



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA

**“Influencia en el desempeño del concreto con polvo de cáscara de huevo
como reemplazo al cemento. Aplicación en muros prefabricados”**

T E S I S

que para obtener el grado de MAESTRO EN INGENIERÍA presenta:

ARMANDO ALVARADO RUIZ

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. José Manuel Gutiérrez Moreno (UABC)

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. Julio Alberto Calderón Ramírez (UABC)

SINODAL SECRETARIO:

Dra. Ana Cecilia Borbón Almada (UNISON)

SINODALES:

Dr. Alejandro Sánchez Atondo (UABC)

Dr. Marco Antonio Montoya Alcaraz (UABC)

Mexicali, B. C. a 20 de noviembre de 2025

Agradecimientos

A mi amada esposa Karen e hijo León

A mis queridos Padres

A mi director de Tesis

Gracias a todos quienes apoyaron para poder concluir esta meta en mi vida, algunos de ellos son:

Dra. Ana Cecilia Borbón de la UNISON por apoyarme en su laboratorio,

Dr. Alvaro Gonzalez (UABC) por permitirse usar su horno y calcinar el PES,

Ing. Martin Ochoa (DICOMSA) por apoyarme en diseños y pruebas al concreto,

A mis jefes en el trabajo por las facilidades para dedicarme a este proyecto,

Gracias a todos de verdad.

Resumen

Esta tesis analiza la influencia del polvo de cáscara de huevo calcinada (PES) como reemplazo parcial del cemento Portland en la fabricación de concreto destinado a muros prefabricados, con el objetivo de promover alternativas sostenibles en la industria de la construcción. El estudio nace ante la creciente preocupación por el impacto ambiental derivado de la producción de cemento, la cual contribuye significativamente a las emisiones globales de CO₂. El PES, subproducto de la industria alimentaria con alto contenido de carbonato de calcio, se evalúa aquí por su viabilidad como material cementante suplementario, aportando beneficios ambientales y técnicos.

La metodología comprende la fabricación de PES a nivel laboratorio, diseño experimental de mezclas de concreto con diferentes porcentajes de reemplazo (0%, 10% y 15%), pruebas en estado fresco y endurecido, y la medición de propiedades térmicas utilizando equipo especializado. Los resultados muestran que, en proporciones adecuadas, el concreto con PES puede mantener o mejorar las propiedades mecánicas respecto al concreto convencional, favoreciendo la economía circular y el reciclaje de residuos agroalimentarios. Sin embargo, se observa que la adición de PES no mejora el aislamiento térmico del concreto, ya que aumenta la conductividad térmica con el porcentaje de reemplazo.

Se concluye que el uso de PES en concreto es una alternativa prometedora para reducir el impacto ambiental y los costos materiales, aunque su potencial como aislante térmico no se valida. Este trabajo establece recomendaciones para futuras investigaciones y aplicaciones en muros prefabricados sustentables.

Abstract

This thesis examines the influence of calcined eggshell powder (ESP) as a partial replacement for Portland cement in concrete, specifically for use in prefabricated wall elements, with the aim of promoting sustainable alternatives within the construction industry. The research emerges from the growing concern over the environmental impact of cement production, which is a major contributor to global CO₂ emissions. ESP, a byproduct of the food industry with high calcium carbonate content, is evaluated in this work for its feasibility as a supplementary cementitious material, offering both environmental and technical benefits.

The methodology includes laboratory-scale production of ESP, experimental design of concrete mixes with varying replacement levels (0%, 10%, and 15%), tests on fresh and hardened concrete, and measurement of thermal properties using specialized equipment. The findings indicate that, at certain replacement percentages, concrete incorporating ESP can maintain or even enhance mechanical properties compared to conventional concrete, supporting circular economy principles and the recycling of agro-industrial waste. However, it is noted that the addition of ESP does not improve the thermal insulation of concrete, as the thermal conductivity increases with higher replacement levels.

It is concluded that ESP use in concrete is a promising alternative to reduce environmental impact and material costs, even though its potential as a thermal insulator was not validated. The work provides recommendations for future research and applications in sustainable precast wall production.

Contenido

	<i>Resumen</i>	3
	Abstract	4
1	8	
	Objetivo general.	10
	Objetivos específicos.	10
	Hipótesis.	10
	Antecedentes	11
	2.1. Impacto ambiental de la producción del cemento para concreto.	11
	2.2. El polvo de cáscara de huevo como material cementante	13
	2.3. Propiedades y beneficios del uso del PES en el concreto	16
	Metodología	23
	3.1. Revisión de literatura sobre aplicaciones del PES	24
	3.2. Diseño de experimentos y pruebas al concreto con y sin PES	24
	3.2.1. Fabricación de PES para concreto	25
	3.2.2. Pruebas al concreto en estado fresco y endurecido	27
	3.3. Conductividad térmica de concreto con PES y resistencia térmica.	28
	3.4. Reflexiones del impacto del concreto con PES para muros y otros elementos	28
4.	Resultados	29
	Pruebas al concreto con y sin PES	29
	Pruebas al concreto en estado fresco	29
	Pruebas al concreto en estado endurecido	31

Conductividad térmica del concreto con PES	33
Determinación de conductividad térmica en especímenes con y sin PES.	34
Cálculo de la resistencia térmica. Método simplificado.	38
5. Conclusiones y recomendaciones	42
Referencias	44
Anexos	51
A1. Glosario de términos	51
A2. Pruebas de agregados para concreto	54
A3. Datos de diseño de mezclas para dosificación	59
A4. Bitácora de resultados de concreto endurecido.	60

Índice de Tablas:

Tabla 1. Resumen de beneficios reportados en literatura	20
Tabla 2. Pruebas a agregados y concreto fresco para los reemplazos de PES indicados.	26
Tabla 3. Resultados de pruebas al concreto fresco con y sin PES.	28
Tabla 4. Resultados de pruebas al concreto endurecido 0%, 10% y 15% de PES.	30
Tabla 5. Mediciones de conductividad térmica para el 0% y 10% de reemplazo de PES.	35
Tabla 6. Resultados de conductividad térmica del material obtenidos del dispositivo λ -Meter EP500e	36

Índice de Figuras:

Figura 1. Cantidad de producción de PES y cemento del año 2000 a 2020.....	12
Figura 2. Metodología de evaluación del Concreto-PES en aplicaciones de ingeniería civil.....	22
Figura 3. Proceso de fabricación de PES.....	24
Figura 4. Memoria fotográfica del proceso de producción de PES.....	25
Figura 5. Cantidad de especímenes elaborados para el 0%, 10% y 15% de PES	26
Figura 6. Memoria fotográfica de pruebas en estado fresco del concreto.	29
Figura 7. Memoria fotográfica de pruebas en estado endurecido del concreto.	31
Figura 8. Esquema representativo de flujo de calor a través de una pared compuesta.....	33
Figura 9. Medición de conductividad térmica de la mezcla propuesta en UNISON.....	34
Figura 10. λ -Meter EP500e.....	35
Figura 11. Moldes elaborados de 15x15x10 cms y especímenes para medición en λ -Meter EP500e.....	35

1 Introducción

El crecimiento de la población mundial y la urbanización han aumentado significativamente en las últimas décadas, lo que ha generado una mayor demanda de materiales de construcción. Siendo el concreto hidráulico el más utilizado entre todos ellos. Este se integra por agregados, agua y cemento; este último ingrediente produce grandes cantidades de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y contaminantes a la atmósfera, por lo que el concreto tiene alta huella de carbono. La producción de cemento por sí sola representa aproximadamente un 7-8 % de las emisiones globales de CO₂, poniendo de manifiesto la carga ambiental sustancial asociada a su uso generalizado en la construcción (Jhatial et al., 2022a; Nandhini & Karthikeyan, 2022). En consecuencia, existe una necesidad imperante de desarrollar e implementar alternativas sostenibles al cemento convencional, centradas en materiales capaces de reducir el impacto ambiental sin comprometer el rendimiento estructural adecuado. Esto ha llevado a una amplia investigación sobre materiales cementicios suplementarios y otros aglutinantes innovadores que pueden sustituir parcial o totalmente al cemento Portland.

En este sentido, y dado que el concreto es el material de construcción más utilizado en el mundo y por sus beneficios no va a ser reemplazado en el mediano plazo, se requiere incorporar ingredientes y optimizar el diseño de mezclas de concreto, para la producción de concreto sustentable. Este enfoque requiere explorar nuevos materiales cementicios suplementarios y agentes vinculantes alternativos que reduzcan la huella ambiental del hormigón, manteniendo o mejorando sus propiedades mecánicas y de durabilidad.

Ante este desafío en la industria de la construcción, emergen alternativas como el uso de concreto elaborado a base de polvo de cáscara de huevo calcinada (PES) como reemplazo parcial de los materiales cementantes, que, de acuerdo con varias investigaciones, ha demostrado contribuir a la eficiencia y durabilidad de las estructuras de concreto que lo contienen como parte de sus ingredientes. La cáscara de huevo, un subproducto de la industria alimentaria presenta una composición rica en carbonato de calcio que, al calcinarse, puede transformarse en óxido de calcio, un componente con propiedades puzolánicas deseables para mejorar el concreto.

Este estudio busca evaluar el desempeño del concreto que incluye en su matriz ligante la cáscara de huevo calcinada, promoviendo la economía circular y reduciendo la huella ambiental de la industria de la construcción. Específicamente, evaluando las mezclas de concreto que incluyen PES, se observa que tienen un desempeño satisfactorio en comparación con las mezclas tradicionales y que estas propiedades cumplen con los estándares necesarios para su aplicación en muros prefabricados (Baldwin et al., 2009).

La presente tesis se estructura en las siguientes secciones, en las que se presentan, en antecedentes, el problema, la justificación, las alternativas que se han planteado en la literatura, así como los resultados obtenidos por otros autores que incorporan polvo de cáscara de huevo en sus concretos. Posteriormente, en metodología se exponen aspectos principales del trabajo realizado, así como el diseño de experimentos y la normativa aplicable. A continuación, se exponen los resultados obtenidos y una breve discusión sobre sus implicaciones. Finalmente, en conclusiones, se abordan las limitaciones y las futuras líneas de investigación tras el desarrollo de esta tesis.

Objetivo general.

Identificar el grado de competitividad que tienen los muros de concreto con PES con relación a los muros de mampostería tradicional a base de block o ladrillo.

Objetivos específicos.

- Analizar el desempeño del concreto con PES en estado fresco y endurecido.
- Analizar las propiedades térmicas del concreto con PES.
- Comparar la conductividad térmica de muros de mampostería y muros de pared delgada base Concreto-PES.
- Sintetizar los beneficios y procedimiento constructivo de la propuesta.

Hipótesis.

- El concreto con PES supera el desempeño de los concretos convencionales y permite disminuir problemas de conductividad térmica en edificaciones, y propiciar un sistema constructivo más eficiente y ambientalmente responsable.

Antecedentes

2.1. Impacto ambiental de la producción del cemento para concreto.

El Informe sobre la situación mundial de la ONU del 2018 en el tema del medio ambiente proyectó una duplicación importante de la superficie construida de aquí al año 2060. El hormigón o concreto es el material de construcción más utilizado, tanto para edificaciones como para las distintas obras civiles. La producción de cemento ha aumentado dramáticamente en los años 2000, generando 4000 millones de toneladas en la primera década. La producción de cemento tradicional es una de las principales fuentes de emisiones de CO₂ a nivel mundial, contribuyendo significativamente al cambio climático. Cada tonelada de cemento genera 0,87 toneladas de dióxido de carbono (Chen et al., 2023). Por lo que el uso y fabricación de cemento son causantes del 8% de las emisiones de carbono a nivel mundial (Nandhini & Karthikeyan, 2022).

Por ello, es esencial innovar en el diseño del concreto para producir mezclas de bajo impacto ambiental y alta resistencia, utilizando métodos de producción más limpios (O'Hegarty et al., 2021). La creciente preocupación por el impacto ambiental de la industria de la construcción ha impulsado la búsqueda de materiales alternativos y sostenibles (Murthi et al., 2022).

En este sentido, en la búsqueda de materiales de construcción sostenibles se ha explorado la incorporación de distintos residuos al concreto. Entre los cuales destacan los siguientes:

- Polvo de cáscara de huevo calcinado (PES); sustituto parcial de cemento.

- Escoria de alto horno o de arco eléctrico; sustituto parcial o total tanto de agregados como de *material cementicio suplementario*.
- Variedad de plásticos como PET o HDPE; sustituto parcial o total de agregados.
- Ceniza volante; sustituto parcial de cemento.
- Cáscara de arroz (sustituto parcial de cemento).
- Residuos de concha y/o de crustáceos (muestran un gran potencial como sustituto parcial del cemento, debido a su alto contenido de calcio).
- Entre otros: paja canalera triturada, vidrio reciclado, corcho, cáscara de cacahuete, residuos de coco o dátil, incluso las bacterias que son incorporadas al *bioconcreto* para promover su auto reparación.

La mayoría de los anteriormente enlistados no solo representan aprovechamiento de residuos, sino que ofrecen mejoras al concreto, como es el caso de la cáscara de arroz, que aumenta la resistencia a la compresión, la durabilidad y la conductividad térmica; en contraste, también su incorporación reduce la permeabilidad en los concretos.

2.2. El polvo de cáscara de huevo como material cementante

La gestión de residuos orgánicos, como las cáscaras de huevo, representa un desafío ambiental. El huevo se usa en grandes cantidades para la preparación de alimentos en restaurantes y panaderías. El gran volumen de desechos que genera este producto de la granja va directamente a la basura. Esto genera un foco rojo en el mundo, pues cada año se incrementa la producción de huevo y día con día millones de toneladas de desecho de cáscara de huevo se generan. Este material residual es altamente tóxico si no se trata adecuadamente. Por ello, este material resulta muy importante para un estudio detallado de sus propiedades (Waheed et al., 2020).

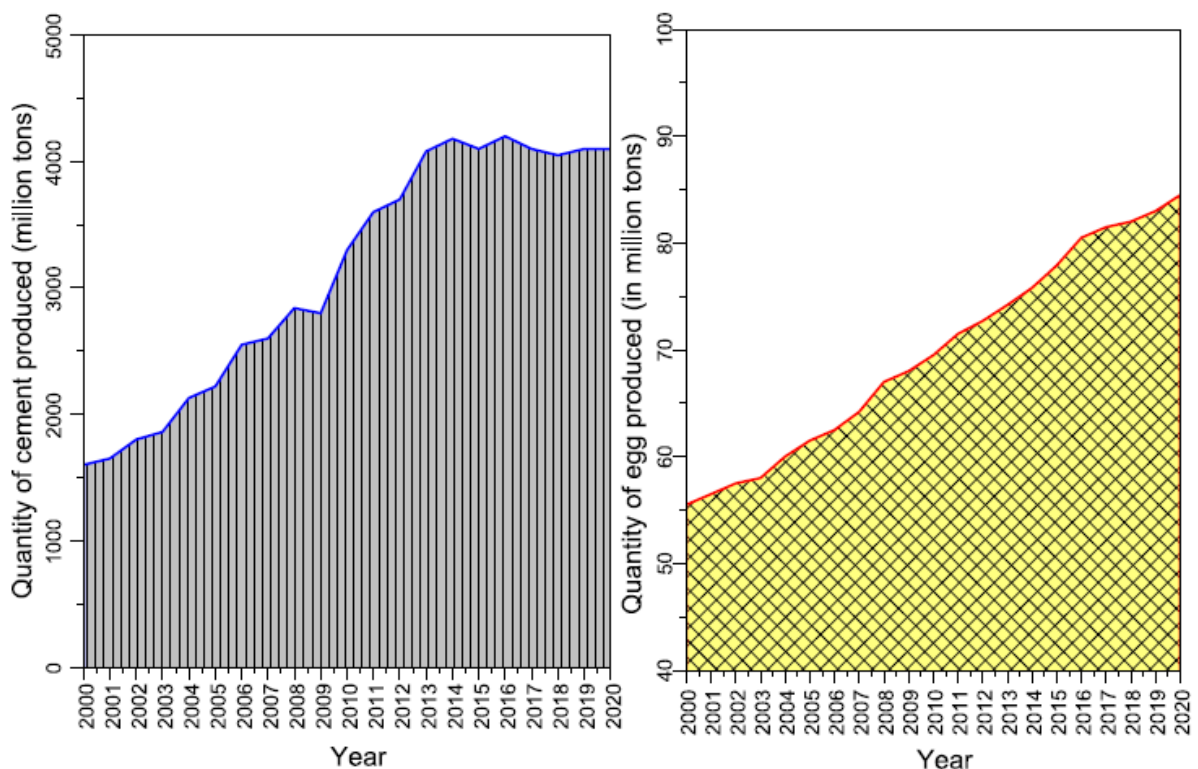


Figura 1. Cantidad de producción de PES y cemento del año 2000 a 2020
Fuente: Nandhini & Karthikeyan, 2022

La cáscara de huevo está compuesta principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3), que representa aproximadamente el 95% de su masa. Es un

material común en la naturaleza y se utiliza en diversas aplicaciones industriales, incluida la construcción (Bhardwaj et al., 2025), al someterla a un proceso de calcinación, donde el carbonato de calcio se transforma en óxido de calcio (CaO) según la reacción: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$. Este óxido de calcio, también conocido como cal viva, puede reaccionar con el agua para formar hidróxido de calcio, que posee propiedades cementantes y puzolánicas (Ribeiro et al., 2021). El óxido de calcio presente en la cáscara de huevo es un componente esencial para la formación de gel ligante silicato de calcio hidratado, en los materiales cementicios (Hussein et al., 2024).

Diversos estudios han documentado que el PES aporta no solo beneficios ambientales, al contribuir a la gestión de residuos orgánicos, sino también ventajas técnicas al mezclarse en proporciones adecuadas con el cemento Portland tradicional. El PES es un material de granulometría fina que le permite integrarse bien en la matriz del concreto, lo que contribuye a una distribución homogénea y eficaz de sus componentes, lo que mejora las propiedades mecánicas del concreto en el orden de 13% cuando la sustitución de Portland por PES es de 10% (Izquierdo et al., 2018).

Al triturar estos cascarones de huevo y calcinar el polvo de cáscara de huevo a 900 °C, se realiza una transferencia de la mayor parte del carbonato de calcio al óxido de calcio, y como resultado de este cambio de propiedades químicas se vuelve un material cementante. Este proceso no solo disminuye la dependencia de recursos naturales no renovables, como la caliza, sino que también reduce las emisiones de CO₂ asociadas a una menor demanda

de energía requerida en relación con la producción tradicional de cemento. Cabe señalar que el polvo de cáscara de huevo calcinado o *Powered eggshell (PES)* por sus siglas en inglés, tiene una menor huella de carbono que el cemento Portland, lo anterior, debido a que para la producción de este se requieren 1450°C para su cocción, sin contar los procesos relacionados con trituración, molienda y otros, visto desde la temperatura requerida para la producción del material cementante, el PES que otorga propiedades similares, requiere menos energía para su producción y en esta etapa es donde genera menos huella de carbono, por lo que desde esta perspectiva se considera una alternativa más sustentable que los cementos tradicionales (Baena et al., 2021; Kim et al., 2021).

Como resultado de la calcinación, el óxido de calcio puede reducir la permeabilidad del concreto, lo que mejora su durabilidad. Esto es especialmente beneficioso en aplicaciones en las que el concreto está expuesto a ambientes agresivos o a condiciones húmedas (Rojas et al., 2025), las propiedades del concreto con PES permiten su aplicación en elementos estructurales y prefabricados (Hamada et al., 2020).

Además de su uso en concretos, el PES tiene otras aplicaciones potenciales: Aplicaciones en la construcción, que se enlistan a continuación:

- Morteros: Como añadido a razón de 10% en la producción de morteros, mejora la resistencia a la compresión en 10%, resistencia a la tensión por flexión en 20%, también aumenta la trabajabilidad, reduce la porosidad y absorción de agua. (Chiraz et al., 2025).
- Materiales de construcción ecológicos: La incorporación de PES en un rango entre 5% y 30%, permite la fabricación y uso de materiales de construcción ecológicos que cumplen con los estándares normativos

de ingeniería establecidos, siendo estos bloques de construcción, paneles y otros elementos arquitectónicos sostenibles (Nandhini & Karthikeyan, 2022; Poorveekan et al., 2021).

- Aditivos en asfaltos y mezclas bituminosas: Investigaciones recientes muestran la efectividad de incorporar 6% de PES en mezclas asfálticas para mejorar la trabajabilidad y propiedades mecánicas del asfalto, como la estabilidad de flujo, densidad volumétrica y resistencia a la tensión indirecta (Vasudevan et al., 2019). Asimismo, la adición de PES trabaja como activador escoria granulada de alto horno, lo que puede mejorar el rendimiento de las mezclas de asfalto frío tanto en edades tempranas como tardías, con un desempeño comparable al de las mezclas convencionales de asfalto en caliente para aplicaciones en capas estructurales de pavimento (Mamuye et al., 2024).

2.3. Propiedades y beneficios del uso del PES en el concreto

De acuerdo con la literatura, la evaluación de las propiedades y el desempeño del PES en concreto se remonta al estudio publicado "*Properties of concrete with eggshell powder as cement replacement*" (Yerramala, 2014), posteriormente, comienzan análisis microestructurales para determinar temas de durabilidad del concreto PES (Ansari M et al., 2016). Desde el año 2020 han incrementado los estudios sobre PES e incluyen combinación con otros residuos para mejorar las propiedades del concreto y el análisis de ciclo de vida. Lo más reciente desde el año 2024 son estudios relacionados con la reducción del CO₂.

Tras una década de investigación, el uso del PES como reemplazo de cemento es todavía limitada en comparación con otros materiales cementicios suplementarios y materiales de relleno, por lo que se requiere

investigación adicional para comprender completamente los mecanismos de acción de este material y optimizar su incorporación en diversas aplicaciones de construcción (Zhang et al., 2024).

A pesar de los beneficios de incorporación del PES, la falta de una guía estandarizada de procesamiento y la variabilidad en los resultados de la investigación impiden su adopción generalizada e implementación masiva. Se requieren estudios a largo plazo para validar la consistencia y durabilidad del concreto con PES (esto incluye estudios sobre corrosión, ciclos de congelación-deshielo, y estabilidad volumétrica), lo que facilitaría su integración en las normativas de construcción (Paruthi et al., 2023).

A continuación, se exponen algunos resultados reportados en la literatura sobre el uso del PES como *material cementicio suplementario* para concreto hidráulico.

Nandhini & Karthikeyan (2022) probaron con sustitución de 5% al 20% de reemplazo, y encontraron que el concreto hecho con reemplazo del 10% cemento Portland por PES, tiene los resultados de mayor resistencia y un mejor rendimiento en la mezcla. Adicionalmente, la utilización de PES en el concreto reduce su costo, en función del porcentaje de reemplazo que tiene en la mezcla de concreto por este material cementante suplementario.

(Gowsika et al., 2014) señalan que la combinación del 5% de PES junto con 20% de microsílice puede mantener la resistencia a la compresión sin disminución alguna.

Por otro lado, (Amanah & Khalil, 2021) señalan los beneficios relacionados con la conductividad térmica de las mezclas de concreto que incorporan hasta 15% de PES, consiguiendo una reducción en la conductividad térmica

del concreto del 10.65%, lo que implica mejor desempeño como aislante, adicionalmente, un aumento en la resistencia a la compresión de 14.7% respecto al concreto convencional, y una reducción en la absorción de agua del 10.7%, lo que favorece su durabilidad. Por otro lado, se ha reportado que una sustitución del 10% por PES mejora la resistencia a la compresión en un 1% y disminuye la absorción de agua en un 21% (Ribeiro et al., 2021).

(Jhatial et al., 2021) indican que la combinación de cementos suplementarios como polvo de cascara de palma (20–25%) y PES (5–15%) presentan resistencia a compresión entre 17.05 y 22.60 MPa, resistencia a tensión entre 1.43 y 2.61 MPa, cumpliendo los requisitos de la ACI213R para concreto estructural ligero. En tanto que la conductividad térmica del concreto disminuye (0.55–0.63 W/mK) frente al concreto de referencia (0.82 W/mK), lo que significa mejor desempeño térmico y mayor aislamiento, lo que contribuye a la eficiencia energética en la edificación.

Por otro lado, (Abdellatief et al., 2025) señalan que la sustitución PES en más del 10% disminuye la resistencia a compresión, a menos que se incremente el módulo de silicato (relación $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$), lo que definitivamente disminuye la porosidad, pero incrementa la conductividad térmica.

En contraste, para la sustitución de 10% Ribeiro et al., 2021 y Chiraz et al., 2025, reportan que el PES puede alcanzar una resistencia a la compresión de 68.4 MPa a los 28 días, lo que representa una mejora significativa en comparación con el concreto convencional. Además, el proceso de hidratación del cemento se acelera significativamente con la incorporación de PES, lo que favorece la formación de *monocarboaluminato* durante la mezcla de los materiales (Paruthi et al., 2023), y por ende se alcanza mayor resistencia, en menor tiempo (en sustituciones de PES menores a 20%).

Rojas et al. (2025) indican que la incorporación de PES mejora la resistencia a la compresión incluso por arriba de los 28MPa, y reduce los costos del concreto por concepto de materiales en un 11%. Sin embargo, sustituciones mayores al 5% de PES, aunque mejoran la fluidez del concreto, disminuyen su resistencia a los 28 días. Esta disminución se atribuye a la menor reactividad puzolánica de las cáscaras de huevo en comparación con el cemento, lo que puede afectar la formación de fases hidratadas cruciales para la resistencia mecánica del concreto (Ribeiro et al., 2021). Además, un tamaño de partícula adecuado, inferior a 0.1 mm (finura de 5,650 cm²/g), es esencial para asegurar una reacción eficiente con los demás componentes del concreto, y es recomendable verificar la ausencia de residuos orgánicos de cada lote según la normativa *ASTM C618-22* (Rojas et al., 2025), para evitar afectar negativamente la porosidad y resistencia del concreto. Adicionalmente, debido a la finura del PES se deben considerar aditivos superplastificantes para aminorar la pérdida de trabajabilidad por demanda de agua adicional (Chiraz et al., 2025).

(Laca et al., 2017) investigó la influencia de la adición de cáscara de huevo en la resistencia a la compresión, tiempo de fraguado y trabajabilidad del concreto. Los resultados indicaron que la incorporación de cáscara de huevo calcinado en proporciones del 2.5% y 5% del peso del cemento mejora significativamente la resistencia a la compresión del concreto.

(Ochoa & Forestieri, 2019) realizaron un estudio sobre el uso de cáscara de huevo en morteros, demostrando que la incorporación de este residuo orgánico puede mejorar la resistencia y durabilidad del material.

El polvo de cáscara de huevo ha demostrado ser una opción viable como sustituto parcial del cemento en la producción de concreto sostenible, como

lo señalan diversos autores. (Jhatial et al., 2022b) indican que, al usar polvo de cáscara de huevo, se puede reducir la cantidad de cemento en las mezclas de concreto, contribuyendo a la sostenibilidad al disminuir la huella de carbono asociada con la producción de cemento en hasta 7% de las emisiones globales de CO₂.

Además, hay estudios que indican que el PES puede mejorar las propiedades del concreto, tanto mecánicas como de durabilidad. Por ejemplo, se han analizado sus propiedades físicas y químicas, y se ha demostrado que su adición puede mejorar características como la resistencia a la compresión y resistencia a la corrosión, aunque también se ha observado que puede haber una pérdida significativa de peso y resistencia en condiciones adversas, como exposiciones a sales sulfúricas o cloruros (Sathiparan, 2021; Shcherban' et al., 2022).

Artículos de revisión también destacan la capacidad del polvo de cáscara de huevo para ser utilizado como un relleno calcáreo alternativo al cemento (aplicaciones de estructura de pavimentos), mostrando similitud con la caliza, lo que sugiere su potencial en la formulación de morteros de cemento y otros materiales de construcción (Chong et al., 2020, 2024). La adición de PES contribuye a la estabilidad térmica del concreto, haciéndolo más resistente a cambios de temperatura.

A pesar de los numerosos beneficios tanto económicos como ambientales, en el uso de residuos orgánicos en la construcción también presenta ciertos desafíos, tales como garantizar la consistencia y calidad de los materiales reciclados. Por ejemplo, los residuos orgánicos pueden variar significativamente en su composición y propiedades, lo que puede afectar la uniformidad del cemento suplementario producido y presentar variaciones

en los tiempos de fraguado del concreto producido. Por lo tanto, es crucial desarrollar métodos de procesamiento, limpieza (esté libre de impurezas), tratamiento que aseguren la calidad y la homogeneidad de estos materiales, ya que su implementación a gran escala podría transformar la industria de la construcción, alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad y reducción de residuos.

Un listado de beneficios asociados a la incorporación de PES como material cementante suplementario en diversos porcentajes de reemplazo al concreto se muestra en la **Tabla 1** a continuación (de elaboración propia):

Tabla 1. Resumen de beneficios reportados en literatura

Categoría	Beneficio	Descripción
Sostenibilidad ambiental	Reducción de residuos	La reutilización de cáscaras de huevo, que usualmente se desechan como residuos sólidos, ayuda a reducir el impacto ambiental
	Menor huella de carbono	Al reemplazar parcialmente el cemento Portland, disminuye la cantidad de CO ₂ producido durante la fabricación del cemento
Composición química valiosa	Calcio (CaCO ₃)	El alto contenido de carbonato de calcio en las cáscaras de huevo brinda propiedades cementantes, similares a las de la piedra caliza, mejora la integración de ingredientes del concreto
Propiedades mejoradas del concreto	Resistencia mecánica	En proporciones óptimas, el PES puede mantener o mejorar propiedades como la resistencia a compresión y flexión del concreto. Sin embargo, la cantidad de PES debe ser controlada con precisión para no afectar negativamente la durabilidad o resistencia.
	Durabilidad	La incorporación de cáscaras puede aportar beneficios en ciertas condiciones ambientales, especialmente en términos de resistencia química y estabilidad
Reducción de costos	Material económico	Al ser un residuo ampliamente disponible, la cáscara de huevo es económica comparada con aditivos tradicionales o con el propio cemento
	Ahorro de cemento	La sustitución parcial con PES reduce el uso de cemento, resultando en menores costos de producción

Reciclaje y Economía Circular	Reutilización de desechos	Este enfoque fomenta una economía circular al reciclar residuos alimentarios para aplicaciones industriales
	Mitigación del impacto ambiental	Se evita la disposición de las cáscaras en vertederos, donde pueden contribuir a problemas ambientales en escala.

El reemplazo parcial con polvo de cáscara de huevo (en niveles óptimos) con los reemplazos de 5 a 15% se mantienen y mejoran la resistencia a la compresión y a la flexión respectivamente en condiciones normales de curado. Cabe señalar que, aunque el PES es un sustituto del cemento Portland tradicional, el PES tiene menor capacidad ligante, es decir son similares, pero el cemento Portland ha sido objeto de investigación y desarrollo por más de un siglo lo que le permite tener propiedades mejores a las del producto inicial al inicio del siglo XX, el cemento PES requiere encontrar modificadores que mejoren sus áreas de oportunidad. Según un censo de la literatura, se considera como el porcentaje máximo recomendado el 15%, posterior a este porcentaje las propiedades tienden a reducirse, afectando negativamente la resistencia (disminuciones del 17% fueron reportadas por Ribeiro et al., 2021 cuando se sustituye el 20%), la adherencia y la durabilidad.

Metodología

Este capítulo se enfoca en describir el diseño metodológico adoptado en la presente investigación, el cual se presenta en la **Figura 2**, en la cual se describen los métodos, técnicas y procedimientos empleados para recolectar y analizar los datos, con el fin de asegurar la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos.

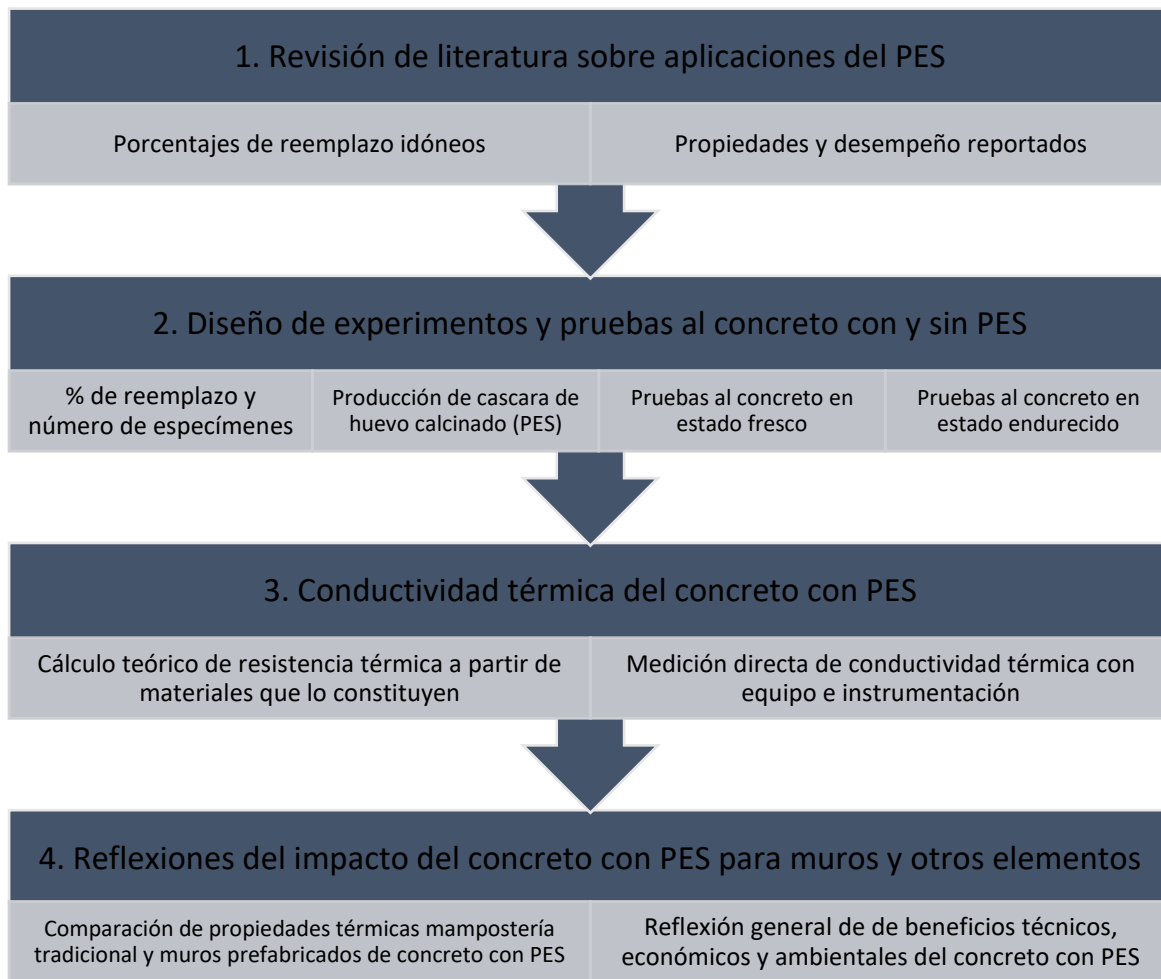


Figura 2. Metodología de evaluación del Concreto-PES en aplicaciones de ingeniería civil.

3.1. Revisión de literatura sobre aplicaciones del PES

Para llevarla a cabo, se consultaron bases de datos de *Web of Science* principalmente y a partir de palabras clave se buscaron artículos del tema, para ser leídos a texto completo. Esto se requiere para conocer la problemática ambiental que existe y que esta investigación atiende (justificación), en este caso se refiere a las emisiones de CO₂ derivadas de la producción de cemento Portland y la gestión de residuos de los cascarones de huevo.

Por otro lado, esta actividad permite identificar las tendencias y hallazgos reportados en la literatura sobre las características y desempeño del concreto con PES, así como los porcentajes de reemplazo de PES utilizados considerados como óptimos y la razón de ello, de acuerdo con los autores.

3.2. Diseño de experimentos y pruebas al concreto con y sin PES

La investigación se llevará a cabo mediante un enfoque experimental, comparando muestras de concreto tradicional con aquellas que incorporan cáscara de huevo calcinado (PES), sustituyendo en un 0%, 10% y 15%, siendo este último, donde existe una mayoría de autores que afirma que después de este, las ventajas de su incorporación disminuyen. Debido a el tiempo y recursos para el número de especímenes a elaborar de concreto, es relevante contar con una base sólida de hallazgos reportados otros autores, para optimizar los recursos y llevar a cabo las pruebas necesarias para validar el desempeño y confiar en los resultados encontrados. Este trabajo representa una continuación y comprobación de esos estudios.

3.2.1. Fabricación de PES para concreto

El proceso de producción del polvo de cáscara de huevo (PES), se obtiene mediante métodos como molienda y tamizado, asegurando una granulometría adecuada para sustituir parcialmente al cemento, posteriormente se procede a la calcinación, los pasos y descripción se describen en el diagrama de la **Figura 3**, que se presenta a continuación, la **Figura 4** presenta un conjunto fotografías alusivas al proceso de la Figura 3.

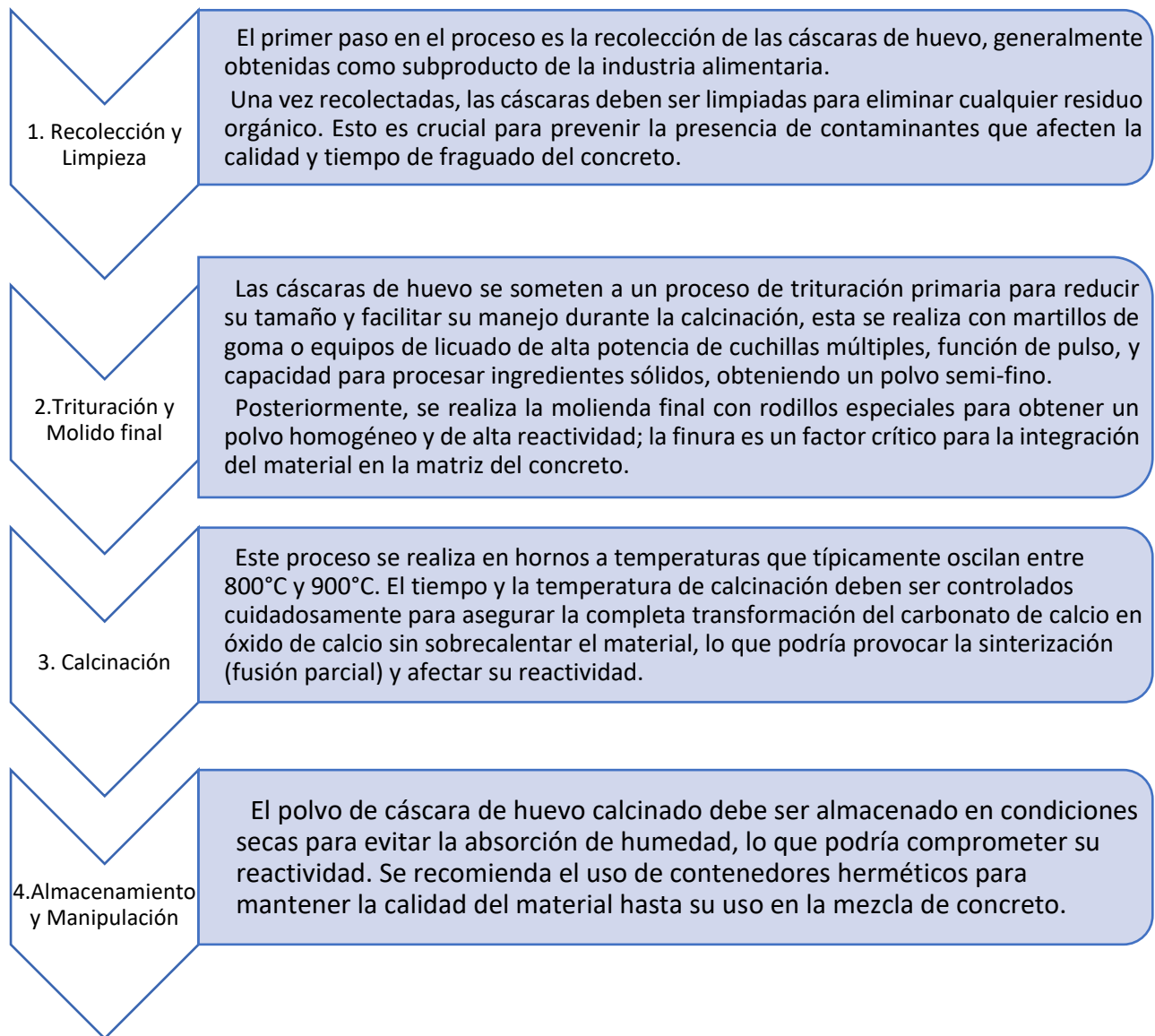


Figura 3. Proceso de fabricación de PES

1. Recolección y limpieza



2. Trituración y molido final



3. Calcinación y 4. Almacenamiento-manipulación.



Figura 4. Memoria fotográfica del proceso de producción de PES.

3.2.2. Pruebas al concreto en estado fresco y endurecido

Se realizan pruebas a agregados (para el diseño de mezclas por ACI 211) y concreto fresco (ver **Tabla 2**). Por otro lado, las pruebas al concreto en estado endurecido requeridas (ASTM -C- 039) para verificar el desempeño entre concretos tradicionales y con adición de PES se presentan en la **Figura 5** señalando la cantidad de especímenes elaborados (cilindros 15x30cm) para los reemplazos del cemento Portland por PES.

Tabla 2. Pruebas a agregados y concreto fresco para los reemplazos de PES indicados.

Categoría	Normativa	Descripción
Pruebas Agregados	ASTM-C-033 y 136	Análisis granulométrico de agregados
	ASTM-C-029	Masa volumétrica de los agregados
	ASTM-C-127 y 128	Densidad y absorción del agregado grueso y fino
	ASTM-C-566	Contenido de humedad de los agregados
Pruebas al concreto en estado fresco	ASTM -C- 138	Masa volumétrica del concreto (gravimétrico)
	ASTM -C- 231	Contenido de aire del concreto – método presión
	ASTM-C-1064	Temperatura del concreto
	ASTM-C-1064	Revenimiento del concreto

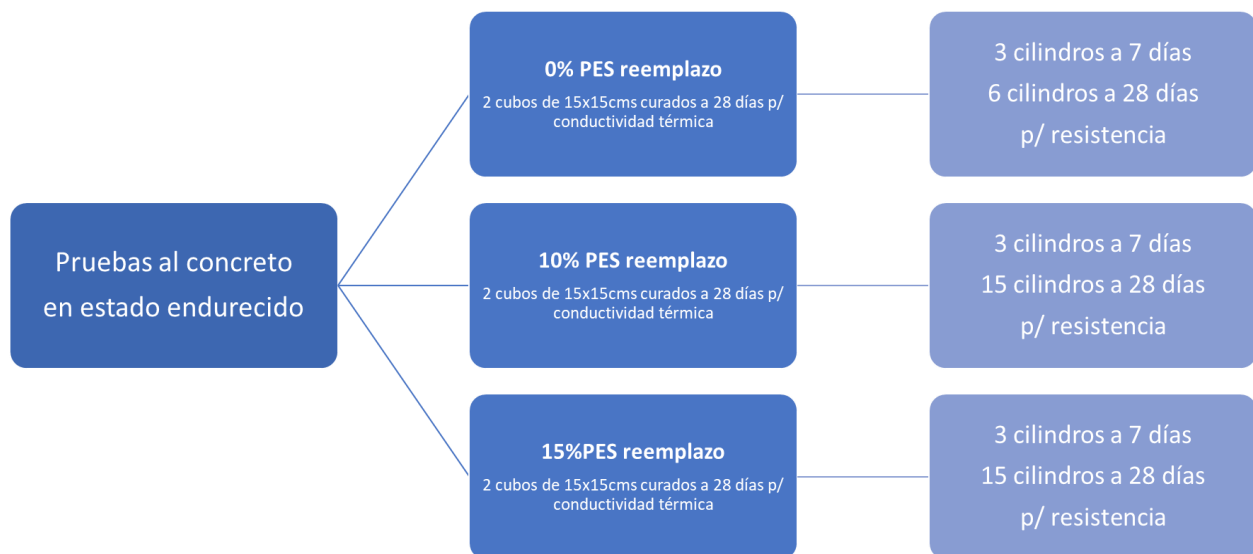


Figura 5. Cantidad de especímenes elaborados para el 0%, 10% y 15% de PES

3.3. Conductividad térmica de concreto con PES y resistencia térmica.

El cálculo teórico de la cuantificación de la resistencia térmica (R) para muros, se refiere a la cuantificación de los materiales que constituyen el muro, en este caso se toman en cuenta diferentes casos, como muros de mampostería tradicional a base de ladrillo y bloque, así como los casos de muro prefabricado de concreto, productos como paneles, y recubrimientos como emplaste o pintura. Lo anterior, para la generación de una tabla comparativa del acumulado de la resistencia térmica para muros, con la intención de tener un parámetro de referencia en relación con lo requerido por la normativa vigente (NMX-C-460, 2009). En el Anexo **A1** se definen algunos conceptos útiles.

Por otra parte, el análisis de conductividad térmica (λ) al concreto se realiza a partir de equipo especializado para determinar la variación de esta propiedad en relación con el porcentaje de reemplazo.

3.4. Reflexiones del impacto del concreto con PES para muros y otros elementos

Finalmente, se identifica el grado de competitividad que tienen los muros colados con concreto y PES (prefabricados), con relación a los muros de mampostería tradicional a base de block o ladrillo de 15 cm.

En la sección de conclusiones y recomendaciones, se realiza un proceso de reflexión crítica del desempeño del concreto que incorpora PES parcialmente como material cementicio suplementario, las limitaciones de este concreto reciclado, así como otros beneficios ambientales y económicos relacionados con la implementación del concreto con PES en la industria de la construcción, particularmente en muros.

4. Resultados

En esta sección se describen los valores obtenidos en las pruebas de laboratorio para los materiales. Asimismo, la comparativa de propiedades térmicas entre la construcción tradicional y la propuesta de concreto+PES.

Pruebas al concreto con y sin PES

En la sección de Anexos, se presentan reportes de laboratorio de los agregados para concreto (**A2**), así como el diseño de mezclas (**A3**) utilizado para la mezcla testigo o con 0% de PES, y para las mezclas con 10% y 15%.

Pruebas al concreto en estado fresco

Se realizaron pruebas de laboratorio en estado fresco con el cementante propuesto (PES), la **Tabla 3** compara el desempeño frente al concreto testigo que tenía 0% de PES en el concreto. El rendimiento de la mezcla es 1004Lt/m³. La **Figura 6** presenta memoria fotográfica de pruebas realizadas.

Tabla 3. Resultados de pruebas al concreto fresco con y sin PES.

Prueba	Concreto 0% PES	Concreto 10% PES	Concreto 15% PES
Masa volumétrica (Kg/m ³)	2005	2012	2019
Contenido de aire (%)	2.2	2.5	2.6
Temperatura (°C)	23.5	25.0	25.4
Revenimiento (mm)	119	116	114

De acuerdo con la Tabla 3, se puede observar el incremento de la masa volumétrica, por otra parte, el revenimiento disminuye a razón del aumento del porcentaje de incorporación de PES, lo que evidencia la pérdida de trabajabilidad y requerimiento de mayor agua o aditivo plastificante para

recuperarla. Es importante considerar esto para contar con buen desempeño del concreto en estado fresco y evitar inconvenientes en su colocación.



Figura 6. Memoria fotográfica de pruebas en estado fresco del concreto.

Pruebas al concreto en estado endurecido

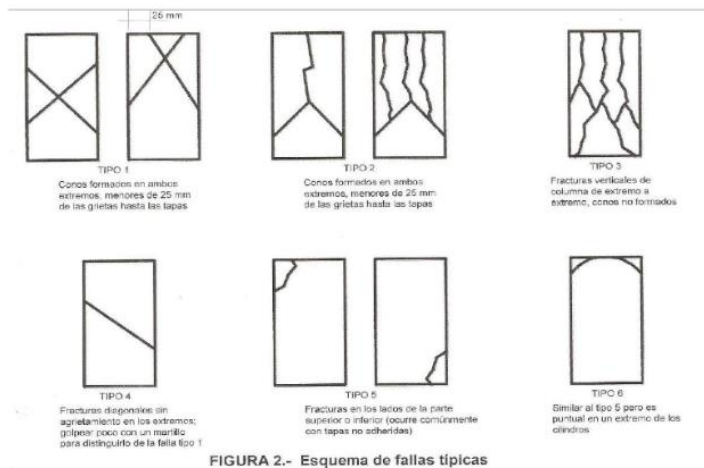
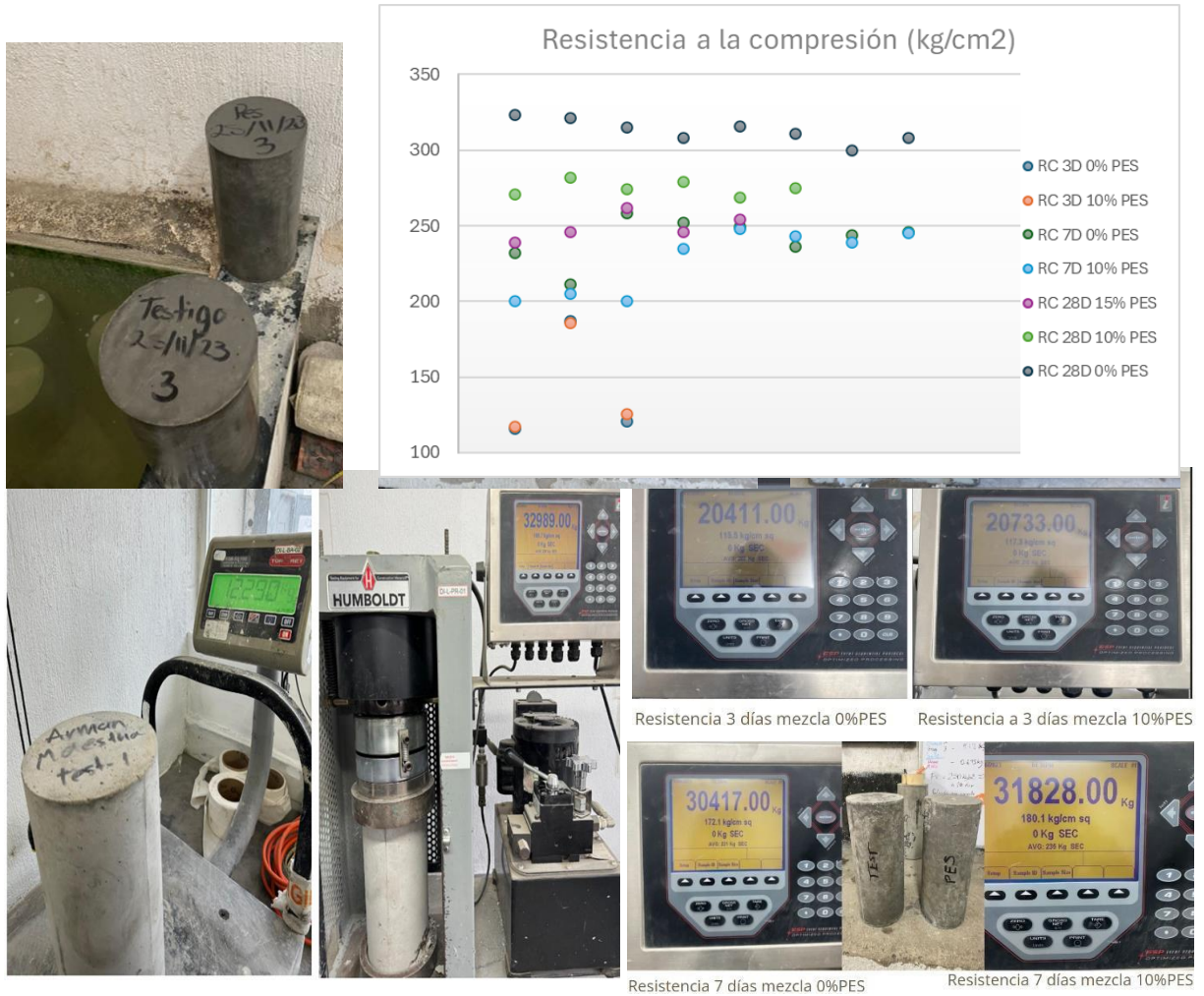
Se realizaron pruebas de laboratorio en estado endurecido de acuerdo a la normativa vigente, las pruebas fueron de acuerdo con el diseño de experimentos, y para los 3, 7 y 28 días de edad, en los porcentajes de reemplazo de 0%, 10% y 15% de PES, la **Tabla 4** compara el desempeño de estos concretos. La **Figura 7** presenta memoria fotográfica de pruebas realizadas. El Anexo **A4** muestra todos resultados de concreto endurecido.

Tabla 4. Resultados de pruebas al concreto endurecido 0%, 10% y 15% de PES.

Prueba(Kg/cm ²)	Concreto 0% PES	Concreto 10% PES	Concreto 15% PES
Resistencia a la compresión 3 días	141.1	143.0	—
Resistencia a la compresión 7 días	241.0	226.9	—
Resistencia a la compresión 28 días	312.8	275.0	249.4

Es importante destacar que a edades tempranas (3 días) no existe diferencia significativa ni indicativa del desempeño mecánico entre concretos con y sin incorporación de PES. Sin embargo, a partir de los 7 días ya empiezan a notarse las diferencias entre ambos concretos; en particular la resistencia del concreto con 10% de reemplazo de PES por cemento Portland presenta una resistencia menor en comparación con la mezcla testigo de 0% de reemplazo. Misma tendencia se muestra a los 28 días de edad, nótese que a mayor porcentaje de reemplazo menor resistencia a la compresión en comparación con la mezcla testigo, y aunque se cumple apenas con la resistencia de diseño de 250 kg/cm², el concreto con 10% de PES es 13.74% menor que el concreto testigo, y en el concreto que incluye 15% de PES la resistencia es 25.42% menor que el concreto de referencia. Esto indica que, a mayor reemplazo de PES en el concreto, menor resistencia a la compresión.

Figura 7. Memoria fotográfica de pruebas en estado endurecido del concreto.



Conductividad térmica del concreto con PES

La conductividad térmica (λ) es la cantidad de calor transmitido por unidad de tiempo y área (unidades en W/mk), no solo depende del espesor de la pared y del gradiente de temperatura, sino también de las propiedades intrínsecas del material en cuanto a su capacidad de conducir el calor. Materiales con una menor conductividad térmica son materiales más aislantes (Aislacel, 2025).

El enfoque en el diseño de estructuras para desarrollar la resistencia térmica en dichas construcciones ha ido creciendo año con año, y su costo también aumenta. El sector de la construcción será responsable y protagonista del consumo de energía y la contaminación ambiental de la tierra entre 2010 y 2050, y se espera para este periodo que los requerimientos mundiales de calefacción y refrigeración aumenten un 79% en edificación residencial y el 84% en edificación comercial (Ziapour et al., 2020).

La Conductividad Térmica (CT) de los materiales " λ " es la capacidad de permitir el paso del calor a través de ellos (sus unidades son W/mk, menor CT habla de materiales más aislantes), y es el inverso de la resistividad o resistencia térmica. La CT es una propiedad crucial que afecta directamente la eficiencia energética de las edificaciones y el confort térmico de los ocupantes. La búsqueda de materiales que mejoren las propiedades térmicas del concreto ha incrementado en los últimos años, investigando la factibilidad de subproductos industriales y residuos orgánicos. En el caso de muros, esto puede representarse mediante el siguiente esquema (**Figura 8**), donde el flujo de calor se da a través de una pared compuesta (muro más placa de poliestireno o emplaste con mortero).

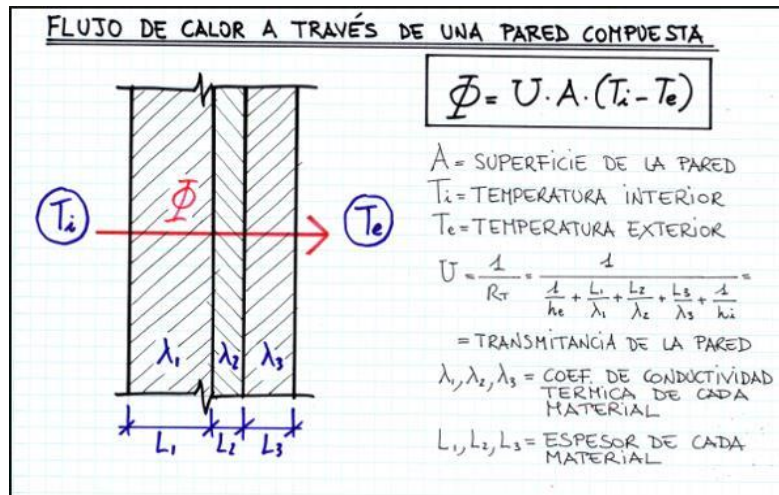


Figura 8. Esquema representativo de flujo de calor a través de una pared compuesta.

Determinación de conductividad térmica en especímenes con y sin PES.

(Pérez et al., 2011) realizó un estudio en Hermosillo, Sonora sobre la resistencia térmica en muros de mampostería, se encontró que las resistencias térmicas promedio para los bloques de 0.12 m y 0.15 m son de 0.159 m².K/W y 0.171 m².K/W respectivamente. Por otra parte cuando se rellenan las cavidades con aislamiento térmico son de 0.407 m².K/W y de 0.530 m².K/W, respectivamente. Al aplicar el mismo volumen de aislante de la cavidad rellena, sobre la cara exterior, se obtienen valores de 1.555 m².K/W y 2.147 m².K/W, en bloques de 0.12 m y 0.15 m respectivamente. Derivado de lo anterior, se identifica que es mucho más conveniente aplicar el aislamiento térmico por la cara exterior del bloque, ya que los valores máximos de resistencia térmica relleno las cavidades, son alrededor del 25% de los valores máximos de resistencia térmica aplicando el mismo volumen de aislamiento en la cara exterior del bloque de concreto hueco.

El PES ha emergido como un aditivo prometedor en la industria del concreto, no solo por su contribución a la sostenibilidad y reducción de residuos, sino también por sus posibles beneficios en la mejora de la conductividad térmica del concreto. Este apartado se centra en analizar cómo la incorporación de

PES calcinado afecta la conductividad térmica del concreto, para abordar la factibilidad de su implementación.

Derivado a la trayectoria de la Dra. Borbón Almada y los laboratorios especializados con los que cuenta, se gestionó una estancia corta de investigación en la Universidad de Sonora, Campus Hermosillo, para determinar la conductividad térmica del concreto con PES en los diferentes % de reemplazo establecidos en la presente investigación.

Para realizar la medición directa de la conductividad térmica se utilizó el dispositivo *KD2 Pro Thermal Properties Analyzer*, en especímenes cilíndricos de 28 días de edad (ver Figura 9).



Figura 9. Medición de conductividad térmica de la mezcla propuesta en UNISON

Los resultados de esta medición se muestran en la **Tabla 5**, destacando lo que el dispositivo tiene una variación de $\pm 10\%$, y dado que la diferencia entre especímenes no es tan grande, se requería un equipo de mayor precisión para medir la conductividad térmica del material, se trata de un dispositivo basado en el método de placa caliente o técnicas de flujo de calor estable que ofrece márgenes de error significativamente menores (-0.7%), el equipo se muestra en la **Figura 10**, en particular se requiere que las probetas de ensaye no sean cilíndricas, por lo que fue necesario elaborar

moldes y generar otros especímenes¹ (ver la **Figura 11**) para recibir apoyo con el procesamiento de las muestras en la UNISON.

Tabla 5. Mediciones de conductividad térmica para el 0% y 10% de reemplazo de PES.

Mezcla %	Medición 1 (W/mK)	Medición 2 (W/mK)	Medición 3 (W/mK)	Promedio (W/mK)
C0%PES	1.116	1.155		1.135
C10%PES	1.287	1.103	1.260	1.216

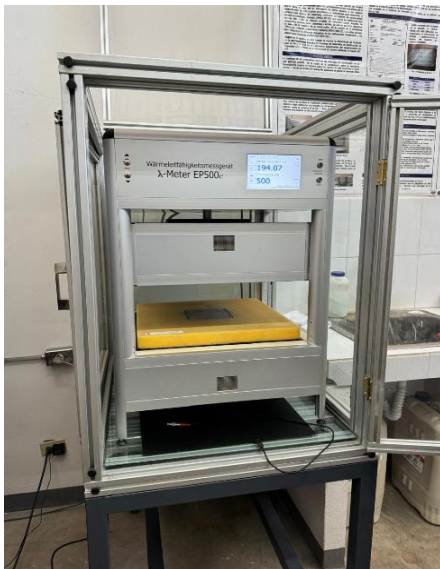


Figura 10. λ-Meter EP500e
(Wärmeleitfähigkeitsmessgerät)



Figura 11. Moldes elaborados de 15x15x10 cms y especímenes para medición en λ-Meter EP500e.

El λ-Meter EP500e, es un dispositivo de medición de la conductividad térmica que se utiliza basado en el principio de placa caliente protegida para determinar tanto la conductividad como la resistencia térmica de materiales aislantes. Se caracteriza por tener la precisión de menos del 1.0%, permitiendo evaluar la capacidad para transferir calor de materiales. Este dispositivo recibe especímenes de una dimensión promedio de 15x15x10 centímetros en el centro de su estructura. En este sentido, se fabricaron los moldes de dichas medidas para verter la mezcla de concreto con y sin PES,

¹ Asimismo, se considera pertinente complementar el análisis con pruebas adicionales en diferentes condiciones de curado y formatos de muestra, con el fin de evaluar la consistencia del desempeño térmico del material en escenarios representativos de su aplicación en obra.

para contar con especímenes para su medición. Los resultados de la medición se muestran en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Resultados de conductividad térmica del material obtenidos del dispositivo λ -Meter EP500e

Mezcla %	λ (W/mK)
C0%PES	0.892
C10%PES	1.052
C15%PES	1.340

Los valores de conductividad térmica obtenidos de esta medición son muy congruentes con los valores reportados en diversa bibliografía consultada, Corresponde a valores de concreto simple. Sin embargo, se observa un aumento en la conductividad térmica en la medida del aumento de porcentaje de polvo de cáscara de huevo calcinado (PES).

Cabe destacar, y recordando que a menor conductividad térmica más aislantes los materiales, los valores presentados en la **Tabla 6** (equipo con mayor precisión) permiten concluir que la adición de PES NO REDUCE la conductividad térmica conforme aumenta, por lo que NO mejora las capacidades de aislamiento del concreto, esto es diferente a lo que se esperaba obtener, lo cual sugiere que este aditivo podría no ser adecuado para aplicaciones donde se requiere eficiencia energética, pese a lo que indican algunos estudios.

En este sentido, no se valida la hipótesis de que la adición de PES al concreto produce las propiedades aislantes. El resto del documento discute sobre en qué medida el concreto con PES *puede propiciar un sistema constructivo más eficiente y ambientalmente responsable* (el resto de la hipótesis, considerando el desempeño mostrado en las pruebas mecánicas al concreto expuestas anteriormente, así como lo relativo a la gestión de residuos y disminución de CO₂ por reemplazo parcial de cemento Portland.

Cálculo de la resistencia térmica. Método simplificado.

Para que los muros cumplan con las especificaciones establecidas en la tabla 2 de la NMX-C-460, deben de ser parte de las fachadas y que limiten los espacios interiores de la vivienda. Estas propiedades varían de acuerdo a la zona térmica de México de acuerdo la tabla 3 y figura 1 de NMX-C-460

TABLA 2.- Resistencia Térmica Total (Valor "R") de un elemento de la envolvente

Zona Térmica No.	Techos m² K / W (ft² h °F / BTU)			Muros m² K / W (ft² h °F / BTU)			Entrepisos Ventilados m² K / W (ft² h °F / BTU)		
	Mínima	Habitabilidad	Ahorro de Energía	Mínima	Habitabilidad	Ahorro de Energía	Mínima	Habitabilidad	Ahorro de Energía
1	1,40 (8,00)	2,10 (12,00)	2,65 (15,00)	1,00 (5,70)	1,10 (6,00)	1,40 (8,00)	NA	NA	NA
2	1,40 (8,00)	2,10 (12,00)	2,65 (15,00)	1,00 (5,70)	1,10 (6,00)	1,40 (8,00)	0,70 (4,00)	1,10 (6,00)	1,20 (7,00)
3A, 3B y 3C	1,40 (8,00)	2,30 (13,00)	2,80 (16,00)	1,00 (5,70)	1,23 (7,00)	1,80 (10,00)	0,90 (5,00)	1,40 (8,00)	1,60 (9,00)
4A, 4B y 4C	1,40 (8,00)	2,65 (15,00)	3,20 (18,00)	1,00 (5,70)	1,80 (10,00)	2,10 (12,00)	1,10 (6,00)	1,80 (10,00)	1,90 (11,00)

Nota 4: 1 m² K / W = 5,68 ft² h °F / BTU

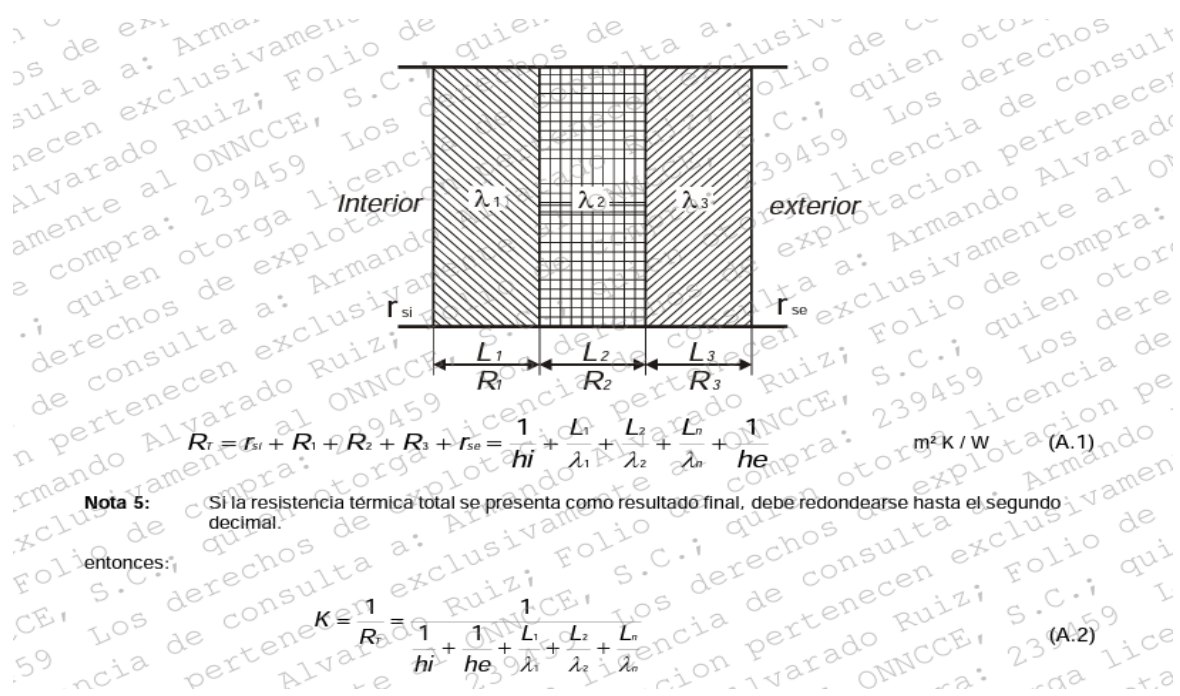
TABLA 3.- Zonas térmicas de la República Mexicana

Estado	Localidad	Zona Térmica
Aguascalientes	Aguascalientes	3 B
Baja California	Ensenada	3 C
	Mexicali	2
	Tijuana	3 B
Baja California Sur	La Paz	2
	Los Cabos	2



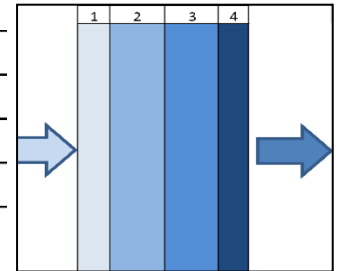
FIGURA 1.- Zonas térmicas de la República Mexicana (La presente figura es solo ilustrativa).

Como ya se mencionó la resistencia total de un muro o techo con capas homogéneas es la suma de las resistencias térmicas parciales de cada capa. Basándose en la figura #2, tabla #3 de la NMX-C-460 y en el concepto de resistencia total tenemos el cálculo que se muestra a continuación.



Para estos valores de materiales presentados en la tabla siguiente:

Material	Densidad kg/m3	Conductividad termicade diseño (λ)
Aplanado de yeso	800	0.372
Concreto simple al interior	1250	0.698
Concreto simple al exterior	2200	1.65
Mortero Cemento arena	2000	0.17



Los valores de conductividad térmica por material, serían los siguientes:

Capas		Espesor ("e")	"λ" W/Mk (conductividad termica)	e/λ
1-	Aplanado de yeso	0.05	0.372	0.134408602
2-	Concreto simple al interior	0.075	0.698	0.107449857
3-	Concreto simple al exterior	0.075	1.65	0.045454545
4-	Mortero Cemento arena	0.05	0.17	0.294117647

Sustituyendo en la ecuación de resistencia térmica total se tiene que:

$$R_T = r_{sr} + R_1 + R_2 + R_3 + r_{se} = \frac{1}{hi} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_n}{\lambda_n} + \frac{1}{he}$$

Conductancia superficial interior	muros
$h_i =$	8.1

Conductancia superficial exterior
 $h_e = 13$

Resistencia total:	0.781810518	m2 K/W
--------------------	-------------	--------

Como resultado tenemos una resistencia térmica total del muro de $0.7818 \text{ m}^2 \text{ K/W}$

Esto indica que la conductividad térmica de la combinación de materiales tradicionales, aunque esta por encima de lo recomendable, tiene mejor desempeño en resistencia térmica que la mampostería y el concreto con reemplazos de PES de acuerdo con los resultados de laboratorio.

5. Conclusiones y recomendaciones

Esta investigación busco validar el desempeño que tenían los muros de concreto con adición de PES. Aunque en la literatura existen algunos estudios que señalan propiedades favorables, incluso en temas de durabilidad, aunque existen estudios publicados con resultados prometedores, se requiere investigación que valide su desempeño satisfactorio a largo plazo en diversas aplicaciones de construcción, asimismo condiciones de exposición severas o ambientes de corrosión.

Este estudio tras llevar a cabo diversas pruebas no se puede confirmar que hipótesis planteada al inicio, debido a que el desempeño mecánico que mostró el concreto con PES en la resistencia a la compresión fue hasta 25% menor que el concreto sin adición de PES, por lo que a mayor reemplazo menor resistencia a la compresión.

Por otro lado, se encontró que a mayor reemplazo de cemento Portland por PES el concreto en estado fresco se vuelve más denso (mostrando incremento de masa volumétrica), y en este mismo sentido pierde trabajabilidad a mayor porcentaje de reemplazo de PES.

En relación con el desempeño mostrado en las pruebas de conductividad térmica, el efecto de la adición de PES en el concreto fue adverso, debido a que el 10%PES incrementó la conductividad térmica en 17.93%, y con 15% de reemplazo esta fue 33.43% más alta que el concreto sin adición de PES.

De acuerdo con los resultados de esta investigación, no existe evidencia que sustente que, en las proporciones adecuadas, la incorporación de PES en concretos puede mejorar o mantener las propiedades mecánicas de aquellos

sin adición de PES, tampoco que un concreto con adición de PES ayude a la eficiencia energética por aportar mayor resistividad térmica en muros.

No considero que este resultado sea del todo negativo, porque deja el antecedente de que la incorporación de PES tiene más desventajas que ventajas, lo anterior se sustenta en las pruebas de laboratorio elaboradas.

Reportar los resultados de investigaciones que no validan su hipótesis tras la aplicación del método científico, considero que es pertinente, y ayuda a que otros no dediquen tiempo de investigación a probar algo que no dio buenos resultados en lo general.

Lo que es si es cierto es que el reemplazo de PES sobre cemento Portland permite reducir el número de emisiones de CO₂ lo que puede promover la construcción sustentable. Desde el punto de vista económico la producción de muros prefabricados de concreto sin PES o con bajos porcentajes de reemplazo puede reducir la mano de obra, y el tiempo de edificación, lo que puede traducirse en algo positivo a nivel de ingeniería de valor.

Con la producción de polvo de cáscara de huevo, se promueve la economía circular y reciclaje del residuo agroalimentario que va en aumento. Existen desafíos que deben abordarse paralelamente para la implementación exitosa de esta aplicación, tales como, la consistencia de las propiedades, el procesamiento adecuado para eliminar materia orgánica que pueda interferir en la reacción química del cemento, los tiempos de fraguado o la trabajabilidad. Es muy probable que la materia orgánica interfiera en el desarrollo de la resistencia del concreto, por lo que evaluar si a edades más avanzadas se alcanza la resistencia esperada a los 28 días es posible, quizá los concretos con adición de PES alcanzan esa resistencia a edades como

56 días o mayores, y aunque no es algo conveniente para todo tipo de construcciones, puede ser una posibilidad que permite reconsiderar a estos concretos pensando en sus beneficios ambientales de gestión de residuos o menores emisiones de CO₂.

Referencias

- Abdellatief, M., Mortagi, M., Hamouda, H., Skrzypkowski, K., Zagórski, K., & Zagórska, A. (2025). Influence of Silicate Modulus and Eggshell Powder on the Expansion, Mechanical Properties, and Thermal Conductivity of Lightweight Geopolymer Foam Concrete. *Materials* 2025, Vol. 18, Page 2088, 18(9), 2088. <https://doi.org/10.3390/MA18092088>
- Aislacel. (2025, November 20). *¿Qué es la conductividad térmica Resistencia Térmica y Transmitancia Térmica?* <https://www.aislacel.cl/article/que-es-la-conductividad-termica-resistencia-termica-r-y-transmitancia-termica-u-y-el-r100>
- Amanah, B., & Khalil, W. (2021). Evaluating the Use of Eggshell Waste Ash in High Strength Concrete. *Engineering and Technology Journal*, 39(8), 1321–1327. <https://doi.org/10.30684/etj.v39i8.2102>
- Ansari M, M., Kumar M, D., Charles J, M., & G, V. (2016). Replacement of Cement using Eggshell. *SSRG International Journal of Civil Engineering (SSRG-IJCE)*, 3(3), 1–2. <https://doi.org/10.14445/23488352/ijce-v3i3p101>
- Baena, O. J. R., Granados, N. B., Restrepo, J. C., & Tobón, J. I. (2021). Alternative cement production methods would reduce its environmental footprint. *Material Science & Engineering International Journal*, Volume 5(Issue 4), 100–101. <https://doi.org/10.15406/MSEIJ.2021.05.00164>
- Baldwin, A., Poon, C. S., Shen, L. Y., Austin, S., & Wong, I. (2009). Designing out waste in high-rise residential buildings: Analysis of precasting methods and traditional construction. *Renewable Energy*, 34(9), 2067–2073. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2009.02.008>

- Bhardwaj, A., Kumar, S., & Singh, D. (2025). Eggshell Waste Utilization as a Sustainable Building Material: A Comprehensive Review. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 419, 213–225. https://doi.org/10.1007/978-981-97-9777-6_19
- Chen, G., Zheng, D. ping, Chen, Y. wu, Lin, J. X., Lao, W. jian, Guo, Y. chang, Chen, Z. biao, & Lan, X. wei. (2023). Development of high performance geopolymers concrete with waste rubber and recycle steel fiber: A study on compressive behavior, carbon emissions and economical performance. *Construction and Building Materials*, 393, 131988. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.131988>
- Chiraz, K., Fatima Zohra, B., Ghanian, N., Houria, H., Hamid, A., & Karima, M. (2025). Utilization of Eggshell Powder as a Green Mortar Material. *Materials Science*, 31(2), 241–247. <https://doi.org/10.5755/J02.MS.37855>
- Chong, B. W., Gujar, P., Shi, X., & Suraneni, P. (2024). Assessment of waste eggshell powder as a limestone alternative in portland cement. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 57(10), 1–17. <https://doi.org/10.1617/S11527-024-02478-9/FIGURES/14>
- Chong, B. W., Othman, R., Ramadhansyah, P. J., Doh, S. I., & Li, X. (2020). Properties of concrete with eggshell powder: A review. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 120, 102951. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2020.102951>
- Gowsika, D., kokila, S. S., & Sargunan, K. (2014). Experimental Investigation of Egg Shell Powder as Partial Replacement with Cement in Concrete. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 14(1), 65–68. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V14P214>

- Hamada, H. M., Tayeh, B. A., Al-Attar, A., Yahaya, F. M., Muthusamy, K., & Humada, A. M. (2020). The present state of the use of eggshell powder in concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 32, 101583. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.101583>
- Izquierdo, I., Soto Izquierdo, O., Ramalho, M., Izquierdo, I., Soto Izquierdo, O., & Ramalho, M. (2018). Physical and mechanical properties of concrete using residual powder from organic waste as partial cement replacement. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33(3), 229–240. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732018000300229>
- Jhatial, A. A., Goh, W. I., Mastoi, A. K., Rahman, A. F., & Kamaruddin, S. (2021). Thermo-mechanical properties and sustainability analysis of newly developed eco-friendly structural foamed concrete by reusing palm oil fuel ash and eggshell powder as supplementary cementitious materials. *Environmental Science and Pollution Research* 2021 28:29, 28(29), 38947–38968. <https://doi.org/10.1007/S11356-021-13435-2>
- Jhatial, A. A., Kumar, A., Bheel, N., Sohu, S., & Goh, W. I. (2022a). Assessing the sustainability and cost-effectiveness of concrete incorporating various fineness of eggshell powder as supplementary cementitious material. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(56), 84814–84826. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-21635-7/FIGURES/7>
- Jhatial, A. A., Kumar, A., Bheel, N., Sohu, S., & Goh, W. I. (2022b). Assessing the sustainability and cost-effectiveness of concrete incorporating various fineness of eggshell powder as supplementary cementitious material. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(56), 84814–84826. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-21635-7/FIGURES/7>

- Kim, H. S., Kim, I., Yang, W. H., Moon, S. Y., & Lee, J. Y. (2021). Analyzing the Basic Properties and Environmental Footprint Reduction Effects of Highly Sulfated Calcium Silicate Cement. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 7540, 13(14), 7540. <https://doi.org/10.3390/SU13147540>
- Laca, A., Laca, A., & Díaz, M. (2017). Eggshell waste as catalyst: A review. *Journal of Environmental Management*, 197, 351–359. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.088>
- Mamuye, Y., Liao, M.-C., Do, N.-D., & Vo, D.-H. (2024). Performance of Cold-Mix Asphalt with Calcined Eggshell Powder–Activated GGBFS Filler. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(4), 04024003. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-16982;WEBSITE:WEBSITE:ASCE-SITE>
- Murthi, P., Lavanya, V., & Poongodi, K. (2022). Effect of eggshell powder on structural and durability properties of high strength green concrete for sustainability: A critical review. *Materials Today: Proceedings*, 68, 1311–1318. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.06.346>
- Nandhini, K., & Karthikeyan, J. (2022). Sustainable and greener concrete production by utilizing waste eggshell powder as cementitious material – A review. *Construction and Building Materials*, 335, 127482. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127482>
- NMX-C-460, AISLAMIENTO TERMICO-VALOR R PARA LAS ENVOLVENTES DE VIVIENDA POR ZONA TERMICA PARA LA REPUBLICA MEXICANA-ESPECIFICACIONES Y VERIFICACION (2009). https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5105784&fecha=18/08/2009#gsc.tab=0

- Ochoa, L., & Forestieri, G. (2019). Mortero sostenible con cáscara de huevo. *Investigación Formativa En Ingeniería*, 128–136. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3387691>
- O'Hegarty, R., Kinnane, O., Newell, J., & West, R. (2021). High performance, low carbon concrete for building cladding applications. *Journal of Building Engineering*, 43, 102566. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102566>
- Paruthi, S., Khan, A. H., Kumar, A., Kumar, F., Hasan, M. A., Magbool, H. M., & Manzar, M. S. (2023). Sustainable cement replacement using waste eggshells: A review on mechanical properties of eggshell concrete and strength prediction using artificial neural network. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02160. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E02160>
- Pérez, J. B., Cabanillas, R. E., Hinojosa, J. F., & Borbón, A. C. (2011). Estudio Numérico de la Resistencia Térmica en Muros de Bloques de Concreto Hueco con Aislamiento Térmico. *Informacion Tecnologica*, 22(3), 27–38. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000300005>
- Poorveekan, K., Ath, K. M. S., Anburuvel, A., & Sathiparan, N. (2021). Investigation of the engineering properties of cementless stabilized earth blocks with alkali-activated eggshell and rice husk ash as a binder. *Construction and Building Materials*, 277, 122371. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122371>
- Ribeiro, V. A. dos S., Werdine, D., Barbosa, L. B., Oliveira, A. F., Rodrigues, L. B., & Silva, L. R. R. (2021). Investigação das propriedades do concreto convencional com adição de resíduos de casca de ovo. *Research, Society*

and Development, 10(11), e08101119189–e08101119189.
<https://doi.org/10.33448/RSD-V10I11.19189>

Rojas, D., Ayquipa, M., Carolina Angarita Albornoz, A., Alberto Rivera Echegaray, L., & Angarita Albornoz, A. (2025). Influencia de la cáscara de huevo molida como sustituto parcial de cemento en la resistencia mecánica y trabajabilidad de mezclas de concreto para pavimentos rígidos. *Advances in Building Education*, 9(2), 50–62.
<https://doi.org/10.20868/ABE.2025.2.5543>

Sathiparan, N. (2021). Utilization prospects of eggshell powder in sustainable construction material – A review. *Construction and Building Materials*, 293, 123465. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123465>

Shcherban', E. M., Stel'makh, S. A., Beskopylny, A. N., Mailyan, L. R., Meskhi, B., Varavka, V., Beskopylny, N., & El'shaeva, D. (2022). Enhanced Eco-Friendly Concrete Nano-Change with Eggshell Powder. *Applied Sciences* 2022, Vol. 12, Page 6606, 12(13), 6606.
<https://doi.org/10.3390/APP12136606>

Vasudevan, G., Chan Wei -, S., Pai, P. M., Prashanth H, M. B., -, al, & Ghassan Masued, G. (2019). Investigating the Ability of Using Eggshell Powder as a Filler in Hot Mix Asphalt Mixture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 518(2), 022047. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/518/2/022047>

Waheed, M., Yousaf, M., Shehzad, A., Inam-Ur-Raheem, M., Khan, M. K. I., Khan, M. R., Ahmad, N., Abdullah, & Aadil, R. M. (2020). Channelling eggshell waste to valuable and utilizable products: A comprehensive review.

Trends in Food Science & Technology, 106, 78–90.
<https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2020.10.009>

Yerramala, A. (2014). Properties of concrete with eggshell powder as cement replacement. *The Indian Concrete Journal*.

Zhang, G. Y., Oh, S., Han, Y., Meng, L. Y., Lin, R., & Wang, X. Y. (2024). Influence of Eggshell Powder on the Properties of Cement-Based Materials. *Materials* 2024, Vol. 17, Page 1705, 17(7), 1705.
<https://doi.org/10.3390/MA17071705>

Ziapour, B. M., Rahimi, M., & Yousefi Gendeshmin, M. (2020). Thermoeconomic analysis for determining optimal insulation thickness for new composite prefabricated wall block as an external wall member in buildings. *Journal of Building Engineering*, 31, 101354.
<https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.101354>

Anexos

A1. Glosario de términos

Resistencia a la compresión:

Propiedad esencial del concreto, mide la carga que soporta el material por unidad de área, y se mide mediante ensayos normalizados, como los especificados en las normas ASTM C39. La resistencia a la compresión del concreto depende de la relación agua/cemento (a/c), el tipo de cemento, el tamaño y la forma de los agregados, y las condiciones de curado.

Durabilidad:

Representa la resistencia a la degradación del concreto. La durabilidad del concreto está influenciada por varios factores, incluyendo la resistencia a la penetración de cloruros (ASTM C1202) y sulfatos, la permeabilidad al agua y la resistencia a los ciclos de congelamiento-deshielo. La adición de puzolanas (ceniza volante o humo de sílice) puede mejorar la durabilidad del concreto al reducir la porosidad y aumentar la resistencia química.

Trabajabilidad del concreto:

Se evalúa mediante ensayos como el de asentamiento del cono de Abrams o revenimiento. Se refiere a la facilidad con que el concreto puede ser mezclado, colocado, compactado y terminado sin segregar. Factores como el tamaño y la forma de los agregados, la proporción de agua en la mezcla y el uso de aditivos plastificantes influyen significativamente en la trabajabilidad. La incorporación de superplastificantes permite reducir la cantidad de agua sin comprometer la trabajabilidad, lo que resulta en concretos de alta resistencia y baja permeabilidad.

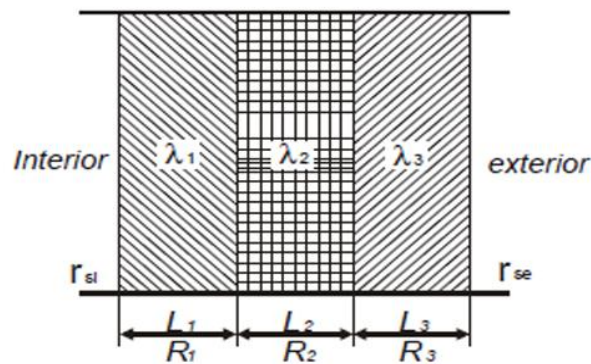
Retracción del concreto:

También conocida como contracción por secado, ocurre cuando el concreto pierde agua durante el proceso de curado. Este fenómeno puede causar fisuras superficiales y afectaciones estructurales si no se controla adecuadamente. La norma ASTM C157/C157M describe los métodos para medir la retracción del concreto. Factores que influyen en la retracción incluyen la relación a/c, el tipo de cemento, y las condiciones de curado. El uso de fibras de refuerzo y aditivos reductores de retracción puede ayudar a mitigar los efectos de la retracción en el concreto.

Conductancia térmica:

Es la cantidad de calor transmitida a través de la unidad de área de una muestra de material o una estructura de espesor (L) dividida por la diferencia de temperatura entre las caras caliente y fría en condiciones estacionarias. Se representa por el símbolo "C" y sus unidades son $W/m^2 \text{ } ^\circ C$.

La Resistividad (resistencia) térmica, es el inverso de la conductividad térmica, y es una propiedad del calor y una medida de la diferencia de temperatura por la cual un objeto o material resiste un flujo de calor, y se mide en m^2K/W . La resistencia térmica para la conducción en una pared plana se define como:



$$R_r = r_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + r_{se} = \frac{1}{h_i} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_3}{\lambda_3} + \frac{1}{h_e} \quad \text{m}^2 \text{ K / W} \quad (\text{A.1})$$

Nota 5: Si la resistencia térmica total se presenta como resultado final, debe redondearse hasta el segundo decimal.

entonces:

$$K = \frac{1}{R_r} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_3}{\lambda_3}} \quad (\text{A.2})$$

Fuente: NMX-C-460-ONNCCE-2009

Para muros bajo la normativa mexicana NMX-C-460, que regula el desempeño térmico de muros y fachadas, es importante utilizar valores de conductividad térmica (λ) representativos de materiales comunes en muros para cálculos de aislamiento y transmisión de calor. Para un cálculo preciso, se usa la suma del espesor entre materiales y su conductividad térmica para determinar la resistencia térmica total (R).

Los valores típicos recomendados para muros según NMX-C-460 son:

- Ladrillo macizo: 0.60–0.80 W/m K
- Ladrillo hueco ligero: 0.30–0.45 W/m K
- Block de concreto: 1.2–1.8 (según densidad y tipo) W/m K
- Mortero (cemento-cal): 0.9–1.2 W/m K
- Yeso/enlucido: 0.35–0.50 W/m K
- Aislamientos térmicos típicos (lana mineral, poliestireno expandido, espuma poliuretano): 0.029–0.045 W/m K
- Madera blanda para acabados interiores: 0.12–0.16 W/m K

A2. Pruebas de agregados para concreto

CÁLCULOS Y REPORTE

Análisis granulométrico en arena

Densidad = $MSSS / Volumen = (500/192.3) \times 1000 = 2600 \text{ kg/m}^3$

Absorción = $[(MSSS - MS) / MS] \times 100 = [(500-491)/491] \times 100 = 1.83\%$

Humedad total = $[(MH-MS)/MS] \times 100 = [(500 - 499)/ 499] \times 100 = 0.20\%$

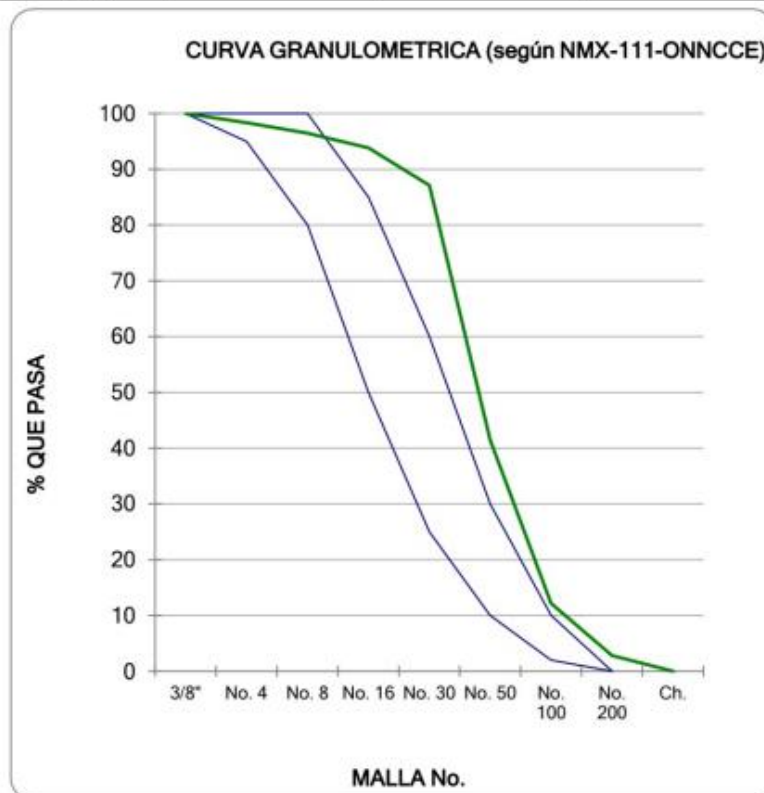
Masa volumétrica compacta = $M. \text{ Comp.} \times \text{Factor Recip.} = 15.46 \times 106.67 = 1649 \text{ kg/m}^3$

Perdida por lavado = $[(MS1 - MS2) / MS1] \times 100 = [(535 - 520) / 535] \times 100 = 2.80\%$

PROPIEDADES FÍSICAS		
DENSIDAD	kg/m ³	2,600
ABSORCIÓN	%	1.83
HUMEDAD TOTAL	%	0.20
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	kg/m ³	0
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	kg/m ³	1,649
PÉRDIDA POR LAVADO	%	2.80
CONTRACCIÓN LINEAL	%	ND
CONTAMINACIÓN DE GRAVA o ARENA	%	1.68
COEFICIENCIA DE FORMA	adim	ND
MATERIA ORGÁNICA	adim	ND
EQUIVALENTE DE ARENA	%	ND
MÓDULO DE FINURA	adim	1.71



DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA				
MALLA No.	PESO RET.	% RET. INDIV.	% RET. ACUM.	% PASA ACUM. REAL
2"	0.0	0.0	0.0	100.0
1 1/2"	0.0	0.0	0.0	100.0
1"	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4"	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2"	0.0	0.0	0.0	100.0
3/8"	0.0	0.0	0.0	100.0
No. 4	9.0	1.7	1.7	98.3
No. 8	10.0	1.9	3.6	96.4
No. 16	14.0	2.6	6.2	93.8
No. 30	36.0	6.7	12.9	87.1
No. 50	244.0	45.6	58.5	41.5
No. 100	157.0	29.3	87.9	12.1
No. 200	50.0	9.3	97.2	2.8
Ch.	15.0	2.8	100.0	0.0
Total	535.0			



Análisis granulométrico en grava 5-12mm

Densidad = $MSSS / Volumen = (2/0.743) \times 1000 = 2,692 \text{ kg/m}^3$

Absorción = $[(MSSS - MS) / MS] \times 100 = [(2,000-1,987)/1,987] \times 100 = 0.65\%$

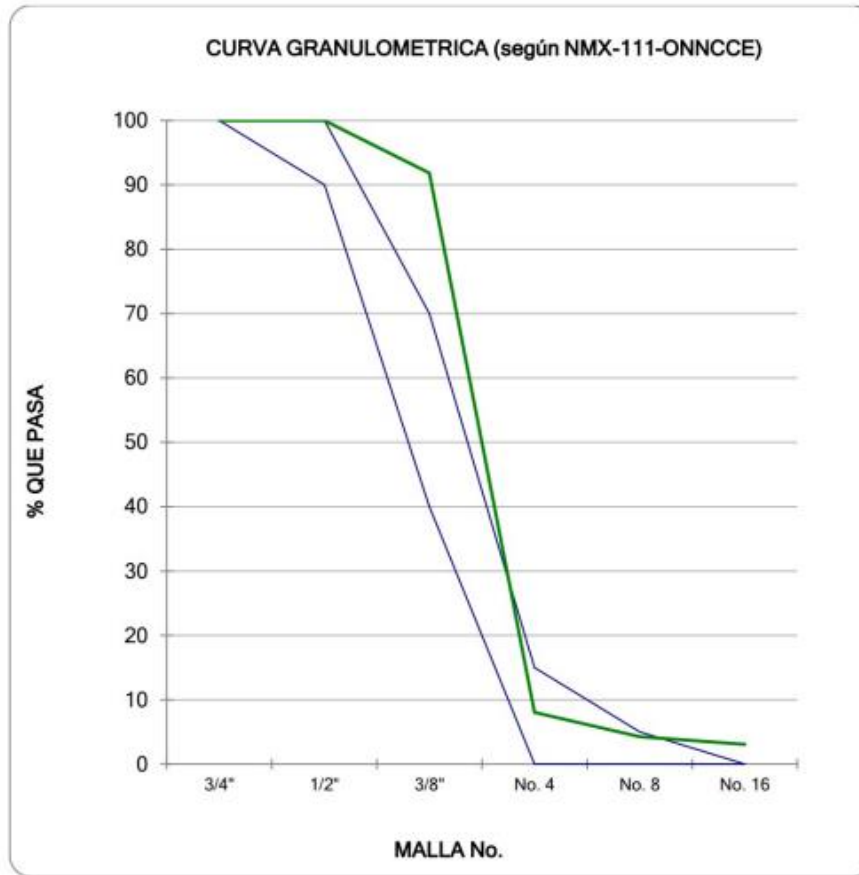
Humedad total = $[(MH-MS)/MS] \times 100 = [(2 - 1.988)/ 1.988] \times 100 = 0.60\%$

Masa volumétrica compacta = $M. \text{ Comp.} \times \text{Factor Recip.} = 15.01 \times 106.67 = 1601 \text{ kg/m}^3$ *

1591.09 kg/ m3 con la corrección por humedad de 0.603%

PROPIEDADES FÍSICAS		
DENSIDAD	kg/m ³	2,692
ABSORCIÓN	%	0.65
HUMEDAD TOTAL	%	0.60
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	kg/m ³	0
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	kg/m ³	1,591
CONTRACCIÓN LINEAL	%	ND
CONTAMINACIÓN DE GRAVA o ARENA	%	8.05
COEFICIENCIA DE FORMA	adim	ND
MATERIA ORGÁNICA	adim	ND
EQUIVALENTE DE ARENA	%	ND
MÓDULO DE FINURA	adim	5.80

DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA				
MALLA No.	PESO RET. RET.	% RET. INDIV.	% RET. ACUM.	% PASA ACUM. REAL
2"	0.0	0.0	0.0	100.0
1 1/2"	0.0	0.0	0.0	100.0
1"	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4"	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2"	0.0	0.0	0.0	100.0
3/8"	8.2	8.2	8.2	91.8
No. 4	83.7	83.8	91.9	8.1
No. 8	3.8	3.8	95.7	4.3
No. 16	1.2	1.2	96.9	3.1
No. 30	0.8	0.8	97.7	2.3
No. 50	0.9	0.9	98.5	1.5
No. 100	0.8	0.8	99.3	0.7
No. 200	0.7	0.7	100.0	0.0
Fondo	0.0	0.0	100.0	0.0
Total	100			



Análisis granulométrico en grava 20-40mm

Densidad = $MSSS / Volumen = (6/2.260) \times 1000 = 2,655 \text{ kg/m}^3$

Absorción = $[(MSSS - MS) / MS] \times 100 = [(5.032 - 4.998) / 4.998] \times 100 = 0.68\%$

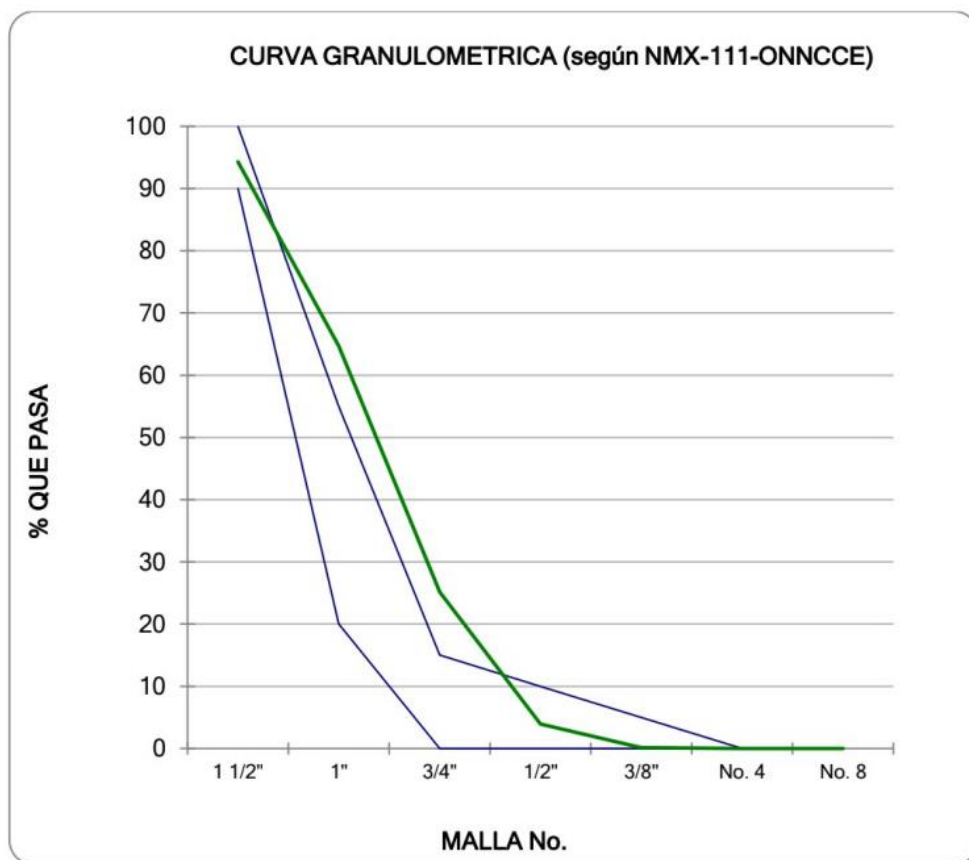
Humedad total = $[(MH - MS) / MS] \times 100 = [(9.6 - 9.59) / 9.59] \times 100 = 0.10\%$

Masa volumétrica compacta = $M. \text{ Comp.} \times \text{Factor Recip.} = 20.44 \times 71.34 = 1,458 \text{ kg/m}^3^*$

PROPIEDADES FÍSICAS		
DENSIDAD	kg/m ³	2,655
ABSORCIÓN	%	0.68
HUMEDAD TOTAL	%	0.10
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	kg/m ³	0
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	kg/m ³	1,458
CONTRACCIÓN LINEAL	%	ND
CONTAMINACIÓN DE GRAVA o ARENA	%	0.00
MÓDULO DE FINURA	adim	6.00

DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA (NMX-C-077-1997-ONNCCE)				
MALLA No.	PESO RET.	% RET. INDIV.	% RET. ACUM.	% PASA ACUM. REAL
2"	0.0	0.0	0.0	100.0
1 1/2"	377.0	5.7	5.7	94.3
1"	1957	29.6	35.3	64.7
3/4"	2614	39.5	74.8	25.2
1/2"	1403	21.2	96.1	3.9
3/8"	253	3.8	99.9	0.1
No. 4	8	0.1	100.0	0.0
Total	6612.0			

TAMAÑO MAXIMO NOMINAL DEL AGREGADO (TMNA)			
A=	$\frac{B \times C}{100}$	B=	<u>29.6</u> %
		C=	<u>60</u> %
		A=	<u>17.76</u> %
A= Porcentaje del TMNA, en relación a la masa del concreto (%) B= Porcentaje retenido de la grava en la criba que se fije como tamaño máximo nominal C= Porcentaje de grava, respecto a la masa total del concreto Nota: C puede ser = a 60% en caso de que no se tenga el dato del porcentaje de grava con respecto a la masa del concreto.			



A3. Datos de diseño de mezclas para dosificación

En tema del diseño de la mezcla y proporcionamiento para concreto de resistencia $F'c$ 250 kg/cm², me apoye con mi compañero de posgrado Martin Francisco Ochoa Mota, el Ingeniero civil y jefe del área técnica de Distribuidora de Concretos Mexicali (DICOMSA), la dosificación de ingredientes por metro cúbico se presenta a continuación.

1. - Elección de la relación agua/cemento para un concreto convencional $f'c = 280$ kg/cm².

Se determinó empíricamente que, para lograr dicha resistencia a la compresión, es necesaria una relación a/c de 0.62, por lo que se propone utilizar 300 kg, y 185 litros de agua (Cantidad de agua sugerida por el ACI 211 para el TMA a utilizar) para lograr la fluidez necesaria para la manipulación de la mezcla.

Material	Consumo		Prop. unit.
	Kg/m ³	l/m ³	
Cemento	300	100	1.000
Adición 1	0.00	0.00	0.000
Adición 2	0	0	0.000
Agua	185	185	0.617
Vacios	2	20	

2. Proporcionamiento de agregados.

En este paso se eligen los porcentajes de participación de los agregados pétreos, los cuales se eligen según las herramientas que proporciona el ACI 302, cumpliendo con el factor de grosor y de trabajabilidad que posicionan la mezcla en la Zona optima del gráfico de shilstone (Zona II).

Distribución Grava / Arena					
Arena 1	100	%	Pa,% = 35	peso Pg = 1.90 Pa	
Arena 2	0	%			
			Cont.fino: 425		
Grava 1	70	%	Pg,% = 65		
Grava 2	0	%			
Grava 3	30	%			
Contenido de arena y grava (l/m3)					
Vag =	1000	-	305	= 695	
			Volumen arena:	243	
			Volumen grava:	452	
	Vol	Peso	Peso		
Arena 1	243	633	34		
Arena 2	0	0			
Grava 1:	316	840			
Grava 2:	0	0	66		
Grava 3:	136	365			
Suma:	695	1838			

Dosificación para preparar 25Lts de concreto en revolvedora



Diseño mezcla de concreto F'c 250 kg/cm ²		
Material	S/PES	C/PES (10%)
Cemento	9.45 KG	0.945 K
Grava	43.14 KG	
Arena	22.99 KG	
Agua	7.05 KG	

A4. Bitácora de resultados de concreto en estado endurecido

#Cilindro	Tipo de muestra	Peso (kg)	Carga(kg)	Resistencia a la compresion a los 3 dias	Resistencia a la compresion a los 7 dias	Resistencia a la compresion a los 28 dias	Promedio resistencia (kg/cm2)
Cil 31	28D 10% PES	12.53	47853			271	275.0
Cil 32	28D 10% PES	12.55	49790			282	
Cil 33	28D 10% PES	12.44	48484			274	
Cil 34	28D 10% PES	12.48	49350			279	
Cil 35	28D 10% PES	12.51	47563			269	
Cil 36	28D 10% PES	12.49	48575			275	
Cil 37	28D 15% PES	12.58	42274			239	249.4
Cil 38	28D 15% PES	12.53	43485			246	
Cil 39	28D 15% PES	12.57	46293			262	
Cil 40	28D 15% PES	12.54	43508			246	
Cil 41	28D 15% PES	12.52	44846			254	
Cil 23	28D TESTIGO	12.52	57138			323.3	312.8
Cil 24	28D TESTIGO	12.56	56762			321	
Cil 25	28D TESTIGO	12.58	55746			315	
Cil 26	28D TESTIGO	12.62	54471			308	
Cil 27	28D TESTIGO	12.57	55846			316	
Cil 28	28D TESTIGO	12.56	54916			311	
Cil 29	28D TESTIGO	12.57	53052			300	
Cil 30	28D TESTIGO	12.63	54471			308	
Cil 2	3D 10% PES	12.62	20733	117.3			143.0
Cil 4	3D 10% PES	12.34	32817	186			
Cil 20	3D 10% PES	12.2	25784	125.6			
Cil 1	3D TESTIGO	12.56	20411	115.5			141.1
Cil 3	3D TESTIGO	12.29	32989	187			
Cil 17	3D TESTIGO	12.2	22635	120.7			
Cil 8	7D 10% PES	12.1	35398		200.3		226.9
Cil 9	7D 10% PES	12.2	36164		205		
Cil 10	7D 10% PES	12.21	35330		200		
Cil 14	7D 10% PES	12.21	41983		235		
Cil 15	7D 10% PES	12.21	42634		248		
Cil 16	7D 10% PES	12.21	39612		243		
Cil 21	7D 10% PES	12			238.7		
Cil 22	7D 10% PES	12.28			245.1		241.0
Cil 5	7D TESTIGO	12.23	40982		232		
Cil 6	7D TESTIGO	12.16	37280		211		
Cil 7	7D TESTIGO	12.28	45604		258		
Cil 11	7D TESTIGO	12.21	35280		252		
Cil 12	7D TESTIGO	12.21	43089		249		
Cil 13	7D TESTIGO	12.21	41456		236		
Cil 18	7D TESTIGO	12.29	42128		243.6		
Cil 19	7D TESTIGO	12.25			246		