduce the contamination and the unnecessary use of spaces that can be destined for productive uses. The crushing process reduces the concrete debris giving way to a new aggregate that can be used for different civil works with respect to steel filing, which in some cases is discarded without considering the contribution of resistance to products made with concrete. The hollow blocks of concrete manufactured from these materials, with the optimal dosage, managed to obtain resistances superior to those established in the Ecuadorian Technical Norm NTE INEN 643 for block. This comparison was made for both blocks manufactured manually and for those manufactured in an industrial manner. Its cost, compared to those already existing in the market, is relatively similar. As for the resistance to compression, blocks of recycled material have a superior resistance.

**Keywords:** recycling of concrete and iron, blocks, resistance to compression, reduction of construction wastes

## 1. Introducción

Fomentar el reciclaje o reuso del hormigón en los tiempos actuales es difícil toda vez que las personas optan por botar la “basura” o escombros en lugares que no son destinados para éstos, y de esta manera se contaminan ríos y obstruyen colectores de aguas lluvia provocando inundaciones en la época invernal.

El reciclaje del concreto presenta dos ventajas principales: la primera, reduce la utilización de nuevos agregados vírgenes y los costos ambientales de explotación, transporte y asociados; y la segunda, reduce el desecho innecesario de materiales valiosos que pueden ser recuperados y reutilizados.

La falta de aprovechamiento de los residuos de los cilindros y vigas ensayados en el laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática de la Universidad Central del Ecuador contribuye con la contaminación del medio ambiente debido a que origina focos infecciosos para la proliferación de vectores y enfermedades; además, contaminan el suelo y ocupan grandes espacios que podrían ser utilizados para otros fines.

El concreto es el segundo material más consumido después del agua y moldea la mayor parte de nuestro entorno. Viviendas, escuelas, hospitales, oficinas, vías y aceras, todos se realizan a partir del concreto. El concreto es un material durable y puede conservarse por cientos de años en muchas aplicaciones.

En el laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática de la Universidad Central del Ecuador se realizan ensayos, tanto comerciales como académicos, por parte de los estudiantes, a los cilindros de hormigón y vigas con acero de refuerzo, los cuales posteriormente se acumulan de manera inadecuada sin ningún uso beneficioso. Mediante la potencialización de un sistema de clasificación de residuos y de un proceso adecuado para su reciclaje se pueden reutilizar los residuos como materia prima para la fabricación de nuevos materiales de construcción.

## 2. Fundamentación

### Componentes para los bloques de hormigón reciclado

#### *Reciclaje de hormigón*

El concreto puede ser recuperado, triturado y reutilizado como agregado en nuevos proyectos, el cual puede conformar nuevos elementos como aceras, vías, bloques o cualquier obra que requiera agregados.

Por medio de la trituradora se logra obtener la granulometría que el constructor requiera para la realización de algún proyecto en especial.

En particular, los cilindros reciclados deben estar libres de sulfatos, plásticos, materia orgánica, vidrio, plomo y otros metales pesados. La presencia de cualquiera de los elementos antes mencionados afecta al correcto fraguado y, algunos, en interacción con el cemento, producen reacciones que afectan a la resistencia del elemento estructural, en este caso a la resistencia de los bloques de hormigón.

#### *Reciclaje de limadura de acero*

La limadura de acero tiene una alta resistencia y durabilidad, esto favorece su aplicación en la industria de la ingeniería civil.

La limadura de acero cuando se encuentra reducida a polvo es muy utilizada para mejorar el concreto de los pisos de plantas industriales, ya que éstos requieren mayor resistencia al desgaste, por lo tanto, la limadura esparcida al final de la colocación del hormigón mejora considerablemente la resistencia toda vez que ésta endurece la superficie.

## 3. Objetivo

Fabricar bloques huecos con hormigón reciclado y limadura de acero que garantice resistencias superiores a las establecidas en la norma vigente.

## 4. Idea a defender

Mediante el aprovechamiento de los cilindros y vigas de hormigón ensayados, los cuales son generados en el laboratorio de Ensayo de Materia-

les, y por medio del proceso del reciclaje, fabricar bloques huecos de hormigón con limadura de acero, dando como resultado un producto de alta resistencia.

## 5. Proceso de producción

El agregado se obtiene mediante un proceso de trituración de los cilindros, pasando por un proceso de tamizaje. El tamaño nominal del mismo será todo aquel que pase por el tamiz número # 4.

El cemento, que es usado para la realización de los bloques huecos de hormigón, es el Armaduro de la marca LaFarge Selva Alegre. Este cemento tiene la característica de rápido fraguado.

La limadura de acero, que fue obtenida de un taller de torno en la ciudad de Quito, fue lavada por tres días hasta que el aceite soluble, en el que se encontraba sumergida para que no se oxide, se desprenda de ésta. Es conocido que el hormigón en interacción con grasa o aceites es afectado en su adherencia con los agregados. Luego de ser lavada se la introdujo en el horno por 24 horas para separar las impurezas mediante la ayuda de un imán, aplicando el principio de electromagnetismo a fin de separar rápidamente las partículas de acero de plásticos y maderas que se encontraban presentes.

Se utilizó el método llamado *densidad máxima* para el diseño de la mezcla, con una relación agua/cemento de 0.49 para obtener una resistencia aproximada de 7 a 10 MPa a los 7 días de los bloques fabricados industrialmente en la empresa “Prefabricados y Construcciones”; al mismo tiempo se realizaron bloques de manera manual con la misma relación A/C, dando como resultados resistencias de 4 a 6 MPa.

Con la finalidad de aumentar la resistencia de los bloques se añadió un 5% de la limadura de acero con relación al peso del cemento. Este porcentaje asegura no incrementar el peso total del bloque al final del proceso.

La mezcla para la fabricación de bloques debe tener una consistencia seca, la cual se la comprueba mediante el ensayo del cono de Abrams, el cual debe tener un asentamiento igual a 0.

No se utilizaron aditivos debido a que su uso provocaba que la mezcla se vuelva heterogénea, por lo cual se descartó su dosificación.

## 6. Procesos de fabricación manual e industrial

### *Fabricación manual*

De acuerdo a la dosificación, acorde a los pesos exactos del agregado triturado, cemento, agua y limadura de acero, con ayuda de la concretera se obtuvo la mezcla, misma que se vertió en moldes con espesores de 10, 15 y 20 cm. Estos moldes cumplen con las características establecidas en la norma correspondiente.

La compactación se la realizó por capas con ayuda de tacos de madera, mientras que el vibrado se realizó artesanalmente, con el uso de los combos de goma.

Una vez fabricados los bloques se los almacenó sobre una losa, dejándolos en reposo un día para que puedan ser manipulados para su respectivo curado. El curado se lo realizó humedeciéndolos con agua y luego embalándolos individualmente con papel film, y cubriéndolos con plástico negro en su totalidad.

El proceso de curado debe ser permanente, hasta un día antes del ensayo de compresión, a fin de eliminar toda presencia de humedad que afectaría en su resistencia.

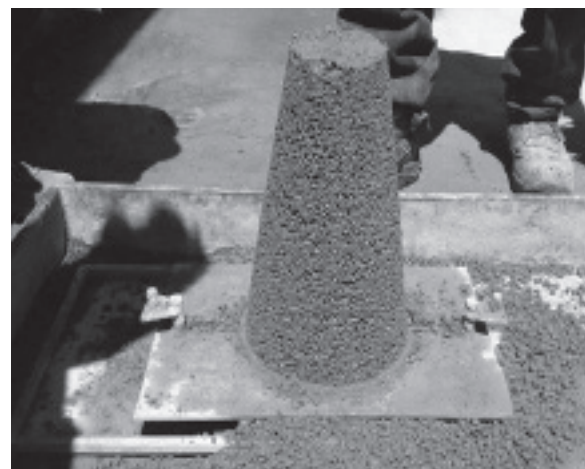
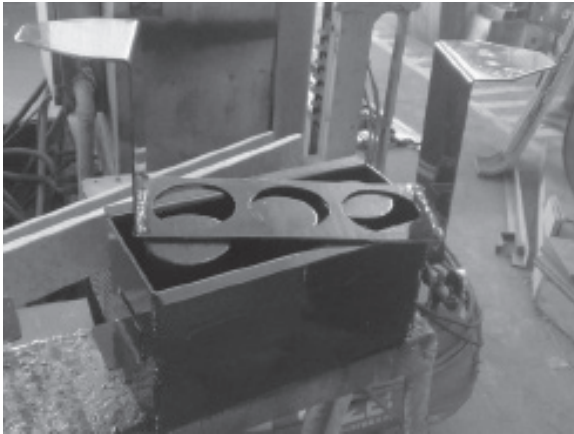


Ilustración 1. Ensayo cono de Abrams, asentamiento cero.





**Ilustración 2.** Encofrado para proceso manual, bloque de ancho 15 cm.

### Fabricación industrial

Con la misma dosificación considerada para la fabricación manual se procedió a realizar la mezcla en la empresa bloquera, la cual empieza con el mezclado y vertido en la máquina prensadora. El material, una vez colocado en los moldes, es sometido a un proceso de vibración electrónica a través de una banda vibratoria por un tiempo de un minuto y medio, la compactación de los mismos es a través de un mecanismo de prensado hidráulico.

Los bloques, una vez terminados, son dispuestos a secado natural hasta que puedan ser manipulados para luego ser sometidos al mismo proceso de curado del proceso manual.



**Ilustración 3.** Máquina prensadora.

## 7. Resultados

**Tabla 1.** Peso de los bloques

PESO BLOQUES		
ANCHO	MANUAL	INDUSTRIAL
cm	kg	kg
10	12.24	10.63
	13.85	10.79
	12.36	11.38
15	10.42	13.18
	10.51	13.20
	10.87	13.15
20	14.44	-
	14.73	-
	15.02	-

**Tabla 2.** Resultados del ensayo de compresión

ENSAYO DE COMPRESIÓN NE BLOQUES (7 DÍAS)		
ANCHO	MANUAL	INDUSTRIAL
cm	MPa	MPa
10	5.15	6.45
	2.78	6.84
	7.87	7.55
PROMEDIO	5.27	6.95
15	4.72	9.00
	5.83	11.86
	7.02	9.72
PROMEDIO	5.86	10.19
20	4.57	-
	4.58	-
	4.27	-
PROMEDIO	4.47	-

## 8. Discusión

La fabricación de los bloques se puede realizar de forma manual o industrial en virtud de que los resultados obtenidos en los ensayos de compresión en laboratorio comparados con la norma NTE INEN 643 son óptimos para que el producto sea comercializado a los 7 días de edad, consideran-



do principalmente que los bloques son elementos que deben tener condiciones de rápido fraguado, alcanzando resistencias esperadas en los primeros días.

El precio unitario de los bloques está dispuesto en función de la cantidad de materia prima y recursos utilizados para su fabricación. Como es el caso del cemento, el cual tiene el mayor grado de importancia para obtener una mayor resistencia. Aquí también se debe considerar el costo de otros recursos indispensables como son: maquinaria, mano de obra y costo de servicios básicos necesarios para conseguir el producto final.

El impacto ambiental que se genera al fabricar los bloques bajo este principio es positivo porque reduce la producción de escombros mediante el reciclaje. Además, para aumentar la producción de los bloques se necesitaría dos condicionantes: (1) acopiar un volumen de escombros sin material orgánico en el laboratorio, y (2) la donación de limadura de acero por parte de empresas comercializadoras de este producto como Novacero y Adelca.

Estos bloques pueden destinarse para ser usados en muros simples o estructurales, ornamentales, primeras plantas de edificaciones, paredes divisorias internas de las construcciones, muros de contención, entre otros.

## 9. Conclusiones

- Se limita su uso para obras en los que no se empleen como elementos de alivianamiento dado su mayor peso en comparación a los bloques de fabricación convencional.
- La compresión de los bloques no se puede realizar a los 28 días debido a la necesidad inmediata de comercialización, por lo cual la resistencia esperada se debe obtener en los 7 primeros días.
- Según la norma NTE INEN 643 la resistencia mayor es de 6 MPa a los 28 días para un bloque tipo A; a su vez los bloques fabricados manualmente alcanzan una resistencia similar en un menor tiempo.
- Los resultados de compresión presentan rela-

ción directa en función del procedimiento de curado de los bloques.

- Los bloques industrializados fabricados con la dosificación óptima superan en un 40% la mayor resistencia según la norma NTE INEN 643.
- Un impacto ambiental negativo generado es la producción de polvo y ruido producido por la maquinaria durante la trituración.
- El rango de precios de un bloque de hormigón fabricado bajo esta modalidad va desde los USD 0.55 hasta USD 1.20 dependiendo de las dimensiones. Para un bloque de espesor de 10 cm el PVP es de USD 0.75; mientras que para un bloque de espesor de 15 cm el PVP es de USD 1.30.

## 10. Referencias

- [1] Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2012). INEN 643. Obtenido de <http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/639-2.pdf>
- [2] Iniciativa por la sostenibilidad del cemento. (Julio de 2009). Reciclando concreto. Obtenido de ficem: [http://ficem.org/publicaciones-CSI/DOCUMENTO-CSI-RECICLAJE-DEL-CONCRETO/RECICLAJE-D-CONCRETO\\_1.pdf](http://ficem.org/publicaciones-CSI/DOCUMENTO-CSI-RECICLAJE-DEL-CONCRETO/RECICLAJE-D-CONCRETO_1.pdf)
- [3] Maza, C. L. (2007). repositorio.uchile. Obtenido de [http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120397/Evaluacion\\_de\\_Impactos\\_Ambientales.pdf](http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120397/Evaluacion_de_Impactos_Ambientales.pdf)

## 11. Agradecimientos

- Guerra E.P. Agradezco a mi familia, amigos y Jonathan por su apoyo incondicional en todo momento. A mi compañera de fórmula Pauly con quien pude hacer realidad este sueño, al laboratorio de Ensayo de Materiales por colaborar, y en especial al ingeniero Freddy Muñoz por creer en este proyecto y apoyarnos para hacerlo realidad.

- Ñacata P.E. Agradezco a mi familia, amigos y todas las personas que colaboraron en la realización de esta meta, al laboratorio de Ensayo de Materiales por ayudarnos a realizar nuestra tesis. A mi compañera de tesis

Estefanía por culminar este sueño juntas, y en especial al ingeniero Freddy Muñoz por creer en este proyecto y apoyarnos para hacerlo realidad.

# Validación estructural de una vivienda de interés social mediante, estudios analítico-experimentales

Herrera M.<sup>1</sup>; Gómez C.<sup>2</sup>; Parra G.<sup>3</sup>; Arévalo D.<sup>4</sup>; Hernández L.<sup>5</sup>; Placencia P.<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Ayudante de Investigación, Centro de Investigación de la Vivienda, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador  
e-mail: melisa.herrera@epn.edu.ec

<sup>2</sup> Coordinador Técnico, Centro de Investigación de la Vivienda, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador  
e-mail: christian.gomez@epn.edu.ec

<sup>3</sup> Analista, Centro de Investigación de la Vivienda, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador  
e-mail: klever.parra@epn.edu.ec

<sup>4</sup> Especialista, Centro de Investigación de la Vivienda, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador  
e-mail: diego.arevalo@epn.edu.ec

<sup>5</sup> Profesor Titular, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador  
e-mail: luis.hernandezr@epn.edu.ec

<sup>6</sup> Profesor, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador  
e-mail: pptt30@gmail.com

Artículo recibido en julio de 2018; aprobado en septiembre de 2018.

<sup>1</sup> Ingeniera Civil, mención Estructuras.

<sup>2</sup> Ingeniero Civil, MBA.

Autor para correspondencia: christian.gomez@epn.edu.ec

<sup>3</sup> Ingeniero Civil, mención Estructuras.

<sup>4</sup> Ingeniero Mecánico, MSc.

<sup>5</sup> Ingeniero Civil, PhD.

<sup>6</sup> Ingeniero Civil, MSc.

## Resumen

En la presente investigación se validó estructuralmente una vivienda de interés social, la cual posee un sistema constructivo innovador de paneles tipo sándwich.

Para validar la vivienda se realizaron varios estudios experimentales que incluyen pruebas de campo y ensayos de laboratorio, tanto en los materiales como en el prototipo de vivienda. Para los ensayos se utilizaron las normas ASTM y el código ACI-318, bajo la dirección técnica del Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional. De los estudios realizados se obtuvieron curvas de capacidad, rigidez, esfuerzos y módulos de elasticidad de los materiales, evidenciando que la vivienda presenta un buen comportamiento ante cargas verticales y laterales (acciones sísmicas). Adicionalmente se realizó un estudio analítico con la ayuda de un modelo matemático tridimensional para conocer la distribución de esfuerzos en la vivienda y compararlos con los esfuerzos obtenidos experimentalmente.

Los resultados obtenidos mostraron que la vivienda es apta para resistir solicitaciones gravitacionales y laterales que requiere la norma NEC-15.

**Palabras clave:** vivienda, paneles sándwich, innovación, poliestireno expandido, poliisocianurato.

## Abstract

In the present investigation, a housing of social interest was validated structurally, which has an innovative constructive system of sandwich panels.

To validate the house, several experimental studies were carried out, including field tests and laboratory tests, both on the materials and on the housing prototype. For the tests, the ASTM standards and the ACI-318 code were used, under the technical direction of the Housing Research Center of the National Polytechnic School. From the studies carried out, curves of capacity, rigidity, stresses and modulus of elasticity of the materials were obtained, showing that the house presents a good behavior before vertical and lateral loads (seismic actions). Additionally, an analytical study was carried out with the help of a three-dimensional mathematical model to know the distribution of efforts in the house and compare them with the efforts obtained experimentally.

The obtained results showed that the house is apt to resist gravitational and lateral solicitations that the NEC-15 standard requires

**Keywords:** housing, sandwich panels, innovation, expanded polystyrene, polyisocyanurate

## 1. Introducción

Ecuador ha sido constantemente escenario de varios eventos sísmicos y la destrucción que estos dejan a su paso no ha disminuido. El sismo del 16 de abril del 2016, permitió comprobar que la mayoría de las estructuras en el país son vulnerables dado que un buen número de estructuras son construidas de manera empírica y otras simplemente no tienen un control técnico y de calidad adecuado. Por tales razones es necesario investigar e implementar nuevos sistemas y métodos constructivos, además de optimizar los existentes. Estos nuevos sistemas estructurales deben ser resistentes, livianos, durables y de bajo costo y que cumplan con estándares sismo-resistentes.

Una empresa ecuatoriana, fabricó y construyó una vivienda de interés social con un sistema de paneles tipo sándwich, que se espera pueda ayudar en la reconstrucción de las poblaciones afectadas de Manabí, es por ello que busca validar estructuralmente la vivienda para que pueda ser una solución segura y funcional para la sociedad.

El sistema de paneles tipo sándwich, es un sistema constructivo no convencional que ofrece muchos beneficios tales como:

- Auto-portante.
- Aislante termo-acústico.
- Sostenibilidad en su fabricación.
- Ligereza.
- Facilidad y rapidez de montaje.
- Excelente relación peso-resistencia.
- Compatibilidad con otros sistemas constructivos.
- Acabados de alta calidad.

Iza en el 2012, menciona “La perfecta combinación entre la rigidez que proporciona la chapa metálica y las buenas propiedades de aislamiento de la espuma de poliuretano hacen que este material compuesto, bajo el denominado efecto *sánduche*, tenga una óptima resistencia acorde al tipo

de sollicitación de carga a la que esté expuesto, ya que por separado tanto la chapa metálica como el poliuretano no las alcanzaría (...)” [1, p. 200]. Abeyasinghe, et al. en 2013 concluyen el sistema HCFPS (Sistema Híbrido Compuesto de Placa de Piso) se puede utilizar como una alternativa viable al sistema de piso convencional ya que cumple requisitos de rendimiento estructural y tiene muchas propiedades deseables [2]. Según Bournas et al. en el 2012, el estudio que realizaron sobre el sistema estructural de paneles tipo sándwich prefabricados de hormigón armado (RCSP) obtuvo resultados que muestran que es un sistema de construcción prometedor para regiones de sismicidad moderada y alta [3].

Al ser un sistema no convencional cuyos parámetros de diseño no están definidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15), esta debe ser estudiada, basándose en el apartado 2.3 del capítulo 9 de la norma NEC-15 (Viviendas de hasta 2 pisos con luces de hasta 5 m), el cual indica que, “para sistemas constructivos diferentes a los descritos en este capítulo, cuyo diseño no pueda ser respaldado por normativa nacional o internacional o cuando se trate de un sistema único o patentado, éstos deberán ser aprobados por el Comité Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción y contar con un informe técnico sobre el desempeño del sistema constructivo, y el cumplimiento de las disposiciones de la NEC, emitido por el Centro de Investigación de la Vivienda (CIV) de la Escuela Politécnica Nacional u otro centro certificado por el Comité Ejecutivo de la NEC” [4].

Para la validación estructural se realizan varios ensayos en los materiales con el fin de determinar sus propiedades físico-mecánicas. Y se realizan pruebas a carga vertical y carga lateral en la vivienda, para conocer su desempeño, adicionalmente se determina el periodo experimental de la estructura mediante un estudio de vibraciones ambientales. Como lo solicita la norma estos ensayos son ejecutados en laboratorio y en campo por el Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional.

Con los resultados obtenidos de dichos ensayos se verifica si la vivienda cumple con requisitos de

resistencia y rigidez para hacer frente a las cargas verticales y laterales cumpliendo con deflexiones y derivas establecidas en la NEC-15. Además, se realizan modelos matemáticos tridimensionales para luego de calibrarlos compararlos con los resultados experimentales obtenidos y verificar que la vivienda cumple con requisitos de esfuerzos máximos y otros parámetros de desempeño de los materiales.

## 2. Materiales fuentes y métodos

### 2.1 Descripción de los paneles

Los paneles tipo sándwich poseen un material aislante termo-acústico unido a dos láminas de 0.4 mm de acero estructural A36 producidos mediante un proceso continuo, que actúan monolíticamente para resistir esfuerzos exteriores. Un recubrimiento galvanume por inmersión en caliente, ofrece resistencia a los efectos de la intemperie [5].

### 2.2 Descripción arquitectónica de la vivienda

El modelo propuesto es una vivienda de 42 m<sup>2</sup> de área de construcción, de una planta con cubierta a doble caída y con una distribución de paredes que permiten separar los espacios esenciales como se muestra en los gráficos 1 y 2.

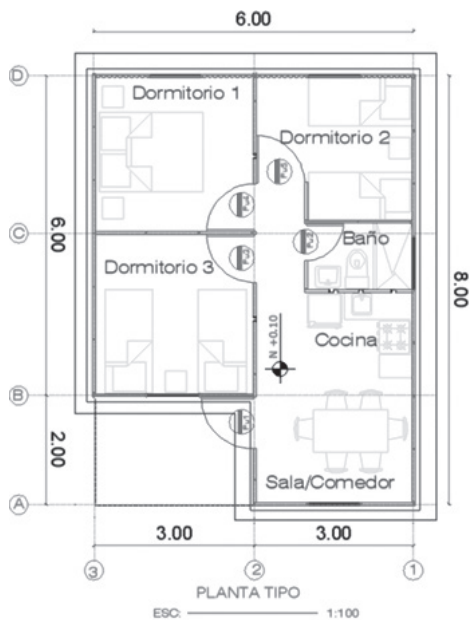


Gráfico 1. Plano arquitectónico de la vivienda.

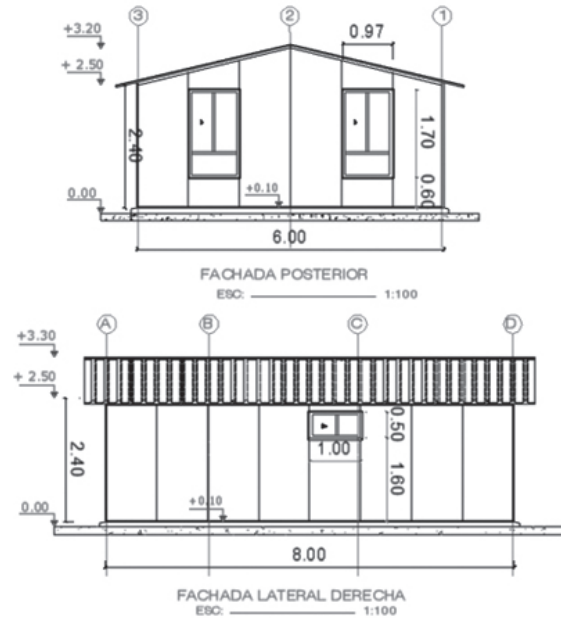


Gráfico 2. Plano arquitectónico de fachadas posterior y lateral derecha.

### 2.3 Descripción estructural de la vivienda

La vivienda está basada en un conjunto de paredes auto-portantes y cubierta a dos aguas con una pendiente del 30%. Las paredes son la estructura resistente y se encuentran sobre un perfil metálico tipo C 55x30x2 unido a un contrapiso de hormigón de 20.6 MPa (210 kg/cm<sup>2</sup>) mediante pernos de 10 cm de longitud (4<sup>º</sup>) cada 50 cm.

Las paredes y divisiones internas están conformadas por paneles de EPS (poliestireno expandido) de 50 mm de espesor, mientras que la cubierta está conformada por paneles de PIR (poliisocianurato) de 15 mm de espesor.

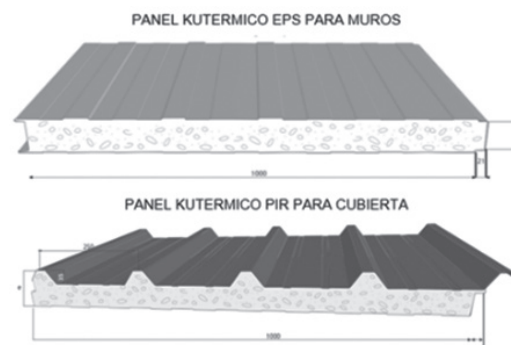


Gráfico 3. Paneles tipo sándwich para paredes y cubierta.



### 2.4 Estudios experimentales en materiales

Se realizan diferentes ensayos para determinar algunas de las propiedades físico mecánicas de los materiales a utilizar en esta investigación, como son el poliestireno expandido (EPS), el poliisocianurato (PIR) y el acero estructural.

**Ensayo de Densidad:** El ensayo se realiza utilizando la norma ASTM C271 [6], y permite conocer la densidad y contenido de humedad de los elementos núcleo.

**Ensayo de Corte:** Este ensayo se realiza de acuerdo a la norma ASTM C393 [7] para determinar el esfuerzo máximo a corte del material del núcleo del panel.

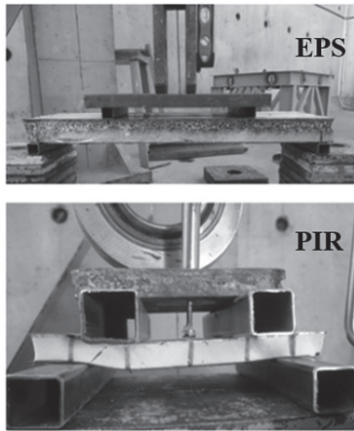


Gráfico 4. Ensayo de corte.

**Ensayo a Compresión Perpendicular:** Este ensayo se realiza utilizando la norma ASTM C365 [8] para determinar el esfuerzo a compresión perpendicular, y el módulo de elasticidad a compresión.

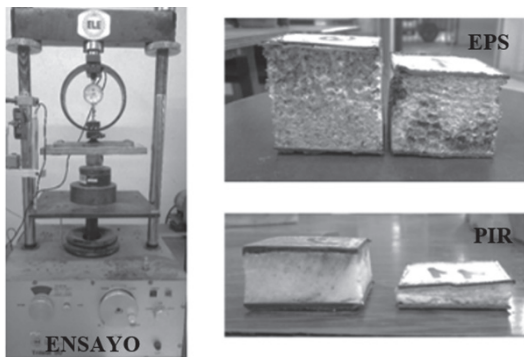


Gráfico 5. Ensayo de compresión perpendicular.

Para el ensayo se toman cinco muestras de cada material y se grafican los resultados esfuerzo y deformación unitaria para determinar el módulo de elasticidad con la pendiente de las curvas.

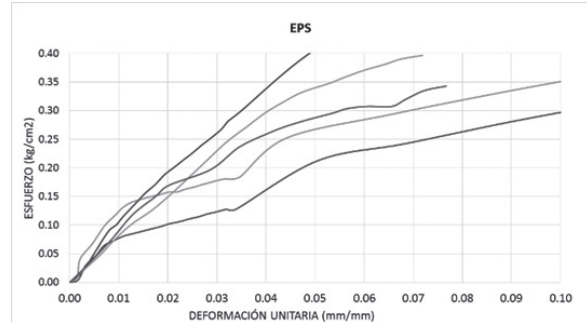


Gráfico 6. Curvas esfuerzo versus deformación unitaria en muestras de EPS.

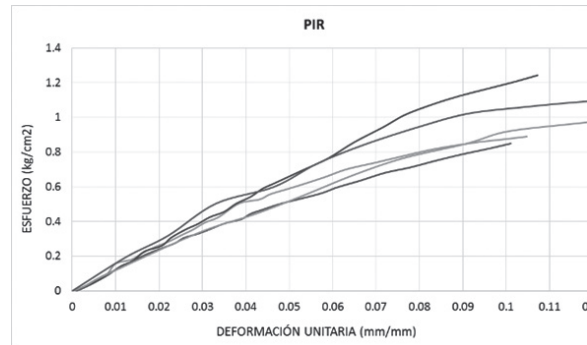


Gráfico 7. Curvas esfuerzo versus deformación unitaria en muestras de PIR.

**Ensayo a Compresión Paralela:** Este ensayo se realiza utilizando la norma ASTM C364 [9], para determinar el esfuerzo máximo a compresión paralela.

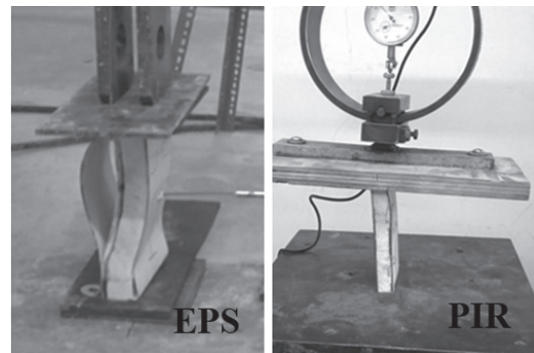


Gráfico 8. Ensayo a compresión paralela.

**Ensayo a Flexión:** El ensayo se realiza en los paneles de cubierta (PIR) según la norma ASTM E72 [10], para determinar el esfuerzo máximo a flexión y parámetros de resistencia y rigidez de la sección transversal del panel frente a cargas perpendiculares al plano.



Gráfico 9. Ensayo a flexión.

### 2.5 Estudio experimental a carga vertical en la vivienda

El estudio a carga vertical evalúa la resistencia y rigidez de la estructura frente a solicitaciones gravitatorias, para ello se realiza una prueba de carga vertical estática en la cubierta y se procesan los datos para determinar deflexiones.

La vivienda de esta investigación posee segmentos idénticos por lo que la prueba de carga se realiza en una sección representativa de la cubierta [11]. La sección de estudio se escoge analizando la zona más crítica, donde las deflexiones y esfuerzos sean máximos.

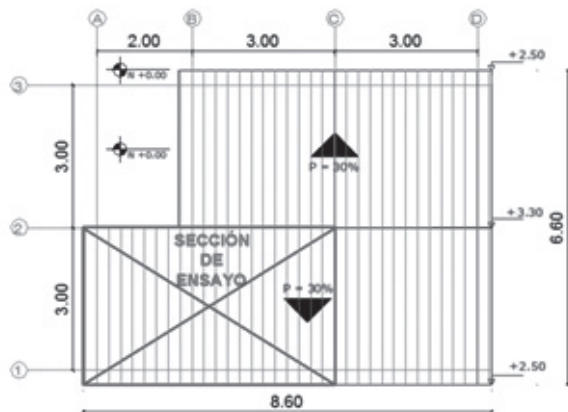


Gráfico 10. Sección de cubierta donde se aplica la sobrecarga.

La carga de estudio para esta vivienda es la carga muerta (peso propio de cubierta) más una sobrecarga de servicio [11]. Para la carga viva se utiliza la indicada para cubiertas inclinadas según la norma NEC-15 [12], y la intensidad de carga aplicada en el ensayo se calcula según el código ACI 318 [11].

TIPO DE CARGA	DESCRIPCIÓN	CARGA kPa	CARGA kg/m <sup>2</sup>
CARGA MUERTA	Peso propio panel	0.068	6.886
CARGA VIVA	Carga mínima para cubiertas	0.700	71.380
INTENSIDAD DE CARGA REQUERIDA	Carga total de ensayo incluyendo la carga muerta ya presente	1.092	111.338
SOBRECARGA APLICADA	Carga de ensayo	1.030	105.000

El proceso de aplicación de carga se realiza en seis etapas, primero se aplica una carga de 0.294 kPa (30 kg/m<sup>2</sup>), seguido se realizan incrementos de 0.147 kPa (15 kg/m<sup>2</sup>) hasta llegar a la carga de ensayo, y posteriormente se realiza la descarga en un proceso de cinco etapas.

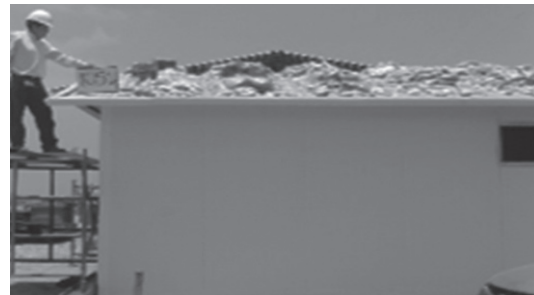


Gráfico 11. Ensayo de prueba de carga vertical.

La instrumentación empleada para registrar las deflexiones son deformímetros mecánicos, mismos que se ubican en el centro de luz de la sección de análisis.

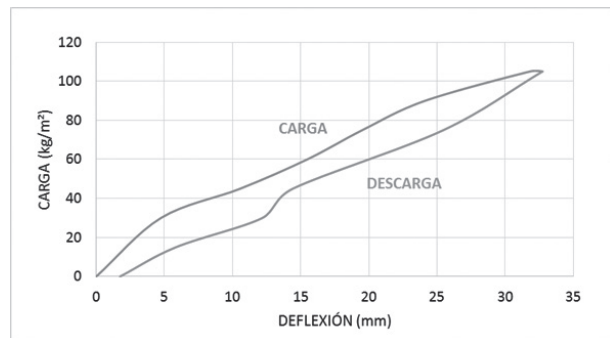


Gráfico 12. Etapas de carga y descarga en prueba de carga vertical.



### 2.6 Estudio experimental a carga lateral en la vivienda

Mediante el estudio a carga lateral se evalúa la resistencia y estabilidad de la estructura frente a sollicitaciones sísmicas, para ello se realiza un ensayo monotónico a carga lateral en el sentido más crítico en la parte superior de los paneles (ver gráfico 14) y se procesan los datos para determinar desplazamientos.

La carga aplicada debe ser superior al cortante basal de la estructura (fuerza demandada por el sismo de diseño). Para el cálculo del cortante basal se utiliza la ecuación y parámetros descritos en la norma NEC-15 [13].

Tabla 2. Valores de carga lateral

TIPO DE CARGA	CARGA kN	CARGA kg
PESO DE LA ESTRUCTURA	15.602	1590.937
CORTANTE BASAL ESTÁTICO	22.158	2259.418
CARGA APLICADA	<b>27.459</b>	<b>2800.000</b>

El proceso de aplicación de carga se realiza en dos etapas, en la primera etapa se aplica carga lateral en varias etapas hasta llegar a la carga de ensayo y posteriormente se realiza la descarga. En la segunda etapa para revisar el comportamiento de la estructura se vuelve a cargar a la vivienda hasta una carga determinada en una sola etapa y se descarga para ver su recuperación.

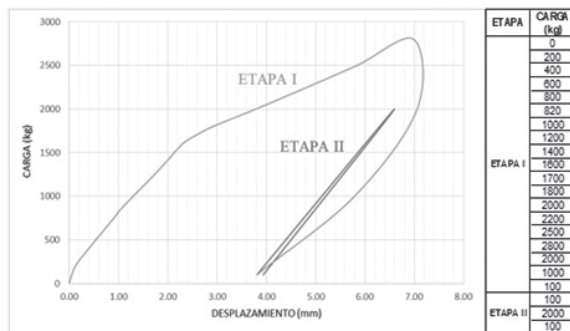


Gráfico 13. Etapas del ensayo a carga lateral.

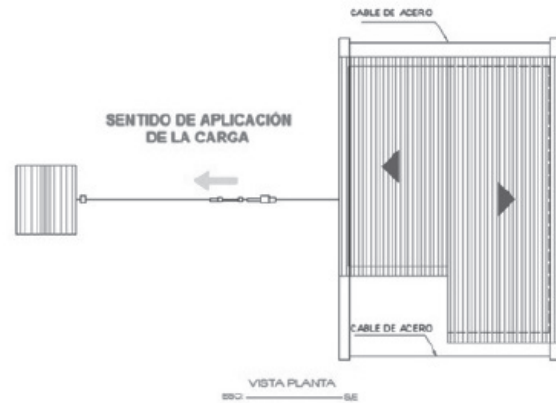
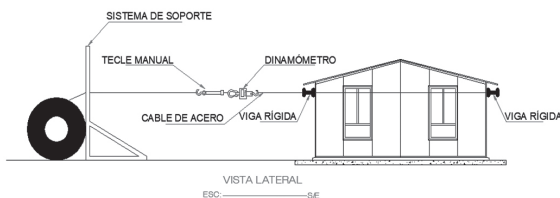


Gráfico 14. Esquema del ensayo a carga lateral.

Se instrumenta el ensayo de carga lateral con tres deformímetros mecánicos, para medir desplazamientos en determinados puntos como se muestra en el gráfico 15.

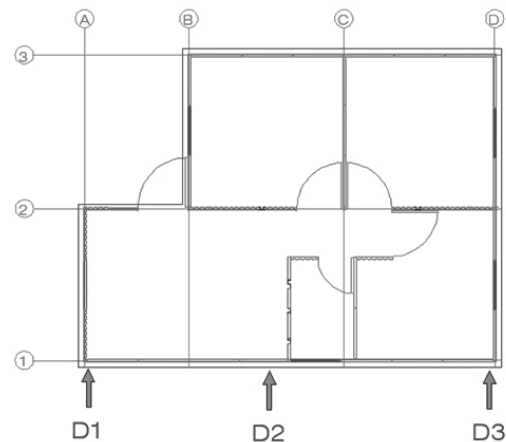


Gráfico 15. Ubicación de medidores de desplazamiento.

### 2.7 Medición de vibraciones ambientales en la vivienda

El estudio de vibraciones ambientales busca determinar el periodo fundamental de la vivienda, si bien este parámetro dinámico de la estructura se puede calcular con modelaciones matemáticas, la medición de vibraciones ambientales da un valor más real del mismo [14].

El equipo utilizado para medir las vibraciones ambientales consistió de un velocímetro-acelerómetro REF-TEK 160-03 marca Trimble, el mismo ha sido provisto por el Instituto Geofísico de la

Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN). Este es un sensor sísmico que permite medir velocidades y aceleraciones en función del tiempo.

Los datos obtenidos de los sensores son procesados de forma similar a la metodología empleada por Guillier et al. [15].

### 2.8 Estudio analítico

El estudio analítico comprende el desarrollo y análisis de un modelo matemático computacional de la vivienda, con el fin de tener un mayor conocimiento del comportamiento y desempeño de la estructura.

En el modelo matemático se simula los ensayos realizados experimentalmente para comprobar que el modelo refleja un comportamiento real de la estructura y conocer los esfuerzos existentes en los diferentes materiales.

Se utilizan dos tipos de elementos para formar los paneles tipo sándwich, se utiliza elementos tipo "Shell" para representar las laminar de acero, y elementos tipo "Solid" para definir el material aislante.

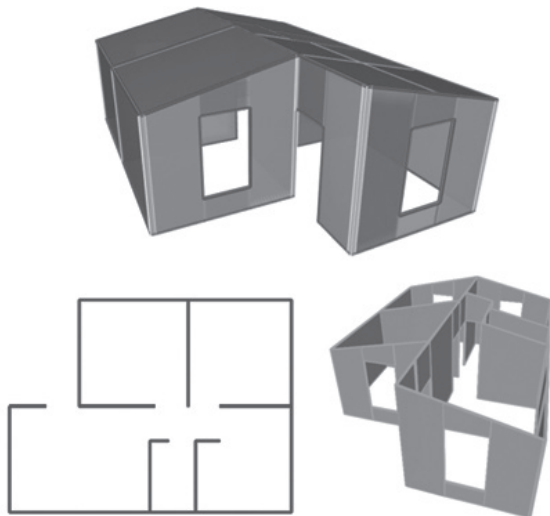
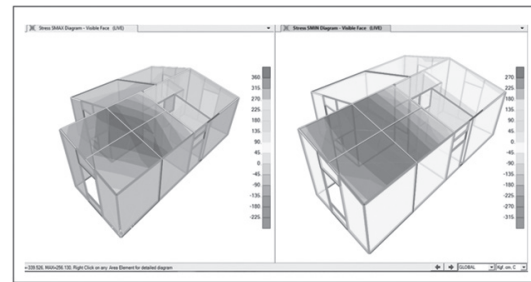
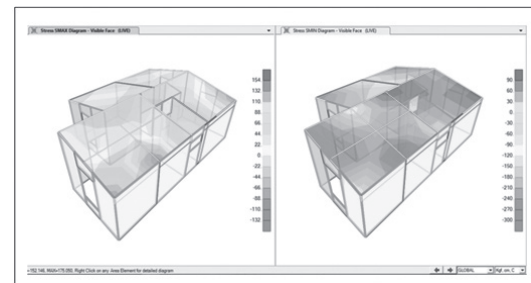


Gráfico 16. Vistas del modelo.

Con el modelo calibrado se obtuvieron esfuerzos críticos en los diferentes elementos para los diferentes estados de carga que se analizaron en los estudios experimentales.

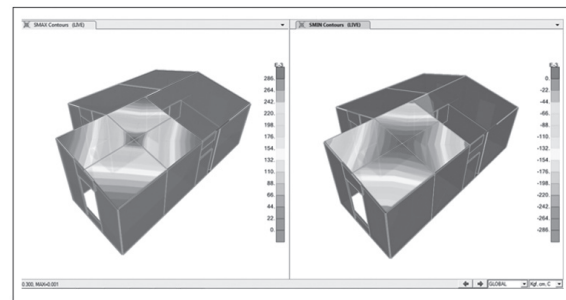


(a)

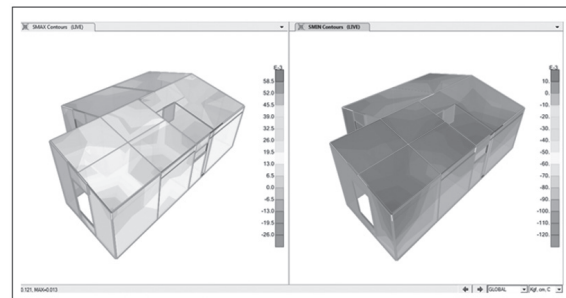


(b)

Gráfico 17. Esfuerzos normales máximos y mínimos para elementos tipo Shell (a) condiciones de carga vertical (b) condiciones de carga lateral.



(a)



(b)

Gráfico 18. Esfuerzos normales máximos y mínimos para elementos tipo Solid (a) condiciones de carga vertical. (b) condiciones de carga lateral.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Propiedades físico-mecánicas de los materiales

En este punto se muestra un resumen de las propiedades obtenidas de los materiales ensayados experimentalmente y estudiados analíticamente.

Tabla 3. Propiedades físico-mecánicas de los materiales

PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS	NORMA	UNIDADES	NÚCLEO EPS	NÚCLEO PIR	PANEL DE EPS	PANEL DE PIR
Densidad	ASTM C271	kN/m <sup>3</sup>	0.186	0.382	-	-
Esfuerzo a Corte	ASTM C393	kPa	61.880	321.853	-	-
Esfuerzo a Compresión Perpendicular	ASTM C365	kPa	15.396	28.243	-	-
Módulo de Elasticidad a Compresión	ASTM C365	kPa	755.109	1192.092	-	-
Esfuerzo a Compresión Paralela	ASTM C364	kPa	265.563	176.225	-	-
Esfuerzo a Flexión	ASTM E72	kPa	-	-	46707.233	87639.646
Módulo de Elasticidad a Flexión	ASTM E72	MPa	-	-	101332.837	86150.390

Tabla 4. Resultado de esfuerzos críticos en elementos tipo Shell y elementos tipo Solid

ESFUERZO	SOLID		SHELL
	EPS kPa	PIR kPa	LÁMINA DE ACERO kPa
Corte	1.667	6.276	-
Compresión Perpendicular	2.354	29.420	-
Flexión - Tracción	-	-	34341.780
Flexión - Compresión	-	-	31674.381

#### 3.2 Deflexiones obtenidas en carga vertical.

Para evaluar la deflexión máxima permitida a carga vertical de la vivienda se analizan dos casos: en el primer caso se revisa la deflexión permanente permitida de acuerdo al informe técnico de la UEAtc [16] para paneles de cubierta de poliisocianurato cuya deformación permanente debe ser inferior al límite admitido equivalente a 1/200 de la luz entre ejes. Como segundo punto se analizó la deflexión máxima y la deflexión permanente requerida en una prueba de carga en losas de hormigón armado, de acuerdo al código ACI-318.

Tabla 5. Comparación de deflexiones teóricas y experimentales

TIPO DE DEFLEXIÓN	DEFLEXIÓN mm	DESCRIPCIÓN
Deflexión permanente permitida	15.00	UEAtc
Deflexión permanente permitida	7.50	ACI 318
Deflexión permanente obtenida	2.24	Ensayo
Deflexión máxima permitida	30.00	ACI 318
Deflexión máxima obtenida	31.83	Ensayo

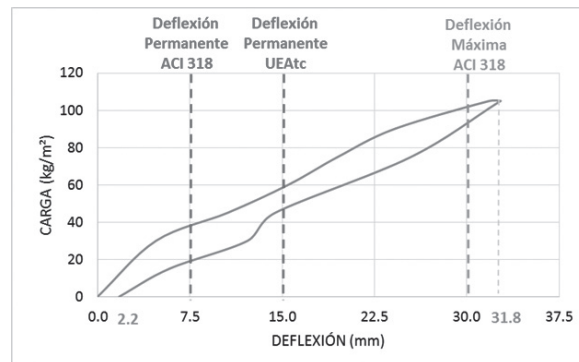


Gráfico 19. Curva carga versus deflexión.

#### 3.2 Fuerza lateral alcanzada

De acuerdo a [13], se requiere que la resistencia de la vivienda a carga lateral sea mayor a la demandada por el sismo de diseño (sismo con un periodo de retorno de 475 años). Para ello se determina el cortante basal elástico de la estructura utilizando (1).

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

Donde:

V : cortante basal total

I : coeficiente de importancia

Sa : espectro de diseño en aceleración

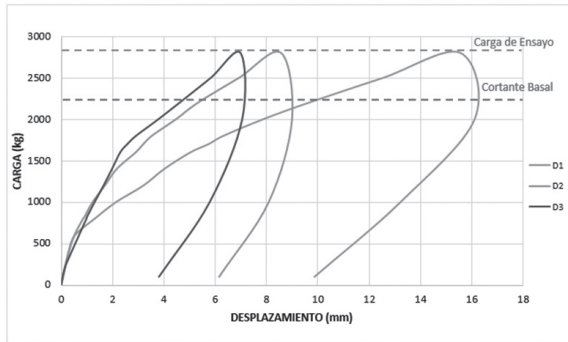
$\phi_p$  y  $\phi_e$  : coeficientes de configuración en planta y elevación

R : factor de reducción de resistencia sísmica

W : carga sísmica reactiva

**Tabla 6.** Comparación de cargas laterales máximas teóricas y experimentales

TIPO DE CARGA	CARGA kN	CARGA kg	OBSERVACIONES
Peso de la estructura	15.602	1590.937	W= Peso de la estructura
Cortante basal estático	22.158	2259.418	Fuerza demandada por el sismo de diseño. (equivalente a 1.42 W )
Carga aplicada	27.459	2800.000	Fuerza de ensayo ( equivalente a 1.76 W)



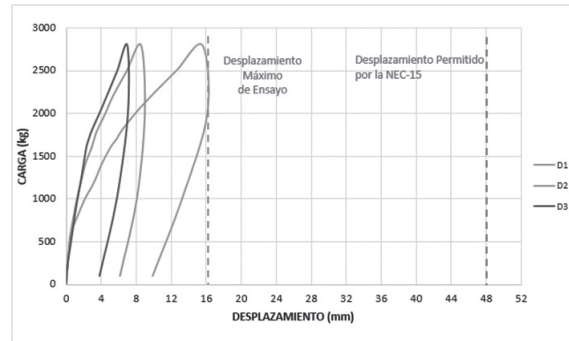
**Gráfico 20.** Comparación de cargas laterales alcanzadas con las requeridas por el código.

**3.3 Derivas máximas obtenidas en carga lateral.**

En la NEC-15 [13], se requiere que la deriva máxima no exceda el límite de deriva inelástica establecida para los diferentes tipos de estructuras. Debido a que el sistema constructivo de la vivienda no se encuentra descrito en la norma se toma el límite establecido para estructuras de hormigón armado, estructuras metálicas y de madera ( $\Delta_{m\acute{a}x.} = 0.02$ ).

**Tabla 7.** Comparación de derivas máximas teóricas y experimentales

Desplazamiento máximo permitida por la norma (mm)	48.000
Deriva máxima permitida por la norma	0.020
Desplazamiento máximo obtenido en el ensayo (mm)	9.650
Deriva máxima obtenida en el ensayo	0.004
Desplazamiento máximo obtenido en el ensayo (mm)	16.100
Deriva máxima obtenida en el ensayo	0.007



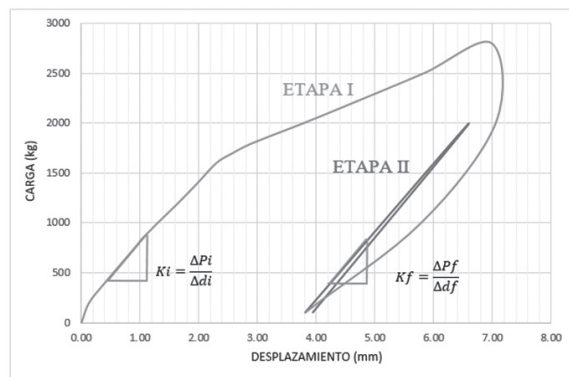
**Gráfico 21.** Comparación de derivas alcanzadas con las requeridas por el código.

**3.4 Variación de la rigidez**

En el ensayo a carga lateral se aplica carga en dos etapas con el fin de comprobar si la vivienda pierde de rigidez durante el ensayo. Para ello se analiza las pendientes de las curvas de capacidad, tanto para la Etapa I como para la Etapa II.

**Tabla 8.** Comparación de rigidez inicial y rigidez final

RIGIDEZ kN/m	D1	D2	D3
ETAPA I (ki)	4604.134	8038.366	7543.697
ETAPA II (kf)	4729.170	7731.507	6678.470



**Gráfico 22.** Curva carga versus deformación para carga lateral (D3), variación de la rigidez.

### 3.5 Volcamiento

La vivienda no debe presentar volcamiento para la fuerza demandada por el sismo de diseño.

Para revisar que no exista volcamiento se verifica que el momento resistente de la vivienda sea mayor que el momento volcante.

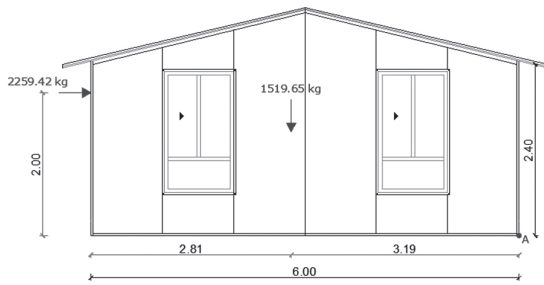


Gráfico 23. Fuerzas resistente y volcante de la vivienda.

Tabla 9. Comparación de momento resistente y momento volcante

	FUERZA kN	BRAZO DE APLICACIÓN DE LA FUERZA m	MOMENTO kN.m	MOMENTO kg.m	DESCRIPCIÓN
Resistente	14.90	3.19	47.54	4847.69	Momento que genera el peso propio
Volcante	22.16	2.00	44.32	4518.84	Momento que genera el cortante basal

### 3.6 Daños visuales en prueba de carga vertical y ensayo a carga lateral.

Durante la prueba de carga vertical y el ensayo a carga lateral la estructura no presenta signos de desintegración, es decir los paneles nunca se salieron de sus guías metálicas, las uniones no fallan y no se pierde la conexión entre las paredes y la cubierta. Tampoco presenta deformaciones permanentes representativas.

### 3.6 Periodo fundamental

Con las vibraciones ambientales se tuvieron las siguientes señales, mismas que se procesaron para obtener las frecuencias fundamentales en ambas direcciones.

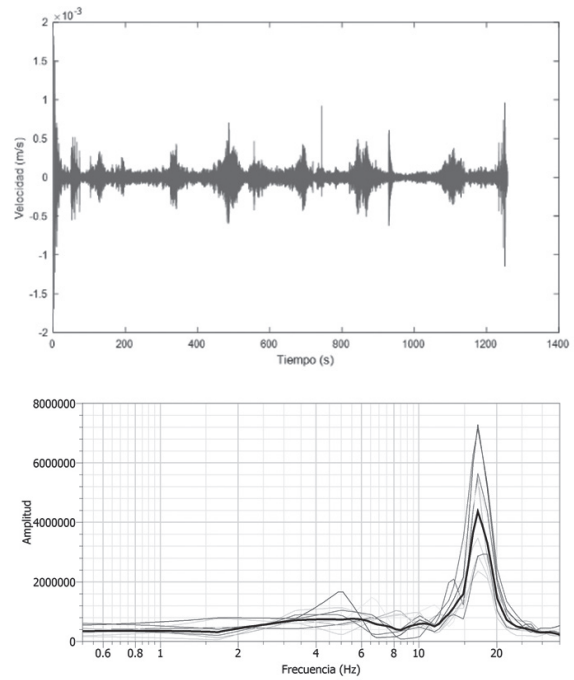


Gráfico 24. Señal y espectro de respuesta obtenido en sentido norte-sur.

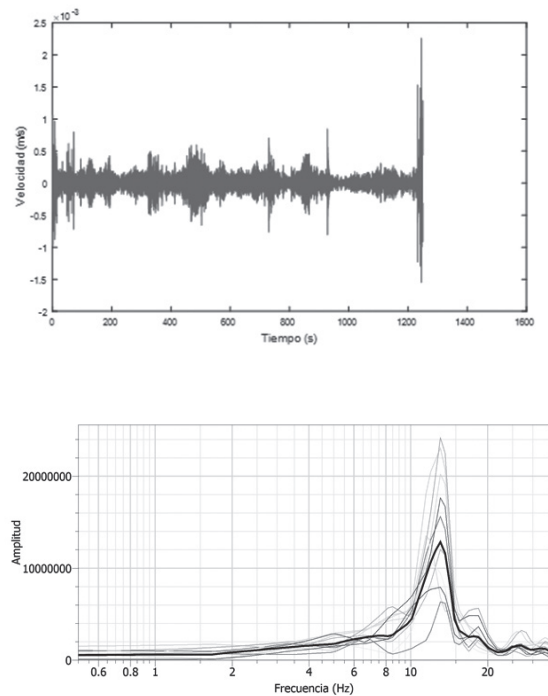


Gráfico 25. Señal y espectro de respuesta obtenido en sentido este-oeste.



**Tabla 10.** Resultado de vibraciones ambientales

DIRECCIÓN	FRECUENCIA FUNDAMENTAL (Hz)	PERIODO FUNDAMENTAL (s)
NORTE-SUR	17.5323	0.0570
ESTE-OESTE	12.7791	0.0783

De la tabla 10 se puede observar que el periodo fundamental de la vivienda es de 0.0783 en el sentido este-oeste (sentido corto de la vivienda).

### 3.6 Esfuerzos de corte en espumas de EPS y PIR

Para revisar si el comportamiento de las espumas de PIR y EPS es el adecuado frente a esfuerzos de corte, se compara el esfuerzo resistente a corte obtenido en el estudio de materiales, con el esfuerzo máximo a corte obtenido del modelo calibrado en los elementos tipo *Solid* para los diferentes materiales.

**Tabla 11.** Comparación de esfuerzos de corte obtenidos analítica y experimentalmente

DETALLE	EPS kPa	PIR kPa	DESCRIPCIÓN
ENSAYO DE LABORATORIO	61.880	321.853	CAPACIDAD
MODELO ANALÍTICO CALIBRADO	1.667	6.276	DEMANDA

### 3.7 Esfuerzos de compresión en espumas de EPS y PIR

La revisión del comportamiento de las espumas frente a esfuerzos de compresión, consiste en comparar el esfuerzo resistente a compresión perpendicular obtenido en el estudio de materiales, con el esfuerzo máximo a compresión del modelo calibrado.

**Tabla 12.** Comparación de esfuerzos de compresión obtenidos analítica y experimentalmente

DETALLE	EPS kPa	PIR kPa	DESCRIPCIÓN
ENSAYO DE LABORATORIO	15.396	28.243	CAPACIDAD
MODELO ANALÍTICO CALIBRADO	2.354	29.420	DEMANDA

### 3.8 Esfuerzos de flexión en láminas de acero

La revisión del comportamiento de las láminas de acero frente a esfuerzos de flexión, compara el esfuerzo resistente a flexión obtenido en el es-

tudio de materiales con los esfuerzos máximos a tracción y compresión obtenidos del modelo calibrado en los elementos tipo Shell.

**Tabla 13.** Comparación de esfuerzos a flexión obtenidos analítica y experimentalmente.

DETALLE	TRACCIÓN kPa	COMPRESIÓN kPa	DESCRIPCIÓN
ENSAYO DE LABORATORIO	87639.744	87639.744	CAPACIDAD
MODELO ANALÍTICO CALIBRADO	34341.780	31674.381	DEMANDA

## 4. Conclusiones

La vivienda de esta investigación con la disposición de paredes mostrada tiene una respuesta óptima ante cargas verticales y laterales que representan las acciones sísmicas. Su desempeño la convierte en una vivienda apta para zonas de alto riesgo sísmico.

Las deflexiones obtenidas para una carga de servicio 1.03 kPa (105 kg/m<sup>2</sup>) son menores que las **deflexiones admisibles** recomendadas por el código ACI-318 y el informe técnico emitido por la UEAtc. Por lo que se concluye que la vivienda de estudio cumple con este criterio de aceptabilidad.

La demanda por el sismo de diseño según la NEC-15, 22.158 kN (2259.42 kg) que equivale a 1.42W (siendo W el peso de la estructura) es menor que la **resistencia lateral** de la estructura 27.459 kN (2800 kg) que equivale a 1.76W en la dirección en que se aplicó la carga. La vivienda cumple con este criterio de aceptabilidad.

La **deriva máxima** obtenida (0.0067) en dirección de la aplicación de la carga lateral, no excede el límite de deriva inelástica (0.02) establecida en la norma NEC-15 [13]. Se puede concluir que la vivienda cumple con este criterio de aceptabilidad para la dirección en que se realizó el ensayo.

En el ensayo a carga lateral, al incrementar las fuerzas el comportamiento de la estructura se mantuvo en el **rango elástico** durante todo el ensayo en lo que se refiere a los elementos, pero se observa un comportamiento no lineal de la estructura al sobrepasar los 17.65 kN (1800 kg) aproximadamente, debido al rozamiento entre paneles y conexiones existentes. Debido a que la vivienda resistió la fuerza demandada por el sis-

mo de diseño en el rango elástico, se concluye que la vivienda tiene un comportamiento aceptable bajo cargas laterales.

Luego de realizar los ensayos a carga vertical y carga lateral, no se encontraron **daños visuales** en la estructura, esto se comprobó con el monitoreo de fisuras en los testigos de yeso realizado en el ensayo a carga lateral, en el cual se presentan fisuras pequeñas no generalizadas para las cargas a las que fue sometida la vivienda. Es decir, la vivienda cumple con este criterio de aceptabilidad.

Del **análisis de esfuerzos** realizado se concluye que los esfuerzos actuantes en los materiales núcleo de la vivienda (espuma de EPS y PIR), tanto para cargas verticales como para cargas laterales no exceden a los esfuerzos últimos resistentes de los materiales, por lo que se comprueba que la vivienda tuvo un buen desempeño a nivel de esfuerzos ya que no presento fallas por corte o compresión en las espumas de cubierta ni de pared durante los ensayos experimentales.

En caso de existir algún cambio en la disposición de paredes en la vivienda, se recomienda utilizar el modelo calibrado puesto que refleja un comportamiento cercano a la realidad.

Es importante realizar más ensayos de laboratorio en los paneles utilizados en las paredes, para tener un mayor conocimiento de su desempeño frente a cargas laterales.

Se sugiere cambiar el material de relleno de las paredes (espuma de EPS) que, si bien tuvo un buen desempeño durante los ensayos a carga lateral y vertical, este material no presentó una buena resistencia al calor al acondicionarlo para el cálculo de la densidad (ensayo de densidad), ya que el material se quemó y redujo su sección a la mitad.

## Reconocimiento

Gracias al personal del Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional por su colaboración durante la ejecución de esta investigación.

Gracias a la empresa KUBIEC por su contribución durante la realización de esta investigación.

## Referencias

- [1] M. Iza, *Modelación de un sistema estructural alternativo, prefabricado de bajo costo, para una vivienda de dos pisos. (Paneles de metálicos con inyección de poliuretano de alta densidad)*, Quito, Pichincha, 2012, p. 200.
- [2] C. Abeysinghe, D. Thambiratnam and N. Perera, *Flexural performance of an innovative Hybrid Composite Floor Plate System*, 2013, p. 26.
- [3] D. Bournas, G. Torrisi, F. Crisafulli and A. Pavese, *Experimental Investigation and Analytical Modeling of Prefabricated Reinforced Concrete Sandwich Panels*, vol. 14, Portugal, 2012.
- [4] NEC-15 Capítulo 9, *NEC-SE-VIVIENDA: Viviendas de hasta 2 pisos con luces de hasta 5 metros*, 2015.
- [5] KUBIEC, *KUTÉRMICO paneles tipo sánduche con aislamiento termoacústico*, Quito, Pichincha, 2015.
- [6] ASTM C271, Standard Test Method for Density of Sandwich Core Materials., ASTM, 2017.
- [7] ASTM C393, Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam., ASTM, 2017.
- [8] ASTM C365, Standard Test Method for Flatwise Compressive Strength of Sandwich Constructions, ASTM, 2017.
- [9] ASTM C364, Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions, ASTM, 2017.
- [10] ASTM E72, Standard Test Method of Conducting Strength Tests of Panels for Building Constructions, ASTM, 2017.
- [11] A. C. I. ACI 318S, *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario*, Estados Unidos, 2014.
- [12] NEC-15 Capítulo 1, *NEC-SE-CG: Cargas no sísmicas*, 2015.
- [13] NEC-15 Capítulo 2, *NEC-SE-DS: Peligro sísmico y requisitos de diseño sismo resistente*, 2015.



- [14] G. Parra and J. Sarango, *Análisis estadístico del periodo experimental de vibración de edificios aporricados de hormigón armado en el Distrito Metropolitano de Quito*. Quito, Pichincha, 2016.
- [15] B. Guillier, J. L. Chatelain, H. Tavera, H. Perfettini, A. Ochoa and B. Herrera, *Establishing Empirical Period Formula for RC Buildings in Lima, Peru: Evidence for the Impact of Both the 1974 Lima Earthquake and the Application of the Peruvian Seismic Code on High-Rise Buildings.*, vol. 85(6), *Seismological Research Letters*, 2014, pp. 1308-1315.
- [16] Unión Europea para la Idoneidad Técnica en la Construcción, “Informe técnico de la UEAtc para la evaluación de las obras realizadas con paneles sándwich de espuma de poliuretano sin CFC”, 1996.

# La construcción sostenible a partir del empleo de ladrillos tipo PET

Ing. Juan Carlos Moya MSc.<sup>1</sup>, Sr. Esteban Cevallos<sup>2</sup>, Sr. Erick Endara<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Docente - Investigador, Coordinador Unidad de Titulación Carrera de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática  
Universidad Central del Ecuador  
jmoya@uce.edu.ec juancmoya4@gmail.com

<sup>2</sup> Estudiante - Investigador, Carrera de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática  
Universidad Central del Ecuador

<sup>3</sup> Estudiante - Investigador, Carrera de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática  
Universidad Central del Ecuador

Información del artículo  
Recibido: julio 2018  
aceptado: septiembre 2018

## Resumen

El presente proyecto investigativo demuestra la problemática en la que se encuentra el Distrito Metropolitano de Quito, esto es debido al alto consumo por parte de la sociedad de materiales plásticos, entre ellos el polietileno de tereftalato (PET), los cuales no tiene un destino final apropiado. En primer lugar el proyecto proporciona factores favorables para una construcción sostenible, porque se intenta mitigar el problema de la contaminación y la disminución del uso de mamposterías tradicionales. El objetivo es brindar a la sociedad alternativas de construcción mediante el reciclaje de materiales de alto consumo a fin de conservar el medio ambiente, una forma de mitigación es la reutilización de las botellas plásticas de cualquier capacidad como elementos constructivos de mampostería. Esta construcción novedosa debe cumplir con parámetros que brinden seguridad a sus ocupantes, para ello la investigación determinará a través de ensayos en especímenes de mampostería las bases de diseño para la construcción con elementos reciclados, verificando los resultados con las normas vigentes en el país.

**Palabras clave:** mampostería con ladrillo tipo pet / tracción indirecta en botellas plásticas / resistencia a la compresión de prismas / tensión diagonal en muretes / adherencia con botellas plásticas / costo mampostería de botellas tipo pet.

## Abstrac

This research project demonstrates the problems in the Metropolitan District of Quito, due to the high consumption by the society of plastic materials including polyethylene terephthalate (PET) which does not have an appropriate final destination. In the first place, the project provides favorable factors for sustainable construction, because it tries to mitigate the problem of pollution and the reduction of the use of traditional masonry. The objective is to provide society with construction alternatives through the recycling of high consumption materials to conserve the environment, a way of mitigation is the reuse of plastic bottles of any capacity as building elements of masonry. This new construction must comply with parameters that provide security to its occupants, for this the research will determine through tests in masonry specimens the design bases for the construction with recycled elements, verifying the results with the norms in force in the Country.

**Keywords:** Typical pet brake mamposters / indirect traction in plastic bottles / resistance to prism compression / diagonal tension in mureters / adhesion with plastic bottles / cost pet bottle mamposters.

## 1. Introducción

El PET (polietileno de tereftalato) es uno de los residuos más abundantes mundialmente. Son elementos no retornables y tardan en degradarse entre 100 y 1.000 años. Mediante un proceso de reciclaje se puede reutilizarlo para conformar elementos aptos para la construcción, implementándolo en la creación de paredes o mamposterías logrando de esta manera una reducción significativa en la carga permanente o carga muerta de una edificación o vivienda. Al ser un elemento más liviano que los mampuestos tradicionales (ladrillos o bloques), se obtendrán estructuras más ligeras y se reducirían los costos de construcción.

El ladrillo PET podrá ser fabricado con diferentes envases o recipientes de plástico de distintas capacidades y el material de relleno (arena, tierra, espuma flex, paja, entre otros) puede variar dependiendo de la zona en donde se va a construir la vivienda. De esta manera se puede considerar como **construcción sostenible** debido a que reutiliza una gran cantidad de residuos de plásticos y otros elementos de sitio, evitando la explotación de materias primas a nivel de canteras para la producción de mampuestos de ladrillo o bloque.

Existe poca conciencia por parte del ser humano al momento de reciclar materiales que emplea de forma frecuente, una vez que los productos fueron consumidos, la mayoría de los envases de botellas plásticas PET son dispuestos en rellenos sanitarios, cauces, calles o tiraderos clandestinos; pero estos podrían ser reutilizados en la construcción como nuevas alternativas ecológicas, entre ellas el uso de botellas de plástico como ladrillo tipo PET en mampostería, permitiendo tener elementos sismo resistentes a bajo costo siempre y cuando participe o colabore la comunidad en la edificación de las mismas apoyando de esta manera con una alternativa para mitigar la contaminación ambiental que tanto afecta a ciudades y pueblos ecuatorianos.

En el cantón San Lorenzo de la provincia de Esmeraldas se utilizó cerca de 21.500 botellas para edificar una vivienda de aproximadamente 275m<sup>2</sup> de construcción<sup>1</sup>.

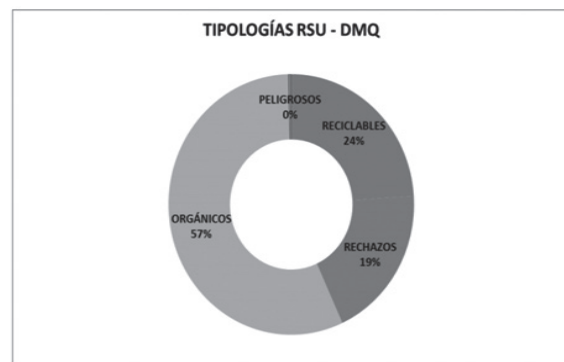
1 Celi, M., (2013). *Análisis del sistema constructivo con botellas recicladas PET, y su aplicación en el diseño de un centro de exposición*



Fotografía 1. Vivienda construida con ladrillos tipo PET.

Fuente: Universidad Técnica Particular de Loja.

En el Distrito Metropolitano de Quito DMQ se generan al día 2.037 toneladas de basura o residuos sólidos urbanos RSU de los cuales el 57% son residuos orgánicos, **el 24% es material reciclable**, 19% rechazos (papel higiénico, servilletas usadas, envases de espuma flex, envolturas de golosinas y caramelos) y un porcentaje bajo de residuos peligrosos.



Elaboración: Ing. Marcelo Castillo P.

Gráfico 1. Tipologías de los residuos sólidos urbanos en el DMQ.

Fuente: Emaseo (2016)<sup>2</sup>

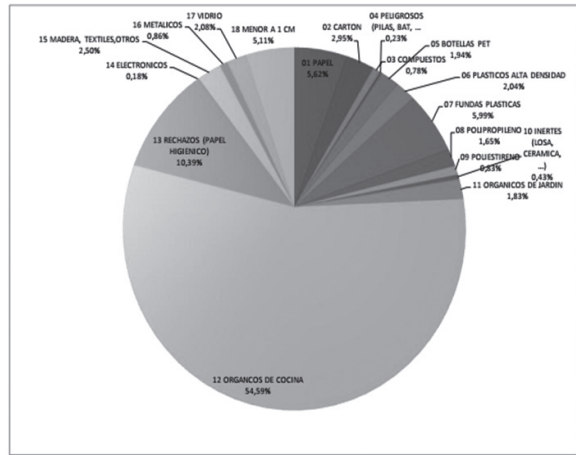
De los porcentajes descritos el material reciclable contiene un 1,94% de botellas PET que representan 38,572 ton/día se lo puede observar en el ítem quinto de la siguiente tabla.

(tesis de pregrado). Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador.

2 Consultoría para la realización de un estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos domésticos y asimilables a domésticos para el Distrito Metropolitano de Quito, Recuperado de: [http://www.emaseo.gob.ec/documentos/pdf/Caracterizacion\\_residuos.pdf](http://www.emaseo.gob.ec/documentos/pdf/Caracterizacion_residuos.pdf).

**Tabla 1.** Caracterización de los residuos sólidos del cantón Quito

CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS.- NIVEL CANTONAL												
CANTON QUITO.- URBANA Y RURAL												
Año: 2012		Población: 2.344.231										
CANTIDADES POR TIPO DE GENERADOR												
Subproducto	% Prom.	DOMESTICA	% Prom.	COMERCIAL	% Prom.	EDUCATIVA	% Prom.	MERCADOS	% Prom.	OTROS	% Promedio	TOTAL
PPC (kg/día/hab)		0,5254		0,1353		0,0253		0,1166		0,0476		0,8503
TOTAL (Ton/día)		1231,645		317,210		59,346		273,410		111,581		1993,192
01 PAPEL	5,29%	65,215	7,65%	24,275	14,42%	8,558	1,96%	5,365	7,73%	8,624	5,62%	112,008
02 CARTON	2,37%	29,204	5,28%	16,433	3,14%	1,885	2,77%	7,588	3,37%	3,761	2,95%	58,817
03 COMPUESTOS	0,40%	4,924	0,23%	0,731	11,14%	6,609	0,00%	0,000	2,98%	3,329	0,78%	15,593
04 PELIGROSOS (PILAS, BAT., ...)	0,29%	3,544	0,25%	0,788	0,04%	0,025	0,00%	0,000	0,15%	0,172	0,23%	4,529
05 BOTTELLAS PET	1,70%	20,943	2,78%	8,818	4,07%	2,418	1,28%	3,501	2,59%	2,889	1,94%	38,572
06 PLASTICOS ALTA DENSIDAD	2,13%	26,187	2,06%	6,549	4,21%	2,489	0,97%	2,654	2,40%	2,674	2,00%	40,564
07 FUNDAS PLASTICAS	5,53%	68,151	9,67%	30,667	5,23%	3,302	3,88%	10,618	6,11%	6,823	5,99%	119,361
08 POLIPROPILENO	1,54%	18,916	2,55%	8,080	5,45%	3,237	0,00%	0,000	2,46%	2,750	1,65%	32,802
09 POLIESTIRENO	0,73%	8,961	1,41%	4,477	2,88%	1,728	0,00%	0,000	1,30%	1,447	0,83%	16,595
10 INERTES (LOSA, CERAMICA, ...)	0,63%	7,748	0,08%	0,259	0,36%	0,212	0,00%	0,000	0,28%	0,312	0,43%	8,531
11 ORGANICOS DE JARDIN	2,58%	31,748	1,06%	3,369	0,14%	0,212	0,00%	0,000	1,04%	1,162	1,83%	36,482
12 ORGANICOS DE COCINA	51,36%	632,604	49,07%	155,643	24,47%	14,511	83,62%	228,613	50,79%	56,668	54,59%	1088,859
13 RECHAZOS (PAPEL HIGIENICO)	12,61%	155,297	6,82%	21,646	9,73%	5,772	5,39%	14,741	8,63%	9,633	10,39%	287,083
14 ELECTRONICOS	0,23%	2,879	0,19%	0,604	0,07%	0,041	0,00%	0,000	0,13%	0,141	0,18%	3,664
15 MADERA, TEXTILES, OTROS	2,83%	34,816	2,73%	8,654	4,89%	2,902	0,12%	0,328	2,79%	3,079	2,50%	49,780
16 METAUCOS	1,65%	20,373	0,79%	2,481	1,41%	0,835	0,00%	0,000	0,86%	0,958	0,86%	17,159
17 VIDRIO	2,55%	31,383	1,65%	5,249	4,10%	2,433	0,00%	0,000	2,12%	2,448	2,08%	42,514
18 MENOR A 1 CM	6,19%	76,234	5,83%	18,494	4,16%	2,467	0,00%	0,000	4,22%	4,704	5,11%	101,899



**Gráfico 2.** Composición de los residuos sólidos urbanos del cantón Quito

Fuente: Emaseo

Según estudios realizados por Emaseo en el DMQ con una población urbana y rural de 2'551.721 habitantes la producción o generación per cápita de residuos sólidos (PPC<sup>3</sup>) global, se encuentra, en promedio, en un valor de 0,850 kg/hab/día equivalentes a 319 kg/hab/año; siendo 0,879 kg/hab/día a nivel urbano y 0,779 kg/hab/día a nivel rural.

Se han obtenido valores sobre la generación de residuos sólidos en la capital a partir del año 2012, los cuales constan identificados en la tabla adjunta.

3 PPC: Producción per cápita de residuos sólidos: cantidad de residuos sólidos generados por persona en un día; kg/habitante/día.

**Tabla 2.** Caracterización de los residuos sólidos urbanos y rurales del cantón Quito

CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DOMÉSTICOS Y ASIMILABLES A DOMÉSTICOS									
CANTON QUITO									
Año: 2012		Población: 2.344.231							
CANTIDADES POR TIPO DE GENERADOR (EN TON/DIA)									
AÑO	POBLACION	DOMESTICA	COMERCIAL	EDUCATIVA	MERCADOS	OTROS	TOTAL		
PPC (kg/día/hab)		0,5254	0,1353	0,0253	0,1166	0,0476	0,8503		
2012	2.344.231	1.231,645	317,210	59,346	273,410	111,581	1.993,192		
2013	2.382.343	1.251,305	321,443	60,287	278,039	113,059	2.024,133		
2014	2.421.817	1.271,671	325,838	61,261	282,833	114,594	2.056,197		
2015	2.462.715	1.292,772	330,400	62,271	287,801	116,186	2.089,431		
2016	2.505.063	1.314,625	335,136	63,317	292,944	117,838	2.123,861		
2017	2.548.928	1.337,264	340,050	64,401	298,271	119,553	2.159,539		
2018	2.594.346	1.360,708	345,149	65,524	303,784	121,332	2.196,496		
2019	2.641.393	1.384,996	350,442	66,686	309,494	123,180	2.234,798		
2020	2.690.028	1.410,105	355,921	67,889	315,396	125,091	2.274,402		
2021	2.740.364	1.436,095	361,602	69,133	321,505	127,073	2.315,409		

Fuente: Emaseo

## 2. Justificación

### 2.1 Justificación teórica

Buscar nuevas alternativas constructivas y ecológicas que sirvan como elementos sismo resistentes a bajo costo, aprovechando materiales de la zona donde será la construcción y controlar la contaminación generada por el uso de grandes cantidades de energía para la elaboración de mampostería tradicional.

### Justificación práctica

Encontrar soluciones económicas, eficientes y seguras para edificaciones de diversos usos, a través de un estudio técnico que permita conocer las propiedades físico mecánicas de un elemento de mampostería; también contar con información acerca de esta alternativa de construcción ecológica siendo un aporte nuevo para la la comunidad.

## 3. Antecedentes

En la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Central del Ecuador se han realizado investigaciones acerca de la aplicación del ladrillo PET como elemento para la construcción sostenible combinando botellas de distintas capacidades, diferentes elementos de relleno y varias combinaciones del mortero de pega con los mampuestos para observar la adherencia de los elementos; de

dichos estudios se citan la condiciones más relevantes:

En una primera investigación realizada en enero de 2015 se verificó las propiedades de las mamposterías empleadas en la construcción de varias aulas en el colegio Liceo Internacional de Quito. Esta técnica la auto calificaron de manera inapropiada como antisísmica, se utilizaron botellas plásticas de 1.35 litros rellenas de arena, con la finalidad de estudiar la adherencia entre las botellas y el mortero se trabajó con botellas lisas, botellas con rugosidad y botellas con clavos diametralmente opuestos.

Al final de este se obtuvieron diferentes limitaciones tanto en la adherencia del conjunto (pasta de mortero - botellas) y un peso propio elevado ( $570 \text{ kg/m}^2$ ). Como recomendaciones de dicha investigación se sugiere realizar un nuevo estudio empleando botellas de menor capacidad y otro material de relleno para disminuir el peso del ladrillo PET.

En la segunda etapa de investigación realizada en mayo de 2017, se cambió el tipo de envases, empleando botellas de 0.50 litros, relleniéndolas de suelo del sitio de construcción (tierra), con la finalidad de aligerar el peso propio del ladrillo PET; además se empleó un aditivo plastificante para conseguir una mejor adherencia entre el mortero y los mampuestos.

Se obtuvieron resultados favorables al disminuir el peso propio aproximadamente en un 30% ( $394 \text{ kg/m}^2$ ) sin embargo, dicho valor aún sigue siendo elevado. El empleo del aditivo originó una pérdida en la resistencia del mortero, a pesar de este inconveniente se logró mejorar las propiedades físico-mecánicas del conjunto.

A partir de las ideas anteriormente expuestas, el propósito del presente estudio es conseguir un elemento que tenga un peso propio similar a los valores recomendados por la NEC 2015 (peso propio  $\leq 200 \text{ kg/cm}^2$ ) y con mejores propiedades físico-mecánicas a un bajo costo; con la finalidad de alcanzar estas características en los ladrillos PET se debe saber responder a las siguientes preguntas:

¿Cuál será el material de relleno para disminuir el peso propio?

¿De qué forma se deben rellenar las botellas?

¿Cómo mejorar la adherencia entre el mortero y el ladrillo PET?

¿Qué propiedades físico-mecánicas se logran mejorar?

¿Cuál es el costo de construcción de este tipo de mampostería?

## 4. Objetivos

### 4.1 Objetivo general

- Mejorar las bases de diseño para la construcción sostenible con mampostería de ladrillo tipo PET.

### 4.2 Objetivos específicos

- Establecer las propiedades físicas y mecánicas de los elementos que conforman la mampostería optimizada.
- Comprobar la adherencia entre el mortero y el ladrillo tipo PET optimizado.
- Determinar los costos de construcción por cada metro cuadrado de mampostería tipo PET.
- Comparar los resultados con los obtenidos en las investigaciones anteriores sobre la construcción sostenible con ladrillos PET.

## 5. Análisis de los materiales

En esta tercera etapa de investigación se emplearon botellas de 600 ml de capacidad, con una longitud de 24 cm, diámetro promedio de la botella 6,5 cm y un diámetro de 2,1 cm en la boca del envase; las mismas fueron rellenas de espuma flex reciclada y triturada previamente.





Fotografía 2. Caracterización de los ladrillos PET.



Autores: Esteban Cevallos / Erick Endara

Nuevamente en esta etapa de investigación se empleó el aditivo plastificante y como estudio complementario se utilizaron botellas con clavos diametralmente opuestos para verificar las condiciones de adherencia entre el mortero y los ladrillos PET

### 5.1 Propiedades físicas de la mampostería

Un sistema de mampostería deberá tener la capacidad para resistir las diferentes cargas a las que estará expuesta durante su vida útil como son: cargas gravitacionales, cargas sísmicas, presiones de tierra, acción de viento, entre otras; debe ser una barrera contra el ruido, contra el frío o el calor, además de resistir los daños que ocasionaría el fuego en caso de un incendio.

#### 5.1.1 Durabilidad

La durabilidad es la capacidad de resistir influencias ambientales y físicas, en el transcurso del tiempo, de un material de construcción trabajando por separado o conjuntamente.

En cuanto a la mampostería, específicamente se trata de las resistencias a los cambios de las condiciones naturales como son la humedad y la temperatura a la que están expuestos. Esta capacidad de la mampostería se evalúa realizando pruebas de congelación y descongelación, consistiendo en condiciones repetitivas de saturación con ciclos de humedecimiento y secado.

Dado que la vida útil o el tiempo de descomposición de las botellas plásticas, utilizadas como ladrillo PET de esta investigación, va desde 100 a 1.000 años, se considera que este material cumple satisfactoriamente con esta propiedad.

#### 5.1.2 Absorción

La absorción de una mampostería es la medida de porosidad de un bloque o ladrillo, por donde se puede filtrar algún tipo de líquido, tendiendo a la disgregación.

Debido a que el ladrillo PET está conformado por botellas plásticas, no absorberá ningún tipo de líquido de su alrededor, teniendo la característica de impermeable, evitando la disgregación del material, siendo este un gran problema en tipos de mampostería tradicional.

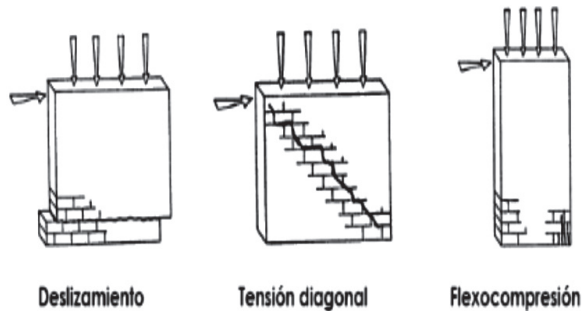
### 5.2 Propiedades mecánicas de la mampostería

La mampostería al estar formada por dos materiales que tienen características distintas (esfuerzo-deformación) y encontrarse sometidos a la acción de esfuerzos de compresión tienden a deformarse de diferente manera, es decir que tanto el mampuesto como el mortero de pega reaccionan indistintamente, lo que hace difícil su interacción.

Un prisma de mampostería sometido al efecto de una carga vertical, tanto el mortero como el mampuesto sufren deformaciones verticales y alargamientos transversales. Se debe destacar que, si los materiales tuviesen la oportunidad de trabajar independientemente, sus deformaciones serían distintas debido a sus respectivas propiedades elásticas.

La adherencia y las fuerzas de fricción entre las caras de contacto del mampuesto con el mortero, impiden el desplazamiento o deslizamiento rela-

tivo lo que genera que ambos tengan una misma deformación transversal que será un intermedio de las que se inducirían por separado.



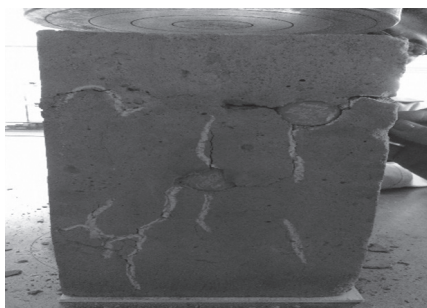
Autores: Moreno D. / Rojas S. / Gutiérrez C.

Gráfico 3. Posibles modos de falla en un muro de mampostería

El mecanismo de falla es el efecto generado en la mampostería debido a solicitaciones de compresión, corte, flexión, entre otros, por el cual se ocasionan procesos, secuencias de daño que provocan las fallas en el muro de mampostería. Cuando los muros de mampostería no cuentan con un adecuado confinamiento, una cantidad suficiente o detalle adecuado del refuerzo en los elementos confinantes, o no presentan ningún tipo de refuerzo, se han detectado diferentes tipos de patrones de agrietamiento, que dan origen a fallas en los muros.

### 5.2.1 Falla por compresión axial

Debido a la compresión axial, la falla podrá presentarse por aplastamiento de las piezas, pero este efecto también puede darse por agrietamiento vertical producido por deformaciones transversales que acompañan a la deformación longitudinal y que debido al efecto de junta pueden ser incrementadas en las piezas.



Fotografía 3. Ensayo a compresión axial de prismas de mampostería PET.

Autores: Fernando Gamboa / Andrea Recalde

Cuando el agrietamiento vertical es en exceso, este produce inestabilidad del elemento de mampostería y su falla. El aplastamiento del mortero solamente, no ocasiona, generalmente, la falla del elemento, ya que por estar colocado en capas delgadas es retenido por las piezas y no generan la inestabilidad del conjunto. (Meli R. & Reyes A., 1992).



Fotografía 4. Ensayo a compresión axial de prismas de mampostería PET

Autores: Esteban Cevallos / Erick Endara

### 5.2.2 Falla por tensión diagonal

En un muro las cargas laterales inducen esfuerzos de tensión diagonal que pueden causar la falla del muro, se produce una grieta diagonal que atraviesa indistintamente de forma parcialmente recta las piezas de mampostería y el mortero, formándose desde el centro del muro, creciendo hasta los extremos del mismo.

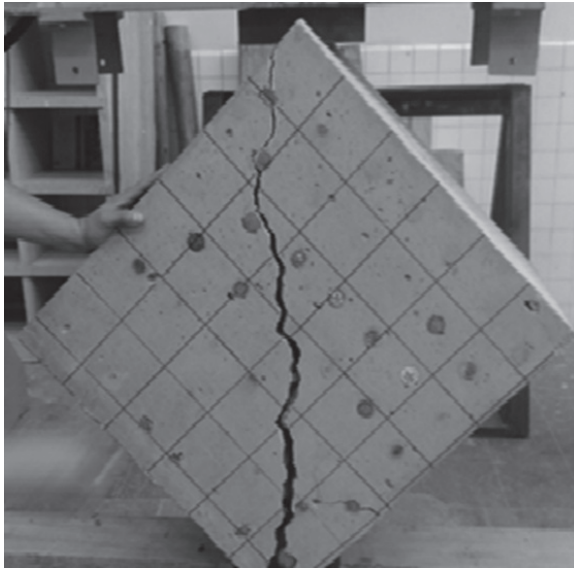


Fotografía 5. Ensayo a compresión axial de prismas de mampostería PET

Autores: Esteban Cevallos / Erick Endara



La falla por tensión diagonal se da cuando los mampuestos son de baja resistencia y tienen buena adherencia con el mortero, de lo contrario la falla se presentaría por esfuerzos tangenciales en las juntas.



**Fotografía 6.** Ensayo a tensión diagonal de muretes de mampostería PET.

**Autores:** Fernando Gamboa / Andrea Recalde

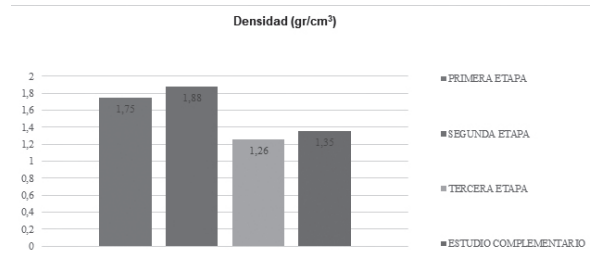
## 6. Análisis e interpretación de los resultados

**Tabla 3.** Análisis comparativo de las propiedades de la mampostería PET

PROPIEDAD	1° ETAPA	2° ETAPA	3° ETAPA	ESTUDIO COMPLEMENTARIO
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	1.75	1.88	1.26	1.35
Peso unitario (kg/m <sup>2</sup> )	570.50	394.13	301.73	324.00
Resistencia a tensión diagonal (MPa)	0.09	2.22	0.17	0.25
Resistencia a compresión axial (MPa)	0.63	3.47	0.69	1.26
Costo unitario (USD /m <sup>2</sup> )	52.60	42.02	81.01	60.62

**Autores:** Esteban Cevallos / Erick Endara

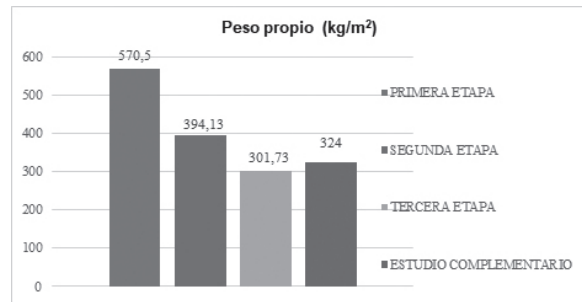
Luego de realizar los ensayos de laboratorio (densidad, tracción indirecta, compresión axial y tensión diagonal) en los elementos y muretes representativos de la mampostería PET, a continuación se detalla un análisis global de las diferentes etapas de la investigación realizada en la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Central del Ecuador.



**Gráfico 3.** Densidad de la mampostería PET.

**Autores:** Esteban Cevallos / Erick Endara

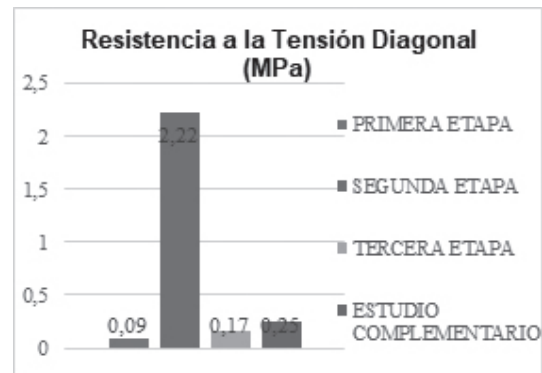
### 6.2 Peso propio



**Gráfico 4.** Peso propio de la mampostería PET.

**Autores:** Esteban Cevallos / Erick Endara

### 6.3 Resistencia a la tensión diagonal



**Gráfico 5.** Resistencia a tensión diagonal de la mampostería PET.

**Autores:** Esteban Cevallos / Erick Endara

### 6.4 Resistencia a la compresión axial

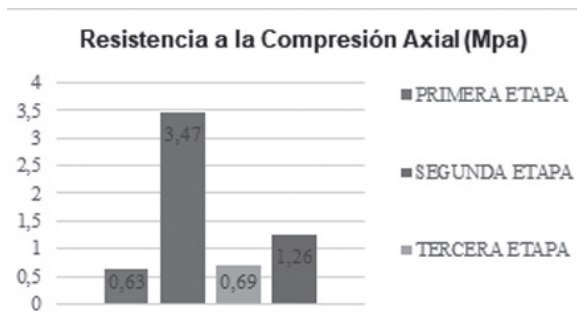


Gráfico 6. Resistencia a compresión axial de la mampostería PET.

Autores: Esteban Cevallos / Erick Endara

### 6.5 Costo unitario

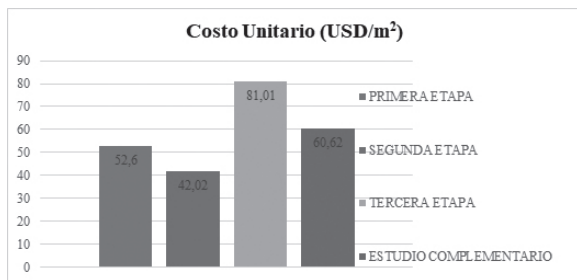


Gráfico 7. Costo Unitario de la mampostería PET.

Autores: Esteban Cevallos / Erick Endara

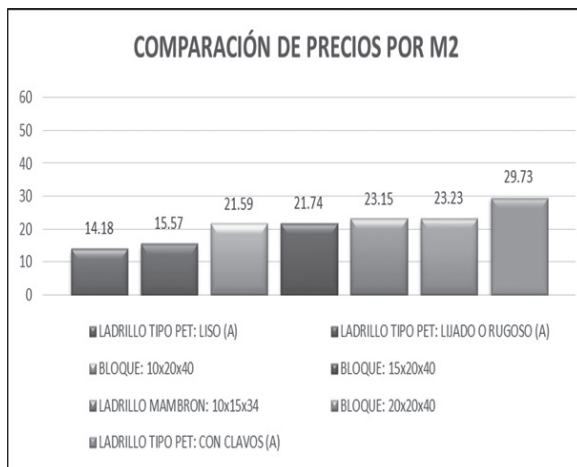


Gráfico 8. Costo unitario de diversos tipos de mampostería.

Autores: Fernando Gamboa / Andrea Recalde

## 7. Conclusiones

Los muretes construidos con botellas PET y clavos poseen menor densidad que los de la primera etapa en 22.86% y que los de la segunda etapa en 28.19%, sin embargo, tiene un ligero aumento de 0.09 gr/cm<sup>3</sup> que representa 7.38% de incremento al valor de los muretes construidos con elementos rellenos únicamente de espuma flex.

De igual manera el peso propio de los muretes construidos con botellas PET y clavos son más livianos en 43.21% a los de la primera etapa y son más livianos en 17.79% que los elementos de la segunda etapa y al igual que la densidad tienen un incremento del 7.38% al valor de los muretes de la tercera etapa.

Los resultados nos indican que los muretes de la segunda etapa (botellas rellenas con suelo de sitio) son los que presentan la mayor resistencia tanto en tensión diagonal 2,22 MPa como en compresión axial 3,47 MPa, en comparación a todos los demás elementos estudiados; por lo tanto se encuentra dentro de los parámetros permisibles según la NEC\_SE\_VIVIENDA, viviendas hasta dos pisos con luces hasta 5 metros, convirtiendo a este mampuesto en una alternativa para la construcción sostenible de viviendas.

Se evidenció que la adición de clavos diametralmente opuestos además de permitir una mejor adherencia entre el mortero y los ladrillos PET aporta en un incremento a la resistencia del elemento tanto en tensión diagonal como a la compresión axial.

Los muretes construidos en la segunda etapa son los más económicos que se obtuvieron a lo largo de esta investigación, sin embargo el costo de los muretes de la tercera etapa podría disminuir si se involucra a la comunidad en el reciclaje, acopio, limpieza y trituración del poliestireno expandido (espuma flex) que se utiliza como relleno de las botellas, de esta manera se tendría una reducción del 34,3% del costo con una mampostería de bloque y hasta un 38,7% del costo de una mampostería de ladrillo mambro.

El uso del aditivo plastificante con la finalidad de mejorar la adherencia entre el mortero y las bote-

llas PET logra que la mezcla posea mayor trabajabilidad, sin embargo, ocasiona una pérdida del 25% del valor de resistencia a la compresión y no alcanza su propósito de mejorar la adherencia debido a la superficie lisa de las botellas PET.

El empleo del ladrillo PET elaborado en esta investigación, es una alternativa viable y sostenible para reducir los impactos negativos y de esta manera mitigar la contaminación ambiental, debido a que se genera un proceso de reciclaje y reutilización de dos elementos altamente contaminantes, como son las botellas PET y la espuma flex.

Finalmente, luego de analizar todos los resultados obtenidos en la presente investigación se puede afirmar que se ha mejorado la densidad, el peso propio y las resistencias a compresión axial y tensión diagonal al emplear como relleno el suelo de sitio (segunda etapa), sin embargo, la adherencia entre el mortero y las botellas PET sigue siendo una gran debilidad del sistema de mampostería propuesto.

## 8. Referencias bibliográficas

- Cabrera O. & Ruales R. (30 de 08 de 2017). Repositorio Universidad Central. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/12022/1/T-UCE-0011-303.pdf>
- Emaseo. (2016). Empresa pública metropolitana de aseo de Quito. Obtenido de Emaseo: <http://www.emaseo.gob.ec/>
- Gallo Ortiz, G.O., Espino Márquez, L. I., & Olvera Montes, A.E. (2005). Diseño Estructural de casas habitación. En Diseño estructural de casas habitación. México D.F.: McGraw-Hill.
- Gamboa F. & Recalde A. (2015). Bases de diseño para la construcción sostenible con mampostería de ladrillo tipo PET.
- NEC. (2015). Mampostería estructural, Capítulo 10. Norma Ecuatoriana de la Construcción.

# Diseño a flexión de vigas de hormigón simplemente apoyadas utilizando lógica difusa

Santamaría J. L.<sup>\*,\*\*</sup>; Morales L.<sup>\*</sup>

\*Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, Carrera de Ingeniería Civil, Quito, Ecuador

\*\*Autor correspondiente

e-mail: jsantamaria@uce.edu.ec

Información del artículo  
Recibido: julio 2018  
aceptado: septiembre 2018

## Resumen

Las vigas de hormigón armado son elementos estructurales esenciales, muy utilizadas en toda infraestructura por lo que su diseño se hace recurrente. Diferentes códigos de construcción son empleados para su diseño, mismos que utilizan ecuaciones o ábacos para calcular el acero de refuerzo. El presente estudio muestra una metodología alternativa para determinar el acero de refuerzo de vigas de hormigón armado, simplemente apoyadas, sometidas a cargas uniformemente distribuidas, a través del uso de la teoría de lógica difusa. Un Sistema de Inferencia Lógico (SIL) tipo Sugeno fue desarrollado a partir de datos provenientes del diseño realizado con el código de construcción ACI 318 -14 de los Estados Unidos y el uso del método de agrupamiento sustractivo de datos y ANFIS. Los resultados indican que el modelo difuso tipo Sugeno es capaz de predecir nuevos datos de una manera adecuada ( $R^2=95.5\%$ ) y que podría ser utilizado para el diseño de vigas por cuanto el área del acero de refuerzo colocado efectivamente en una viga no necesita ser exactamente igual al área de acero calculada. Además, el método propuesto es muy flexible y puede ser extendido al diseño de otros elementos estructurales siempre y cuando se disponga de datos reales o experimentales para realizar la modelación difusa.

**Palabras clave:** diseño de vigas de hormigón, agrupamiento sustractivo de datos, ANFIS, lógica difusa

## Abstract

Concrete reinforced beams are essential structural elements that are commonly used in every infrastructure, which makes their design to become recurrent. Several construction building codes are utilized for designing beams using equations or correlations to compute the area of steel needed. The present study illustrates an alternative framework in order to determine the area of steel for reinforced simple supported concrete beams, subjected to uniform loads through the use of fuzzy set theory. A Sugeno type Fuzzy Inference System (SIL) was developed based on actual data resulting from using the ACI 318-14, a United States building code, and the use of subtractive clustering method and ANFIS. The results indicate that the Sugeno type fuzzy model is able to predict new data very well ( $R^2=95.5\%$ ), and that it could actually be used for designing concrete beams since the actual area of steel placed in the beam is not necessarily exactly the same as the calculated area. Furthermore, the proposed methodology could be extended to the design of other structural elements as long as real or experimental data are available for performing the fuzzy modeling.

**Keywords:** Concrete beam design, concrete, subtractive clustering method, ANFIS, fuzzy logic.

## 1. Introducción

Las vigas de hormigón armado son elementos estructurales muy utilizados en la construcción de proyectos de ingeniería ya que comprenden gran parte de toda infraestructura física, especialmente aquella destinada a brindar servicios de vivienda. Razón por la cual se requiere que su diseño se lo lleve a cabo de una manera muy frecuente. Una viga se la puede definir como un elemento estructural que soporta principalmente cargas o fuerzas que actúan perpendicular a su eje longitudinal, soportando esfuerzos de flexión generados por momentos actuantes en sus extremos. Las vigas al ser parte de una estructura son de vital importancia en el funcionamiento deseado de la misma y es por esta razón que fueron escogidas en el presente estudio.

Diferentes tipos de vigas pueden ser utilizadas en la construcción tomando en cuenta su sección transversal (rectangulares, sección "T" o "I"), tipo de apoyo (en cantiléver, simplemente apoyadas o empotradas) y el tipo de carga actuante sobre ellas (carga puntual o uniformemente distribuida). Para efectos de ilustrar el procedimiento de diseño de vigas de hormigón utilizando lógica difusa, se escogieron vigas rectangulares simplemente apoyadas que soportan cargas distribuidas triangulares, rectangulares y trapezoidales. Sin embargo, la metodología empleada en el presente estudio es aplicable para cualquier tipo de elemento estructural que se considere.

Para realizar el diseño estructural de un elemento de hormigón armado se utilizan procedimientos o normativas, llamados códigos de construcción, que han sido previamente establecidos y aceptados y son de aplicación y uso obligatorio dentro de una determinada zona geográfica. Por ejemplo, en el Ecuador se utiliza la Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC), mismo que está basado en el código de los Estados Unidos (ACI 318 -14). Cuando se calcula el área de acero de refuerzo que se debe colocar en una sección transversal de un elemento estructural, en este caso una viga rectangular, se obtienen resultados "exactos", con varias cifras decimales. Todo esto en razón de que dichos resultados provienen de la evaluación de ecuaciones formuladas para el efecto.

Sin embargo, en la práctica, dichos resultados obtenidos del diseño no se los puede colocar en su cantidad exacta ya que dichas áreas de acero de refuerzo calculadas deben ser convertidas a su equivalente de área de varillas comerciales (disponibles en el mercado). Dicha área efectiva de acero que será colocada en la viga es un valor aproximado del área calculada. De hecho, el área de acero seleccionada es un valor cercano al calculado y, preferiblemente, estará por encima de dicho valor (mayor al calculado). Lo que significa que la cuantía de acero colocada no es precisa sino aproximada.

La teoría de lógica difusa es una herramienta idónea cuando se habla de valores aproximados y no precisos. Si se considera el uso de lógica difusa en problemas de ingeniería se debe tomar en consideración la tolerancia a la imprecisión [1]. Existen muchos casos en los que ser preciso no influye determinantemente en el resultado. De hecho, estar cercano al valor calculado es usualmente suficiente para conseguir el objetivo propuesto. Además, se hace necesario tomar en consideración que los códigos de construcción incluyen los denominados factores de seguridad en sus cálculos y resultados; lo cual proporciona un rango de seguridad en los diseños obtenidos. En consecuencia, el uso de la teoría de lógica difusa no influiría significativamente en los resultados finales por cuanto no se usan los valores exactos de diseño, sino aproximados.

El presente estudio tiene por objeto presentar una metodología alternativa para estimar la cuantía de acero de refuerzo ( $A_s$ ) en vigas de hormigón rectangulares simplemente armadas, simplemente apoyadas, y sometidas a cargas distribuidas de tipo triangular, rectangular y trapezoidal a través de la utilización de la teoría de lógica difusa. Un modelo de inferencia lógico capaz de predecir cantidades de acero de refuerzo para vigas fue desarrollado utilizando el método automático para sistemas de inferencia lógicos conocido como: Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems (ANFIS) según sus siglas iniciales del idioma inglés. Dicho procedimiento emplea datos reales sean estos calculados o experimentales del tipo entrada - salida (I/O), conocidos como conocimiento



previo para crear funciones de membresía (FM) y reglas difusas del tipo condicional (*If – then*) que permiten estimar o predecir nuevos datos.

### 1.1. Teoría de lógica difusa

La teoría de lógica difusa es una teoría relativamente nueva que fue desarrollada por Zadeh en [2] con el fin de explicar cómo la imprecisión o incertidumbre puede ser manejada en la solución de problemas. De hecho, lógica difusa es una poderosa herramienta que puede ser utilizada para entender sistemas complejos donde no se dispone de funciones matemáticas [1]. Lógica difusa es una herramienta muy efectiva que permite relacionar datos de entrada con datos de salida y brindar información que permite ganar conocimiento del sistema que se está estudiando. Esta teoría emplea Sistemas de Inferencia Lógicos (SILs) denominados Fuzzy Inference Systems (FIS) por sus siglas en idioma inglés, los cuales incorporan variables lingüísticas relacionadas a través del uso de las denominadas reglas difusas del tipo antecedente – consecuente (*If – then*) comúnmente utilizadas por las personas.

### 1.2 Sistema de inferencia lógico (SIL)

Los SILs o también llamados modelos difusos, son conocidos como funciones universales no lineales aproximadas capaces de predecir o estimar nuevos datos basados en conocimiento previo [1]. Un SIL está formado por dos partes fundamentales: 1) Conocimiento base, y 2) Mecanismo de inferencia (ver Fig. 1) y son capaces de estimar un resultado mediante el uso de algoritmos de razonamiento aproximado. El conocimiento base comprende el conocimiento previo que incluye datos de entrada y salida (I/O); así como también, la información disponible resultante de la observación del sistema y las reglas difusas que relacionan las variables consideradas. Con respecto al mecanismo de inferencia lógico, los métodos más utilizados son los de Mamdani [3,4], Sugeno [5] y Tsukamoto [6]. De los mencionados procedimientos, solamente los métodos de Sugeno y Tsukamoto producen como resultados valores no difusos (valores discretos).

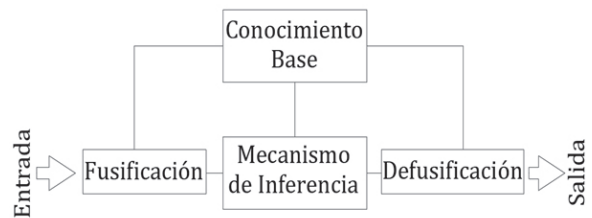


Figura 1. Funcionamiento del Sistema de Inferencia Lógico (SIL).

El razonamiento lógico que es realizado por los SILs se lo lleva a cabo de la siguiente manera según [7]. Primeramente, se asigna los llamados grados de membresía a los valores o datos de entrada mediante la utilización de las funciones de membresía (FM) y a este proceso se lo conoce como fusificación. Luego se combinan los grados de membresía a través de una operación difusa (T-norm) con el fin de obtener los pesos respectivos llamados “firing strengths” en idioma inglés. Después, se genera los valores consecuentes correspondientes a cada regla difusa basados en los pesos calculados, para finalmente compilar todos los consecuentes y producir un valor discreto.

### 1.3 Funciones de membresía (FM) y reglas difusas (*If – then*)

Una FM se la puede definir como una función matemática que describe a un conjunto difuso y se la utiliza para asignar grados de membresía a un determinado elemento. Las formas de las FM pueden ser variadas: triangular, trapezoidal o gaussiana entre otras; sin embargo, la característica de dichas curvas es que su altura sea la unidad como se indica en la Fig. 2. Las reglas difusas son del tipo condicional de la forma *If – then*, donde *e* son los nombres de los conjuntos difusos, mismos que son caracterizados por sus respectivas FM. Si utilizamos el mecanismo de inferencia lógico Sugeno [5], se tiene conjuntos difusos solo en la premisa () de la regla difusa del tipo *If – then*, mientras que la parte consecuente () está descrita por una función matemática no difusa. Por ejemplo, la expresión “si el esfuerzo de compresión del hormigón es alto (), entonces la relación agua–cemento es W/C ()”. En este caso se utiliza un conjunto difuso que corresponde al esfuerzo de compresión (variable), donde se puede observar cómo se in-

cluye el uso de términos lingüísticos comúnmente usados por las personas como “alto”, el cual es caracterizado por una función, que es una FM. En lo que respecta al valor consecuente ( $W/C$ ), este es un valor discreto.

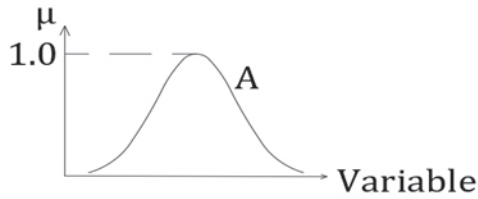


Figura 2. Función de membresía (FM) tipo gaussiana.

## 2. Metodología

La Fig. 3 ilustra la metodología que será aplicada a fin de estimar el acero de refuerzo en vigas simplemente apoyadas, de sección rectangular, que trabajan a flexión y que están sometidas a cargas uniformemente distribuidas.



Figura 3. Metodología de la investigación.

### 2.1 Datos (I/O)

Para el cálculo del acero de refuerzo ( $A_s$ ) se utilizaron vigas de sección rectangular, comúnmente utilizadas y diseñadas en el medio, cuyas características son: base ( $b$ ) entre 25 cm y 40 cm; altura ( $h$ ) entre 40 cm y 70 cm; carga distribuida ( $q_u$ ) entre 3.5 T/m a 13.5 T/m de tipo rectangular, trapezoidal y triangular, y luces ( $L$ ) entre 3 m y 10 m, según se observa en la Fig. 4. El valor de  $A_s$  corresponde a los extremos de la carga trapezoidal medida desde el apoyo. El código empleado para el diseño de las vigas de hormigón fue el Código de Construcción ACI 318-14 de los Estados Unidos y los parámetros de diseño se encuentran compilados en la Tabla 1. Un total de 105 vigas fueron diseñadas para generar datos del tipo de entrada – salida (I/O), de los cuales se escogió los datos para entrenar (TR) y chequear (CH) el modelo ANFIS (ver Tabla 2). 75 y 30 filas de datos fueron escogidas al azar para entrenar y chequear el referido modelo

difuso que será utilizado para generar un sistema de inferencia lógico (SIL) tipo Sugeno capaz de estimar el  $A_s$  necesario para resistir las condiciones preestablecidas de diseño.

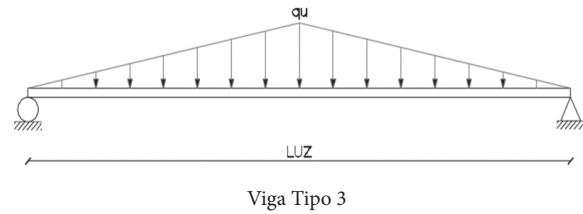
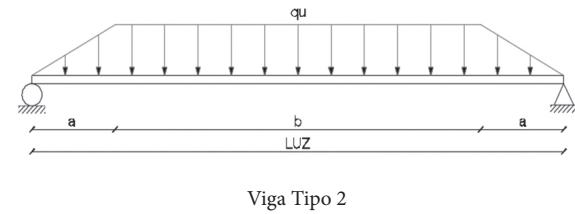
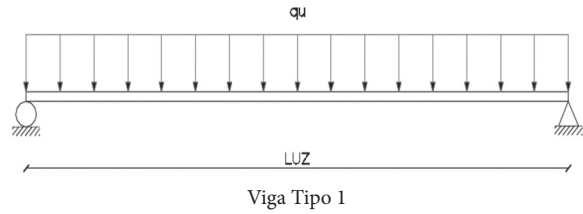


Figura 4. Esquema de vigas sometidas a cargas distribuidas.

Tabla 1. Parámetros de diseño

Parámetro	Valor
Resistencia a la compresión del hormigón ( $f'_c$ ) =	21 MPa a 35 MPa
Límite de fluencia del acero de refuerzo ( $f_y$ ) =	4200 Kg/cm <sup>2</sup>
Deformación mínima del acero a mas traccionado ( $\xi_t$ ) =	0.005 mm/mm
Deformación última del hormigón ( $\xi_{cu}$ ) =	0.003 mm/mm
Deformación unitaria del acero ( $\xi_s$ ) =	0.0021 mm/mm
Recubrimiento =	4 cm
Estribo =	10 mm



Tabla 2. Datos utilizados para la modelación difusa

Nº	Viga Tipo	f'c (Kg/cm <sup>2</sup> )	b (m)	h (m)	luz (m)	a (m)	qu (Kg/m)	As (cm <sup>2</sup> )	Dato
1	1	210	25	40	4	0.0	4	6.88	TR
2	1	210	25	45	5	0.0	4.5	11.00	TR
3	1	210	30	45	6	0.0	4	14.26	TR
4	1	210	30	55	7	0.0	4.5	17.28	CH
5	1	210	30	60	8	0.0	4	18.05	TR
6	1	210	25	40	4	0.0	5	8.87	CH
7	1	210	30	45	5	0.0	5.5	13.50	TR
8	1	240	25	40	4	0.0	4	6.78	TR
9	1	240	25	40	3	0.0	5	4.64	TR
10	1	240	30	45	5	0.0	6	14.60	CH
11	1	240	30	55	6	0.0	7	19.75	TR
12	1	240	35	60	7	0.0	8	28.42	TR
13	1	240	30	45	4	0.0	9	13.92	TR
14	1	240	35	55	5	0.0	11	21.29	CH
15	1	280	25	40	4	0.0	4	6.69	TR
16	1	280	35	55	6	0.0	10	28.48	CH
17	1	280	35	60	7	0.0	8	27.56	TR
18	1	280	30	55	8	0.0	4	19.59	TR
19	1	280	35	65	9	0.0	6	31.49	TR
20	1	280	40	70	8	0.0	10	38.29	CH
21	1	280	25	45	7	0.0	3.5	17.24	TR
22	1	300	25	40	4	0.0	4	6.66	TR
23	1	300	30	50	6	0.0	6.5	20.12	TR
24	1	300	25	40	5	0.0	5	14.09	CH
25	1	300	35	60	8	0.0	7.5	34.64	TR
26	1	300	25	45	4.5	0.0	8	15.87	CH
27	1	300	30	50	7	0.0	5	21.23	TR
28	1	300	30	55	5.5	0.0	9.5	22.15	TR
29	1	350	25	40	4	0.0	4	6.59	CH
30	1	350	30	50	5	0.0	10	21.20	TR
31	1	350	30	45	6	0.0	6	20.98	TR
32	1	350	30	55	7	0.0	8	31.12	TR
33	1	350	35	65	8	0.0	9	37.18	CH
34	1	350	40	65	9	0.0	8.5	44.80	TR
35	1	350	30	55	5.5	0.0	12	28.38	TR
36	2	210	25	40	4.5	1.1	4.5	9.33	TR
37	2	210	25	45	5.5	1.4	4	10.82	CH
38	2	210	35	60	6.5	1.6	8	21.99	TR
39	2	210	35	60	7.5	1.9	6.5	24.17	TR
40	2	210	35	60	8.5	2.1	4.5	21.01	CH
41	2	210	25	40	3.5	0.9	6	7.29	TR
42	2	210	30	50	5	1.3	7	13.75	TR
43	2	240	25	40	4.5	1.1	5	10.32	CH
44	2	240	25	40	3.5	0.9	5.5	6.52	TR

45	2	240	30	50	5.5	1.4	7	16.79	TR
46	2	240	35	60	6.5	1.6	8.5	23.07	TR
47	2	240	40	65	7.5	1.9	9	29.93	CH
48	2	240	25	45	3.5	0.9	9.5	10.13	TR
49	2	240	30	55	4.5	1.1	12	17.08	TR
50	2	280	25	45	5	1.3	5.5	11.99	TR
51	2	280	30	55	5.5	1.4	11	24.07	CH
52	2	280	35	55	6.5	1.6	8.5	25.60	TR
53	2	280	30	55	7.5	1.9	5	19.75	TR
54	2	280	35	65	8.5	2.1	7.5	32.51	CH
55	2	280	35	55	6	1.5	11	28.77	TR
56	2	280	25	40	3.5	0.9	4	4.59	TR
57	2	300	25	40	4	1.0	6	9.42	TR
58	2	300	30	45	5.5	1.4	7	19.01	CH
59	2	300	30	45	6.5	1.6	5	18.96	CH
60	2	300	35	60	7.5	1.9	8	28.91	TR
61	2	300	30	45	5	1.3	9	20.44	TR
62	2	300	30	50	6.5	1.6	6.5	21.93	TR
63	2	300	35	55	9	2.3	5	29.15	TR
64	2	350	35	60	8	2.0	8.5	35.39	TR
65	2	350	30	55	5.5	1.4	11	23.17	CH
66	2	350	35	55	7.5	1.9	7.5	29.75	TR
67	2	350	30	55	6.5	1.6	9	27.05	TR
68	2	350	35	65	8	2.0	9.5	35.78	TR
69	2	350	40	65	8.5	2.1	9.5	40.31	TR
70	2	350	30	55	5.5	1.4	13.5	29.44	CH
71	3	210	25	40	5	2.5	5	0.00	CH
72	3	210	25	45	5.5	2.8	6	10.82	TR
73	3	210	30	55	7.5	3.8	6	21.99	TR
74	3	210	35	55	8	4.0	6	24.17	CH
75	3	210	30	55	8.5	4.3	5	21.01	TR
76	3	210	25	45	5.5	2.8	6	7.29	TR
77	3	210	30	50	6	3.0	7	13.75	TR
78	3	240	25	40	4.5	2.3	6	10.32	TR
79	3	240	25	40	4.5	2.3	6.5	6.52	CH
80	3	240	30	45	6	3.0	7	16.79	CH
81	3	240	30	50	6.5	3.3	8	23.07	TR
82	3	240	35	65	8.5	4.3	9.5	29.93	TR
83	3	240	30	50	5	2.5	11	10.13	TR
84	3	240	30	55	5.5	2.8	12.5	17.08	TR
85	3	280	25	40	5.5	2.8	5	11.99	TR
86	3	280	35	55	7	3.5	11	24.07	CH
87	3	280	35	55	7.5	3.8	9.5	25.60	TR
88	3	280	35	55	9.5	4.8	6	19.75	TR
89	3	280	35	65	10	5.0	7.5	32.51	TR
90	3	280	35	65	8.5	4.3	11	28.77	TR
91	3	280	30	50	8.5	4.3	4.5	4.59	CH
92	3	300	25	40	5	2.5	5.5	9.42	CH

93	3	300	30	50	6.5	3.3	8.5	19.01	TR
94	3	300	30	50	6.5	3.3	6.5	18.96	TR
95	3	300	35	60	9	4.5	8.5	28.91	TR
96	3	300	25	45	5	2.5	9	20.44	TR
97	3	300	30	55	8.5	4.3	6.5	21.93	TR
98	3	300	30	55	6.5	3.3	11.5	29.15	CH
99	3	350	25	40	4.5	2.3	5.5	35.39	TR
	3	350	30	55	6.5	3.3	11	23.17	TR
	3	350	30	45	7	3.5	7	29.75	TR
	3	350	30	55	7.5	3.8	9.5	27.05	CH
	3	350	40	65	9.5	4.8	11	35.78	TR
	3	350	40	65	10	5.0	10	40.31	CH
	3	350	30	50	6	3.0	13	29.44	TR

## 2.2 Modelación difusa

La modelación difusa comprende el procedimiento para desarrollar un SIL. Existen dos enfoques para crear modelos difusos [8]. El primero es llamado *enfoque directo* y consiste en crear un SIL basado únicamente en el conocimiento del técnico o experto quien conoce muy bien el funcionamiento de un sistema. En este caso el experto elabora las funciones de membresía, las reglas difusas, escoge un SIL apropiado y evalúa el modelo difuso. El segundo enfoque es conocido como *identificación del sistema* y se basa en la utilización de datos del tipo I/O reales a fin de generar de una manera automatizada un SIL tipo Sugeno. En el presente estudio se utilizó esta técnica a fin de estimar el de una viga simplemente armada y simplemente apoyada sometida a cargas uniformemente distribuidas.

## 2.3 Identificación del sistema

Para la realización de la identificación del sistema se requiere del cumplimiento de dos fases que son la *identificación de la estructura* y la *identificación de parámetros* [9]. La primera fase consiste en establecer las particiones o agrupamiento de los datos I/O, el número y las reglas difusas de la forma *If - then*. Los centros de los grupos de datos (clústeres) son identificados mediante el método de agrupamiento sustractivo [10] y son los que determinan el número de reglas difusas y las funciones de membresía que constituyen los antecedentes. En la segunda fase se realiza el ajuste

de los parámetros del modelo a fin de minimizar errores a través de ANFIS.

### 2.3.1 Identificación de la estructura

Como se mencionó anteriormente, agrupamiento sustractivo [10] es el método de agrupamiento utilizado para determinar el número de reglas difusas y las funciones de membresía. En este método, cualquier punto es considerado como un centro del grupo o clúster, reduciendo la carga computacional significativamente, aun para un número grande de variables de entrada. Este método es rápido ya que no envuelve optimización no lineal y es recomendado cuando no se conoce el número posible de centros de los clústeres. Por las razones antes mencionadas se utilizará este procedimiento en la presente investigación.

#### 2.3.1.1 Agrupamiento sustractivo

En el presente método [10], cada punto de datos es considerado como un potencial centro del clúster y el valor potencial ( $P_i$ ) de cada punto ( $x_i$ ) está definido por (1). Un punto de datos con muchos puntos alrededor tendrá alto valor potencial y el punto con mayor valor potencial será asignado el primer centro. El valor de  $P_i$  se lo puede calcular con (2), donde  $\beta$ , una constante positiva, es el radio de influencia del centro del clúster. Valores grandes de  $\beta$  producen menos centros de clústeres mientras que valores pequeños generan más centros. Este parámetro es especificado por el usuario y debe ser basado en los resultados que se produzcan de acuerdo a lo deseado. Luego los valores potenciales de los puntos restantes son actualizados con respecto al primer clúster utilizando (3), donde  $x_1^*$  es el primer clúster identificado con su correspondiente valor potencial,  $P_1^*$ . El valor de  $\beta$  está definido por (4), donde  $r_b$  es una constante positiva definida por (5) y representa el radio del vecindario que tiene reducciones medibles. El valor de  $\eta$  es conocido como "squash factor" y 1.5 es un valor típico que asegura que los centros de los clústeres no estén muy cerca unos de otros; sin embargo, este valor deberá ser analizado de acuerdo al caso.

$$P_i = \sum_{j=1}^n e^{-\alpha \|x_i - x_j\|^2} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{4}{r_a^2} \quad (2)$$

$$P_i \Leftarrow P_i - P_1^* e^{-\beta \|x_i - x_1^*\|^2} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{4}{r_b^2} \quad (4)$$

$$r_b = \eta * r_a \quad (5)$$

Luego de que se han calculado todos los valores potenciales correspondientes con (3), el punto con el más alto valor potencial llega a ser segundo clúster. Se procede de la misma manera para actualizar los siguientes valores potenciales, pero utilizando el segundo clúster y así sucesivamente hasta obtener todos los clústeres según (6), donde  $x_k^*$  y  $P_k^*$  son el clúster  $k^{\text{th}}$  con su respectivo valor potencial.

$$P_i \Leftarrow P_i - P_k^* e^{-\beta \|x_i - x_k^*\|^2} \quad (6)$$

Como se mencionó anteriormente, el número de clústeres identificados determina el número de FMs y el número total de reglas difusas a utilizarse. Los parámetros de cada FM gaussiana están dados por el centro de cada clúster; mientras que el valor de la desviación estándar está definido por (7).

$$\sigma = \frac{r_a * (\max(X) - \min(X))}{\sqrt{8}} \quad (7)$$

Una vez que han sido generadas todas las FMs tipo gaussiana, únicas posibles para ser usadas con el modelo ANFIS, se continua con la siguiente fase para la modelación difusa; en donde, la identificación de los parámetros realizada con ANFIS genera un SIL tipo Sugeno.

### 2.3.2 Identificación de parámetros

Cuando se utiliza el método de agrupamiento sustractivo y ANFIS, el SIL es de tipo Sugeno de primer orden, utiliza solamente FMs tipo gaussianas, igual número de FMs y reglas difusas (reglas tipo *If - then*), con una salida calculada con el método del peso promedio (valor discreto no difuso).

#### 2.3.2.1 Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)

ANFIS [7] es un modelo que combina las ventajas de redes neuronales y lógica difusa permitiendo que un SIL aprenda a través de un algoritmo híbrido que combina el método de la gradiente con el de los mínimos cuadrados. ANFIS utiliza datos existentes del tipo I/O de un sistema para tunear o pulir las FMs y crear reglas difusas para un SIL tipo Sugeno. La Fig. 5 muestra el mecanismo de inferencia lógico tipo Sugeno y la manera en que ANFIS ejecuta sus operaciones, con sus 5 capas, a fin de producir un resultado único, no difuso.

Cada capa tiene una función única a fin de procesar la información recibida hasta producir el resultado final. La capa 1 es conocida como una capa de entrada de datos y es donde se asigna un grado de membresía a cada dato utilizando las respectivas FMs gaussianas. Este proceso se lo realiza con (8).

$$\mu(x_i) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - c_i}{\sigma_i}\right)^2} \quad (8)$$

En la capa 2 se realiza la multiplicación (II) de todos los grados de membresía que convergen al nudo para calcular los llamados "firing strengths" representados por  $\mu$ . La capa 3 es una capa donde se normaliza cada  $\mu$ . Esto se lo consigue dividiendo cada uno para la suma total de los  $\mu$ , obteniendo de esta manera  $\bar{\mu}$ . Luego en la capa 4, se calculan los parámetros (consecuentes) de cada función  $f$ ; esto es los valores de  $a$  y  $b$ , con la utilización del método de los mínimos cuadrados. Finalmente, en la capa 5 se calcula un solo resultado final  $z$  empleando el método del peso promedio.

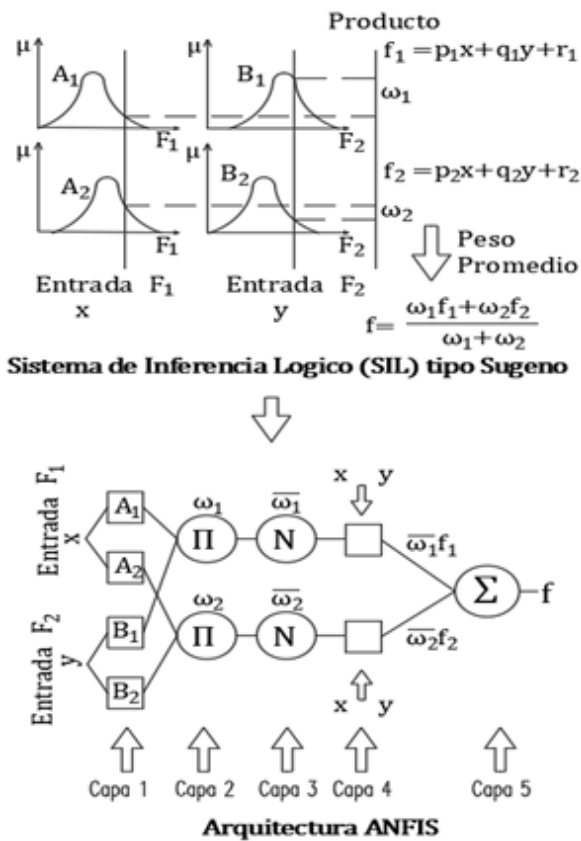


Figura 5. SIL tipo Sugeno y arquitectura ANFIS.

### 3. Resultados

El SIL para estimar el acero de refuerzo en vigas de hormigón simplemente armadas y simplemente apoyadas sometidas a cargas distribuida tiene seis variables de entrada ( $f'c, b, h, luz, a, qu$ ) y una salida ( $As$ ). Los parámetros utilizados para agrupar los datos de entrada con el método de agrupamiento sustractivo fueron: relación de aceptación ( $\bar{\mathcal{E}} = 0.5$ ), relación de rechazo ( $\underline{\mathcal{E}} = 0.15$ ), rango de influencia ( $r_a = 0.95$ ) y el factor “squash” ( $\eta = 1.25$ ), tratando de obtener el menor número posible de centros de clústeres. La Tabla 3 contiene los resultados de los cinco clústeres resultantes de la fase de identificación de la estructura que determinan los parámetros de las FMs gaussianas ( $\sigma$  y  $c$ ), mismos que fueron utilizados para obtener los grados de membresía correspondientes a cada dato de entrada.

Tabla 3. Parámetros de las funciones de membresía (FMs) gaussianas

Reglas Difusas	$\mu_{f'c}$		$\mu_b$		$\mu_h$		$\mu_{luz}$		$\mu_a$		$\mu_{qu}$	
	$\sigma$	$c$	$\sigma$	$c$	$\sigma$	$c$	$\sigma$	$c$	$\sigma$	$c$	$\sigma$	$c$
1	47.03	239.97	5.12	29.94	8.56	50.05	2.89	5.36	1.87	1.43	3.92	7.08
2	46.98	300.03	5.08	34.92	8.40	59.89	2.39	7.63	1.54	1.07	2.14	7.37
3	47.01	240.01	5.08	25.03	8.50	40.07	2.72	3.89	1.71	0.98	2.57	5.48
4	47.03	350.00	5.04	30.13	8.42	49.98	1.79	4.86	0.93	0.24	2.73	9.99
5	47.07	349.97	5.10	30.07	8.64	45.11	2.13	6.76	1.02	3.56	3.64	7.45

Las seis reglas difusas del tipo condicional (*If-then*) generadas fueron las siguientes:

1. *If* ( $f'c$  está en  $\mu_{f'c1}$ ) *y* ( $b$  está en  $\mu_{b1}$ ) *y* ( $h$  está en  $\mu_{h1}$ ) *y* ( $luz$  está en  $\mu_{luz1}$ ) *y* ( $a$  está en  $\mu_{a1}$ ) *y* ( $qu$  está en  $\mu_{qu1}$ ) *then* ( $As$  es  $f_1$ )
2. *If* ( $f'c$  está en  $\mu_{f'c2}$ ) *y* ( $b$  está en  $\mu_{b2}$ ) *y* ( $h$  está en  $\mu_{h2}$ ) *y* ( $luz$  está en  $\mu_{luz2}$ ) *y* ( $a$  está en  $\mu_{a2}$ ) *y* ( $qu$  está en  $\mu_{qu2}$ ) *then* ( $As$  es  $f_2$ )
3. *If* ( $f'c$  está en  $\mu_{f'c3}$ ) *y* ( $b$  está en  $\mu_{b3}$ ) *y* ( $h$  está en  $\mu_{h3}$ ) *y* ( $luz$  está en  $\mu_{luz3}$ ) *y* ( $a$  está en  $\mu_{a3}$ ) *y* ( $qu$  está en  $\mu_{qu3}$ ) *then* ( $As$  es  $f_3$ )
4. *If* ( $f'c$  está en  $\mu_{f'c4}$ ) *y* ( $b$  está en  $\mu_{b4}$ ) *y* ( $h$  está en  $\mu_{h4}$ ) *y* ( $luz$  está en  $\mu_{luz4}$ ) *y* ( $a$  está en  $\mu_{a4}$ ) *y* ( $qu$  está en  $\mu_{qu4}$ ) *then* ( $As$  es  $f_4$ )
5. *If* ( $f'c$  está en  $\mu_{f'c5}$ ) *y* ( $b$  está en  $\mu_{b5}$ ) *y* ( $h$  está en  $\mu_{h5}$ ) *y* ( $luz$  está en  $\mu_{luz5}$ ) *y* ( $a$  está en  $\mu_{a5}$ ) *y* ( $qu$  está en  $\mu_{qu5}$ ) *then* ( $As$  es  $f_5$ )

La Tabla 4 resume los parámetros de las funciones calculados en la capa 4 cuando se utilizan seis variables. Los valores resultantes de estas funciones son multiplicados con los correspondientes para luego ser agregados para dar el resultado final.

Tabla 4. Parámetros de las funciones  $f_i$

$f_i$	$p$	$q$	$r$	$s$	$t$	$u$	$v$
1	0.034	1.241	0.041	2.247	-0.204	0.714	-49.523
2	0.015	0.063	-0.750	7.785	-2.874	4.959	-25.882
3	-0.015	-0.146	0.439	3.912	-0.532	1.264	-23.399
4	-0.081	-3.515	-1.390	12.172	-2.609	4.491	117.927
5	0.017	-0.569	-0.571	11.263	-8.563	2.480	-6.953

### 3.1 Validación del modelo

La validación del modelo consiste en evaluar su desempeño estimando nuevos datos y comparándolos con los calculados. Para la validación del modelo ANFIS se recomienda utilizar los datos utilizados para chequear el modelo (CH) y no los datos utilizados para entrenarlo (TR) [11]. Valores estadísticos como el coeficiente de correlación  $R^2$  y el error estándar (S), desviación estándar de los residuales, permiten determinar si un modelo se desempeña de manera adecuada [12, 13]. La Fig. 6 representa el gráfico de valores estimados versus valores calculados, mismo que fue realizado utilizando los datos de chequeo (CH).

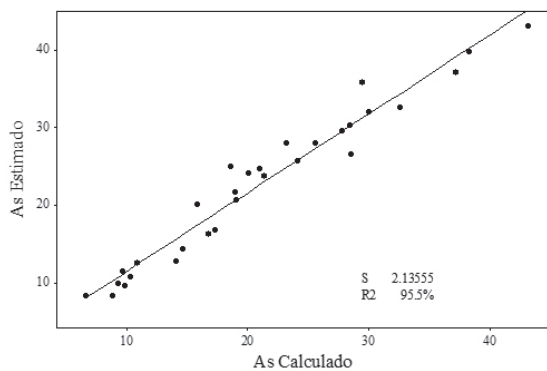


Figura 6. Valores de estimados vs. calculados.

## 4. Conclusiones

El modelo difuso tipo Sugeno resultado de este estudio, propuesto para estimar el acero de refuerzo ( $A_s$ ) de una viga simplemente armada, de sección rectangular, simplemente apoyada, sometida a cargas distribuidas de tipo rectangular, trapezoidal y triangulares, tiene un desempeño aceptable de acuerdo a los resultados obtenidos. De la Fig. 6, se puede evidenciar que el coeficiente de correlación  $R^2$  es alto (95.5%) lo cual implica que el SIL generado es capaz de predecir o estimar nuevos datos de una manera aceptable. El valor del error S calculado representa la desviación estándar de los residuales. Mientras mejor un SIL estime nuevos valores, mayor será el valor de  $R^2$  y menor será el error S. A pesar de que siempre va a existir un error cuando se estime

el valor de  $A_s$ , este no afectaría el diseño de una viga significativamente por cuanto el área efectiva que se coloca en el elemento estructural (área de acero real) depende de la suma de las áreas reales de acero de refuerzo disponibles en el mercado; por ejemplo, varillas de 10 mm, 12 mm o 14 mm. Además, el área real de una varilla comercial no tiene el área exacta que le corresponde al diámetro respectivo debido a los resaltes propios de una varilla corrugada y a su proceso de fabricación. Generalmente se selecciona varillas comerciales que sumen un área de acero ligeramente mayor al área calculada. Lo cual sugiere que la precisión no es un parámetro determinante cuando se trata de colocar un  $A_s$  en una viga o cualquier elemento estructural. Se necesita, de hecho, que el valor estimado sea cercano al valor requerido (valor necesario) y, en este caso, el modelo resultante de este estudio (SIL tipo Sugeno) cumpliría satisfactoriamente con el objetivo propuesto.

El método de investigación empleado en este estudio basado en datos reales, sean estos calculados o experimentales, podría ser extendido a otras áreas del diseño de hormigón armado. Todos los códigos de construcciones, sean estos nacionales o internacionales, contemplan factores o ciertas condiciones que brindan un determinado grado de seguridad, evidenciando que los valores calculados a través de ecuaciones no son necesariamente "exactos". Es cierto que ya existen ecuaciones o funciones definidas para calcular el  $A_s$  en elementos estructurales; sin embargo, la teoría de lógica difusa se la podría utilizar plenamente para estimar valores, donde la exactitud no sea un determinante.

La teoría de lógica difusa brinda la posibilidad de elaborar o crear modelos, basados en lo que se conoce como conocimiento previo; esto es, información existente como son datos históricos o experimentales, a fin de ganar conocimiento de sistemas complejos a través de reglas del tipo condicional.

## Referencias

- [1] Ross, T. J. (2017). Fuzzy logic with engineering applications, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, U.K.



- [2] Zadeh, L. A. (1965). "Fuzzy sets." *Inform. Comput.*, 8(3), 338-353.
- [3] Mamdani, E. and Assilian, S. (1975). "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller." *Int. J. of Hum-Comp. Stud.*, 51(2), 135-147.
- [4] Mamdani, E. (1977). "Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis." *IEEE Trans. Comput.*, 26(12), 1182-1191.
- [5] Takagi, T., and Sugeno, M. (1985). "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control." *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, 15(1), 116-132.
- [6] Tsukamoto, Y. (1979). "An approach to fuzzy reasoning method", in *Advances in fuzzy set theory and applications* (eds Gupta, M. M., Ragade, R. K., and Yager, R. R.), Elsevier, Amsterdam, 137-149.
- [7] Jang, J.-S. R. (1993). "ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system." *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, 23(3), 665-685.
- [8] Yager, R. R., and Filev, D. P. (1994a). *Essentials of fuzzy modeling and control*, Wiley, New York.
- [9] Sugeno, M., and Yasukawa, T. (1993). "A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling." *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 1(1), 7-31.
- [10] Chiu, S. L. (1994). "Prediction of fresh and hardened properties of self-consolidating concrete using neurofuzzy approach." *J. Intell. Fuzzy Syst.*, 2, 267-278.
- [11] Tesfamariam, S., and Najjaran, H. (2007). "Adaptive network-fuzzy inferencing to estimate concrete strength using mix design." *J. Mater. Civil Eng.*, 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:7(550), 550-560.
- [12] Tayfur, G., Erdem, T. K., and Kirca, Ö. (2014). "Strength prediction of high-strength concrete by fuzzy logic and artificial neural networks." *J. Mater. Civil Eng.*, 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000985, 04014079.
- [13] Kostić, S., and Vasović, D. (2015). «Prediction model for compressive strength of basic concrete mixture using artificial neural networks.» *Neural Comp. Appl.*, 26(5), 1005-1024.

# Competitividad en costos: postensado en losas

Hurtado J.<sup>1</sup>; Morales S.<sup>2</sup>; Hernández L.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero Civil, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador  
e-mail: jaha@outlook.es

<sup>2</sup> Ingeniero Civil, Escuela Politécnica Nacional, Master of Science in Structural Engineering,  
Universidad de Florida, Florida, USA.  
e-mail: sebastianmorales@grupodelpacifico.com.ec

<sup>3</sup> Profesor titular, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador.  
e-mail: luis.hernandezr@epn.edu.ec

Información del artículo  
Recibido: julio 2018  
Aceptado: septiembre 2018

## Resumen

El presente estudio técnico compara dos modelos de edificios con las mismas características arquitectónicas para evaluar las ventajas económicas que se obtienen al emplear un sistema de losas de hormigón con acero postensado con respecto a las de hormigón armado tradicional, bajo todas las provisiones y requisitos que se establecen en los distintos códigos y normas de la construcción (ACI 318-14, NEC 2015 y PTI). El edificio que se va a comparar utiliza un sistema dual de pórticos especiales resistentes a momentos y muros especiales de corte que formarán conjuntamente el sistema resistente a fuerzas laterales.

También se realizó una comparación económica para losas aisladas de hormigón armado además de la planta tipo con diferentes luces mostrando gráficamente mediante curvas y barras el ahorro en cantidades de materiales que se puede alcanzar mediante el uso del sistema postensado, mostrándose así, como una alternativa eficiente y económica para su aplicación en la industria de la construcción.

**Palabras clave:** hormigón postensado, sistema dual, hormigón presforzado, comparación económica.

## Abstract

A comparison between two models of buildings with the same architectural characteristics is presented to evaluate the economic advantages which are obtained by using a system of postensioned slabs, under all provisions and requirements that are established in the different codes and construction standards (ACI 318-14, NEC 2015 & PTI). The building to be compared is composed as a dual system of special moment frame in combination with special structural walls that together conforms the lateral force resistant system.

Also, the economic comparison was made for insulated reinforced concrete slabs and a typical plant with different spans showing graphically through curves and bars the savings in material quantities that can be achieved through the use of the post-tensioned system, thus showing an efficient and economical alternative for its application in the construction industry.

**Keywords:** postensioned slabs, dual system, prestressed concrete, economic comparison.

## 1. Introducción

En la actualidad el desarrollo de los materiales utilizados en la construcción a un costo relativamente bajo ha permitido obtener acero de mayor resistencia al convencional y de la misma manera se ha logrado producir hormigones con mayor resistencia a la compresión. La combinación del hormigón en conjunto con torones de presfuerzo de alta resistencia colocados bajo una trayectoria predefinida y tensados una vez que el hormigón adquiere una resistencia mínima, permite introducir esfuerzos en el elemento que contrarrestan los efectos producidos por cargas gravitacionales, mejorando así la capacidad resistente del elemento [1]. El acero es un material que trabaja bajo tensiones altas después del tensado. El concreto es un material frágil a tensión cuya capacidad se ve mejorada con la inclusión del acero sin que su capacidad a compresión se vea afectada [2].

El desarrollo de estos materiales permite una tendencia a progresar hacia estructuras más económicas mediante métodos de diseño mejorados y también con el uso de materiales de alta resistencia. Los resultados permiten la reducción de las secciones y por ende la reducción del peso, donde esta representa una parte sustancial de la carga total [3].

En vista de la necesidad que tiene el Ecuador de implementar nuevos sistemas constructivos que impulsen a la industria de la construcción incorporando a sus procesos ventajas en cuanto a economía, seguridad y eficiencia se refiere, la inclusión de acero postensado en el sistema de entrepiso resulta una alternativa viable que ha sido utilizada ampliamente en países de Latinoamérica como: Brasil, Chile, Colombia, Panamá y Perú.

## 2. Bases técnicas de comportamiento y comparación

Tomando en cuenta la necesidad de hacer una comparación económica del sistema postensado con respecto al sistema de hormigón armado tradicional, se ha realizado un estudio donde para varias luces se ha diseñado lozas macizas de hormigón armado y losas postensadas sobre vigas. Adicionalmente, se compara una edificación de diez pisos para uso residencial y diseñado cum-

pliendo todos los parámetros y requisitos estipulados en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 2015) y parámetros para postensado estipulados en por el Post-Tensioning Institute (PTI, 2006).

La concepción de un adecuado sistema resistente de fuerzas laterales es fundamental para el análisis y comportamiento de un modelo o edificio. La experiencia obtenida con los eventos naturales suscitados en el país ha determinado que es necesario un sistema que rigidice la estructura y controle de manera eficiente las derivas de piso para una zona de alta amenaza sísmica.

Se presenta un sistema dual que combina pórticos especiales a momento y muros especiales a cortante los cuales resistirán las cargas laterales del sismo de diseño en proporción a sus rigideces, los pórticos especiales a momento deben ser capaces de resistir por lo menos un 25% de las fuerzas de sismo de diseño [4].

Para este caso específico, la participación de materiales de alta resistencia como el postensado no forma parte de estos sistemas resistentes debido a que son menos dúctiles. Sin embargo, se acepta su uso en el sistema resistente de fuerzas laterales siempre y cuando no exceda una contribución de 25% en resistencia de acero de presfuerzo, el resto debe resistirse con acero convencional [4].

El uso de losas con acero postensado es permitido debido a que estos elementos estructurales trabajan únicamente bajo cargas gravitacionales. Es así como se ha llegado a formar incluso edificios donde el 100% de resistencia para el sismo de diseño lo absorben los muros de corte dejando que las losas formen únicamente el sistema de gravedad.

Las ventajas que ofrece el sistema postensado en sistemas de gravedad como lo las losas son:

- Para las losas, la sustitución a un sistema postensado permite reducir hasta en un tercio el espesor de la sección.

- La cantidad de acero de refuerzo se reduce entre un 60-85%.
- Ciclos de construcción más rápidos [5].

Además, la aplicación del postensado en la construcción de estructuras no plantea mayores dificultades en la construcción de un edificio comparándolo con otro método constructivo [6]. Y para edificios con gran cantidad de pisos la reducción en costos puede ser substancial ya que se tendrán menores cargas en cimentaciones y menores cargas sísmicas debido a la reducción de peso que representa el uso de este sistema [7].

El diseño de losas consta de varios métodos, uno de los métodos adoptados es el Diseño por bandas o “Strip Method Design”. Este método se ha optado como óptimo para el diseño de losas en hormigón armado y losas con acero postensado por la consideración e integración que tiene este método de los momentos que se ejercen en la losa. A continuación se detallará este método con sus consideraciones.

### 2.1 Método de diseño por bandas - Strip Method Design

Strip Method Design es el método adaptado para el análisis y diseño de las losas tanto de hormigón armado como losas postensadas.

El Strip Method Design es un método de diseño que permite considerar a la losa como si estuviera compuesta por un sistema de fajas en dos direcciones en ángulo recto, lo que permite calcular los momentos flexionantes por métodos simples de estática que implican el equilibrio de fajas.

La ecuación de equilibrio para una losa corresponde a:

$$\frac{\delta^2 mx}{\delta x^2} + 2 \frac{\delta^2 mxy}{\delta x \delta y} + \frac{\delta^2 my}{\delta y^2} = -w$$

Donde  $x$  y  $y$  son los ejes rectangulares al plano de la losa,  $mx$  y  $my$  son los momentos flexionantes por unidad de ancho en las direcciones  $x$  e  $y$ , es  $mxy$  el momento de torsión por unidad de ancho en las direcciones  $x$  e  $y$ , y  $w$  es la carga uniformemente distribuida por área unitaria. La forma

más común de obtener estos momentos en losa es mediante el análisis de elementos finitos.

El Strip Method Design tiene dos características. La primera es la facilidad con que se pueden obtener los momentos en la losa y las cargas sobre el sistema de soporte utilizando la estática simple. La segunda es la variedad de distribuciones de momentos y cargas, dependiendo posiblemente de la manera como se supone que actúa la dispersión de la carga. Cada distribución debe ser tratada según su naturaleza y cada diseñador debe suponer el comportamiento de la misma en base a la teoría elástica de distribución de momentos para asegurarse de una razonable distribución de momentos resultantes.

El uso de Strip Method Design proporciona una solución exacta que, además, utiliza eficientemente y económicamente el refuerzo [8].

La losa diseñada bajo este método va a ser reforzada por acero dúctil en las direcciones  $x$  e  $y$  y obtienen capacidad para soportar los momentos  $M_{ry}$  y  $M_{rx}$  por unidad de ancho tributario [9]. Estos momentos corresponden a:

$$M_{ry} = my \pm |mxy|$$

$$M_{rx} = mx \pm |mxy|$$

Los momentos  $M_{ry}$  y  $M_{rx}$  son integrados en todo el ancho tributario por la “strip” en toda su longitud obteniéndose así los momentos de diseño de la losa. Lo cual facilita los procesos de cálculo donde se considere la participación del momento torsionante en estas losas. El acero de refuerzo que se colocará en la losa es proporcional al momento de diseño por ancho tributario.

El refuerzo obtenido se distribuye ortogonalmente a lo largo de las “strips” de modo que el refuerzo total provisto en una banda es suficiente para resistir el momento factorizado total calculado para esa banda, y el momento en que la resistencia por ancho de unidad en la banda es al menos dos tercios del momento máximo por ancho de unidad en la banda, como se calcula en el análisis de elementos finitos.

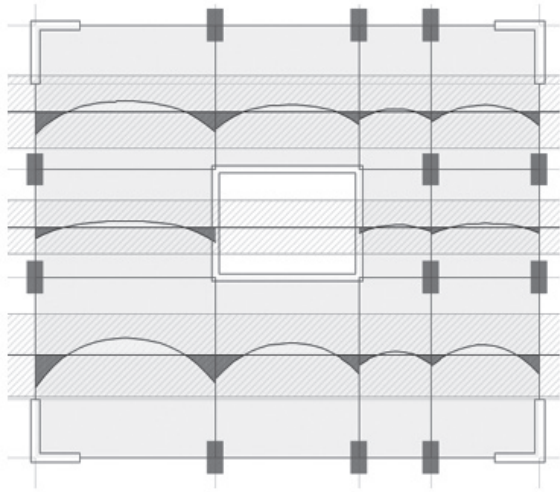


Figura 1. Strip Method Design - Strip X.

Para ilustrar estas ventajas económicas que se insertan con el sistema de losas postensadas no adherentes se hizo un análisis comparativo de los costos directos de construcción (excluyendo los costos administrativos, imprevistos y de utilidad) de losas macizas de hormigón armado o postensadas sobre vigas con varias luces y de un edificio de 10 pisos diseñado bajo las consideraciones necesarias de sismo resistencia para hormigón armado tradicional con losas macizas de hormigón y un segundo diseño con losas postensadas macizas.

### 2.2 Consideraciones de diseño para losas macizas sobre vigas

Para el diseño de losas macizas sobre vigas diseñadas a partir del método anteriormente mencionado y una vez cumplidos todos los requerimientos de serviciabilidad y resistencia se ha logrado determinar las cantidades de materiales de hormigón y acero de refuerzo que estas requieren. Los precios directos que se utilizan para esta comparación son los que se mencionan en la revista de la Cámara de la Industria de la Construcción (CAMICON).

Para la comparación de estas losas macizas se han tomado las siguientes combinaciones de luces de acuerdo a la tradición constructiva en Ecuador y además de losas con luces más grandes que no son comunes en el medio.

Area	Luces
m <sup>2</sup>	m
16.00	4x4
32.00	8x4
40.00	10x4
48.00	8x6
64.00	8x8
80.00	10x8

Figura 2. Combinaciones de luces consideradas.

En base al diseño de las losas, con estas luces se ha logrado obtener la siguiente curva de tendencia de costos directos en cuanto a costos directos con respecto a sus luces.



Figura 3. Curva de tendencia de costos directos.

En la curva se observa que el costo directo que se obtiene con el sistema postensado es menor. Además, el beneficio que se alcanza con el cambio a postensado es mayor en cuanto más grandes son las luces que se adaptan al proyecto arquitectónico. Por otro lado, para luces pequeñas el cambio a postensado no representa un beneficio económico en cuanto a cantidades de materiales refiere. La siguiente figura muestra mediante barras el ahorro que se genera con el cambio a postensado



evidenciando que para luces pequeñas no existe un beneficio.

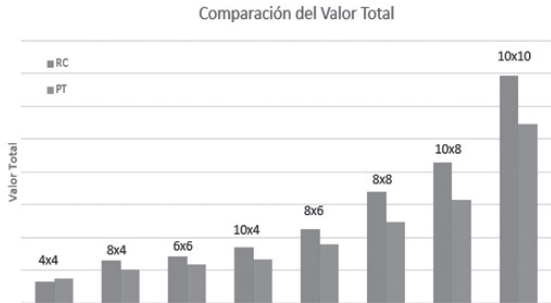


Figura 4. Diferencia de costos directos.

La gráfica anterior muestra que, de los análisis realizados se ha determinado que el porcentaje de ahorro para losas macizas sobre vigas de hormigón varían entre un 10-20%, esta ventaja económica en conjunto con la combinación de luces más grandes convierte a ese sistema en una solución eficiente en cuanto a costos y arquitectura.

### 2.3 Comparación de losas macizas sobre vigas en un edificio de 10 pisos

El modelo que se plantea para la comparación económica utiliza un sistema dual con muros de corte en combinación con pórticos especiales de momento. Este sistema es implementado en zonas de alta amenaza sísmica debido a la rigidez y control de derivas que los muros de corte aportan a la estructura.

Un sistema Dual es una combinación de muros estructurales y pórticos resistentes a momentos, los cuales resistirán las cargas de sismo de diseño en proporción a sus rigideces, los pórticos especiales a momento deben ser capaces de resistir por lo menos un 25% de las fuerzas de sismo de diseño [4].

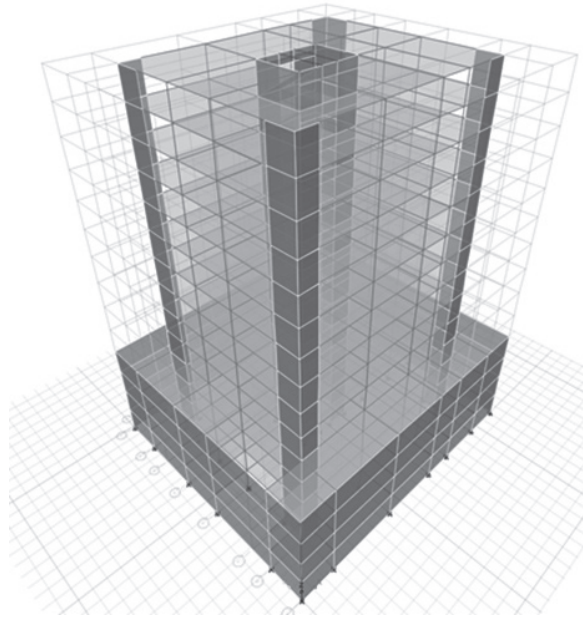


Figura 5. Modelo estructural para sistema de entepiso macizo sobre vigas.

Esta definición es totalmente contraria a la que se dicta en el NEC – 2015 que dice: “Sistema resistente de una estructura compuesta tanto por pórticos especiales sismo resistentes como por muros estructurales adecuadamente dispuestos espacialmente, diseñados todos ellos para resistir las fuerzas sísmicas. Se entiende como una adecuada disposición ubicar los muros estructurales lo más simétricamente posible, hacia la periferia y que mantienen su longitud en planta en todo lo alto de la estructura. Para que la estructura se considere como un sistema dual se requiere que los muros absorban al menos el 75% del corte basal en cada dirección” [11].

Esta discrepancia en cuanto a las definiciones además de los valores para los factores de reducción “R” que es asignado para este tipo de estructuras. Pueden provocar errores en cuanto a la ductilidad que estos modelos alcanzan. Un sistema dual no puede tener un factor “R” de 8 como se especifica puesto que los muros de corte son muy rígidos y no presentan ductilidad, y es precisamente lo que NEC – 2015 sugiere. Una estructura con una proporción de muros mayor al 75% se vuelve

menos dúctil, por ende, tendrá un factor de reducción menor a 8. La ASCE recomienda para este tipo de sistemas un factor de reducción “R” de 7 para pórticos especiales a momentos y de 6 para pórticos ordinarios. Es importante recalcar que la norma ecuatoriana no especifica este tipo de pórticos.

En un sistema dual la adición de columnas otorga ductilidad a los muros de corte y es lo permite aumentar su factor “R”, la recomendación para sistemas de muros de corte es de “R” de 5 [10].

El modelo planteado como se observa en la figura 4, se analiza bajo las consideraciones necesarias para hormigón armado tradicional con losas macizas de hormigón y posteriormente mediante un segundo análisis con losas postensadas macizas. La implementación de un adecuado sistema de fuerzas laterales permite la inclusión de herramientas que ofrezcan un beneficio económico, así como lo es la inclusión de acero postensado. La alta amenaza sísmica y la experiencia han demostrado que el sistema de pórticos tiene un desempeño deficiente en cuanto a control de derivas en este tipo de zonas, por lo que un adecuado sistema de fuerzas resistentes permitirá satisfacer los parámetros de seguridad que se busca con el diseño sismo resistente.

La reducción de peso del edificio tiene una incidencia directa en la reducción de las fuerzas laterales que el edificio va a soportar lo cual en una zona de alta amenaza sísmica se convierte en una ventaja estructural.

### 3.Resultados y discusión

#### 3.1 Comportamiento estructural

El comportamiento obtenido del análisis de ambas estructuras ha permitido determinar que la inclusión de muros y el cambio de sistema de entrepiso (reducción del peso del edificio) han resultado en un mejor control de derivas, modos de vibración y torsión en planta. Estas ventajas estructurales ofrecen un mejor resultado final y un adecuado comportamiento bajo solicitaciones sísmicas.

En cuanto a la participación de pórticos especiales para el sistema dual se ha alcanzado el siguiente porcentaje de participación:

**Tabla 1.** Porcentaje de participación de sistema dual – Modelo hormigón armado

Sentido	Vb	Pórtico	Muro	%
X	2163.78	541.51	1622.27	25.03%
Y	2163.78	752.53	1411.25	34.78%

**Tabla 2.** Porcentaje de participación de sistema dual – Modelo hormigón postensado

Sentido	Vb	Pórtico	Muro	%
X	1913.75	478.98	1434.77	25.03%
Y	1913.75	590.57	1323.18	30.86%

Como se puede observar en las tablas la participación del pórtico sobre los muros cumple el 25% mínimo con lo que se puede determinar efectivamente al sistema como dual. Además, se puede observar que el cambio a postensado redujo en un 12% la sollicitación de cortante basal, esto se logró al alcanzar menores secciones en los elementos de hormigón que conforman el pórtico especial a momento.

La reducción de secciones de hormigón se tradujo en una reducción de un 15% para vigas y un 14% para columnas aproximadamente.

En cuanto al control de derivas se ha obtenido las mayores derivas en el eje Y registrándose los siguientes porcentajes para los dos modelos analizados:

Nivel	Carga	Dirección	Deriva	Deriva Inelástica
P10	SPECTRO Y Max	Y	0.00224	1.57%
P9	SPECTRO Y Max	Y	0.002376	1.66%
P8	SPECTRO Y Max	Y	0.002514	1.76%
P7	SPECTRO Y Max	Y	0.00262	1.83%
P6	SPECTRO Y Max	Y	0.002685	1.88%
P5	SPECTRO Y Max	Y	0.002701	1.89%
P4	SPECTRO Y Max	Y	0.002655	1.86%
P3	SPECTRO Y Max	Y	0.00254	1.78%
P2	SPECTRO Y Max	Y	0.002326	1.63%
P1	SPECTRO Y Max	Y	0.001904	1.33%

**Tabla 3.** Derivas - Modelo hormigón armado

**Tabla 4.** Derivas - Modelo hormigón postensado

Nivel	Carga	Dirección	Deriva	Deriva Inelastica
P10	SPECTRO Y Max	Y	0.002275	1.59%
P9	SPECTRO Y Max	Y	0.002383	1.67%
P8	SPECTRO Y Max	Y	0.002486	1.74%
P7	SPECTRO Y Max	Y	0.00256	1.79%
P6	SPECTRO Y Max	Y	0.002599	1.82%
P5	SPECTRO Y Max	Y	0.002591	1.81%
P4	SPECTRO Y Max	Y	0.002529	1.77%
P3	SPECTRO Y Max	Y	0.002407	1.68%
P2	SPECTRO Y Max	Y	0.002196	1.54%
P1	SPECTRO Y Max	Y	0.0018	1.26%
0	SPECTRO Y Max	Y	0.000259	0.18%

Con la reducción de secciones en el modelo considerado se ha logrado controlar las derivas de piso según los límites establecidos en la norma ecuatoriana de la construcción (NEC, 2015). Evidentemente este control tiene que ver directamente con la reducción de fuerzas laterales a la estructura alcanzada con el cambio a postensado.

Respecto a los modos de vibración, se ha logrado una pequeña participación en cuanto a los modos de vibración con el cambio a entrepiso postensado, como se observa a continuación:

**Tabla 5.** Modos de vibración - Modelo hormigón armado

Modal	Periodo	Ux	Uy	Rz
1	1.181	0	0.996	0.004
2	1.053	0.995	0	0.005
3	0.814	0.005	0.004	0.991

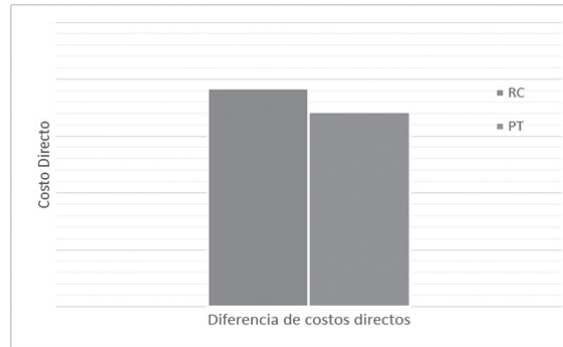
**Tabla 6.** Modos de vibración - Modelo hormigón postensado

Modal	Periodo	Ux	Uy	Rz
1	1.18	0	0.998	0.002
2	1.048	0.997	0	0.003
3	0.774	0.003	0.002	0.996

Alcanzado un comportamiento estructural adecuado y una vez cumplidas con las provisiones para pórticos especiales a momentos referidas en los capítulos 18 y 25 del Código American Concrete Institute (ACI 318-14, 2014) se ha logrado determinar las cantidades de materiales que estas losas requieren y comparar estas cantidades tanto para el modelo de entrepiso macizo de hormigón armado y de hormigón postensado sobre vigas.

### 3.2 Competitividad en costos

De las ventajas anteriormente mencionadas, respecto a la reducción de secciones y cuantías de acero obtenidas para ambos modelos analizados, una vez cumplidos todos los requerimientos de la estructura en cuanto a efectos de sismo resistencia refiere, se ha podido determinar la siguiente gráfica:



**Figura 6.** Comparación económica en sistema de entrepiso

Como se puede observar en la figura, mediante el empleo de un sistema de losas postensadas macizas para un sistema dual se ha podido alcanzar un ahorro aproximado de un 10% del valor total.

El cambio de entrepiso postensado permitió obtener secciones de menor tamaño y menores cuantías de acero lo que se traduce en una reducción de peso y, por ende, una menor carga sísmica para el edificio, todo esto en conjunto permitió una ventaja económica en la estructura.

Este ahorro representativo en comparación al hormigón armado tradicional convierte al sistema postensado en una alternativa económica viable para los procesos constructivos del país en un sistema dual adecuado para zonas de alta amenaza sísmica. Estas ventajas mencionadas no consideran la rapidez constructiva que varios autores refieren y aumentan el porcentaje de ahorro alcanzado con el cambio a postensado.

El ahorro se incrementa si se toman en cuenta los beneficios de rapidez constructiva, los mismos que reducen los tiempos de construcción ya que el postensado permite un desencofrado acelerado de los entrepisos y, además, reducen la mano de obra.

El trabajo conjunto entre ingenieros y arquitectos es lo que se necesita para poder explotar los beneficios económicos que este sistema puede ofrecer; el uso de herramientas tecnológicas que permitan este trabajo conjunto son necesarias para avanzar en los procesos constructivos.

La tradición constructiva en el país es el empleo de losas alivianadas las mismas que reducen en gran proporción la cantidad de hormigón empleada en contraste con las losas macizas. El sistema de losas postensadas puede adaptarse a este método constructivo y brindar los beneficios económicos anteriormente mencionados siempre y cuando se asegure su correcto procedimiento de cálculo y diseño.

#### 4. Conclusiones y recomendaciones

Un correcto entendimiento de los sistemas resistentes de fuerzas laterales es necesario en zonas de alta amenaza sísmica. Una correcta definición de los sistemas resistentes y un adecuado factor de reducción permitirán asegurar diseños eficientes y seguros acordes al comportamiento esperado de la estructura planteada.

El uso de un sistema de hormigón postensado permite reducir secciones de hormigón y, por ende, reducir el peso propio de la estructura, lo cual es una ventaja estructural en zonas de alto riesgo sísmico, puesto que la fuerza sísmica que soporta la estructura es directamente proporcional al peso de esta.

Las losas postensadas requieren de un eficiente sistema resistente de fuerzas laterales puesto que estas no forman parte de este. Estas losas son eficientes bajo cargas de servicio y son poco dúctiles debido a los materiales de alta resistencia que emplean.

Las ventajas económicas para un sistema que emplea losas de hormigón postensado dependen y varían desde la concepción arquitectónica, así como se observa en la figura 3, para luces pequeñas (4 m - 6 m) el sistema postensado se iguala económicamente al de hormigón armado tradicional, sin embargo, al modificar la arquitectura implementando luces más grandes la ventaja eco-

nómica que se puede alcanzar es mayor.

La reducción de peso en la estructura genera menores fuerzas sísmicas en la misma con lo que se producen menores solicitaciones a los elementos estructurales en cuanto a momentos y cargas axiales. La disminución de solicitaciones permite secciones de elementos estructurales más pequeñas y el uso de hormigones de alta resistencia secciones más eficientes. Juntamente con la reducción de solicitaciones en los elementos también se obtienen menores cuantías de acero. Esta es la ventaja económica que el cambio a losas de hormigón postensadas permite alcanzar.

El empleo de losas postensadas planas con un sistema de muros de corte ha dado resultados adecuados en otros países de alto riesgo sísmico en donde el uso de este sistema es de vieja aplicación y ha dado resultados satisfactorios además de ventajas económicas y arquitectónicas para su desarrollo.

El país de cara al desarrollo urbano debería adaptar el sistema postensado en cuanto a los beneficios económicos que este presenta y la arquitectura que permite alcanzar. Es necesario cambiar los paradigmas constructivos y empezar a crear soluciones alternativas eficientes y seguras basadas en la experiencia y ventajas que otros países han obtenido de este sistema.

#### Referencias

- [1] Aalami, B. (2014). *Post-Tensioned Buildings, Design and Construction* (International ed.). USA: PT-Structures.
- [2] Lin T.Y, B. N. (2010). *Design of Prestressed Concrete Structures* (3rd ed.). USA: Wiley India.
- [3] Nilson Arthur, D. D. (2010). *Design of Concrete Structures* (14th ed.). New York: McGraw Hill.
- [4] Moehle, J. (2014). *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. USA: Mc Graw Hill.
- [5] Nawy, E. (2009). *Prestressed Concrete* (5th ed.). New Jersey, Estados Unidos: Pearson.

- [6] FIB. (2005). Post - tensioning in Buildings. Stuttgart: Sprint - Digital - Druck.
- [7] PTI. (2006). Post-Tensioning Manual. Phoenix: PTI.
- [8] Gamble, P. (2000). Losas de concreto reforzado. USA.
- [9] Park R, G. W. (1990). Losas de concreto reforzado. USA.
- [10] ASCE, 7.-1. (2017). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. USA.
- [11] NEC. (2015). Diseño sismo resistente. Norma Ecuatoriana de la Construcción, 139.



# The pathway of concrete improvement via nano-technology

Alvansazyazdi M.\*; Rosero José Augusto\*

\*Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática  
Quito, Ecuador  
e-mail: faridalvan@uce.edu.ec  
e-mail: jarosero@uce.edu.ec

Información del artículo  
Recibido: junio 2018  
Aceptado: septiembre 2018

## Resumen

La nanotecnología es la ciencia que trata la materia en la escala de una billonésima de metro (es decir,  $10^{-9}$  m = 1 nm), y también es el estudio de la manipulación de la materia a escala atómica y molecular. El uso de la nanotecnología puede modificar algunas propiedades del hormigón. En esta revisión, se discute la aplicación de diferentes nanomateriales para mejorar las propiedades convencionales del hormigón. Cada material ultrafino actúa como agente para reducir la formación de microporos, proporcionar una microestructura densa y aumentar las propiedades mecánicas. Así, se recogen las principales tendencias en el uso de nanomateriales destacando las ventajas generadas por la adición de nanopartículas al concreto.

**Palabras clave:** nanopartículas, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nano clay, CNT.

## Abstract

Nanotechnology is the science that deals with matter at the scale of 1 billionth of a meter (i.e.,  $10^{-9}$  m = 1 nm), and is also the study of manipulating matter at the atomic and molecular scale. The use of nanotechnology can modify some properties of concrete. In this review we discuss the application of different nanomaterials to enhance conventional concrete properties. Each ultrafine materials act as agent to reduce formation of micro pores, provide dense microstructure and increase mechanical properties. Thus, the main trends in the use of nanomaterials are highlighted, highlighting the advantages generated by the addition of nanoparticles to concrete

**Keywords:** Nanoparticles, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nano clay, CNT

## Introduction

Nanotechnology, which covers synthesis, process, characterization and application of nanomaterials, considerably attracts most attention because of a wide variety of potential and practical application, including medicine, electronics and advanced ceramics. In general, a nanoparticle has an ultrafine size in the range of 1 to 100 nm. The typical properties of nanoparticles are considerably different from those of the bulk materials. In the last decade, nanotechnology was used in different engineering field, especially in the civil engineering. A large number of materials such as, glass, concrete, steel can be improved by the use of nanotechnology. Nanoparticles has also different applications in coatings such as paints to develop self-healing capabilities and corrosion protection of coating. Since these coatings have hydrophobic properties and ward the metal surface off water as well can also protect materials from salt water and acid attack. The most useful application of nanotechnology in fields of civil engineering, is in the concrete production.

Concrete includes of amorphous phase, crystals in different size of nanometer to micrometer, and bound water. It can be improved in numerous ways that one of which is composed with nanoparticles. This research covers the effect of incorporation of nano-size spherical materials (e.g., nano-SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc.), nano-tubes or fibers [(carbon nanotube (CNT) and carbon nano-fibers (CNF)] and nano-clay into cementitious materials.

The beneficial effect of the nanoparticles on the performance of cementitious materials can be explained by the different following factors

- Nanoparticles that well-dispersed can act as nuclei for cement phases, hence promoting the hydration due to their high reactivity;
- Use of Nanoparticles lead to crushed size of crystals (such as Ca(OH)<sub>2</sub>) and also formation of small-sized uniform clusters of C-S-H;

- Nanoparticles accelerate the pozzolanic reactions, resulting in the consumption of Ca(OH)<sub>2</sub> and formation of an “additional” C-S-H gel;
- structure of the aggregates ‘contact zone’ can be improved by use of nanoparticles, resulting in a better bond between cement paste and aggregates; and
- Nanoparticles provide crack detention and interlocking effects between the slip planes, which improve the toughness, shear, tensile and flexural strength of cement-based materials.
- Nanoparticles can act as nano reinforcement and strong the tensile strength of concrete.

Most research on nanotechnology in concrete has focused on the use of nanoparticles to investigation of structure and mechanical properties of nano-concrete.

## Incorporation of SiO<sub>2</sub> nanoparticles

The mechanical properties of cement mortars can be varied with addition of nano particles. It has been observed that SiO<sub>2</sub> nano-particles can be increased compressive and flexural strengths of cement mortars [1,2]. The compressive strengths of cements with nano-silica (NS) were all higher than those of cements containing silica fume at setting time of 7 and 28 days. Results showed 26% increase of 28 days compressive strength with addition of 10% nano-SiO<sub>2</sub> whereas addition of 15% silica fume lead to increase of 10% compressive strength [2]. In other investigation it is found that the addition of small volumes of NS (i.e., 0.25%) caused 25% increase of flexural strength and 10% increase of compressive strength at 28 days [3].

The mechanisms for increase performance of concrete with nano-SiO<sub>2</sub> has been studied at different levels. Uniformed Dispersion of nanoparticles in the cement paste, increased deposition of

the hydrated products of cement on it due to their great surface energy, i.e., act as nucleation sites. Nucleation of hydration products on nano-particles further improve and accelerates cement hydration [4]. The other mechanisms of improved performance of concrete by addition of nanoparticles are (i) the nano-size pores of the cement paste fill with nanoparticles, and (ii) Nanosilica influence pozzolanic reaction and reacts with  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and generates additional C-S-H [5], the particle size and the proper dispersion of the nano particles is important factor in effective improvement and the colloidal dispersions being more effective than the powder in cement paste [6]. The addition of Nanosilica provides major improvement of early age of concrete structure respect to crystal orientation degree, reduction in content, and crystal size of portlandite crystals was reported [7] as could be observed at the following Fig. 1 and Fig. 2 under the Scanning Electron Microscopy (SEM).

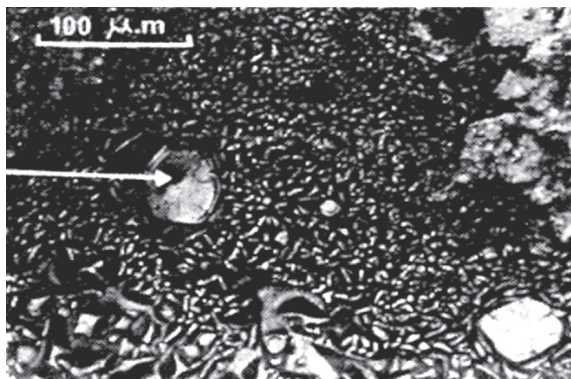


Fig. 1. Particles (indicated by an arrow), surrounded by solid phase portlandite.

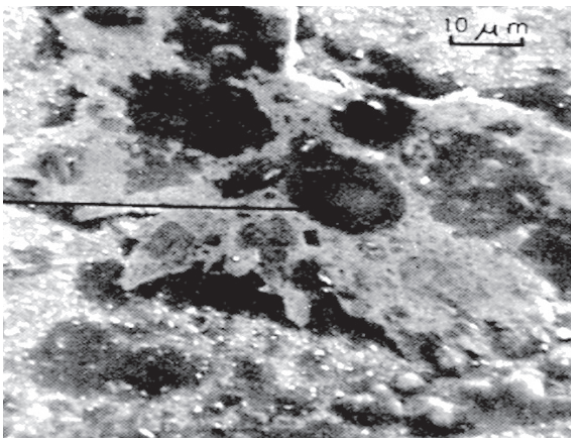


Fig. 2. Particles marked with an arrow in the previous Figure 1 with the irregular morphology of the portlandite support.

The addition of  $\text{SiO}_2$  nanoparticles resulted in the increase of heat of hydration process and chemically combined water percentage and decrease of CH content [8]. In other research [9], the microstructural studies showed that the increase in strength due to addition of nano-  $\text{SiO}_2$  was not related to pozzolanic reaction but due to the growth of silica chains in C-S-H and causing dense microstructure.

The water permeability resistant behavior of nano silica concrete is better than of normal concrete [10].

By addition of nano-silica to Light Weight Concrete resistance to water and chloride ions penetration was enhanced despite strength slightly increased. The resistance against chloride ion penetration, water penetration and sorptivity was improved by addition up to 2% Nanosilica to concrete [11].

The addition of colloidal nano-silica to concrete (without and with class F fly ash binder) result in improvement of overall performance of concrete. Adiabatic temperature test within 15 h after mixing indicate that ultrafine nature of nano-silica was responsible for speeding up the kinetics of hydration reactions. The strength of concrete increased with the addition of nano- $\text{SiO}_2$  up to 6%, showed that addition of small dosages of nano-silica can controlled destructive effect of fly ash on strength performance. Also it was showed a decrease in passing charges and physical penetration depths because of reducing the conductivity and dense structure [12].

Nano  $\text{SiO}_2$  could significantly increase the compressive strength of high volume fly ash and also rice husk concrete. The concretes containing 2 and 4 % of nano silica exhibited similar compressive strength and it is showed effectiveness of high percentage of nanoparticles in HVFA concrete. The durability properties of concretes containing 38 % class F fly ash and 2 % nano-silica as replacement of cement are higher than ordinary concrete [13].

Also addition of Nano-silica to Rice husk Ash (RHA) concrete improving its mechanical properties research showed that blending 1% Nano-

silica to 20% RHA concrete caused an increase in compressive and flexure strength. In general, by addition Nanosilica particles up to 1% to concrete the disadvantages of rice husk ash had overcome [14].

### **Incorporation of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles**

TiO<sub>2</sub> nanoparticles has wide applications due to its high oxidizing capability under near UV-radiation, chemical stability in different environment (both acidic and basic environments), absence of toxicity. Several studies have shown that nano-TiO<sub>2</sub> can improve the early-age hydration of cement [15] and increase compressive and flexural strengths [16]. The abrasion resistance of concrete containing different nanoparticles (both nano-TiO<sub>2</sub> and nano-SiO<sub>2</sub>) is experimentally studied [15] and it is found that the abrasion resistance of concrete containing nano-TiO<sub>2</sub> is higher than Nanosilica and optimum amount of nano TiO<sub>2</sub> is 1% for effectiveness in enhancing abrasion resistance. With the increase of nano TiO<sub>2</sub> content up to 5% the abrasion resistance decreases. Concrete containing nano-TiO<sub>2</sub> has self-cleaning properties for de-polluting the environments. Nano-TiO<sub>2</sub> act as a photocatalytic agent to degradation of pollutants (e.g., NO<sub>x</sub>, CO, VOCs, chlorophenols, and aldehydes from vehicle and industrial transpiration) [17, 18, 19]. A clean TiO<sub>2</sub> concrete exposed to sunlight can purificate the harmful NO<sub>x</sub> gases from the atmosphere by oxidation to nitrates. [20].

In other study, a photocatalytic concrete with nano-TiO<sub>2</sub> nanoparticles was fabricated. Results show that the surface of nano concrete was covered by a layer contain C-S-H and TiO<sub>2</sub> nano particles around tens of nm and the roughness of the nano concrete was about 3.5-11 nm. Due to its photocatalytic properties and high-smooth surface, this concrete can used as a material for the urban application [21].

The effect of the addition of TiO<sub>2</sub> on the con-

crete compaction and mechanical properties was investigated. The results indicated that addition of TiO<sub>2</sub> nanoparticles to concrete increase the amount of C-S-H (calcium silicate hydrate), compressive strength at 28 days and a reduction in the modulus of elasticity of the nano concretes. In relation to the percent of concrete porosity, the addition of TiO<sub>2</sub> nanoparticles in the both form of 10% anatase II and rutile resulted in a decrease in the overall pore volume, pore restoration and improve distribution of the pore lengths. { Study of the influence of nano-TiO<sub>2</sub> on the properties of Portland cement concrete for application on road surface. Another benefit of TiO<sub>2</sub> is increasing abrasion resistance and strength of concrete at early age [22].

In self-compacting concrete containing class F fly ash (5-15%). It was found that addition of TiO<sub>2</sub> up to 4% could lead to improvement of detrimental effect of flu ash on flexural strength by accelerate formation of C-S-H gel at the early age of hydration. Also, nano TiO<sub>2</sub> nanoparticles lead to increasing in consistency and reducing in the possibility of bleeding and segregation [23].

Marine environment is destructive for concrete structures that create the coupled attack of chloride diffusion and scouring. Concrete containing 1% nano-TiO<sub>2</sub> shows a high scouring abrasion resistance and a low diffusion coefficient. Furthermore nano Tio2 can improve more resistance to chloride diffusion [24].

### **Incorporation of CaCO<sub>3</sub>**

The CaCO<sub>3</sub> nanoparticles is very useful in cement alternative. In recent developments in concrete technology ultra-high-performance concrete (UHPC) is produced that are characterized by very low water-to-cement (w/c) ratios. Hence, high amount of the cement in concrete will not hydrate and will just act as filler. Therefore, use of non-costly filler material to replacing cement are interest. In research showed that addition of micro-CaCO<sub>3</sub>



to concrete acted as a filler, improvement of microstructure and increasing the effective w/c ratio [25] but nano- $\text{CaCO}_3$  act as accelerator of the early-age hydration process, and an effective filler to concrete. The combining of both micro- and nano- $\text{CaCO}_3$  resulted in better performance not only for enhancing of mechanical properties but also to replacement of cement up to 20 % [26].

In other research results showed that nano- $\text{CaCO}_3$  slurry increase the mechanical strength of the concrete with and without fly ash at the early ages. Actually, nano- $\text{CaCO}_3$  modified the strength and microstructure of concrete containing fly ash by accelerate both the hydration of cement at early ages and the hydration of fly ash at late ages [27]. Also in the research of nanoparticles addition to different grade of concrete (C30 and C50) it was found that in the low strength grade of concrete adding nano- $\text{CaCO}_3$  created calcium carbon-aluminum hydrate with lower carbon that can promote the strength of concrete at early age. But, in the high strength grade of concrete, these improvement disappeared [28].

Compared between addition of chloride- and non-chloride based accelerating admixtures and nano-calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) at rates of 0, 2.5, 5, 10 and 15% on properties of ultra-high performance concrete showed that concrete containing nano- $\text{CaCO}_3$  had better effect on accelerating of hydration and compressive strength on early-age setting, improved the flowability of mixture and increase workability of concrete and also reducing the risk of steel corrosion induced by chloride-based accelerating admixtures. Consideration of the performance and economic approach determined that addition 5% up to 10% nano- $\text{CaCO}_3$  to UHPC concrete can cause better improvement for concrete properties [29].

Conduction calorimeter based test results [30] showed that the addition of nano- $\text{CaCO}_3$  considerably accelerated the speed of heat progress and shortened the induction period of  $\text{C}_3\text{S}$  hydration. It was proposed that nano- $\text{CaCO}_3$  can shorten the induction period of  $\text{C}_3\text{S}$  hydration by broke down the protective layer of it or accelerated the C-S-H nucleation (i.e., seeding effect) in the paste

solution of high ionic concentration.

### **Incorporation of Nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$**

There are few studies on the use of nano alumina in concrete. Nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles was very effective to increase the modulus of elasticity of cement. With the addition 5% nano-  $\text{Al}_2\text{O}_3$  to concrete, the elastic modulus increased by 143% at 28 days whereas compressive strength was not very obvious changed [31]. Frost resistance property of concrete can be significantly increased by the addition of nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  and nano- $\text{SiO}_2$ . These nano-materials behave as accelerators of pozzolanic reaction and also improve the pore structure of concrete and densifying the microstructure. It is found that the frost resistance of nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles is better than the same amount of nano- $\text{SiO}_2$  particles [32]. Also it is found that replacement of cement by  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles up to 1% proportional increase flexural strength and Split Tensile strength of cement mortar [33].

Dispersion of cement in UHPC must take place simultaneously with silica action in the hydration of cement because of high proportion of cement in this concrete. Without nano alumina, the hydration process will be slower because silica component cannot penetrated to the internal structure of hydration gel. Nano alumina created the path of injection silica or binding materials into the microstructure of hydration gel and the refining activity will start [34,35,36].

### **Incorporation of nano clay**

Nano clays depending on the chemical composition and nanoparticle morphology, have several classes such as montmorillonite, bentonite, kaolinite, hectorite, and halloysite. Nanoclay particles enhanced the mechanical properties, the self-compacting properties of concrete and reduce the ability of chloride penetration, permeability and shrinkage [37,38,39]. Montmorillonite clay has unique structure that make it an excellent base for manipulation through nanotechnology.



Montmorillonite clay has different properties such as stability, an interlayer space, high hydration and swelling capacity and a high chemical reactivity. Organo-modified montmorillonites (OMMT) are employed as fillers and reinforcements in concrete. [38]. The use of low percentage of Nanoclay particles can effectively influence the freshstate properties of concrete.

Nanoclay particles can provide high viscosity by increasing the adhesion between the ingredients of the fresh mixture. Incorporation of small dosages nano-montmorillonite (NMMT) clays (.25, .50, .75 and 1.00% ) to self-compacting concrete (SCC) was investigated. It was found that the addition of .5% and .75% NMMT increase compressive strength and splitting tensile strength, respectively. Also, the addition of NMMT clays up to 1.00% improved durability and electrical resistivity of specimens [40].

### Incorporation of CNT

In Concrete containing fibers (typically steel or polypropylene fibers) control of plastic shrinkage cracking and drying shrinkage cracking increased. The addition of fibers to mix concrete lower the permeability of the fiber reinforce concrete and promote the impact, abrasion and shatter resistance. The important properties of fibers in FRC include diameter, specific gravity, high Young's modulus and tensile strength [41,42].

In recent years, researchers have explored the option of using CNTs as fibers in concrete.

Carbon nanotubes are a form of carbon with cylindrical shape, and diameter size in nanometer scale. Nanotubes have the fullerene structure. single-walled nanotube (SWNT) and multi-walled nanotube (MWNT) are two categories of nanotubes [43].

Carbon nanotubes/nanofibers (CNTs/CNFs) have nano-reinforcements application in cement-based materials. CNTs/CNFs exhibit extraordinary strength with elasticity module of CNTs/CNFs is in the range of TPa and tensile strength in the order of GPa, with unique electronic and amazing chemical properties [44,

45, 46]. Concrete has poor tensile strength with prone to brittle and crack. One of the methods to increase tensile strength, ductility and improve durability is the incorporation of fibers into concrete. The mixture of carbon nanotubes and cement hydrates provides high strength properties. Carbon nanotubes can act as bridges across cracks and pores, which load transfer across cracks and pores [47].

Addition of small dosage (e.g., 0.025% by weight of cement) of homogeneously dispersed multiwall carbon nanotubes (MWCNTs) increase significantly the flexural strength and stiffness of concrete. It is found that adding small amount of carbon nanotube (1% wt.) improve both compressive and flexural strength. Also results show that addition of CNT increases the compressive strength up to 70% and decreases the heat conductivity up to 12% in fiber reinforce concrete[48]. One of the important benefits of used of the CNT instead of steel fiber to reinforcement of concrete is that CNTs will not corrode in corrosive environments. This benefit may provide application of CNT in marine environments.

### Conclusions

In practice, under the Scanning Electron Microscopy (SEM) it is possible to observe with certainty how working at nanodimensions opens an enormous potential for the improvement of concrete.

The different uses of nanoparticles not only reveal the capacity of the nanomaterials considered in this review, but also point the way forward for Concrete Improvement Via Nano-Technology.

The applications of the nanomaterials that have been presented also indicate the possibility to lower costs in the use of improved concrete. Each incorporation raises different answers whose experimental characteristics open keys to an increasingly interesting and more investigative world.

## References

- [1]-Li, G.: Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>. *Cement and Concrete Research* 34, 1043–1049 (2004)
- [2]-Li, H., Xiao, H.-g., Yuan, J., Ou, J.: Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Compos. B Eng.* 35(2), 185–189 (2004)
- [3]-Sobolev, K., Flores, I., Torres-Martinez, L.M., Valdez, P.L., Zarazua, E., Cuellar, E.L.: Engineering of SiO<sub>2</sub> nanoparticles for optimal performance in nano cement-based materials. In: Bittnar, Z., Bartos, P.J.M., Nemecek, J., Smilauer, V., Zeman, J. (eds.) *Nanotechnology in construction: Proceedings of the NICOM3, 3rd International Symposium on Nanotechnology in Construction, Prague, Czech Republic*, pp. 139–148 (2009)
- [4]-Bjornstrom, J., Martinelli, A., Matic, A., Borjesson, L., Panas, I.: Accelerating effects of colloidal nanosilica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement. *Chem. Phys. Lett.* 392(1-3), 242–248 (2004).
- [5]-Jo, B.-W., Kim, C.-H., Lim, J.-H.: Characteristics of cement mortar with nano-SiO<sub>2</sub> particles. *ACI Materials Journal* 104(4), 404–407 (2007)
- [6]-Gaitero, J.J., Campillo, I., Mondal, P., Shah, S.P.: Small Changes Can Make a Great Differences. *Journal of Transportation Research Record* 1(2141), 1–5 (2010).
- [7]-Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., Rongshen, C.: Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construct Build Mater* 21(3), 539–545 (2007).
- [8]-Lu, Z.-y., Xu, X.: Effect of nanometer SiO<sub>2</sub> on hydration character of portland cement. *Jianzhu Cailiao Xuebao* 9(5), 581–585 (2006) (in Chinese).
- [9]-Dolado, J.S., Campillo, I., Erkizia, E., de Miguel, Y.R., de Ibarra, Y.S., Porro, A., Ayuela, A.: Effects of Nanosilica Additions on Cement Pastes. *Applications of Nanotechnology in Concrete Design*. In: *Proceedings of the International Conference Applications of Nanotechnology in Concrete Design*, pp. 87–96 (2005).
- [10]- Ji, T.: Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>. *Cement Concr. Res.* 35(10), 1943–1947 (2005).
- [11]- HongjianDu, SuhuanDu, XuemeiLiu, Effect of nano-silica on the mechanical and transport properties of lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 82, 1 May 2015, Pages 114-122.
- [12]-A.M.Said, M.S.Zeidan, M.T.Bassuoni, Y.Tian, Properties of concrete incorporating nano-silica, *Construction and Building Materials*, Volume 36, November 2012, Pages 838-844.
- [13]- S.W.M. Supit , F.U.A.Shaikh , “Durability Properties of High Volume Fly Ash Concrete Containing Nano-Silica”, *Materials and Structures*, 2014.
- [14]- K.V.Priya, D.Vinutha, “Effect of Nano Silica In Rice Husk Ash Concrete.” *India IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, PP. 39-43, 2014.
- [15]-Jayapalan, A.R., Lee, B.Y., Fredrich, S.M., Kurtis, K.E.: Influence of additions of anatase TiO<sub>2</sub> nanoparticles on early age properties of cement-based materials. *Journal of Transportation Research Record* 1(2141), 41–46 (2010).

- [16]-Li, H., Zhang, M.-H., Ou, J.-P.: Flexural fatigue performance of concrete containing nanoparticles for pavement. *International Journal of Fatigue* 29(7), 1292–1301 (2007).
- [17]-Vallee, F., Ruot, B., Bonafous, L., Guillot, L., Pimpinelli, N., Cassar, L., Strini, A., Mapelli, E., Schiavi, L., Gobin, C., Andre, H., Moussiopoulos, N., Papadopoulos, A., Bartzis, J., Maggos, T., McIntyre, R., Lehaut-Burnouf, C., Henrichsen, A., Laugesen, P., Amadelli, R., Kotzias, D., Pichat, P.: Cementitious materials for self-cleaning and depolluting facade surfaces. In: *RILEM Proceedings (2005), PRO 41 RILEM International Symposium on Environment-Conscious Materials and Systems for Sustainable Development*, pp. 337–346 (2004).
- [18]-Murata, Y., Obara, T., Takeuchi, K.: Air purifying pavement: development of photocatalytic concrete blocks. *J. Adv. Oxidat. Technol.* 4(2), 227–230 (1999)
- [19]-Chen, J., Poon, C.-S.: Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications. *Build Environ.* 44(9), 1899–1906 (2009)
- [20]-Kamitani, K., Murata, Y., Tawara, H., Takeuchi, K.: Air purifying pavement: development of photocatalytic concrete blocks. In: Wu, Z. (ed.) *International Symposium on Cement and Concrete*, pp. 751–755. International Academic Publishers, Beijing (1998)
- [21]-Weiguo Shen, Preparation of TiO<sub>2</sub> nano particle modified photocatalytic self-cleaning concrete, *Journal of Cleaner Production*, 2014.
- [22]- F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, Nanotechnology: advantages and drawbacks in the field of construction and building materials, *Constr. Build. Mater.* 25 (2) (2011) 582–590.
- [23]- Mostafa Jalal, Mostafa Tahmasebi, Assessment of nano-TiO<sub>2</sub> and class F fly ash effects on flexural fracture and microstructure of binary blended concrete, *Science and Engineering of Composite Materials*, Volume 22, May 2015.
- [24]-Hui Li, Huigang Xiao, Xinchun Guan, Zetao Wang, Lei Yu, Chloride diffusion in concrete containing nano-TiO<sub>2</sub> under coupled effect of scouring, *Composites Part B: Engineering*, Volume 56, January 2014, Pages 698-704
- [25]- Granger S, Loukili A, Pijaudier-Cabot G, Chanvillard G (2005) Mechanical characterization of self-healing effect of cracks in Ultra High Performance Concrete (UHPC) In: *Proceedings of 3rd international conference on construction materials, performance, innovations and structural implications*, Vancouver, August 22–24.
- [26]- J. Camiletti, A. M. Soliman, M. L. Nehdi, Effects of nano- and micro-limestone addition on early-age properties of ultra-high-performance concrete, *Mate-*

- rials and Structures, Volume 46 , June 2013, pp. 881-898.
- [27]-Tao Meng, Yue Yu, Zhongjia Wang, Effect of nano-CaCO<sub>3</sub> slurry on the mechanical properties and micro-structure of concrete with and without fly ash, Composites Part B: Engineering, Volume 117, 15 May 2017, Pages 124-129.
- [28]-Miao Zhou Huang, Tao Meng, Xiao Qian Qian, Jin Jian Zhang, Influence of Nano-SiO<sub>2</sub> and Nano-CaCO<sub>3</sub> on the Mechanical Properties of Concrete with Different Strength Grades, Advanced Building Materials, May 2011, pp. 480-484.
- [29]-Jessica Camiletti, Ahmed M. Soliman, Moncef L. Nehdi, Effect of nano-calcium carbonate on early-age properties of ultra-high-performance concrete , Magazine of Concrete Research, Volume 65 Issue 5, March 2013, pp. 297-307.
- [30]-Sato, T., Diallo, F.: Seeding effect of nano-CaCO<sub>3</sub> on the hydration of tricalcium silicate. Journal of Transportation Research Record 1(2141), 61–67 (2010)
- [31]-Li, Z., Wang, H., He, S., Lu, Y., Wang, M.: Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. Materials Letters 60, 356–359 (2006).
- [32]-Kiachehr Behfarnia, Niloofar Salemi, The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete, Construction and Building Materials, Volume 48, November 2013, Pages 580-584.
- [33]- A. Nazari, Sh. Riahi, Sh.Riahi, S.F. Shamekhi, A.Khademno, “Mechanical properties of cement mortar with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles”, Journal of American Science, 2009.
- [34]- L. Hui et al., Microstructure of cement mortar with nano-particles, Compos. Part B: Eng. 35 (2) (2004) 185–189
- [35]- J. Rosenqvist, Surface Chemistry of Al and Si (Hydr)Oxides, With Emphasis on Nano-Sized Gibbsite (A-Al(OH)<sub>3</sub>), Department of Chemistry, Inorganic Chemistry, Umeå University, Umeå, Sweden, 2002.
- [36]- I.G. Richardson, The nature of C–S–H in hardened cements, Cement and Concrete Research, Volume 29, (1999), pp. 1131–1147.
- [37]- Chang, T.-P., Shih, J.-Y., Yang, K.-M., Hsiao, T.-C.: Material properties of portland cement paste with nano-montmorillonite. Journal of Materials Science 42(17), 7478–7487 (2007).
- [38]- Kuo, W.-Y., Huang, J.-S., Lin, C.-H.: Effects of organo-modified montmorillonite on strengths and permeability of cement mortars. Cement Concr. Res. 36(5), 886–895 (2006)
- [39]- Morsy, M.S., Aglan, H.A., Abd El Razek, M.M.: Nanostructured zonalite-cementitious surface compounds for thermal insulation. Construct Build. Mater. 23(1), 515–521 (2009).
- [40]- Payam Hosseini; Alireza Afshar; Bijan Vafaei; Abbas Booshehrian; Elias Molaei Raisi; Amin Esrafil, Effects of nano-clay particles on the short-term properties of self-compacting concrete, European Journal of Environmental and Civil Engineering , Volume 21, 2015, pp. 127-147.
- [41]- Brown, R., Shukla, A., Natarajan, K.R.: Fiber reinforcement of concrete structures. URITC Project 536101, University

- of Rhode Island Transportation Center, Kingston, RI, USA (2002)
- [42]- Shah, S.P.: Next Horizon in High Performance Concrete: Self-Consolidating Concrete and Nanotechnology. *Nanotecnología en el Hormigón Y Hormigones Autocompactantes. Jornada Técnica JT-01*, 131–151 (2009).
- [43]- F.C. Lai, M.F.M. Zain, M. Jamil, Nano cement additives (NCA) development for OPC strength enhancer and Carbon Neutral cement production, in: 35th Conference on Our World in Concrete & Structures, August 2010.
- [44]- Ajayan, P.M.: Nanotubes from carbon. *Chem. Rev.* 99, 1787–1799 (1999)
- [45]- Salvetat, J.-P., Bonard, J.-M., Thomson, N.H., Kulik, A.J., Forro, L., Benoit, W., Zuppiroli, L.: Mechanical properties of carbon nanotubes. *Appl. Phys. Mater. Sci. Process* 69, 255–260 (1999)
- [46]- Srivastava, D., Wei, C., Cho, K.: Nanomechanics of carbon nanotubes and composites. *Appl. Mech. Rev.* 56, 215–230 (2003)
- [47]- Li, G.Y., Wang, P.M., Zhao, X.: Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. *Carbon.* 43(6), 1239–1245 (2005).
- [48]- Yakovlev, G., Kerienė, J., Gailius, A., Girniene, I.: Cement based foam concrete reinforced by carbon nanotubes. *Materials Science (Medžiagotyra)* 12(2) (2006).



## Normas para publicar en la revista Ingenio

Los artículos enviados a la revista Ingenio deben ajustarse a los siguientes criterios:

### Aspectos generales

1. Podrán ser publicados todos los trabajos realizados por investigadores nacionales o extranjeros, una vez que cumplan los criterios de calidad científica requeridos.
2. La revista Ingenio publica artículos relacionados con investigaciones culminadas, revisiones bibliográficas, informes de desarrollo tecnológico, ensayos científicos, propuestas de modelos e innovaciones, productos de la elaboración de tesis de grado siempre que sean un aporte para el campo de la ciencia y tecnología.
3. La revista Ingenio publica trabajos originales e inéditos en español e inglés; es decir, no pueden haber sido publicados a través de ningún medio impreso ni electrónico.
4. Todo artículo será sometido a un riguroso proceso de arbitraje; la evaluación del artículo se hará conforme a criterios de originalidad, pertinencia, actualidad, aportes, rigurosidad científica y cumplimiento de las normas editoriales establecidas.
5. Por tratarse de una publicación arbitrada, el Consejo Editorial aprueba su publicación en base al concepto de pares especializados. La recepción de un documento no implica compromiso de publicación.
6. Es indispensable presentar una carta dirigida al Consejo Editorial autorizando a la revista Ingenio la publicación de la investigación, dando fe de la originalidad y de ser autor de la misma. Además, debe consignar constancia o credencial que conforme la adscripción a la Universidad o Centro de Investigación, tal como firma el artículo.
7. Como reconocimiento a su aporte, a cada autor se le remitirán dos ejemplares de la edición en la cual se publica el artículo.
8. El artículo propuesto se debe remitir a: [vicedecanat.fing@uce.edu.ec](mailto:vicedecanat.fing@uce.edu.ec)

### Requerimientos técnicos

9. Los artículos pueden estar escritos sobre Microsoft Word (.doc o .docx) o LATEX (.tex). Las plantillas a ser utilizadas pueden ser descargadas del sitio web de la revista (próximo a ser abierto).
10. Las ilustraciones y tablas deberán estar numeradas secuencialmente incluyendo una descripción explicativa para cada una. Las ecuaciones incluidas en el artículo deberán también estar numeradas.
11. Cuando presente el artículo, no intente diseñar el manuscrito. Use un tamaño de letra de 12 puntos en todo el manuscrito. No justifique el margen derecho.
12. Use espacio después de punto, comas y signos de interrogación.
13. Use doble "enter" al final de cada párrafo, título encabezamiento. No use "enter" en ningún otro lugar, deje al programa procesador de palabras romper automáticamente las líneas.
14. No centre encabezamientos o subencabezamientos y déjelos estar alineados a la izquierda.

15. Las tablas deben estar creadas en el mismo programa usado para el cuerpo del documento, pero deben estar guardadas en un archivo separado. Use tabuladores, no espacios, para crear columnas. Recuerde que el tamaño final de las páginas impresas será aproximadamente de 21 x 28 cm, entonces sus tablas deben estar diseñadas para ajustarse al espacio de la impresión final.

### **Instrucciones para preparación de manuscritos**

16. El manuscrito no debe tener más de 5.000 palabras de extensión e incluir algunos o todos los siguientes elementos:

#### Encabezamiento

- Título
- Autores y su adscripción institucional con referencia al final de la primera hoja
- Resumen en español e inglés
- Palabras clave en español e inglés

#### Cuerpo del trabajo

- Introducción
- Fundamentación
- Definiciones
- Revisión de literatura
- Formulación de objetivos y establecimiento de hipótesis
- Materiales, fuentes y métodos
- Recopilación de datos
- Tratamiento de las variables
- Análisis estadístico
- Resultados
- Discusión
- Conclusiones
- Referencias bibliográficas
- Referencias
- Material adicional
- Elementos gráficos
- Tablas
- Agradecimientos

17. El artículo debe incluir en el encabezado: el “Título”, y a continuación se debe informar los datos de cada uno de los autores con nombre completo, y con referencia al final de la página el título universitario de pregrado y el de postgrado más alto obtenido, cargo e institución donde labora, números telefónicos (convencional y celular), la dirección y correo electrónico.

Si hay más de un autor, indicar el autor a quién se debe enviar la correspondencia.

18. El ‘Resumen’ y el ‘Abstract’ deben ser en español e inglés, respectivamente en todos los manuscritos; deben ser de un solo párrafo, corto y conciso (máximo de 250 palabras) y resumir los resultados del artículo. Deben ser informativos no indicativos.
19. Las palabras clave serán de tres a seis y representarán los principales temas del artículo y deberán ser colocadas al final del resumen.

20. Las secciones de “Introducción”, “Materiales y Métodos”, “Resultados”, “Discusión” y “Conclusiones” del artículo pueden estructurarse divididas en diferente forma. Si el artículo describe un estudio efectuado en un área particular, ésta debe ser escrita en subencabezamientos bajo “Materiales y Métodos”.
21. Los “Resultados”, “Discusión” y “Conclusiones”, pueden ser en algunos casos combinados.
22. Los “Agradecimientos” deben ser cortos, no deben exceder de un párrafo y se colocan al final del artículo.
23. Para la integración de citas dentro del artículo, debe usarse un corchete con un número en el interior, el mismo que hará referencia al documento de citación que debe constar en la bibliografía, y se irá colocando de forma ascendente. Cuando se trata de citas textuales se escribirá entre comillas con el texto en cursiva y a continuación se debe colocar el corchete con el número que corresponda siguiendo el formato de la IEEE. Información disponible en url <http://normas-ieee.com/>
24. Las “Referencias Bibliográficas” se colocan al final del texto, luego de la sección de conclusiones.
25. Las “Referencias Bibliográficas” se colocan ordenadas en orden de citación
26. Se debe verificar con cuidado que todas las citas colocadas en el texto, aparezcan en la lista de “Referencias Bibliográficas”. En la lista sólo deben aparecer las referencias que fueron utilizadas en el texto principal del trabajo, en las tablas o en las figuras, esto implica que no deben aparecer otras referencias aunque el autor las haya consultado durante la preparación del artículo.
27. La sección de “Referencias Bibliográficas” deberá incluirse en un archivo aparte sobre LATEX, proporcionando un archivo de información bibliográfica (.bib); o si el artículo está escrito sobre Microsoft Word u otro procesador de texto, añadir una tabla en Microsoft Excel (.xls o .xlsx). De esta manera el formato de la revista para las referencias se coloca automáticamente.

### Arbitraje

27. El Comité Editorial remitirá al autor acuse de recibo de su trabajo en un plazo no mayor de cinco días luego de cerrada la convocatoria, y en un mes (que podría ampliarse en circunstancias extraordinarias hasta mes y medio) le remitirá la resolución final sobre el mismo.
28. Para ser publicado en la revista Ingenio, todo artículo será sometido a una fase de selección y a un proceso de dictamen. En la primera fase, el Comité Editorial seleccionará los artículos que correspondan a las áreas temáticas tratadas en la revista y que cumplan con los requisitos académicos indispensables de un artículo científico.
29. Las contribuciones serán sometidas al dictamen de dos especialistas en la materia correspondiente. Si existe contradicción entre ambos dictámenes, se procederá a una tercera evaluación que se considerará definitiva. El proceso de dictaminación será secreto y no se dará información nominal respecto a éste. Una vez emitidas las evaluaciones de los árbitros consultados, se enviará a los autores el acta de dictamen, y éstos tendrán un plazo no mayor de cinco días para entregar la versión final del artículo con las correcciones pertinentes si las hubiere.
30. El Comité Editorial de la revista verificará la versión final con base en los dictámenes e informará a los autores en qué número de la revista será publicado su trabajo. Las colaboraciones aceptadas se someterán a corrección de estilo y su publicación estará sujeta a la disponibilidad de espacio en cada número.



Esta edición que consta de 300 ejemplares en papel couché de 115 grs., se terminó de imprimir en enero de 2019, siendo Rector de la Universidad Central del Ecuador el señor Dr. Fernando Sempértegui Ontaneda, PhD.