

REPOSITORIO ACADÉMICO UPC

Diseño de ladrillos ecológicos con ceniza de cáscara de huevo inyectados en 3D

Item Type	info:eu-repo/semantics/bachelorThesis
Authors	Celis Miñope, Diego Enrique; Sulen Kano, Camila Celeste
Publisher	Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)
Rights	info:eu-repo/semantics/openAccess
Download date	03/03/2026 21:18:27
Item License	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Link to Item	http://hdl.handle.net/10757/688509



UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Diseño de ladrillos ecológicos con ceniza de cáscara de huevo inyectados en 3D

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Celis Miñope, Diego Enrique	0009-0003-2162-7726
Sulen Kano, Camila Celeste	0009-0003-8042-8591

ASESOR(ES)

Rodríguez Dionisio, Sandra	0000-0002-5308-6923
----------------------------	---------------------

Lima, 07 de noviembre de 2025

Dedicatoria

A nuestros queridos padres, cuyas palabras de aliento y ejemplo de trabajo incansable han sido la guía y el sustento de este largo camino. Su amor incondicional, su apoyo constante y su fe inquebrantable en nosotros han sido la fuerza que nos ha impulsado a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Les agradecemos por ser nuestro refugio y por enseñarnos que los sueños se alcanzan con dedicación y esfuerzo.

A nuestros abuelos, quienes, con su sabiduría, paciencia y cariño, han sido faros de luz y fuentes inagotables de inspiración. Ustedes, que han visto pasar el tiempo con una sonrisa, nos han mostrado que la verdadera riqueza se encuentra en el amor y la familia. Sus historias, sus abrazos y su presencia han sido un ancla en nuestras vidas, y es en su honor que celebramos este logro.

A ustedes, padres, abuelos, hermanos y a nuestros tíos que estuvieron apoyándonos en este proceso, les dedicamos con mucho amor y gratitud esta tesis, como un humilde tributo a su legado y a los valores que nos han inculcado. Este logro es tan suyo como nuestro, porque sin su apoyo y sacrificio, este sueño no habría sido posible.

Con todo nuestro cariño y respeto

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al laboratorio Ofilab Perú S.A.C., así como a las empresas La Calera, Ovosur y PROKRETE Aditivos, por el apoyo brindado a lo largo de la presente investigación. Su colaboración ha sido clave para que este proyecto pudiera llevarse a cabo con éxito.

De igual manera, extendemos nuestro agradecimiento a los restaurantes La Bistecca, D'Mela, Minegrita, Estación 23, Pascuale, AKIPA, Beso Francés y Fridays, quienes nos donaron la cáscara de huevo utilizada en la investigación. Su generosidad y disposición para colaborar con la investigación reflejan un compromiso valioso con la innovación y el desarrollo científico.

Resumen

En los últimos años, las tecnologías de automatización han avanzado de manera significativa, destacando el sistema de inyección 3D de mortero. No obstante, en el Perú esta innovación aún no se implementa debido a la limitada infraestructura tecnológica.

Esta situación es relevante en Lima Metropolitana, donde el ladrillo de arcilla es uno de los materiales más empleados, pese a que su producción genera altos niveles de contaminación ambiental. Frente a ello, el presente estudio propone el diseño de un ladrillo ecológico inyectado en 3D, incorporando ceniza de cáscara de huevo con el fin de disminuir el impacto ambiental generado por la fabricación de ladrillos tradicionales de arcilla.

Se elabora una mezcla de mortero con 10% de ceniza en reemplazo del cemento, evaluándose propiedades reológicas como fluidez, esfuerzo de fluencia estática, tixotropía y tiempo de fraguado. Posteriormente, la mezcla es utilizada en la fabricación de ladrillos mediante una inyectora 3D.

Los ladrillos producidos fueron sometidos a ensayos mecánicos de compresión individual y en prismas de albañilería. Los resultados muestran que la incorporación de ceniza mejoró la resistencia a la compresión, cumpliendo con los parámetros establecidos en la Norma Técnica E.070 para unidades de albañilería.

Además, se realizó el análisis de ciclo de vida y el cálculo de la huella de carbono, comparando el eco-ladrillo con el ladrillo de arcilla tipo pandereta. Se obtuvo una reducción del 26.31% en el impacto ambiental, demostrando el potencial de esta propuesta como alternativa sostenible para la construcción en el contexto peruano.

Palabras clave: Inyección 3D; Ladrillo ecológico; Ceniza de cáscara de huevo; Mortero 3D; Huella de carbono

Design of Eco-Friendly Bricks Made with Eggshell Ash and 3D Injection

Abstract

In recent years, advancements in automation technologies, such as the 3D mortar injection system, have emerged in the construction industry. However, in Peru, the adoption of this technology remains limited due to the absence of advanced equipment, technology, and well-established mix designs tailored for this purpose. Furthermore, in Metropolitan Lima, conventional clay bricks are among the construction materials contributing significantly to environmental pollution during their manufacturing process. For this reason, the present study proposes the design of an eco-friendly brick incorporating eggshell ash, produced through 3D printing, in order to reduce the environmental impact caused by traditional clay brick production.

A mortar mix was developed, incorporating 10% eggshell ash as a partial replacement for cement. The rheological properties, flowability, static yield stress, thixotropy, and setting time were evaluated. The mortar mix was subsequently used to fabricate bricks using a 3D printer. Mechanical tests were conducted to assess their compressive strength, both individually and in masonry prisms or wall assemblies. The results indicate that the incorporation of eggshell ash improved the compressive strength, demonstrating that the proposed eco-brick meets the requirements established in Standard E.070 for masonry bricks. In addition, a life cycle assessment (LCA) and carbon footprint calculation were conducted to compare the environmental impact of the eco-brick with that of the traditional clay “pandereta” brick, resulting in a 26.31% reduction.

Keywords: 3D injection; Eco-friendly brick; eggshell ash; mortar 3D; carbon footprint

u202015009_Diego Enrique Celis Miñope_Diseño de ladrillos ecológicos con ceniza de cáscara de huevo inyectados en 3D

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%	12%	3%	5%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	3%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	2%
4	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	hipernatural.com Fuente de Internet	1%
6	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	<1%
9	Submitted to Universidad Privada del Norte Trabajo del estudiante	<1%
10	Submitted to Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas Trabajo del estudiante	<1%
11	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	<1%

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 EL PROBLEMA	1
1.2 ESTADO DEL ARTE.....	6
1.3 HIPÓTESIS	11
1.4 OBJETIVO GENERAL.....	11
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.6 LIMITACIONES DEL PROYECTO	12
2. MARCO TEÓRICO	13
2.1. CENIZA DE CÁSCARA DE HUEVO (ESP)	13
2.2. MORTERO.....	13
2.3. COMPONENTES DE MORTERO Y CONCRETO	14
2.3.1. <i>Cemento</i>	14
2.3.2. <i>Agua</i>	14
2.3.3. <i>Arena</i>	14
2.3.4. <i>Aditivos</i>	14
2.4. UNIDADES DE ALBAÑILERÍA TRADICIONALES	15
2.4.1. <i>Ladrillo de arcilla</i>	15
2.4.2. <i>Ladrillo de concreto</i>	15
2.4.3. <i>Ladrillos ecológicos</i>	15
2.5. PROPIEDADES DE LADRILLO	16
2.5.1. <i>Dureza</i>	16
2.5.2. <i>Densidad</i>	16
2.5.3. <i>Absorción de agua</i>	16
2.5.4. <i>Resistencia a la compresión</i>	16
2.6. INYECCIÓN 3D EN LA CONSTRUCCIÓN	16
2.7. REOLOGÍA	17
2.8. INYECTORA DE MORTERO.....	17
2.9. MORTERO INYECTABLE EN 3D.....	17
2.10. PROPIEDADES DE LA MEZCLA INYECTABLE	18
2.10.1. <i>Tixotropía</i>	18
2.10.2. <i>Esfuerzo de fluencia estática</i>	18

2.10.3.	<i>Trabajabilidad</i>	18
2.10.4.	<i>Fluidez</i>	18
2.10.5.	<i>Edificabilidad</i>	19
2.10.6.	<i>Extrudabilidad</i>	19
2.10.7.	<i>Tiempo abierto</i>	19
2.10.8.	<i>Calidad de impresión</i>	19
2.11.	ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	20
2.12.	REGLAMENTOS Y NORMAS.....	21
2.12.1.	<i>Reglamento nacional de edificaciones</i>	21
2.12.2.	<i>Norma E.070 Albañilería</i>	21
2.12.3.	<i>Normas técnicas peruanas</i>	22
2.12.4.	<i>Norma A.C.I.</i>	22
2.12.5.	<i>Normas ISO</i>	22
3.	METODOLOGÍA	23
3.1.	NIVEL DE INVESTIGACIÓN	23
3.2.	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	23
3.3.	PROCEDIMIENTO	23
3.3.1.	<i>Fase preliminar</i>	24
3.3.2.	<i>Fase definitiva</i>	25
4.	RESULTADOS	31
4.1.	FASE PRELIMINAR	31
4.1.1.	Diseño de un modelo de ladrillo ecológico garantizando su inyectabilidad para que cumpla con la norma técnica peruana E.070	31
4.1.2.	Evaluación de las propiedades de los agregados a utilizarse en la mezcla de mortero inyectable en 3D	32
4.1.3.	<i>Diseño de una mezcla de mortero para un ladrillo ecológico inyectable en 3D utilizando el 10% de ceniza de cáscara de huevo como reemplazo del cemento</i> 35	
4.2.	FASE DEFINITIVA.....	36
4.2.1.	<i>Evaluación de las propiedades de la mezcla de mortero para ladrillos inyectados en 3D en estado fresco</i>	36

4.2.2.	<i>Medición de los parámetros físicos y mecánicos de los eco ladrillos, de tal manera que los resultados se encuentren dentro de la norma técnica peruana E.070 y compararlos con ladrillos de arcilla pandereta tradicionales</i>	38
4.2.3.	<i>Evaluación del impacto ambiental generado por el ladrillo propuesto mediante el cálculo de su huella de carbono</i>	41
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
5.1.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PROPIEDADES DE LA MEZCLA DE MORTERO INYECTABLE EN 3D	43
5.1.1.	<i>Ensayo de fluencia estática</i>	43
5.1.2.	<i>Ensayo de tixotropía</i>	44
5.1.3.	<i>Ensayo de fluidez</i>	44
5.1.4.	<i>Ensayo de tiempo de fraguado</i>	45
5.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL LADRILLO ECOLÓGICO	45
5.2.1.	<i>Variación de dimensiones</i>	45
5.2.2.	<i>Alabeo</i>	46
5.2.3.	<i>Absorción</i>	46
5.2.4.	<i>Resistencia a la compresión</i>	47
5.2.5.	<i>Compresión de pilas de ladrillo</i>	48
5.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS QUE EVALÚEN EL DESEMPEÑO AMBIENTAL DEL LADRILLO ECOLÓGICO	48
6.	CONCLUSIONES	51
7.	RECOMENDACIONES	54
	REFERENCIAS	57
	ANEXO(S)	66

Lista de Tablas

Tabla 1	<i>Principales contaminantes asociados a la producción del ladrillo de arcilla.....</i>	2
Tabla 2	<i>Resultados del diseño de modelo de ladrillo</i>	32
Tabla 3	<i>Resultados del ensayo granulometría en agregado fino para mortero.....</i>	32
Tabla 4	<i>Resultados del ensayo de material que pasa la malla n °200</i>	33
Tabla 5	<i>Resultados del ensayo de contenido de humedad.....</i>	33
Tabla 6	<i>Resultados del ensayo de peso específico de agregado fino para mortero.....</i>	34
Tabla 7	<i>Dosificación de mortero inyectable en 3D con ceniza de cáscara de huevo</i>	35
Tabla 8	<i>Diseño de mortero inyectable en 3D para 1 ladrillo.....</i>	35
Tabla 9	<i>Resultados del ensayo de fluencia estática.....</i>	36
Tabla 10	<i>Resultados del ensayo de tixotropía</i>	37
Tabla 11	<i>Resultados del ensayo de fluidez</i>	37
Tabla 12	<i>Resultados del ensayo de tiempo de fraguado.....</i>	37
Tabla 13	<i>Resultados del ensayo variación de dimensiones.....</i>	38
Tabla 14	<i>Resultados del ensayo de alabeo</i>	39
Tabla 15	<i>Resultados del ensayo de absorción.....</i>	39
Tabla 16	<i>Resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días</i>	40
Tabla 17	<i>Resultados del ensayo de pila de ladrillos a los 28 días</i>	41
Tabla 18	<i>Resultados del análisis de ciclo de vida para un 1kg de ladrillo</i>	41
Tabla 19	<i>Resultados del cálculo de huella de carbono del ladrillo inyectado en 3D.....</i>	42
Tabla 20	<i>Resultados del cálculo de huella de carbono del ladrillo pandereta</i>	42
Tabla 21	<i>Análisis de resultados del ensayo de fluencia estática.....</i>	43
Tabla 22	<i>Análisis de resultados del ensayo de tixotropía</i>	44
Tabla 23	<i>Análisis de resultados del ensayo de fluidez</i>	45
Tabla 24	<i>Análisis de resultados del ensayo de tiempo de fraguado.....</i>	45
Tabla 25	<i>Verificación de variación de dimensiones con norma E.070</i>	46
Tabla 26	<i>Verificación de alabeo con norma E.070</i>	46
Tabla 27	<i>Verificación de resistencia a compresión de ladrillo por norma E.070</i>	47
Tabla 28	<i>Comparación de cálculo de huella de carbono en ladrillos</i>	49
Tabla 29	<i>Resultados del análisis económico del ladrillo inyectado en 3D.....</i>	69
Tabla 30	<i>Análisis económico de los ladrillos: comparación de análisis económico del ladrillo ecológico con cáscara de huevo</i>	69

Tabla 31 <i>Combinaciones descartadas de mezclas de mortero</i>	69
Tabla 32 <i>Resultados de fluidez de mezclas descartadas</i>	70

Lista de Figuras

Figura 1 Toneladas de CO ₂ emitidas por los procesos de la fabricación de ladrillos tradicionales de arcilla.....	3
Figura 2 Resultados de evaluaciones de contenido de partículas PM 2.5 en Huachipa, Lima	4
Figura 3 Resultados de evaluaciones de contenido de partículas PM 2.5 en Huachipa, Lima	5
Figura 4 Historial de carga y curva de histéresis según el Modelo reológico de Bingham	26
Figura 5 Gráfica de prueba de corte	27
Figura 6 Diseño de modelo de ladrillo	31
Figura 7 Gráfico de comparación de %absorción de ladrillos.....	47
Figura 8 Gráfico de comparación de resistencia a compresión individual de ladrillos	48
Figura 9 Gráfico de comparación de resistencia a compresión de pila de ladrillos	48
Figura 10 Gráfico de red de impacto ambiental para 1kg de ladrillo inyectado en 3D con ceniza de cáscara de huevo	50
Figura 11 Pequeñas manchas en los pulmones de uno de los colaboradores expuestos a cenizas de carbón de piedra en las ladrilleras artesanales en Yarabamba.....	66
Figura 12 Tipos de ladrillos	67
Figura 13 Tabla de clase de unidad de albañilería para fines estructurales.....	68
Figura 14 Evidencia de donación de cáscaras por parte de Ovosur	68

1. Introducción

La industria de la construcción enfrenta una urgente necesidad de adoptar soluciones sostenibles ante el impacto ambiental generado por la producción tradicional de ladrillos de arcilla, caracterizada por altas emisiones de gases contaminantes y deficiente gestión de residuos. Esta tesis propone el diseño de un ladrillo ecológico inyectado en 3D, utilizando ceniza de cáscara de huevo como reemplazo parcial del cemento, como alternativa innovadora para mitigar la contaminación ambiental en Lima. A través del análisis del estado del arte, se evidencia que el uso de residuos agroindustriales y tecnologías avanzadas como la inyección 3D ya ha demostrado beneficios significativos en cuanto a resistencia mecánica, eficiencia térmica y reducción de huella de carbono. La investigación se guía por una hipótesis que plantea que esta solución permite reducir significativamente el impacto ambiental asociado a los métodos constructivos tradicionales. Para ello, se plantean objetivos orientados al diseño, caracterización y validación del ladrillo ecológico propuesto, así como la evaluación de su impacto ambiental y cumplimiento de la normativa técnica peruana. No obstante, se reconocen limitaciones técnicas y económicas vinculadas al acceso a tecnología de inyección 3D, disponibilidad de materiales compatibles y aceptación del mercado. Esta propuesta busca contribuir al desarrollo de prácticas constructivas más responsables y sostenibles en el contexto nacional. A continuación, se abordaron diversos aspectos clave de esta investigación, proporcionando un análisis detallado del problema, revisando el estado del arte, formulando una hipótesis, estableciendo el objetivo general y los objetivos específicos, y evaluando las limitaciones del proyecto.

1.1 El problema

A nivel global, los ladrillos de arcilla desempeñan un papel fundamental en la industria de la construcción, ya que se emplean ampliamente en la edificación de estructuras de albañilería como muros portantes, albañilería confinada, parapetos y tabiques (Picón, 2023).

Sin embargo, la producción tradicional de estos ladrillos, aún empleada en muchos países, carece de innovación tecnológica y contribuye significativamente a la emisión de gases nocivos como CO₂, SO₂ y NO. Estos contaminantes afectan tanto la salud de la población como el medio ambiente, tal como se observa en la Figura 11 (Ortega & Vásquez, 2024).

Esto también se evidencia en la Tabla 1, donde se presentan los efectos de la emisión de estos gases tóxicos y de la materia particulada (PM 2.5).

Tabla 1

Principales contaminantes asociados a la producción del ladrillo de arcilla

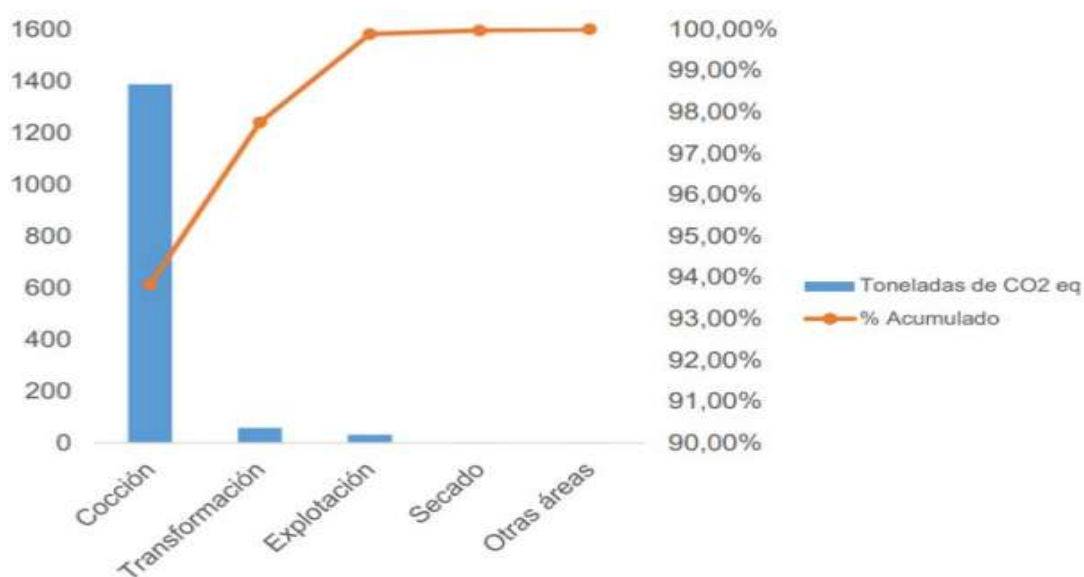
Contaminante	Efectos
Dióxido de carbono (CO ₂)	No es tóxico, pero produce efecto invernadero.
Monóxido de Carbono (CO)	Es tóxico y puede ocasionar cambios estructurales en el corazón y cerebro, cambios en la agudeza visual e impedimento de las pruebas psicomotoras.
Dióxido de azufre (SO ₂)	Importante factor en la lluvia ácida, acidificando aguas superficiales y produciendo corrosión en estructuras metálicas.
Óxidos de nitrógeno (NO)	Causa enfermedades respiratorias, irritación y disminución del crecimiento de las plantas.
Material particulado PM2.5	Causa tos, resuello, dificultad para respirar, agravamiento de asma, enfermedades coronarias, etc.

Nota. De “Responsabilidad social empresarial: Aproximación desde la ingeniería industrial al caso de las ladrilleras artesanales en zonas veredales del Valle del Cauca, Colombia”, por A. Saavedra, M. Quintero y J. Pulido, 2022 (http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-30332023000100021&script=sci_arttext).

El CO₂ es el gas nocivo predominante durante el proceso tradicional de fabricación de ladrillos. Se calcula que, en un periodo de cuatro meses, solo el proceso de cocción de una ladrillera genera aproximadamente 1,386.901 toneladas de CO₂ (Alarcón et al., 2020). En consecuencia, el factor de emisión de un ladrillo de arcilla tradicional y la huella de carbono de un ladrillo King Kong 18 huecos tradicional son de 1.123 kg CO₂/kg y 3.023 kg CO₂ respectivamente, cifras consideradas elevadas (Reynaga & Rodríguez, 2022). En la Figura 1, se presentan los datos sobre las emisiones de CO₂ derivadas de los procesos de fabricación de ladrillos de arcilla.

Figura 1

Toneladas de CO₂ emitidas por los procesos de la fabricación de ladrillos tradicionales de arcilla



Nota. De “Desarrollo de un plan de negocios para la fabricación, promoción y venta de Ladrillos Ecológicos”, por R. Alarcón, R. Paitán y S. Valdivia, 2020 (<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/654677>).

La fabricación de ladrillos representa un desafío ambiental a nivel internacional debido a sus impactos en la calidad del aire y el suelo. En Bangladesh, por ejemplo, el crecimiento de este sector ha generado emisiones de hierro que contribuyen a la degradación y contaminación de los suelos, afectando el equilibrio ecológico de las zonas cercanas a los hornos ladrilleros (Haque et al., 2022). De manera similar, en China, la industria ladrillera es responsable de entre el 30 % y el 40 % del total de los residuos sólidos generados en el país, lo que resalta la magnitud del problema en términos de gestión de desechos y contaminación ambiental (Li et al., 2022).

Esta problemática también se evidencia en América Latina. Un estudio realizado en 2022 en el sector Tres Marías, en Ecuador, evidenció que las emisiones de monóxido de carbono (CO) durante la cocción de ladrillos alcanzaron 3,621.9 mg/Nm³, superando ampliamente el límite máximo permisible de 1,800 mg/Nm³ establecido por la normativa ambiental ecuatoriana (Chinga & Zambrano, 2022).

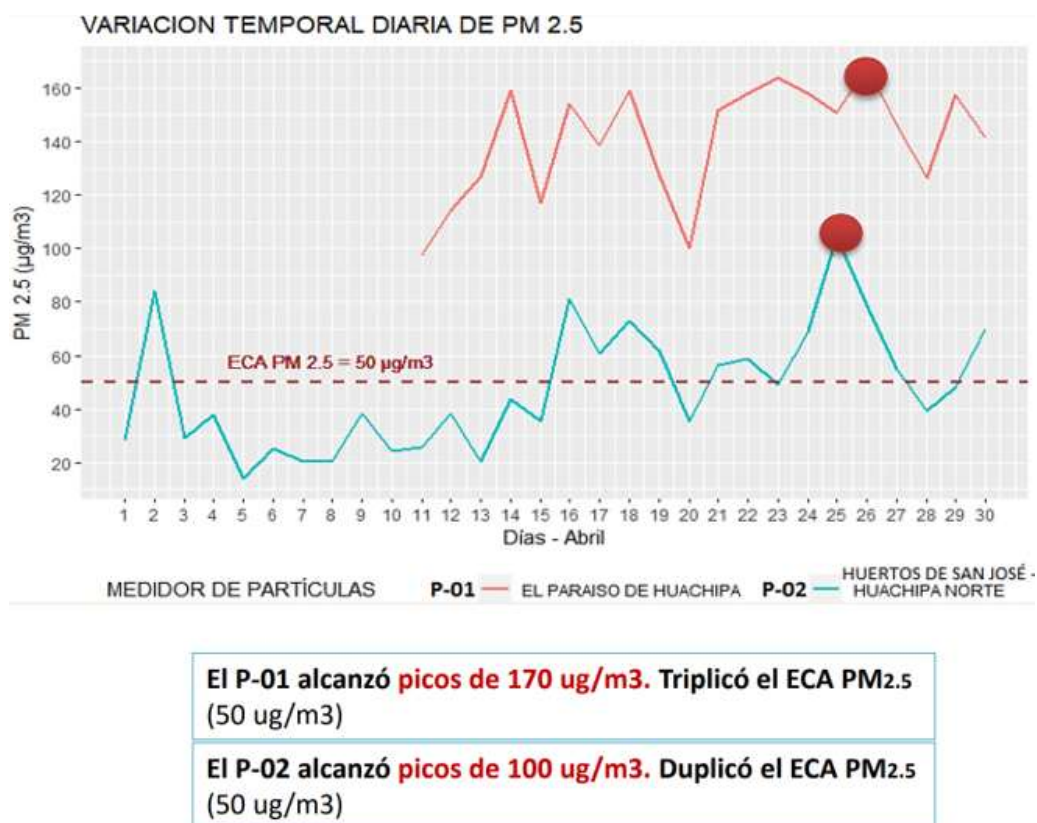
Estos ejemplos reflejan que, aunque la fabricación de ladrillos es una actividad esencial para la construcción, constituye un reto ambiental considerable en diversas regiones del mundo.

Esto hace necesaria la implementación de tecnologías más sostenibles y de regulaciones más estrictas que permitan mitigar sus efectos negativos.

En el ámbito nacional, el sector construcción es clave para la economía, aportando un 6.7% al PBI del Perú y registrando un crecimiento del 0.74% entre enero y mayo de 2022 (Economía, 2022). Sin embargo, la fabricación de ladrillos tradicionales genera un impacto ambiental significativo. Además de las emisiones de CO₂, se han detectado niveles alarmantes de PM 2.5, un material particulado altamente perjudicial para la salud, como se aprecia en la Figura 2 y la Figura 3 (Alarcón et al., 2020). En Huachipa, el OEFA reporta que las ladrilleras superan los límites ambientales permitidos, afectando la calidad del aire y la salud de la población (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2022). De acuerdo con las mediciones disponibles, los niveles de PM 2.5 en la zona duplican el límite de 50 µg/m³ establecido por el Ministerio del Ambiente del Perú (Municipalidad Metropolitana de Lima [MML], 2021).

Figura 2

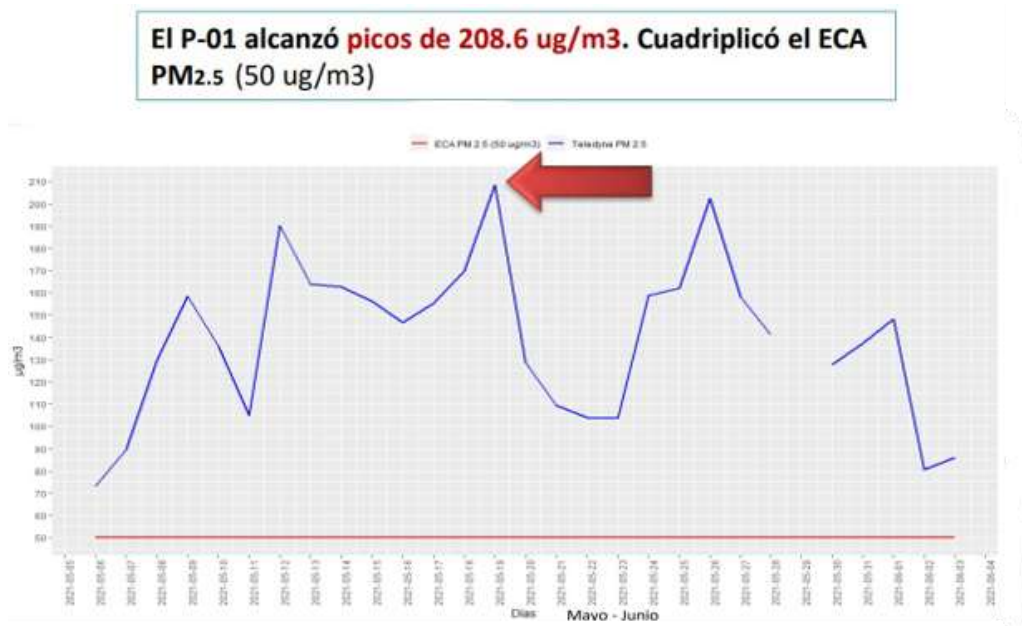
Resultados de evaluaciones de contenido de partículas PM 2.5 en Huachipa, Lima



Nota. De “Caso: Ladrilleras de Huachipa - Distrito Lurigancho Chosica” por MML, 2021 (<https://smia.munlima.gob.pe/uploads/documento/e1727ff331428ec7.pdf>).

Figura 3

Resultados de evaluaciones de contenido de partículas PM 2.5 en Huachipa, Lima



Nota. De “Caso: Ladrilleras de Huachipa - Distrito Lurigancho Chosica”, por MML, 2021 (<https://smia.munlima.gob.pe/uploads/documento/e1727ff331428ec7.pdf>).

Como se demostró, el impacto ambiental de las ladrilleras tradicionales refleja una tendencia global. La necesidad de mitigar los efectos negativos de esta industria es cada vez más urgente.

El proceso de cocción de ladrillos de arcilla puede mejorarse con la implementación de cambios tecnológicos en etapas clave, así como mediante su sustitución por métodos más sostenibles e innovadores, acompañados por la introducción de nuevos tipos de ladrillos. Este enfoque posibilita una reducción del consumo energético y una disminución de los efectos nocivos.

Según lo expuesto, la fabricación tradicional de ladrillos de arcilla se erige como una preocupación ambiental relevante por su implicación en la contaminación del aire y suelo. Urge la búsqueda de alternativas innovadoras más ecoamigables y sostenibles para atenuar el impacto adverso de esta industria sobre el entorno natural y fomentar el desarrollo de prácticas constructivas sustentables.

En continuidad con el apartado anterior, el problema discernido es “La limitada adopción de tecnologías innovadoras en la producción de ladrillos de tabiquería genera una significativa

contaminación ambiental debido a las emisiones de gases y la gestión inadecuada de residuos en el sector construcción”. A continuación, se exponen los datos que sustentan cómo dichas ladrilleras inciden en la contaminación ambiental.

1.2 Estado del arte

La construcción de edificaciones es uno de los principales agentes contaminantes a nivel mundial (Cheng et al., 2022). El sector construcción produce un gran porcentaje de emisiones de dióxido de carbono, relacionadas mayormente con los desechos sólidos generados por las demoliciones y con la producción de los elementos constructivos como los ladrillos (Munir et al., 2021). A nivel mundial, la producción anual de desechos sólidos derivados de las edificaciones ha alcanzado casi 17 mil millones de toneladas, y se estima que para el año 2050 alcanzará los 27 mil millones de toneladas (Tang et al., 2022).

Con respecto a la producción de elementos constructivos como los ladrillos, tanto a nivel mundial como nacional, estos se caracterizan por ser indispensables para la construcción de edificaciones. Desafortunadamente, la producción de este material mediante métodos tradicionales afecta a la calidad del aire, debido a que en el proceso cocción se emiten gases que son nocivos para el medio ambiente (Ibrahim et al., 2022). En consecuencia, la calidad de vida de las personas y el ecosistema se ven perjudicados al estar expuestos a un entorno contaminado por dichos gases tóxicos.

Con la tecnología actual, se podría realizar alguna acción al respecto. Sin embargo, la ausencia de tecnología sostenible es predominante en los procesos de la construcción, lo que solo perpetúa la problemática ambiental. Si se implementaran nuevas tecnologías, se abriría paso a nuevos procesos sustentables para fabricación de elementos constructivos que contribuyen a reducir el impacto ambiental (Ngayakamo et al., 2021). En otras palabras, la aparición de tecnología posibilita el desarrollo de las sociedades y su ausencia perjudica sectores como el medioambiental. Por ello, el desarrollo de nuevas tecnologías para el sector construcción es fundamental para transformar los procesos de fabricación en más ecológicos y sustentables. En este sentido, también resulta necesario sustituir los materiales o componentes utilizados en los ladrillos tradicionales por otros más sostenibles, siempre considerando que estos ofrezcan iguales o mejores propiedades físicas y mecánicas (Reynaga & Rodríguez, 2022).

Afortunadamente, alrededor del mundo ya se están realizando construcciones sustentables con materiales de construcción que posean componentes ecológicos. En China existen ladrillos con residuos de pizarra, cenizas volantes y cemento, que no necesitan hornos para su cocción, ya que, al no utilizar arcilla, no requiere en este proceso y se curan al frío (Wang et al., 2021). Como resultado, se mejoran las propiedades mecánicas del elemento constructivo obteniendo una resistencia de 26 MPa que es equivalente a 265 kg/cm² (Wang, et al., 2021). En comparación con un ladrillo estructural tipo V de arcilla, cuya resistencia es de 180 kg/cm², el eco ladrillo lo supera significativamente. En Hungría, se han desarrollado ladrillos ecológicos utilizando roca pobre en zeolita y cáscara de huevo como alternativa a la arcilla. Según un estudio, la inclusión de un 20% de cáscara de huevo en la mezcla y el sinterizado a 950 °C dieron como resultado ladrillos con una densidad de 1.4 g/cm³, una conductividad térmica de 0.27 W/m·K y una resistencia a la compresión de 10.5 MPa. Todos los ladrillos fabricados en este estudio superaron el mínimo requerido para ser ladrillos cerámicos estructurales, demostrando su viabilidad como alternativa sostenible (Ibrahim et al., 2021). La incorporación de subproductos industriales en la fabricación de ladrillos ecológicos ha demostrado mejorar sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas. Un ejemplo de ello es el uso de la escoria de alto horno (GGBS) y las cenizas volantes (FA), cuya adición en proporciones del 30 % y 10 %, respectivamente, permite obtener ladrillos con propiedades mecánicas comparables a las de los tradicionales. Además, el aumento en la temperatura de cocción reduce la porosidad y mejora la resistencia y densidad de los ladrillos, aunque un contenido elevado de FA puede incrementar la porosidad y la absorción de agua, disminuyendo la densidad y la conductividad térmica (Surul et al., 2020).

Asimismo, la cáscara de arroz, una puzolana natural rica en sílice se presenta como una alternativa sostenible capaz de sustituir parcialmente al cemento en elementos constructivos tradicionales. Su incorporación en un 5-10 % en la fabricación de ladrillos contribuye a la reducción de la densidad y la mejora de la eficiencia térmica, lo que favorece el desarrollo de materiales más ligeros y sostenibles. De hecho, estudios han demostrado que los ladrillos con un 10 % de cáscara de arroz pueden reducir su densidad hasta en un 17 %, mejorando su aislamiento térmico sin comprometer su resistencia estructural (Munir et al., 2021).

Otro residuo orgánico es la cáscara de huevo, la cual tiene la cualidad de poder sustituir o reemplazar parcialmente al cemento debido a su alto contenido de calcio (Ngayakamo & Onwualu, 2022). Sulen et al. (2024) señalan que la cáscara de huevo en su forma de ceniza

(CE) presenta un contenido de óxido de calcio (CaO) del 36.65%. Esto la convierte en un material potencialmente adecuado para mejorar las propiedades del concreto cuando se utiliza como sustituto parcial del cemento. Además, de acuerdo con el estudio de Wahab et al. (2023), la incorporación de un 5% en peso de cáscara de huevo en la fabricación de ladrillos de arcilla permite obtener el rendimiento óptimo. Esta composición presentó la menor absorción de agua (25.06%) y la mayor resistencia mecánica (0.20 kN), comparado con otras concentraciones evaluadas. Además, el proceso de sinterización a 1000 °C mejoró la compactación del material, reduciendo la presencia de poros y aumentando su durabilidad (Wahab et al., 2023). Sathiparan (2021) menciona que la incorporación de polvo de cáscara de huevo (ESP) en una proporción entre el 10 % y 15 % del volumen total de una mezcla de concreto puede mejorar las propiedades de los ladrillos fabricados a partir de dicha composición. Estos pueden alcanzar una resistencia a la compresión normalizada de hasta 1.12 veces superior en ladrillos cocidos y 1.60 veces en adobes estabilizados con ESP. Asimismo, el uso de ESP contribuye a una reducción del 10% en la densidad de los ladrillos, lo que mejora su eficiencia térmica y facilita su manejo en obra. Además, la incorporación de ESP en un 20 % puede reducir hasta un 89 % la absorción de agua, lo que incrementa la durabilidad del material y su resistencia frente a condiciones ambientales adversas (Sathiparan, 2021). En adición, Ngayakamo, et al. (2021) evalúan la viabilidad técnica y la calidad de los ladrillos de arcilla utilizando residuos de granito y cáscaras de huevo como materiales de relleno, demostrando la posibilidad de producir ladrillos más sostenibles. Como resultado, se observa un ahorro de energía, ya que se logra una absorción de agua del 12.2% debido a la densificación y vitrificación mejoradas a 900 °C.

En la actualidad, diversas técnicas sostenibles han surgido para procesar los componentes que conforman las mezclas de los ladrillos, entre ellas la inyección en 3D. Esta tecnología ya ha sido implementada en varios países. En Australia, Pasupathy et al. (2023), diseñaron eco ladrillos mediante una inyectora 3D utilizando residuos de ladrillo de las demoliciones como materia prima. En Egipto, El-Mahdy et al. (2021) utilizaron impresión 3D para fabricar SaltBlock, un bloque de construcción sostenible a base de sal y arena. Este material alcanzó una resistencia a compresión de 9.5 MPa y una transmitancia térmica de 0.94 W/m²·K en muros de 20 cm, superando el aislamiento térmico de los ladrillos cocidos tradicionales, que presentan 2.45 W/m²·K en muros de 12 cm. Estos resultados indican que el SaltBlock puede reducir la demanda energética en regiones cálidas como el desierto de Siwa.

Esta tecnología también ha demostrado una notable reducción en el consumo de materiales en el diseño de los ladrillos, logrando una disminución del 50% en el uso de material y una reducción del 40% en el tiempo de impresión, lo que optimiza costos de fabricación sin comprometer la resistencia estructural (Abdallah & Estévez, 2021). Además, según el estudio de Sangiorgio et al. (2022) realizado en Italia, el diseño de ladrillos de arcilla inyectados en 3D basado en modelos geométricos con superficies mínimas mejoró significativamente sus propiedades térmicas y mecánicas. Se analizaron 18 modelos distintos, donde el mejor diseño alcanzó una resistencia a compresión de 12.3 MPa, en comparación con los ladrillos tradicionales de referencia que registraron 8.5 MPa. Además, la transmitancia térmica se redujo en un 30%, lo que indica un mejor aislamiento térmico y una mayor eficiencia energética en edificaciones. En Corea del Sur se desarrolló un prototipo de impresora 3D para estructuras de concreto. En la investigación se menciona que el uso de arena con partículas más finas menores 0.7 mm en la mezcla de impresión 3D no causaron problemas de obstrucción en la boquilla. Esto sugiere que el tamaño de las partículas de arena y la cantidad de cemento en la mezcla influyen directamente en la fluidez y extrusión del material (Jo et al., 2020). En China, en el estudio de Zhang et al. (2022), controlan y ajustan el esfuerzo de fluencia en un rango entre 500 y 2500 Pa para asegurar la imprimibilidad y estabilidad. También se observa una relación lineal entre el esfuerzo de fluencia del mortero y el de la pasta, evidenciándose que un mayor contenido de agregado incrementa el esfuerzo de fluencia.

En cuanto al ámbito nacional, también existen investigaciones como la de Lavarello y Tello (2024), los cuales proponen morteros especiales para la construcción de viviendas mediante el sistema de impresión 3D. En su estudio, desarrollaron dieciséis mezclas de mortero con cemento Portland Tipo I, incorporando micro sílice y filler calizo en proporciones del 5% al 15% en reemplazo de cemento. Evaluaron propiedades como fluidez, esfuerzo de fluencia estática, tiempo de fraguado y resistencia a la compresión. Sus resultados indican parámetros a cumplirse para obtener una mezcla de mortero apta para la impresión 3D como un rango entre 80% - 110% en el ensayo de fluidez y de 45 a 375 min para el ensayo de tiempo de fraguado. Asimismo, mencionan que el costo en el sistema de impresión 3D para la construcción de un muro de concreto es de S/. 239.17/m², el cual representa un 66.79% menos en comparación con el sistema tradicional. Su investigación refleja un avance significativo en la implementación de esta tecnología en el sector de construcción peruano. Cuando se refiere a inyección en 3D, hay muchas propiedades que se tiene que cumplir, una

de ellas es la tixotropía que posee características con parámetros que se explicaran a continuación.

El comportamiento tixotrópico de los morteros destinados a procesos de inyección 3D es un factor crítico para garantizar su extrudabilidad, estabilidad dimensional y capacidad de auto sustentación. Uno de los parámetros fundamentales es el esfuerzo de cedencia dinámico, que representa la tensión mínima necesaria para que el mortero comience a fluir. Este debe ser lo suficientemente alto para permitir que el material mantenga su forma una vez depositado, pero también lo bastante bajo como para facilitar su extrusión. En este contexto, Weng et al. (2018) reportaron valores de esfuerzo de cedencia dinámico entre 208.4 y 492.7 Pa, dependiendo de la composición de la mezcla y los aditivos empleados. Por otro lado, el área de histéresis, que cuantifica la pérdida estructural del material durante un ciclo de cizallamiento, es un indicador clave de la capacidad de recuperación del mortero. Lee et al., (2022) documentaron valores que oscilan entre 5,647 y 49,242 Pa/s en morteros diseñados para este tipo de aplicaciones, evidenciando un buen grado de reconstrucción estructural tras el cizallamiento. Asimismo, la viscosidad plástica es otro parámetro relevante, ya que describe la resistencia del mortero al flujo cuando no se aplica cizallamiento. Weng et al., (2018) informaron valores de viscosidad plástica entre 16.65 y 33.31 Pa·s en mezclas optimizadas para inyección 3D, lo cual favorece una excelente estabilidad post-deposición. Para evaluar estos parámetros en condiciones realistas, se utilizan tasas de cizallamiento entre 5 y 10 s⁻¹, que simulan las condiciones del flujo del material durante su inyección. En este sentido, Tarhan et al., (2025) destacan la importancia de estas tasas para analizar con precisión el comportamiento reológico bajo condiciones prácticas. Finalmente, el esfuerzo cortante máximo define la capacidad del material para resistir tensiones elevadas sin perder su forma. En conjunto, estos estudios permiten establecer rangos óptimos para cada parámetro reológico, sirviendo como base para el diseño de mezclas tixotrópicas adecuadas para inyección 3D de mortero.

A partir de los estudios revisados, se evidencia que el desarrollo de ladrillos con materiales ecológicos y mediante tecnología como la inyección en 3D resuelve la falta de uso de la tecnología para reducir la contaminación causada por ladrilleras tradicionales de arcilla. Asimismo, resulta esencial prestar atención a la preparación y a los materiales utilizados en la mezcla del ladrillo, pues estos aspectos son determinantes para asegurar la calidad del producto final (Cordero, 2021).

Con respecto a las investigaciones futuras, es viable desarrollar nuevos modelos de elementos prefabricados con materiales ecológicos como nuevas alternativas de construcción para mitigar el impacto medioambiental y mejorar la calidad de vida de las personas.

1.3 Hipótesis

La implementación de la propuesta de ladrillos ecológicos elaborados con ceniza de cáscara de huevo e inyectados mediante tecnología de inyección 3D permite reducir significativamente el impacto ambiental asociado a la limitada adopción de tecnologías innovadoras en la producción de ladrillos de tabiquería en el sector construcción en Lima.

1.4 Objetivo general

Mitigar la contaminación ambiental producida por la fabricación de ladrillos de arcilla tradicionales diseñando un ladrillo ecológico inyectable en 3D incorporando ceniza de cáscara de huevo como reemplazo parcial del cemento.

1.5 Objetivos específicos

- Diseñar un modelo de ladrillo ecológico garantizando su inyectabilidad para que cumpla con la Norma Técnica Peruana E.070.
- Evaluar las propiedades de los agregados a utilizarse en la mezcla de mortero inyectable en 3D.
- Utilizar el 10% del porcentaje de adición de ceniza de cáscara de huevo como reemplazo parcial del cemento en la mezcla de mortero para un ladrillo ecológico inyectable en 3D.
- Diseñar una mezcla de mortero para un ladrillo ecológico inyectable en 3D utilizando ceniza de cáscara de huevo como componente reemplazo del cemento.
- Evaluar las propiedades de la mezcla del mortero para ladrillos ecológicos inyectados en 3D en estado fresco.
- Medir los parámetros físicos y mecánicos de los eco ladrillos inyectados en 3D, de tal manera que los resultados se encuentren dentro de la Norma Técnica Peruana E.070 y compararlos con ladrillos de arcilla pandereta tradicionales.
- Evaluar el impacto ambiental generado por el ladrillo propuesto mediante el cálculo de su huella de carbono.

1.6 Limitaciones del proyecto

El diseño de ladrillos ecológicos inyectados en 3D es una propuesta innovadora, pero existen limitaciones principalmente técnicas y económicas que deben considerarse:

- Limitaciones técnicas

La fabricación de ladrillos ecológicos mediante inyección 3D presentan diversos desafíos y limitantes. En primer lugar, las capacidades de la tecnología de inyección 3D pueden restringir la complejidad y precisión del diseño, lo que puede afectar la eficiencia y calidad del producto final. Además, la selección de materiales adecuados representa una limitación significativa, ya que la disponibilidad y la idoneidad de materiales ecológicos compatibles con la inyección 3D pueden ser reducidas, dificultando la producción de ladrillos con las propiedades mecánicas y térmicas deseadas. Finalmente, la escala y el tamaño de inyección también constituyen un factor limitante, dado que las inyectoras 3D tienen restricciones en cuanto a las dimensiones de los objetos que pueden fabricar, lo que puede influir en la viabilidad de producir ladrillos a una escala adecuada para su aplicación en construcción sostenible.

- Limitaciones económicas:

Además de las limitaciones técnicas, existen factores económicos y de mercado que pueden afectar la viabilidad del uso de inyección 3D en la fabricación de ladrillos ecológicos como se muestra en la Tabla 29 y Tabla 30. En términos de rentabilidad, la adquisición de materiales ecológicos adecuados y, especialmente, de equipos de inyección 3D representa un costo significativo, lo que puede dificultar la implementación del proyecto, en particular para empresas o emprendedores con recursos limitados. Asimismo, la competencia en el sector de la construcción plantea un desafío adicional, ya que los materiales y métodos de construcción tradicionales están ampliamente establecidos en el mercado, lo que puede dificultar la adopción de ladrillos ecológicos fabricados mediante inyección 3D.

2. Marco teórico

El presente capítulo desarrolla el marco teórico que sustenta el diseño de un mortero sostenible e inyectable en 3D, elaborado a partir de ceniza de cáscara de huevo como sustituto parcial del cemento. Se aborda los componentes tradicionales del mortero y las propiedades reológicas requeridas para su aplicación en tecnologías de inyección 3D. Además, se escribe la caracterización de la ceniza por su alto contenido de calcio y su potencial como material alternativo, así como las propiedades mecánicas fundamentales de los ladrillos, como la densidad, la resistencia a la compresión y la absorción de agua. Asimismo, se analiza las tecnologías emergentes como la inyección en 3D de mortero, los criterios técnicos del mortero inyectable y sus propiedades viscoelásticas, entre ellas la tixotropía, la fluidez, la extrudabilidad, el tiempo abierto y la calidad de inyección. También se incorpora las normativas nacionales e internacionales aplicables, el análisis de ciclo de vida como herramienta de evaluación ambiental, y la evolución de las unidades de albañilería, con énfasis en los ladrillos ecológicos como alternativa sostenible. Esta base teórica respalda el diseño experimental y valida la viabilidad técnica y ambiental del mortero propuesto.

2.1. Ceniza de cáscara de huevo (ESP)

La cáscara de huevo es un material cuya producción está en constante crecimiento. En el año 2000 se producía 55 millones de toneladas y en el 2018 aumentó a 83 millones de toneladas (Sathiparan, 2021). Tiene la cualidad de poder usarse en reemplazo del cemento, pues tiene características semejantes en cuanto al calcio. Sin embargo, es su presentación en forma de ceniza la que otorga mejores propiedades (Sulen et al., 2024). Este se ha usado en varias proporciones desde 5% hasta 20% del peso cementante (Ibrahim et al., 2022).

2.2. Mortero

El mortero se define como una pasta compuesta por aglutinantes como son el cemento o cal y áridos finos como es la arena, amasados con agua hasta obtener una consistencia adecuada para su aplicación (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [VIVIENDA], 2021). En el ámbito de la construcción, su función principal es unir los elementos como lo son los ladrillos, bloques o piedras, además de rellenar juntas y cubrir superficies.

2.3. Componentes de mortero y concreto

2.3.1. Cemento

El cemento es un polvo delicado y fino que se emplea como aglutinante debido a su capacidad de endurecimiento al entrar en contacto con el agua. Es uno de los componentes principales en la fabricación de concreto y mortero, que luego se utiliza en la construcción de diversas estructuras y edificaciones. Se obtiene mediante la mezcla y molienda de diversos minerales, como la piedra caliza, la arcilla y el yeso, que son sometidos a altas temperaturas en un proceso llamado calcinación (Solís-Carcaño et al., 2008).

2.3.2. Agua

El agua es un componente esencial para el concreto y mortero, puesto que desarrolla su capacidad ligante, lo hidrata y le da manejabilidad. Para la fabricación del concreto, esta se mezcla con el cemento y los agregados. Además, durante el proceso de curado, el propósito del agua es conservar el concreto en un estado de humedad adecuada, de modo que el cemento pueda hidratarse casi por completo. Esto favorece el desarrollo óptimo de su resistencia mecánica. Sin embargo, para su uso el agua debe tener una condición aceptable acorde a la Norma Técnica Peruana 339.088 (Instituto Nacional de Calidad [INACAL], 2014).

2.3.3. Arena

La arena es un árido usado como agregado fino para la fabricación del concreto y del mortero. Se caracteriza por estar compuesta de partículas de rocas muy diminutas o finas. No obstante, el tamaño depende del uso al que este destinado. Esto debido a que la forma y las cantidades relativas de los agregados, como la cantidad de grava y arena en la mezcla son factores determinantes en la resistencia (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2017).

2.3.4. Aditivos

2.3.4.1. Aditivo plastificante

Un aditivo plastificante es una sustancia química que se añade a la mezcla de concreto o mortero para aumentar su maleabilidad y facilidad de manejo. Sirve para mejorar la trabajabilidad del material, reducir la cantidad de agua necesaria, prevenir la segregación de los componentes y aumentar su durabilidad, especialmente en la construcción (Sika, s.f.-a).

2.3.4.2. Aditivo acelerante

El aditivo acelerante es una sustancia química que se usa cuando se requiera obtener concreto con altas resistencias a temprana edad, reducir el tiempo de desencofrado y colocar concreto en ambientes fríos (Sika, s.f.-b).

2.4. Unidades de albañilería tradicionales

2.4.1. Ladrillo de arcilla

Un ladrillo es una unidad de cerámica o arcilla usada como material de construcción que, para su fabricación, se somete a procesos de cocción a temperaturas superiores a 1000°C. Este calentamiento intenso le otorga resistencia y propiedades aislantes, tanto térmicas como acústicas (Reynaga & Rodríguez, 2022).

Asimismo, los ladrillos de arcilla se caracterizan por poseer diferentes formas y tamaños como se muestra en la Figura 12. Estas variaciones responden a la función que cumplen en la construcción y a las propiedades mecánicas requeridas (Ladrillos Pirámide, 2019).

2.4.2. Ladrillo de concreto

Los bloques o ladrillos de concreto tienen un tamaño, resistencia y peso superiores a los ladrillos de arcilla. Esto conlleva una ventaja, ya que se necesitan menos bloques para erigir una vivienda en comparación con los ladrillos. Además, las paredes construidas que utilizan este material son más sencillas de revestir y requieren una menor cantidad de arena y cemento para su aplicación (Unicon, s.f.). Aunque los bloques de concreto presentan un costo superior al de los ladrillos, sus ventajas constructivas y de rendimiento se traducen en beneficios y ahorros a largo plazo.

2.4.3. Ladrillos ecológicos

Los ladrillos ecológicos son elementos de construcción innovadores que se presentan como alternativa sostenible a los ladrillos tradicionales. Su principal característica es que se fabrican con materiales de origen natural o reciclado (Reynaga & Rodríguez, 2022).

2.5. Propiedades de ladrillo

2.5.1. Dureza

La dureza de un ladrillo es evaluada principalmente a través de pruebas o ensayos que miden su resistencia a la abrasión, penetración o deformación. Es decir, evalúan la capacidad para resistir la deformación plástica (INACAL, 2002a).

2.5.2. Densidad

La densidad es la capacidad que posee la masa contenida en una unidad de volumen de ese material. En el contexto de los ladrillos y otros materiales de construcción, la densidad es una medida importante que puede influir en diversas características y aplicaciones de los ladrillos (Zhang et al., 2021). La densidad se expresa generalmente en unidades como gramos por centímetro cúbico (g/cm^3) o kilogramos por metro cúbico (kg/m^3).

2.5.3. Absorción de agua

La absorción de agua en ladrillos se refiere a la capacidad de un ladrillo para retener el agua cuando entra en contacto con ella. Esta es una propiedad importante ya que la absorción puede afectar la resistencia, durabilidad, aislamiento térmico y la capacidad de resistir el deterioro causado por la humedad en un ladrillo (Falliano et al., 2020).

2.5.4. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión de un ladrillo es una propiedad mecánica que mide la capacidad de un ladrillo para soportar cargas aplicadas en dirección perpendicular a su superficie sin experimentar una deformación excesiva o fallar. En otras palabras, esta propiedad indica cuánta fuerza puede resistir un ladrillo antes de que se rompa o se deforme permanentemente debido a la compresión (Reynaga & Rodríguez., 2022).

2.6. Inyección 3D en la construcción

La inyección 3D emerge como una tecnología disruptiva en la construcción, introduciendo una novedosa técnica de fabricación aditiva y subcategoría de la impresión 3D que permite erigir estructuras capa por capa a partir de un modelo digital tridimensional. Desde entonces ha experimentado un crecimiento constante y significativo (Rahul et al., 2019).

2.7. Reología

La reología, como disciplina de la física, se dedica al estudio minucioso de la deformación y el flujo de la materia, con un enfoque particular en sustancias en estado fluido o semisólido. En el ámbito de las propiedades en estado fresco de materiales como concreto o mortero, la reología emerge como una pieza fundamental para comprender a profundidad el comportamiento de estos materiales ante diversas condiciones de carga y deformación (Gómez, 2022).

2.8. Inyectora de mortero

Una inyectora de mortero en 3D es el componente clave de los sistemas de inyección 3D (3DPC), responsable de la extrusión controlada y la deposición capa por capa del mortero para construir objetos tridimensionales basados en diseños digitales. Para una operación exitosa, el mortero debe exhibir un equilibrio crucial de propiedades en estado fresco, incluyendo un tiempo abierto adecuado para la adherencia intercapa, un tiempo de fraguado inicial que permita la extrusión continua y la estabilidad estructural, suficiente resistencia a la deformación axial inmediata para soportar el peso propio, consistencia y resistencia inicial apropiadas, y propiedades reológicas optimizadas con un esfuerzo de fluencia estático que garantice la extrudabilidad necesarias para un proceso de inyección eficiente (Abudawaba et al., 2025).

2.9. Mortero inyectable en 3D

El mortero inyectable es un material cementicio modificado reológicamente para optimizar su fluidez y consistencia, permitiendo su extrusión precisa mediante sistemas de inyección 3D para fabricar elementos estructurales complejos y personalizados. Sus propiedades viscoelásticas y aditivos específicos como superplastificantes y aceleradores de fraguado garantizan la estabilidad dimensional durante el proceso mientras controlan el comportamiento durante la inyección y las propiedades finales, transformando así la construcción al facilitar la fabricación de componentes con geometrías complejas imposibles de lograr con técnicas tradicionales (Lavarello & Tello, 2024). La inyección en 3D no solo ofrece beneficios en términos de eficiencia y velocidad de construcción, sino que también presenta oportunidades para la personalización del ladrillo y la optimización de recursos. Al integrar el diseño paramétrico y la fabricación digital, se pueden crear estructuras altamente adaptadas a las necesidades específicas del entorno construido.

2.10. Propiedades de la mezcla inyectable

2.10.1. Tixotropía

La tixotropía es una propiedad reológica que se refiere a la capacidad de ciertos materiales para volverse menos viscosos y más fluidos cuando se someten a un esfuerzo de corte o agitación y luego recuperar su viscosidad original cuando dejan de estar sujetos a dicha fuerza. En el contexto del concreto inyectable, la tixotropía juega un papel crucial, ya que permite una adecuada fluidez durante la inyección, asegurando una distribución uniforme, y una rápida recuperación de la viscosidad para evitar la segregación y garantizar la estabilidad estructural de la mezcla (Gómez, 2022).

2.10.2. Esfuerzo de fluencia estática

Las propiedades reológicas, como el límite elástico y la viscosidad plástica, son cruciales para las mezclas inyectables (Hertwig & Holschemacher, 2020). Las mediciones reológicas, como la tensión o esfuerzo de fluencia estática, se utilizan para cuantificar el comportamiento tixotrópico de las mezclas de mortero. Estas mediciones ayudan a comprender las variaciones inducidas por el proceso y el impacto de los diferentes aditivos en las propiedades tixotrópicas (Moeini et al., 2022).

2.10.3. Trabajabilidad

Capacidad para ser transportado y dispensado eficientemente a través de sistemas de bombeo, como bombas de concreto o equipos de bombeo de alta presión (Zhang et al., 2021). En otras palabras, es la propiedad que permite que el concreto o mortero fluya a través de una manguera o tubería y sea depositado en ubicaciones específicas dentro de una obra de construcción sin pérdida significativa de calidad o consistencia (Reyes, 2018). El uso de superplastificantes y otros aditivos puede ayudar a mantener la trabajabilidad y al mismo tiempo lograr las propiedades de resistencia deseadas (Koryanova, 2017).

2.10.4. Fluidez

En la inyección 3D, la trabajabilidad se refiere a la facilidad con la que la mezcla de concreto o mortero fluye sin obstrucciones a través de todo el sistema. Esto incluye el depósito de mezcla, el transporte a la inyectora y la extrusión final. Un flujo continuo y uniforme es esencial para garantizar una inyección exitosa (Valente et al., 2019).

2.10.5. Edificabilidad

Capacidad para mantener su forma, resistencia y durabilidad a lo largo del tiempo, especialmente cuando está sujeto a diversas condiciones ambientales y cargas estructurales (Falliano et al., 2020). Asimismo, esta propiedad es esencial para el mortero sea inyectable, ya que debe conservar su forma sin necesidad de encofrados (Reyes, 2018).

2.10.6. Extrudabilidad

La extrudabilidad es la propiedad que posee el concreto o mortero para ser empujado o forzado a través de un dispositivo, como una boquilla o una máquina de extrusión, de manera continua y con un control preciso sobre la forma y la velocidad de salida (Falliano et al., 2020). Este término se utiliza principalmente en la construcción para describir la habilidad del concreto de ser modelado o formado según las necesidades del proyecto con una alta precisión y consistencia durante el proceso de extrusión (Reyes, 2018).

2.10.7. Tiempo abierto

El tiempo abierto se define como el intervalo durante el cual la mezcla de concreto o mortero inyectable mantiene sus propiedades reológicas y de trabajabilidad, permitiendo su adecuada aplicación y deposición capa por capa dentro de un proceso de inyección 3D. Este periodo abarca desde la preparación inicial de la mezcla hasta el inicio de su fraguado o endurecimiento, momento en el cual su manipulación y extrusión dejan de ser viables (Reyes, 2018). En el contexto de la manufactura aditiva, contar con un tiempo abierto óptimo es fundamental para asegurar la continuidad del proceso de inyección sin interrupciones, favorecer una buena adherencia entre capas y preservar la conformidad dimensional de la estructura inyectada.

2.10.8. Calidad de impresión

Para Reyes (2018) “la calidad de extrusión es el conjunto de propiedades que tiene una capa impresa, en cuanto a los requisitos de calidad superficial, conformidad y estabilidad dimensional” (p.41). Esta definición resalta la complejidad inherente al proceso de impresión, en el que no solo se valora el resultado estético de la superficie, sino también la precisión con la que la geometría inyectada reproduce las dimensiones esperadas y la capacidad de la capa para conservar dichas características a lo largo del tiempo. De este modo, la calidad de extrusión se convierte en un parámetro técnico clave para garantizar la fiabilidad estructural y funcional del producto final. Los componentes que la integran como

la calidad superficial, la conformidad y la estabilidad dimensional permiten una evaluación detallada de la consistencia y exactitud del proceso de deposición de material, asegurando que cada capa cumpla con exigentes estándares técnicos desde su formación inicial hasta su comportamiento en condiciones posteriores. A continuación, se describen brevemente estos aspectos esenciales:

2.10.8.1. Calidad superficial

Se refiere a la capa que tiene que estar libre de defectos superficiales como agrietamiento segregación, huecos o imperfecciones muy notables. La calidad superficial del mortero afecta directamente la calidad de la inyección. Por ejemplo, la uniformidad y precisión del espesor de la capa se ven influenciadas por la fluidez y la proporción de huecos del mortero, lo que a su vez afecta la rugosidad superficial de las capas inyectadas (Seo et al., 2020).

2.10.8.2. Conformidad dimensional

Hace referencia al grado en que las dimensiones reales de la sección transversal inyectada se ajustan a las dimensiones objetivo establecidas en el diseño. Implica que las variaciones geométricas se mantengan dentro de un rango de tolerancia aceptable, garantizando que cada capa depositada mediante el proceso de inyección conserve la precisión necesaria para el correcto ensamblaje y desempeño funcional de la estructura construida. Una alta conformidad dimensional refleja un control eficiente del proceso de inyección, del comportamiento reológico del material y de la estabilidad del sistema de aplicación (Reyes, 2018).

2.10.8.3. Estabilidad dimensional

Se refiere a la capacidad que tiene la capa inyectada a mantener su conformidad dimensional y que no pierda sus características del momento que fue inyectado (Lavarello & Tello, 2024).

2.11. Análisis de ciclo de vida

Según Gabarró (s.f.), el análisis de ciclo de vida es un método que permite evaluar los posibles impactos ambientales generados por un producto a lo largo de su existencia. Para ello:

- Primero, se identifican y registran todos los recursos que el sistema requiere y los residuos o emisiones que genera.

- Luego, se analizan los efectos ambientales que podrían derivarse de esas entradas y salidas.
- Finalmente, los resultados se interpretan considerando los objetivos establecidos para el estudio.

Según Reynaga y Rodríguez (2022), los productos y procesos generan impactos asociados a diversas problemáticas ambientales a lo largo de todas las etapas de su ciclo de vida. En consecuencia, el impacto total de un sistema resulta de la suma de los efectos producidos en cada fase. Bajo esta misma lógica, se requiere evaluar el ciclo completo para identificar en qué etapas se producen las emisiones de gases de efecto invernadero. Las definiciones necesarias para realizar el análisis de ciclo de vida de un producto, de acuerdo con Reynaga y Rodríguez (2022), son:

- **Función del sistema:** Tareas que corresponden desempeñar.
- **Unidad funcional:** Representa la medida cuantificable de las funciones que cumple el sistema y que se toman como base para el análisis.
- **Flujo de referencia:** Corresponde a la cantidad de producto o servicio requerida para cumplir con la unidad funcional definida.

2.12. Reglamentos y normas

2.12.1. Reglamento nacional de edificaciones

El Reglamento Nacional de Edificaciones constituye la norma técnica de obligatorio cumplimiento para todas las entidades públicas, así como para individuos y empresas privadas que estén involucrados en la planificación y construcción de desarrollos urbanos y edificaciones en todo el país. Además, representa el único marco regulatorio que establece los estándares y requisitos mínimos de calidad para la planificación, construcción y mantenimiento de edificios y desarrollos urbanos. Este reglamento fue revisado periódicamente de manera integral o parcial, para mantenerse al día con los avances tecnológicos y las necesidades de la sociedad (VIVIENDA, 2021).

2.12.2. Norma E.070 Albañilería

Esta norma define los estándares y los criterios mínimos necesarios para analizar, diseñar, seleccionar materiales, construir, llevar a cabo el control de calidad e inspeccionar edificaciones nuevas de albañilería confinada y armada. También establece directrices para

evaluar, reparar y reforzar edificaciones de albañilería ya existentes (Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción [SENCICO], 2020).

2.12.3. Normas técnicas peruanas

Las Normas Técnicas Peruanas son textos que definen las características de calidad de productos, procesos y servicios. Además, incluyen pautas relacionadas con la terminología, procedimientos de prueba, toma de muestras, empaque y etiquetado, que se combinan de manera coherente (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [MIDAGRI], 2020).

2.12.4. Norma A.C.I.

Las normas A.C.I. son un conjunto de pautas técnicas desarrolladas por expertos en la industria del concreto para promover prácticas de construcción seguras y eficaces. Se refieren a las normas publicadas por el American Concrete Institute, una organización líder en la industria de la construcción que se centra en el concreto y sus aplicaciones (American Concrete Institute [ACI], 2006).

2.12.5. Normas ISO

Las normas ISO 14040-14049 establecen el marco metodológico para el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), una herramienta clave en la evaluación ambiental de productos y procesos. La ISO 14040 define los principios generales, mientras que la ISO 14041 aborda el análisis de inventario, recopilando datos sobre el uso de recursos y emisiones. La ISO 14042 se enfoca en la evaluación del impacto ambiental, y la ISO 14043 en la interpretación de resultados para la toma de decisiones. Además, las normas ISO 14047, 14048 y 14049 proporcionan ejemplos de aplicación y formatos de documentación. Su implementación permite mejorar la sostenibilidad industrial, optimizar procesos y cumplir con regulaciones ambientales, aunque enfrenta desafíos como la recopilación de datos y costos de adopción (Gabarró, s.f.).

3. Metodología

En el presente capítulo se desarrolla la metodología empleada para evaluar la viabilidad técnica y ambiental de ladrillos ecológicos fabricados mediante la inyección en 3D. Se establece un enfoque explicativo, con un diseño experimental y documental que permite analizar el comportamiento del mortero elaborado con ceniza de cáscara de huevo como sustituto parcial del cemento. Se observa una secuencia metodológica dividida en una fase preliminar, donde se diseña la geometría del ladrillo, se caracterizan los materiales y se formula la mezcla inyectable; y una fase definitiva, en la que se valida la reología del mortero mediante ensayos de fluencia estática, fluidez, tixotropía y fraguado. Asimismo, se fabrican las unidades de albañilería mediante la inyección en 3D, y se aplican ensayos de variación dimensional, alabeo, absorción y resistencia a la compresión para verificar su desempeño según normativas técnicas. Finalmente, se calcula la huella de carbono de los ladrillos a través del análisis de ciclo de vida con el software SimaPro, lo que permite comparar el impacto ambiental entre los ladrillos ecológicos y los tradicionales.

3.1. Nivel de investigación

El nivel de investigación es experimental. La propuesta busca explicar y comprobar los efectos que tiene la implementación del método de inyección 3D en la fabricación de ladrillos ecológicos, mediante la manipulación de variables y la observación de sus resultados en cuanto a resistencia y reducción de las emisiones contaminantes.

3.2. Diseño de investigación

El diseño de investigación es experimental y documental. Es experimental puesto que se realizan ensayos para evaluar las propiedades de los componentes, mezcla de mortero, y de los ladrillos ecológicos. Es documental ya que se revisa literatura científica existente sobre ladrillos ecológicos, inyección 3D en construcción, contaminación atmosférica, componentes ecológicos y calidad del aire a nivel nacional y global.

3.3. Procedimiento

El diseño de ladrillos ecológicos fabricados mediante inyección 3D surge como una alternativa sostenible para mitigar la contaminación generada por las ladrilleras tradicionales de arcilla. Esta propuesta se basa en el uso de materia prima ecológica, como la cáscara de huevo, un residuo comúnmente desechado, aprovechándolo para reducir el impacto

ambiental. El procedimiento para la construcción o implementación de la propuesta se divide en fase preliminar y definitiva.

3.3.1. Fase preliminar

En la fase preliminar, se diseña en un inicio la geometría del ladrillo ecológico. Luego se realiza la identificación y caracterización de los materiales a utilizar. Esto implica los ensayos en los agregados, en las cáscaras de huevo, la selección de aditivos y la caracterización del cemento. Después se formula el diseño de mezcla con la incorporación aditivos para que sea inyectable tridimensionalmente.

3.3.1.1. Diseño geométrico del modelo del ladrillo

Para el diseño geométrico del modelo de ladrillo se toma como base las medidas del ladrillo pandereta. Además, se considera un 18% de vacíos para el diseño de huecos, los cuales tienen forma rectangular. Se establece un espesor de 3cm y se decide redondear las esquinas del ladrillo con el fin de hacerlas más sencillas para ser inyectadas en 3D.

3.3.1.2. Obtención de las cenizas de cáscaras de huevo

Para la obtención de la ceniza de cáscaras de huevo se tiene el siguiente procedimiento:

- Recolección de las cáscaras de huevo de donaciones como se muestra en la Figura 14.
- Tras recolectar las cáscaras de huevo, se almacenan y lavan a mano para eliminar contaminantes.
- Para la obtención de la ceniza de cáscaras de huevo, se incinera la cáscara de huevo a más de 800°C por 1 hora en un horno industrial.
- Una vez hechas cenizas, las cáscaras se trituran mediante un molino hasta pasar la malla N°200.

3.3.1.3. Análisis granulométrico por tamizado

Este análisis se lleva a cabo con el propósito de identificar la distribución de los diversos tamaños de partículas que componen el agregado (INACAL, 2013a). En el caso del agregado fino, se evalúa el tamaño, el cual debe ser como máximo 0.7 mm (Jo et al., 2020). Este ensayo se realiza siguiendo el procedimiento presentado en la norma NTP 400.012.

3.3.1.4. Material que pasa la malla n°200

Este ensayo tiene como objetivo identificar las partículas más pequeñas presentes en los agregados. Debido al valor diminuto del tamaño máximo del agregado. Un exceso de estas partículas puede ser perjudicial para la resistencia del mortero, ya que obliga a usar más agua en la mezcla para tener trabajabilidad, lo que diluye la pasta de cemento y reduce su capacidad de unir eficazmente las partículas, resultando en un mortero más débil y menos durable (INACAL, 2002b). Este ensayo se realiza siguiendo el procedimiento presentado en la norma NTP 400.018.

3.3.1.5. Contenido de humedad

Se refiere al porcentaje de agua total presente en el agregado en comparación con el peso de la muestra seca (INACAL, 2013b). Este ensayo se realiza siguiendo el procedimiento presentado en la norma NTP 339.185.

3.3.1.6. Peso específico de los agregados

El peso específico es la relación entre el peso del material y el volumen que ocupa, excluyendo los espacios vacíos. En este análisis, se calcula el peso específico de masa, el peso específico saturado con superficie seca aparente y el porcentaje de absorción (INACAL, 2013c). Para el agregado fino, este ensayo se guía de la norma NTP 400.022.

3.3.1.7. Diseño de mortero ecológico inyectable en 3D

Se diseña la mezcla de mortero con un tamaño máximo del agregado de clasificación N°30. Además, se incluye una dosificación de plastificante del 2%, un aditivo acelerante en una proporción del 1% y la ceniza de cáscara de huevo en un reemplazo del 10% del cemento. El mezclado se efectuó en una mezcladora de paletas, incorporando primero los materiales secos y luego el agua con los aditivos hasta obtener una mezcla homogénea y trabajable.

3.3.2. Fase definitiva

En la fase definitiva, se valida la capacidad para ser inyectable en 3D de la mezcla de mortero mediante los ensayos de esfuerzo de fluencia estática, el ensayo de tiempo de fraguado con la aguja Vicat, el ensayo de tixotropía y el ensayo de fluidez. Tras obtener la mezcla de mortero para ser inyectado en 3D se procede a la fabricación de las unidades de albañilería mediante inyección 3D. Después, se les aplican ensayos para evaluar sus propiedades según norma E.070.

3.3.2.1. Ensayo de fluencia estática

En este ensayo se caracterizaron las propiedades reológicas de las mezclas producidas. El análisis se centró en el límite elástico o esfuerzo de fluencia estática. El comportamiento reológico se interpretó mediante el modelo de Bingham, expresado en la siguiente ecuación:

$$\tau = \tau_0 + \eta\gamma \quad (1)$$

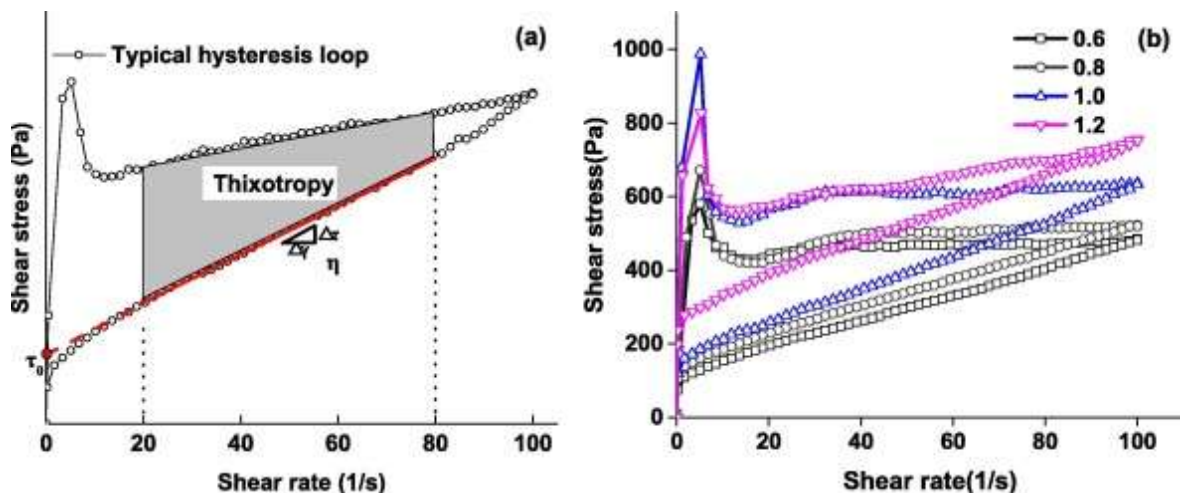
En la cual:

- η = Viscosidad plástica en (Pa · s).
- τ_0 = Esfuerzo de fluencia estática o yield stress (Pa).
- γ = Tasa de deformación o velocidad cortante (s^{-1}).
- τ = Esfuerzo cortante aplicado (Pa).

De acuerdo con el modelo de Bingham en la Ecuación 1, es posible representar el historial de carga en función de la velocidad de deformación y el tiempo, generando además la curva de histéresis (Zhang et al., 2019) mostrada en la Figura 4. El área delimitada por estas curvas corresponde al valor de tixotropía. Por otro lado, el esfuerzo de fluencia estática se obtiene identificando el máximo esfuerzo cortante registrado durante el ensayo (Rahul et al., 2019), tal como se observa en la Figura 5.

Figura 4

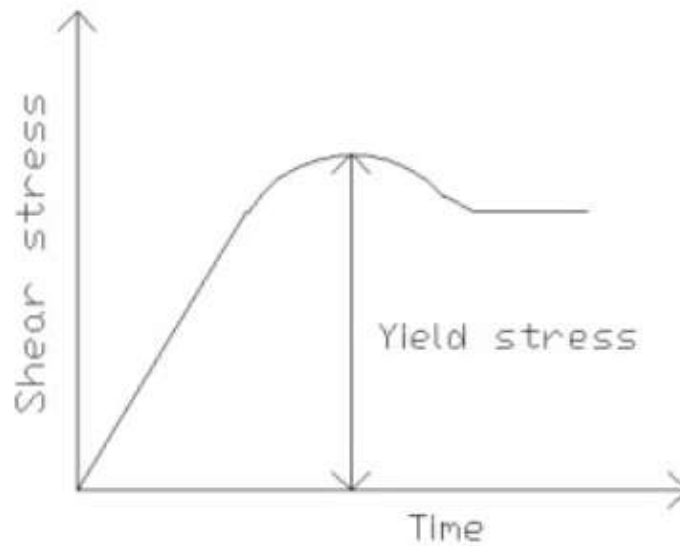
Historial de carga y curva de histéresis según el Modelo reológico de Bingham



Nota. De “Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete”, por Y. Zhang, Y. Zhang, W. She, L. Yang, G. Liu y Y. Yang, 2019 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061>).

Figura 5

Gráfica de prueba de corte



Nota. De “3D printable concrete: Mixture design and test methods”, por A. Rahul, M. Santhanam, H. Meena y Z. Ghani, 2019 (<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.014>).

Para los ensayos reológicos se utilizó un reómetro rotacional modelo RSX SST.

Para determinar el esfuerzo de fluencia estática del mortero, se sigue el siguiente procedimiento:

- Se toman muestras de la mezcla en intervalos de 0, 15, 30 y 45 minutos después de su preparación.
- La mezcla se coloca en el recipiente del reómetro con capacidad de 500 ml.
- El ensayo se efectúa configurando el equipo a una velocidad de 45 rpm, durante un periodo de 3600 s y a una temperatura ambiente de 23 °C. Bajo estas condiciones, el instrumento registra el tiempo (s) y los esfuerzos cortantes (Pa).

El software del reómetro almacena los datos generados durante cada prueba y permite construir la curva de esfuerzo cortante (τ) en función del tiempo (t). En dicha gráfica, el valor máximo registrado en cada medición se considera como el esfuerzo de fluencia estática (τ_0).

3.3.2.2. Ensayo de fluidez

A través del ensayo de fluidez se analiza la facilidad con la que las mezclas correspondientes a los diseños pueden desplazarse y fluir (American Society for Testing and Materials International [ASTM], 2020). El procedimiento se realiza en base a la norma ASTM C1437-20. En este ensayo, se coloca una muestra de mortero en un molde de 25mm de espesor, se apisona uniformemente y luego se mide el diámetro de expansión tras dejar la mesa de flujo caer 25 veces en 15 segundos.

3.3.2.3. Ensayo de tiempo de fraguado

Este ensayo permite determinar el tiempo de fraguado de la mezcla, considerado un parámetro clave para evaluar su trabajabilidad (ASTM, 2021). Este ensayo emplea el aparato de aguja Vicat para determinar el tiempo inicial y final de fraguado. Estos tiempos son indicadores del desarrollo de rigidez del material de muestra, fundamental para procesos constructivos como la inyección 3D.

3.3.2.4. Ensayo de tixotropía

Para evaluar la tixotropía de un mortero, especialmente cuando se desea evaluar su inyectabilidad, se realiza un ensayo que determina su comportamiento reológico, es decir, la variación en la viscosidad del mortero cuando se somete a esfuerzo y su capacidad para recuperar su estructura una vez que cesa la acción de este esfuerzo. Para ello es importante seguir los siguientes pasos:

- Primero, se prepara la muestra de mortero con ceniza de cáscara de huevo, se mezcla y se garantiza que la mezcla este uniforme.
- Luego, se mide la viscosidad inicial o la tensión de cizallamiento de la muestra a la velocidad de cizallamiento constante; para ello, es necesario un reómetro rotacional y, posteriormente, se establece una línea base (Kolawole et al., 2019).
- Se deja reposar la muestra durante un periodo específico para permitir la recuperación estructural de la misma.
- Finalmente, se mide nuevamente la viscosidad o la tensión de cizallamiento después de 15, 30 y 45 minutos. Esto es para determinar el comportamiento tixotrópico del material (Lv et al., 2023).

3.3.2.5.Elaboración de ladrillos

Tras tener a inyectora 3D de ladrillos, se procede a la fabricación de los elementos constructivos con el siguiente procedimiento:

- Se coloca una base impermeable para la inyección del ladrillo.
- Se coloca aditivo desmoldante en el interior del embudo de la inyectora 3D.
- Se vacía el mortero en la inyectora en capas para evitar que se rebalse.

El ladrillo se deja secar durante 16 horas y se empieza el curado de este en una poza de agua para luego ser evaluado mediante los ensayos de albañilería a los 28 días.

3.3.2.6.Variación de dimensiones

Se realiza este ensayo para obtener las diferencias en dimensiones entre diferentes unidades de ladrillos utilizadas en la construcción (SENCICO, 2020). Este ensayo se realiza según la norma E.070 mostrada en la Figura 13 (INACAL, 2017).

3.3.2.7.Alabeo

Este ensayo se lleva a cabo para determinar la deformación o curvatura que puede presentarse en la superficie de un ladrillo, lo cual es un factor clave en la calidad y estabilidad de la mampostería (Seminario, 2013). La prueba se realiza siguiendo los lineamientos establecidos en la norma E.070, garantizando la precisión en la evaluación del material (INACAL, 2017).

3.3.2.8.Absorción

Este ensayo se lleva a cabo para medir la capacidad del ladrillo de absorber agua, un factor clave en su desempeño y durabilidad (Pasupathy et al., 2023). La prueba se realiza siguiendo los lineamientos de la norma NTP 399.613:2017, que establece el procedimiento para su ejecución (INACAL, 2017).

3.3.2.9.Resistencia a la compresión en unidades de albañilería

Como menciona Pasupathy et al. (2023), este ensayo se realiza para determinar la capacidad de un ladrillo para soportar cargas de compresión sin sufrir deformaciones excesivas o colapsar. Este ensayo se realiza siguiendo el procedimiento de la norma NTP 399.613:2017.

3.3.2.10. Compresión de pilas de ladrillos

Este ensayo permite obtener la resistencia a la compresión de las unidades, la cual se emplea para verificar si cumplen con el valor de resistencia especificado para la albañilería (INACAL, 2003) siguiendo el procedimiento de la norma NTP 399.605:2003.

3.3.2.11. Cálculo de huella de carbono del ladrillo

Para la realización de la medición de la huella de carbono, se inicia con la elaboración del ciclo de vida de cada tipo de ladrillo. Aquí se identifica las etapas del proceso que generan emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Reynaga & Rodríguez, 2022). Se determinan la función del sistema, la unidad funcional y el flujo de referencia. Después, se establecen los límites del sistema evaluando desde qué punto hasta qué punto del proceso se analizaría el ladrillo y se clasifican las actividades incluidas o excluidas del sistema. Luego, se elabora el inventario de insumos y maquinarias, considerando las variables de entrada y salida, y se analizan las cantidades de actividades que emitieron CO₂ a lo largo del ciclo. Posteriormente, se calculan las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del ladrillo ecológico y del ladrillo tradicional mediante el software SimaPro para evaluar sus impactos ambientales.

4. Resultados

En el capítulo a continuación se presentan los resultados del desarrollo del ladrillo ecológico inyectado en 3D con ceniza de cáscara de huevo. En la fase preliminar, se diseña un modelo que garantiza su inyectabilidad y cumplimiento con la norma E.070, se evalúan las propiedades de los agregados y se formula una mezcla de mortero con 10 % de ceniza como reemplazo parcial del cemento. En la fase definitiva, se hallan propiedades del mortero en estado fresco, como el esfuerzo de fluencia, la tixotropía, el tiempo de fraguado y la extrudabilidad, y se inyectan ladrillos cuyas propiedades físicas y mecánicas se miden y comparan con ladrillos panderetas tradicionales de arcilla, verificando el cumplimiento normativo. Finalmente, se calcula la huella de carbono, evidenciando un menor impacto ambiental.

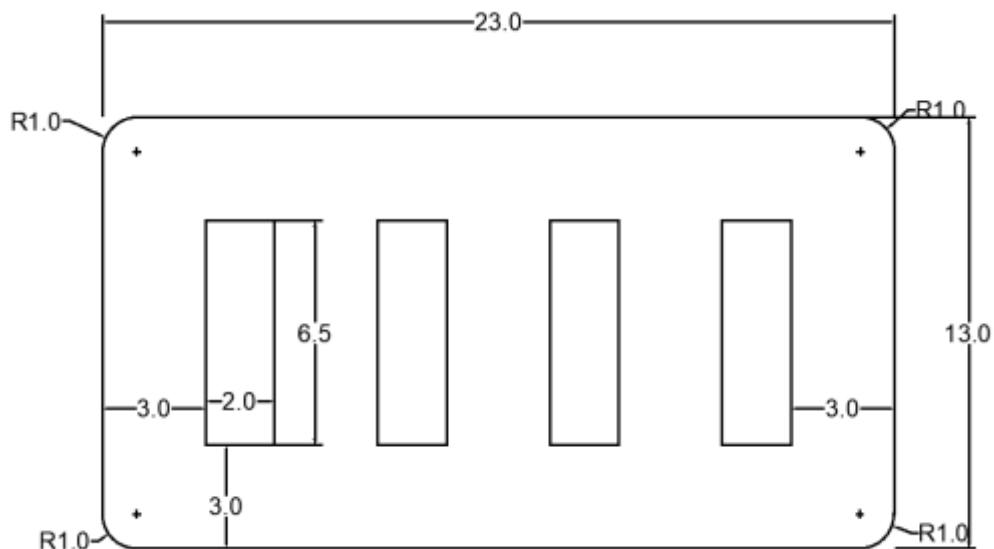
4.1. Fase preliminar

4.1.1. Diseño de un modelo de ladrillo ecológico garantizando su inyectabilidad para que cumpla con la norma técnica peruana E.070

En la Figura 6 se presenta el resultado del diseño del modelo del ladrillo ecológico en AutoCAD. Las medidas utilizadas en este diseño estuvieron expresadas en centímetros.

Figura 6

Diseño de modelo de ladrillo



Nota. Las unidades del diseño están en centímetros. El volumen del ladrillo es de 0.0021 m³.

Tabla 2*Resultados del diseño de modelo de ladrillo*

Medida	Cantidad bruta	Cantidad neta	% Vacíos	Volumen (m³)
Área	285.75	233.75	18%	0.0021
Volumen	2571.77	2103.77		

Como se observa en la Tabla 2 se obtiene un volumen aproximado de 0.0021 m³ por ladrillo producto de tener un 18% de vacíos con un grosor considerable de 3cm.

4.1.2. Evaluación de las propiedades de los agregados a utilizarse en la mezcla de mortero inyectable en 3D

4.1.2.1. Ensayo de granulometría

Se presentan los resultados de los ensayos de granulometría de agregados en la arena fina.

Tabla 3*Resultados del ensayo granulometría en agregado fino para mortero*

Arena fina				
Malla	Peso retenido	%retenido	%retenido acumulado	% que pasa
3/8"	0	0.00%	0.00%	100.00%
N4	0	0.00%	0.00%	100.00%
N8	0	0.00%	0.00%	100.00%
N16	0	0.00%	0.00%	100.00%
N30	0	0.00%	0.00%	100.00%
N50	392.25	36.92%	36.92%	63.08%
N100	386.97	36.43%	73.35%	26.65%
Fondo	283.07	26.65%	100.00%	0.00%
Total	1062.3	100.00%		

Como se observa en la Tabla 3 el peso inicial y final de la arena fina que se utiliza para ensayo fueron de 1066.18 y 1062.3 gramos respectivamente.

Los resultados del ensayo granulométrico en la arena fina son:

- Módulo de fineza de 1.10.
- Tamaño máximo n°30 (0.6 mm).

- Tamaño máximo nominal n°50 (0.3 mm).
- Error de 0.37%.
- La arena fina cumple con el límite máximo de 0.7 mm.

4.1.2.2. Ensayo de material que pasa la malla 200

Se presentan los resultados del ensayo del material que pasa por la malla n°200, donde se muestran los pesos de muestras de los agregados.

Tabla 4

Resultados del ensayo de material que pasa la malla n°200

Propiedades	Arena fina	
Peso humedad ambiente	300	500
Peso muestra seca	293.83	494.33
Peso muestra lavada y secada	215.53	369.93
Material que pasa malla n°200	78.3	124.4
% que pasa malla n°200	26.65%	25.17%

Como puede apreciar en la Tabla 4 la arena fina tiene un porcentaje pasante de malla n°200 de 25.91% en promedio. Es importante destacar que los pesos en estado húmedo del agregado son mayores que en estado seco debido a la presencia de humedad en el lugar de extracción de estos agregados.

4.1.2.3. Ensayo de contenido de humedad

Con respecto a los ensayos de contenido de humedad de los agregados mostrados en la Tabla 5, se revela una humedad natural del 2.65% para la arena fina. Estos resultados indican un bajo nivel de humedad en el agregado.

Tabla 5

Resultados del ensayo de contenido de humedad

Propiedades	Arena fina
Peso ambiente	394.6
Peso seco	384.4
Humedad natural (wo%)	2.65%

4.1.2.4. Ensayo de peso específico y absorción

En la Tabla 6 se presentan los resultados de los ensayos de peso específico y absorción de agregados en la arena fina. Para cada ensayo se tomaron dos muestras diferentes de un mismo agregado para luego obtener un promedio de sus resultados.

Tabla 6

Resultados del ensayo de peso específico de agregado fino para mortero

Arena fina		
Propiedades	Muestra 1	Muestra 2
Peso de la fiola (gr)	205.8	205.8
Peso de arena sss (gr)	500	500
Peso de arena sss + peso fiola (gr)	705.8	705.8
Peso de arena sss+ peso fiola+peso agua (gr)	1014.5	1014.8
Peso agua (gr)	308.7	309.0
Peso de la arena seca (gr)	494.50	494.00
Volumen de la fiola (ml)	500	500
Pe masa	2.58	2.59
Pe masa sss	2.61	2.62
Pe aparente	2.66	2.67
% de absorción	1.11%	1.21%

Los resultados promedio del ensayo de peso específico en la arena fina son:

- Pe de masa promedio: 2.59
- Pe de masa SSS promedio: 2.62
- Pe aparente promedio: 2.67
- % de absorción promedio: 1.16%

4.1.3. Diseño de una mezcla de mortero para un ladrillo ecológico inyectable en 3D utilizando el 10% de ceniza de cáscara de huevo como reemplazo del cemento

El diseño de la mezcla de mortero inyectable en 3D con ceniza de cáscara de huevo se realizó mediante un enfoque experimental. Se prepararon diferentes combinaciones de materiales variando la relación agua/cemento y la proporción agregado/cemento. En el proceso de validación, las mezclas fueron evaluadas en estado fresco y se descartaron aquellas que no cumplieron con algún ensayo, priorizando únicamente las que cumplieran con los parámetros establecidos de inyectabilidad. En la Tabla 30 y Tabla 31 se muestran las combinaciones descartadas y sus resultados, mientras que en la Tabla 7 y Tabla 8 se presenta la mezcla de mortero final que logró superar los parámetros en los ensayos.

Tabla 7

Dosificación de mortero inyectable en 3D con ceniza de cáscara de huevo

Materiales	Dosificación
agua/cemento	0.52
agreg/cemento	0.94
SP (kg)	0.02
Acelerante (kg)	0.01

A partir de la dosificación y considerando el peso específico de cada material, se determinaron las masas necesarias para un ladrillo de volumen 0.0021 m³.

Tabla 8

Diseño de mortero inyectable en 3D para 1 ladrillo

Materiales	Masa (kg)	Operaciones	Vol. (m³)
Ag. fino	1.616	/Pe seco	0.0006
Agua	0.904	/1000	0.0009
Cemento	1.542	/PE	0.0005
CE	0.171	/PE	0.0002
SP	0.034	/PE	0.00003
AC	0.017	/PE	0.00001
TOTAL	4.284		0.0021

Las cantidades se obtuvieron multiplicando las proporciones por el peso específico de cada componente y ajustando por el volumen del ladrillo.

Se comprobó que la suma de los volúmenes parciales de cada componente coincidiera con el volumen requerido del ladrillo, permitiendo así optimizar el diseño y evitar excedentes o deficiencias en la mezcla.

4.2. Fase definitiva

4.2.1. Evaluación de las propiedades de la mezcla de mortero para ladrillos inyectados en 3D en estado fresco

4.2.1.1. Ensayo de fluencia estática

Para el ensayo de esfuerzo de fluencia estática, el valor analizar es el mayor valor de los esfuerzos cortantes en el tiempo de ensayo siendo en este caso 607.12 Pa para una duración de 45 minutos como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9

Resultados del ensayo de fluencia estática

T (min)	Esfuerzo de Fluencia Estática
	Valor obtenido (Pa)
T = 0	607.12
T = 15	63.152
T = 30	72.494
T = 45	84.650

4.2.1.2. Ensayo de tixotropía

Los parámetros mostrados en la Tabla 10 reflejan el comportamiento tixotrópico del mortero. El esfuerzo de cedencia dinámico y la viscosidad plástica indican su resistencia al flujo en estado dinámico, mientras que el área de histéresis y el esfuerzo cortante máximo permiten evaluar su estructura interna y respuesta al esfuerzo aplicado.

Tabla 10*Resultados del ensayo de tixotropía*

Parámetro	Resultado Obtenido
Esfuerzo de cedencia dinámico	383.27 Pa
Área de histéresis	15,006.16 Pa/s
Viscosidad plástica	32.017 Pa·s
Tasa de cizallamiento	10.60 s ⁻¹

4.2.1.3. Ensayo de fluidez

Tabla 11*Resultados del ensayo de fluidez*

T (min)	Diámetros mezcla (cm)		%Fluidez
T = 0	23	22.5	124
T = 15	22	22	117
T = 30	21	20.5	104
T = 45	20	19.5	94

Como se observa en la Tabla 11, los valores muestran una disminución progresiva en la fluidez del mortero a lo largo del tiempo, evidenciada por la reducción en los diámetros de extensión. Esto indica una pérdida de trabajabilidad con el paso de los minutos.

4.2.1.4. Ensayo de tiempo de fraguado

Tabla 12*Resultados del ensayo de tiempo de fraguado*

Tiempo de fraguado (min)	
T inicial	T final
261	441

Según la Tabla 12, el mortero presentó un tiempo de fraguado inicial de 261 minutos y final de 441 minutos, lo que indica un proceso de endurecimiento gradual adecuado para su manipulación y colocación en obra.

4.2.2. Medición de los parámetros físicos y mecánicos de los eco ladrillos, de tal manera que los resultados se encuentren dentro de la norma técnica peruana E.070 y compararlos con ladrillos de arcilla pandereta tradicionales

4.2.2.1. Ensayo de variación de dimensiones

Tabla 13

Resultados del ensayo variación de dimensiones

Muestra	Largo (mm)	Altura (mm)	Ancho (mm)
M-1	232.15	88.13	132.54
M-2	240.28	91.72	137.11
M-3	227.55	89.05	133.71
M-4	233.70	87.16	134.55
M-5	235.65	88.94	141.22
M-6	233.93	87.78	139.66
M-7	233.97	84.11	133.71
M-8	236.88	83.63	140.41
M-9	222.94	83.62	125.19
M-10	242.13	91.01	137.19

Los resultados mostrados en la Tabla 13 referentes al ensayo muestran ligeras variaciones en las dimensiones de los ladrillos analizados, lo cual es común en procesos artesanales o no estandarizados.

4.2.2.2. Ensayo de alabeo

Para este ensayo, se toman medidas de las flechas de 10 ladrillos respecto a las diagonales rectas tanto de la cara superior como en la inferior, obteniendo los siguientes resultados presentados en la Tabla 14.

Tabla 14*Resultados del ensayo de alabeo*

Muestra	Medida cara superior (mm)				Medida cara inferior (mm)			
	Convexidad		Concavidad		Convexidad		Concavidad	
	Lado	Lado	Centro	Centro	Lado	Lado	Centro	Centro
	izq.	der.	1	2	izq.	der.	1	2
M-1			3	3	0	1		
M-2			1	2			7	9
M-3			6	6			1	0.5
M-4			1	1			2	3
M-5			2	2			1.5	2
M-6	3	2					2	3
M-7	1	1					1.7	2
M-8	1	1.5					1	1.5
M-9	1	2			1	1		
M-10			2	1.5	2	2		

4.2.2.3. Ensayo de absorción

Los valores de absorción en la Tabla 15 se encuentran entre 4.50 % y 5.70 %, lo que indica una moderada capacidad de retención de agua en los ladrillos. Estos resultados son importantes para evaluar su durabilidad y comportamiento frente a la humedad.

Tabla 15*Resultados del ensayo de absorción*

Muestra	Peso (gr)		%Absorción
	Peso saturado	Peso seco	
M-1	4274.380	4056.750	5.36%
M-2	4301.310	4115.890	4.50%
M-3	4314.830	4082.100	5.70%
M-4	4279.460	4070.430	5.14%
M-5	4292.720	4101.350	4.67%

4.2.2.4. Ensayo de resistencia a la compresión

Los valores de la Tabla 16 muestran que la resistencia a la compresión de los ladrillos a los 28 días varió entre 53.47 y 86.61 kg/cm². Estos resultados permiten evaluar la capacidad mecánica del material y su aptitud para aplicaciones estructurales o no estructurales, según los requerimientos normativos. Además, se comparan con la resistencia del ladrillo pandereta, cuyo valor es de 39.8 kg/cm² (Ladrillos Lark, s.f.).

Tabla 16

Resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días

Muestra	Área (cm²)	Fuerza (kN)	Resistencia (kg/cm²)
M-1	307.69	198.04	65.61
M-2	329.45	279.91	86.61
M-3	304.26	168.97	56.61
M-4	314.44	169.76	55.03
M-5	332.78	255.62	78.30
M-6	326.71	171.37	53.47
M-7	312.84	168.18	54.80
M-8	332.60	212.71	65.19
M-9	279.10	171.12	62.50
M-10	332.18	233.01	71.50
M-11	301.76	163.76	55.32

4.2.2.5. Ensayo de pila de ladrillos

La Tabla 17 presenta los resultados del ensayo de compresión en pilas de ladrillos a los 28 días, con resistencias que oscilan entre 29.55 y 32.72 kg/cm². Estos valores reflejan el comportamiento estructural del conjunto ladrillo-mortero y permiten evaluar la calidad del ensamblado. Además, se comparan con la resistencia de pilas del ladrillo pandereta, cuyo valor es de 12.83 kg/cm² (Sáenz, 2016).

Tabla 17*Resultados del ensayo de pila de ladrillos a los 28 días*

Muestra	Alto (cm)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm²)	Fuerza (kN)	hp/tp	Factor de corrección	Resistencia (kg/cm²)
P-1	286.72	232.94	140.13	326.42	127.89	2.05	0.74	29.55
P-2	295.15	233.72	132.03	308.58	130.31	2.24	0.76	32.72
P-3	290.93	233.33	136.08	317.52	129.10	2.14	0.75	31.09

Nota. La abreviatura hp/tp es la relación de esbeltez o proporción geométrica de la pila de ladrillos.

4.2.3. Evaluación del impacto ambiental generado por el ladrillo propuesto mediante el cálculo de su huella de carbono

Se calcula primero el factor de emisión de 1kg del ladrillo inyectado en 3D con ceniza de cáscara de huevo mediante el software SimaPro como se aprecia en la Tabla 18.

Tabla 18*Resultados del análisis de ciclo de vida para un 1kg de ladrillo*

Categoría de impacto	Total (kg CO₂ eq)
Producción	0.349
Energía	0.0135
Transporte	0.00469
Desperdicio	0.0000619
Factor de emisión	0.367

Nota. Elaborado a partir de SimaPro.

En base a los resultados, se obtuvo un factor de emisión de 0.367 kg CO₂/kg del ladrillo inyectado en 3D con ceniza de cáscara de huevo. Después se obtuvo su huella de carbono multiplicándolo por la masa del ladrillo como se presenta en la Tabla 19.

Tabla 19

Resultados del cálculo de huella de carbono del ladrillo inyectado en 3D

Descripción	Unidad	Total
Factor de emisión CO ₂	kg CO ₂ eq / kg	0.367
Masa del ladrillo inyectado en 3D	kg	4.284
Huella de carbono	kg CO ₂ eq	1.572

De igual manera, para el cálculo de la huella de carbono del ladrillo pandereta se toma en cuenta el factor de emisión del ladrillo de arcilla tradicional y se multiplica por el peso del ladrillo pandereta de 1.90 kg (Ladrillos Lark, s.f.) como se observa en la Tabla 20.

Tabla 20

Resultados del cálculo de huella de carbono del ladrillo pandereta

Descripción	Unidad	Total
Factor de emisión CO ₂	kg CO ₂ eq / kg	1.123
Masa del ladrillo pandereta	kg	1.90
Huella de carbono	kg CO ₂ eq	2.133

5. Análisis de resultados

En el presente capítulo del análisis de resultados se divide en tres secciones principales. Primero, se evalúan las propiedades del mortero inyectable en 3D, destacando su comportamiento reológico mediante ensayos de fluencia estática, tixotropía, fluidez y tiempo de fraguado, confirmando su idoneidad para la inyección 3D. En segundo lugar, se analizan las propiedades físicas y mecánicas del ladrillo ecológico inyectado, como la variación dimensional, el alabeo, la absorción de agua, la resistencia a la compresión y la compresión en pilas, evidenciando su cumplimiento con los límites establecidos por la Norma Técnica Peruana E.070 y su competitividad frente al ladrillo de arcilla tradicional. Finalmente, se evalúa su desempeño ambiental mediante un análisis de ciclo de vida en SimaPro en comparación a un ladrillo pandereta tradicional.

5.1. Análisis de resultados de propiedades de la mezcla de mortero inyectable en 3d

5.1.1. Ensayo de fluencia estática

Tabla 21

Análisis de resultados del ensayo de fluencia estática

Esfuerzo de Fluencia Estática		
Valor máximo obtenido	Valores recomendados	Validación
607.120 Pa	500-2500 Pa	Si cumple

En la Tabla 21, del análisis del ensayo de fluencia estática se observa que el valor obtenido está dentro de los márgenes recomendados. Valores altos al inicio como 607.120 Pa indican que el mortero tiene rigidez suficiente para mantener la forma inmediatamente después de ser depositado, lo que es fundamental para la inyección 3D en construcción y fabricación de ladrillos.

5.1.2. Ensayo de tixotropía

Tabla 22

Análisis de resultados del ensayo de tixotropía

Parámetro	Valor obtenido	Valores recomendados	Validación
Esfuerzo de cedencia dinámico	383.27 Pa	208.4–492.7 Pa	Si cumple
Área de histéresis	15,006.16 Pa/s	5,647–49,242 Pa/s	Si cumple
Viscosidad plástica	32.017 Pa·s	16.65–33.31 Pa·s	Si cumple
Tasa de cizallamiento	10.60 s ⁻¹	5 – 10 s ⁻¹	Si cumple

Del análisis de ensayo de tixotropía en la Tabla 22 se obtiene que:

- El esfuerzo de cedencia dinámico se encuentra dentro del rango ideal (208.4–492.7 Pa). Esto garantiza que el material fluya con aplicación de esfuerzo, pero se mantenga estable una vez depositado.
- El área de histéresis supera el mínimo recomendado (5,647–49,242 Pa/s). Esto confirma un buen grado de recuperación estructural tras el cizallamiento.
- La viscosidad plástica se encuentra dentro del rango recomendado (16.65–33.31 Pa·s), lo cual proporciona excelente estabilidad post aplicación, evitando colapsos.
- La tasa de cizallamiento es aceptable para procesos de impresión o inyección que requieren velocidad.

5.1.3. Ensayo de fluidez

Para el ensayo de fluidez, se establece como parámetro que cumpla con un mínimo ideal de 90%, es decir un 10% mayor al mencionado en el estado del arte de 80% en los cuatro tiempos evaluados de 0, 15, 30 y 45 minutos. Esto se hizo con el fin de garantizar la fluidez a través de la inyectora 3D.

Tabla 23*Análisis de resultados del ensayo de fluidez*

T (min)	Fluidez (%)	Valores recomendados (%)	Validación
T = 0	124		Si cumple
T = 15	117	>90	Si cumple
T = 30	104		Si cumple
T = 45	94		Si cumple

En la Tabla 23, los valores indican que el mortero tiene buena fluidez al inicio, teniendo como rango preferentemente de inyección 30-45 minutos para asegurar un buen desempeño en inyección 3D.

5.1.4. Ensayo de tiempo de fraguado

Tabla 24*Análisis de resultados del ensayo de tiempo de fraguado*

Tiempo de fraguado (min)			
T inicial	T final	Valores recomendados	Validación
251	365	45-375	Si cumple

Del ensayo de tiempo de fraguado en la Tabla 24 se observa que los valores obtenidos cumplen con el rango ideal de 45min a 375min. Estos tiempos de fraguado prolongados permiten mayor trabajabilidad y flexibilidad en la producción, especialmente cuando la inyección no es continua o cuando se manejan lotes, facilitando la manipulación y evitando bloqueos en la boquilla.

5.2. Análisis de resultados de propiedades físicas del ladrillo ecológico

Como se ha mencionado, los ensayos realizados poseen un valor mínimo o máximo establecido en la Norma E.070. Por lo cual, se analiza que cada valor obtenido se encuentre dentro del rango normativo.

5.2.1. Variación de dimensiones

Se muestra en la Tabla 25 que el ladrillo inyectado en 3D con ceniza de cáscara de huevo, en promedio, cumple con lo estipulado en la norma E.070. Para el largo, ancho y altura del ladrillo, la norma dice que no se debe sobre pasar $\pm 4\%$, $\pm 6\%$ y $\pm 8\%$ respectivamente.

Tabla 25*Verificación de variación de dimensiones con norma E.070*

LADRILLO I	Medida promedio	Medida específica	Variación dimensional	Variación según norma		Validación
	(mm)	(mm)	(%)	(%)		
Largo	233.69	230.00	-1.61%	<±	4%	Si cumple
Ancho	135.06	130.00	-3.89%	<±	6%	Si cumple
Altura	87.41	90.00	2.88%	<±	8%	Si cumple

5.2.2. Alabeo

Para este ensayo, se toman medidas de las flechas de 10 ladrillos respecto a las diagonales rectas tanto de la cara superior como en la inferior, estando por debajo del máximo establecido en la normativa para un ladrillo tipo I.

Tabla 26*Verificación de alabeo con norma E.070*

LADRILLO I	Medida cara superior (mm)				Medida cara inferior (mm)			
	Convexidad		Concavidad		Convexidad		Concavidad	
	Lado	Lado	Centro	Centro	Lado	Lado	Centro	Centro
	izq.	der.	1	2	izq.	der.	1	2
Promedio (mm)	1.50	1.63	2.50	2.58	1.00	1.33	2.31	3.00
Alabeo máx. según norma (mm)	10							
Validación	Si cumple							

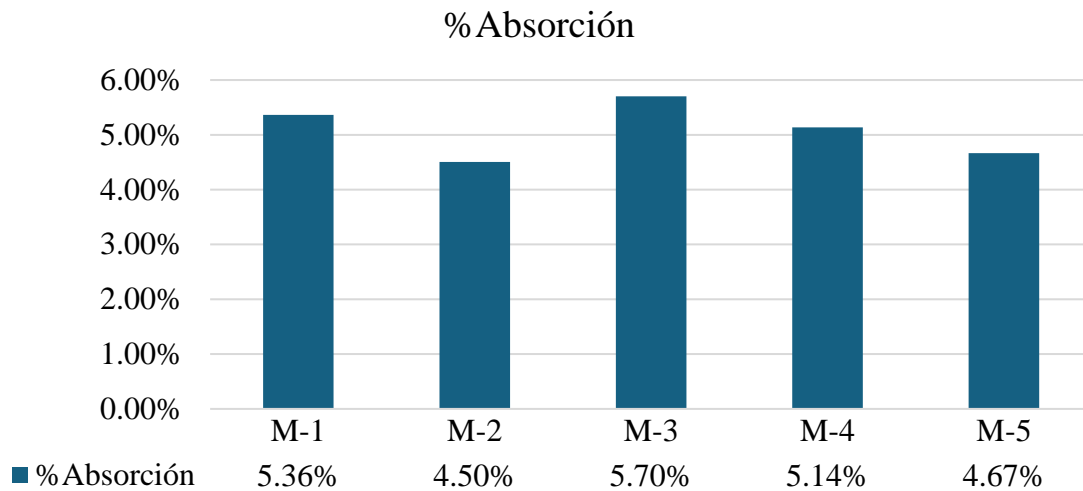
Se observa en la Tabla 26, que los valores obtenidos de los ladrillos fabricados cumplen con el parámetro máximo para la propiedad de alabeo.

5.2.3. Absorción

Para este ensayo la norma no establece ningún valor máximo o mínimo. Sin embargo, en la Figura 7 se puede apreciar que los valores de absorción varían de 4.67% a 5.70%.

Figura 7

Gráfico de comparación de %absorción de ladrillos



5.2.4. Resistencia a la compresión

De los resultados en la Tabla 27 se obtiene que el ladrillo inyectado en 3D con incorporación de ceniza de cáscara de huevo en un porcentaje del 10% como reemplazo del cemento logra cumplir con la resistencia deseada y obteniendo una resistencia a los 28 días de 53.20 kg/cm². Esto lo clasifica como un ladrillo tipo I según su resistencia a compresión.

Tabla 27

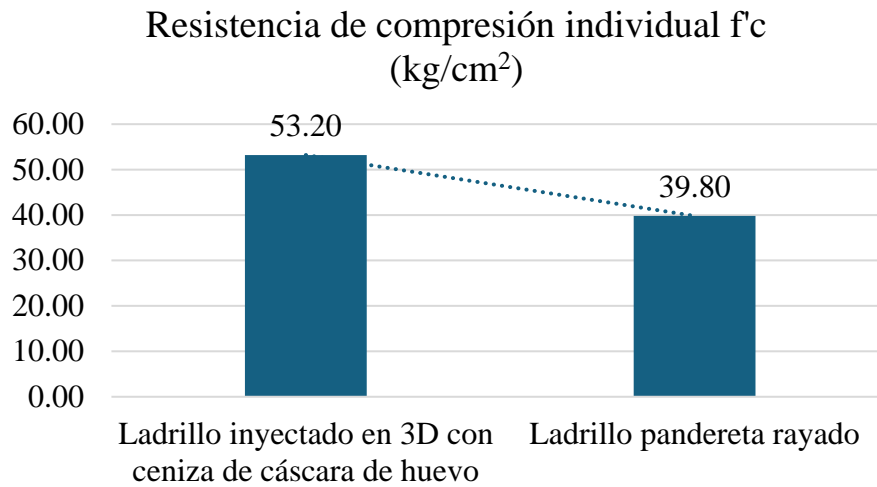
Verificación de resistencia a compresión de ladrillo por norma E.070

Ladrillo I	Ladrillo inyectado en 3D con ceniza de cáscara de huevo	Norma E.070
Resistencia a compresión de ladrillo	53.20 kg/cm ²	>50 kg/cm ²

Asimismo, el ladrillo inyectado en 3D con ceniza de cáscara de huevo obtuvo una mayor resistencia a compresión individual en comparación con el ladrillo pandereta rayado tradicional como se muestra en la Figura 8.

Figura 8

Gráfico de comparación de resistencia a compresión individual de ladrillos

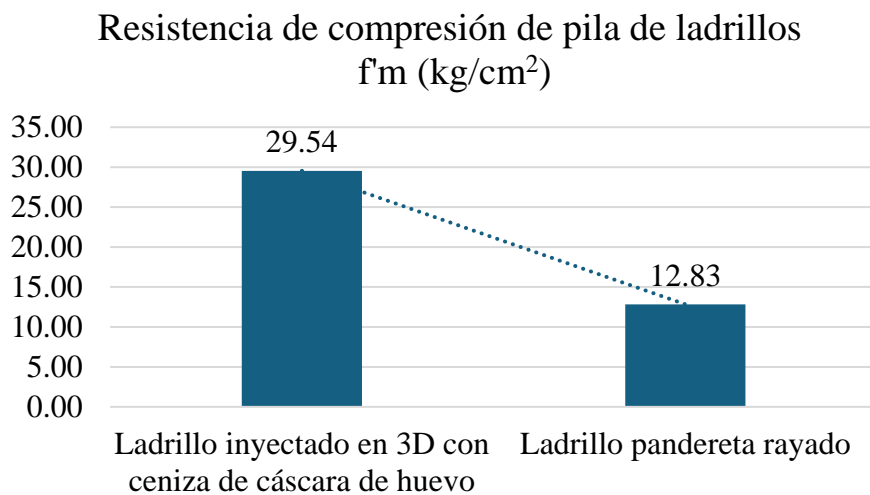


5.2.5. Compresión de pilas de ladrillo

Con respecto al ensayo de pilas, los resultados en la Figura 9 revelan una resistencia de 29.54 kg/cm², superando a la resistencia de compresión de pilas de ladrillo pandereta rayado tradicional de 12.83 kg/cm².

Figura 9

Gráfico de comparación de resistencia a compresión de pila de ladrillos



5.3. Análisis de resultados que evalúen el desempeño ambiental del ladrillo ecológico

En la Tabla 28, el análisis de ciclo de vida de un sistema de cuna a la puerta revela una diferencia de 0.756 kg CO₂/kg de factor de emisión entre el ladrillo inyectado en 3D con

ceniza de cáscara de huevo y el ladrillo pandereta tradicional. Esto a su vez genera una reducción significativa del 26.31% de la huella de carbono del ladrillo inyectado en 3D en comparación con el ladrillo pandereta de arcilla tradicional. La incorporación de cáscara de huevo, especialmente en su forma de ceniza junto a su proceso de fabricación libre de hornos contribuye sustancialmente a la sostenibilidad ambiental en la construcción.

Tabla 28

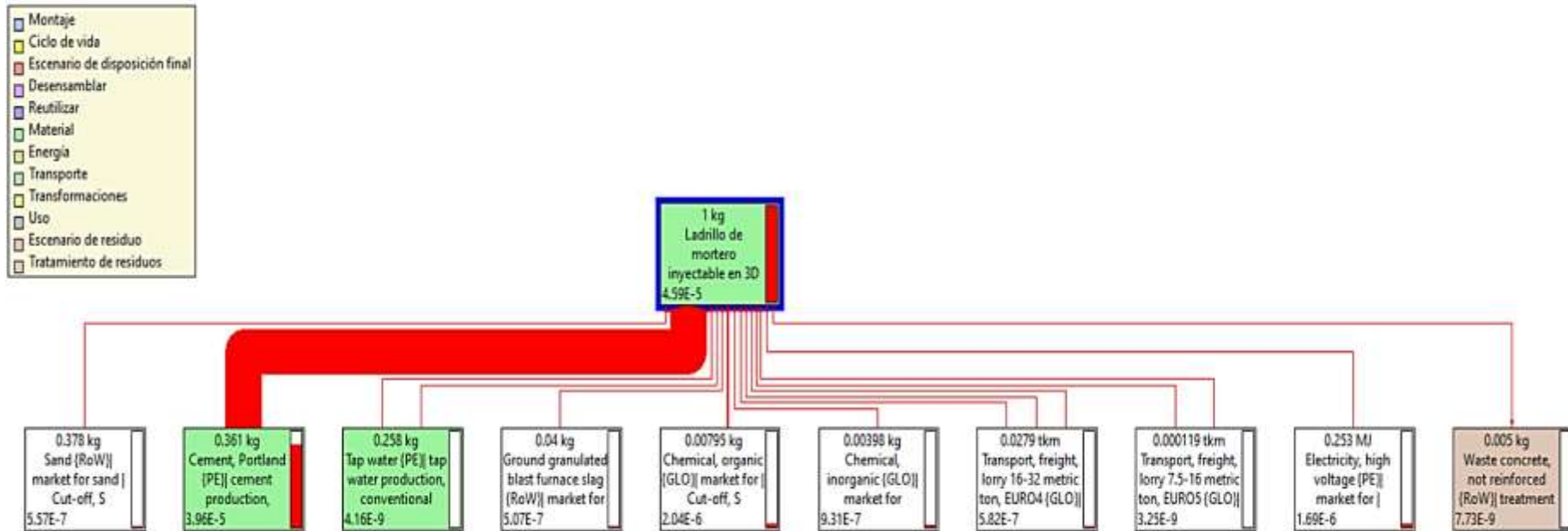
Comparación de cálculo de huella de carbono en ladrillos

Descripción	Huella de carbono (kg CO₂)
Ladrillo inyectado en 3D con ceniza de cáscara de huevo	1.572
Ladrillo pandereta tradicional	2.133

Al examinar las contribuciones caracterizadas de los diferentes flujos de entrada al proceso de producción del ladrillo de mortero inyectable en 3D presentadas en la Figura 10, se evidencia una clara preeminencia del cemento Portland. Su valor asociado, 3.94E-5, no solo supera significativamente las magnitudes observadas para la arena (5.5E-7), el agua (4.16E-9), la escoria granulada de alto horno (5.07E-7) y los diversos aditivos químicos (con valores de 2.04E-6 y 9.81E-7), sino que también sugiere que la etapa de producción del cemento es un factor determinante en la generación del impacto ambiental que se está analizando en este diagrama de flujo.

Figura 10

Gráfico de red de impacto ambiental para 1kg de ladrillo inyectado en 3D con ceniza de cáscara de huevo



Nota. Elaborado a partir de SimaPro.

Esta diferencia subraya la importancia de considerar la intensidad ambiental de la producción de cemento al evaluar la sostenibilidad del ladrillo de mortero inyectable en 3D.

6. Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones derivadas del análisis y discusión de los resultados obtenidos, sintetizando los hallazgos más relevantes y su relación con los objetivos planteados en la investigación.

Objetivo General

Se desarrolló un diseño de ladrillo ecológico a base de mortero con adición de ceniza de cáscara de huevo en reemplazo del cemento en proporción de 10% y con reología modificada que permita su implementación en el sistema de inyección 3D para reducir el impacto ambiental generado por la fabricación de ladrillos tradicionales.

Objetivo Específico 01

Se desarrolló un modelo de eco-ladrillo apto para inyección en 3D. La sencillez de su diseño permite que la inyectora 3D pueda fabricar el ladrillo continuamente sin pausas. El diseño propuesto presenta dimensiones optimizadas para tecnologías de extrusión por inyección, asegurando su producción sin deformaciones durante el proceso de inyección. Además, su volumen de 0.0021 m^3 y su 18% de vacíos contribuye a que cumpla satisfactoriamente con los requisitos establecidos en la Norma Técnica Peruana E.070 para unidades no portantes.

Objetivo Específico 02

En conclusión, los agregados empleados arena fina presentaron una granulometría continua y adecuada, con un módulo de finura de 1.10, con el tamaño máximo de n°30 y el tamaño máximo nominal n°50 lo cual favorece la obtención de una mezcla homogénea, cohesiva y viable para procesos de inyección en 3D. El tamaño de la arena facilita el procesamiento de la mezcla de mortero en la inyectora, evitando obstrucciones. Asimismo, la forma angular de las partículas mejora la adherencia en estado fresco, contribuyendo significativamente a las propiedades reológicas y de estabilidad necesarias para aplicaciones de construcción aditiva.

Objetivo Específico 03

Se incorporó ceniza de cáscara de huevo calcinada a 800 °C en un 10 % del peso del cemento. Esta adición permite una reducción parcial del contenido de cemento, contribuyendo directamente a la disminución del impacto ambiental asociado a su producción. A pesar de esta sustitución, la mezcla de mortero mantiene un desempeño mecánico adecuado, evidenciando el potencial de este residuo agroindustrial como material cementante suplementario.

Objetivo Específico 04

Se diseñó una mezcla de mortero apta para la fabricación de ladrillos ecológicos mediante tecnología de inyección 3D, incorporando ceniza de cáscara de huevo calcinada como reemplazo parcial del cemento. La dosificación obtenida de relación agua/cemento de 0.52 y agregado/cemento de 0.94 junto con el uso de aditivos superplastificante y acelerante permitió alcanzar una fluidez adecuada para su inyección sin obstrucciones y poder adaptarse al diseño y dimensiones del ladrillo.

Objetivo Específico 05

En estado fresco, la evaluación del comportamiento del mortero demostró que la mezcla diseñada cumple con los parámetros recomendados para procesos de inyección 3D. El ensayo de fluencia estática arrojó un esfuerzo de 607.12 Pa, indicando la rigidez necesaria para mantener la forma del material tras su extrusión. La tixotropía de la mezcla presentó un buen desempeño: el esfuerzo de cedencia dinámico (383.27 Pa), la alta área de histéresis (15,006.16 Pa/s) y la elevada viscosidad plástica (32.017 Pa · s) validan su capacidad para recuperar estructura después del cizallamiento, garantizando estabilidad.

Asimismo, el ensayo de fluidez mostró valores superiores al 90% durante los primeros 45 minutos, estableciendo una ventana operativa adecuada para el proceso de inyección sin pérdida de trabajabilidad. Finalmente, los tiempos de fraguado inicial (251 min) y final (365 min) se mantuvieron dentro del rango ideal, brindando suficiente flexibilidad operativa y minimizando el riesgo de obstrucción en equipos de inyección. En conjunto, estos resultados validan la idoneidad de la mezcla para su aplicación en inyección 3D de ladrillos ecológicos.

Objetivo Específico 06

Se concluye que los ladrillos ecológicos inyectados en 3D con incorporación de ceniza de cáscara de huevo cumplen con los parámetros establecidos por la Norma Técnica Peruana E.070 para ladrillos tipo I. La variación dimensional en largo, ancho y altura se mantuvo dentro de los márgenes permitidos, al igual que el alabeo en ambas caras del ladrillo, lo que garantiza la regularidad geométrica necesaria para un buen asentado.

Aunque la norma no establece un valor específico para la absorción, los valores registrados entre 4.67% y 5.70% reflejan un comportamiento aceptable. En cuanto a la resistencia a la compresión, los ladrillos ecológicos alcanzaron 53.20 kg/cm² a los 28 días, superando el mínimo exigido (>50 kg/cm²) y superando además a los ladrillos de arcilla pandereta tradicionales. Esta superioridad también se evidenció en el ensayo de compresión de pilas, donde los ladrillos inyectados alcanzaron 29.54 kg/cm², más del doble que los ladrillos tradicionales con 12.83 kg/cm².

En conjunto, estos resultados confirman que los ladrillos ecológicos inyectados en 3D no solo cumplen con los requisitos normativos, sino que también presentan un mejor desempeño mecánico en comparación con los ladrillos pandereta, lo que respalda su viabilidad como alternativa sostenible y eficiente en la construcción.

Objetivo Específico 07

El análisis de huella de carbono bajo un enfoque de ciclo de vida de cuna a puerta demuestra que el ladrillo ecológico inyectado en 3D con ceniza de cáscara de huevo genera un impacto ambiental considerablemente menor que el ladrillo pandereta tradicional, logrando una reducción del 26.31% en emisiones de CO₂ por producto. Esta mejora ambiental se debe, en gran parte, a la incorporación de un residuo orgánico como la cáscara de huevo en forma de ceniza y a un proceso de fabricación de ladrillos que evita el uso de hornos de cocción. Sin embargo, el análisis de los flujos de entrada revela que el cemento Portland sigue siendo el principal contribuyente a la huella de carbono del ladrillo propuesto, representando la mayor carga ambiental del proceso.

7. Recomendaciones

A partir de las conclusiones obtenidas, en este apartado se formulan recomendaciones orientadas a la mejora de futuras investigaciones y a la aplicación práctica de los resultados en contextos reales.

Objetivo General

Mitigar la contaminación ambiental producida por la fabricación de ladrillos de arcilla tradicionales diseñando un ladrillo ecológico inyectable en 3D incorporando ceniza de cáscara de huevo como reemplazo parcial del cemento.

- Se sugiere que futuras investigaciones exploren el uso de cáscaras de huevo en distintos tamaños y como reemplazo de agregados.
- Se recomienda investigar y probar nuevos diseños de mezcla que incluyan adiciones y aditivos alternativos, con el objetivo de mejorar las propiedades del mortero en términos de fluidez, resistencia y durabilidad.

Objetivo Específico 1

Diseñar un modelo de ladrillo ecológico garantizando su inyectabilidad para que cumpla con la Norma Técnica Peruana E.070.

- Se recomienda diseñar nuevos modelos de ladrillos utilizando diferentes formas de boquillas para la inyectora 3D, con el objetivo de mejorar la resistencia del elemento estructural y reducir su peso.
- Se recomienda mantener una velocidad de extrusión constante y controlada, adaptada al diseño del ladrillo y al tiempo de fraguado inicial.

Objetivo Específico 2

Evaluar las propiedades de los agregados a utilizarse en la mezcla de mortero inyectable en 3D.

- Se recomienda utilizar agregados cuyos finos no excedan el porcentaje permitido de partículas pasantes por la malla #200, ya que puede disminuir la resistencia mecánica del ladrillo final.
- Se sugiere trabajar con un tamaño de agregado acorde con el diámetro de la boquilla de la inyectora, a fin de evitar obstrucciones y daños en el equipo.

- Se recomienda realizar ensayos periódicos de granulometría y limpieza de agregados para garantizar la uniformidad en la mezcla y evitar variaciones en la reología del mortero.

Objetivo Específico 3

Utilizar el 10% del porcentaje de adición de ceniza de cáscara de huevo como reemplazo parcial del cemento en la mezcla de mortero para un ladrillo ecológico inyectable en 3D.

- Se recomienda tener precaución al tamizar o triturar las cáscaras de huevo, ya que, aunque no son materiales tóxicos, la inhalación de partículas finas en grandes cantidades puede irritar los pulmones y las vías respiratorias. Para minimizar este riesgo, se debe utilizar equipo de protección adecuado, como mascarillas respiratorias, y realizar el proceso en un área bien ventilada, garantizando así la seguridad del operario durante el manejo del material.
- Se recomienda evaluar la compatibilidad entre los aditivos empleados y su relación con los tiempos de fraguado y endurecimiento, con el fin de obtener una ganancia temprana de resistencia sin comprometer la fluidez de la mezcla.

Objetivo Específico 4

Diseñar una mezcla de mortero para un ladrillo ecológico inyectable en 3D utilizando ceniza de cáscara de huevo como componente reemplazo del cemento.

- Se recomienda la inclusión de un aditivo superplastificante en la formulación del mortero para optimizar su comportamiento tixotrópico.
- Es esencial considerar un margen de error o desperdicio al calcular la dosificación de los materiales necesarios para cada diseño de mezcla.

Objetivo Específico 5

Evaluar las propiedades de la mezcla del mortero para ladrillos ecológicos inyectados en 3D en estado fresco.

- Es recomendable monitorear la temperatura y la humedad del ambiente durante la inyección, ya que los cambios en las condiciones ambientales pueden afectar la trabajabilidad del mortero y la calidad final del ladrillo inyectado.

- Se recomienda observar la apariencia de la mezcla al ser extruida por la inyectora 3D para identificar la formación de grietas, mejorando así la cohesión y apariencia del producto final.

Objetivo Específico 6

Medir los parámetros físicos y mecánicos de los eco ladrillos inyectados en 3D, de tal manera que los resultados se encuentren dentro de la Norma Técnica Peruana E.070 y compararlos con ladrillos de arcilla pandereta tradicionales.

- Para obtener resultados precisos en los ensayos de variación de dimensiones y alabeo, es crucial configurar adecuadamente la inyectora en base a las medidas del ladrillo, a fin de evitar deformaciones en la forma de los ladrillos.
- Es recomendable llevar a cabo un proceso de curado adecuado, preferiblemente mediante la inmersión en agua, con el propósito de minimizar la dispersión de los resultados en los ensayos.
- Se recomienda verificar que el laboratorio en el que se realicen los ensayos cumpla rigurosamente con las normas NTP y la norma técnica E.070, ya que cualquier desviación podría comprometer la validez de los resultados.

Objetivo Específico 7

Evaluar el impacto ambiental generado por el ladrillo propuesto mediante el cálculo de su huella de carbono.

- Se recomienda ampliar el análisis de huella de carbono para incluir las etapas de transporte, uso y disposición final del ladrillo, obteniendo así una visión integral del ciclo de vida del producto.
- Se recomienda investigar alternativas de sustitución parcial adicional del cemento Portland mediante otros subproductos industriales, con el fin de reducir aún más las emisiones de CO₂.

Referencias

- Abdallah, Y., & Estévez, A. (2021). 3D-printed biodigital clay bricks. *Biomimetics*, 6(4). <https://doi.org/10.3390/biomimetics6040059>
- Abudawaba, F., Gomaa, E., Gheni, A., Feys, D., & ElGawady, M. (2025). Evaluation of fresh properties of high calcium content fly ash-based alkali-activated 3D-Printed mortar. *Journal of Building Engineering*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112244>
- Alarcón, R., Paitan, R., & Valdivia, S. (2020). *Desarrollo de un plan de negocios para la fabricación, promoción y venta de Ladrillos Ecológicos* [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/654677>
- American Concrete Institute. (2006, 21 de octubre). *About ACI*. American Concrete Institute Always Advancing. Recuperado el 10 de octubre de 2023, de <https://www.concrete.org/aboutaci.aspx>
- American Society for Testing and Materials International. (2020). *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar* (Norma ASTM C1437-20). <https://store.astm.org/c0191-21.html>
- American Society for Testing and Materials International. (2021). *Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle* (Norma ASTM C191-21). <https://store.astm.org/c0191-21.html>
- Cheng, B., Lu, K., Li, J., Chen, H., Luo, X., & Shafique, M. (2022). Comprehensive assessment of embodied environmental impacts of buildings using normalized environmental impact factors. *Journal of Cleaner Production*, 334. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.130083>
- Chinga, C., & Zambrano, D. (2022). *Evaluación de las emisiones de monóxido de carbono en la producción de ladrillos en el sector Tres Marías – Chone* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López]. Repositorio ESPAM MFL. <http://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/1797>
- Cordero, N. (2021). *Estudio de factibilidad para la producción y comercialización de ladrillos ecológicos hechos de residuos de construcción y demolición* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/20103>

- Economía. (2022, 22 de julio). *Construcción se estanca en el primer semestre y decrecería al cierre del año por crisis política*. Recuperado el 01 de abril de 2023, de <https://www.revistaeconomia.com/construccion-se-estanca-en-el-primer-semestre-y-decreceria-al-cierre-del-ano-por-crisis-politica/>
- El-Mahdy, D., Gabr, H., & Abdelmohsen, S. (2021). SaltBlock as a 3D printed sustainable construction material in hot arid climates. *Journal of Building Engineering*, 43. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103134>
- Falliano, D., De Domenico, D., Ricciardi, G., & Gugliandolo, E. (2020). 3D-printable lightweight foamed concrete and comparison with classical foamed concrete in terms of fresh state properties and mechanical strength. *Construction and Building Materials*, 254. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119271>
- Gabarró, J. (s.f.). *Análisis del ciclo de vida: Normas ISO*. Normes ISO. Recuperado el 13 de julio de 2023, de <https://iso.cat/es/analisis-del-ciclo-de-vida/>
- Gómez, J. (2022). *Evaluación de las propiedades térmicas, reológicas y mecánicas de mezclas entre HDPE virgen con HDPE reciclado* [Tesis de maestría, Universidad EAFIT]. Repositorio de la Universidad EAFIT. <https://repository.eafit.edu.co/entities/publication/3a071fb5-1cb8-4932-ab5e-7b24c9bae422>
- Haque, S., Shahriar, M., Nahar, N., & Haque, M. (2022). Impact of brick kiln emissions on soil quality: A case study of Ashulia brick kiln cluster, Bangladesh. *Environmental Challenges*, 9. <https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2022.100640>
- Hertwig, L., & Holschemacher, K. (2020). Rheological investigations on maximum fibre content for injecting high-performance mortars. *En Abstracts of the fib Symposium 2020*, 1, 232–239. https://www.researchgate.net/publication/346398029_Rheological_investigations_on_maximum_fibre_content_for_injecting_high-performance_mortars
- Ibrahim, J., Kotova, O., Sun, S., Kurovics, E., Tihtih, M., & Gömze, L. (2022). Preparation of innovative eco-efficient composite bricks based on zeolite-poor rock and Hen's eggshell. *Journal of Building Engineering*, 45. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103491>
- Ibrahim, J., Tihtih, M., & Gömze, L. (2021). Environmentally friendly ceramic bricks made from zeolite-poor rock and sawdust. *Construction and Building Materials*, 297. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123715>

- Instituto Nacional de Calidad. (2002a). *Unidades de albañilería. Métodos de muestreo y ensayo de unidades de albañilería de concreto*. (Norma Técnica Peruana 399.604). <https://salalecturavirtual.inacal.gob.pe:8098/>
- Instituto Nacional de Calidad. (2002b). *Agregados. Método de ensayo normalizado para determinar materiales más finos que pasan por el tamiz normalizado 75 um (N°200) por lavado en agregados* (Norma Técnica Peruana 400.018). <https://salalecturavirtual.inacal.gob.pe:8098/>
- Instituto Nacional de Calidad. (2003). *Unidades de albañilería. Método de ensayo para la determinación de la resistencia en compresión de prismas de albañilería*. (Norma Técnica Peruana 399.605:2003). <https://salalecturavirtual.inacal.gob.pe:8098/>
- Instituto Nacional de Calidad. (2013a). *Agregados. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global* (Norma Técnica Peruana 400.012). <https://salalecturavirtual.inacal.gob.pe:8098/>
- Instituto Nacional de Calidad. (2013b). *Agregados. Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado* (Norma Técnica Peruana 339.185). <https://salalecturavirtual.inacal.gob.pe:8098/>
- Instituto Nacional de Calidad. (2013c). *Agregados. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino* (Norma Técnica Peruana 400.022). <https://salalecturavirtual.inacal.gob.pe:8098/>
- Instituto Nacional de Calidad. (2014). *Concreto. Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento Portland. Requisitos* (Norma Técnica Peruana 339.088). <https://salalecturavirtual.inacal.gob.pe:8098/>
- Instituto Nacional de Calidad. (2017). *Unidades de albañilería. Métodos de muestreo y ensayo de ladrillos de arcilla usados en albañilería* (Norma Técnica Peruana 399.613:2017). <https://salalecturavirtual.inacal.gob.pe:8098/>
- Jo, J., Jo, B., Cho, W., & Kim, J. (2020). Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14, 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0388-2>
- Kana, R., & Malaga, G.(2018). *Análisis de riesgo a la salud por exposición de cenizas de carbón de piedra en las ladrilleras artesanales en Yarabamba–Arequipa 2018*

- [Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica del Perú]. Repositorio Institucional de la UTP. <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/1939>
- Kolawole, J., Combrinck, R., & Boshoff, W. (2019). Measuring the thixotropy of conventional concrete: The influence of viscosity modifying agent, superplasticiser and water. *Construction and Building Materials*, 225, 853–867. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.240>
- Koryanova, Y. (2017). Structure and properties of concrete for injection with two-stage expansion. *Solid State Phenomena*, 265, 103–108. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.265.103>
- Ladrillos Lark. (s.f.). *Ladrillos para muro: pandereta acanalada*. Recuperado el 13 de noviembre del 2023, de <https://ladrilloslark.pe/productos/pandereta-acanalada/>
- Ladrillos Pirámide. (2019, 12 de julio). *Las cosas claras, aquí entregamos fichas técnicas, ¡certificados de calidad y ensayos mecánicos para nuestros ladrillos portantes!* Facebook. Recuperado el 4 de octubre del 2023, de <https://www.facebook.com/LadrillosPiramidePeru/posts/1359119464263718/>
- Lavarello, S., & Tello, J. (2024). *Propuesta de morteros especiales a reología modificada para la construcción de viviendas con el sistema de impresión 3D en la ciudad de Lima Metropolitana* [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/673188?show=full>
- Lee, K.-W., Lee, H.-J., & Choi, M.-S. (2022). Correlation between thixotropic behavior and buildability for 3D concrete printing. *Construction and Building Materials*, 347. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128498>
- Li, Y., Shen, J., Lin, H., Lv, J., Feng, S., & Ci, J. (2022). Properties and environmental assessment of eco-friendly brick powder geopolymer binders with varied alkali dosage. *Journal of Building Engineering*, 58. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.105020>
- Lv, H., Liu, H., Zhang, C., Wang, Y., Han, M., & Tan, Y. (2023). *Characterization of the healing potential of asphalt binders with separation of thixotropy after cyclic loading*. *Construction and Building Materials*, 370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130686>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2020, 10 de diciembre). *Normas técnicas peruanas*. Midagri. Recuperado el 21 de septiembre de 2023, de

<https://www.midagri.gob.pe/portal/193-exportaciones/importancia-de-la-calidad-en-las-agroexportaciones/695-normas-tecnicas-peruanas#:~:text=Las%20Normas%20T%C3%A9cnicas%20Peruanas%20son,aplicaci%C3%B3n%20de%20car%C3%A1cter%20voluntario.>

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2021, 4 de noviembre). *Reglamento nacional de edificaciones – RNE*. Gob.pe. Recuperado el 21 de septiembre de 2023, de <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/informes-publicaciones/2309793-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>
- Ministerio del Ambiente. (2022, 27 de febrero). *Minam intensifica acciones de supervisión ambiental en ladrilleras en Huachipa*. Gob.pe. Recuperado el 01 de abril de 2023, de <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/586647-minam-intensifica-acciones-de-supervision-ambiental-en-ladrilleras-de-huachipa>
- Moeini, M., Hosseinpoor, M., & Yahia, A. (2022). 3D printing of cement-based materials with adapted buildability. *Construction and Building Materials*, 337. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127614>
- Municipalidad Metropolitana de Lima. (2021). *Caso: Ladrilleras de Huachipa - Distrito Lurigancho Chosica* [Diapositivas de PowerPoint]. <https://smia.munlima.gob.pe/uploads/documento/e1727ff331428ec7.pdf>
- Munir, J., Kazmi, S., Gencel, O., Ahmad, M., & Chen, B. (2021). Synergistic effect of rice husk, glass and marble sludges on the engineering characteristics of eco-friendly bricks. *Journal of Building Engineering*, 42. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102484>
- Ngayakamo, B., & Onwualu, A. (2022). Recent advances in green processing technologies for valorisation of eggshell waste for sustainable construction materials. *Heliyon*, 8(6). <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E09649>
- Ngayakamo, B., Bello, A., & Onwualu, A. (2020). Development of eco-friendly fired clay bricks incorporated with granite and eggshell wastes. *Environmental Challenges*, 1. <https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2020.100006>
- Ngayakamo, B., Komadja, C., Bello, A., & Onwualu, A. (2021). Valorization of granite micronized stones wastes for eco-friendly production of fired clay bricks. *SN Applied Sciences*, 3(11). <https://doi.org/10.1007/S42452-021-04828-6>
- Organización Internacional de Normalización. (2017). *Investigación y ensayos geotécnicos. Identificación y clasificación del suelo. Parte 1: Identificación y*

- descripción* (Norma ISO 14688-1:2017).
<https://www.iso.org/standard/66345.html>
- Ortega, V., & Vásquez, F. (2024). *Proyecto para la creación de una empresa fabricante de ladrillos ecológicos hechos con plástico reciclado y cemento para ser utilizados en el área de la construcción en la provincia de Imbabura* [Tesis de maestría, Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui]. Repositorio ISTER. <https://repositorio.ister.edu.ec/handle/68000/333>
- Pasupathy, K., Ramakrishnan, S., & Sanjayan, J. (2023). 3D concrete printing of eco-friendly geopolymer containing brick waste. *Cement and Concrete Composites*, 138. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2023.104943>
- Picón, D. (2023). *Caso de Estudio: Oportunidades de Negocio Para la Empresa Ladrillera Casablanca Frente a los Avances de la Reapertura de la Frontera Colombo - Venezolana* [Trabajo de grado - Pregrado, Universidad de Santander]. Repositorio UDES. <https://repositorio.udes.edu.co/handle/001/10170>
- Rahul, A., Santhanam, M., Meena, H., & Ghani, Z. (2019). 3D printable concrete: Mixture design and test methods. *Cement and Concrete Composites*, 97, 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.014>
- Reyes, H. (2018). *Estudio de las características del hormigón para su uso en una máquina de impresión* [Tesis de licenciatura, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/153009>
- Reynaga, W., & Rodriguez, D. (2022). *Propuesta de un eco-ladrillo con escoria de acero y material de reciclaje PET para uso de tabiquería, con el fin de reducir el impacto ambiental ocasionado por la fabricación de ladrillos de arcilla en Lima* [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/659186>
- Saavedra, L. A., Quintero, M. C., & Pulido, J. A. (2023). Responsabilidad social empresarial: Aproximación desde la ingeniería industrial al caso de las ladrilleras artesanales en zonas veredales del Valle del Cauca, Colombia. *Ingeniería y Competitividad*, 25(1). <https://doi.org/10.25100/iyv.v25i1.12282>
- Sáenz, L. (2016). *Comportamiento sísmico de tabiques construidos con ladrillos pandereta* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú].

- Repositorio Institucional PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/items/19dda568-69ff-47ef-8e60-2ce0f0ad6aa8>
- Sangiorgio, V., Parisi, F., Fieni, F., & Parisi, N. (2022). The New Boundaries of 3D-Printed Clay Bricks Design: Printability of Complex Internal Geometries. *Sustainability*, *14*(2). <https://doi.org/10.3390/su14020598>
- Sathiparan, N. (2021). Utilization prospects of eggshell powder in sustainable construction material – A review. *Construction and Building Materials*, *293*. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123465>
- Seminario, R. (2013). *Variabilidad de las propiedades de los ladrillos industriales de 18 huecos en la ciudad de Piura* [Tesis de pregrado, Universidad de Piura]. Repositorio Institucional PIRHUA. <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/1749>
- Seo, J.-S., Lee, B.-C., & Kim, Y.-Y. (2020). Uniformity and accuracy of mortar layer thickness for the quality evaluation of 3D printer output. *Journal of the Korea Concrete Institute*, *32*(4), 371–377. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2020.32.4.371>
- Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. (2020, 29 de julio). *Norma E.070 Albañilería*. Gob.pe. <https://www.gob.pe/institucion/sencico/informes-publicaciones/887225-normas-del-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>
- Sika. (s.f.-a). *SikaCEM Plastificante*. Recuperado el 10 de diciembre de 2024, de <https://per.sika.com/es/construccion/aditivos-autoconstruccion/plastificantes-concreto/sikacem-plastificante.html>
- Sika. (s.f.-b). *SikaCEM Acelerante PE*. Recuperado el 10 de diciembre de 2024, de <https://per.sika.com/es/construccion/aditivos-autoconstruccion/acelerante-concreto/sikacem-acelerantepe.html>
- Solís-Carcaño, R., Moreno, E., & Arcadia-Abad, C. (2008). Study of the concrete's compressive strength due to the combined effect of the water-cement ratio, the coarse-fine aggregate ratio and the source of the aggregates. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, *31*(3), 213-224. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702008000300002&lng=es&tlng=
- Sulen, C., Celis, D., Rodriguez, S., & Muñoz, M. (2024). Sustainable concrete design using brown chicken eggshell to reduce carbon footprint. *Proceedings of the 9th*

- International Conference on Civil Structural and Transportation Engineering*, 243. <https://doi.org/10.11159/iccste24.243>
- Surul, O., Bilir, T., Gholampour, A., Sutcu, M., Ozbakkaloglu, T., & Gencel, O. (2020). Recycle of ground granulated blast furnace slag and fly ash on eco-friendly brick production. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(5), 1738–1756. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1731714>
- Tang, Z., Li, W., Tam, V., & Xue, C. (2020). Advanced progress in recycling municipal and construction solid wastes for manufacturing sustainable construction materials. *Resources, Conservation & Recycling*: X, 6. <https://doi.org/10.1016/J.RCRX.2020.100036>
- Tarhan, Y., Tarhan, İ., & Şahin, R. (2025). Comprehensive review of binder matrices in 3D printing construction: Rheological perspectives. *Buildings*, 15(1), 75. <https://doi.org/10.3390/buildings15010075>
- Unicon. (s.f.). *Ladrillos de concreto*. Recuperado el 10 de julio de 2024, de <https://www.unicon.com.pe/prefabricados/ladrillos-konkreto/>
- Valente, M., Sibai, A., & Sambucci, M. (2019). Extrusion-based additive manufacturing of concrete products: Revolutionizing and remodeling the construction industry. *Journal of Composites Science*, 3(3). <https://doi.org/10.3390/jcs3030088>
- Wahab, R., Mohammad, M., Mazlan, M., Yaki, A., Bahari, N., Fadzli, S., Zahanis, Z., & Zaid, M. (2023). Study on the physical and mechanical properties of low energy consumption fired industrial waste clay bricks from eggshells and rice husks. *Materials Today: Proceedings*, 75, 79–83. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.10.083>
- Wang, W., Gan, Y., & Kang, X. (2021). Synthesis and characterization of sustainable eco-friendly unburned bricks from slate tailings. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 1697–1708. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.07.071>
- Weng, Y., Li, M., Tan, M., & Qian, S. (2018). Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model. *Construction and Building Materials*, 163, 600–610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.112>
- Zhang, C., Deng, Z., Chen, C., Zhang, Y., Mechtcherine, V., & Sun, Z. (2022). Predicting the static yield stress of 3D printable concrete based on flowability of paste and thickness of excess paste layer. *Cement and Concrete Composites*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104494>

- Zhang, C., Nerella, V., Krishna, A., Wang, S., Zhang, Y., Mechtcherine, V., & Banthia, N. (2021). Mix design concepts for 3D printable concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104155>
- Zhang, Y., Zhang, Y., She, W., Yang, L., Liu, G., & Yang, Y. (2019). Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. *Construction and Building Materials*, *201*, 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061>

Anexo(s)

Anexo A: Evidencia del daño de la emisión de gases nocivos a la salud de la población

Figura 11

Pequeñas manchas en los pulmones de uno de los colaboradores expuestos a cenizas de carbón de piedra en las ladrilleras artesanales en Yarabamba



Nota. De “Análisis de Riesgo a la Salud por Exposición de Cenizas de Carbón de Piedra en las Ladrilleras Artesanales en Yarabamba–Arequipa 2018”, por R. Kana y G. Malaga, 2019 (<https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/1939>).

Anexo B: Información detallada de los tipos de ladrillos en el mercado peruano

Figura 12

Tipos de ladrillos

LADRILLOS PARA MUROS Y TABIQUERÍAS

Los ladrillos King Kong son ideales para la construcción de muros portantes, los cuales soportan la carga de los techos. Además se usan en la construcción de cercos.

Ladrillo King kong 30%

- Medidas (cm): 24 x 13 x 9
- Unidades x m²: 38
- Peso kg.: 3.9
- Resistencia kg/cm²: 230

Ladrillo King kong 18

- Medidas (cm): 23 x 12.5 x 9
- Unidades x m²: 39
- Peso kg.: 3.8
- Resistencia kg/cm²: 202

Ladrillo Bloqueta 8

- Medidas (cm): 34 x 8 x 38
- Unidades x m²: 14
- Peso kg.: 4.0

Los ladrillos Pandereta son ideales para la construcción de muros divisorios y tabiques los cuales son para separar los ambientes de la casa

Ladrillo Pandereta Lisa

- Medidas (cm): 23 x 11 x 8.4
- Unidades x m²: 38
- Peso kg.: 2.2

Ladrillo Pandereta Raya

- Medidas (cm): 23 x 11 x 9.4
- Unidades x m²: 38
- Peso kg.: 2.2

Ladrillo Tabicón

- Medidas (cm): 25 x 8 x 35
- Unidades x m²: 24
- Peso kg.: 3.3

LADRILLOS PARA TECHOS TRADICIONALES Y VIGUETAS

Ladrillos para sistema tradicional de techos de losa aligerada de luces y de cargas menores o mayores, dependiendo del área de techado

Ladrillo Hueco 20 Raya

- Medidas (cm): 30 x 30 x 20
- Unidades x m²: 23
- Peso kg.: 9.8

Ladrillo Hueco 12 Liso/Raya

- Medidas (cm): 30 x 30 x 12
- Unidades x m²: 9
- Peso kg.: 6.7

Ladrillo Hueco 15 Liso/Raya

- Medidas (cm): 30 x 30 x 15
- Unidades x m²: 9
- Peso kg.: 7.8

Ladrillo Hueco 8

- Medidas (cm): 30 x 30 x 8
- Unidades x m²: 9
- Peso kg.: 4.6

Ladrillos Bovedilla se usan en la construcción de techos con sistema de viguetas de concreto prensado.

Ladrillo Fontanella Bovedilla 15

- Medidas (cm): 20 x 36.5 x 15
- Unidades x m²: 10
- Peso kg.: 7.5

Ladrillo Fontanella Bovedilla 20

- Medidas (cm): 20 x 36.5 x 20
- Unidades x m²: 10
- Peso kg.: 10.15

LADRILLOS ACABADO DECORATIVO

El ladrillo Caravista es un ladrillo para acabado decorativos y arquitectónicos.

Ladrillo Caravista 9

- Medidas (cm): 24 x 12 x 9
- Unidades x m²: 38
- Peso kg.: 3.0

Ladrillos para la protección de los techos finales, protege de la lluvia y absorbe y disipa la temperatura del sol de verano. Asimismo, aísla la humedad durante la época de invierno.

Ladrillo Pastelero

- Medidas (cm): 24 x 24 x 3
- Unidades x m²: 16
- Peso kg.: 2.4

Ladrillo Caravista 6

- Medidas (cm): 24 x 12 x 6
- Unidades x m²: 53
- Peso kg.: 2.0

Teja Colonial

- Medidas (cm): 35 x 13.8 x 17.8 x 1
- Unidades x m²: 30
- Peso kg.: 1.8

La información técnica es resultado de datos promedios, pudiendo variar según el lote de producción. Los diferentes modelos de ladrillos tienen una absorción 18% y no presentan eflorescencia. Todos nuestros productos cumplen con las Normas Técnicas Peruanas (NTC) por lo cual obtenemos un ladrillo de alta calidad y más resistente.

Nota. De “Las cosas claras, aquí entregamos fichas técnicas, certificados de calidad y ensayos mecánicos para nuestros ladrillos portantes! ¿Deseas el mejor ladrillo?”, por Ladrillos Pirámide, 2019 (<https://www.facebook.com/LadrillosPiramidePeru/posts/1359119464263718/>).

Anexo E: Análisis económico del ladrillo ecológico inyectado en 3D

Tabla 29

Resultados del análisis económico del ladrillo inyectado en 3D

Rendimiento	137	u/día		Jornada (horas)	8
Unidad	u			Costo unitario (S/.)	3.532
Descripción /Recursos	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Costo (S/.)	Parcial (\$)
Mano de obra					1.138
Peón	hh	1	0.0584	19.49	1.138
Materiales					1.519
Cemento Portland tipo I	bls		0.0363	23.75	0.862
Ceniza de cáscara de huevo	kg		0.1713	0.6	0.103
Agua	m ³		0.0009	6.24	0.006
Arena fina	m ³		0.0006	29.17	0.018
Aditivo plastificante	kg		0.0343	10.2	0.350
Aditivo acelerante	kg		0.0171	10.61	0.182
Equipos					0.875
Inyectora 3D	HM		0.0583	15	0.875

Tabla 30

Análisis económico de los ladrillos: comparación de análisis económico del ladrillo ecológico con cáscara de huevo

Descripción	Precio
Ladrillo fabricado con molde	S/3.409
Ladrillo inyectado en 3D	S/3.532
Ladrillo pandereta rayado	S/0.85

Anexo F: Resultados de mezclas de mortero descartadas

Tabla 31

Combinaciones descartadas de mezclas de mortero

Dosificación mezclas mortero	agua/cemento	agreg/cemento	SP (kg)	Acelerante (kg)
X1	0.55	1.23	0.02	0.01

Dosificación mezclas mortero	agua/cemento	agreg/cemento	SP (kg)	Acelerante (kg)
Z1	0.55	1.15	0.02	0.01
Z2	0.55	1.08	0.02	0.01
Z3	0.55	1.01	0.02	0.01

Tabla 32

Resultados de fluidez de mezclas descartadas

%Fluidez						
Mezclas de mortero	0min	40min	60min	1h30min	Rango	Validación
X1	89	77	72	55	>90%	No cumple
Z1	109	97	85	75		No cumple
Z2	112	107	94	87		No cumple
Z3	117	114	97	87		No cumple