

CORPORACION UNIVERSITARIA DEL META

Ingeniería Civil



MONOGRAFÍA

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LOS CRISTALES COLUMNARES DE
CALCITA EN CÁSCARAS DE HUEVO COMO CEMENTANTE EN MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

PRESENTADO POR:

NELSON NIÑO AVELLA

TRABAJO DE GRADO

Presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero Civil

Villavicencio

Abril de 2024

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA DEL META
Ingeniería de Civil



MONOGRAFÍA

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LOS CRISTALES COLUMNARES DE
CALCITA EN CÁSCARAS DE HUEVO COMO CEMENTANTE EN MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

PRESENTADO POR:
NELSON NIÑO AVELLA

TRABAJO DE GRADO
Presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero Civil

DIRECTORES
PhD. Camilo Lesmes Fabián
PhD. Cristian Julián Díaz Álvarez

Villavicencio
Abril de 2024

NOTA DE ADVERTENCIA

“La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Solo velará porque no se publique nada contrario al dogma y a la moral católica y porque las tesis no contengan ataques personales contra persona alguna, antes bien se vea en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia”

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LOS CRISTALES COLUMNARES DE
CALCITA EN CÁSCARAS DE HUEVO COMO AGREGADO DE MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

PRESENTADO POR:

Nelson Niño Avella

APROBADO

_____ Nombre	Firma: Jurado 1	_____ Nombre.	Firma: Jurado 2
-----------------	---------------------------	------------------	---------------------------

Firma:
PhD. Camilo Lesmes Fabián
Director 1

Firma:
PhD. Cristian Julián Díaz Álvarez
Director 2

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	7
2.	ESTADO DEL ARTE	8
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.	11
4.	OBJETIVOS.....	12
4.1.	General	12
4.2.	Específicos	12
5.	JUSTIFICACIÓN	13
6.	ANTECEDENTES	14
7.	MARCO DE REFERENCIA	15
8.	MARCO DE CONCEPTUAL	17
9.	MARCO LEGAL	19
10.	METODOLOGÍA	21
10.1.	Fase 1: Recopilación de Fuentes	21
10.2.	Fase 2: Análisis y Síntesis de la Información	21
10.3.	Fase 3: Redacción de la Monografía	22
11.	RESULTADOS	23
11.1.	Identificación de propiedades físicas del cemento	23
11.2.	Tipos de Cemento	29
11.3.	Identificación de las propiedades físicas y composición química de la cáscara de huevo. 31	
11.4.	Técnicas de preparación de la cáscara de huevo como material cementante	34
12.	DISCUSIÓN	37
12.1.	Eficiencia de la cáscara de huevo como material cementante en el concreto	37
12.2.	Impacto ambiental del uso de la cáscara de huevo en la construcción	42
12.3.	Eficiencia económica de la cáscara de huevo como material cementante en el concreto. 42	
12.4.	Hipótesis Nula	43
13.	CONCLUSIONES	45
14.	BIBLIOGRAFÍA	46

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Finura del cemento según la empresa Cementos Tequendama 2021	23
Ilustración 2. Determinación de la expansión de cemento portland en autoclave	24
Ilustración 3. Ensayo de tiempo de fraguado con la Aguja de Vicat en [40].	25
Ilustración 4. Medidor de aire ocluido en morteros	25
Ilustración 5. Desarrollo del calor para una pasta de cemento	26
Ilustración 6. Esquema de la RAS en estructuras de concreto.....	27
Ilustración 7. Ataque por sulfatos en concretos y morteros.....	28
Ilustración 8. Formación de yeso en concreto expuesto a CaSO_4	28
Ilustración 9. Capas de la cáscara de huevo.....	32
Ilustración 10. Diagrama de flujo para la obtención de cáscara de huevo pulverizada	34
Ilustración 11. Diagrama de flujo para la obtención de ceniza de cáscara de huevo.....	35
Ilustración 12. Diagrama de flujo para la obtención de calcita.....	36
Ilustración 13. Ensayo de compresión de las sustituciones 0%, 4%, 8%, 12% y 16 % a los 7, 14 y 28 días de curado	39
Ilustración 14. Ensayo de compresión de concreto con sustitución parcial de cemento por cáscara de huevo	40
Ilustración 15. Ensayo de resistencia a la tracción a los 28 días de curado y a diferentes cargas de diseño	41
Ilustración 16. Tiempos de fraguado inicial y final de la muestra patrón y las muestras experimentales	41
Ilustración 17. Comparativo de costos directos de las muestras de concreto	43

Lista de tablas

Tabla 1. Requisitos físicos normalizados por la NTC 121	30
Tabla 2. Composición química elemental de la cáscara de huevo.....	33
Tabla 3. Concentración de Calcita en la cáscara de huevo	33
Tabla 4. Uso de cáscara de huevo como sustituto parcial de material cementante	37

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo sostenible es un concepto encaminado a la solución de los problemas globales teniendo en cuenta un modelo de desarrollo que abarca tres dimensiones: la económica, la ambiental y la social [1]. De esta manera, el concepto de desarrollo sostenible enmarca la idea de satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades [2]. Así mismo, al ser un modelo de desarrollo que busca el equilibrio en tres dimensiones de alto alcance [3], este concepto puede ser implementado en cualquier área del conocimiento que implique el uso y/o aprovechamiento de los recursos para la obtención de bienes y servicios que satisfagan las necesidades humanas.

La industria de la construcción es una de las actividades antrópicas cuya ejecución impacta significativamente la economía, la sociedad y el medio ambiente [4]. Siendo históricamente la industria de mayor consumo de recursos naturales para obtener sus materiales esenciales, también se le conoce como industria de industrias [5]. De manera general, toda construcción requiere de cemento, arena, concreto, acero, hierro etc. como materias primas para una construcción de calidad [6]. Sin embargo, el uso de estos materiales convencionales solo satisface las dimensiones económica y social, ya que desde un contexto medio ambiental, realizar una construcción es considerado como una actividad de alto impacto debido a que perturba el orden natural de los ecosistemas debido a las actividades y materiales utilizados en el proceso constructivo [7].

Ahora bien, desde una perspectiva generalizada de la industria de construcción, se puede afirmar que sus impactos inician desde la obtención de materias primas hasta el fin de vida útil del bien construido [7, 8]. De este modo, la industria de la construcción en miras de una producción más limpia y sostenible, está a la vanguardia en la búsqueda e inclusión de nuevos materiales dentro de sus procesos, materiales que cumplan las mismas funciones que los materiales convencionales [6]. Es ahí, donde el ecodiseño emerge como una herramienta de innovación en la construcción, enfocada en elevar los estándares de seguridad y confiabilidad de las estructuras erigidas haciendo uso de nuevos materiales que mantengan o mejoren las propiedades mecánicas de las mismas.

En la misma línea, la cáscara de huevo es uno de los materiales cuya inclusión en el campo de la construcción está en surgimiento gracias a su alto contenido de calcio [9], el cual puede desempeñar un papel como material cementante de sustitución parcial dentro del concreto [10],

demostrando su uso potencial en el campo de la construcción como un residuo agroindustrial con oportunidad de valor agregado de reinclusión al ciclo productivo [11]. Por lo anterior, este trabajo estudiará la utilidad de la cáscara de huevo como material cementante en el concreto usado para la construcción de obras civiles.

2. ESTADO DEL ARTE

La integración de materiales sostenibles en la industria de la construcción es esencial para abordar la creciente preocupación ambiental y promover prácticas más responsables desde el punto de vista social y ecológico [12]. En este contexto, el uso de cáscaras de huevo en la construcción se ha convertido en un área de investigación y aplicación en constante crecimiento. Se examinan varias hipótesis relacionadas con la viabilidad, la ecoeficiencia, la responsabilidad social y la sostenibilidad en esta área de investigación.

2.1. Uso de Cáscaras de Huevo en Materiales de Construcción

El uso de cáscaras de huevo en materiales de construcción, como el concreto, ha sido objeto de investigación en varios estudios, incluyendo investigadores como Castillo Piscoya [13], y Marquina Irigoín [14]. Estos estudios han arrojado resultados positivos al demostrar que la adición de cáscaras de huevo a estos materiales puede conducir a mejoras significativas en la resistencia y las propiedades mecánicas de los mismos. Estos hallazgos respaldan la idea de que las cáscaras de huevo pueden ser un recurso valioso en el campo de la construcción sostenible. En otras palabras, la incorporación de cáscaras de huevo en materiales de construcción no solo puede ser beneficioso desde el punto de vista de la resistencia y la calidad de los materiales, sino que también se alinea con prácticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

En la construcción sostenible, se busca reducir el impacto ambiental y maximizar la eficiencia de los recursos. La reutilización de cáscaras de huevo, que de otro modo podrían ser consideradas desechos, en lugar de desecharlas, puede contribuir a la sostenibilidad al tiempo que se mejora la calidad de los materiales de construcción. Por lo tanto, la investigación respalda la idea de que las cáscaras de huevo pueden ser una opción interesante en la búsqueda de soluciones más sostenibles en la industria de la construcción.

2.2. Ecoeficiencia y Valorización de Residuos.

La ecoeficiencia se ha convertido en un enfoque importante en la gestión de recursos y la producción sostenible. En este contexto, Beltrán Ramírez y otros [15] proponen un enfoque ecoeficiente al emplear cáscaras de huevo en la creación de ecomateriales para la industria de la construcción. Este enfoque destaca la idea de que la valorización de las cáscaras de huevo puede desempeñar un papel crucial en la promoción de prácticas más sostenibles en la construcción. La valorización de residuos implica la transformación de materiales que normalmente se considerarían desechos, en recursos útiles. En el contexto de la construcción, la valorización de las cáscaras de huevo implica tomar un subproducto común sin valor de uso y utilizarlo de manera efectiva en la creación de ecomateriales cuyo valor de uso se relaciona directamente con el aporte y la mejora de las propiedades mecánicas de materiales convencionales a través de sustituciones parciales. Esto no solo reduce el desperdicio, sino que también presenta beneficios ambientales y económicos al promover la reutilización de recursos. La investigación de Beltrán Ramírez y otros respalda la hipótesis de que la valorización de residuos, como las cáscaras de huevo, puede ser una estrategia exitosa en la construcción sostenible [15]. No solo se trata de reciclar o reutilizar materiales, sino de transformar residuos en componentes valiosos que mejoran la ecoeficiencia de la industria de la construcción. La valorización de residuos, en este caso mediante la incorporación de cáscaras de huevo en ecomateriales, es una iniciativa prometedora que se alinea con los objetivos de la construcción sostenible y la gestión responsable de recursos.

2.3. Perspectiva Empresarial y Responsabilidad Social.

En este contexto, Botero [12] destaca la relevancia de la responsabilidad social empresarial en el ámbito de la construcción, subrayando que esta debe estar alineada con principios éticos y una fuerte responsabilidad hacia la sociedad. Por su parte, Mariño [16] también enfatiza la necesidad de un enfoque ético en la industria de la construcción. Este enfoque ético refuerza la idea de que la responsabilidad social debe ser una prioridad en la construcción sostenible. No basta con buscar la eficiencia y el beneficio económico, sino que las empresas del sector de la construcción también deben considerar su impacto social y ambiental. Esto implica tomar medidas responsables que no solo beneficien a la empresa, sino que también contribuyan al bienestar de la sociedad en su conjunto.

La responsabilidad social empresarial en la industria de la construcción, respaldada por un enfoque ético, se alinea con la idea de que la construcción sostenible no solo se trata de la calidad de los edificios y las infraestructuras, sino también de la contribución positiva al entorno social y ambiental en el que operan las empresas constructoras. Este enfoque ético es fundamental para promover prácticas más sostenibles y socialmente responsables en la industria de la construcción.

2.4. Sostenibilidad y Ciclo de Vida.

La sostenibilidad y el análisis del ciclo de vida son aspectos cruciales en la toma de decisiones relacionadas con materiales de construcción. Romo y otros investigadores [17] llevaron a cabo un análisis del ciclo de vida para evaluar la sostenibilidad de la obtención de hidróxido de calcio a partir de cáscaras de huevo. Este estudio demuestra la importancia de considerar el impacto ambiental en la elección de materiales de construcción y respalda la hipótesis de que la sostenibilidad debe ser un criterio clave en la toma de decisiones. El análisis del ciclo de vida implica examinar detenidamente todas las etapas de producción, uso y disposición de un material o producto, teniendo en cuenta su impacto ambiental en todas estas fases. En el caso de la obtención de hidróxido de calcio a partir de cáscaras de huevo, este enfoque permite evaluar la sostenibilidad de todo el proceso, desde la recolección de las cáscaras hasta su uso en la construcción. Los resultados de este análisis resaltan la importancia de considerar aspectos como la eficiencia de recursos, la reducción de residuos y la huella de carbono en la elección de materiales de construcción. Se destaca que la sostenibilidad no solo debe ser un objetivo, sino un criterio clave en la toma de decisiones, ya que la elección de materiales sostenibles no solo puede reducir el impacto ambiental, sino también contribuir a la construcción de edificios y estructuras más respetuosos con el entorno y más duraderos. El análisis del ciclo de vida y la evaluación de la sostenibilidad en la obtención de materiales de construcción, como el hidróxido de calcio a partir de cáscaras de huevo, subrayan la importancia de considerar el impacto ambiental y la sostenibilidad como criterios esenciales en la selección de materiales en la construcción. Esto es esencial para promover prácticas más sostenibles en la industria de la construcción y reducir su huella ecológica.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.

En la actualidad, la industria de la construcción enfrenta el desafío de buscar alternativas sostenibles y económicamente viables para reducir su impacto ambiental, minimizar la generación de residuos y optimizar el rendimiento de los materiales de construcción. En este contexto, las cáscaras de huevo, un residuo orgánico abundante en la agroindustria, han emergido como un recurso potencialmente valioso para mejorar las propiedades de los materiales de construcción y promover prácticas más sostenibles.

A pesar del creciente interés en el uso de cáscaras de huevo como material de construcción, es notoria la falta de una investigación sistemática que aborde de manera integral su viabilidad técnica, impacto ambiental y aplicabilidad en diversas áreas de la construcción. Además, la diversidad de enfoques y metodologías empleadas en investigaciones previas ha generado una necesidad de sintetizar y consolidar el conocimiento existente sobre este tema.

Por lo tanto, la pregunta problema o de investigación que surge es **¿Cuál es el potencial real de las cáscaras de huevo como sustituto parcial del material cementante en la construcción, en términos de su viabilidad técnica, ventajas ambientales y aplicabilidad práctica?**

Para responder a esta pregunta, se requiere una investigación que explore en profundidad las propiedades químicas y físicas de las cáscaras de huevo, su influencia en las características mecánicas y de durabilidad de los materiales de construcción, así como la evaluación del ciclo de vida y el impacto ambiental de esta práctica. Además, se necesita una revisión crítica de las investigaciones previas para identificar las brechas de conocimiento y proporcionar una base sólida para la toma de decisiones en la industria de la construcción.

Por lo tanto, la pertinencia de este trabajo se refleja en la contribución al conocimiento de nuevos materiales que fomentan la construcción sostenible como un modelo de industrial rentable ambiental y económicamente.

4. OBJETIVOS

4.1. General

Comprender a fondo y evaluar críticamente las ventajas ambientales de emplear cáscaras de huevo como sustituto parcial del material cementante en la elaboración de concreto, con el propósito de contribuir al desarrollo de soluciones sostenibles en la construcción.

4.2. Específicos

- 1) Identificar las propiedades químicas, físicas y minerales de las cáscaras de huevo que hacen posible su utilización como material cementante, destacando su potencial beneficio ambiental al reducir la generación de residuos agroindustriales.
- 2) Realizar un análisis sistemático de la literatura científica y técnica para evaluar las ventajas ambientales derivadas de la incorporación de cáscaras de huevo en el concreto, incluyendo la disminución de la huella de carbono y la reducción de la demanda de recursos naturales.
- 3) Evaluar críticamente las investigaciones previas relacionadas con el uso de cáscaras de huevo como material cementante complementario, centrándose en los beneficios ambientales como la mitigación de residuos y la promoción de prácticas sostenibles en la construcción.

5. JUSTIFICACIÓN

La industria de la construcción representa una parte sustancial de la actividad económica a nivel mundial, pero también es una de las principales fuentes de consumo de recursos naturales y generación de residuos. En un contexto de creciente conciencia ambiental y la necesidad de abordar el cambio climático, es imperativo que la industria de la construcción adopte prácticas más sostenibles y busque alternativas innovadoras que reduzcan su impacto ambiental sin comprometer la calidad y la seguridad de las estructuras construidas.

El uso de cáscaras de huevo como material de construcción se presenta como una oportunidad única para abordar este desafío. Las cáscaras de huevo son un residuo agroindustrial ampliamente disponible y de bajo costo que, hasta ahora, no se ha aprovechado plenamente. Su composición química, rica en calcio y otros minerales, sugiere un potencial significativo para mejorar las propiedades de los materiales de construcción, como el cemento, el hormigón y otros compuestos.

De esta manera, la pertinencia del desarrollo de esta investigación se justifica en su aporte al conocimiento en miras de promover la sostenibilidad, la eficiencia económica y la innovación en la industria de la construcción. Así mismo, esta investigación evidencia su impacto positivo en la industria gracias a la demostración de los beneficios que trae manejar desafíos ambientales y tecnológicos críticos a los cuales se encuentra directamente relacionada, como es el aprovechamiento de residuos comúnmente desaprovechados.

6. ANTECEDENTES

La integración de cáscaras de huevo en materiales de construcción representa una oportunidad significativa para avanzar en la sostenibilidad en la industria de la construcción. Varios estudios revisados respaldan diversas hipótesis relacionadas con la viabilidad, la ecoeficiencia, la responsabilidad social y la sostenibilidad de esta práctica. Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar una serie de factores clave al tomar decisiones en la industria de la construcción [18].

En primer lugar, la viabilidad de utilizar cáscaras de huevo en la construcción se basa en investigaciones que demuestran mejoras en la resistencia y las propiedades mecánicas de los materiales, lo que respalda la hipótesis de que este recurso puede ser valioso para la construcción sostenible [19-25].

En segundo lugar, la ecoeficiencia se vuelve relevante al emplear cáscaras de huevo en la creación de ecomateriales, lo que implica la valorización de residuos. Esto respalda la hipótesis de que la valorización de residuos, como las cáscaras de huevo, puede contribuir a prácticas más sostenibles en la construcción [26-28].

Tercero, la responsabilidad social empresarial cobra importancia al considerar el impacto de las decisiones de construcción en la sociedad. Expertos enfatizan que la ética y la responsabilidad social deben ser prioritarias en la construcción sostenible, lo que respalda la hipótesis de que la responsabilidad social debe ser un enfoque central [29].

Por último, el análisis del ciclo de vida en la obtención de hidróxido de calcio a partir de cáscaras de huevo destaca la necesidad de evaluar el impacto ambiental en la elección de materiales de construcción. Esto demuestra que la sostenibilidad debe ser un criterio clave en la selección de materiales, considerando aspectos como la eficiencia de recursos y la reducción de la huella de carbono [17].

En resumen, la inclusión de cáscaras de huevo en materiales de construcción se erige como una vía prometedora para fomentar la sostenibilidad en la construcción. La combinación de viabilidad, ecoeficiencia, responsabilidad social y sostenibilidad destaca la importancia de abordar las preocupaciones ambientales y promover prácticas más responsables desde un punto de vista tanto social como ecológico en la industria de la construcción. Estos enfoques y hallazgos conjuntos tienen el potencial de cambiar la forma en que se construyen y se seleccionan los materiales en la industria de la construcción para lograr un futuro más sostenible.

7. MARCO DE REFERENCIA

- Un grupo de investigadores y estudiantes de la Universidad del Norte, en Colombia, logró incorporar las cáscaras de huevo al cemento, al PVC y a la granalla, para obtener materiales más ecológicos y económicos.

- Un estudio de diseño mexicano creó una biocerámica a base de cáscara de huevo y bio-aglutinantes, que se puede moldear con un brazo robótico para construir muros y otras estructuras.

- Un proyecto europeo llamado EGGPLANT convirtió las cáscaras de huevo recicladas en una pasta que sirve para imprimir en 3D objetos arquitectónicos y decorativos.

- Una investigación realizada en la Universidad Nacional Autónoma de México evaluó las propiedades mecánicas y térmicas de un compuesto formado por cáscara de huevo y poliestireno expandido, que podría usarse como aislante térmico en la construcción.

- Una tesis doctoral desarrollada en la Universidad Politécnica de Valencia propuso el uso de la cáscara de huevo como aditivo para mejorar la resistencia a la compresión y la durabilidad del hormigón.

Estos antecedentes muestran que hay un interés creciente por aprovechar las cáscaras de huevo como material de construcción, y que existen diversas formas de hacerlo. Sin embargo, también se evidencia que hay aspectos que aún no han sido explorados o que podrían mejorarse, como la optimización de los procesos, la evaluación del impacto ambiental, la comparación con otros materiales alternativos, etc.

En línea con lo anterior, la influencia positiva de esta temática de investigación se refleja por las siguientes razones:

Sostenibilidad Ambiental: La incorporación de cáscaras de huevo en la construcción tiene el potencial de reducir la demanda de recursos naturales y disminuir la generación de residuos, lo que contribuye directamente a la sostenibilidad ambiental y a la mitigación del cambio climático.

Viabilidad Económica: Dado que las cáscaras de huevo son un subproducto común en la industria agroindustrial, su utilización puede conducir a una reducción de costos en la adquisición de materiales de construcción y, por lo tanto, mejorar la viabilidad económica de los proyectos de construcción.

Innovación Tecnológica: Investigar el uso de cáscaras de huevo en la construcción fomenta la innovación tecnológica en la industria de la construcción, lo que puede resultar en

nuevos productos y soluciones que contribuyan a la competitividad y la diferenciación en el mercado.

Mejora de Propiedades Mecánicas: La comprensión de cómo las cáscaras de huevo afectan las propiedades mecánicas y de durabilidad de los materiales de construcción es crucial para garantizar la seguridad y la confiabilidad de las estructuras construidas.

Cierre de Brechas de Conocimiento: A pesar de la creciente atención en este campo, existen brechas significativas en el conocimiento relacionado con el uso de cáscaras de huevo en la construcción. Esta tesis tiene como objetivo abordar estas brechas y proporcionar una visión más completa y precisa de su viabilidad y aplicabilidad.

8. MARCO DE CONCEPTUAL

Desarrollo sostenible

La teoría del desarrollo sostenible, que plantea la necesidad de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras, y que propone tres dimensiones: la ambiental, la económica y la social [1].

Análisis del Ciclo de Vida

La teoría del ciclo de vida, que analiza las etapas por las que pasa un producto desde su extracción hasta su disposición final, considerando los flujos de materiales y energía, así como los impactos ambientales asociados [30].

Construcción

La teoría de la construcción plantea el proceso de creación de estructuras y edificaciones involucrando el conocimiento de ingeniería, arquitectura y diseño de tal manera que cumplan con los estándares económicos, sociales y ambientales establecidos en la normativa vigente [31].

Concreto

Material empleado en la construcción para formar estructuras sólidas y duraderas. Se compone por una mezcla de cemento, agregados finos (arena), agregados gruesos (grava) y agua; dicha mezcla se endurece al secar y cuenta con varias propiedades importantes a tener en cuenta en su uso: resistencia, durabilidad, trabajabilidad, entre otras [32].

Cemento

Material de construcción que funciona como un aglomerante hidráulico. Al mezclarse con agua, genera una pasta que se endurece tanto al aire libre o incluso bajo el agua adquiriendo resistencia y dureza. En la construcción, se usa principalmente como pegamento para la unión de otros materiales de construcción como adoquines, rocas, bloques, entre otros [33].

Residuo agroindustrial

Son los subproductos resultantes del procesamiento de materiales orgánicos en la industria alimenticia y la agricultura. Generalmente este tipo de residuos son originados por cosechas, crianza de animales, transformación de alimentos, entre otros [34].

Cáscara de huevo

Es un residuo agroindustrial proveniente del procesamiento de huevos en la industria alimentaria. Frecuentemente, este residuo es descartado dado que no se le ha brindado un valor de uso o aprovechamiento potencial a pesar de contar con un alto contenido de cristales de calcita

(CaCO₃), hidróxido de calcio (Ca(OH)₂), carbonato de magnesio (MgCO₃) y otros componentes orgánicos que le permiten aplicar a diferentes técnicas de aprovechamiento [35].

Ecodiseño

La gestión ambiental de procesos define al ecodiseño como una herramienta de diseño de productos basada en los impactos ambientales que estos podrían llegar a tener a lo largo de todo su ciclo de vida. Esta herramienta propone la prevención de la contaminación ambiental y la mejora continua por parte de las industrias de cualquier índole [36].

Valor agregado

También conocido como valor añadido, es el incremento del valor de un material ya sea en términos económicos o por el uso potencial con el que éste cuenta. Dentro del contexto de residuos, este término se refiere a la transformación de los mismos para la obtención de nuevos materiales útiles y comerciales [37].

9. MARCO LEGAL

- **La Ley 1259 de 2008**, que establece el comparendo ambiental como un instrumento para prevenir y sancionar las conductas que atenten contra el medio ambiente y la salubridad pública, entre ellas, la disposición inadecuada de residuos sólidos.

- **La Ley 1715 de 2014**, que promueve el desarrollo y la utilización de fuentes no convencionales de energía, especialmente las de carácter renovable, y que incentiva la investigación, el desarrollo y la innovación en este campo.

- **La NTC 121 de 2014**, que especifica las condiciones de desempeño por tipo de cementos hidráulicos para aplicaciones especiales o generales en proyectos de construcción. Contempla aquellas propiedades físicas que garantizan su durabilidad como resistencia a la compresión, tiempos de fraguado, expansión del agua y autoclave, calor de hidratación, resistencia a sulfatos, entre otras.

- **La NTC 33**, que establece la técnica de laboratorio para establecer la finura del cemento hidráulico empleando el aparato de Blaine de permeabilidad al aire.

- **La NTC 294**, esta norma también establece un método de laboratorio para determinar la finura del cemento. En este caso se establece el ensayo de tamiz de 45 μm #325.

- **La NTC 107**, por la cual se establece el ensayo de laboratorio para determinar el cambio o la expansión del cemento en autoclave estableciendo condiciones de temperatura y presión.

- **La NTC 118**, define el protocolo para definir el tiempo de fraguado del cemento mediante la técnica del aparato de Vicat.

- **La NTC 224**, define el método para determinar la cantidad de aire contenida en morteros de cemento.

- **La NTC 220**, describe el ensayo de laboratorio para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento empleando la técnica de cubos.

- **La NTC 6270**, hace referencia al método para determinar el calor de hidratación de materiales cementantes a través de la técnica de calorimetría por condición isotérmica.

- **La NTC 4927**, por la cual es posible definir la durabilidad de morteros de cemento empleando la técnica de expansión de barras de mortero sumergidas en agua.

- **La NTC 3330**, por la cual se establece el valor máximo permisible de expansión longitudinal de morteros de cemento en una solución de sulfatos.

- **La Resolución 0549**, que establece los requisitos técnicos para la producción y comercialización del cemento en Colombia, y que contempla la posibilidad de incorporar aditivos minerales en su composición.

10. METODOLOGÍA

La presente investigación cuenta con una metodología de tipo mixta, puesto que pretende analizar datos cualitativos y cuantitativos, así pues, se analizan las propiedades físicas y químicas de la cáscara de huevo a fin de reconocer su aporte en las propiedades mecánicas del concreto al ser empleadas como material cementante. Así mismo, se analiza la incidencia de esta práctica dentro el contexto económico y ambiental de la industria de la construcción.

Teniendo en cuenta lo anterior, la investigación da cumplimiento a su objetivo a través de las siguientes fases metodológicas:

10.1. Fase 1: Recopilación de Fuentes

Búsqueda Bibliográfica: Iniciar con una búsqueda sistemática en bases de datos académicas, revistas científicas, libros, tesis, informes técnicos y sitios web confiables. Utilizar términos de búsqueda relevantes, como "cáscaras de huevo en construcción" y "aplicaciones de cáscaras de huevo en la industria de la construcción".

Selección de Fuentes: Evaluar críticamente las fuentes encontradas para determinar su relevancia y calidad. Seleccionar aquellas que aporten información sólida y actualizada sobre el tema.

10.2. Fase 2: Análisis y Síntesis de la Información

Clasificación de Fuentes: Organizar las fuentes seleccionadas en categorías temáticas, como propiedades químicas de las cáscaras de huevo, aplicaciones en la construcción, impacto ambiental, estudios de casos, entre otras.

Análisis de Contenido: Realizar un análisis detallado del contenido de cada fuente, extrayendo información relevante sobre el uso de cáscaras de huevo en la construcción, sus ventajas y desafíos, así como ejemplos de aplicaciones exitosas.

Síntesis de Resultados: Sintetizar la información recopilada en cada categoría temática para identificar patrones, tendencias y puntos clave relacionados con el uso de cáscaras de huevo como material de construcción.

10.3. Fase 3: Redacción de la Monografía

Estructura de la Monografía: Organizar la monografía en secciones lógicas, como introducción, antecedentes, propiedades de cáscaras de huevo, aplicaciones en construcción, impacto ambiental, estudios de casos y conclusiones.

Redacción del Documento: Escribir la monografía de manera clara y coherente, siguiendo las normas de estilo y formato académico correspondientes.

11. RESULTADOS

El presente trabajo es un estudio de revisión sistemático que expone las utilidades de emplear cristales columnares presentes en la cáscara de huevo como material cementante en materiales de construcción. Lo anterior, a partir de la literatura científica concerniente a la temática que se encuentra disponible en línea.

11.1. Identificación de propiedades físicas del cemento

Como se mencionó anteriormente, el cemento es un material de construcción que funciona como un aglomerante hidráulico. Al mezclarse con agua, genera una pasta que se endurece tanto al aire libre o incluso bajo el agua adquiriendo resistencia y dureza. Este material, es componente fundamental para la fabricación de concreto de acuerdo a las necesidades de construcción [33].

La calidad del cemento es medida por sus propiedades físicas ya que estas dan noción del comportamiento que adopta dentro del concreto en las diferentes condiciones a las que esté expuesto. De acuerdo con la Norma Técnica Colombiana – NTC 121, las propiedades físicas que determinan la calidad del cemento son:

a) Finura

Se conoce como el tamaño de partícula del cemento. Esta característica es importante tenerla en cuenta ya que de esta depende el tamaño del área que experimenta el cemento cuando se expone a hidratación, es decir, a mayor finura, mayor será la superficie que adoptan las partículas de cemento por gramo una vez sean hidratadas [38].



Ilustración 1. Finura del cemento según la empresa Cementos Tequendama 2021

Fuente: Cementos Tequendama, 2021

b) Cambio de longitud por autoclave

Es un método de laboratorio que permite determinar la estabilidad dimensional del cemento bajo condiciones de alta presión y temperatura. Este ensayo, permite evaluar la solidez del cemento a través de la expansión potencial que experimenta la muestra dependiendo de la composición química del cemento y de las condiciones (presión y temperaturas) controladas en la autoclave. Si el cambio de longitud por autoclave es excesivo, las estructuras que sean construidas con ese tipo de cemento estarán expuestas a problemas de durabilidad debido a que se puede presentar la ruptura de la microestructura del concreto [39].



Ilustración 2. Determinación de la expansión de cemento portland en autoclave

Fuente: Tania M en [39]

c) Tiempos de fraguado:

Corresponde al tiempo que tarda una mezcla de cemento en perder su plasticidad (fraguado inicial) y empezar a endurecerse desarrollando resistencia mecánica (fraguado final), es decir, el tiempo que tarda en pasar de su fase líquida a una fase sólida. El tiempo de fraguado, puede variar dependiendo de la temperatura ambiente, la composición de cemento y el empleo de aditivos para acelerar o retardar el proceso [40].



Ilustración 3. Ensayo de tiempo de fraguado con la Aguja de Vicat en [40].

d) Contenido volumétrico de aire en mortero

El contenido de aire en volumen de mortero hace referencia a la cantidad de espacio interno ocupado por aire dentro de la mezcla de mortero de cemento ya sea porque quedó atrapado en la fase de mezclado o porque fue incorporado intencionalmente mediante aditivos. Según la fracción de aire, la masa endurecida puede aligerarse y perder resistencia [41].



Ilustración 4. Medidor de aire ocluido en morteros
Fuente: Rodríguez & Díaz en [41].

e) Resistencia a la compresión

Esta propiedad, es una medida de prueba que permite determinar la capacidad del cemento para resistir cierta cantidad de presión o carga sobre él antes de que falle. De este modo,

esta propiedad es conocida como el parámetro fundamental en el diseño seguro de la mezcla ya que con esta se determina la durabilidad y calidad del concreto que sea fabricado [42].

f) Calor de hidratación

Esta propiedad, hace referencia al calor que es liberado gracias a la reacción química exotérmica entre el cemento y el agua durante el proceso de hidratación del cemento. De esta manera, el calor de hidratación depende directamente de la composición química del cemento (específicamente de las proporciones de aluminatos y silicatos de calcio), la finura de la muestra, la temperatura del agua y el medio ambiente con el que se esté en contacto [43].

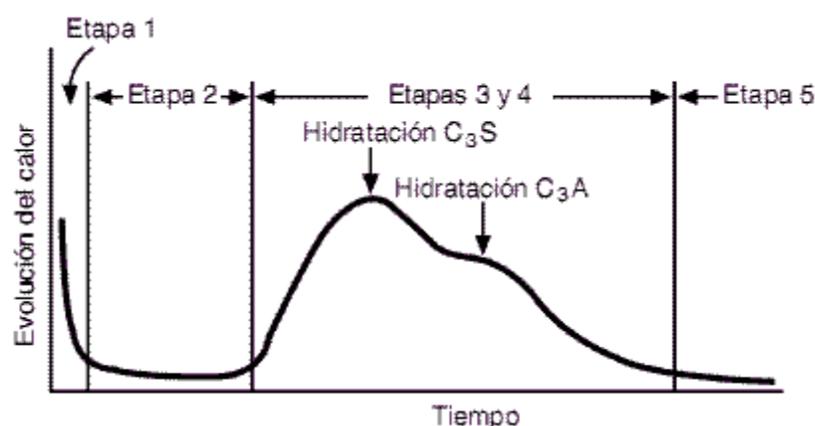


Ilustración 5. Desarrollo del calor para una pasta de cemento

Fuente: Notas de concreto en [44]

“En la etapa 1 se evidencia el comportamiento del calor de humedecimiento inicial. En la etapa 2, se representa el comportamiento del calor durante el periodo de incubación en el tiempo de fraguado inicial. La etapa 3, representa la reacción de los productos de hidratación, determinando el tiempo de fraguado final y la tasa de endurecimiento. La etapa 4, refleja la desaceleración en la formación de productos de hidratación y determina el aumento de la tasa de resistencia. Finalmente, la etapa 5 representa la estabilización de los productos de hidratación y de la tasa de aumento de resistencia, esta etapa final en la más lenta.”[44].

g) Expansión de barra de mortero

Es una prueba específica para medir la expansión volumétrica de las barras de mortero para un tipo de cemento cuando son sometidas a condiciones controladas de humedad (condiciones de curado) en un tiempo determinado. Esta prueba, permite determinar durabilidad del concreto a fabricar a raíz de la estabilidad dimensional del mortero de concreto, la cual se calcula como el porcentaje de expansión de acuerdo con la longitud inicial de la barra [45].

Este ensayo, también permite identificar la susceptibilidad a presentar fisuras o grietas en las estructuras construidas con concreto compuesto con el cemento estudiado y otros agregados. La susceptibilidad se debe principalmente a la reacción álcali-sílice (RAS), de la cual resulta un

tipo de gel higroscópico resultante de la reacción entre los álcalis del cemento (potasio o sodio) con la sílice presente en los agregados [46].



Ilustración 6. Esquema de la RAS en estructuras de concreto

Fuente: Adaptado de Fanijo et. al, en [47]

“La reacción RAS, provoca una deformación asociada con la durabilidad de las estructuras de concreto. Esta reacción, produce un gel higroscópico potencialmente absorbente de humedad que se expande provocando esfuerzos internos que dan paso a fisuras y grietas, degradando la estructura.

El estado pasivo de la sílice (SiO₂) químicamente se estructura en grupos Siloxano ($\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$), sin embargo, el desorden de la sílice cristalina superficial hace que estos grupos generen afinidad para atraer agua y producir sílice hidratada amorfa (Grupo Silanol [$\equiv\text{Si-OH}$]). De este modo, la sílice se orienta a disolver iones hidroxilo, descomponiendo gradualmente los silanoles y los siloxanos y atrayendo hidróxidos alcalinos solubles como el NaOH, KOH y Ca(OH)₂ cuya reacción produce el gel silicato alcalino hidratado y agua que en presencia de humedad tiene a expandirse” [47].

h) Expansión por sulfatos

Es un método que se encarga de evaluar la expansión de las barras de mortero de cemento cuando son expuestas a soluciones de sulfato, generalmente sulfato de sodio (Na₂SO₄), sulfato de magnesio (MgSO₄) y sulfato de calcio (CaSO₄) por un tiempo determinado, con el fin de simular condiciones ambientales potencialmente dañinas por expansión de sulfatos en las estructuras de concreto. Durante a exposición a los sulfatos, se monitorea la longitud de la barra de mortero registrando cualquier cambio en su longitud. Al final del periodo, se expresa la expansión de la barra de mortero por sulfatos como un porcentaje de su longitud inicial [48].

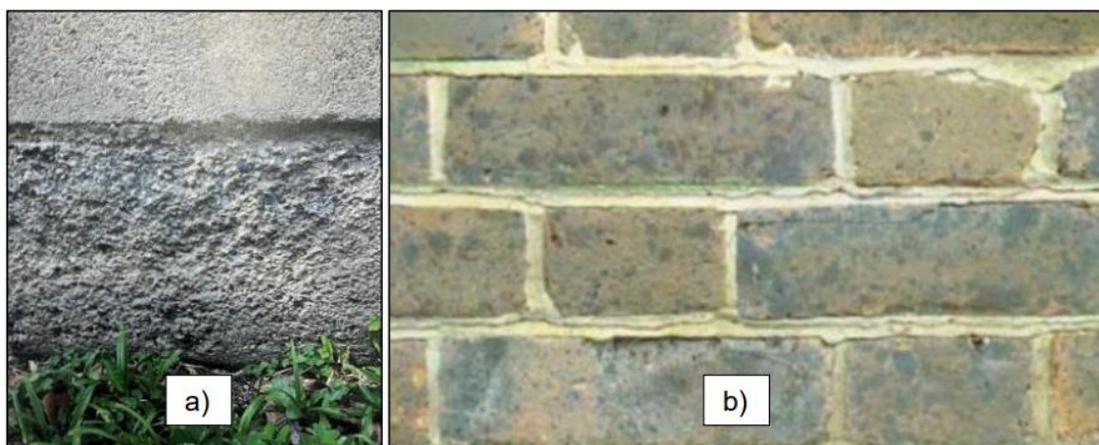


Ilustración 7. Ataque por sulfatos en concretos y morteros

Nota: en la figura a) se muestra la degradación de un bloque en concreto; en la b) Se reconoce la expansión de mortero de pega.
Adaptado por Cubillos en [48].

“El mecanismo de ataque de sulfatos en morteros es directamente proporcional con el contenido de hidróxido de calcio ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$) hidratado. Ahora bien, dependiendo de la solución de sulfato (magnesio, calcio, sodio) el $\text{Ca}[\text{OH}]_2$ es susceptible a convertirse en yeso ante el ataque del sulfato. Los daños asociados al yeso provocan la pérdida de masa y resistencia en las estructuras” [49].

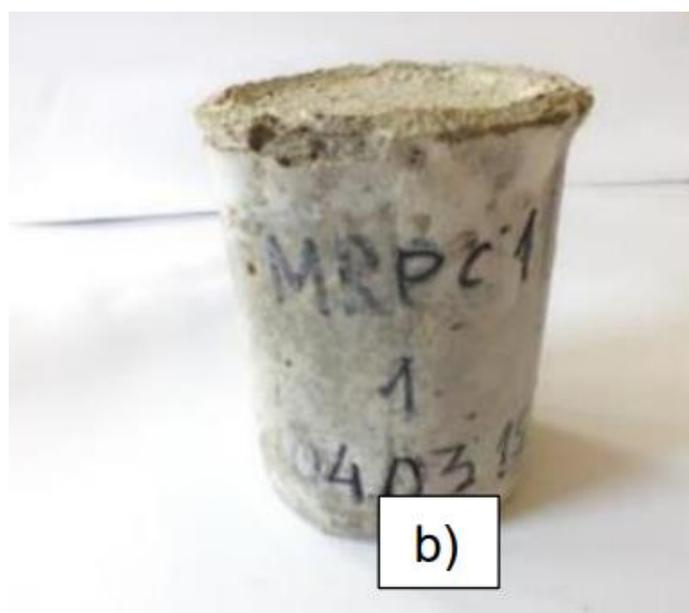


Ilustración 8. Formación de yeso en concreto expuesto a CaSO_4
Nota: Adaptado por Cubillos en [48].

En base a toda la información anterior, el Instituto Colombiano de Normas Técnicas formula la NTC – 121 como la norma técnica compilatoria del desempeño del cemento hidráulico a partir de las propiedades físicas con las que cuenta cada tipo de cemento.

11.2. Tipos de Cemento

a) Cemento de uso general (UG)

Es usado en construcciones generales como pavimentos, edificios de concreto reforzado, puentes, tanques, tuberías, pisos, mampostería y otros elementos estructurales de concreto reforzado. Este cemento, es usado cuando los elementos a construir no van a estar expuestos a agentes nocivos como sulfatos o a concretos que aumentan su temperatura por el calor resultante de la hidratación [50].

b) Cemento de Alta Resistencia Temprana (ART)

Se caracteriza por desarrollar altas resistencias en periodos de tiempo relativamente cortos (una semana o menos) y también por contener partículas finamente molidas que lo hacen útil para la elaboración de concretos y morteros para construcciones de producción industrializada de concretos, estructuras que requieren de ser puestas a servicio rápidamente, entre otros. El desempeño de este tipo de cemento en ambientes agresivos depende de la cantidad de adición utilizada [50].

c) Cemento de Moderada Resistencia a los Sulfatos (MRS)

Este cemento se emplea para la elaboración de concretos que requieren un desempeño moderado en resistencia a los sulfatos y a la compresión. Generalmente, este tipo de cemento es utilizado para la elaboración de concretos destinados a cimentaciones, contenciones, muros, rellenos y cualquier tipo de estructura en general [50].

d) Cemento de Alta Resistencia a los Sulfatos (ARS)

Destinado para la elaboración de concretos que serán expuestos a ambientes nocivos con presencia de sulfatos ya sea en el suelo o en el agua, por ejemplo, alcantarillas, canales, plantas de tratamiento de agua, entre otras. Un factor importante de este cemento, es que su resistencia se desarrolla lentamente en comparación a la de un cemento UG [50].

e) Cemento de Moderado Calor de Hidratación (MCH)

Frecuentemente es usado para la construcción de puentes y tuberías gracias a su desempeño moderado en calor de hidratación en el concreto. Así mismo, el cemento MCH desarrolla su resistencia a una velocidad bastante reducida en comparación a otros tipos de cemento [50].

f) Cemento de Bajo Calor de Hidratación (BCH)

Este cemento, es utilizado en aquellos proyectos donde no se van a generar dilataciones en los tiempos de fraguado, ni retracciones en el secado. Por ejemplo, construcciones de presas de

gravidad, diques, muros y estructuras de concreto masivo donde la elevación de la temperatura en el proceso de endurecimiento se debe mantener en el menor valor posible gracias a que este tipo de proyectos demandan un bajo calor de hidratación por parte del cemento [50].

Tabla 1. Requisitos físicos normalizados por la NTC 121

Tipo de cemento Propiedad Física	Método de ensayo aplicable	UG	ART	MRS	ARS	MCH	BCH
Finura	NTC 33 NTC 294	A	A	A	A	A	A
Cambio de longitud por autoclave, máx., %	NTC 107	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Tiempos de Fraguado, ensayo de Vicat	NTC 118						
Inicial, min., minutos		45	45	45	45	45	45
Inicial, máx., minutos		420	420	420	420	420	420
Contenido volumétrico de aire en volumen de mortero	NTC 224	12	12	12	12	12	12
Resistencia min. a la compresión, Mpa	NTC 220						
1 día		N/A	11	N/A	N/A	N/A	N/A
3 días		8	22	11	11	5	N/A
7 días		15	N/A	18	18	11	11
28 días		24	N/A	N/A	25	N/A	21
Calor de hidratación, KJ/Kg (cal/g)	NTC 6270						
3 días		N/A	N/A	N/A	N/A	335(80)	200(50)
7 días		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	225(55)
Expansión de barra de mortero	NTC 4927	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Expansión por sulfatos (resistencia a los sulfatos)	NTC 3330						
6 meses, máx., %		N/A	N/A	0.1	0.05	N/A	N/A
1 año, máx., %		N/A	N/A	N/A	0.1	N/A	N/A

Fuente: ICONTEC – NTC 121:2021

De esta manera, la clasificación del cemento según su desempeño facilita el cumplimiento de los requerimientos de las construcciones en términos de durabilidad y alternativas ante la exposición a diversos ambientes.

11.3. Identificación de las propiedades físicas y composición química de la cáscara de huevo

La cáscara de huevo es un tipo de biocerámica que cuenta con una fase orgánica y una fase inorgánica integradas en una matriz cálcica porosa por naturaleza [51]. Este material, químicamente se encuentra compuesto por 1.6% de H₂O, 94% de cristales de calcita (CaCO₃), 1% de fosfato tricálcico (Ca₃[PO₄]₂), 1% de carbonato de magnesio (MgCO₃) y 4% de materia orgánica [52]; lo que la hace potencialmente aprovechable en diferentes áreas del conocimiento como es el caso de la industria de la construcción donde puede ser empleada como sustituto parcial del material cementante en el concreto.

Dada su rica composición, la cáscara de huevo cuenta con diferentes propiedades físicas como dureza, porosidad, rugosidad y resistencia a la compresión [53]. A raíz de ello, diferentes investigaciones se han puesto a la tarea de definir por qué la cáscara de huevo presenta en especial cierto grado de dureza y resistencia a la compresión. Así pues, mediante microscopía electrónica de barrido se demostró que la parte proteica (fase orgánica) de la cáscara de huevo se enlaza con los cristales de CaCO₃ a una proporción 1:50, factor que le otorga a la cáscara dureza y resistencia por ser el componente mayoritario en la cáscara [54].

La cáscara de huevo se subdivide en 8 capas: la capa de las membranas de la cáscara, la capa mamilar, la capa de matriz orgánica, la capa cristalina entrelazada, capa de cristal vertical, la capa de pigmento y la cutícula como se muestra en la siguiente ilustración.

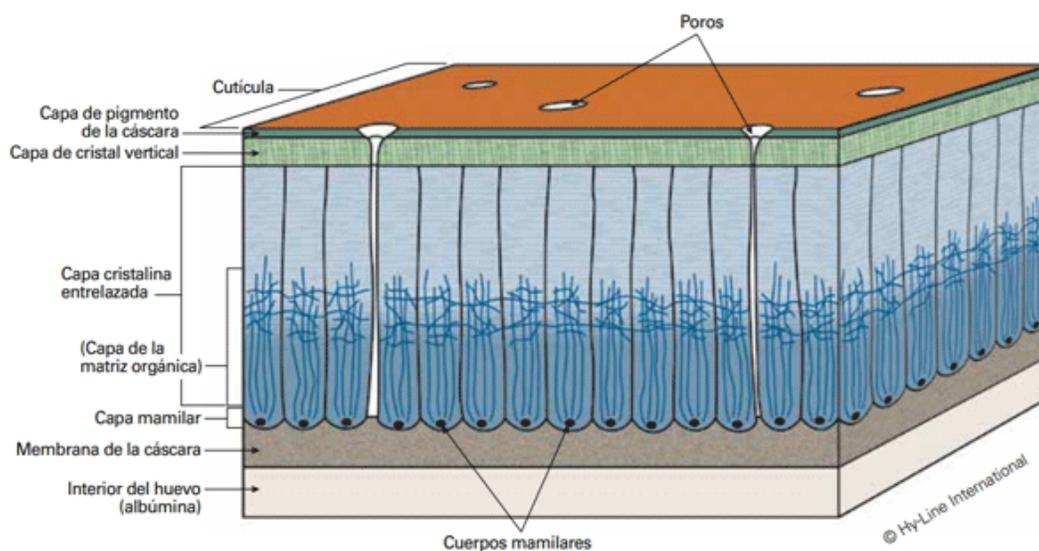


Ilustración 9. Capas de la cáscara de huevo

Fuente: Hy-line en [55]

- a) “La capa de la membrana es la más interna de la cáscara protegiendo el contenido interno del huevo. Un defecto en esta membrana puede provocar una calcificación defectuosa de la cáscara.
- b) La capa mamilar se compone por cuerpos mamilares entrelazados que permiten la organización estructural de la cáscara de la cual depende su resistencia.
- c) La capa de matriz orgánica añade fortaleza a la cáscara de huevo gracias a su entrelazamiento con la capa cristalina, permitiendo la organización de los cristales de calcio en forma de columnas. Las fibras de proteína contenidas en esta capa brindan elasticidad y resistencia a la cáscara.
- d) La capa cristalina entrelazada se compone principalmente por cristales de CaCO_3 con pequeñas cantidades de $\text{Ca}_3[\text{PO}_4]_2$ y MgCO_3 , los cuales están orientados de forma perpendicular en la superficie de la cáscara proporcionando mayor dureza.
- e) La capa de cristal vertical está formada por cristales de CaCO_3 más densos, los cuales están orientados de forma vertical brindando suavidad y dureza a la cáscara.
- f) La capa de pigmento es el lugar donde finaliza la calcificación de la cáscara. El color de los pigmentos depositados en las capas calcificadas del exterior depende del tipo de ave y de la edad de esta; el pigmento disminuye conforme la edad del ave aumenta.
- g) La cutícula es la capa porosa y externa que se encarga de recubrir la parte externa de la cáscara del huevo. Funciona como una barrera protectora contra la pérdida de humedad y el ingreso de bacterias al interior del huevo.” [55].

De este modo, en la siguiente tabla se expone la composición química elemental de la cáscara de huevo en porcentaje de masa.

Tabla 2. Composición química elemental de la cáscara de huevo

Fórmula	Elemento	Concentración % masa	Concentración normalizada a 100%
Al ₂ O ₃	Óxido de Aluminio	6.290	6.202
SiO ₂	Dióxido de Silicio	2.751	2.712
SO ₂	Dióxido de Azufre	0.442	0.436
ClO ₂	Dióxido de Cloro	0.287	0.293
K ₂ O	Óxido de Potasio	0.219	0.216
CaCO ₃	Calcita	90.067	88.801
MnO	Oxido de Manganeso (II)	0.004	0.004
Fe ₂ O ₃	Óxido de Hierro (III)	0.063	0.062
Ni ₂ O ₃	Óxido de Níquel (III)	0.014	0.014
CuO	Óxido de Cobre (II)	0.774	0.763
ZnO	Óxido de Zinc	0.386	0.381
As ₂ O ₅	Pentóxido de Diarsénico	0.005	0.005
SrO	Óxido de estroncio	0.095	0.093
Y ₂ O ₃	Óxido de Itrio	0.001	0.001
ZrO ₂	Dióxido de Zirconio	0.007	0.007
Total		101.425	100.00

Fuente: Adaptado por Alvarado Maguiña a partir del Informe 19-LAQ/2019 de la UNMSM en [56].

Tabla 3. Concentración de Calcita en la cáscara de huevo

Fórmula	Elemento	Concentración % masa
H ₂ O	Agua	1.6
	Minerales	95.1
CaCO ₃	Calcita	93.51
MgCO ₃	Carbonato de Magnesio	0.8
Ca ₃ PO ₄	Fósforo Tricálcico	0.7
	Materia Orgánica	3.3

Fuente: Adaptado por Jaimes Acuña a partir de la investigación de Sánchez y Huanio en [57].

11.4. Técnicas de preparación de la cáscara de huevo como material cementante

a) Activación mecánica y caracterización por molido y fluorescencia de rayos X:

En primer lugar, se recolectan de las cáscaras de huevo, posteriormente se realiza la limpieza de estas para retirar impurezas y membranas para así poder triturarlas. Se debe tener en cuenta una buena molienda para poder tamizar las partículas (su puede realizar con un molino de granos corona o manual con un mortero y pilón), pues entre más fina sea la cáscara de huevo, más reactiva será.

Cuando ya se tiene el material fino de cáscaras de huevo, se determina la composición química mediante el ensayo de fluorescencia de rayos X, el cual permite conocer el contenido y porcentaje de óxidos del material [58].

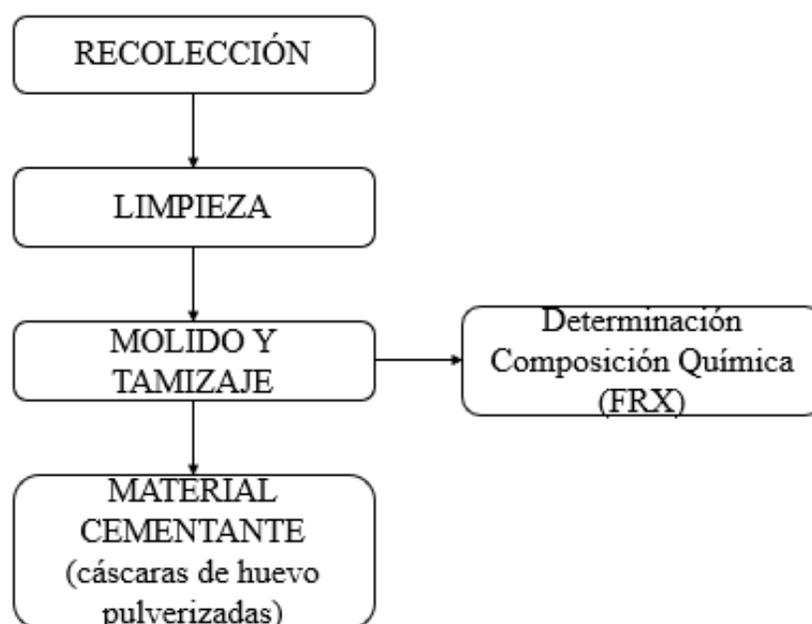


Ilustración 10. Diagrama de flujo para la obtención de cáscara de huevo pulverizada

Nota: Adaptado de la investigación de Matías Quispe en [58].

b) Análisis térmico diferencial (DTA)

Consiste en la caracterización de la ceniza de cáscara de huevo, para ello se recolectan las cáscaras de huevo, se dejan secar a cielo abierto y se trituran, luego se realiza un pre-quemado, se tamiza y se garantiza que el material fino pase por el tamiz N°200, para así efectuar el análisis térmico diferencial en el cual se calcina el material obtenido del pre-quemado (a 700°C por 4 horas) y por último se determina la composición química por medio del ensayo de fluorescencia de rayos X, para determinar el contenido y porcentaje de óxidos del material [56].

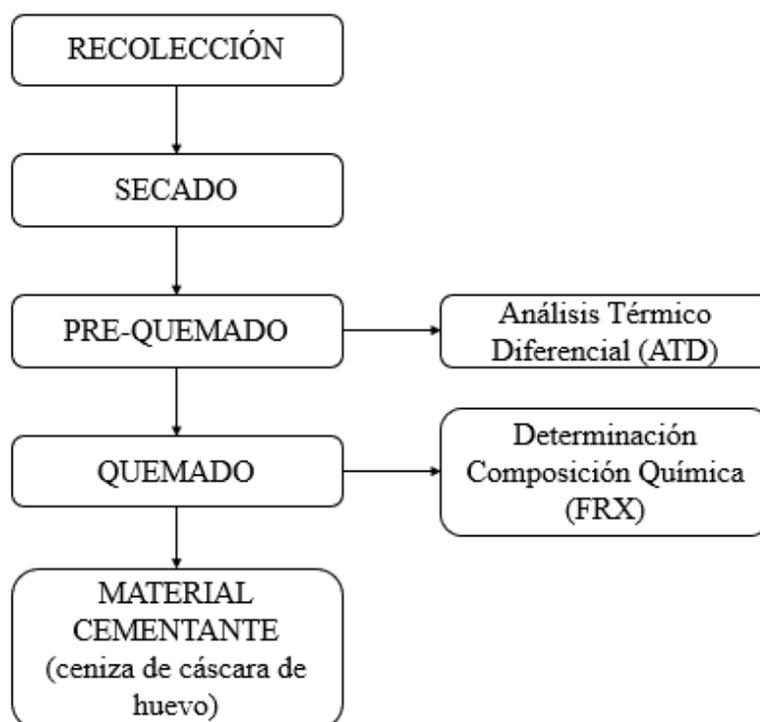


Ilustración 11. Diagrama de flujo para la obtención de ceniza de cáscara de huevo

Nota: Adaptado de la investigación de Alvarado Maguiña en [56].

c) Obtención por molienda y tamizado manual

La preparación de la cáscara de huevo inicia con su recolección, seguidamente se extrae su materia orgánica (cutículas) de forma tal que no pierda las proteínas y se pueda obtener un alto contenido de cristales de calcita. Posteriormente, se realiza lavado por medio de inmersión en abundante agua, para eliminar la suciedad y contaminantes físicos, luego se desinfecta con 6ml de ácido oxoclórico ($HClO$) en 6 litros de agua por 2 minutos para liberar microorganismos y eliminar residuos orgánicos, después, se seca a temperatura ambiente y se procede a moler con un mortero y apisonador para obtener el cristales de calcita, por último, se tamiza y se debe lograr que el material pase por el tamiz N°200 y lo que no pase, se desecha.



Ilustración 12. Diagrama de flujo para la obtención de calcita

Nota: Adaptado de la investigación de Jaimes Acuña en [57]

12. DISCUSIÓN

12.1. Eficiencia de la cáscara de huevo como material cementante en el concreto

Con el fin de reconocer el uso potencial de la cáscara de huevo como sustituto parcial del material cementante para la fabricación de concreto, en la siguiente tabla se expone la eficiencia que este material obtuvo en diferentes investigaciones orientadas a la mejora de las propiedades físicas y mecánicas del concreto al implementar este agroresiduo en el proceso.

Tabla 4. Uso de cáscara de huevo como sustituto parcial de material cementante

Autor y fecha	Mezcla analizada	Porcentaje de sustitución	Metodología	Resultados
Matías Quispe, 2018	Concreto	<ul style="list-style-type: none"> 10% (7.5% cáscara de huevo pulverizada + 2.5% ceniza de hoja de eucalipto) 16% (12% cáscara de huevo pulverizada + 4% ceniza de hoja de eucalipto) 	Se elaboraron 9 probetas de concreto para cada porcentaje de sustitución con $f'c = 210 \frac{kg}{cm^2}$ y se realizaron ensayos de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de curado.	La resistencia a la compresión aumenta proporcionalmente en base a los días de curado. De esta manera, la sustitución 1 aumentó un 2% la resistencia a la compresión; y la sustitución 2 aumentó un 10.8%.
Castro Gallardo y Alfaro Pérez, 2019	Concreto	15% y 20% de cáscara de huevo pulverizada con 2% adicional por peso del cemento	Se ensayaron muestras con proporciones de sustitución del 15% y 20% del cemento por fibra de cáscara de huevo, añadiendo 2% en razón al peso del cemento.	Con la sustitución del 15% y 2% de adición, se alcanzó la resistencia de diseño en 7 días (acelerador de resistencia), el tiempo de fraguado mejoró 15 – 20 minutos. El concreto mejoró su resistencia a la compresión y a la tracción.
Jaimes Acuña, 2019	Adoquines de concreto	<ul style="list-style-type: none"> 15% (11.25% cáscara de huevo pulverizada + 7.5% de vidrio molido) 30% (22.50% cáscara de huevo pulverizada + 7.50 % de vidrio molido) 	Se elaboraron 9 adoquines tipos peatonal de concreto para cada porcentaje de sustitución con $f'c = 320 \frac{kg}{cm^2}$ y se realizaron ensayos de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de curado.	Se evidenció la mejora en la resistencia a la compresión, en la sustitución 1 la mejora fue del 12.97 % y en la sustitución 2 del 1.62%
Dávila Delgado, 2021	Ladrillos de concreto con material de eliminación	1%, 2%, 4% y 6% de cáscara de huevo pulverizada, cada uno + 1% de cal	Se elaboraron 10 ladrillos por cada porcentaje de sustitución con ensayos de resistencia a la compresión por medio de la máquina uniaxial a los 7, 14 y 28 días de curado.	El diseño experimental óptimo es la sustitución 1, debido a que es la presenta mejoras en su resistencia a la compresión en un 66% con $f'c = 81.8 \text{ kg/cm}^2$
Alamo y Sigüeñas, 2022	Concreto	2%, 4% y 6% de ceniza de cáscara de huevo con adiciones de fibras de acero reciclado del 1% y 2% para cada sustitución	Se elaboraron 27 probetas de concreto (cilíndricas y prismáticas), para cada sustitución diseñadas con concreto convencional con $f'c = 210 \frac{kg}{cm^2}$. Se realizaron ensayos a la compresión y tracción diametral a los 7, 14 y 28 días de curado.	El diseño con mejor desempeño fue el de 2% de ceniza de cáscara de huevo + 1% fibra de acero reciclado, representando mejoras en la resistencia a la compresión del 23% y con respecto a la resistencia a la flexión, esta depende directamente de las adiciones de fibra de acero.
Martínez, 2022	Concreto arquitectónico para mobiliario	10%, 20%, 30% y 35% de cáscaras de huevo pulverizadas y calcinadas	Se elaboraron 10 muestras cilíndricas para cada porcentaje de sustitución y se llevaron a cabo ensayos de resistencia a la compresión a los 7, 14, 28 y 56 días de curado.	El diseño con sustitución del 10% presentó un rendimiento del 86% respecto a la resistencia a la compresión de diseño, es decir, no cumplió con su resistencia de diseño por lo que se requieren mejoras en las dosificaciones de elaboración del concreto. Sin embargo, se destaca su eficiencia en el proceso.

Vásquez Lazo, 2022	Concreto para Pavimento rígido	4%, 8%, 12% y 16% de cenizas de cáscara de huevo pulverizada	Se elaboraron 9 probetas para cada sustitución con $f'c = 210 \frac{kg}{cm^2}$ 7, 14 y 28 días de curado	El diseño óptimo de sustitución fue el del 12%, ya que presenta mejoras en la resistencia a la compresión desde los 14 días de curado con una mejora del 16% y a 28 días con 23%. El estudio presenta una mejora en la resistencia a la compresión en los porcentajes de sustitución de 4%, 8% y 12%. Sin embargo, en la sustitución de 16% el efecto en las propiedades físico-mecánicas ya es adverso.
Castillo Piscoya, 2023	Concreto	5%, 7.5% y 10% de ceniza de cáscara de huevo (950°C por 2 horas)	Se elaboraron 288 probetas para cada sustitución, la mitad con diseño de mezcla para $f'c = 210 \frac{kg}{cm^2}$ y la otra con diseño de mezcla $f'c = 280 \frac{kg}{cm^2}$. Se llevaron a cabo ensayos de resistencia a la compresión, a la tracción y flexión a los 7, 14 y 28 días de curado.	La sustitución del 10% fue la de mayor beneficio para ambos diseños de tipo de mezcla, mejorando la resistencia a la compresión un 11.06%, la resistencia a la tracción en un 11.01% y la resistencia a la flexión en un 11.15%
Marquina Irigoien, 2023	Concreto	3%, 5%, 8% y 10% de cáscara de huevo pulverizada	Se elaboraron 300 muestras para cada sustitución, la mitad con diseño de mezcla para $f'c = 210 \frac{kg}{cm^2}$ y la otra con diseño de mezcla $f'c = 280 \frac{kg}{cm^2}$. Se llevaron a cabo ensayos de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión, a la tracción a los 7, 14 y 28 días de curado.	La sustitución del 8% fue la de mayor beneficio para ambos diseños de tipo de mezcla, cumpliendo la resistencia a la compresión de diseño en un 83%, la resistencia a la tracción en un 92% y el módulo de elasticidad en un 85%
Neira Uchofen, 2023	Mortero	5%, 10%, 15% y 20% de ceniza de cáscara de huevo	Se elaboraron 100 vigas y 300 probetas para diseños de $f'c = 280 \frac{kg}{cm^2}$ y $f'c = 350 \frac{kg}{cm^2}$ y se llevaron a cabo pruebas de resistencia a la compresión, modulo elástico, flexión y tracción	El diseño con mayor resultado fue el de sustitución del 15%, mejorando la resistencia a la compresión entre el 10% y el 20%; la resistencia a la flexión en 5.2%; la resistencia a la tracción en un 17.91% y el módulo elástico en un 13.6%

Fuente: *Elaboración propia*

Como se muestra en la tabla anterior, la sustitución parcial del cemento por cáscara de huevo se adapta a diferentes materiales usados en la construcción como concreto, pavimento rígido, concreto arquitectónico, ladrillo y adoquines, destacando su buen comportamiento cuando se somete a diferentes pruebas teniendo en cuenta los porcentajes de sustitución empleados y las condiciones de preparación del material en estudio.

Para el concreto, al sustituir parcialmente el cemento por cáscara de huevo pulverizada, se presenta una eficiencia en las propiedades físico-mecánicas de diseño, pero sin presentar mejoras más allá de lo requerido por el diseño como lo representa el estudio de Marquina Irigoien en [14]. Sin embargo, al hacer adecuaciones como el tratamiento térmico de la cáscara de huevo pulverizada, se presentan mejoras notorias y superiores a las de diseño en las propiedades físico-mecánicas del concreto como lo demuestra Castillo Piscoya y Neira Uchofen en [13], [59] respectivamente.

Ahora bien, hablando de aleaciones de la cáscara de huevo pulverizada (Calcinada o no) con materiales orgánicos como las cenizas de material vegetal, se presentan mejoras en las propiedades físico-mecánicas como lo demuestra Matías Quispe (2018) en [58]. Sin embargo, estas mejoras no son tan eficientes al contrastarlas con las aleaciones de la cáscara de huevo pulverizada (calcinada o no) con materiales inorgánicos como el vidrio molido, la cal o las fibras de acero reciclado, como lo demuestra, Jaimes Acuña, Dávila Delgado, y Alamo y Sigüeñas (2022) en [22], [57], [23] respectivamente.

Finalmente, la relevancia del control de los porcentajes de sustitución se refleja en su incidencia sobre las propiedades físico-mecánicas de la mezcla debido a que en exceso presentan resultados desfavorables como lo presenta Vásquez Lazo en [21].

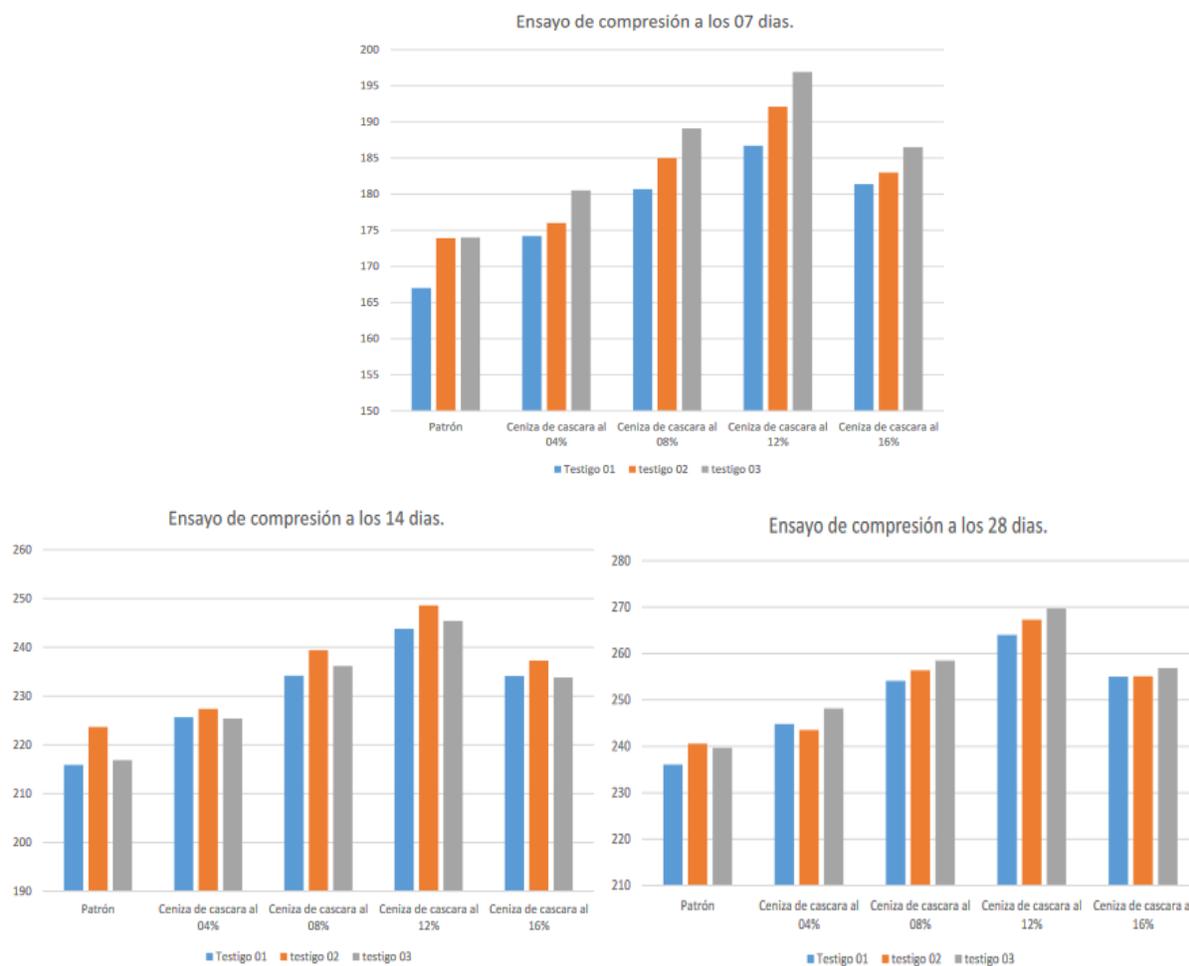


Ilustración 13. Ensayo de compresión de las sustituciones 0%, 4%, 8%, 12% y 16 % a los 7, 14 y 28 días de curado

Fuente: Adaptado de Vásquez Lazo en [21].

El anterior ejemplo de ensayo de compresión refleja la importancia del control de los porcentajes de sustitución. En las sustituciones del 4%, 8% y 12% se presenta una mejora de manera lineal de la resistencia a la compresión a medida que aumenta el porcentaje de sustitución, tanto a los 7 como a los 14 y 18 días de curado. Sin embargo, no ocurre lo mismo al llegar al porcentaje de sustitución del 16% ya que se produce un efecto adverso en la resistencia a la compresión, ya que en lugar de seguir aumentando la propiedad, la reduce. Por lo tanto, la sustitución del cemento en las proporciones correctas garantiza la mejora de las propiedades físico-mecánicas de la mezcla [21].

El estudio de Castro Gallardo y Alfaro Pérez en [19] refuerza lo anteriormente expuesto, ya que define las ventajas de implementar una sustitución óptima en pro de las propiedades físico-mecánicas requeridas por el concreto para ser de calidad. En este estudio, los autores demuestran que la ceniza de cáscara de huevo funciona como un material cementante eficiente ya que es capaz de mejorar la resistencia a la compresión hasta un 12%, la resistencia a la tracción en un 10%, el tiempo de fraguado lo acelera 15 minutos para el inicial y 20 minutos para el final.

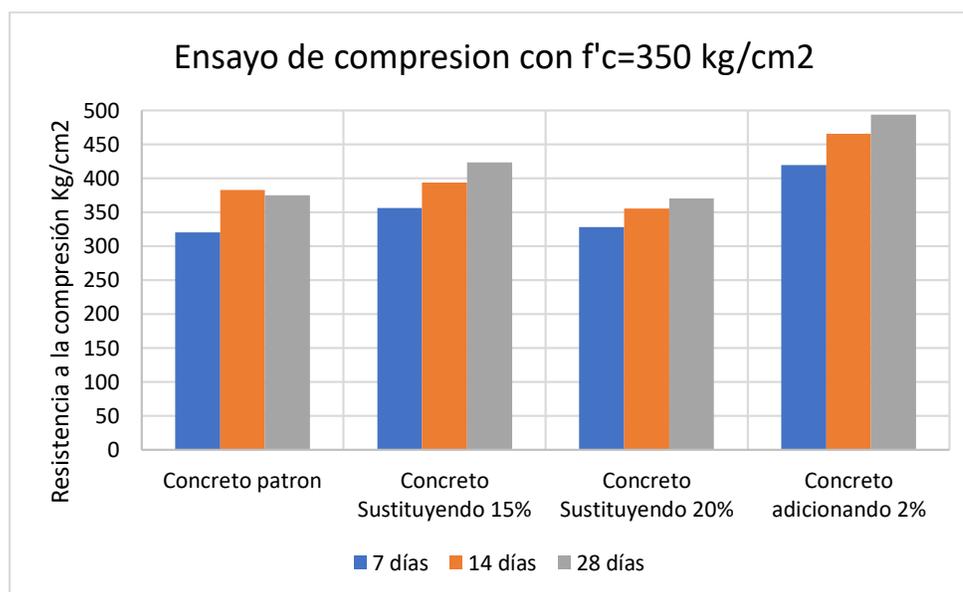


Ilustración 14. Ensayo de compresión de concreto con sustitución parcial de cemento por cáscara de huevo

Nota: Adaptado según los resultados obtenidos por Castro Gallardo y Alfaro Pérez en [19].

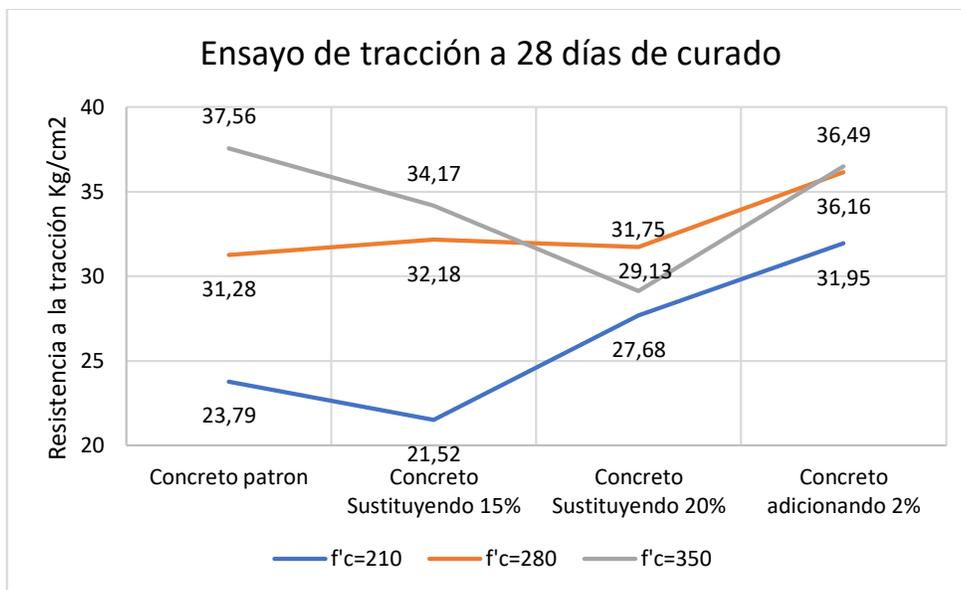


Ilustración 15. Ensayo de resistencia a la tracción a los 28 días de curado y a diferentes cargas de diseño

Nota: Adaptado según los resultados obtenidos por Castro Gallardo y Alfaro Pérez en [19].

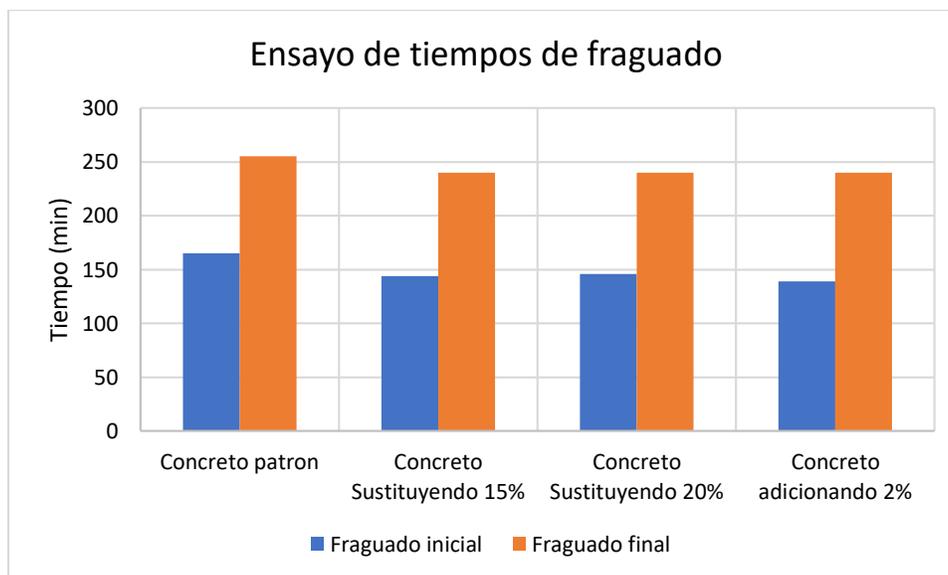


Ilustración 16. Tiempos de fraguado inicial y final de la muestra patrón y las muestras experimentales

Nota: Adaptado según los resultados obtenidos por Castro Gallardo y Alfaro Pérez en [19].

De esta manera se resalta la utilidad y eficiencia de la cáscara de huevo como sustituto parcial de material cementante gracias a su alto contenido de calcita en forma de cristales columnares.

Según GeologyScience en [60], la calcita es un mineral cuya estructura cristalina es de forma hexagonal a raíz de la unión de iones de calcio (Ca^{2+}) con iones de carbonato (CO_3^{2-}) en un

modelo repetitivo que da como resultado una forma escalonada convirtiéndolo en uno de los material de potencial uso en la construcción ya que es un ingrediente clave en la producción de cemento. De este modo, la cáscara de huevo al contener en su estructura capas de cristales de calcita, cuenta con la capacidad de ser empleada como sustituto parcial del material cementante.

En base al punto anterior, los mejores resultados de los diferentes ensayos con sustituciones parciales de cemento por calcita, se han obtenido cuando el tamaño de partícula de la calcita es más pequeña, ya que podrá reaccionar más rápido con el agua lo que garantizará un tiempo de fraguado óptimo y la adquisición acelerada de la resistencia a la compresión en edades tempranas como lo demuestra el estudio presentado por Castro Gallardo y Alfaro Pérez en [19].

12.2. Impacto ambiental del uso de la cáscara de huevo en la construcción

El uso de la cáscara de huevo en un área tan amplia como lo es la construcción, contribuye de manera significativa en la reducción de dióxido de carbono, residuos y consumo energético, puesto que la problemática que presenta Correa et al en [61], donde menciona que el hecho de producir cemento genera 0.8 Toneladas de dióxido de carbono por tonelada de cemento y la elevada producción de residuos de cáscara de huevo (en 2020 fue de 86.7×10^6 millones de toneladas), ha hecho reflexionar y ha permitido determinar que el uso de la ceniza de cáscara de huevo no solo mejora las propiedades mecánicas del concreto, sino que contribuye con una reducción del 84% en las emisiones de dióxido de carbono, lo que apunta al desarrollo de ciudades más sostenibles y comunidades más sanas.

12.3. Eficiencia económica de la cáscara de huevo como material cementante en el concreto

Como se evidencia en las investigaciones analizadas en la Tabla 4, las sustituciones parciales de cemento por de cáscara de huevo (calcita) han arrojado resultados que mejoran las propiedades físico-mecánicas del concreto, lo que permite afirmar que la eficiencia económica de este tipo de sustituciones parciales en el concreto está directamente relacionada con el porcentaje de sustitución efectuado en base al diseño de mezcla de interés. En estos términos, en el estudio peruano presentado por Alamo y Sigüeñas en [23] se demostró que el costo del concreto con sustitución parcial de cemento es 0.2% más costoso que el concreto convencional o concreto patrón, como se muestra en la siguiente ilustración.

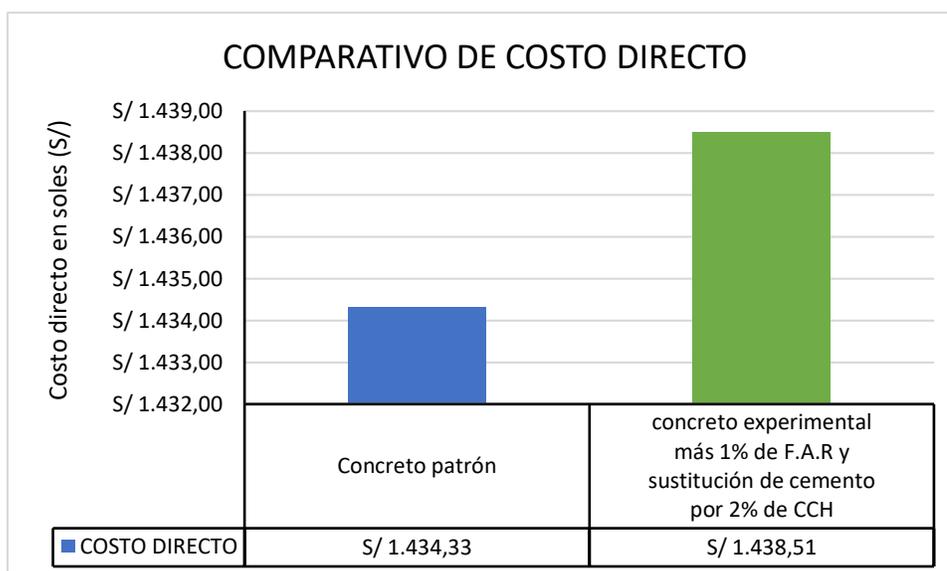


Ilustración 17. Comparativo de costos directos de las muestras de concreto

Nota: Adaptado de la investigación realizada por Alamo y Sigüeñas en [23].

En contraste a lo anterior, para el caso específico de Colombia, no se cuenta con información teórica o documentada acerca de entidades que se dediquen a la venta y/o reciclaje de las cáscaras de huevo que permitan definir un precio estándar de este material. Por lo tanto, se hace necesario la búsqueda de este dato en fuentes de información primaria, es decir, ir a las fuentes potenciales de producción de cáscara de huevo como residuo sin aprovechamiento para hacer un análisis monetario del costo que este residuo puede tener a partir del sistema de recolección, transporte, almacenamiento, tratamiento y pretratamiento necesarios para que este material pueda ser empleado como un sustituto parcial de material cementante en la elaboración de concreto.

12.4. Hipótesis Nula

Ahora bien, las cáscaras de huevo al ser estudiadas como un sustituto parcial de material cementante, también presenta limitantes en cuanto a su desempeño, pues no siempre llega a cumplir con los criterios de diseño como lo demuestra el estudio de Marquina Irigoien en [14], donde la sustitución parcial de cemento por cáscara de huevo pulverizada desarrolló un cumplimiento de la resistencia a la compresión de diseño en un 83%, de la resistencia a la tracción en un 92% y del módulo de elasticidad en un 85%. Sin embargo, a pesar de ser porcentajes de cumplimiento considerables, al denominar a los cristales columnares de la cáscara de huevo como

un material que mejora las propiedades físico-mecánicas del concreto se presenta una controversia pues este estudio demuestra que no es un sustituto de mejora al 100%, pues se espera que, si no mejora las propiedades del concreto, cuando mucho, debe mantenerlas.

El planteamiento anterior, es reforzado por el estudio de Martínez Calixto en [25], donde el diseño con sustitución del 10% del cemento por cáscara pulverizadas presentó un rendimiento del 86% respecto a la resistencia a la compresión de diseño, es decir, no cumplió con su resistencia de diseño por lo que se requieren mejoras en las dosificaciones de elaboración del concreto. Sin embargo, se destaca su eficiencia en el proceso.

Ambos estudios hacen recomendaciones respecto a la dosificación del sustituto parcial del material cementante y el tratamiento previo de este antes de ser incluido en la mezcla, pues al hacer adecuaciones como el tratamiento térmico de la cáscara de huevo pulverizada, se presentan mejoras notorias y superiores a las de diseño en las propiedades físico-mecánicas del concreto como lo demuestra Castillo Piscocoy y Neira Uchofen en [13], [59] respectivamente.

13. CONCLUSIONES

La calcita es un mineral cuya estructura cristalina es de forma hexagonal a raíz de la unión de iones de calcio (Ca^{2+}) con iones de carbonato (CO_3^{2-}) en un modelo repetitivo que da como resultado una forma escalonada convirtiéndolo en uno de los materiales de potencial uso en la construcción ya que es un ingrediente clave en la producción de cemento. De este modo, la cáscara de huevo al contener en su estructura capas de cristales columnares de calcita, cuenta con la capacidad de ser empleada como sustituto parcial del material cementante.

En cuanto al comportamiento de la calcita como sustituto parcial del cemento, se puede afirmar que entre más fino sea su tamaño de partícula, más reactiva será, pues actúa como un acelerante en la adquisición de resistencia a la compresión permitiendo generar mejores tiempos de fraguado en los concretos. Así mismo, hace que sea un sustituto versátil que se puede aplicar en materiales de construcción como pavimento rígido, ladrillo, adoquines y concreto arquitectónico.

El cemento es un material de construcción cuya obtención se remonta a la explotación de canteras, actividad que genera altas emisiones de CO_2 . Por lo tanto, al sustituirlo parcialmente por la calcita obtenida a partir de las cáscaras de huevo, se reduce el consumo de materiales cuya producción está asociada a impactos ambientales negativos.

Dar un valor de uso a aquellos residuos agroindustriales cuyo potencial de aprovechamiento es menospreciado, reduce la cantidad de residuos cuya disposición final debe estar ligada a los rellenos sanitarios. De este modo, el hecho de dar un valor de uso a la cáscara de huevo como sustituto parcial de material cementante en la construcción, evita que la capacidad de gestión de residuos en los rellenos sanitarios se reduzca, ya que ese espacio puede ser aprovechado para la disposición final de otro tipo de residuos cuyo aprovechamiento es mucho más limitado.

El proceso de obtención de la calcita a partir de las cáscaras de huevo contribuye en la reducción de producción de dióxido de carbono causado por la explotación de canteras y en la reducción en la cantidad de residuos agroindustriales cuya disposición final se efectúa en rellenos sanitarios. Además, permite generar una alternativa de concreto la cual puede tener impactos positivos en factores importantes como la economía, sociedad y medio ambiente.

14. BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. L. Pardo, «Sobre el desarrollo sostenible y la sostenibilidad: conceptualización y crítica», *Barataria. Revista Castellano-Manchega de Ciencias Sociales*, n.º 20, pp. 111-128, 2015.
- [2] P. Z. Ávila, «La sustentabilidad o sostenibilidad: un concepto poderoso para la humanidad», *Tabula Rasa*, n.º 28, pp. 409-423, jun. 2018, doi: 10.25058/20112742.n28.18.
- [3] A. Castro Alfaro, «Economía, salud, desarrollo humano e innovación en el desarrollo sustentable», *Conocimiento global*, vol. 3, n.º 1, Art. n.º 1, dic. 2018.
- [4] A. S. Castro Torres, E. J. Suysuy Chambergo, A. S. Castro Torres, y E. J. Suysuy Chambergo, «Herramientas de gestión ambiental para reducir el impacto de los costos ambientales en una empresa de construcción», *Revista Universidad y Sociedad*, vol. 12, n.º 6, pp. 82-88, dic. 2020.
- [5] J. D. B. Gordillo y N. F. L. Elizalde, «Impactos de la construcción sostenible y tradicional a nivel ambiental», *Boletín Semillas Ambientales*, vol. 12, n.º 1, Art. n.º 1, jul. 2018.
- [6] M. F. Hernández-Zamora, S. Jiménez-Martínez, J. I. Sánchez-Monge, M. F. Hernández-Zamora, S. Jiménez-Martínez, y J. I. Sánchez-Monge, «Materiales alternativos como oportunidad de reducción de impactos ambientales en el sector construcción», *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 34, n.º 2, pp. 3-10, jun. 2021, doi: 10.18845/tm.v34i2.4831.
- [7] A. Enshassi, B. Kochendoerfer, y E. Rizq, «Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción», *Revista ingeniería de construcción*, vol. 29, n.º 3, pp. 234-254, dic. 2014, doi: 10.4067/S0718-50732014000300002.
- [8] N. S. Pardo, G. L. Penagos García, y H. Acevedo, «Impactos ambientales asociados a la huella de carbono y la energía incorporada del ciclo de vida de una edificación en Medellín», *Environmental impacts associated with the carbon footprint and embodied energy of life cycle of a building in Medellín*, vol. 74, n.º 565, p. 11, mar. 2022, doi: 10.3989/ic.82758.
- [9] F. Gómez, S. Frías, W. Bravo, y C. Pacheco, «Uso de cáscara de huevo como reemplazo parcial de material cementante en cubos mortero de cemento hidráulico», *Investigación Formativa en Ingeniería*, pp. 158-164, 2018.
- [10] M. A. Reyes Chaupis, «Resistencia a compresión de un concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ al sustituir al cemento en 4%, 6% y 8% por cascara de huevo», Trabajo de Grado, Universidad San Pedro, Perú, 2019. Accedido: 11 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.usanpedro.edu.pe//handle/USANPEDRO/11387>
- [11] M. E. Revuelta Muñoz, «Análisis de ciclo de vida de nuevo material cementante realizando reemplazos parciales con dos tipos de residuos agroindustriales puzolánicos», Trabajo de Maestría, Universidad del Norte, Barranquilla, 2022. Accedido: 11 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/10833>
- [12] L. F. B. Botero, «Responsabilidad social empresarial en el sector de la construcción», *AD-minister*, n.º 14, Art. n.º 14, 2009.

- [13] G. E. Castillo Piscocoya, «Sustitución parcial de cemento por ceniza de cáscara de huevo para la elaboración de concreto», Trabajo de Grado, Universidad Señor de Sipán, 2023. Accedido: 11 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uss.edu.pe//handle/20.500.12802/11134>
- [14] L. A. Marquina Irigoin, «Análisis de las propiedades mecánicas del concreto sustituyendo un porcentaje de cemento por polvo de cáscara de huevo», Trabajo de Grado, Universidad Señor de Sipán, 2023. Accedido: 11 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uss.edu.pe//handle/20.500.12802/11179>
- [15] N. Beltrán Ramírez, Y. M. González Fino, y L. J. Hernández Gómez, «Estudio para el desarrollo de un biomaterial de cáscara de huevo», Bachelor Thesis, Universidad EAN, 2021. Accedido: 12 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.universidadean.edu.co/handle/10882/10786>
- [16] J. J. Mariño, «Reflexiones sobre el papel de la Ingeniería Civil en la evolución del medio ambiente en Colombia», *Revista de Ingeniería*, n.º 26, pp. 65-73, nov. 2007.
- [17] L. J. C. Romo, A. L. Melo, y S. G. R. Achicanoy, «Análisis del ciclo de vida en la obtención de hidróxido de calcio a partir de cáscara de huevo», *Revista Biumar*, vol. 4, n.º 1, Art. n.º 1, dic. 2020, doi: 10.31948/BIUMAR4-1-art4.
- [18] A. Vasquez, H. Acevedo, y D. Ramirez, «Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia», jun. 2012, Accedido: 15 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10784/28440>
- [19] D. D. Castro Gallardo y J. J. Alfaro Pérez, «Análisis comparativo de las propiedades físicas-mecánicas del concreto de resistencias $F'c = 210, 280, 350 \text{ kg/cm}^2$ sustituyendo material cementicio por cáscara de huevo», Trabajo de Grado, Universidad Privada Antenor Orrego, 2019. Accedido: 15 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/4900>
- [20] J. M. Bances Elera, «Modelo matemático para estimar la resistencia a la compresión de 210 kg/cm^2 del concreto con la adición de cáscara de huevo», Trabajo de Grado, Universidad Privada del Norte, 2020.
- [21] B. A. Vásquez Lazo, «Diseño del pavimento rígido adicionando ceniza de cáscara de huevo en la avenida mi Próceres en Chilca 2022», Trabajo de Grado, Universidad César Vallejo, 2022. Accedido: 15 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/102368>
- [22] D. A. Dávila Delgado, «Propiedades físicas mecánicas de ladrillo de concreto con material de eliminación y cáscara de huevo con ca», Trabajo de Grado, Universidad César Vallejo, 2021. Accedido: 15 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/82975>
- [23] L. M. Elias Alamo y J. Tito Sigüeñas, «Análisis de las propiedades físico-mecánicas de un concreto tradicional $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ al sustituir cemento por cenizas de cáscara de huevo y adicionar a la mezcla fibra de acero reciclado. Lima Norte 2022», Trabajo de Grado, Universidad Privada del Norte, 2022.

- [24] W. R. Bermudez Mauricio, «Efecto del mucílago de cactus (*Echinopsis Pachanoi*) y ceniza de cascara de huevo en la permeabilidad y resistencia del concreto $f'c$ 210 kg/cm²», Trabajo de Grado, Universidad César Vallejo, 2022. Accedido: 15 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/119034>
- [25] R. A. Martínez Calixto, «Implementación Cascaras de Huevo como Sustituto Parcial para el Material Cementante en Elaboración de Concreto Arquitectónico para Mobiliario.», Trabajo de Grado, Universidad Santo Tomás, 2022. Accedido: 15 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/46119>
- [26] A. Bedoya Salazar Esp. y M. P. Valencia González M. Sc., «Usos potenciales de la cáscara de huevo de gallina (*Gallus gallus domesticus*): una revisión sistemática», *Revista colombiana de ciencia animal recia*, vol. 12, n.º 2, pp. 106-116, dic. 2020, doi: 10.24188/recia.v12.n2.2020.776.
- [27] M. T. Castañeda y D. E. Stechina, «Alternativa ecoeficiente para el aprovechamiento de cáscara de huevo, residuo derivado de la industria de ovoproductos», presentado en XIV Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos (CYTAL) (Rosario, 23 al 25 de octubre de 2013), 2013. Accedido: 15 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/49186>
- [28] J. Stefanie, «Plan de negocio para la implementación del procesamiento y comercialización de cáscara de huevo molida», Tesis doctoral, Zamorano, Escuela Agrícola Panamericana, 2015.
- [29] D. Acosta, «Arquitectura y construcción sostenibles», *Dearq*, n.º 4, pp. 14-23, 2009.
- [30] M. Uceda Rodríguez, «Aplicación del análisis del ciclo de vida en el estudio ambiental de materiales de construcción», Tesis doctoral, UJA : Universidad de Jaén, 2023. Accedido: 15 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://ruja.ujaen.es/jspui/handle/10953/2417>
- [31] A. B. Castellanos, M. F. Serrano Guzmán, D. D. Pérez Ruiz, y A. B. Castellanos, «Estrategia de reflexión para enseñanza de proyectos de construcción en Ingeniería Civil», *ALTERIDAD.Revista de Educación*, vol. 14, n.º 1, pp. 122-137, jun. 2019, doi: 10.17163/alt.v14n1.2019.10.
- [32] D. F. J. Estupiñan y J. J. G. Caballero, «Importancia del concreto en el campo de la construcción», *Formación Estratégica*, vol. 2, n.º 1, Art. n.º 1, nov. 2020.
- [33] V. Flores, J. Rojas, R. Torres, R. Vallejos, P. Flores, y M. Flores, «Mezclas de cemento y agregados de plástico para la construcción de viviendas ecológicas», *Revista de Ingeniería Civil*, vol. 4, n.º 12, pp. 44-49, 2020.
- [34] S. Aguiar, M. E. Estrella, y H. U. Cabadiana, «Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento», *AXIOMA*, n.º 27, Art. n.º 27, dic. 2022, doi: 10.26621/ra.v1i27.803.
- [35] A. R. Posso, «Método de Reutilización de la Cascara de Huevo», Monografía, Universidad Católica de Pereira, 2020. Accedido: 15 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ucp.edu.co/handle/10785/7135>

- [36] M. R. Gómez Escasany, C. González Gaya, y M. A. Sebastian, «Cómo las Normas ISO y el modelo de gestión de AENOR contribuyen a la estrategia de economía circular y ODS», *27th International Congress on Project Management and Engineering*, 2023, doi: 10.61547/3434.
- [37] J. A. J. A. V. Solano y J. E. C. Barriga, «El valor agregado de un sistema de gestión ambiental más allá de la certificación», *BISTUA: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, vol. 16, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2019, doi: 10.24054/01204211.v1.n1.2018.3194.
- [38] J. A. Fontalvo Villamil y L. C. Peñaranda Hurtado, «Evaluación de las propiedades de cemento obtenido a partir de mezclas Clinker/yeso proporcionada por CEMEX con ceniza volátil calcárea producida en la planta Termotasajero Dos.», Trabajo de Grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2020. Accedido: 17 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repository.unad.edu.co/handle/10596/35617>
- [39] R. España, «Determinación de la expansión en autoclave del cemento portland». Universidad Centroamericana Jose Simeon Cañas, UCA, 2007.
- [40] J. N. Pineda Rincón y G. A. Quintero Moreno, «Evaluación de la adición de polvo de ladrillo en la mezcla de cemento, para la producción de prefabricados de concreto en la empresa Reciclados Industriales de Colombia», Trabajo de Grado, Fundación Universidad de América, 2018. Accedido: 17 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6961>
- [41] C. I. Rodríguez Díaz y V. I. Goenaga Delgado, «Evaluación de la resistencia a la compresión en mezclas de mortero aplicando reemplazo del agregado fino por hueso porcino triturado siguiendo lo establecido en la normativa vigente colombiana», Universidad de la Costa, CUC, 2022. Accedido: 17 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11323/9149>
- [42] J. M. Sánchez Chávez, «Influencia del uso del agua lluvia de la ciudad de Bogotá y Barranquilla en la resistencia a la compresión de morteros hidráulicos fabricados», Trabajo de Grado, Universidad de la Costa, 2021. Accedido: 17 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11323/8273>
- [43] D. L. Llanos Peña, «Diagnóstico de la influencia de las temperaturas ambiente en la resistencia final del concreto», Trabajo de Grado, Universidad La Gran Colombia, 2015. Accedido: 17 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.ugc.edu.co/handle/11396/3483>
- [44] Eddy, «Calor de Hidratación del Concreto.», Calor de Hidratación del Concreto. | Notas de Concreto. Accedido: 17 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://notasdeconcretos.blogspot.com/2011/04/calor-de-hidratacion-del-hormigon.html>
- [45] S. B. Murcia y N. Torres, «Assessment of the ASTM C 1260 mortar bar accelerated test methodology to detect potentially reactive aggregates and the ASTM C 1567alkali- silica reaction mitigation measures», *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, n.º 110, pp. 73-82, 2018.
- [46] A. López Miguel, J. T. Quiroz, J. Terán Gullén, y M. Arroyo Olvera, «Metodología para la determinación de la reacción álcali-sílice (RAS)», *Comunicaciones Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes*, 2023.

- [47] E. O. Fanijo, J. T. Kolawole, y A. Almakrab, «Alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures: Mechanisms, effects and evaluation test methods adopted in the United States», *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, p. e00563, dic. 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00563.
- [48] F. C. Cubillos Bernal, «Estudio de morteros adicionados con Dióxido de Titanio frente al ataque de sulfatos», Tesis de maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2023. Accedido: 17 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/33103>
- [49] A. Borsoi, S. Collepardi, C. Luigi, R. Troli, y M. Collepardi, «Sulfate Attack on Blended Portland Cements», *ACI Spec Publ*, vol. 192, ene. 2000.
- [50] Cicerón, «Tipos de cementos y características según NTC 121», Cementos Tequendama. Accedido: 17 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://cetesa.com.co/blog/tipos-de-cementos-y-caracteristicas-segun-ntc-121/>
- [51] S. Calvo Barbería, «Revalorización de la cáscara de huevo para su empleo como catalizador en el tratamiento de aguas residuales», Tesis de maestría, Universidad de Oviedo, 2019.
- [52] M. S. Fernández y J. L. Árias, «La cascara del huevo: un modelo de biomineralizacion», *Artículos CONICYT*, 2000.
- [53] Y. G. Blanco Vásquez y M. C. Pérez Chahua, «Elaboración de mármol sintético a partir de la cáscara de huevo», Trabajo de Grado, Universidad Nacional del Callao, 2021.
- [54] P. Hunton, «Research on eggshell structure and quality: an historical overview», *Braz. J. Poult. Sci.*, vol. 7, pp. 67-71, jun. 2005, doi: 10.1590/S1516-635X2005000200001.
- [55] Hy-Line, «La ciencia de la calidad del huevo: Boletín técnico», Engormix. Accedido: 17 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.engormix.com/avicultura/minerales-avicultura/ciencia-calidad-huevo_a48796/
- [56] E. S. Alvarado Maguiña, «Resistencia a la compresión de un concreto sustituyendo al cemento en 12% y 20% por la combinación de cáscara de huevo y arcilla», Universidad San Pedro, 2019. Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.usanpedro.edu.pe//handle/USANPEDRO/12417>
- [57] V. R. Jaimes Acuña, «Resistencia de adoquines de concreto $f'c = 320 \text{ Kg/Cm}^2$, sustituyendo el cemento en 15% y 30% por una combinación de cáscara de huevo y vidrio molido», Trabajo de Grado, Universidad San Pedro, 2018. Accedido: 31 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.usanpedro.edu.pe//handle/USANPEDRO/11381>
- [58] S. Matias Quispe, «Resistencia de un concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$ sustituyendo el 10% y 16% de cemento por una combinación de cáscara de huevo y ceniza de hoja de eucalipto», Universidad San Pedro, 2019. Accedido: 31 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.usanpedro.edu.pe//handle/USANPEDRO/8015>
- [59] G. N. Neira Uchofen, «Desempeño de las propiedades del concreto físico y mecánicas sustituyendo cenizas de cáscara de huevo», Universidad Señor de Sipán, 2023. Accedido: 31 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uss.edu.pe//handle/20.500.12802/11844>

- [60] «Calcita: Propiedades, Formación, Ocurrencia y Usos Áreas», Geology Science. [En línea]. Disponible en: <https://es.geologyscience.com/minerales/calcita/>
- [61] J. A. Correa Verdeza, J. J. Ochoa Valbuena, J. J. Vallejo Botero, y Ó. F. Arbeláez Pérez, «Evaluación de la resistencia y la ecoeficiencia de hormigones modificados con ceniza de cáscara de huevo», en *Memorias Segundo Congreso Internacional Objetivos de Desarrollo Sostenible*, Medellín: Sello Editorial Tecnológico de Antioquia Institución Universitaria, oct. 2022.