



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Arquitectura, Ingenierías Civil y del Ambiente Escuela Profesional de Arquitectura

Evaluación de la viabilidad físico-mecánica, económica y ambiental de un ladrillo de concreto con caucho reciclado y perlita expandida, con análisis de conductividad térmica mediante simulación en Abaqus, y su aplicación en un módulo de vivienda unifamiliar en la ciudad de Arequipa.

Tesis presentada por:

Flores Ticona, Yanela Yanira

ORCID: 0009-0002-1962-7594

Bolaños Rado, Romario

ORCID: 0009-0006-8034-6811

para optar el Título Profesional de Arquitecto

Asesora:

Mg. Carrillo Pinto, Alejandra

ORCID: 0000-0002-8531-0045

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ARQUITECTURA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 22 de Abril del 2026

Dictamen: 003878-C-EPA-2026

Visto el borrador del expediente 003878, presentado por:

2015100842 - FLORES TICONA YANELA YANIRA

2015400141 - BOLAÑOS RADO ROMARIO

Titulado:

EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD FÍSICO-MECÁNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE UN LADRILLO DE CONCRETO CON CAUCHO RECICLADO Y PERLITA EXPANDIDA, CON ANÁLISIS DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA MEDIANTE SIMULACIÓN EN ABAQUS, Y SU APLICACIÓN EN UN MÓDULO DE VIVIENDA UNIFAMILIAR EN LA CIUDAD DE AREQUIPA.

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

ARQUITECTO

**29202806 - MARQUEZ ARRISUEÑO VICTOR EDUARDO
DICTAMINADOR**



**42620399 - FUENTES LOPEZ CYNTHIA PATRICIA
DICTAMINADOR**



**29582067 - VELAZCO GUTIERREZ MARISOL
DICTAMINADOR**



EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD FÍSICO-MECÁNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE UN LADRILLO DE CONCRETO CON CAUCHO RECICLADO Y PERLITA EXPANDIDA, CON ANÁLISIS DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA MEDIANTE SIMULACIÓN EN ABA

INFORME DE ORIGINALIDAD

15%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

Submitted to Universidad Católica de Santa
María

Trabajo del estudiante

4%

2

hdl.handle.net

Fuente de Internet

3%

3

repositorio.uandina.edu.pe

Fuente de Internet

1%

4

repositorio.unc.edu.pe

Fuente de Internet

1%

5

tesis.ucsm.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

6

Submitted to Universidad Andina del Cusco

Trabajo del estudiante

<1%

7

repositorio.upn.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

Dedicatoria

“Dedico este trabajo a mis padres, con amor y gratitud eternos. Su paciencia infinita, apoyo incondicional y sacrificios fueron el pilar fundamental que me permitió crecer como profesional y persona. Esta tesis es un tributo a su fe en mí y a su guía constante.

Agradezco a Dios por haberme guiado hacia la arquitectura, una vocación que amo y me apasiona. No concibo estar en un ámbito distinto al de la creación y el diseño.

Finalmente, un agradecimiento especial a mi hermana, Amanda; gracias por ser mi apoyo desde el primer día, por sostenerme en los momentos difíciles y por entender lo que nadie más veía. Este logro es, en gran parte, de ustedes.”

Yanira Flores

“Dedico este trabajo a mis padres que me dieron la oportunidad de crecer como persona y como profesional durante estos años, Gracias a ellos pude terminar esta Carrera tan hermosa, donde aprendí muchas cosas durante esos años universitarios y dedicar esta tesis con mucho amor y cariño para mis padres”

Romario Bolaños Rado

RESUMEN

La acumulación de neumáticos fuera de uso (NFU) representa un problema ambiental relevante en el Perú y particularmente en Arequipa, lo que impulsa la búsqueda de alternativas de valorización en el sector construcción. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo fabricar y evaluar la viabilidad físico-mecánica, térmica, económica y ambiental de un ladrillo de concreto con adición de caucho reciclado y perlita expandida, incorporando además su aplicación en un módulo de vivienda unifamiliar mediante análisis estructural, bioclimático y económico-ambiental.

Se desarrolló un diseño experimental cuantitativo con 13 dosificaciones (Patrón y diseños A–L), variando porcentajes de caucho (5%, 10% y 15%) y perlita (0%, 5%, 10% y 15%) respecto al volumen total. Se realizaron ensayos mecánicos en probetas (7, 14 y 28 días), evaluación de unidades, pilas y muretes, pruebas físicas y simulaciones térmicas en ABAQUS bajo escenarios de 10 °C, 25 °C, 50 °C e incendio.

El diseño F (10% caucho + 5% perlita) se identificó como el más equilibrado. Alcanzó 174.39 kg/cm² en probetas y 131.5 kg/cm² en unidades, clasificándose como Tipo IV según la Norma E.070. En pilas presentó mayor resistencia que el ladrillo King Kong (118.17 vs 78.3 kg/cm²), evidenciando buen desempeño estructural colectivo.

En el ámbito térmico, el ladrillo F mostró una capacidad térmica de 5420 J/K (+71.5%), lo que mejora la inercia térmica y el confort pasivo. No obstante, su resistencia térmica fue menor (0.370 vs 0.437 K·m²/W), debido a su geometría con pocas cavidades, lo que sugiere optimización.

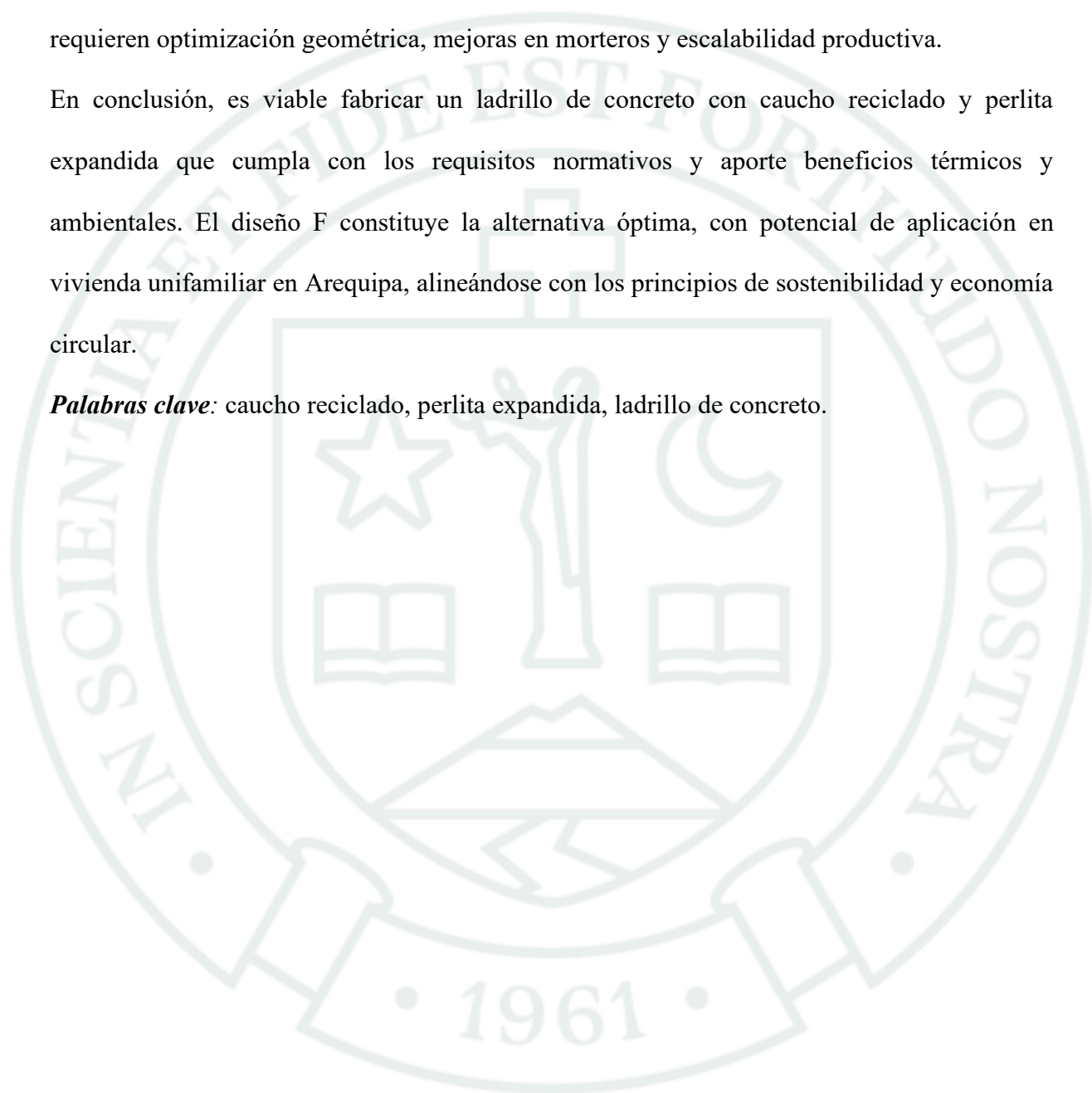
A nivel de vivienda, su aplicación incrementó el peso de los muros en 54%, sin comprometer la estabilidad, y elevó la capacidad térmica a 34.78 MJ/K (+86.09%), mejorando el comportamiento bioclimático. El costo total aumentó en solo 0.97%, mientras que se redujeron

aproximadamente 4.03 t de CO₂ y se valorizaron 3.20 t de NFU, evidenciando un impacto ambiental positivo con baja incidencia económica global.

Entre las principales limitaciones se identificaron el mayor peso de las unidades, la baja succión capilar que afecta la adherencia mortero-ladrillo y el mayor costo unitario. Estas condiciones requieren optimización geométrica, mejoras en morteros y escalabilidad productiva.

En conclusión, es viable fabricar un ladrillo de concreto con caucho reciclado y perlita expandida que cumpla con los requisitos normativos y aporte beneficios térmicos y ambientales. El diseño F constituye la alternativa óptima, con potencial de aplicación en vivienda unifamiliar en Arequipa, alineándose con los principios de sostenibilidad y economía circular.

Palabras clave: caucho reciclado, perlita expandida, ladrillo de concreto.



ABSTRACT

The accumulation of end-of-life tires (ELTs) represents a significant environmental problem in Peru, particularly in Arequipa, encouraging the search for sustainable alternatives within the construction sector. This study aimed to manufacture and evaluate the physical-mechanical, thermal, economic, and environmental viability of a concrete brick incorporating recycled rubber and expanded perlite, including its application in a single-family housing module through structural, bioclimatic, and economic-environmental analysis.

A quantitative experimental design was developed with 13 mix proportions (Control and designs A–L), varying rubber (5%, 10%, and 15%) and perlite (0%, 5%, 10%, and 15%) based on total volume. Mechanical tests were performed on specimens (7, 14, and 28 days), along with unit, prism, and wallet tests, physical characterization, and thermal simulations in ABAQUS under scenarios of 10 °C, 25 °C, 50 °C, and fire exposure.

Design F (10% rubber + 5% perlite) was identified as the optimal solution. It achieved 174.39 kg/cm² in specimens and 131.5 kg/cm² in units, meeting Type IV classification according to Peruvian Standard E.070. In prism tests, it outperformed conventional clay bricks (118.17 vs 78.3 kg/cm²), demonstrating adequate structural performance.

Thermally, Design F exhibited a heat capacity of 5420 J/K (+71.5%), improving thermal inertia and passive comfort. However, its thermal resistance was lower (0.370 vs 0.437 K·m²/W) due to its geometry, suggesting optimization opportunities.

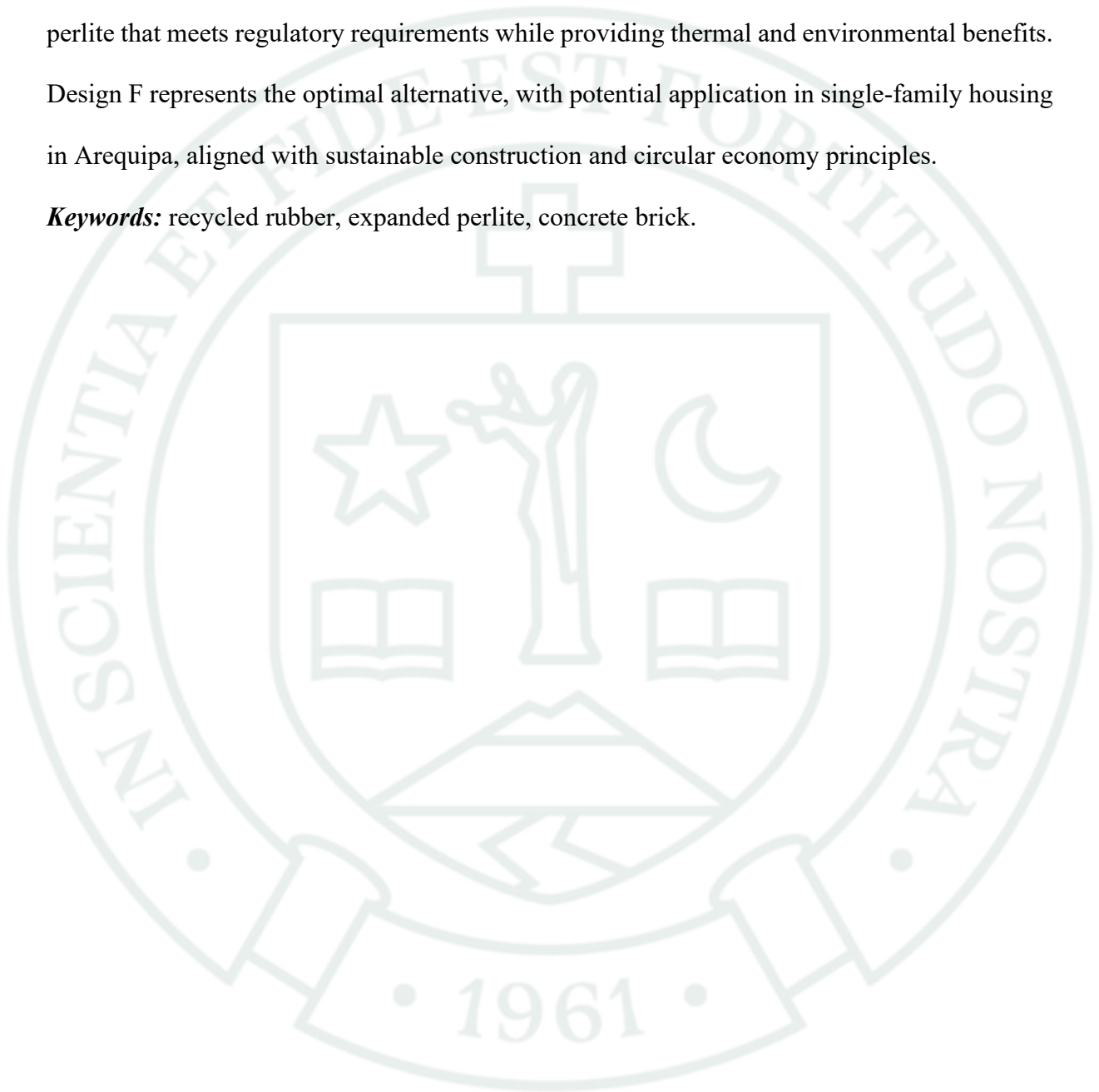
At the housing level, its application increased wall weight by 54% without compromising structural stability and improved thermal capacity to 34.78 MJ/K (+86.09%). The total construction cost increased by only 0.97%, while approximately 4.03 tons of CO₂ were reduced and 3.20 tons of ELTs were valorized, showing a positive environmental impact with minimal economic impact.

Key limitations include higher unit weight, low capillary suction affecting mortar adhesion, and increased unit cost, requiring further optimization in geometry, mortar design, and production scalability.

In conclusion, it is feasible to manufacture a concrete brick with recycled rubber and expanded perlite that meets regulatory requirements while providing thermal and environmental benefits.

Design F represents the optimal alternative, with potential application in single-family housing in Arequipa, aligned with sustainable construction and circular economy principles.

Keywords: recycled rubber, expanded perlite, concrete brick.



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN.....	1
1. CAPÍTULO I: Generalidades	3
1.1 Planteamiento del Problema.....	3
1.1.1 Descripción de la Situación Problemática	3
1.1.2 Formulación del Problema / Pregunta de investigación	5
1.2 Justificación de la Investigación	6
1.2.1 Importancia de la Investigación.....	6
1.2.2 Viabilidad de la Investigación	7
1.3 Hipótesis.....	8
1.4 Objetivos de la Investigación	10
1.4.1 Objetivo General.....	10
1.4.2 Objetivos Específicos.....	10
1.5 Variables	11
1.5.1 Variables Independientes	11
1.5.2 Variables Dependientes	11
1.5.3 Operacionalización de las Variables	12
1.6 Limitaciones de la Investigación.....	16
2. CAPÍTULO II: Fundamento Teórico	19
2.1 Estado del Arte.....	19
2.1.1 Internacional	19
2.1.2 Nacional	20
2.1.3 Brechas de investigación.....	20
2.2 Marco Teórico.....	22
2.2.1 Concreto y unidades de albañilería	22
2.2.2 Materiales alternativos para el concreto	30

2.2.3	Propiedades físico-mecánicas en mezclas con adiciones.....	39
2.2.4	Conductividad térmica y transferencia de calor en materiales de construcción	44
2.2.5	Simulación numérica en ABAQUS	48
2.2.6	Aspectos económicos y ambientales en la fabricación de ladrillos	56
2.2.7	Viabilidad integral de un ladrillo de concreto modificado	62
2.3	Marco Normativo	66
2.3.1	Agregados	66
2.3.2	Diseño y elaboración de mezclas	83
2.3.3	Especímenes.....	83
2.3.4	Unidades de albañilería.....	87
2.3.5	Mortero	96
2.3.6	Prismas	97
3.	CAPÍTULO III: Metodología de la Investigación	103
3.1.1	Enfoque de Investigación.....	103
3.1.2	Tipo de Investigación.....	103
3.1.3	Diseño y Nivel de Investigación	103
3.1.4	Método de Investigación.....	103
3.1.5	Método de Muestreo	103
3.1.6	Tamaño de la Muestra.....	104
3.1.7	Recursos Empleados	110
3.1.8	Procedimiento de recolección	110
3.1.9	Matriz de consistencia.....	115
4.	CAPÍTULO IV: Marco Operativo	118
4.1	Fase I. Diseño y selección de las mezclas óptimas.	118
4.1.1	Actividad 1. Ensayos de materiales para concreto.....	118
4.1.2	Actividad 2. Diseño de mezcla	128
4.1.3	Actividad 3. Elaboración de probetas.	156
4.1.4	Actividad 4. Evaluación y selección de diseños de mezcla.	159
4.2	Fase II. Fabricación y evaluación físico-mecánica de los ladrillos.....	170
4.2.1	Actividad 1. Elaboración de ladrillos, pilas y muretes.	170
4.2.2	Actividad 2. Evaluación de ladrillos, pilas y muretes.....	180

4.2.3	Actividad 3. Comparación de resultados.	211
4.3	Fase III. Análisis del comportamiento térmico mediante simulación.....	226
4.3.1	Actividad 1. Determinación de propiedades térmicas.	227
4.3.2	Actividad 2. Modelado y simulación en ABAQUS.....	234
4.3.3	Actividad 3. Evaluación del comportamiento térmico.	241
4.3.4	Actividad 4. Comparación de resultados.	259
4.4	Fase IV. Análisis económico y ambiental.....	261
4.4.1	Actividad 1. Cálculo de costos de producción.....	262
4.4.2	Actividad 2. Análisis del impacto ambiental.	268
4.4.3	Actividad 3. Comparación de resultados	282
4.5	Fase V. Selección del diseño más eficiente.	287
4.5.1	Actividad 1. Puntuación numérica.....	287
4.6	Fase VI. Aplicación del ladrillo tipo F en módulo de vivienda unifamiliar	294
4.6.1	Contexto y condicionantes del emplazamiento.....	294
4.6.2	Propuesta arquitectónica del módulo de vivienda	303
4.6.3	Estrategias de diseño bioclimático.....	314
4.6.4	Aplicación del ladrillo tipo F en el sistema constructivo.....	324
4.6.5	Evaluación estructural del módulo de vivienda.....	339
4.6.6	Evaluación económica del módulo de vivienda.....	357
4.6.7	Evaluación del desempeño térmico y energético.....	370
4.6.8	Evaluación ambiental.....	376
4.6.9	Evaluación integral de la aplicación del ladrillo tipo F en el módulo de vivienda	378
5.	CAPÍTULO FINAL: Evaluación de la viabilidad	383
5.1	Análisis de resultados.....	383
5.1.1	Ensayos geométricos (variación dimensional y alabeo)	385
5.1.2	Ensayos físicos (peso, vacíos, densidad, absorción, humedad y succión).....	386
5.1.3	Ensayos mecánicos (unidades, pilas y compresión diagonal)	387
5.1.4	Ensayos térmicos (capacidad calorífica, capacidad térmica, simulaciones y flujo de calor)	389

5.1.5	Ensayos económico–ambientales (precio, huella de carbono y valorización de NFU).....	390
5.1.6	Impacto en la vivienda unifamiliar	392
5.2	Discusión sobre la viabilidad	393
5.2.1	Viabilidad estructural.....	394
5.2.2	Viabilidad térmica.....	394
5.2.3	Viabilidad económica.....	395
5.2.4	Viabilidad ambiental.....	396
5.3	Justificación de la viabilidad integral.....	396
5.4	Posibles limitaciones del estudio	399
5.5	Síntesis de viabilidad	401
5.6	Contraste de hipótesis	403
5.6.1	Hipótesis general.....	403
5.6.2	Hipótesis específicas.....	403
CONCLUSIONES.....		407
RECOMENDACIONES.....		418
REFERENCIAS		421

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Operacionalización de variables	12
Tabla 2.	Brechas de investigación identificadas en el estado del arte	21
Tabla 3.	Datos del ladrillo King Kong Fortaleza	23
Tabla 4.	Datos del ladrillo King Kong Hércules 9.....	23
Tabla 5.	Datos del ladrillo King Kong Hércules 10.....	24
Tabla 6.	Datos del Ladrillo King Kong Lima 18	24
Tabla 7.	Datos del Ladrillo King Kong Infes.....	24
Tabla 8.	Datos del ladrillo King Kong H9	26
Tabla 9.	Datos del ladrillo King Kong H10	26
Tabla 10.	Comparación entre ladrillos de concreto y arcilla mecanizados	27
Tabla 11.	Diferencias en la fabricación de ladrillos de concreto y arcilla	30
Tabla 12.	Propiedades típicas del caucho reciclado	33
Tabla 13.	Partículas generadas durante la incineración de neumáticos	34
Tabla 14.	Otros residuos peligrosos generados durante la incineración de neumáticos.....	34
Tabla 15.	Aplicación según la granulometría de la perlita.....	37
Tabla 16.	Propiedades típicas de la perlita expandida.....	38
Tabla 17.	Reducción de resistencia a compresión según adición de caucho y perlita.....	40
Tabla 18.	Variación de densidad en concretos con adiciones	41
Tabla 19.	Valores de conductividad térmica en materiales de construcción.....	46
Tabla 20.	Comparación de costos aproximados de producción	56
Tabla 21.	Emisiones de CO ₂ en la producción de ladrillos	58
Tabla 22.	Contribución de contaminantes por ladrilleras en toneladas año- Arequipa.....	60
Tabla 23.	Tipo de combustibles empleados en los hornos de Arequipa	61
Tabla 24.	Integración de criterios de viabilidad	65
Tabla 25.	Requisitos químicos del cemento portland.....	67
Tabla 26.	Requisitos químicos del cemento portland.....	67
Tabla 27.	Requerimiento de granulometría para agregado fino	69
Tabla 28.	Requisitos granulométricos del agregado grueso	70
Tabla 29.	Cantidad mínima de la muestra de agregado grueso o global.....	72
Tabla 30.	Tamaño de la muestra de agregado para contenido de humedad	74

Tabla 31.	Masa mínima de muestra de ensayo de peso específico	76
Tabla 32.	Diámetros máximos de especímenes de ensayo.....	84
Tabla 33.	Edades de ensayo y tolerancias permisibles.....	85
Tabla 34.	Clase de unidad de albañilería para fines estructurales.....	87
Tabla 35.	Limitaciones en el uso de la unidad de albañilería para fines estructurales.....	88
Tabla 36.	Requisitos de resistencia y absorción.....	94
Tabla 37.	Granulometría de la arena gruesa.....	96
Tabla 38.	Tipos de morteros.....	97
Tabla 39.	Resistencias características de la albañilería Mpa (kg/cm ²).....	97
Tabla 40.	Factores de corrección altura/espesor para la resistencia en compresión de pilas de albañilería.....	100
Tabla 41.	Tamaño de la muestra de especímenes para el mortero de junta	104
Tabla 42.	Tamaño de la muestra de especímenes para el concreto patrón.....	104
Tabla 43.	Tamaño de la muestra de especímenes para el concreto con adiciones de caucho granulado y perlita mineral	105
Tabla 44.	Tamaño de la muestra de unidades de albañilería para ladrillo king kong - 18 huecos (kk).....	105
Tabla 45.	Tamaño de la muestra de unidades de albañilería para ladrillos de concreto patrón (P).....	106
Tabla 46.	Tamaño de la muestra de unidades de albañilería para ladrillos de concreto con adiciones de caucho granulado y perlita mineral.....	107
Tabla 47.	Tamaño de la muestra de pilas y muretes para ladrillo king kong - 18 huecos.....	108
Tabla 48.	Tamaño de la muestra de pilas y muretes para ladrillos de concreto patrón.....	108
Tabla 49.	Tamaño de la muestra de pilas y muretes para ladrillos de concreto con adiciones de caucho granulado y perlita mineral	109
Tabla 50.	Matriz de consistencia.....	115
Tabla 51.	Características químicas y físicas de cemento portland tipo IP	121
Tabla 52.	Características del confítillo.....	121
Tabla 53.	Características de la arena gruesa.....	122
Tabla 54.	Características del caucho granulado	125
Tabla 55.	Características de la perlita expandida	126

Tabla 56.	Efectos negativos sobre el concreto, si se superan los valores límites permisibles de sustancias en el agua	127
Tabla 57.	Propiedades de los materiales para concreto	128
Tabla 58.	Resistencia requerida de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar	130
Tabla 59.	Resistencia a la compresión requerida y resistencia a la compresión promedio del diseño patrón	130
Tabla 60.	Asentamiento según consistencia de mezcla.....	131
Tabla 61.	Volumen unitario de agua	132
Tabla 62.	Contenido aproximado del aire en el concreto	132
Tabla 63.	Relación agua/cemento por resistencia	133
Tabla 64.	Contenido de cemento	134
Tabla 65.	Peso del agregado grueso por unidad de volumen del concreto	134
Tabla 66.	Volumen absoluto para slump de 3" a 4"	135
Tabla 67.	Volumen absoluto para slump de 6" a 7"	136
Tabla 68.	Diseño de mezcla $f'c$ 210 kg/cm ² en estado seco	137
Tabla 69.	Peso húmedo de los agregados	138
Tabla 70.	Ajuste de agua a la mezcla	139
Tabla 71.	Diseño de mezcla de concreto patrón $f'c$ 210 kg/cm ²	140
Tabla 72.	Volúmenes absolutos de materiales del diseño patrón.....	141
Tabla 73.	Volúmenes absolutos de materiales del diseño A al K	143
Tabla 74.	Peso en estado seco de materiales del diseño A al K	145
Tabla 75.	Peso en estado húmedo de materiales del diseño A al K	147
Tabla 76.	Aporte de agua y agua efectiva del diseño A al K	149
Tabla 77.	Dosificación para 1 m ³ del diseño A	150
Tabla 78.	Dosificación para 1 m ³ del diseño B	150
Tabla 79.	Dosificación para 1 m ³ del diseño C	151
Tabla 80.	Dosificación para 1 m ³ del diseño D	151
Tabla 81.	Dosificación para 1 m ³ del diseño E.....	152
Tabla 82.	Dosificación para 1 m ³ del diseño F	152
Tabla 83.	Dosificación para 1 m ³ del diseño G	153
Tabla 84.	Dosificación para 1 m ³ del diseño H	153
Tabla 85.	Dosificación para 1 m ³ del diseño I.....	154
Tabla 86.	Dosificación para 1 m ³ del diseño J.....	154

Tabla 87.	Dosificación para 1 m ³ del diseño K	155
Tabla 88.	Dosificación para 1 m ³ del diseño L.....	155
Tabla 89.	Resistencia a la compresión promedio del Diseño Patrón	159
Tabla 90.	Resistencia a la compresión promedio del Diseño A.....	159
Tabla 91.	Resistencia a la compresión promedio del Diseño B	159
Tabla 92.	Resistencia a la compresión promedio del Diseño C	160
Tabla 93.	Resistencia a la compresión promedio del Diseño D.....	160
Tabla 94.	Resistencia a la compresión promedio del Diseño E	160
Tabla 95.	Resistencia a la compresión promedio del Diseño F.....	161
Tabla 96.	Resistencia a la compresión promedio del Diseño G.....	161
Tabla 97.	Resistencia a la compresión promedio del Diseño H.....	161
Tabla 98.	Resistencia a la compresión promedio del Diseño I	162
Tabla 99.	Resistencia a la compresión promedio del Diseño J	162
Tabla 100.	Resistencia a la compresión promedio del Diseño K.....	162
Tabla 101.	Resistencia a la compresión promedio del Diseño L	163
Tabla 102.	Ranking de diseños de mezcla según resistencia a compresión – edad 7 días.....	167
Tabla 103.	Ranking de diseños de mezcla según resistencia a compresión – edad 14 días.....	167
Tabla 104.	Ranking de diseños de mezcla según resistencia a compresión – edad 28 días.....	168
Tabla 105.	Cantidad de ladrillos a vaciar según ensayos	175
Tabla 106.	Variación dimensional de unidades de albañilería de arcilla	181
Tabla 107.	Variación dimensional de unidades de albañilería de concreto	182
Tabla 108.	Peso de unidades de albañilería de arcilla.....	183
Tabla 109.	Peso de unidades de albañilería de concreto	183
Tabla 110.	Porcentaje de área de vacíos de unidades de albañilería de arcilla	185
Tabla 111.	Porcentaje de área de vacíos de unidades de albañilería de concreto	186
Tabla 112.	Alabeo de unidades de albañilería de arcilla.....	188
Tabla 113.	Alabeo de unidades de albañilería de concreto	188
Tabla 114.	Absorción de unidades de albañilería de arcilla.....	189
Tabla 115.	Absorción de unidades de albañilería de concreto	190
Tabla 116.	Contenido de humedad de unidades de albañilería de arcilla	191
Tabla 117.	Contenido de humedad de unidades de albañilería de concreto.....	192

Tabla 118.	Succión de unidades de albañilería de arcilla.....	193
Tabla 119.	Succión de unidades de albañilería de concreto.....	194
Tabla 120.	Resistencia a la compresión de unidades de albañilería de arcilla.....	196
Tabla 121.	Resistencia a la compresión de unidades de albañilería de concreto patrón $\phi=2''$	197
Tabla 122.	Resistencia a la compresión de unidades de albañilería de concreto patrón $\phi=3''$	198
Tabla 123.	Resistencia a la compresión de unidades de albañilería de concreto, diseño A.....	198
Tabla 124.	Resistencia a la compresión de unidades de albañilería de concreto, diseño B.....	198
Tabla 125.	Resistencia a la compresión de unidades de albañilería de concreto, diseño F.....	199
Tabla 126.	Resistencia a la compresión de unidades de albañilería de concreto, diseño J.....	199
Tabla 127.	Clasificación según resistencia a la compresión de unidades de albañilería.....	201
Tabla 128.	Resistencia a la compresión de probetas de mortero.....	203
Tabla 129.	Resistencia a la compresión en pilas de unidades de albañilería de arcilla.....	205
Tabla 130.	Resistencia a la compresión de pilas de unidades de albañilería de concreto.....	206
Tabla 131.	Resistencia a la compresión diagonal de muretes de unidades de albañilería de arcilla.....	208
Tabla 132.	Resistencia a la compresión diagonal de muretes de unidades de albañilería de concreto.....	209
Tabla 133.	Comparación de propiedades físicas y mecánicas entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J.....	225
Tabla 134.	Cálculo de densidad de ladrillos de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J.....	228
Tabla 135.	Cálculo de capacidad calorífica de ladrillos del diseño patrón, A, B, F y J.....	229
Tabla 136.	Cálculo de capacidad térmica de ladrillos de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J.....	230

Tabla 137. Asignación de las propiedades de conductividad térmica para los materiales compuestos dentro del ladrillo de concreto – perlita y el caucho	231
Tabla 138. Cálculo de conductividad térmica de ladrillos del diseño patrón, A, B, F y J.....	232
Tabla 139. Flujo de calor (HFL) de ladrillos de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J.....	233
Tabla 140. Parámetros ingresados en el software ABAQUS	238
Tabla 141. Distribución de temperatura (NT11) para ladrillos de arcilla en las temperaturas de 10, 50, 1000°C y flujo de calor (HFL).....	244
Tabla 142. Distribución de temperatura (NT11) para diseño patrón, A, B, F y J en las temperaturas de 10, 50, 1000°C y flujo de calor (HFL)	248
Tabla 143. Cálculo de la resistencia térmica idealizada mediante la relación entre espesor y conductividad térmica efectiva.....	256
Tabla 144. Cálculo de la resistencia térmica a partir de la simulación con flujo de calor constante en ABAQUS.....	257
Tabla 145. Análisis de costos unitarios de la fabricación de ladrillo de concreto del diseño patrón.....	262
Tabla 146. Análisis de costos unitarios de la fabricación de ladrillo de concreto del diseño A.....	263
Tabla 147. Análisis de costos unitarios de la fabricación de ladrillo de concreto del diseño B.....	264
Tabla 148. Análisis de costos unitarios de la fabricación de ladrillo de concreto del diseño F.....	265
Tabla 149. Análisis de costos unitarios de la fabricación de ladrillo de concreto del diseño J.....	266
Tabla 150. Cálculo de CO ₂ emitido en la fabricación de un ladrillo de arcilla mecanizado.....	270
Tabla 151. Cálculo de kg de CO ₂ emitido en la fabricación de un ladrillo del diseño Patrón.....	274
Tabla 152. Cálculo de kg de CO ₂ emitido en la fabricación de un ladrillo del diseño A.....	274
Tabla 153. Cálculo de kg de CO ₂ emitido en la fabricación de un ladrillo del diseño B.....	275
Tabla 154. Cálculo de kg de CO ₂ emitido en la fabricación de un ladrillo del diseño F.....	275

Tabla 155.	Cálculo de kg de CO ₂ emitido en la fabricación de un ladrillo del diseño J.....	276
Tabla 156.	Fase piloto – 1% de la demanda local	279
Tabla 157.	Fase de expansión – 5% de la demanda local	280
Tabla 158.	Fase de largo plazo – 10% de la demanda local.....	281
Tabla 159.	Cálculo de precio comercial de ladrillos de concreto	282
Tabla 160.	Resultados numéricos por diseño y ensayo.....	288
Tabla 161.	Puntuación final de desempeño.....	290
Tabla 162.	Ranking final de diseños según evaluación comparativa (máx. 130 puntos).....	291
Tabla 163.	Condiciones climáticas promedio mensuales – Sachaca (Arequipa).....	299
Tabla 164.	Síntesis de condicionantes de diseño del módulo de vivienda.....	302
Tabla 165.	Programa arquitectónico y áreas de la vivienda.....	303
Tabla 166.	Cantidad de ladrillos 24x14x9 cm empleados en muros portantes	336
Tabla 167.	Cantidad de ladrillos tipo F en muros portantes del módulo de vivienda.....	337
Tabla 168.	Síntesis comparativa del sistema constructivo entre ladrillo Tipo F y ladrillo convencional.....	338
Tabla 169.	Categoría de las edificaciones y factor de uso	341
Tabla 170.	Factor de suelo	341
Tabla 171.	Densidad de muros en el eje X, primer nivel	343
Tabla 172.	Densidad de muros en el eje Y, primer nivel	344
Tabla 173.	Densidad de muros en el eje X, segundo nivel	345
Tabla 174.	Densidad de muros en el eje Y, segundo nivel	346
Tabla 175.	Comparación del peso estructural del sistema de muros portantes.....	347
Tabla 176.	Materiales utilizados en el análisis.....	348
Tabla 177.	Secciones de materiales utilizados en el análisis	349
Tabla 178.	Desplazamientos y derivas de entrepiso obtenidos del análisis dinámico espectral.....	351
Tabla 179.	Verificación de fisuración – Primer nivel, Dirección X.....	353
Tabla 180.	Verificación de fisuración – Primer nivel, Dirección Y.....	354
Tabla 181.	Verificación de cortante en la base por sismo severo en la primera planta, dirección X.....	355
Tabla 182.	Verificación de cortante en la base por sismo severo en la primera planta, dirección Y.....	355

Tabla 183.	Análisis de costo unitario del asentado de muro soga con ladrillo tipo F	358
Tabla 184.	Análisis de costo unitario del asentado de muro soga con ladrillo KK.....	358
Tabla 185.	Presupuesto detallado de la construcción del módulo de vivienda unifamiliar propuesto empleando ladrillos tipo F	361
Tabla 186.	Comparación económica entre ladrillo tipo F y KK aplicado al módulo de vivienda propuesto.....	369
Tabla 187.	Comparación de la capacidad térmica con ladrillos tipo F y convencionales.....	370
Tabla 188.	Cálculo del coeficiente global de pérdidas térmicas (H_{total}) por elementos.....	373
Tabla 189.	Resultados globales del coeficiente de pérdidas térmicas.....	374
Tabla 190.	Comparación del comportamiento térmico con ladrillos tipo F y convencionales	375
Tabla 191.	Comparación de emisiones de CO ₂ de ladrillos tipo F y convencionales	376
Tabla 192.	Comparación de la valorización de NFU con ladrillos tipo F y convencionales	377
Tabla 193.	Indicadores integrales de desempeño del ladrillo tipo F frente al ladrillo convencional.....	379
Tabla 194.	Resultados numéricos de ensayos a ladrillos KK y de concreto del diseño F.....	383
Tabla 195.	Resultados a escala de vivienda unifamiliar para ladrillos KK y diseño F.....	384
Tabla 196.	Síntesis de la viabilidad integral del ladrillo tipo F a nivel de material y vivienda.....	399
Tabla 197.	Resumen de la discusión sobre la viabilidad del diseño F	402
Tabla 198.	Contraste de hipótesis.....	406
Tabla 199.	Conclusiones por objetivo.....	411

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Medidas del ladrillo King Kong Fortaleza	24
Figura 2.	Medidas del ladrillo King Kong Hércules 9.....	25
Figura 3.	Medidas del ladrillo King Kong Hércules 10.....	25
Figura 4.	Medidas del ladrillo King Kong Lima 18	25
Figura 5.	Medidas del Ladrillo King Kong Infes	26
Figura 6.	Esquema comparativo de los procesos de fabricación del ladrillo de concreto.....	28
Figura 7.	Esquema de fabricación mecanizada de unidades de arcilla.....	29
Figura 8.	Estructura del neumático	32
Figura 9.	Partes del neumático.....	32
Figura 10.	Etapas de la perlita.....	36
Figura 11.	Tamaños de la perlita.....	37
Figura 12.	Proceso de conducción entre moléculas	45
Figura 13.	Convección	45
Figura 14.	Análisis de ciclo de vida de ladrillos y bloques de concreto	58
Figura 15.	Contaminación por quema de ladrillos	60
Figura 16.	Esquema de roturas de probetas	86
Figura 17.	Medidas de alabeo	90
Figura 18.	Esquemas de modo de falla en pilas	99
Figura 19.	Esquemas de modo de falla en muretes.....	102
Figura 20.	Mapa de Fase I.....	118
Figura 21.	Arena gruesa y confitillo	119
Figura 22.	Caucho granulado y perlita mineral.....	119
Figura 23.	Cemento portland Yura tipo multi – propósito.....	120
Figura 24.	Confitillo.....	122
Figura 25.	Arena gruesa	123
Figura 26.	Ubicación de la trituradora caucho grass EIRL.....	123
Figura 27.	Empresa trituradora caucho grass EIRL	124
Figura 28.	Empresa trituradora caucho grass EIRL	124
Figura 29.	Caucho granulado	125
Figura 30.	Perlita expandida	126
Figura 31.	Slump de 1” del concreto f’c 210 kg/cm2	140

Figura 32.	Slump de 4" del concreto f'c 210 kg/cm2	141
Figura 33.	Mezclado	156
Figura 34.	Vaciado	157
Figura 35.	Desmoldado	158
Figura 36.	Curado	158
Figura 37.	Ensayo de resistencia a la compresión de probetas	163
Figura 38.	Resistencia a la compresión vs. Contenido de caucho reciclado para la mejor incidencia de perlita mineral – edad 7 días	164
Figura 39.	Resistencia a la compresión vs. Contenido de caucho reciclado para la mejor incidencia de perlita mineral – edad 14 días	164
Figura 40.	Resistencia a la compresión vs. Contenido de caucho reciclado para la mejor incidencia de perlita mineral – edad 28 días	165
Figura 41.	Resistencia a la compresión vs. Edad del concreto según diseño de mezcla	168
Figura 42.	Mapa conceptual de fase II	170
Figura 43.	Isometría de molde para ladrillos de concreto con dos perforaciones de 3" de diámetro	171
Figura 44.	Isometría explotada de molde para ladrillos de concreto con dos perforaciones de 3" de diámetro	171
Figura 45.	Isometría de la pieza número 1 del molde para ladrillos de concreto con dos perforaciones de 3" de diámetro	172
Figura 46.	Isometría de la pieza número 2 del molde para ladrillos de concreto	172
Figura 47.	Molde de madera pino con perforaciones de 2" para ladrillos	173
Figura 48.	Isometría del molde para ladrillos de concreto con dos perforaciones de 2" de diámetro	173
Figura 49.	Isometría de la pieza número 1 y 2 del molde para ladrillos de concreto con dos perforaciones de 2" de diámetro	174
Figura 50.	Molde de madera pino con perforaciones de 2" para ladrillos	174
Figura 51.	Mezclado	176
Figura 52.	Engrasado de moldes	176
Figura 53.	Vaciado	177
Figura 54.	Desmoldado	178
Figura 55.	Fisuras durante el desmoldado sin papel celofán de ladrillos con perforaciones de 3"	179

Figura 56.	Curado	179
Figura 57.	Asentado de muros	180
Figura 58.	Medición de peso de unidades de albañilería de concreto.....	184
Figura 59.	Ensayo de área de vacíos de unidades de albañilería de arcilla.....	185
Figura 60.	Ensayo de área de vacíos de unidades de albañilería de concreto.....	187
Figura 61.	Medición de alabeo en unidad de albañilería de arcilla.....	187
Figura 62.	Ensayo de succión de unidades de albañilería de concreto	195
Figura 63.	Refrentado de yeso	196
Figura 64.	Ensayo de resistencia a la compresión de unidades de albañilería de concreto.....	197
Figura 65.	Resistencia a la compresión vs. Edad del concreto según diseño de mezcla.....	200
Figura 66.	Ensayo de resistencia a la compresión de probetas de mortero.....	203
Figura 67.	Resistencia a la compresión axial en mortero 1:4	205
Figura 68.	Ensayo de resistencia a la compresión de pilas con ladrillos de concreto.....	207
Figura 69.	Ensayo de resistencia a la compresión diagonal de muretes de unidades de albañilería de concreto	210
Figura 70.	Comparación de variabilidad dimensional entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J	211
Figura 71.	Comparación de peso entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J.....	213
Figura 72.	Comparación de porcentaje de área de vacíos entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J	214
Figura 73.	Comparación de alabeo entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J.....	216
Figura 74.	Comparación de absorción entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J.....	217
Figura 75.	Comparación de contenido de humedad entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J	218
Figura 76.	Comparación de succión entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J.....	219
Figura 77.	Comparación de resistencia a la compresión entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J	221

Figura 78.	Comparación de resistencia a la compresión de pilas entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J	222
Figura 79.	Comparación de resistencia a la compresión diagonal de muretes entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J	223
Figura 80.	Mapa de Fase III	226
Figura 81.	Modelamiento de ladrillos de concreto y de arcilla con el software ABAQUS.....	234
Figura 82.	Ladrillo de arcilla con condiciones de borde impuestas, cara expuesta a 25°C (298.15°K) y cara opuesta con temperaturas variables	236
Figura 83.	Ladrillo de arcilla con condiciones de borde impuestas, cara expuesta a 1000°C (1273.2°K) y cara opuesta con temperaturas variables	237
Figura 84.	Ladrillo de concreto con condiciones de borde impuestas, cara expuesta a 25°C (298.15°K) y cara opuesta sometida al flujo de calor	237
Figura 85.	Nodos numerados en base al software ABAQUS del ladrillo de arcilla.....	239
Figura 86.	Nodos numerados en base al software ABAQUS del ladrillo de concreto.....	239
Figura 87.	Trayectoria de nodos (PATH) en el ladrillo de concreto para registrar la distribución de temperatura vertical	240
Figura 88.	Trayectoria de nodos (PATH) en el ladrillo de arcilla para registrar la distribución de temperatura vertical.....	241
Figura 89.	Distribución de temperatura (NT11) del ladrillo de arcilla	243
Figura 90.	Flujo de calor (HFL) en el ladrillo de arcilla.....	243
Figura 91.	Comparativa de NT11 a 10, 50, 1000 °C y flujo de calor (HFL) en función de la distancia nodal para ladrillos de arcilla mecanizados	245
Figura 92.	Distribución de temperatura (NT11) del ladrillo de concreto	247
Figura 93.	Comparativa de NT11 a 10 °C en función de la distancia nodal para diseño patrón, A, B, F y J.....	249
Figura 94.	Comparativa de NT11 a 50 °C en función de la distancia nodal para diseño patrón, A, B, F y J.....	250
Figura 95.	Comparativa de NT11 a 1000 °C en función de la distancia nodal para diseño patrón, A, B, F y J.....	251
Figura 96.	Flujo de calor (HFL) en el ladrillo de concreto	253

Figura 97.	Comparativa del flujo de calor (HFL) en función de la distancia nodal para diseños Patrón, A, B, F y J a 25 °C como condición de borde.....	254
Figura 98.	Mapa de fase IV	261
Figura 99.	Costos comerciales de ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J.....	283
Figura 100.	CO2 emitido por ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J.....	283
Figura 101.	Llantas requeridas por año en la Fase piloto para el diseño patrón, A, B, F y J.....	285
Figura 102.	Llantas requeridas por año en la Fase de expansión para el diseño patrón, A, B, F y J.....	285
Figura 103.	Llantas requeridas por año en la Fase de largo plazo para el diseño patrón, A, B, F y J.....	286
Figura 104.	Ubicación del terreno de la vivienda unifamiliar	295
Figura 105.	Dimensiones del terreno de la vivienda unifamiliar	296
Figura 106.	Diagrama de zonificación del primer nivel	305
Figura 107.	Diagrama de zonificación del segundo nivel.....	305
Figura 108.	Distribución de primer nivel.....	306
Figura 109.	Distribución de segundo nivel	306
Figura 110.	QR de vídeo de recorrido virtual	308
Figura 111.	Vista 3D de fachada principal de vivienda unifamiliar	309
Figura 112.	Vista 3D - Corte de fachada principal de vivienda unifamiliar.....	309
Figura 113.	Vista 3D de fachada posterior de vivienda unifamiliar	310
Figura 114.	Vista 3D de sala de estar de vivienda unifamiliar	310
Figura 115.	Vista 3D de dormitorio principal de vivienda unifamiliar	311
Figura 116.	Planta primer nivel de vivienda unifamiliar	312
Figura 117.	Planta primer nivel de vivienda unifamiliar	313
Figura 118.	Esquema de flujo de aire del primer nivel.....	314
Figura 119.	Esquema de flujo de aire del segundo nivel	317
Figura 120.	Estudio de sombras en el solsticio de verano (21 de diciembre) - 9:00 a.m.....	319
Figura 121.	Estudio de sombras en el solsticio de verano (21 de diciembre) - 12:00 m.....	320

Figura 122.	Estudio de sombras en el solsticio de verano (21 de diciembre) - 3:00 p.m.....	320
Figura 123.	Estudio de sombras en el solsticio de invierno (21 de junio) - 9:00 a.m.....	322
Figura 124.	Estudio de sombras en el solsticio de invierno (21 de junio) - 12:00 m.....	322
Figura 125.	Estudio de sombras en el solsticio de invierno (21 de junio) - 3:00 p.m.....	323
Figura 126.	Refuerzo horizontal en muros portantes	326
Figura 127.	Detalle constructivo del encuentro de sobrecimiento y muro portante	328
Figura 128.	Detalle constructivo del encuentro de losa, viga y muro portante.....	328
Figura 129.	Detalle constructivo 3D del muro portante.....	329
Figura 130.	Muros portantes en planta primer nivel de vivienda unifamiliar.....	331
Figura 131.	Muros portantes en planta segundo nivel de vivienda unifamiliar.....	333
Figura 132.	Zonas sísmicas.....	340
Figura 133.	Modelamiento en ETABS	348
Figura 134.	Modos de vibración	352

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	Constancia de ensayos en laboratorio	427
Anexo 2-17.	Informes de laboratorio	428
Anexo 18.	Planos del módulo de vivienda unifamiliar	428



INTRODUCCIÓN

La acumulación de residuos sólidos constituye uno de los principales desafíos ambientales del siglo XXI. Entre estos, los neumáticos fuera de uso (NFU) representan un problema crítico, debido a su prolongado tiempo de degradación, que puede superar los mil años, y a los riesgos que generan cuando se disponen inadecuadamente, tales como la contaminación del suelo, la emisión de gases tóxicos y la proliferación de vectores de enfermedades. En el Perú, la gestión de los NFU es limitada, y en ciudades como Arequipa la mayoría de estos residuos termina en botaderos o rellenos sanitarios, lo que intensifica su impacto ambiental y sanitario.

Por otro lado, la industria de la construcción es uno de los sectores con mayor consumo de recursos naturales y generación de emisiones de CO₂, lo que subraya la necesidad de innovar en materiales sostenibles que reduzcan la presión ambiental sin comprometer la seguridad estructural. En este contexto, los ladrillos de concreto constituyen uno de los materiales más demandados en Arequipa, especialmente el ladrillo King Kong mecanizado utilizado en muros portantes. Sin embargo, su proceso de producción es intensivo en recursos y emite altos niveles de contaminantes.

La presente investigación propone como alternativa la fabricación de ladrillos de concreto con adición de caucho reciclado y perlita expandida. El caucho granulado permite valorizar un residuo problemático como los NFU, mientras que la perlita expandida, por sus propiedades térmicas e ignífugas, contribuye a mejorar el desempeño frente al fuego y la transferencia de calor. La combinación de ambos materiales en una matriz cementicia puede generar un producto innovador que, además de ser viable estructuralmente conforme a las Normas Técnicas Peruanas para unidades de albañilería portante, aporte beneficios ambientales y térmicos.

Si bien existen estudios previos sobre el uso de caucho reciclado en concretos y morteros, aún es limitada la investigación que evalúe simultáneamente su viabilidad estructural, térmica, económica y ambiental en ladrillos de concreto. Asimismo, la incorporación de perlita expandida como material complementario en este tipo de unidades es escasamente explorada en el contexto peruano, lo que constituye un vacío de conocimiento.

Por ello, el objetivo general de esta tesis es fabricar y evaluar la viabilidad físico-mecánica, térmica, económica y ambiental de un ladrillo de concreto con caucho reciclado y perlita expandida en la ciudad de Arequipa. Asimismo, se analiza su aplicación a escala real mediante la evaluación de su desempeño estructural, bioclimático y económico-ambiental en un módulo de vivienda unifamiliar, permitiendo validar su comportamiento como sistema constructivo integral en condiciones representativas del contexto local.

La investigación se organiza en seis capítulos principales. El Capítulo I presenta las generalidades del estudio, incluyendo el problema, los objetivos, hipótesis y variables. El Capítulo II expone el marco teórico y el estado del arte. El Capítulo III desarrolla el marco referencial sobre materiales y procesos. El Capítulo IV aborda el marco normativo. El Capítulo V describe el marco operativo y la metodología experimental aplicada. Finalmente, el Capítulo VI evalúa de manera integral la viabilidad del ladrillo experimental, presentando conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I: Generalidades

1.1 Planteamiento del Problema

1.1.1 Descripción de la Situación Problemática

En el Perú, la gestión de los neumáticos fuera de uso (NFU) representa un desafío ambiental significativo. Según el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2021), en 2021 ingresaron al mercado nacional 99,789 toneladas de neumáticos, lo que supone un incremento notable respecto a las 55,673 toneladas registradas en 2014. La acumulación de estos residuos es un problema creciente, ya que su degradación natural puede tardar hasta 1,000 años (Prodynamics, 2023), generando impactos ambientales y riesgos para la salud pública. Durante este extenso período, los neumáticos pueden liberar gases tóxicos y partículas finas al aire, contribuyendo a la contaminación atmosférica (Renovables, s.f.). Uno de los principales problemas derivados de los NFU es su incorrecta disposición final, lo que contribuye a la contaminación del suelo y el agua, además de convertirse en criaderos de vectores de enfermedades como el mosquito *Aedes aegypti*, principal transmisor del dengue (Revista Minería, 2023). En Arequipa, se recaudan aproximadamente 581,062 kg de residuos sólidos al día, de los cuales el 1.25% corresponde a neumáticos en desuso (MINAM, 2014). A pesar de estos riesgos, en el Perú existen menos de diez empresas dedicadas al reciclaje y valorización de NFU, lo que limita las opciones para su manejo sostenible (La República, 2023).

Por otro lado, la falta de innovación en materiales de construcción es un factor determinante. Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2017), en Arequipa el 77.24% de las viviendas utilizan ladrillo o bloque de cemento. La alta demanda de ladrillos industrializados, como el tipo King Kong, se debe a que ofrecen propiedades físicas y mecánicas superiores a las unidades artesanales (Universidad César Vallejo, 2023).

Sin embargo, la industria de la construcción sigue siendo una de las más contaminantes a nivel global, caracterizada por una alta extracción de recursos naturales.

Al intentar incorporar residuos de caucho como reemplazo de agregados en matrices cementicias, se han identificado limitaciones técnicas importantes. Según Sew-Eurodrive (s.f.), el caucho presenta una inestabilidad térmica crítica a temperaturas elevadas, donde su descomposición conlleva la liberación de gases tóxicos como monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x), lo cual eleva el riesgo ambiental y la vulnerabilidad de la estructura ante incendios.

Por otra parte, la literatura técnica describe a la perlita expandida como un material de origen volcánico con una estructura alveolar que le confiere una baja conductividad térmica, consolidándola como un material incombustible de alta eficiencia aislante (Padua Materiales, 2018). No obstante, existe un vacío de conocimiento respecto a la sinergia de ambos materiales. Si bien el caucho aporta beneficios en términos de economía circular, su comportamiento térmico negativo y la emisión de gases a altas temperaturas no han sido mitigados exitosamente en unidades de albañilería mediante la adición de perlita expandida en contextos locales. Actualmente, no se dispone de información consolidada sobre cómo la presencia de ambos elementos en una mezcla de concreto afecta la viabilidad estructural, el desempeño térmico y la seguridad frente a incendios. Esta falta de antecedentes técnicos sobre la interacción de caucho y perlita en una matriz de concreto impide determinar si dicha combinación constituye una alternativa viable para las condiciones climáticas y de seguridad constructiva en la ciudad de Arequipa.

1.1.2 Formulación del Problema / Pregunta de investigación

General

- ¿Es viable, en términos físico-mecánicos, térmicos, económicos y ambientales, la fabricación de un ladrillo de concreto con caucho reciclado y perlita expandida, evaluando su conductividad térmica mediante simulación en ABAQUS y aplicándolos en un módulo de vivienda unifamiliar en la ciudad de Arequipa?

Específicas

- ¿Qué dosificaciones de caucho reciclado y perlita expandida permiten obtener un ladrillo de concreto con propiedades adecuadas para su fabricación?
- ¿Cuáles son las propiedades físico-mecánicas del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida en comparación con los ladrillos de arcilla mecanizados, según ensayos de laboratorio basados en las Normas Técnicas Peruanas vigentes?
- ¿Cómo se comporta térmicamente el ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida en comparación con los ladrillos de arcilla mecanizados, considerando diferentes condiciones de temperatura mediante simulaciones en ABAQUS?
- ¿Cuál es el costo de producción, la huella de carbono y la cantidad de llantas en desuso que pueden reutilizarse en la fabricación del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida, en comparación con los ladrillos de arcilla mecanizados?

- ¿Cuál es el diseño óptimo del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida considerando su desempeño físico-mecánico, térmico, económico y ambiental?
- ¿La aplicación del ladrillo óptimo en el módulo de vivienda cumplirá satisfactoriamente con los requisitos estructurales ofreciendo un desempeño bioclimático justificado, presentando una viabilidad económico-ambiental al ser costo-efectivo a largo plazo y contribuyendo a la gestión de residuos?

1.2 Justificación de la Investigación

1.2.1 Importancia de la Investigación

Esta investigación se enmarca en la línea de estudio de diseño de ladrillos con materiales innovadores, con el propósito de desarrollar una alternativa sostenible a los ladrillos de arcilla mecanizados tipo IV, utilizados en muros portantes. La propuesta se basa en la fabricación de un ladrillo de concreto con adición de caucho reciclado y perlita expandida, evaluando su desempeño físico-mecánico, térmico, económico y ambiental.

Desde un enfoque ambiental, se busca reducir el impacto negativo de los neumáticos en desuso en la ciudad de Arequipa, reutilizándolos en la producción de un material de construcción. La acumulación de estos residuos representa un problema significativo debido a su lenta degradación y el riesgo de contaminación si se disponen inadecuadamente.

En cuanto al desempeño térmico, el uso de perlita expandida tiene el potencial de disminuir la transferencia de calor en el ladrillo, mejorando su capacidad de aislamiento. Esto se evaluará a través de simulación en ABAQUS, considerando escenarios de temperatura representativos del clima arequipeño y de incendios, lo que permitirá obtener datos detallados sobre su comportamiento térmico en comparación con los ladrillos de arcilla mecanizados.

A nivel estructural, se analizará la resistencia a la compresión del ladrillo propuesto, con el objetivo de que sea comparable a los ladrillos de arcilla mecanizados tipo IV, cumpliendo con las Normas Técnicas Peruanas.

Desde una perspectiva económica, se evaluará la viabilidad de producción, considerando costos y beneficios en comparación con los ladrillos tradicionales. Esta investigación podría representar una alternativa atractiva para la industria de materiales de construcción, promoviendo la fabricación de productos más sostenibles.

Asimismo, la investigación trasciende la evaluación del material a nivel unitario, incorporando su aplicación en un módulo de vivienda unifamiliar. Esto permite analizar su impacto real en el comportamiento estructural, térmico y económico de la edificación, acercando la propuesta a una escala práctica y validando su aplicabilidad en el contexto constructivo de Arequipa.

Finalmente, este estudio puede servir como base para futuras investigaciones, especialmente en la reutilización de residuos sólidos en la construcción y en el análisis térmico de materiales de edificación con herramientas computacionales.

1.2.2 Viabilidad de la Investigación

La investigación es viable debido a la disponibilidad de materiales y equipos necesarios para el desarrollo del estudio.

- **Accesibilidad a fuentes de información:** Se cuenta con investigaciones previas y bases de datos académicas que permitirán sustentar teóricamente la propuesta. Además, se recurrirá a fuentes virtuales, videoconferencias y medios electrónicos para complementar la recopilación de datos.
- **Disponibilidad de materiales:** El caucho reciclado será adquirido de una planta de procesamiento de neumáticos en desuso, lo que garantiza la consistencia en la

granulometría y composición del material. La perlita expandida, por su parte, se adquirirá en viveros, donde se comercializa regularmente.

- **Infraestructura y ensayos:** Se dispone de laboratorios con el equipo necesario para realizar los ensayos físico-mecánicos requeridos por las Normas Técnicas Peruanas. Además, la simulación térmica en ABAQUS permitirá evaluar el comportamiento del material sin necesidad de pruebas experimentales de alto costo. Estos factores aseguran que la investigación pueda desarrollarse de manera efectiva, permitiendo alcanzar los objetivos planteados.

- **Aplicación a escala de vivienda:** Se dispone de herramientas de análisis que permiten evaluar el comportamiento del ladrillo dentro de un módulo de vivienda unifamiliar, considerando variables estructurales, térmicas y económicas, lo que garantiza una evaluación integral del sistema constructivo.

1.3 Hipótesis

General

- Es posible fabricar un ladrillo de concreto con caucho reciclado y perlita expandida que sea viable en términos físico-mecánicos, económicos y ambientales, y que presente un mejor desempeño térmico en comparación con los ladrillos de arcilla mecanizados, de acuerdo con los resultados obtenidos mediante ensayos de laboratorio, simulaciones en ABAQUS y un análisis de su aplicación en un módulo de vivienda unifamiliar en la ciudad de Arequipa.

Específicos

- Las diferentes dosificaciones de caucho reciclado y perlita expandida influirán en la resistencia del concreto, permitiendo seleccionar una mezcla óptima con un desempeño mecánico aceptable según los ensayos en probetas a los 7, 14 y 28 días.
- Los ladrillos con caucho reciclado y perlita expandida presentarán propiedades físico-mecánicas comparables a los ladrillos de arcilla mecanizados, cumpliendo con los estándares mínimos establecidos en las Normas Técnicas Peruanas para su uso en muros portantes.
- El ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida tendrá un mejor desempeño térmico que los ladrillos de arcilla mecanizados, presentando una menor transferencia de calor, una distribución de temperatura más homogénea, menor flujo de calor y mayor resistencia térmica en condiciones de clima frío (10°C), moderado (25°C), caluroso (50°C) e incendio (1000°C).
- El ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida tendrá un costo de producción competitivo y una menor huella de carbono en comparación con los ladrillos de arcilla mecanizados, permitiendo la reutilización de llantas en desuso y contribuyendo a la reducción de desechos sólidos en Arequipa.
- Existe un diseño óptimo del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida que presenta un mejor desempeño en términos físico-mecánico, térmico, económico y ambiental.
- La aplicación del ladrillo óptimo en el módulo de vivienda unifamiliar es viable como un sistema constructivo integral, debido a que cumple satisfactoriamente con los requisitos estructurales, ofrece un desempeño

bioclimático justificado, y presenta una viabilidad económico-ambiental al ser costo-efectivo a largo plazo y contribuir a la gestión de residuos.

1.4 Objetivos de la Investigación

1.4.1 Objetivo General

- Fabricar y evaluar la viabilidad físico-mecánica, económica y ambiental de un ladrillo de concreto con caucho reciclado y perlita expandida, con análisis de conductividad térmica mediante simulación en ABAQUS; y analizar su aplicación en un módulo de vivienda unifamiliar en la ciudad de Arequipa.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Diseñar y fabricar prototipos del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida, ensayando diferentes dosificaciones en probetas y seleccionando las más adecuadas para su fabricación.
- b) Determinar las propiedades físico-mecánicas del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida mediante ensayos de laboratorio basados en las Normas Técnicas Peruanas vigentes, comparándolos con ladrillos de arcilla mecanizados.
- c) Analizar el comportamiento térmico del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida mediante simulaciones en ABAQUS, examinando la distribución de temperatura, la transferencia de calor y la resistencia térmica en condiciones de clima frío, moderado, caluroso e incendio, comparándolo con ladrillos de arcilla mecanizados.
- d) Calcular costos de producción, emisiones de CO₂ y la cantidad de llantas en desuso que podrían reutilizarse en la fabricación del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida, considerando su implementación en un porcentaje de la producción anual de ladrillos en Arequipa, y comparándolo con los ladrillos de arcilla mecanizados.

- e) Seleccionar el diseño óptimo del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida, considerando su desempeño en términos de comportamiento físico-mecánico, térmico, económico y ambiental.
- f) Analizar el impacto de la aplicación del ladrillo óptimo en el desempeño del módulo de vivienda unifamiliar, mediante la evaluación integral de su comportamiento estructural, térmico, económico, ambiental y bioclimático en el contexto de Arequipa.

1.5 Variables

1.5.1 Variables Independientes

- Porcentaje de caucho granulado en la mezcla
- Porcentaje de perlita expandida en la mezcla

1.5.2 Variables Dependientes

- Propiedades físico-mecánicas del ladrillo
- Propiedades térmicas del ladrillo
- Impacto ambiental
- Costo de producción
- Desempeño del módulo de vivienda

1.5.3 Operacionalización de las Variables

A continuación, se muestra la operacionalización de variables.

Tabla 1.

Operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	TIPO	DIMENSIÓN	INDICADOR	UNIDAD	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INSTRUMENTOS
INDEPENDIENTE	Porcentaje de Caucho granulado en la mezcla	Cuantitativa Continua	Diseño de Mezcla	Cantidad de caucho reciclado en la mezcla	% en peso respecto a la mezcla total	Se emplearán diferentes porcentajes de caucho reciclado en la fabricación de los ladrillos para evaluar su efecto en las propiedades del producto final.	Tabla de dosificación del diseño de mezcla, donde se especificarán los porcentajes de caucho reciclado utilizados en cada prototipo.
	Porcentaje de Perlita expandida en la mezcla		Diseño de Mezcla	Cantidad de perlita expandida en la mezcla	% en peso respecto a la mezcla total	Se incluirán diferentes proporciones de perlita expandida para evaluar su efecto en las propiedades térmicas y mecánicas del ladrillo.	Tabla de dosificación del diseño de mezcla, donde se especificarán los porcentajes de perlita expandida utilizados en cada prototipo.
DEPENDIENTE	Propiedades físico-mecánicas del ladrillo	Cuantitativa Continua	Evaluación de Propiedades Físicas en estado fresco	Asentamiento	pulgadas	Se aplica el método del cono de Abrams, que consiste en llenar el concreto en el cono en tres capas picando cada una, 25 veces con la varilla. Cuando se encuentre lleno, se enrasa la parte superior del molde y se levanta rápidamente, midiendo el asentamiento del concreto con respecto al molde cónico. Según la NTP 399.604 (2015) se debe medir largo, ancho y alto de cada espécimen.	- Cono truncado de plancha metálica de 12" de altura, con diámetro en base inferior 8" y diámetro en cara superior de 4" con asas en la parte superior. -Varilla redonda lisa sin resaltantes de 5/8" y 60cm de largo
				Variabilidad Dimensional	%	Se coloca la regla sobre una de las caras mayores y se mide su concavidad o convexidad, según la NTP 399.613 (2017)	Regla metálica
			Evaluación de Propiedades Físicas	Alabeo	mm	Se mide el volumen del ladrillo.	Regla metálica
				Porcentaje vacíos	de %	Se rellena las perforaciones de este con arena y luego se pesa lo que se utilizó para rellenar los	Balanza Arena gradada Recipientes

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	TIPO	DIMENSIÓN	INDICADOR	UNIDAD	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INSTRUMENTOS
Propiedades térmicas del ladrillo	Capacidad del ladrillo para regular la transferencia de calor y su respuesta térmica en distintas condiciones.	Cuantitativa Continua.	Aislamiento térmico	Absorción	gr/cm ³	vacíos, según lo que contempla la NTP 399.613 (2017). Durante 24 horas se sumergen en agua cada espécimen, para luego medir el peso saturado, según la NTP 399.604 (2015)	Poza con agua Balanza
				Succión	gr/200 cm ² -min	Cada espécimen se coloca en contacto con el agua cubriendo su base 3 mm durante un minuto. Se registra su peso según la NTP 399.613 (2017).	Poza con agua Horno para el secado
				Resistencia compresión probetas	a de kg/cm ²	Se aplica esfuerzos a compresión a muestras cilíndricas de concreto según la NTP 339.034 (2015).	Máquina universal de ensayos con esfuerzos
				Resistencia compresión unidad de albañilería	a de kg/cm ²	Se aplica esfuerzos a compresión según la NTP 399.604 (2015) a las unidades de albañilería con la colación de Capping de yeso sobre una unidad.	Máquina universal de ensayos con esfuerzos
				Resistencia compresión axial de pilas	a kg/cm ² – Mpa	Se aplica el método de ensayo para la determinación de la resistencia en compresión de prismas de albañilería según la NTP 399.605 (2018).	Máquina universal de ensayos con esfuerzos
				Resistencia a corte diagonal de muretes	a kg/cm ² – Mpa	Se aplica el método de ensayo de compresión diagonal en muretes de albañilería según la NTP 399.621 (2015).	Máquina universal de ensayos con esfuerzos
				Distribución de temperatura	°C	Se analizará el comportamiento térmico mediante simulaciones en ABAQUS en condiciones de clima frío, moderado, caluroso e incendio, comparándolo con los ladrillos de arcilla mecanizados.	Modelado y simulación en ABAQUS
				Transferencia de calor del ladrillo	W/m ²		
				Resistencia térmica del ladrillo	m ² K/W		
Impacto Ambiental	Efectos en la reducción de residuos y emisiones contaminantes derivados del uso de materiales reciclados en la fabricación del ladrillo.	Cuantitativa Continua	Sostenibilidad ambiental	Emisiones de CO ₂ en la producción	de la kg CO ₂	Se calcularán las emisiones de CO ₂ en la extracción de materia prima y fabricación del ladrillo con datos de fuentes secundarias. Además, se estimará la cantidad de neumáticos reciclados en el proceso.	Análisis de ciclo de vida del producto basado en literatura y bases de datos ambientales
				Cantidad de llantas en desuso reutilizadas	Toneladas/año		

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	TIPO	DIMENSIÓN	INDICADOR	UNIDAD	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INSTRUMENTOS
DEPENDIENTE	Costo de producción	Cuantitativa Continua	Viabilidad económica	Costo unitario del ladrillo	Soles por unidad (S/ por ladrillo)	Se calculará el costo de producción considerando el precio de las materias primas, mano de obra y procesos de fabricación, comparándolo con el costo de los ladrillos de arcilla mecanizados.	Presupuesto de costos y análisis comparativo
	Desempeño del Módulo de Vivienda	Cuantitativa	Técnico-constructivo	Peso total de ladrillos	kg	Diferencial de carga propia vs. sistema convencional.	Memoria de cálculo
				Consumo de unidades	und/m²	Cálculo geométrico según formato de ladrillo.	Metrado geométrico
			Económica	Costo total de vivienda	S/.	Sumatoria del presupuesto de obra según APU.	Presupuesto del módulo de vivienda unifamiliar
				Costo por m² de vivienda	S/./m²	Ratio entre costo total y área construida.	Presupuesto del módulo de vivienda unifamiliar + planos de vivienda
				Costo por m² de muro	S/./m²	Costo directo de la partida de muros.	Análisis de precios unitarios
				Incidencia muro portante	%	% de costo de la partida respecto al total.	Análisis de costos en el presupuesto
			Térmica	Costo por ladrillo colocado	S/./und	Costo unitario final asentado.	Análisis de precios unitarios
				Capacidad térmica total	MJ/K	Producto de capacidad unitaria por cantidad de ladrillos.	Cálculos con la capacidad térmica (unitaria) previamente obtenida (ABAQUS)
				Coefficiente global de pérdidas térmicas (H _{total})	W/K	Sumatoria de flujos de calor de la envolvente.	Cálculos con datos de referencias normativas (MVCS, 2015; ASHRAE, 2017; ISO 10077-1, 2017; INEN, 2017) y capacidad térmica hallada de ladrillos.
			Ambiental	Inercia térmica	Cualitativa	Evaluación de estabilidad ante variaciones diurnas.	Análisis dinámico
				CO ₂ evitado en fabricación	kg	Diferencia de emisiones: (CO ₂ KK - CO ₂ F).	Análisis de Ciclo de Vida
				Ecoeficiencia	kg CO ₂ /S/.	Relación entre CO ₂ evitado y sobrecosto.	Análisis de Ciclo de Vida y Presupuesto total de vivienda
		Global		NFU valorizados	kg/vivienda	Balance de masa de caucho (cantidad * dosificación).	Balance de masa
				Costo de mitigación	S/./t CO ₂	Ratio entre sobrecosto y toneladas CO ₂ evitadas.	Rentabilidad ambiental

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	TIPO	DIMENSIÓN	INDICADOR	UNIDAD	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INSTRUMENTOS
DEPENDIENTE	Desempeño del Módulo de Vivienda	Cuantitativa	Técnico-constructivo	Costo por capacidad térmica adicional (S./MJ/K)	S./MJ/K	Relación costo-beneficio en términos energéticos.	Presupuesto total de vivienda y datos de capacidad termica
				Peso total de ladrillos	kg	Diferencial de carga propia vs. sistema convencional.	Memoria de cálculo
				Consumo de unidades	und/m²	Cálculo geométrico según formato de ladrillo.	Metrado geométrico
				Económica	Costo total de vivienda	S/.	Sumatoria del presupuesto de obra según APU.

Nota. Elaboración propia

1.6 Limitaciones de la Investigación

- **Alcance del análisis comparativo:** El estudio se centrará en la comparación del ladrillo propuesto con el ladrillo de arcilla mecanizado tipo IV, ya que posee las características necesarias para la construcción de muros portantes. En particular, se utilizará como referencia el ladrillo King Kong de 18 huecos de la ladrillera El Diamante, debido a su alta comercialización en el mercado de Arequipa.
- **Porcentajes de caucho reciclado evaluados:** Solo se analizarán tres niveles de incorporación de caucho reciclado (5%, 10% y 15%), determinados a partir de estudios previos. Esto tiene como objetivo identificar el porcentaje más eficiente sin ampliar excesivamente el alcance experimental.
- **Tamaño de las partículas de caucho reciclado:** El tamaño de las partículas de caucho reciclado está determinado por las características del material adquirido en una planta con maquinaria especializada en la tritución de caucho.
- **Tamaño de partícula de la perlita expandida:** Se trabajará con un único tamaño de partícula de perlita mineral, definido por la oferta comercial disponible en los viveros de Arequipa, lo que restringe la posibilidad de evaluar variaciones en su granulometría.
- **Metodología de fabricación:** El proceso de elaboración de las unidades de albañilería se realizó bajo métodos artesanales con control manual de dosificación, compactación y curado. A diferencia de los ladrillos King Kong convencionales, fabricados mediante procesos industriales estandarizados (extrusión y prensado hidráulico), esta condición introduce una mayor variabilidad en las propiedades físico-mecánicas (resistencia y dimensiones), lo que limita los resultados sin ajustes previos en los controles de calidad.
- **Limitaciones en la simulación térmica de ladrillos:** La simulación en ABAQUS modelará la transferencia de calor y la distribución térmica en condiciones controladas,

pero no replicará con total precisión factores ambientales reales como humedad, viento o radiación solar, que podrían influir en el desempeño térmico del material en obra.

- **Propiedades mecánicas en laboratorio vs. condiciones reales:** Las propiedades físico-mecánicas del ladrillo se evaluarán en laboratorio bajo condiciones controladas, lo que puede no reflejar completamente su comportamiento en estructuras reales, donde influyen otros factores como cargas dinámicas, asentamiento diferencial y compatibilidad con otros materiales.
- **Disponibilidad y costo de materiales:** La obtención de caucho reciclado y perlita expandida dependerá de la oferta en Arequipa, lo que podría afectar la viabilidad económica y escalabilidad del producto en caso de fabricación masiva.
- **Normativas y aceptación regulatoria:** Aunque se comparará con las Normas Técnicas Peruanas, la validación del ladrillo como material de construcción podría requerir certificaciones adicionales o pruebas complementarias para su aprobación en el mercado.
- **Escalabilidad de la producción:** La fabricación se realizará a nivel experimental para evaluar su desempeño, pero no se analizará su viabilidad en una producción industrial, lo que podría implicar desafíos técnicos y económicos en su implementación a gran escala.
- **Delimitación del módulo de vivienda:** La presente investigación no constituye una ejecución de obra real de la aplicación del ladrillo en una vivienda, sino una aplicación teórica. En consecuencia, el análisis de viabilidad técnica está condicionado por la precisión del cálculo teórico; se asume que los resultados de comportamiento térmico y estructural podrían presentar desviaciones respecto a una construcción real debido a factores constructivos no definidos, tales como: la experiencia real del personal de obra,

el cumplimiento estricto de las partidas de construcción y las variaciones en la calidad de los materiales puestos en obra.

- **Delimitación del análisis ambiental del módulo de vivienda:** El análisis de emisiones de CO₂ se circunscribe exclusivamente a la etapa de producción de los ladrillos propuestos. Esta delimitación implica que la investigación no constituye un análisis de ciclo de vida (ACV) completo de la vivienda, excluyendo las emisiones asociadas a otros materiales estructurales (cemento, acero, agregados), transporte y energía en obra. Los resultados deben entenderse únicamente como un comparativo de la huella ambiental del material propuesto frente a las unidades convencionales.
- **Limitación del análisis térmico del módulo de vivienda:** El análisis térmico se basa en simulaciones computacionales (ABAQUS) hechos al ladrillo y métodos analíticos, bajo condiciones de contorno idealizadas. Estos resultados representan indicadores de desempeño predictivo y no mediciones reales de una edificación ejecutada, omitiendo variables como infiltraciones de aire por vanos, desgaste térmico del material y condiciones climáticas dinámicas reales.

CAPÍTULO II: Fundamento Teórico

2.1 Estado del Arte

2.1.1 Internacional

2.1.1.1 Caucho reciclado en concreto.

Diversos estudios han analizado el uso de caucho reciclado como sustituto parcial de agregados en concreto. Eissa, Habib, Al Houry y Alibrahim (2024) señalan que el rango óptimo de reemplazo se ubica entre 2 % y 5 %, donde se conserva la ductilidad sin afectar de forma crítica la resistencia. En la misma línea, Saeed (2024) evidenció que la sustitución de arena por caucho triturado es viable solo en dosis controladas, pues porcentajes mayores a 10 % reducen significativamente la resistencia a compresión.

En investigaciones orientadas a concretos de alto desempeño, Pham et al. (2024) destacan que la inclusión de caucho aporta beneficios ambientales, aunque compromete la trabajabilidad y la resistencia si la proporción es elevada. De igual forma, Abdelaleem (2024) y Sherbini (2025) confirman que, aunque se obtienen concretos más ligeros y con mayor capacidad de absorción de energía, la resistencia sigue siendo menor que la del concreto patrón.

En síntesis, la literatura internacional reciente coincide en que el caucho reciclado es adecuado para aplicaciones no estructurales o de baja exigencia, pero aún existe un vacío respecto a su empleo en elementos modulares como ladrillos.

2.1.1.2 Perlita expandida en concreto

La perlita expandida ha sido estudiada como agregado ligero por su baja densidad y capacidad aislante. Abed et al. (2025) destacan que su uso mejora el aislamiento térmico y reduce el peso, pero porcentajes elevados generan pérdida de resistencia. De igual forma, Ayfari et al. (2024) comprobaron que mezclas con altos contenidos de perlita presentan propiedades mecánicas muy reducidas, lo que limita su uso estructural.

Flores et al. (2025) hallaron que dosis moderadas de perlita mejoran la ligereza y disminuyen la conductividad térmica, aunque altas proporciones afectan la trabajabilidad y resistencia. Finalmente, Fan et al. (2025) subrayan la necesidad de profundizar en estudios de durabilidad y en aplicaciones específicas como ladrillos y bloques.

2.1.2 Nacional

2.1.2.1 Caucho reciclado en concreto

En el Perú, las investigaciones recientes sobre concreto con caucho reciclado son todavía limitadas. Vilca Gonzales (2024) evaluó la adición de caucho reciclado en concreto y reportó resultados dispersos, principalmente en probetas. Vizcarra (2022) exploró su aplicación en bloques y encontró que presentaban menor densidad y mayor absorción.

Asimismo, Goñas y Saavedra (2020) destacaron que estos bloques muestran limitaciones para aplicaciones estructurales, lo cual refleja la necesidad de profundizar en la aplicación de agregados alternativos en ladrillos de concreto, especialmente considerando que el país genera grandes volúmenes de residuos de neumáticos.

2.1.2.2 Perlita expandida en concreto

en estudios de durabilidad y en aplicaciones específicas como ladrillos y bloques.

A nivel nacional, la documentación académica reciente sobre la perlita expandida en mezclas de concreto y ladrillos es escasa. La mayor parte de estudios disponibles provienen de investigaciones internacionales (Abed et al., 2025; Fan et al., 2025). Esta carencia constituye una oportunidad para analizar su desempeño en bloques y ladrillos producidos localmente.

2.1.3 Brechas de investigación

A partir de la revisión de la literatura internacional y nacional, se identifican brechas importantes que justifican la presente investigación. Si bien existe evidencia del potencial del caucho reciclado y de la perlita expandida como agregados alternativos, los estudios recientes coinciden en que aún faltan ensayos aplicados específicamente a bloques y ladrillos de

concreto. Asimismo, en el contexto peruano los trabajos disponibles son escasos y con metodologías limitadas, lo cual impide establecer lineamientos claros para su aplicación en la industria de la construcción.

Tabla 2.

Brechas de investigación identificadas en el estado del arte

Tema	Evidencia internacional	Evidencia nacional	Brecha identificada
Caucho reciclado en concreto	Estudios recientes (Eissa et al., 2024; Saeed, 2024; Pham et al., 2024) muestran que dosis entre 2 % y 5 % pueden mantener ductilidad y reducir peso, pero porcentajes elevados disminuyen la resistencia.	Investigaciones limitadas (Vilca Gonzales, 2024; Vizcarra, 2022) muestran resultados en probetas y bloques, pero sin continuidad.	Escasez de estudios aplicados a ladrillos de concreto con caucho reciclado en Perú.
Perlita expandida en concreto	Investigaciones actuales (Abed et al., 2025; Ayfari et al., 2024; Fan et al., 2025) destacan su potencial como agregado ligero y aislante, aunque altas dosis reducen la resistencia.	No existen investigaciones recientes aplicadas a bloques o ladrillos.	Vacío en la evaluación de la perlita expandida en la fabricación de ladrillos de concreto en el contexto nacional.
Aspectos combinados (caucho + perlita)	No se reportan estudios integrados que evalúen ambos materiales en conjunto.	Tampoco se han desarrollado investigaciones que combinen ambos agregados en Perú.	Brecha en el análisis sinérgico de caucho y perlita para la producción de ladrillos con beneficios ambientales, mecánicos y térmicos.

Nota. Elaboración propia

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Concreto y unidades de albañilería

El concreto es el material de construcción más empleado a nivel mundial por su resistencia, durabilidad y versatilidad. Según la Federación Internacional del Hormigón (fib, 2021), constituye más del 70% de los materiales usados en edificaciones modernas. En el contexto de la presente investigación, resulta esencial comprender sus componentes, propiedades y la forma en que se fabrican las unidades de albañilería, en comparación con los ladrillos de arcilla mecanizados, predominantes en la ciudad de Arequipa.

2.2.1.1 Definición y componentes del concreto

El concreto es una mezcla de cemento hidráulico, agua y agregados (finos y gruesos), a la que se pueden incorporar aditivos o materiales suplementarios. El cemento Portland es el aglomerante más común y, al hidratarse, produce geles que otorgan resistencia. Los agregados representan entre el 70% y 80% del volumen total, aportando estabilidad dimensional, mientras que la relación agua/cemento regula la resistencia final (Mehta & Monteiro, 2022).

2.2.1.2 Propiedades físico-mecánicas del concreto

Las propiedades más relevantes para unidades de albañilería son:

- **Resistencia a compresión**, evaluada normalmente a 28 días.
- **Módulo de elasticidad**, relacionado con la rigidez y los agregados empleados.
- **Absorción y permeabilidad**, factores que condicionan la durabilidad.
- **Peso unitario**, que clasifica al concreto en normal, ligero o pesado (Castillo et al., 2020).

Estas características determinan la idoneidad del concreto para su uso en elementos portantes o no portantes.

2.2.1.3 Unidades de albañilería de concreto

Los ladrillos de concreto son elementos prefabricados obtenidos al moldear y compactar mezclas cementicias. La NTP 399.613 (2021) establece requisitos de resistencia mínima, absorción y uniformidad dimensional. Existen ladrillos sólidos, perforados o aligerados con adiciones como perlita o caucho reciclado, lo que permite ajustar propiedades según las necesidades constructivas (García et al., 2023).

2.2.1.4 Ladrillos de arcilla mecanizados

Los ladrillos de arcilla mecanizados son ampliamente usados en el Perú por tradición y costo relativamente bajo. Están elaborados a partir de arcilla plástica que se extruye, corta, seca y finalmente se cuece en hornos a altas temperaturas (900–1000 °C), lo que les otorga estabilidad, pero también implica un alto consumo energético y emisiones contaminantes (Torres & Ramos, 2022).

Ladrillera El Diamante. Esta ladrillera ofrece el ladrillo King Kong, el cual tiene cinco variaciones.

Tabla 3.

Datos del ladrillo King Kong Fortaleza

King Kong Fortaleza	Tipo	Medidas (cm)	Peso (kg)	Resistencia a compresión (Kg/cm ²) (min)
	IV	10x14x24	2.55(min)- 2.90(máx.)	130

Nota. Elaborado con datos de Ladrillera El Diamante

Tabla 4.

Datos del ladrillo King Kong Hércules 9

King Kong Hércules 9	Tipo	Medidas (cm)	Peso (kg)	Resistencia a compresión (Kg/cm ²) (min)
	IV	9x14x24	2.65(min)- 2.90(máx.)	130

Nota. Elaborado con datos de Ladrillera El Diamante

Tabla 5.*Datos del ladrillo King Kong Hércules 10*

King Kong Hércules 10	Tipo	Medidas (cm)	Peso (kg)	Resistencia a compresión (Kg/cm ²) (min)
	IV	10x14x24	2.95(min)- 3.20(máx.)	130

Nota. Elaborado con datos de Ladrillera El Diamante

Tabla 6.*Datos del Ladrillo King Kong Lima 18*

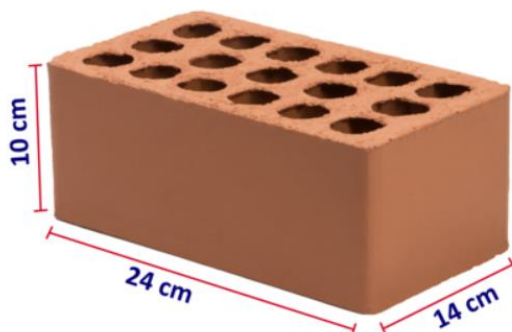
King Kong Lima 18	Tipo	Medidas (cm)	Peso (kg)	Resistencia a compresión (Kg/cm ²) (min)
	IV	9x12.5x23	2.55(min)- 2.90(máx.)	130

Nota. Elaborado con datos de Ladrillera El Diamante

Tabla 7.*Datos del Ladrillo King Kong Infes*

King Kong Infes	Tipo	Medidas (cm)	Peso (kg)	Resistencia a compresión (Kg/cm ²) (min)
	V	9x13x24	3.40(min)- 3.75(máx.)	180

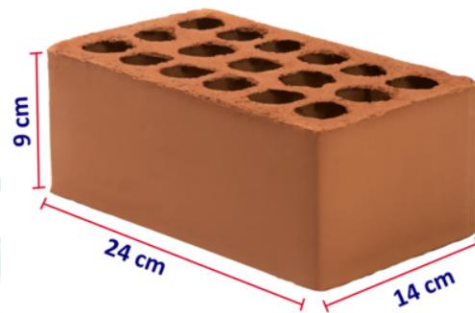
Nota. Elaborado con datos de Ladrillera El Diamante

Figura 1.*Medidas del ladrillo King Kong Fortaleza*

Nota. Adaptado de Ladrillera El Diamante

Figura 2.

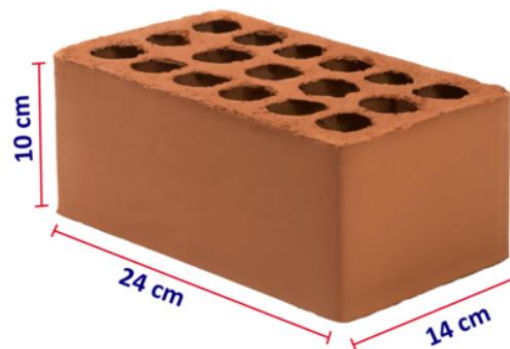
Medidas del ladrillo King Kong Hércules 9



Nota. Ladrillera El Diamante

Figura 3.

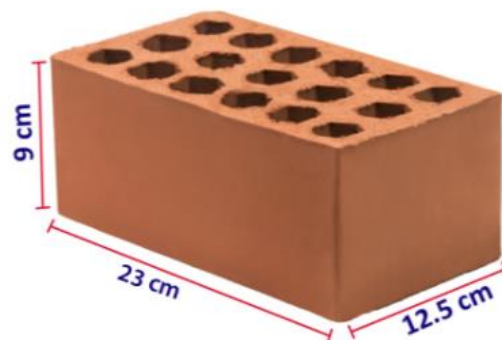
Medidas del ladrillo King Kong Hércules 10



Nota. Adaptado de Ladrillera El Diamante

Figura 4.

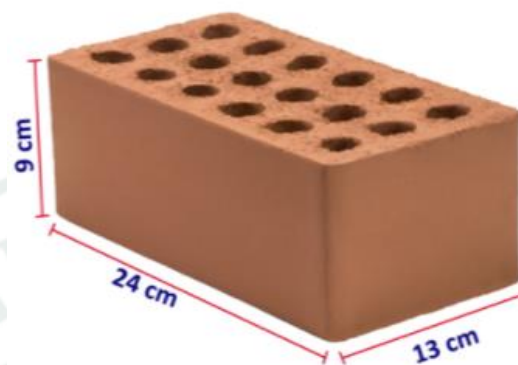
Medidas del ladrillo King Kong Lima 18



Nota. Adaptado de Ladrillera El Diamante

Figura 5.

Medidas del Ladrillo King Kong Infes



Nota. Adaptado de Ladrillera El Diamante

Ladrillera Unidas del Sur. Esta ladrillera ofrece el ladrillo King Kong, el cual tiene dos variaciones.

Tabla 8.

Datos del ladrillo King Kong H9

King Kong H9	Tipo	Medidas (cm)	Peso (kg)	Resistencia a compresión (Kg/cm ²) (min)
	IV	9x14x24	3	130

Nota. Elaborado con datos de Ladrillera Unidas S.A.

Tabla 9.

Datos del ladrillo King Kong H10

King Kong H10	Tipo	Medidas (cm)	Peso (kg)	Resistencia a compresión (Kg/cm ²) (min)
	IV	10x14x24	3	130

Nota. Elaborado con datos de Ladrillera Unidas S.A.

2.2.1.5 Comparación de propiedades

Tabla 10.

Comparación entre ladrillos de concreto y arcilla mecanizados

Propiedad	Ladrillo de concreto	Ladrillo de arcilla mecanizado
Resistencia a compresión	150–220 kg/cm ²	70–120 kg/cm ²
Absorción de agua	5–12%	12–20%
Durabilidad	Alta, resistente a intemperie	Media, sensible a humedad
Producción	Curado en húmedo	Cocción en hornos
Impacto ambiental	Moderado, admite reciclados	Alto por combustión

Nota. Adaptado de García et al. (2023) y Torres & Ramos (2022)

2.2.1.6 Proceso de fabricación

2.2.1.6.1 Ladrillos de concreto

El proceso de producción de ladrillos de concreto es principalmente mecánico y de bajo consumo energético:

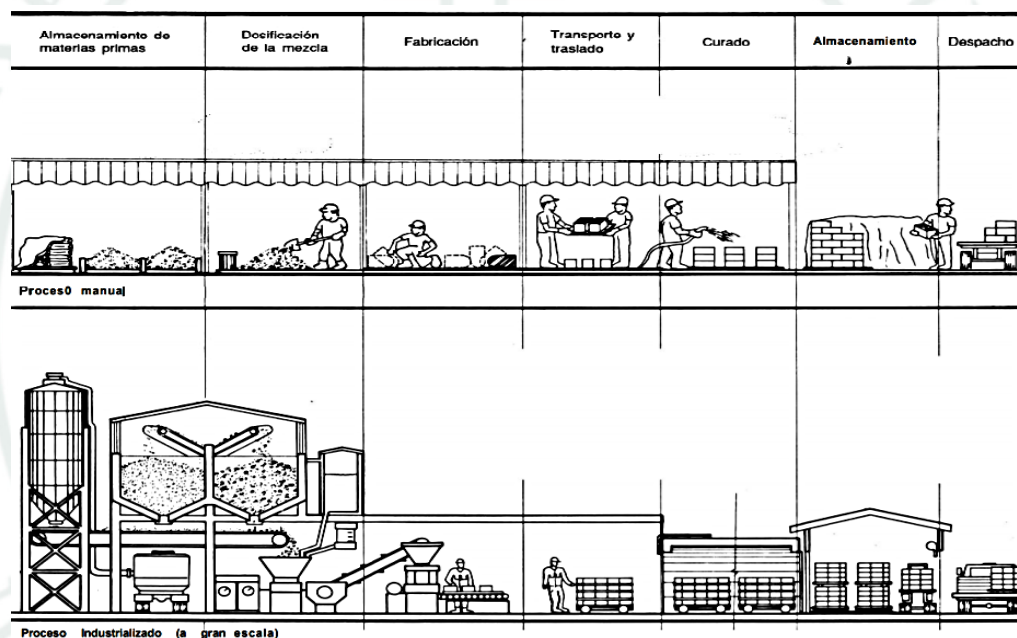
- **Dosificación y mezclado:** Se pesan los materiales (cemento, agregados, agua y aditivos) y se mezclan en trompos o batidoras mecánicas para lograr homogeneidad.
- **Moldeado y compactación:** La mezcla fresca se coloca en moldes metálicos o de madera. La compactación se realiza por presión o vibración, lo que asegura densidad y resistencia.
- **Desmolde inmediato:** A diferencia de la arcilla, el concreto se puede desmoldar inmediatamente debido a su consistencia rígida.

- **Curado húmedo:** Los ladrillos se sumergen en agua o se mantienen en cámaras húmedas durante al menos 7 días, alcanzando resistencias óptimas a los 28 días (García et al., 2023).

Este método permite producir grandes volúmenes en ciclos cortos, sin necesidad de hornos de alta temperatura. Además, facilita la incorporación de materiales reciclados, reduciendo la demanda de cemento y agregados naturales.

Figura 6.

Esquema comparativo de los procesos de fabricación del ladrillo de concreto



Nota. Adaptado del Instituto Colombiano de Productores de Cemento – ICPC, (1991)

2.2.1.6.2 Ladrillos de arcilla mecanizados

El proceso de los ladrillos de arcilla es más intensivo en recursos:

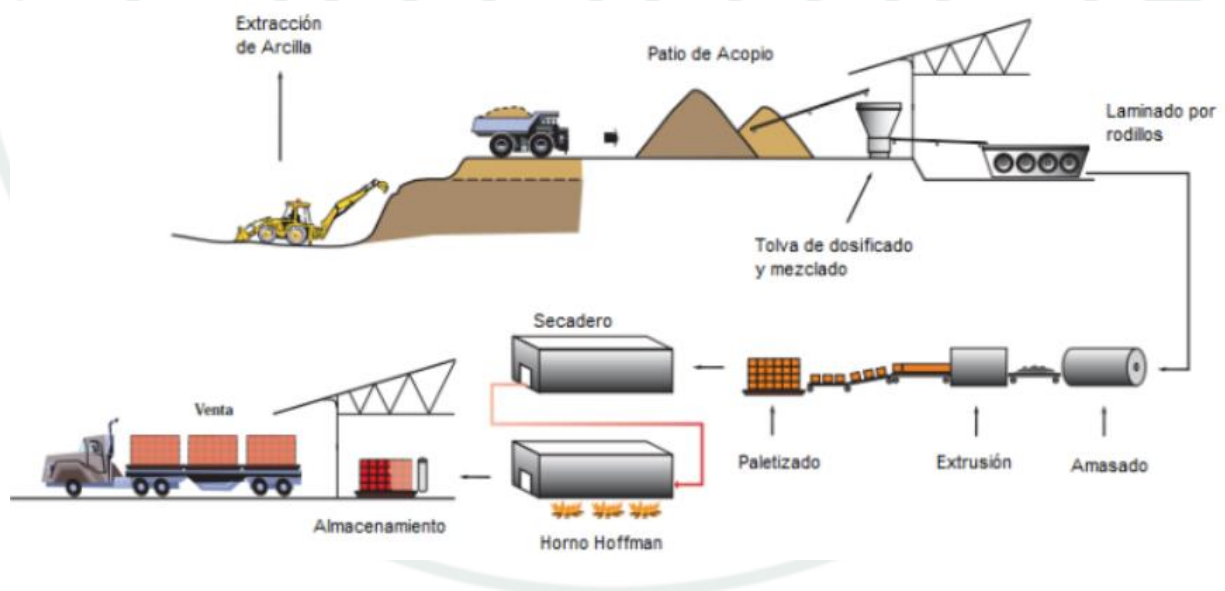
- **Extracción y preparación de la arcilla:** Se obtiene de canteras y se acondiciona eliminando impurezas.
- **Amasado y extrusión:** La arcilla plástica se homogeniza y se extruye en bloques que luego son cortados en piezas unitarias con hilos metálicos.

- **Secado:** Antes de la cocción, los ladrillos deben reducir su contenido de humedad para evitar fisuras. Este secado puede durar varios días, ya sea al aire libre o en secaderos artificiales.
- **Cocción:** Se realiza en hornos Hoffman o túnel, alcanzando temperaturas de 900–1000 °C durante 24–48 horas. Esta etapa es la que confiere dureza y estabilidad dimensional, pero también es la más contaminante por el uso de combustibles fósiles.
- **Enfriado y clasificación:** Una vez cocidos, los ladrillos se enfrían lentamente para evitar fisuras y luego se clasifican según calidad (Torres & Ramos, 2022).

Aunque el proceso garantiza piezas resistentes y uniformes, el consumo energético y la liberación de gases contaminantes representan un impacto ambiental significativo.

Figura 7.

Esquema de fabricación mecanizada de unidades de arcilla



Nota. Adaptado de Rodríguez (2007)

Tabla 11.*Diferencias en la fabricación de ladrillos de concreto y arcilla*

Etapas	Concreto	Arcilla mecanizada
Materias primas	Cemento, agua, agregados, reciclados	Arcilla, agua
Conformado	Moldeado y compactación	Extrusión y corte
Secado/Curado	Curado en agua o cámara húmeda	Secado y cocción
Energía requerida	Baja	Alta
Emisiones de CO ₂	Moderadas	Elevadas

Nota. Adaptado de García et al. (2023) y Torres & Ramos (2022)

2.2.1.7 Relevancia

La principal diferencia radica en que los ladrillos de concreto se producen con menor gasto energético y sin hornos, lo que reduce emisiones. Por el contrario, los de arcilla requieren cocción prolongada a altas temperaturas, con consumo de combustibles y generación de gases contaminantes. Estas diferencias técnicas son clave para entender por qué la propuesta de incluir caucho reciclado y perlita expandida en ladrillos de concreto tiene mayor potencial de sostenibilidad, análisis que se desarrollará en detalle en el apartado 2.6.

2.2.2 Materiales alternativos para el concreto

La industria de la construcción enfrenta actualmente el desafío de reducir su impacto ambiental mediante la incorporación de materiales reciclados y sostenibles en sus procesos productivos. Dos de los insumos con mayor potencial para reemplazar parcialmente a los agregados convencionales son el **caucho reciclado proveniente de llantas en desuso** y la **perlita expandida de origen volcánico**. Ambos poseen propiedades que permiten mejorar ciertos aspectos físicos y térmicos del concreto, aunque también presentan limitaciones que deben ser evaluadas con rigurosidad.

2.2.2.1 Caucho reciclado

2.2.2.1.1 *Origen y obtención*

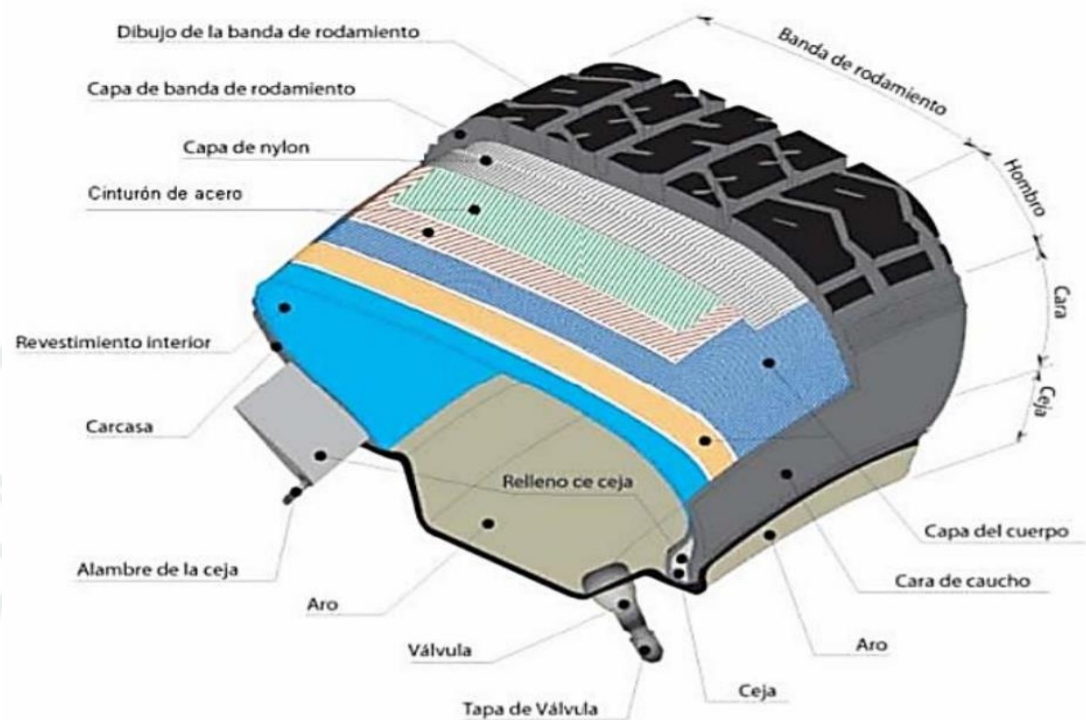
El caucho reciclado utilizado en mezclas de concreto proviene principalmente de **llantas fuera de uso**. Se estima que, a nivel mundial, se generan más de 1,5 mil millones de neumáticos desechados cada año, lo que representa un grave problema ambiental debido a su lenta degradación (Rodríguez et al., 2021). En el Perú, la Ley N.º 29519 promueve la gestión de neumáticos en desuso, incentivando el reciclaje mediante trituración mecánica para obtener gránulos de caucho de diferentes tamaños.

El proceso de obtención incluye:

- **Recolección y selección de llantas** en desuso.
- **Trituración mecánica o criogénica**, donde las llantas se fragmentan hasta obtener partículas de 0,5 a 10 mm.
- **Separación de impurezas** como acero y fibras textiles.
- **Clasificación granulométrica**, de acuerdo con el tamaño requerido para su uso en mezclas cementicias.

Figura 8.

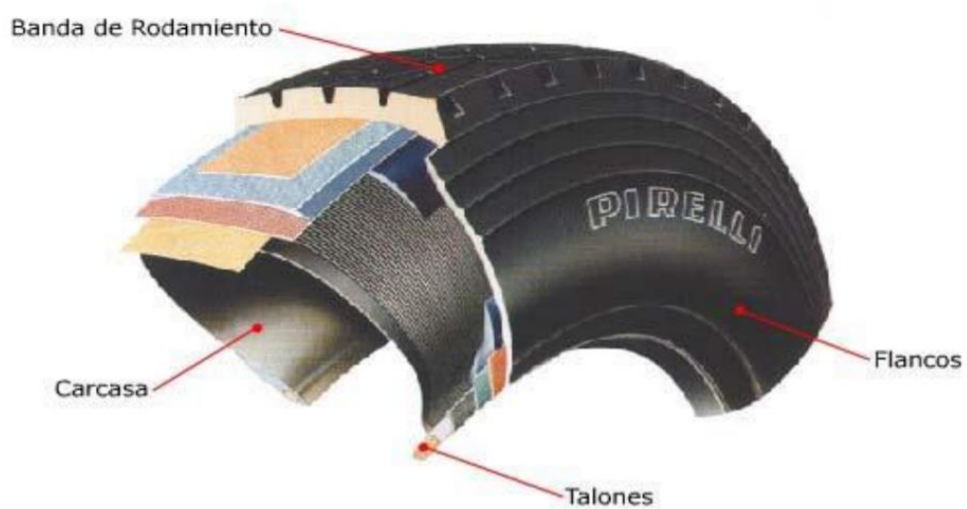
Estructura del neumático



Nota. Adaptado de Calvo (1997)

Figura 9.

Partes del neumático



Nota. Adaptado de Calvo (1997)

2.2.2.1.2 *Propiedades físicas y químicas*

El caucho reciclado se caracteriza por su **baja densidad (aprox. 500–600 kg/m³)**, su elasticidad y su resistencia al desgaste. Sin embargo, presenta **superficies hidrofóbicas** con escasa adherencia a la matriz cementante, lo que reduce la resistencia mecánica del concreto (Gutiérrez et al., 2022).

Tabla 12.

Propiedades típicas del caucho reciclado

Propiedad	Valor aproximado
Densidad	0,5 – 0,6 g/cm ³
Absorción de agua	1 – 3 %
Conductividad térmica	0,15 – 0,25 W/m·K
Elasticidad	Alta

Nota. Adaptado de Gutiérrez et al. (2022)

2.2.2.1.3 *Contaminación causada por neumáticos en desuso*

Según la revista digital Interfaz Negocios (2013), la quema de neumáticos genera energía con un poder calorífico muy alto (15,000 BTU/lb), es por eso que son usados como combustible en ladrilleras y cementeras. Este poder calorífico supera en 200% más al del carbón.

Esta práctica requiere realizarse en una temperatura promedio de 1 110°C además de poseer controles de gases emitidos, ya que de no hacerlo generaría residuos peligrosos. Si estos gases no se controlan, tendríamos un escenario muy perjudicial para la salud y medio ambiente.

Tabla 13.*Partículas generadas durante la incineración de neumáticos*

Elemento	Nomenclatura
Monóxido de carbono	CO
Dióxido de sulfuro	SOx
Óxido nitroso	NOx
Compuestos volátiles orgánicos	CVO

Nota. Adaptado de Babativa (2017)

Tabla 14.*Otros residuos peligrosos generados durante la incineración de neumáticos*

Residuos peligrosos	Metales peligrosos
Hidrocarburos aromáticos polinucleares (PAH)	Niquel
Cloruro de hidrógeno	Cadmio
Benceno	Arsénico
Policlorados	Mercurio
Dioxina	Zinc
Bifenilos policlorados	Cromo
	Vanadio

Nota. Adaptado de Babativa (2017)

Según Luján (2005) la quema de llantas genera residuos en forma de partículas hasta en 150 metros a la redonda, es decir cerca de 4 hectáreas. Estas partículas son carboalquitransas contaminadas a su vez con otros polutantes que se adhieren a aquellos alimentos que estuvieron expuestos (pan, frutas, verduras que se consumen crudas), llevándolos así a la vía digestiva.

2.2.2.1.4 *Aplicaciones en concretos y morteros*

El caucho reciclado se utiliza como sustituto parcial de los agregados finos o gruesos.

Los principales efectos reportados son:

- **Reducción de resistencia a compresión**, proporcional al aumento del porcentaje de caucho. Ensayos recientes muestran pérdidas de 20–40% cuando se reemplaza más del 10% del agregado fino (Pérez et al., 2023).
- **Mejora en la absorción de energía y ductilidad**, lo que convierte al concreto con caucho en un material más resistente al impacto y a la fatiga.
- **Reducción de densidad y conductividad térmica**, lo que favorece el comportamiento como material de aislamiento.
- **Durabilidad adecuada**, siempre que se limite el contenido de caucho y se empleen aditivos que mejoren la adherencia pasta-agregado.

2.2.2.1.5 *Limitaciones*

Las principales limitaciones del caucho reciclado en concreto son:

- Disminución de la resistencia a compresión y flexión.
- Posible formación de microvacíos por la baja adherencia entre caucho y pasta cementicia.
- Dificultad para alcanzar los requisitos normativos de ciertos elementos estructurales.

Por ello, su uso se recomienda principalmente en **ladrillos no estructurales, bloques de cerramiento y elementos con requerimientos de aislamiento acústico y térmico** (Ríos et al., 2021).

2.2.2.2 Perlita expandida

2.2.2.2.1 Origen y obtención

La perlita es una roca volcánica vítrea con alto contenido de sílice y agua combinada. Al ser sometida a un calentamiento rápido a temperaturas de 850–1000 °C, su agua interna se vaporiza y expande el material hasta 20 veces su volumen inicial, generando un producto extremadamente ligero conocido como perlita expandida (Martínez et al., 2020).

En el Perú, la perlita se extrae principalmente en regiones volcánicas como Arequipa y se comercializa tanto en horticultura como en construcción.

Se encuentra a la perlita en tres estados:

- **Perlita sin procesar.** Material encontrado en forma natural.
- **Perlita cruda procesada.** Material luego de ser molido.
- **Perlita expandida o ablandada.** Luego de ser expuesta en un horno a altas temperaturas y multiplicado su tamaño.

Figura 10.

Etapas de la perlita



Nota. Adaptado de Carolina Perlite Company

Tabla 15.

Aplicación según la granulometría de la perlita

Uso	Granulometría
Horticultura	0.59 – 10 mm
Concreto y rellenos	0.25 – 2.83 mm
Retención de agua	0.088 – 1.00 mm
Ayuda filtrante	0.020 – 0.59 mm

Nota. Adaptado de Perlite Institute, Inc. (2016)

Figura 11.

Tamaños de la perlita



Nota. Adaptado de Carolina Perlite Company

2.2.2.2.2 Propiedades físicas y químicas

La perlita expandida se caracteriza por su muy baja densidad (90–120 kg/m³), alta porosidad y baja conductividad térmica, lo que la convierte en un excelente aislante térmico y acústico.

Tabla 16.*Propiedades típicas de la perlita expandida*

Propiedad	Valor aproximado
Densidad	90 – 120 kg/m ³
Absorción de agua	>100 %
Conductividad térmica	0,04 – 0,06 W/m·K
Resistencia a compresión	Muy baja

Nota. Adaptado de Martínez et al. (2020)

2.2.2.2.3 *Aplicaciones en concretos y morteros*

La perlita expandida se emplea como sustituto parcial del agregado fino en concretos y morteros ligeros. Entre sus principales efectos se encuentran:

- **Reducción significativa del peso unitario**, con valores entre 800–1500 kg/m³.
- **Mejor desempeño térmico y acústico**, gracias a su baja conductividad y estructura porosa.
- **Disminución de la resistencia mecánica**, lo que limita su uso en elementos portantes.
- **Mayor absorción de agua**, lo que requiere ajustes en la dosificación y el uso de aditivos impermeabilizantes (Santos et al., 2022).

2.2.2.2.4 *Limitaciones*

Las principales desventajas de la perlita expandida son su baja resistencia mecánica y su alta absorción de agua, que puede afectar la trabajabilidad de la mezcla. No obstante, estas limitaciones se compensan con su excelente desempeño como aislante y su ligereza, cualidades deseables en la fabricación de ladrillos de concreto no estructurales.

2.2.2.3 Sinergia entre caucho reciclado y perlita expandida

La combinación de caucho y perlita en mezclas de concreto busca un equilibrio entre resistencia, ligereza y propiedades térmicas. Mientras el caucho aporta elasticidad y reciclaje de residuos sólidos, la perlita proporciona aislamiento térmico.

Estudios recientes indican que, cuando ambos materiales se usan en proporciones moderadas (5–15%), es posible obtener ladrillos de concreto con propiedades mecánicas aceptables y un desempeño térmico superior al de ladrillos convencionales (López et al., 2024).

2.2.2.4 Relevancia para la investigación

El uso de caucho reciclado y perlita expandida responde a dos objetivos clave:

- **Ambiental:** reutilización de residuos (llantas en desuso) y reducción del impacto energético de la edificación mediante mejor aislamiento térmico.
- **Económico-social:** menor consumo de agregados naturales y posibilidad de crear cadenas de valor a partir del reciclaje.

Para el caso de Arequipa, ciudad con contrastes climáticos marcados y altos índices de generación de residuos de llantas, esta combinación se presenta como una alternativa viable para la producción de ladrillos sostenibles, contribuyendo a la economía circular y a la reducción de emisiones en el sector construcción.

2.2.3 *Propiedades físico-mecánicas en mezclas con adiciones*

La inclusión de materiales alternativos como el caucho reciclado y la perlita expandida en mezclas de concreto modifica significativamente sus propiedades físico-mecánicas. Estos cambios no siempre son negativos; en algunos casos, si se emplean en proporciones moderadas y con un diseño de mezcla adecuado, pueden aportar beneficios adicionales a la durabilidad, la ligereza o el aislamiento térmico. A continuación, se presentan los principales efectos en cada propiedad relevante.

2.2.3.1 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión es la propiedad más crítica en el concreto, pues determina su capacidad de carga. Diversos estudios han reportado que el reemplazo parcial de agregados finos por caucho reciclado reduce progresivamente la resistencia, debido a la baja rigidez del caucho y su débil adherencia a la pasta cementicia (Pérez et al., 2023).

En cambio, la perlita expandida, al ser un material muy ligero y poroso, también genera disminución de la resistencia, pero aporta beneficios en términos de aislamiento térmico. El efecto combinado de ambos materiales puede controlarse limitando su porcentaje en la mezcla a un rango del 5% al 15%, dependiendo de los requisitos de diseño (López et al., 2024).

Tabla 17.

Reducción de resistencia a compresión según adición de caucho y perlita

Tipo de mezcla	% de sustitución	Resistencia (kg/cm ²)	Variación respecto al patrón
Concreto patrón	0%	210	-
+5% caucho	5%	180	-14 %
+10% caucho	10%	160	-24 %
+5% perlita	5%	185	-12 %
+10% perlita	10%	165	-21 %
+10% caucho + 5% perlita	15% combinado	170	-19 %

Nota. Adaptado de Pérez et al. (2023) y López et al. (2024)

Esto demuestra que, aunque la resistencia se reduce, los valores pueden mantenerse dentro de rangos aceptables para ladrillos no estructurales, siempre que la sustitución no supere el 15%.

2.2.3.2 Densidad y peso unitario

La densidad del concreto tradicional es de aproximadamente **2400 kg/m³**. Con la adición de caucho y perlita, esta densidad disminuye de manera notable, lo que da lugar a **concretos ligeros**.

- El caucho, con densidad cercana a **500–600 kg/m³**, reduce el peso unitario de la mezcla.
- La perlita expandida, con densidad de apenas **90–120 kg/m³**, puede reducir la densidad global hasta en un 30% (Santos et al., 2022).

Tabla 18.

Variación de densidad en concretos con adiciones

Tipo de mezcla	Densidad (kg/m ³)	Clasificación
Concreto patrón	2400	Normal
+10% caucho	2100	Ligero
+10% perlita	1800	Ligero
+10% caucho + 5% perlita	1700	Ligero

Nota. Adaptado de Santos et al. (2022)

La reducción de densidad es beneficiosa para elementos no portantes, pues disminuye las cargas muertas y facilita el transporte e instalación.

2.2.3.3 Absorción y permeabilidad

La absorción de agua es un indicador de la porosidad y, por tanto, de la durabilidad del concreto.

- El caucho reciclado tiende a generar **microvacíos** en la matriz, lo que puede incrementar la absorción si no se utilizan aditivos o tratamientos superficiales (Gutiérrez et al., 2022).

- La perlita expandida, debido a su estructura altamente porosa, puede absorber hasta **100% de su peso en agua**, lo que exige corregir la dosificación de agua y cemento para evitar mezclas demasiado secas o débiles (Martínez et al., 2020).

De acuerdo con López et al. (2024), la adición simultánea de caucho y perlita requiere un control riguroso del curado, ya que la mayor absorción podría afectar la hidratación del cemento.

2.2.3.4 Durabilidad y comportamiento frente a agentes agresivos

En términos de durabilidad:

- Los concretos con caucho presentan **mayor resistencia al impacto y a la fatiga**, lo que los hace útiles en aplicaciones donde se requiere absorber energía. Además, muestran una mejor resistencia al agrietamiento por retracción plástica, gracias a la elasticidad del caucho (Ríos et al., 2021).
- Los concretos con perlita expandida muestran mayor vulnerabilidad a ciclos de congelamiento-deshielo y ataques químicos, por su alta absorción. Sin embargo, cuando se emplean aditivos impermeabilizantes o tratamientos superficiales, su durabilidad puede incrementarse (Santos et al., 2022).

2.2.3.5 Trabajabilidad y consistencia

La presencia de caucho en la mezcla tiende a mejorar la trabajabilidad por su forma redondeada y superficie lisa, que actúan como un lubricante interno en la pasta (Rodríguez et al., 2021). En cambio, la perlita, al ser muy porosa y liviana, puede generar mezclas menos cohesivas y con segregación, si no se controla adecuadamente el contenido de agua.

El ensayo de **cono de Abrams** es el más utilizado para medir la consistencia. Investigaciones recientes muestran que la adición de perlita reduce el asentamiento en más de 30 mm en comparación con el patrón, mientras que el caucho tiene un efecto menos significativo en esta propiedad (López et al., 2024).

2.2.3.6 Elasticidad y resistencia a flexión

La sustitución de agregados por caucho reciclado reduce el **módulo de elasticidad estático**, pero incrementa la capacidad de deformación. En otras palabras, el material se vuelve menos rígido pero más dúctil. Esto es positivo en elementos que deben resistir cargas de impacto o vibraciones, aunque puede ser un inconveniente en estructuras portantes (Pérez et al., 2023).

La perlita, por su baja resistencia, tiende a disminuir tanto la elasticidad como la resistencia a flexión, pero este efecto se compensa parcialmente si se combina con caucho en proporciones moderadas.

2.2.3.7 Balance entre resistencia y beneficios

El reto en el uso de caucho y perlita es lograr un **equilibrio entre resistencia y propiedades complementarias**.

- Con altos porcentajes de caucho (>15%), la resistencia puede caer por debajo de los límites normativos.
- Con altos porcentajes de perlita, el ladrillo se vuelve demasiado frágil.
- Sin embargo, la combinación de **5–10% caucho + 5% perlita** ha mostrado resultados prometedores, con pérdidas moderadas de resistencia, pero con mejoras en aislamiento térmico y reducción de peso (López et al., 2024).

2.2.3.8 Relevancia para la investigación

El estudio de las propiedades físico-mecánicas en mezclas con adiciones es fundamental para esta investigación, porque:

- Permite **seleccionar las dosificaciones más viables** para la producción de ladrillos de concreto con caucho reciclado y perlita expandida.
- Facilita la comparación con ladrillos de arcilla mecanizados, los cuales tienen resistencias menores pero un mayor impacto ambiental.

- Aporta una base para justificar el uso de estos materiales en unidades no estructurales, donde se priorizan la ligereza y el aislamiento térmico sobre la resistencia extrema.

2.2.4 Conductividad térmica y transferencia de calor en materiales de construcción

El desempeño térmico de los materiales de construcción es un aspecto clave en la eficiencia energética de las edificaciones. En países como el Perú, donde coexisten distintos pisos ecológicos y condiciones climáticas, resulta indispensable evaluar la capacidad de los materiales para regular la temperatura interior y proporcionar confort térmico. En particular, la ciudad de Arequipa, ubicada a más de 2300 m s. n. m., presenta variaciones diarias de temperatura que exigen un análisis detallado de las propiedades térmicas de los ladrillos de construcción.

2.2.4.1 Principios básicos de transferencia de calor

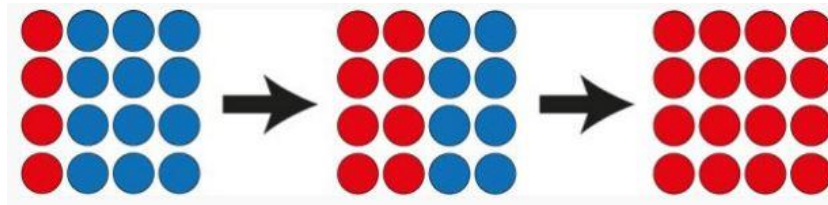
El calor se transmite a través de tres mecanismos principales:

- **Conducción:** transferencia de energía térmica a través de un sólido por contacto directo entre sus moléculas. En los materiales de construcción, la conductividad térmica (λ) expresa la facilidad con que el calor fluye, medida en $W/m \cdot K$.
- **Convección:** transferencia de calor entre una superficie y un fluido (aire o agua) en movimiento. En muros y techos, suele ocurrir entre la superficie del material y el aire circundante.
- **Radiación:** transferencia de energía mediante ondas electromagnéticas. Todos los cuerpos emiten radiación según su temperatura, pero en materiales de construcción es menos significativa que la conducción y la convección (Pérez et al., 2022).

En un muro de ladrillo, la **conducción** es el principal mecanismo de transferencia de calor, y depende tanto de la densidad como de la porosidad del material.

Figura 12.

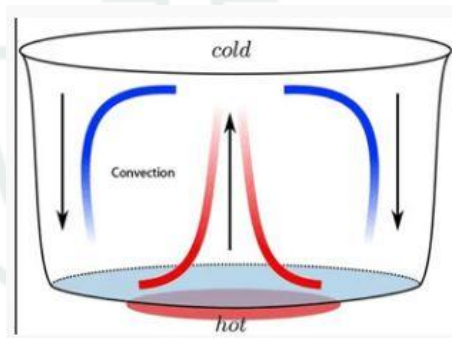
Proceso de conducción entre moléculas



Nota. Elaboración propia

Figura 13.

Convección



Nota. Elaboración propia

2.2.4.2 Conductividad térmica en materiales de construcción

La conductividad térmica varía según la composición, densidad y contenido de humedad del material. En general:

- Los **materiales densos** como el concreto tienen **alta conductividad térmica**, lo que significa que transmiten más calor.
- Los **materiales ligeros y porosos** como la arcilla cocida o la perlita tienen **baja conductividad**, actuando como aislantes.

Tabla 19.*Valores de conductividad térmica en materiales de construcción*

Material	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica λ (W/m·K)
Concreto normal	2200–2400	1,4 – 1,8
Concreto con caucho reciclado (10%)	1800–2100	0,8 – 1,2
Concreto con perlita expandida (10%)	1500–1800	0,3 – 0,5
Ladrillo de arcilla cocida	1600–1900	0,6 – 0,9
Madera	400–600	0,1 – 0,2
Poliestireno expandido (EPS)	20–40	0,03 – 0,04

Nota. Adaptado de Santos et al. (2022) y López et al. (2024)

Como se observa, la adición de caucho y perlita reduce de forma significativa la conductividad térmica del concreto, acercando sus valores a los de materiales aislantes ligeros.

2.2.4.3 Factores que influyen en la conductividad térmica

Diversos factores afectan el comportamiento térmico de un material:

- **Densidad:** a mayor densidad, mayor conductividad.
- **Porosidad:** el aire atrapado en los poros reduce la transmisión de calor.
- **Contenido de humedad:** el agua es un buen conductor térmico, por lo que materiales húmedos transmiten más calor que secos.
- **Temperatura:** algunos materiales, como el caucho y los plásticos, presentan variaciones en λ con los cambios de temperatura (Gutiérrez et al., 2022).

En el caso de ladrillos con adiciones de caucho y perlita, la reducción de densidad y el incremento de porosidad explican su menor conductividad térmica respecto al concreto tradicional.

2.2.4.4 Importancia en el desempeño térmico de edificaciones

El aislamiento térmico en edificaciones tiene múltiples beneficios:

- **Confort térmico:** interiores más frescos en verano y más cálidos en invierno.
- **Eficiencia energética:** menor consumo en calefacción y refrigeración, reduciendo costos y emisiones de CO₂.
- **Durabilidad de los materiales:** al limitar los choques térmicos, se reducen las fisuras y deterioros prematuros (Jiménez et al., 2021).

Los ladrillos de concreto con perlita y caucho tienen el potencial de mejorar el confort térmico en Arequipa, donde las viviendas sufren de temperaturas frías durante la noche y radiación intensa durante el día.

2.2.4.5 Simulación térmica en elementos constructivos

La evaluación experimental de la conductividad térmica en ladrillos puede complementarse con simulaciones numéricas. El software ABAQUS, basado en el método de elementos finitos, permite modelar el flujo de calor en diferentes condiciones climáticas y escenarios extremos como incendios (López et al., 2024).

De esta manera, es posible analizar:

- Distribución de temperaturas en muros de ladrillo.
- Respuesta térmica frente a cambios bruscos de temperatura.
- Comportamiento en situaciones de incendio, donde la capacidad aislante puede retrasar la propagación del calor.

2.2.4.6 Caso particular: viviendas en Arequipa

Arequipa presenta un clima semiárido con variaciones térmicas de hasta 15 °C entre el día y la noche. Los ladrillos de arcilla mecanizados, actualmente predominantes en la región, tienen una conductividad intermedia que no asegura un aislamiento térmico suficiente.

La incorporación de caucho y perlita en ladrillos de concreto puede reducir la conductividad en más de un 40%, mejorando el confort sin necesidad de recurrir a materiales aislantes adicionales. Esto es especialmente relevante en proyectos de vivienda social, donde la eficiencia térmica puede reducir la pobreza energética de los hogares.

2.2.4.7 Relevancia para la investigación

El análisis de la conductividad térmica es fundamental en esta tesis, ya que los ladrillos fabricados con caucho reciclado y perlita expandida buscan ser una alternativa no solo físicamente resistente, sino también energéticamente eficiente. La simulación en ABAQUS permitirá comparar el comportamiento de los nuevos ladrillos frente a los de arcilla mecanizados, identificando ventajas en aislamiento térmico y respuesta frente al fuego.

2.2.5 Simulación numérica en ABAQUS

La simulación numérica se ha convertido en una herramienta indispensable en la investigación y la práctica de la ingeniería civil, ya que permite analizar el comportamiento de materiales y estructuras sin necesidad de recurrir únicamente a ensayos físicos, que suelen ser más costosos y demandar mayor tiempo. Entre los programas más utilizados en este ámbito destaca ABAQUS, un software basado en el método de elementos finitos (MEF) que posibilita modelar condiciones complejas de carga, deformación y transferencia de calor en materiales de construcción.

2.2.5.1 Método de Elementos Finitos (MEF)

El MEF es una técnica de resolución numérica de problemas físicos que involucran sistemas continuos. Su principio consiste en dividir un cuerpo complejo en un conjunto de

elementos más pequeños y sencillos (llamados elementos finitos), conectados entre sí en puntos llamados nodos. A partir de esta discretización, es posible aproximar soluciones a ecuaciones diferenciales que describen fenómenos físicos como:

- Transferencia de calor.
- Propagación de esfuerzos y deformaciones.
- Flujo de fluidos.
- Comportamiento dinámico de estructuras.

En el caso de materiales de construcción, el MEF permite predecir cómo un muro, viga o bloque responderá a condiciones externas antes de que el prototipo real sea fabricado (Bathe, 2021).

2.2.5.2 Características principales de ABAQUS

ABAQUS es un software comercial desarrollado originalmente en 1978, hoy perteneciente a la empresa Dassault Systèmes. Se caracteriza por su capacidad para resolver problemas altamente no lineales y multifísicos.

Entre sus principales características destacan:

- **Versatilidad de materiales:** permite modelar concretos, aceros, polímeros, suelos, materiales compuestos y reciclados.
- **Módulos especializados:** incluye herramientas para análisis estructural, térmico, dinámico y de interacción fluido-estructura.
- **Condiciones de frontera realistas:** posibilita simular variaciones de temperatura, cargas dinámicas y efectos de incendio.
- **Resultados detallados:** entrega mapas de tensiones, distribuciones de temperatura y curvas de respuesta que permiten interpretar el desempeño del material en distintas condiciones (Dassault Systèmes, 2023).

2.2.5.3 Aplicaciones de ABAQUS en ingeniería civil

En la ingeniería de materiales y la construcción, ABAQUS se utiliza para:

- **Análisis estructural de concretos y morteros:** predice resistencias y deformaciones en probetas, bloques y elementos estructurales.
- **Evaluación de transferencia de calor en muros:** determina la conductividad térmica efectiva y la resistencia térmica de materiales innovadores.
- **Simulación de incendios:** permite analizar la resistencia térmica y estructural de elementos sometidos a altas temperaturas.
- **Modelado de materiales heterogéneos:** facilita representar concretos modificados con adiciones como caucho, perlita o fibras.

Por ejemplo, investigaciones recientes han empleado ABAQUS para estudiar bloques de concreto con residuos plásticos y determinar su capacidad de aislamiento térmico frente a muros tradicionales de ladrillo (Santos et al., 2022).

2.2.5.4 Simulación térmica en ABAQUS

El análisis térmico con ABAQUS se basa en la resolución de la ecuación de conducción de calor en estado transitorio o estacionario. Esto permite calcular:

- **Distribución de temperaturas** dentro de un muro o bloque.
- **Flujos de calor** a través de materiales con distinta conductividad.
- **Resistencia térmica equivalente** en muros compuestos.

En materiales como el concreto con adiciones de caucho y perlita, ABAQUS es especialmente útil porque estos agregados alteran la homogeneidad del material. El software permite aproximar la mezcla como un sólido heterogéneo y analizar cómo las partículas de baja conductividad influyen en la transferencia térmica (López et al., 2024).

2.2.5.5 Propiedades térmicas

En la simulación de materiales de construcción con ABAQUS, además de la conductividad térmica, se pueden analizar distintas propiedades derivadas que permiten comprender de manera integral el desempeño del material frente a gradientes de temperatura. Estas propiedades incluyen la capacidad calorífica, la capacidad térmica, el flujo de calor, la resistencia térmica idealizada, la resistencia térmica simulada y la transferencia de calor.

2.2.5.5.1 Capacidad calorífica específica

La capacidad calorífica específica describe la energía que requiere una masa determinada de material para incrementar su temperatura en una unidad. En el contexto de las simulaciones, suele definirse como propiedad de entrada en ABAQUS, pero también puede estimarse a partir de la energía interna y de la variación de temperatura obtenidas durante el análisis. Este parámetro es fundamental porque determina cuánto calor absorbe el material frente a cambios de temperatura, influyendo en su comportamiento térmico en edificaciones (Pérez et al., 2022).

2.2.5.5.2 Capacidad térmica total

La capacidad térmica hace referencia a la energía total que puede almacenar un cuerpo completo cuando se incrementa su temperatura. En términos constructivos, este valor indica la inercia térmica del material y su capacidad para contribuir al confort de los usuarios al suavizar las oscilaciones de temperatura. En el caso de ladrillos con adiciones como caucho reciclado y perlita expandida, esta propiedad es relevante para evaluar su potencial de mejorar la eficiencia energética en viviendas (Santos et al., 2022).

2.2.5.5.3 Flujo de calor

El flujo de calor corresponde a la cantidad de energía transmitida a través de una superficie en un periodo de tiempo. En ABAQUS se representa mediante vectores que indican la dirección y magnitud de la transferencia térmica en cada punto del modelo. Su análisis

permite identificar zonas donde la disipación es mayor o menor, lo que resulta útil para detectar posibles debilidades en la uniformidad térmica de un ladrillo no convencional (López et al., 2024).

2.2.5.5.4 *Resistencia térmica idealizada*

La resistencia térmica idealizada se entiende como la oposición al paso del calor en condiciones homogéneas. Tradicionalmente se calcula a partir de la conductividad del material y de su espesor. Aunque se trata de un valor teórico, sirve como referencia para estimar el comportamiento esperado de un material uniforme y compararlo con los resultados obtenidos en simulaciones (Mehta & Monteiro, 2022).

2.2.5.5.5 *Resistencia térmica simulada*

La resistencia térmica simulada refleja la oposición real del material al paso del calor en un modelo numérico que incluye heterogeneidades, interfaces o porosidad. Este parámetro se obtiene relacionando la diferencia de temperaturas entre las superficies del modelo y el flujo de calor registrado. En estudios de ladrillos con materiales reciclados, la resistencia simulada permite verificar si las adiciones afectan positiva o negativamente la capacidad de aislamiento en comparación con los ladrillos de arcilla mecanizada (García et al., 2023).

2.2.5.5.6 *Transferencia de calor*

La transferencia de calor es la expresión global del intercambio de energía entre un cuerpo y su entorno bajo condiciones de frontera, como gradientes de temperatura, convección o radiación. En ABAQUS este valor se obtiene integrando los flujos en una superficie de control, lo que permite cuantificar el calor total que atraviesa un material en un escenario simulado. Este indicador resulta esencial para evaluar el desempeño térmico del ladrillo en condiciones semejantes a las que enfrentaría en una vivienda real (Jiménez et al., 2021).

La transferencia de calor por conducción se fundamenta en la **Ley de Fourier**, la cual establece que el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura y a la conductividad

térmica del material. En términos sencillos, esta ley explica que el calor siempre se transfiere desde una región de mayor temperatura hacia otra de menor temperatura, a través de un área de contacto determinada. La formulación matemática puede expresarse tanto en forma unidimensional como vectorial, lo que permite describir la conducción en medios homogéneos y anisotrópicos. Asimismo, la ecuación general de la conducción de calor incorpora parámetros como la densidad y la capacidad calorífica específica del material, lo que la convierte en una herramienta esencial para modelar procesos térmicos transitorios y estacionarios en elementos constructivos (Çengel & Ghajar, 2020; Incropera et al., 2021).

En el ámbito de la construcción, estas ecuaciones permiten comprender y predecir el comportamiento de materiales como el concreto o los ladrillos con adiciones recicladas, ya que relacionan directamente la estructura interna del material con su capacidad para resistir la transferencia de calor. Esto resulta particularmente relevante al evaluar soluciones constructivas que buscan mejorar la eficiencia energética y el confort térmico en viviendas (García et al., 2023).

2.2.5.5.7 Ecuaciones fundamentales del análisis de transferencia de calor

Ley de Fourier

$$q = -K * A * \frac{dT}{dx}$$

K: conductividad térmica $K = \frac{W}{m \cdot ^\circ K}$

A: superficie de área

Dt/dx: gradiente de temperatura

Nota: la transferencia de calor es una cantidad positiva cuando el gradiente de temperatura es negativo

Ley de Fourier - Simplificación con parámetros

$$q = -K * A * \frac{T_2 - T_1}{L}$$

T2 y T1 son la variación de la temperatura de un grado elevado hacia uno bajo

L: longitud del continuo

Flujo de calor

$$q'' = -K * \frac{dT}{dx}$$

q'': flujo de calor se expresa en Watts / m2

Flujo de calor en su forma vectorial

$$\vec{q''} = -K * i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z}$$

Forma general de la ley de Fourier

$$\vec{q''} = -K * \nabla T$$

Ecuación de la conducción del calor entre continuos

$$K * \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + j \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho * Cp * \frac{\partial T}{\partial t}$$

Cp: capacidad calorífica específica

ρ: densidad

Nota: la formulación de ecuaciones tiene el propósito de exhibir las ecuaciones fundamentales de la transferencia de calor.

2.2.5.6 Validación experimental y numérica

Un aspecto fundamental en la aplicación de ABAQUS es la **validación de resultados**.

Las simulaciones no sustituyen completamente a los ensayos de laboratorio, sino que los complementan:

- Los **ensayos físicos** en probetas y ladrillos permiten obtener valores experimentales de resistencia y conductividad.
- Las **simulaciones en ABAQUS** sirven para extrapolar esos resultados a distintas condiciones climáticas (frío, calor, incendio) y a configuraciones constructivas más complejas.

Cuando los valores obtenidos por simulación se aproximan a los resultados experimentales, se considera que el modelo numérico es confiable y puede aplicarse a escenarios más amplios (Pérez et al., 2022).

2.2.5.7 Relevancia para la investigación

En la presente tesis, el uso de ABAQUS es clave para analizar la conductividad térmica de ladrillos de concreto con caucho reciclado y perlita expandida. Los objetivos específicos que se cumplen mediante la simulación son:

- Examinar la distribución de temperaturas en muros construidos con los nuevos ladrillos, bajo condiciones de clima frío, moderado y cálido.
- Evaluar el desempeño térmico en escenarios de incendio, donde la conductividad juega un papel crítico en la propagación del calor.
- Comparar los resultados con los obtenidos en ladrillos de arcilla mecanizados, actualmente predominantes en Arequipa.
- Identificar qué dosificaciones presentan el mejor balance entre resistencia mecánica y aislamiento térmico.

De esta forma, la simulación en ABAQUS no solo complementa los ensayos experimentales, sino que amplía la comprensión del comportamiento térmico de los ladrillos, contribuyendo a la selección de diseños más sostenibles y eficientes para viviendas sociales en la región.

2.2.6 Aspectos económicos y ambientales en la fabricación de ladrillos

La evaluación de materiales de construcción no puede limitarse únicamente a su desempeño físico-mecánico o térmico. En el contexto actual, la viabilidad económica y la sostenibilidad ambiental son parámetros fundamentales para determinar la factibilidad de adoptar nuevas tecnologías en la industria. En este sentido, los ladrillos de concreto con adiciones de caucho reciclado y perlita expandida ofrecen la posibilidad de reducir costos a largo plazo y mitigar los impactos ambientales asociados a la producción convencional de unidades de albañilería.

2.2.6.1 Costos de producción de ladrillos

El costo de un ladrillo está determinado principalmente por:

- **Materia prima:** cemento, agregados, agua, aditivos o materiales reciclados.
- **Procesos de producción:** mezclado, moldeo, compactación y curado en el caso del concreto; extracción, secado y cocción en hornos para los ladrillos de arcilla.
- **Consumo energético:** electricidad en ladrillos de concreto; combustibles fósiles (leña, carbón, gas) en los de arcilla.
- **Logística:** transporte de materiales y distribución del producto final.

En el Perú, el costo de producción de ladrillos de arcilla mecanizados suele ser más bajo en la fase inicial debido a la abundancia de materia prima y a la tradición productiva. Sin embargo, el gasto energético en la cocción y el impacto ambiental incrementan su costo indirecto. Por otro lado, los ladrillos de concreto tienen un costo directo mayor por el uso de cemento, pero permiten una producción más flexible y con mayor control de calidad (Torres & Ramos, 2022).

Tabla 20.

Comparación de costos aproximados de producción

Tipo de ladrillo	Materias primas (S/ por unidad)	Energía (S/ por unidad)	Costo total estimado (S/ por unidad)
Arcilla mecanizado	0,25 – 0,30	0,20 – 0,25	0,50 – 0,55
Concreto convencional	0,35 – 0,40	0,05 – 0,08	0,40 – 0,48
Concreto con caucho y perlita	0,30 – 0,35	0,05 – 0,08	0,35 – 0,42

Nota. Adaptado de García et al. (2023) y cálculos propios

Esto indica que, aunque el concreto suele percibirse como más caro, la incorporación de materiales reciclados como caucho y perlita puede reducir el costo de materias primas al sustituir parte de los agregados naturales y del cemento.

2.2.6.2 Análisis de ciclo de vida y emisiones de CO₂

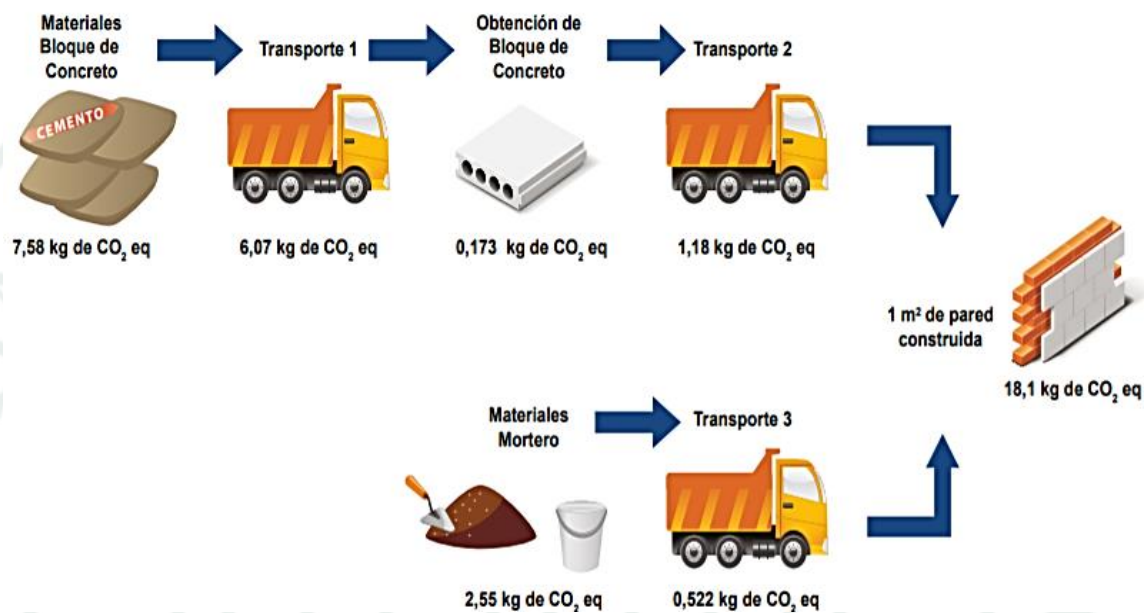
El ciclo de vida de un ladrillo incluye la extracción de materias primas, la fabricación, el transporte, el uso y la disposición final. Durante este ciclo, se generan emisiones de dióxido de carbono (CO₂), que son uno de los principales indicadores de impacto ambiental.

- En los **ladrillos de arcilla mecanizados**, las emisiones se concentran en la etapa de cocción, que requiere hornos a 900–1000 °C. Según Jiménez et al. (2021), esta etapa puede representar hasta el 70% de las emisiones totales, generando aproximadamente **0,22–0,25 kg CO₂ por ladrillo**.
- En los **ladrillos de concreto**, las emisiones se relacionan principalmente con la producción de cemento Portland. Se estima que la fabricación de 1 kg de cemento emite **0,8–0,9 kg CO₂** (Mehta & Monteiro, 2022). Sin embargo, al no necesitar cocción, los ladrillos de concreto emiten entre **0,15–0,18 kg CO₂ por unidad**, un valor inferior al de los ladrillos de arcilla.

- En los **ladrillos con caucho y perlita**, la incorporación de materiales reciclados disminuye la proporción de cemento y agregados naturales, lo que reduce aún más las emisiones, estimándose en **0,12–0,14 kg CO₂ por unidad** (López et al., 2024).

Figura 14.

Análisis de ciclo de vida de ladrillos y bloques de concreto



Nota. Adaptado de Estudio de análisis de ciclo de vida de ladrillos y bloques de concreto San Jerónimo – Cusco

Tabla 21.

Emisiones de CO₂ en la producción de ladrillos

Tipo de ladrillo	Emisiones CO ₂ por unidad	
	(kg)	Principales fuentes de emisión
Arcilla mecanizado	0,22 – 0,25	Combustibles en hornos
Concreto convencional	0,15 – 0,18	Producción de cemento
Concreto con caucho y perlita	0,12 – 0,14	Producción de cemento (reducida)

Nota. Adaptado de Jiménez et al. (2021) y López et al. (2024)

2.2.6.3 Economía circular y gestión de residuos

El enfoque de la economía circular busca maximizar el aprovechamiento de recursos, minimizando el desperdicio y reincorporando los residuos al ciclo productivo.

- **Caucho reciclado:** su uso en ladrillos permite reducir el volumen de llantas en vertederos, donde su degradación puede tardar más de 600 años. Además, evita la quema clandestina de neumáticos, que genera contaminantes tóxicos.
- **Perlita expandida:** aunque no es un residuo, su ligereza permite disminuir el consumo de cemento y agregados naturales, contribuyendo a la preservación de canteras y ríos.
- **Reducción del cemento:** al sustituir parte de los agregados por caucho y perlita, disminuye la cantidad de cemento requerido, y con ello las emisiones de CO₂ asociadas a su producción.

De acuerdo con Rodríguez et al. (2021), el aprovechamiento de llantas en desuso en la construcción contribuye tanto a la gestión de residuos sólidos urbanos como a la creación de cadenas productivas sostenibles.

2.2.6.4 Impacto ambiental comparativo

Los impactos ambientales pueden evaluarse no solo en términos de emisiones, sino también en:

- **Consumo energético:** los ladrillos de arcilla requieren más de 3 MJ por unidad para su cocción, mientras que los de concreto requieren menos de 1 MJ, y los modificados con caucho y perlita aún menos, al reducir la proporción de cemento (Santos et al., 2022).
- **Uso de recursos naturales:** la extracción de arcilla puede degradar suelos agrícolas, mientras que los agregados del concreto provienen de canteras y ríos, cuya explotación excesiva también genera impactos. La incorporación de materiales reciclados mitiga este efecto.

- **Contaminación del aire:** la cocción de ladrillos de arcilla libera no solo CO₂, sino también óxidos de nitrógeno y partículas finas, lo que afecta la calidad del aire en zonas urbanas productoras.

Durante el quemado se genera la mayor emisión de gases tóxicos, pues para encender el horno, las ladrilleras artesanales emplean llantas usadas, aceite usado, plásticos, residuos orgánicos (estiércol de animales) y otros desechos, para avivar el fuego que cocerá la arcilla en los ladrillos. El fuego directo durante el encendido del horno provoca emisiones fugitivas. El quemado de aserrín, llantas usadas y aceite en compartimientos con mala ventilación y combustión incompleta genera una alta emisión de contaminantes del aire, principalmente material particulado en la forma de humos densos y visibles. Las personas vulnerables a la exposición de los gases tóxicos emitidos son los ladrilleros artesanos y la personas que residen en zonas aledañas. (Por ejemplo: Arequipa y Cusco). (PRAL, 2009)

Tabla 22.

Contribución de contaminantes por ladrilleras en toneladas año-Arequipa

Emisiones de fuentes estacionarias (t/año)	PTS	SO ₂	NO _x	CO	COV	Total
Ladrilleras	8.860	187	32	216	45	9.340

Nota. Adaptado de PRAL (2009)

Figura 15.

Contaminación por quema de ladrillos



Nota. Adaptado de PRAL (2009)

Tabla 23.

Tipo de combustibles empleados en los hornos de Arequipa

Combustibles usados	% empresas
Petróleo / Aceite	65
Desechos orgánicos	30
Carbón mineral	3
Otras combinaciones	2

Nota. Adaptado de PRAL (2009)

2.2.6.5 Viabilidad económica y ambiental en Arequipa

En Arequipa, donde predomina el uso de ladrillos de arcilla mecanizados, la transición hacia ladrillos de concreto con caucho y perlita tendría ventajas significativas:

- **Disponibilidad de materia prima:** la ciudad cuenta con plantas cementeras y agregados de origen volcánico, además de una creciente generación de llantas en desuso.
- **Reducción de costos a largo plazo:** aunque el costo inicial por unidad puede ser ligeramente mayor, la durabilidad y el mejor desempeño térmico reducen gastos en mantenimiento y energía.
- **Mejora ambiental:** al disminuir el consumo de leña y carbón en hornos, se reducirían las emisiones locales de gases contaminantes.
- **Generación de empleo verde:** el reciclaje de neumáticos y la producción de nuevos ladrillos generan cadenas de valor sostenibles, integrando a recicladores y pequeñas empresas.

2.2.6.6 Relevancia para la investigación

La comparación económica y ambiental es fundamental en esta tesis, porque no basta con demostrar que los ladrillos de concreto con caucho y perlita son técnicamente viables. Es necesario evidenciar que también son competitivos en costos y sostenibles en términos ambientales, lo que justifica su implementación en proyectos de vivienda en Arequipa.

Este análisis complementa los resultados físico-mecánicos y térmicos, aportando una visión integral de la viabilidad del nuevo material.

2.2.7 Viabilidad integral de un ladrillo de concreto modificado

La propuesta de incorporar caucho reciclado y perlita expandida en la fabricación de ladrillos de concreto no puede evaluarse únicamente desde una perspectiva técnica aislada. La verdadera innovación radica en la integración de criterios físico-mecánicos, térmicos, económicos y ambientales, lo que permite determinar su viabilidad como material alternativo frente a los ladrillos de arcilla mecanizados, predominantes en la construcción en Arequipa.

2.2.7.1 Viabilidad físico-mecánica

Los resultados de investigaciones previas han demostrado que la resistencia a compresión disminuye cuando se incorporan caucho y perlita al concreto (Pérez et al., 2023; López et al., 2024). Sin embargo, la reducción es controlable si los porcentajes de sustitución se mantienen en rangos moderados (5–15%).

- **Concreto patrón:** resistencias de 200–220 kg/cm².
- **Concreto con 5% caucho + 5% perlita:** resistencias en el rango de 170–190 kg/cm², valores aceptables para ladrillos de albañilería no estructural.
- **Concretos con >20% de sustitución:** caídas significativas por debajo de los 150 kg/cm², lo que los vuelve menos viables estructuralmente.

La viabilidad físico-mecánica se fundamenta en que los ladrillos modificados cumplen con los requisitos mínimos de la Norma Técnica Peruana (NTP 399.613) para unidades de albañilería de concreto, lo que los habilita para su uso en muros no portantes, cerramientos y divisiones interiores.

2.2.7.2 Viabilidad térmica

El desempeño térmico constituye una de las mayores ventajas de la incorporación de caucho y perlita.

- El **caucho reciclado** aporta una reducción moderada en la conductividad térmica gracias a su baja densidad.
- La **perlita expandida** genera un efecto aislante más marcado, con conductividades en torno a 0,3–0,5 W/m·K, muy por debajo del concreto convencional (1,4–1,8 W/m·K) (Santos et al., 2022).

Esto implica que un muro de ladrillos con estas adiciones puede mejorar el confort térmico interior, reduciendo la necesidad de calefacción en climas fríos y de refrigeración en climas cálidos. En Arequipa, donde las temperaturas nocturnas suelen ser bajas y las diurnas altas, esta característica representa un beneficio directo en la habitabilidad.

Las simulaciones realizadas en ABAQUS permiten extrapolar este desempeño a diferentes escenarios climáticos e incluso en condiciones extremas como incendios, donde la capacidad aislante puede retrasar la propagación del calor y aumentar la seguridad de la vivienda (López et al., 2024).

2.2.7.3 Viabilidad económica

Desde el punto de vista económico, la comparación muestra que los ladrillos de concreto con adiciones pueden ser competitivos frente a los de arcilla.

- El costo de materias primas se reduce al emplear residuos como el caucho, y al disminuir el consumo de cemento gracias a la perlita.
- La fabricación no requiere hornos de cocción, lo que reduce drásticamente el gasto energético en comparación con los ladrillos de arcilla.
- Los costos de mantenimiento de la vivienda también se reducen por el mejor desempeño térmico, que disminuye el consumo de energía en climatización (Jiménez et al., 2021).

Aunque el costo unitario inicial de un ladrillo de concreto puede ser ligeramente mayor que el de arcilla, la relación costo-beneficio a largo plazo favorece a los ladrillos modificados, especialmente en proyectos de vivienda social donde la eficiencia energética se traduce en ahorro para las familias.

2.2.7.4 Viabilidad ambiental

El impacto ambiental es quizás el argumento más sólido a favor de los ladrillos modificados:

- **Reducción de emisiones de CO₂:** al evitar la cocción en hornos, los ladrillos de concreto emiten un 30–40% menos CO₂ que los de arcilla (Jiménez et al., 2021). Con adiciones de caucho y perlita, la reducción puede alcanzar hasta un 50%.
- **Gestión de residuos:** se reutilizan llantas fuera de uso, un residuo de lenta degradación y alto impacto ambiental.
- **Preservación de recursos naturales:** se reduce la demanda de arcilla, cemento y agregados naturales.
- **Economía circular:** se fomenta una cadena productiva que involucra reciclaje, transformación y aplicación en la construcción (Rodríguez et al., 2021).

2.2.7.5 Integración de los criterios

La viabilidad integral se logra al considerar de manera conjunta los cuatro ejes de análisis:

Tabla 24.

Integración de criterios de viabilidad

Criterio	Ladrillo de arcilla mecanizado	Ladrillo de concreto con caucho y perlita
Físico-mecánico	Resistencia 70–120 kg/cm ²	Resistencia 170–190 kg/cm ²
Térmico	Conductividad 0,6–0,9 W/m·K	Conductividad 0,3–0,5 W/m·K
Económico	Costo unitario bajo, pero alto consumo energético	Costo unitario moderado, menor gasto energético
Ambiental	Elevadas emisiones por cocción	Reducción de CO ₂ , uso de residuos

Nota. Adaptado de Jiménez et al. (2021), García et al. (2023) y López et al. (2024)

Esta comparación evidencia que los ladrillos modificados no solo cumplen con los requisitos técnicos mínimos, sino que superan a los ladrillos de arcilla en términos de desempeño térmico y sostenibilidad ambiental, lo que refuerza su viabilidad integral.

2.2.7.6 Aplicabilidad en módulos de vivienda en Arequipa

La ciudad de Arequipa presenta un contexto favorable para la implementación de estos ladrillos:

- **Disponibilidad de materias primas:** se producen cementos y agregados volcánicos localmente, y existe una oferta creciente de llantas en desuso.
- **Clima con marcadas variaciones térmicas:** lo que hace imprescindible contar con materiales que aporten aislamiento.
- **Demanda de vivienda social:** proyectos habitacionales que requieren materiales económicos, durables y sostenibles.

- **Políticas ambientales en crecimiento:** normativas que promueven la economía circular y la reducción de emisiones.

La incorporación de estos ladrillos en módulos de vivienda no solo mejoraría las condiciones térmicas de los hogares, sino que además contribuiría a reducir el impacto ambiental del sector construcción en la región.

2.2.7.7 Relevancia para la investigación

Este apartado sintetiza la importancia de analizar la viabilidad integral del ladrillo de concreto con caucho reciclado y perlita expandida. La investigación no se limita a una prueba de laboratorio, sino que busca validar un material que:

- Cumpla con los requisitos mecánicos básicos.
- Aporte beneficios térmicos en viviendas.
- Sea competitivo en costos frente a los ladrillos tradicionales.
- Contribuya a la sostenibilidad ambiental y a la gestión de residuos.

Por tanto, la viabilidad integral debe demostrar que esta propuesta tiene el potencial de ser implementada a escala local en Arequipa, con posibilidades de expansión a otras regiones del país.

2.3 Marco Normativo

2.3.1 Agregados

2.3.1.1 Cemento Portland

Norma Técnica Peruana 334.009 (2016) muestra que existen dos tipos entre ellos hay químicos y físicos, pueden variar los números que se van a aplicar, utilizando el tipo de cemento que se va a usar según las normas del cemento.

Tabla 25.*Requisitos químicos del cemento portland*

Requisitos	Tipo de cemento					
	I	II	II(MH)	III	IV	V
Óxido de aluminio, Al_2O_3 (máx.%)	-	6,0	6,0	-	-	-
Óxido férrico, Fe_2O_3 (máx.%)	-	6,0 ^B	6,0 ^{B, C}	-	6,5	-
Óxido de magnesio, MgO (máx.%)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Trióxido de azufre, SO_3 (máx.%)						
Cuando $(C_3A)^E$ es 8% o menos	3,0	3,0	3,0	3,5	2,3	2,3
Cuando $(C_3A)^E$ es más del 8%	3,5	F	F	4,5	F	F
Pérdida por ignición, máx %						
Cuando la caliza no es un ingrediente	3,0	3,0	3,0	3,0	2,0	3,0
Cuando la caliza es un ingrediente	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Residuo insoluble, máx.%	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Silicato tricálcico $(C_3S)^E$ (máx.%)	-	-	-	-	35 ^C	-
Silicato dicálcico, $(C_2S)^E$ (min. %)	-	-	-	-	40 ^C	-
Aluminato tricálcico $(C_3A)^E$ (máx.%)	-	8	8	15	7 ^C	5 ^B
Suma de $C_3S + 4,75C_3A^G$ (máx.%)	-	-	100 ^{C, H}	-	-	-
Aluminoferrito tetracálcico, más dos veces el aluminato tricálcico $C_4AF+2(C_3A)$, o solución sólida, (C_4AF+C_2F) , como sea aplicable (máx.%)	-	-	-	-	-	25 ^B

Nota. Adaptado de Norma Técnica Peruana 334.009 (2016)

Tabla 26.*Requisitos químicos del cemento portland*

Requisitos físicos	Tipo de cementos					
	I	II	II(MH)	III	IV	V
Contenido de aire del mortero volumen %		12				
Máx.	12		12	12	12	12
Min	-	-	-	-	-	-
Finura, superficie específica(m ² /kg)						
Ensayo de permeabilidad al aire		260				
Min	260	-	260	-	260	260

Máx.	-	-	430 ^C	-	430 ^C	-
Expansión en autoclave		0,80				
Máx.%	0,80		0,80	0,80	0,80	0,80
Resistencia, no menor que los valores mostrados para las edades indicadas a continuación						
Resistencia a la compresión, MPa						
1 día	-	-	-	12,0	-	-
3 días	12,0	10,0	10,0	24,0	-	8,0
			7,0 ^E			
7 días	19,0	17,0	17,0	-	7,0	15,0
			12,0 ^E			
28 días	-	-	-	-	17,0	21,0
Tiempo de fraguado						
Ensayo de Vicat, minutos						
Tiempo de fraguado, no menor de:	45	45	45	45	45	45
Tiempo de fraguado, no mayor de:	375	375	375	375	375	375

Nota. Adaptado de Norma Técnica Peruana 334.009 (2016)

2.3.1.2 Agregados para concreto

La Norma Técnica Peruana 400.037 (2018) indica los siguientes requisitos que se debe cumplir para evidenciar la calidad del agregado fino y grueso y también indica lo siguiente “el agregado fino debe consistir en arena natural, arena manufacturada o una combinación de ellas” (pág. 8)

Agregado fino. Debe tener la granulometría según los límites de la siguiente tabla.

Tabla 27.

Requerimiento de granulometría para agregado fino

TAMIZ	PORCENTAJE QUE PASA
9,5 mm(3/8pulg)	100
4,75 mm(No.4)	95 a 100
2,36 mm(No.8)	80 a 100
1,18 mm(No.16)	50 a 85
600um(No.30)	25 a 60
300 um(No.50)	5 a 30
150 um(No.100)	0 a 10
75 um(No.200)	0 a 3,0 ^{A,B}

^A Para concreto no sujeto a la abrasión, el límite para el material más fino que el tamiz 75 um(No.200) debe ser máximo 5%.

^B Para agregado fino artificial u otros reciclados, si el material más fino que el tamiz 75 um(No.200) consiste en polvo de trituración, esencialmente libre de arcilla o esquistos, este límite debe ser 5% para concreto sujeto a abrasión y máximo 7% para concreto no sujeto a abrasión

Nota. Adaptado de Norma Técnica Peruana 400.037 (2018)

La norma explica lo siguiente:

“El agregado fino no debe tener más del 45% que pasa en alguna malla y retenida en la siguiente malla consecutiva, y su módulo de fineza no debe ser menor de 2,3 ni mayor de 3,1”
(Norma Técnica Peruana 400.037,2018, pág. 9)

“Se permitirá el uso de agregados que no cumplan con la granulometría especificada, cuando existan estudios que aseguren que el material producirá concreto con propiedades relevantes al menos igual a las del concreto hecho con los mismos ingredientes” (Norma Técnica Peruana 400.037,2018, pág. 9)

Agregado grueso. Podrá ser grava, piedra chancada, concreto chancado, concreto reciclado o la combinación de los anteriores. Y deberá cumplir con los requisitos de la siguiente tabla según el tamaño especificado.

Tabla 28.

Requisitos granulométricos del agregado grueso

Huso	Tamaño máximo nominal	Porcentaje que pasa por los tamices normalizados													
		100mm (4pulg)	90mm (3 ^{1/2} pulg)	75mm (3pulg)	63mm (2 ^{1/2} pulg)	50mm (2pulg)	37.5mm (2 ^{1/2})	25.0mm (1pulg)	19.0mm (3/4pulg)	12.5mm (1/2pulg)	9.5mm (3/8pulg)	4.75mm (No4)	2.36mm (No8)	1.18mm (No16)	300um (No50)
1	90mm a 37.5mm (3 ^{1/2} pulg a 1 ^{1/2} pulg)	100	90 a 100	-	25 a 60	-	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-	-
2	63mm a 37.5mm (2 ½ pulg a 1½pulg)	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-	-
3	50mm a 25,0 mm(2pulg a 1pulg)	-	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 150	-	0 a 5	-	-	-	-	-
357	50mm a 4,75mm(2 pulg a No.4)	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	-	0 a 5	-	-	-
4	37,5mm a 19,0mm(1 ½ pulg a 1/2 pulg)	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 5	-	0 a 5	-	-	-	-
467	37,5mm a 4,75mm(1 ½ pulg a No.4)	-	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5	-	-	-
5	25,0mm a 12,5mm(1 pulg a 1/2pulg)	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-	-	-	-

Huso	Tamaño máximo nominal	Porcentaje que pasa por los tamices normalizados													
		100mm (4pulg)	90mm (3 ^{1/2} pulg)	75mm (3pulg)	63mm (2 ^{1/2} pulg)	50mm (2pulg)	37.5mm (2 ^{1/2})	25.0mm (1pulg)	19.0mm (3/4pulg)	12.5mm (1/2pulg)	9.5mm (3/8pulg)	4.75mm (No4)	2.36mm (No8)	1.18mm (No16)	300um (No50)
56	25,0mm a 9,5mm(1p ulg a 3/8pulg)	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 15	10 a 40	0 a 15	0 a 5	-	-	-
57	25,0mm a 4,75mm(1 pulg a No.4)	-	-	-	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5	-	-
6	19,0mm a 9,5mm(3/4 pulg a 3/8pulg)	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	-	-	-
67	19,0mm a 4mm(3/4p ulg a No.4)	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	-	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-	-
7	12,5mm a 4,75mm(1/ 2 pulg a No.4)	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	-	-
8	9,5mm a 2,36mm(3/ 8 pulg a No.8)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5	-
89	12,5mm a 9,5mm(1/2 pulg a 3/8pulg)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10	0 a 5
9	4,75mm a 1,18 mm(No.4 a No.16)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 40	0 a 10	0 a 5

Nota. Adaptado de Norma Técnica Peruana 400.037 (2018)

2.3.1.2.1 *Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global*

Norma Técnica Peruana 400.012 (2018) indica la determinación de la distribución por tamaño de partículas del agregado fino, grueso y global por tamizado.

“Esta Norma Técnica Peruana se aplica para determinar la gradación de materiales propuestos para su uso como agregados o los que están siendo utilizados como tales. Los resultados serán utilizados para determinar el cumplimiento de la distribución del tamaño de partículas con los requisitos que exige la especificación técnica de la obra y proporcionar los datos necesarios para el control de la producción de agregados. Los datos también pueden ser utilizados para correlacionar el esponjamiento y el embalaje.” (Norma Técnica Peruana 400.012 .2018, Pág. 03)

Muestreo. La cantidad de muestra de ensayo de agregado grueso será conforme a lo adecuado en la siguiente tabla y para el agregado fino la cantidad de la muestra de ensayo, luego del secado, será de 300 g mínimo.

Tabla 29.

Cantidad mínima de la muestra de agregado grueso o global

Tamaño Máximo Nominal Aberturas Cuadradas mm (pulg)	Cantidad de la Muestra de Ensayo, Mínimo kg (lb)
9,5 (3/8)	1 (2)
12,5 (½)	2 (4)
19,0 (¾)	5 (11)
25,0 (1)	10 (22)
37,5(1 ½)	15 (33)
50 (2)	20 (44)
63 (2 ½)	35 (77)
75 (3)	60 (130)
90 (3 ½)	100 (220)
100 (4)	150 (330)
125 (5)	300 (660)

Nota. Adaptado de Norma Técnica Peruana 400.012 (2018)

Procedimiento. El primer paso es secar la muestra a peso constante a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, luego se seleccionarán tamaños adecuados de tamices para proporcionar la información requerida por las especificaciones que cubran el material a ser ensayado, después las sacudidas de los tamices pueden ser manuales o mecánicas, durante un tiempo determinado y para finalizar se determinará la masa de cada aumento de medida en una balanza. (Norma Técnica Peruana 400.012 .2018, Pág. 06).

Calculo. Para el cálculo, primero calcular el porcentaje que pasa, los porcentajes totales retenidos, o los porcentajes sobre cada tamiz, aproximando al 0,1 % más cercano de la masa seca inicial de la muestra y cuando se requiera, calcular el módulo de fineza, sumando el porcentaje acumulado retenido de material de cada uno de los siguientes tamices (porcentaje acumulado retenido) y dividir la suma entre 100: 150 μm (N° 100); 300 μm (N° 50); 600 μm (N° 30); 1,18 mm (N° 16); 2,36 mm (N° 8); 4,75 mm (N° 4); 9,5 mm (3/8 de pulgada); 19,0 mm (3/4 de pulgada); 37,5 mm (1 1/2 pulgada) y. mayores; incrementando en la relación 2 a 1. (Norma Técnica Peruana 400.012 .2018, Pág. 09).

2.3.1.2.2 Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado.

Norma Técnica Peruana 339.185 (2018) explica el procedimiento para determinar el porcentaje total de humedad evaporable en una muestra de agregado fino o grueso por secado. La humedad evaporable incluye la humedad superficial y la contenida en los poros del agregado, pero no considera el agua que se combina químicamente con los minerales de algunos agregados y que no es susceptible de evaporación, por lo que no está incluida en el porcentaje determinado por este método. (Pág.01)

Muestreo. Se establece la muestra representativa de este ensayo a través de la siguiente tabla:

Tabla 30.*Tamaño de la muestra de agregado para contenido de humedad*

Tamaño máximo Cuadradas mm (pulg)	Nominal de agregado	Cantidad de la muestra de ensayo mínimo Kg
4,75 (0.187) (No,4)		0.5
9,5 (3/8)		1.5
12,5 (1/2)		2.0
19,0 (3/4)		3.0
25,0 (1)		4.0
37,5 (1 1/2)		6.0
50,0 (2)		8.0
63 (2 1/2)		10.0
75 (3)		13.0
90 (3 1/2)		16.0
100 (4)		25.0
150 (6)		50.0

Nota. Adaptado de Norma Técnica Peruana 339.185 (2018)

Procedimiento. Primero se determinará la masa de la muestra con una precisión del 0,1 %, luego Secar la muestra completamente en el recipiente por medio de la fuente de calor elegida y finalmente se debe calcular la masa de la muestra seca, luego que paso un determinado tiempo de enfriamiento.

Calculo. Se calculará el contenido de humedad total a través de la siguiente formula:

$$P = \frac{100(W - D)}{D}$$

Donde:

P : Contenido total de humedad evaporable de la muestra en porcentaje

W : Masa de muestra húmeda original (g)

D : Masa de muestra seca (g)

2.3.1.2.3 Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso

Norma Técnica Peruana 400.021 (2018) establece un procedimiento para determinar la densidad promedio de partículas de agregado grueso (no incluye los orificios entre las partículas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso. (pág. 01)

Campo de aplicación. Norma Técnica Peruana 400.021 (2018) explica que la densidad relativa (gravedad específica) es la característica generalmente usada para el cálculo del volumen ocupado por el agregado en diferentes mezclas que contienen agregados y también se utiliza en el cálculo de los vacíos. La densidad relativa (gravedad específica) (SSD) se utiliza si el agregado está húmedo, es decir, si su absorción se ha cumplido. Por el contrario, la densidad o densidad relativa (gravedad específica) (OD) se utiliza para los cálculos cuando el agregado está seco o se supone que está seco y por último los valores de absorción se usan para calcular el cambio en la masa de un agregado debido al agua absorbida en los espacios de los poros dentro de las partículas. (pág. 04).

Definiciones. (Norma Técnica Peruana 400.021, 2018, pág. 6-7)

- Densidad relativa (gravedad específica): Es la relación de la densidad de un material a la densidad del agua a una temperatura indicada; los valores son adimensionales.
- Densidad relativa (gravedad específica) (OD): Es la relación de la densidad (OD) del agregado a la densidad del agua a una temperatura indicada.
- Densidad relativa (gravedad específica), (SSD): Es la relación de la densidad (SSD) del agregado a la densidad del agua a una temperatura indicada.

- Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente): Es la relación de la densidad aparente de los agregados a la densidad del agua a una temperatura indicada. (Norma Técnica Peruana 400.021, 2018, pág. 6-7)

Método de ensayo. Una muestra de agregado es sumergida en agua por $24 \text{ h} \pm 4 \text{ h}$ para esencialmente llenar los poros. Luego la muestra es removida del agua, y el agua superficial de las partículas es secada y se determina la masa. Posteriormente, el volumen de la muestra se determina por el método de desplazamiento de agua. Finalmente, la muestra es secada en horno y la masa determinada. Usando los valores de la masa obtenidos y las fórmulas de este método de ensayo, es posible calcular la densidad, densidad relativa (gravedad específica), y la absorción. (Norma Técnica Peruana 400.021, 2018, pág. 7)

Muestreo. La masa mínima de la muestra de ensayo a utilizar se da en la siguiente tabla.

Tabla 31.

Masa mínima de muestra de ensayo de peso específico

Tamaño máximo nominal mm (pulg.)	Masa mínima de muestra de ensayo kg (lb)
12,5 (½) o menor	2 (4,4)
19,0 (¾)	3(6,6)
25,0 (1)	4 (8,8)
37,5 (1 ½)	5(11)
50 (2)	8(18)
63 (2 ½)	12(26)
75 (3)	18(40)
90 (3 ½)	25(55)
100 (4)	40(88)
125 (5)	75(165)

Nota. Adaptado de Norma Técnica Peruana 400.021 (2018)

Procedimiento. Primer paso secar la muestra de ensayo en una estufa hasta una masa constante a una temperatura de $110 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, enfriar a temperatura ambiente durante 1 h a 3

h para las muestras de ensayo de tamaño nominal máximo de 37,5 mm (1 ½ in.), o más para tamaños más grandes, hasta que el agregado se haya enfriado a una temperatura que es cómodo de manipular (aproximadamente 50 °C). Posteriormente sumergir el agregado en agua a temperatura ambiente, durante un período de 24 h ± 4 h.

luego retirar la muestra del agua y hacer rodar sobre un paño absorbente grande, hasta que se eliminan todas las partículas visibles de agua. Limpiar las partículas más grandes individualmente. Se permite la utilización de un flujo de aire para facilitar la operación de secado.

Después de la determinación de la masa en aire, colocar inmediatamente la muestra saturada superficialmente seca en el recipiente de la muestra y determinar su masa aparente en agua a 23 °C ± 2,0 °C y finalmente secar la muestra de ensayo en la estufa hasta una masa constante, a temperatura de 110 °C ± 5 °C , enfriar en aire a temperatura ambiente durante 1 h a 3 h , o hasta que el agregado se ha enfriado a una temperatura que es apropiada para la manipulación (aproximadamente 50 °C) y determinar la masa. (Norma Técnica Peruana 400.021, 2018, pág. 10)

Cálculos.

- Densidad relativa (Gravedad específica) (OD). Se calculará la densidad relativa de acuerdo al secado al horno de las muestras, con la siguiente expresión:

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica)(OD)} = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

A : Masa de la muestra secada al horno en aire (g)

B : Masa de la muestra de ensayo de superficie saturada seca en aire
(g)

C : Masa aparente de la muestra de ensayo saturada en agua (g)

- Densidad relativa (gravedad específica) (SSD). Se hallará la densidad relativa del agregado en condición de superficie seca saturada, con la siguiente fórmula.

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica)(SSD)} = \frac{B}{B - C}$$

- Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente). Se halla mediante la siguiente fórmula.

$$\text{Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)} = \frac{A}{A - C}$$

- Para el cálculo de absorción del agregado grueso:

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{B - A}{A} \times 100$$

2.3.1.2.4 Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino

La Norma Técnica Peruana 400.022 (2013) indica establecer un procedimiento para determinar la densidad promedio de partículas de agregado fino (no incluye los orificios entre las partículas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino. (pág. 01)

Campo de aplicación. La densidad relativa es usada para calcular volumen agregado por el agregado en diferentes mezclas, la densidad relativa (gravedad específica) (SSD) se utiliza en la determinación de la humedad superficial del agregado fino por desplazamiento de agua en el Método de Ensayo de la ASTM C70. La densidad relativa (gravedad específica) (SSD) se usa si el agregado está húmedo, es decir, si su absorción se ha cumplido. Por el contrario, la densidad o densidad relativa (gravedad específica) (OD) se utiliza para los cálculos cuando el agregado está seco o se supone que está seco. (Norma Técnica Peruana 400.022, 2013, pág. 4)

Procedimiento. La Norma Técnica Peruana 400.022 (2013) afirma que existe dos tipos ensayos para determinar el peso específico del agregado fino, uno es el procedimiento gravimétrico y el segundo la determinación volumétrica. En esta tesis se va utilizar el procedimiento gravimétrico (picnómetro)

Para empezar, se va llenar el picnómetro con agua, después se colocará una cantidad de 500 g $\pm$ 10 de agregado fino de saturada seca superficialmente y después llenar con agua hasta un 90% de su capacidad, después se tendrá que agitar el picnómetro puede ser manualmente o mecánicamente.

El segundo paso es ajustar la temperatura del picnómetro y su contenido a 23.0 °C $\pm$ 2.0 °C si es necesario por inmersión parcial en agua circulante, hasta llevar el nivel del agua a su nivel de aforo. Así se podrá determinar la masa total del picnómetro, el espécimen y el agua.

El tercer paso se tendrá que retirar el agregado fino del picnómetro, luego secar en el horno a una masa constante, a temperatura de 110 °C $\pm$ 5 °C, enfriar en aire a temperatura ambiente durante 1 h $\pm$ 1/2 h, y determinar la masa.

Y para finalizar se va determinar la masa del picnómetro lleno hasta su capacidad de aforo de calibración con agua a 23,0 °C $\pm$ 2,0 °C.

Cálculos. Para calcular la densidad relativa (gravedad específica) del agregado fino, se clasifica en tres partes: uno es densidad relativa (saturado superficialmente seca), densidad relativa aparente (gravedad específica aparente) y densidad relativa (seca al horno seco).

-Densidad relativa (gravedad específica) (seca al horno seco). Se calculará la densidad relativa sobre la base del agregado secado al horno a través del procedimiento gravimétrico.

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica)}(OD) = \frac{A}{B + S - C}$$

Donde:

A : Masa de la muestra secada al horno (g)

B : Masa del picnómetro llenado de agua hasta la marca de calibración(g)

C : Masa del picnómetro lleno de la muestra y el agua hasta la marca de calibración (g)

R1 : Lectura inicial de nivel de agua en un matraz de Le Chatelier (ml)

R2 : Lectura final de agua en un matraz de Le Chatelier (ml)

S : Masa de la muestra de saturado superficialmente seca (utilizado en el procedimiento gravimétrico para la densidad y la densidad relativa (gravedad específica), o para la absorción con ambos procedimientos) (g)

S1 : Masa de la muestra de saturado superficialmente seca (utilizado en el procedimiento para la densidad volumétrica y la densidad relativa (gravedad específica)) (g)

-Densidad relativa (gravedad específica) saturado superficialmente seca. Densidad relativa (gravedad específica) en base al agregado saturado superficialmente seca se desarrolla con esta fórmula.

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica)(SSD)} = \frac{S}{B + S - C}$$

-Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente). Con la siguiente formula se halla el procedimiento gravimétrico.

$$\text{Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)} = \frac{A}{B + A - C}$$

-Para calcular la absorción del agregado fino se desarrolla con esta fórmula.

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{S - A}{A} \times 100$$

2.3.1.2.5 Método de ensayo para determinar la masa por unidad de volumen o densidad (“Peso Unitario”) y los vacíos en los agregados.

La Norma Técnica Peruana 400.017 (2020) indica como determinar la densidad aparente (peso unitario) del agregado en estado suelto y compactado, para determinar los vacíos entre partículas en agregados finos, gruesos. El método es flexible a los agregados que no excedan los 125 mm como tamaño máximo nominal.

Significado y uso. La técnica de este ensayo de esta norma es colocada para “determinar los valores de densidad aparente que son necesarios para usos en muchos métodos de selección de proporciones para mezclas de concreto” (Norma Técnica Peruana 400.017, 2020, pág. 3)

Muestra de ensayo. En la muestra es considerada entre 125 % a 200%, es la cantidad solicitada para llenar el recipiente, entonces la muestra debe secarse en una estufa a 110°C ± 5°C.

Determinación del volumen del recipiente. Se establecerá la masa de la placa de vidrio y el recipiente con una precisión del 0.05 kg, en el siguiente procedimiento se tendrá que llevar el recipiente con agua y se tapara con una placa de vidrio con la finalidad de eliminar estas burbujas y exceso de agua. Luego se tendrá que medir la temperatura del agua con un termómetro para obtener su densidad.

Procedimiento. Para determinar la densidad aparente compactada de agregados que tengan un tamaño máximo nominal de 37.5 mm (1 ½ pulg) o menos, consolidar la muestra en el recipiente usando el Método A: Rodding (apisonado); usar el Método B: Jigging para agregados que tengan un tamaño máximo nominal superior a 37.5 mm (1 ½ pulg) y que no exceda de 125mm (5pulg). Para determinar la densidad aparente suelta del agregado, cuando esté estipulado, completar el recipiente con el Método C: Shoveling (palear). (Norma Técnica Peruana 400.017, 2020, pág. 9)

Se usó el método de Rodding para encontrar la densidad aparente compactada, ya que el tamaño máximo nominal del agregado grueso es menor a 37.5mm (1 ½ pulg). Para encontrar la densidad aparente suelta del agregado se usó el método de Shoveling.

Norma Técnica Peruana 400.017 (2020) enseña que para emplear el método de Rodding, primeramente, se llena el recipiente de acero a 1/3 del total y se nivela la superficie con los dedos. después se apisona la capa del agregado con 25 golpes apoyándose de la varilla de apisonado. En segundo, se llena el recipiente a 2/3 del total, se nivela y se apisona nuevamente. En último, se llena el recipiente a sobre volumen y luego se realiza la operación antes mencionada, con el fin de que cualquier montículo leve de partículas del agregado equilibren los vacíos mayores en la superficie por debajo de la parte superior del recipiente.

Y sobre el método de Shoveling, primero se llenará el recipiente hasta su máximo con una pala o cucharón, descargando el agregado de una altura que no sobresalga los 50 mm encima del borde superior. Luego se nivelará la superficie del agregado con el apoyo de una espátula con la intención de que cualquier montículo leve de partículas del agregado igualen los vacíos mayores en la superficie por debajo de la parte superior del recipiente.

Cálculo.

-Para calcular la densidad de la masa se emplea la siguiente fórmula.

$$M = \frac{G - T}{V}$$

$$M = (G - T) \times F$$

Donde:

M : Densidad de masa del agregado (kg/m³)

G : Masa del agregado más el recipiente (kg)

T : Masa del recipiente (kg)

V : Volumen del recipiente (m³)

F : Factor para el recipiente (m³)

-Para calcular el volumen del recipiente se desarrolla con la siguiente formula.

$$V = \frac{W - M}{D}$$

$$F = \frac{D}{W - M}$$

Donde:

V : Volumen del recipiente (m^3)

W : Masa del agua, placa de vidrio y recipiente (kg)

M : Masa de la placa de vidrio y recipiente (kg)

D : Densidad del agua para la temperatura medida (kg/m^3)

F : Factor para el recipiente ($1/m^3$)

2.3.2 Diseño y elaboración de mezclas

El diseño de mezclas de concreto se rige en el Perú por la NTP 339.034 (2021), que establece los procedimientos para elaborar y curar mezclas de prueba y determina la resistencia requerida. Internacionalmente, el ACI 211.1-21 proporciona guías prácticas para la dosificación del concreto, incluyendo mezclas con agregados ligeros.

Para la trabajabilidad de la mezcla, el ensayo de asentamiento se realiza bajo la ASTM C143-20, que describe el método del cono de Abrams. En el caso de concretos ligeros con perlita expandida, la ASTM C567-19 regula la determinación de la densidad, contenido de aire y resistencia.

2.3.3 Especímenes

2.3.3.1 Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas

Norma Técnica Peruana 339.034(2015), establece la determinación de la resistencia a la compresión en especímenes cilíndricos de concreto y extracciones diamantinas de concreto.

Campo de aplicación. En esta norma es adaptable a concretos con pesos unitarios mayores a 800kg/m³.

Síntesis del método de ensayo. El método consiste en aplicar una carga de compresión axial a los cilindros moldeados o extracciones diamantinas a una velocidad que se encuentra en un rango prescrito hasta la falla. La resistencia a la compresión del espécimen es calculada por división de la carga máxima alcanzada durante el ensayo, entre el área de la sección transversal del espécimen. (Comité Técnico de Normalización (CTN) Norma Técnica Peruana 339.034, 2015, pág. 3)

Máquina de ensayo. Las caras de los bloques tendrán una dimensión mínima de al menos 3 % mayor que el diámetro de los especímenes a ser ensayados. Excepto para los círculos concéntricos descritos más adelante, las caras no se apartarán de un plano o superficie horizontal por más de 0,02 mm en cualesquiera 150 mm de los bloques de 150 mm de diámetro o mayor, o por más que 0,02 mm en el diámetro de cualquier bloque más pequeño; los bloques nuevos serán fabricados dentro la mitad de esta tolerancia. Cuando el diámetro de la cara del bloque que se asienta en la esfera excede el diámetro del espécimen por más de 13 mm, se inscribirán círculos concéntricos, para facilitar un apropiado centrado, de no más de 0,8 mm de profundidad y no más de 1 mm de ancho. (Norma Técnica Peruana 339.034, 2015, pág. 6)

Tabla 32.

Diámetros máximos de especímenes de ensayo

Diámetro de espécimen de ensayo, mm	Máximo diámetro mm
50	105
75	130
100	165
150	255
200	280

Nota. Adaptado de Norma Técnica Peruana 339.034 (2015)

Especímenes. La Norma Técnica Peruana 339.034 (2015) indica que los especímenes no serán ensayados si el diámetro individual de un cilindro difiere de cualquier otro diámetro del mismo cilindro por más del 2%. Por lo cual afirma que antes del ensayo las bases de los especímenes no deberán apartarse de la perpendicularidad a los ejes por más de 0. 5°

Procedimiento. Los especímenes deben ser protegidos de la pérdida de humedad en el momento del retiro del almacenaje de humedad y luego el ensayo, los cilindros se ensayarán en condición húmeda.

Tabla 33.

Edades de ensayo y tolerancias permisibles

Edad de ensayo	Tolerancia permisible
24 h	± 0,5 h ó 2,1 %
3 d	± 2 h ó 2,8 %
7 d	± 6 h ó 3,6 %
28 d	± 20 h ó 3,0 %
90 d	± 48 h ó 2,2%

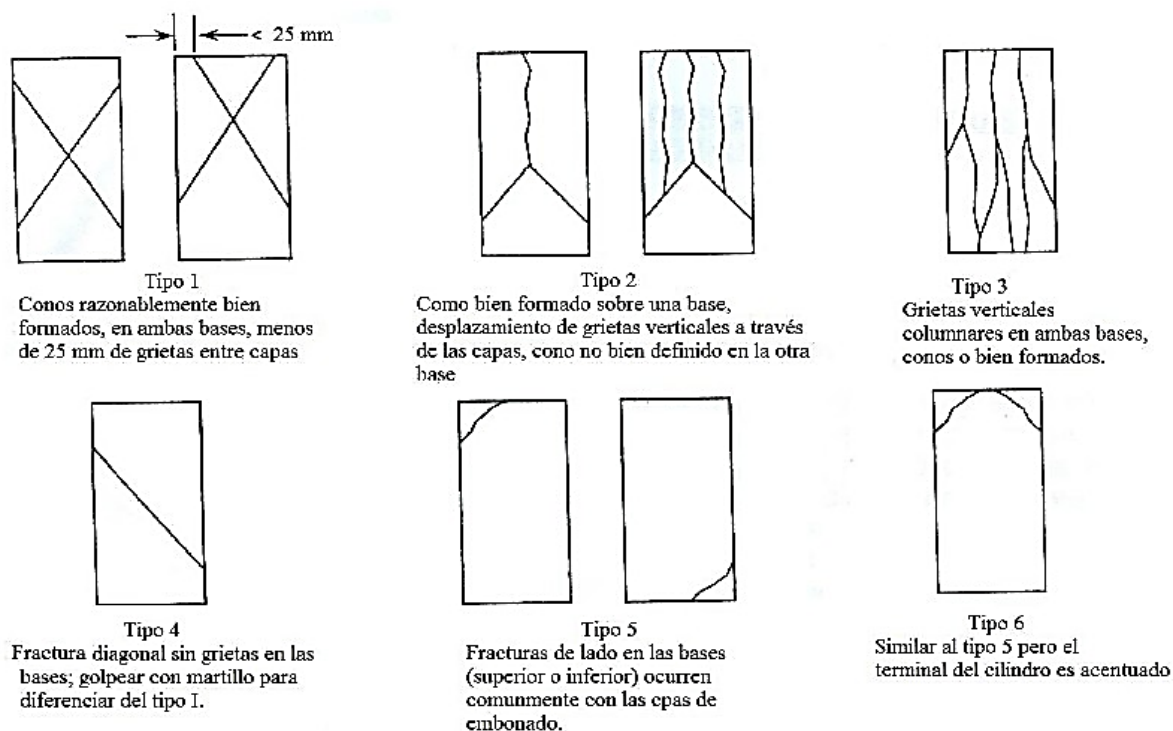
Nota. Adaptado de Norma Técnica Peruana 339.034 (2015)

La colocación del espécimen, primero se instalará el bloque de rotura inferior, sobre la mesa de la máquina de ensayo directamente debajo del bloque de apoyo del asiento esférico superior, los bloques deben estar limpios para poder colocar el cilindro sobre el bloque inferior de rotura. segundo, previo antes del ensayo el espécimen, se debe demostrar que el indicador de carga sea cero, una vez colocado el espécimen en la máquina, se debe inclinar manualmente la parte móvil del bloque de asiento esférico, de tal modo que la superficie de apoyo sea paralela a la parte superior del espécimen.

En lo que es la velocidad de la carga, ésta debe aplicarse de manera continua y sin impacto. Se empleará la carga de compresión cuando el indicador muestra que la carga se reduce y el espécimen enuncie un patrón de fractura bien determinado. Se hallará la carga máxima obtenida del espécimen y se apuntará el tipo de patrón de fractura.

Figura 16.

Esquema de roturas de probetas



Nota. Adaptado de Norma Técnica Peruana 339.034 (2015)

Cálculos. Para encontrar la resistencia a la compresión del espécimen se dividirá la carga máxima conseguida del espécimen entre el área promedio de la sección transversal determinada.

$$C = \frac{W}{A}$$

Donde:

C : Resistencia a la compresión del espécimen (kg/cm^2).

W : Máxima carga indicada por la máquina de ensayo (kg o N)

A : Promedio del área promedio de la sección transversal del espécimen (cm^2)

2.3.4 Unidades de albañilería

Según la Norma E. 070 del Reglamento Nacional de Edificaciones, las unidades de albañilería se clasifican en:

- Ladrillo, unidad que puede levantarse con sólo una mano.
- Bloque, unidad que requiere dos manos para levantarse.

A su vez, tienen la siguiente clasificación según sus fines estructurales.

Tabla 34.

Clase de unidad de albañilería para fines estructurales

Clase	Variación de la dimensión (máx. en %)				Alabeo (máx. en mm)	Resistencia a compresión f _b característica mínima en Mpa (kg/cm ²) sobre área bruta
	Hasta 100mm	Hasta 150mm	Más de 150mm	de		
Ladrillo I	±8	±6	±4		10	4.9 (50)
Ladrillo II	±7	±6	±4		8	6.9 (70)
Ladrillo III	±5	±4	±3		6	9.3 (95)
Ladrillo IV	±4	±3	±2		4	12.7 (130)
Ladrillo V	±3	±2	±1		2	17.6 (180)
Bloque P	±4	±3	±2		4	4.9 (50)
Bloque NP	±7	±6	±4		8	2.0 (20)

Nota. Adaptado de Reglamento Nacional de Edificaciones (2006)

La Norma E. 070 además indica algunas limitaciones en su aplicación a muros portantes, según el tipo de la unidad de albañilería.

Tabla 35.*Limitaciones en el uso de la unidad de albañilería para fines estructurales*

Tipo	Zona sísmica 2 y 3		Zona sísmica 1
	Muro portante en edificios de 4 pisos a más	Muro portante en edificios de 1 a 3 pisos	Muro portante en todo el edificio
Sólido Artesanal	No	Sí, hasta dos pisos	Sí
Sólido Industrial	Sí	Sí	Sí
Alveolar	Celdas totalmente rellenas con grout	Celdas totalmente rellenas con grout	Celdas totalmente rellenas con grout
Hueca	No	No	Sí
Tubular	No	No	Sí, hasta dos pisos

Nota. Adaptado de Reglamento Nacional de Edificaciones (2006)

Para una adecuada aceptación de las unidades según la Norma E. 070, deberán someterse a las siguientes pruebas:

- Muestreo
- Resistencia a la Compresión
- Variación Dimensional
- Alabeo
- Absorción

2.3.4.1 Ladrillos de arcilla

En la Norma Técnica Peruana (NTP) 399.613 (2017) se muestra los métodos de muestreo y ensayo de ladrillos de arcilla usados en albañilería. Para el desarrollo de la presente investigación se realizará los siguientes ensayos para la corroboración de calidad del ladrillo de arcilla.

Medida de dimensiones. (Ensayar 10 unidades) Con una regla metálica de 30 cm se debe medir el ancho y largo de la cara superior e inferior, para luego promediarlos y obtener

una sola medida. También se debe medir las cuatro alturas de la unidad para conseguir un promedio de ellas. En el informe se coloca el promedio de las medidas de la altura, ancho y largo con aproximación a 1mm.

Medidas del área de vacíos en unidades perforadas. (Ensayar 10 unidades tal cual se reciban) Se debe realizar el procedimiento de medida del tamaño con el propósito de calcular el volumen de la unidad. Se coloca el espécimen sobre una hoja de papel y se rellena las perforaciones con arena (sin vibrar), con ayuda de una varilla de acero se retira el excedente de la superficie, se retira el ladrillo y se pesa la arena en la hoja, con aprox. de 0.5g.

En un cilindro de 500 ml se debe rellenar de la misma arena (sin vibrar) hasta la medida de 500 ml para después pesar la arena contenida en el cilindro.

-Determinar el volumen de la arena contenida en las perforaciones del espécimen:

$$V_s = \frac{500ml}{S_c} \times S_u$$

Donde:

V_s : Volumen de arena contenida en el espécimen de ensayo

S_c : Peso de 500ml de arena contenida en el cilindro (g)

S_u : Peso de la arena contenida en el espécimen (g)

-Determinar el porcentaje de vacíos:

$$\% \text{Área vacíos} = \frac{V_u \times 100}{V_s}$$

Donde:

V_s : Volumen de arena contenida en el espécimen de ensayo

V_u : Volumen del espécimen sin considerar perforaciones

En el informe se registrará el porcentaje de vacíos de cada espécimen con aproximación a 1%.

Alabeo. (Ensayar 10 unidades) Con ayuda de una regla metálica o de una cuña de medición se tomará las medidas de los siguientes casos.

-Superficies Cóncavas. Se coloca una varilla recta de forma diagonal en la superficie del espécimen y se mide con la regla la mayor distancia de la cara del ladrillo hacia la varilla con aprox. a 1mm.

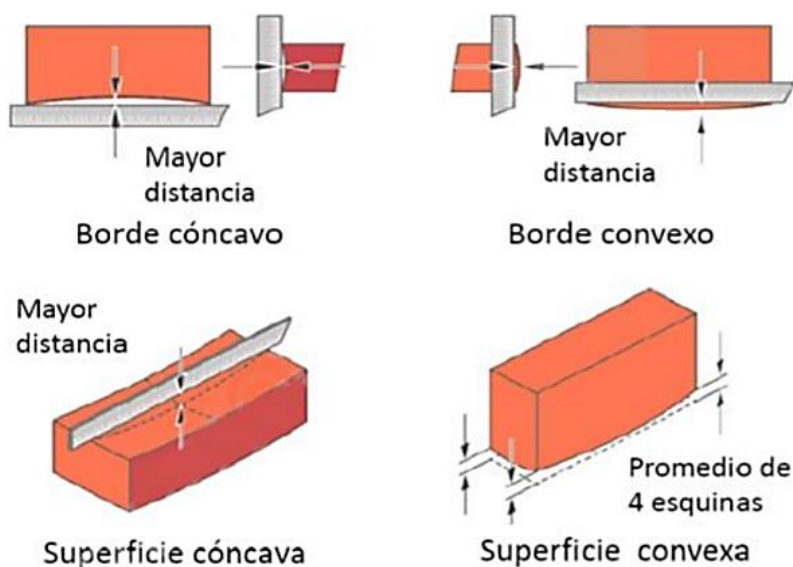
-Bordes Cóncavos. Se coloca una varilla recta de forma diagonal en el borde del espécimen y se mide con la regla la mayor distancia de la cara del ladrillo hacia la varilla con aprox. a 1mm.

-Superficies convexas. Se coloca la superficie convexa en contacto con una superficie plana y con los vértices equidistantes a dicha superficie. Se mide con la regla metálica la distancia desde la superficie plana hacia los vértices con aprox. de 1mm.

-Bordes convexos. Se coloca la varilla recta haciendo coincidir los dos vértices de la borde convexo y medir la mayor distancia entre el borde hacia la varilla.

Figura 17.

Medidas de alabeo



Nota. Adaptado de Norma Técnica Peruana 399.613 (2017)

Antes de realizar los siguientes ensayos se debe ejecutar la preparación de especímenes.

-Preparación de especímenes. (Ensayar 5 unidades). Para ello se realiza un secado en horno ventilado de 105°C a 115°C por menos de 24 horas hasta conseguir un aumento o pérdida no mayor de 0.2% en un rango de 2 horas. A continuación, se debe enfriar las unidades a 24°C ±8°C por 4 horas como mínimo. En el informe se debe indicar por separado el peso de cada unidad y el promedio de todo el grupo.

Absorción. (Ensayar 5 unidades) Después de haber sido secados y enfriados, se someterán a una sumersión en agua potable a 15.5 °C a 30°C, durante 5 y 24 horas. Secar con un paño el excedente de agua y pesarlos uno por uno dentro de los próximos 5 min.

Para calcular la absorción de cada ladrillo:

$$\text{Absorción}\% = \frac{100(W_s - W_d)}{W_d}$$

Donde:

W_d : Peso seco del espécimen.

W_s : Peso del espécimen saturado, después de ser sumergido en agua.

En el informe se registra el promedio de todas las unidades con aprox. a 0.1%.

Succión. (Ensayar 5 unidades) Después de haber sido secados y enfriados, en una bandeja y con ayuda de unos soportes metálicos se coloca un ladrillo sumergido en agua sólo 3 mm de su cara inferior, durante un 1 min ±1seg. Debe aumentarse la cantidad de agua necesaria para mantener la altura de sumersión indicada. Con un paño húmedo se secará el agua excedente (pasados los 10 segundos de retirarse del agua) y luego de 2 min se procederá a pesar el espécimen.

Para determinar la rapidez de absorción (succión) se calculará los gramos de agua absorbidos en 200cm² por min:

$$\text{Succión (g/min/200cm}^2\text{)} = \frac{200W}{LB}$$

Donde:

W : Diferencia de pesos del espécimen, g.

L : Longitud del espécimen, cm.

B : Ancho del espécimen, cm.

En el informe se registrará el promedio del resultado de succión de los 5 especímenes ensayados con aprox. a 0.1 g/min/200cm².

Resistencia a Compresión. (Ensayar 5 unidades) Se debe hacer un capeado de yeso (3mm máx. de espesor sobre la cara de asiento) al ladrillo 24 horas antes de realizar el ensayo. Durante el ensayo, la carga debe ser aplicada sobre la cara de asiento del ladrillo.

Para calcular la resistencia a compresión:

$$C = \frac{W}{A}$$

Donde:

C : Resistencia a la compresión del espécimen (kg/cm²).

W : Máxima carga indicada por la máquina de ensayo (kg o N)

A : Promedio del área bruta de las superficies de contacto superior e inferior del espécimen (cm²)

En el informe se registrará el promedio de la resistencia a compresión de las unidades ensayadas.

2.3.4.2 Ladrillos de concreto

La Norma Técnica Peruana 399.601 (revisada el 2016), define algunos términos para los ladrillos de concreto:

- Dimensiones de fabricación. Son otorgadas por el fabricante.
- Dimensiones efectivas. Son las dimensiones directas realizadas al ladrillo.
- Dimensiones nominales. Son indicadas en la NTP 399.601 para determinar el tamaño del ladrillo.

- Ladrillo de concreto. Elaborado con cemento portland, agua, y agregados, puede ser manipulado con una sola mano.
- Ladrillo sólido (macizo). Tiene una sección neta igual o mayor al 75% de la sección bruta del mismo plano.
- Unidad de albañilería de peso normal. Luego del secado tiene densidad de 2000kg/m³ o más.

La variación dimensional que está permitida por esta NTP es de $\pm 3.2\text{mm}$ de las dimensiones de fabricación.

Tipos. Se presentan los siguientes cuatro tipos:

Tipo 24. Pueden usarse en donde se necesite alta resistencia a la compresión, penetración de la humedad, acción severa del frío, así también como para enchapes o muros exteriores sin revestimiento.

Tipo 17. Uso general con moderada resistencia a la compresión, penetración de la humedad y acción del frío.

Tipo 14. Uso general con moderada resistencia a la compresión.

Tipo 10. Uso general con moderada resistencia a la compresión.

Además, la NTP 399.601 (2016), determina los siguientes requisitos físicos de los ladrillos de concreto según su tipo.

Tabla 36.*Requisitos de resistencia y absorción*

Resistencia a la compresión, min, MPa, respecto al área bruta promedio			Absorción de agua, máx. % (Promedio de 3 unidades)
Tipo	Promedio de 3 unidades	Unidad individual	
24	24	21	8
17	17	14	10
14	14	10	12
10	10	8	12

Nota. Adaptado de Norma Técnica Peruana 399.601 (2016)

Según la Norma Técnica Peruana 399.604 2002 (revisada el 2015) se debe realizar los siguientes ensayos a las unidades de albañilería de concreto.

Antes de ensayar los ladrillos de concreto se debe pesar (peso recibido, W_r) y marcar para diferenciarlos entre ellos.

Medidas de dimensiones. (Ensayar 3 unidades) El procedimiento es el mismo que para los ladrillos de arcilla.

Para calcular la absorción, contenido de humedad y densidad, se ensayará 3 unidades de la siguiente forma:

- Sumergir el ladrillo en agua por 24 horas (15.6°C a 26.7°C). Pesar mientras esté sumergido con ayuda de un alambre de metal que lo suspenda (peso sumergido, W_i)
- Retirar del agua y dejar drenar por 1 min sobre una malla de alambre más grueso de 9.5mm, retirar con un paño húmedo el agua excedente y pesarlo (peso saturado, W_s)
- Luego de registrar el peso saturado, se debe secar en un horno ventilado a 100°C a 115°C por 24 horas. Finalmente registrar el peso (peso secado al horno, W_d).

Absorción.

$$\text{Absorción (kg/m}^3\text{)} = \frac{W_s - W_d}{W_s - W_i} \times 1000$$

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{W_s - W_d}{W_d} \times 100$$

Contenido de humedad.

$$\text{Contenido de humedad (\% de absorción total)} = \frac{W_r - W_d}{W_s - W_d} \times 100$$

Densidad.

$$\text{Densidad (kg/m}^3\text{)} = \frac{W_d}{W_s - W_i} \times 1000$$

Donde:

W_r : Peso del espécimen recibido (kg)

W_i : Peso sumergido del espécimen (kg)

W_s : Peso del espécimen saturado, después de ser sumergido (kg)

W_d : Peso seco del espécimen (kg)

Resistencia a Compresión. (Ensayar 3 unidades) Dos horas antes del ensayo se debe hacer un capeado de yeso mezclado con cemento al ladrillo, el cual a las dos horas debe ser resistente a 24.1 MPa (deberá ensayarse el capeado en cubos). Durante el ensayo, la carga debe ser aplicada sobre la cara de asiento del ladrillo.

Para calcular la resistencia a compresión:

$$C = \frac{W}{A}$$

Donde:

C : Resistencia a la compresión del espécimen (kg/cm²).

W : Máxima carga indicada por la máquina de ensayo (kg o N)

A : Promedio del área bruta de las superficies de contacto superior e inferior del espécimen (cm²)

En el informe se registrará el promedio de la resistencia a compresión de las unidades ensayadas.

2.3.5 Mortero

La Norma E. 070 del Reglamento Nacional de Edificaciones (2006), indica que:

- El aglomerante puede ser cemento Portland tipo I y II (NTP 334.009), cemento adicionado IP (NTP 334.830), mezcla de cemento Portland o cemento adicionado y cal hidratada normalizada (NTP 339.002).
- El agregado fino será arena gruesa natural, libre de materia orgánica y sales (no deberá ser arena de mar). No deberá retenerse más del 50% entre las mallas. El módulo de fineza será entre 1.6 y 2.5; y el porcentaje máximo de partículas quebradizas, 1% en peso.
- El agua será potable.

Tabla 37.

Granulometría de la arena gruesa

Malla ASTM	% que pasa
Nº 4 (4.75 mm)	100
Nº 8 (2.36 mm)	95 al 100
Nº 16 (1.18 mm)	70 a 100
Nº 30 (0.60 mm)	40 a 75
Nº 50 (0.30 mm)	10 a 35
Nº 100 (0.15 mm)	2 a 15
Nº 200 (0.075 mm)	Menos de 2

Nota. Adaptado de Reglamento Nacional de Edificaciones (2006)

También se indica que existe el mortero tipo P (para muros portantes) y mortero tipo NP (para muros no portantes), los cuales tendrán los siguientes componentes:

Tabla 38.*Tipos de morteros*

Componentes				Usos
Tipo	Cemento	Cal	Arena	
P1	1	0 a ¼	3 a 3 ½	Muros Portantes
P2	1	0 a ½	4 a 5	Muros Portantes
NP	1	-	Hasta 6	Muros No Portantes

Nota. Adaptado de Reglamento Nacional de Edificaciones (2006)

2.3.6 Prismas

2.3.6.1 Proceso constructivo de prismas

Según la Norma E. 070 (2006), si no se realizan los ensayos correspondientes de pilas y muretes, se puede emplear los valores a continuación.

Tabla 39.*Resistencias características de la albañilería Mpa (kg/cm²)*

Resistencias características de la albañilería Mpa (kg/cm ²)				
Materia Prima	Denominación	Unidad f_b	Pilas f_m	Muretes v_m
Arcilla	King Kong artesanal	5.4 (55)	3.4 (35)	0.5 (5.1)
	King Kong industrial	14.2 (145)	6.4 (65)	0.8 (8.1)
	Rejilla industrial	21.1 (215)	8.3 (85)	0.9 (9.2)
Sílice – cal	King Kong normal	15.7 (160)	10.8 (110)	1.0 (9.7)
	Dédalo	14.2 (145)	9.3 (95)	1.0 (9.7)
	Estándar y mecano	14.2 (145)	10.8 (110)	0.9 (9.2)
Concreto Bloque Tipo P		4.9 (50)	7.3 (74)	0.8 (8.6)
		6.4 (65)	8.3 (85)	0.9 (9.2)
		7.4 (75)	9.3 (95)	1.0 (9.7)
		8.3 (85)	11.8 (120)	1.1 (10.9)

Nota. Adaptado de Reglamento Nacional de Edificaciones (2006)

Según la Norma E. 070 del Reglamento Nacional de Edificaciones (2006), los muros deberán hacerse a plomo y en línea. La junta de mortero deberá ser entre 10 mm y 15 mm, y

se asentará el ladrillo presionando verticalmente sin bambolearlo. Antes de realizar el asentado debe prepararse las unidades de albañilería de la siguiente forma:

- Para concreto. Humedecer la cara de asentado con una brocha o rociarlas.
- Para arcilla. Regarlas durante 30 min, entre 10 y 15 horas antes del asentado.
(succión entre 10 y 20 gr/200cm²/min)

Los prismas deberán refrentarse con cemento-yeso para corregir la irregularidad superficial.

Almacenar los prismas por 28 días a más de 10 °C.

2.3.6.2 Pilas

En la Norma Técnica Peruana 399.605 (2018) indica que las pilas deben ser de 2 unidades como mínimo y con proporción entre 1.3 y 5.0 (altura-espesor hP/tP), la construcción del prisma debe ser sobre el interior de una bolsa para que luego de terminar, sellarla y así conservar la humedad.

Se ensayarán los prismas a la edad de 28 días y si el prisma presenta humedad visible se debe prolongar el tiempo de almacenamiento hasta que esté totalmente seco para su ensayo.

Durante el transporte hacia su ensayo los prismas deben estar asegurados para evitar sacudidas, de rebote, o vuelco.

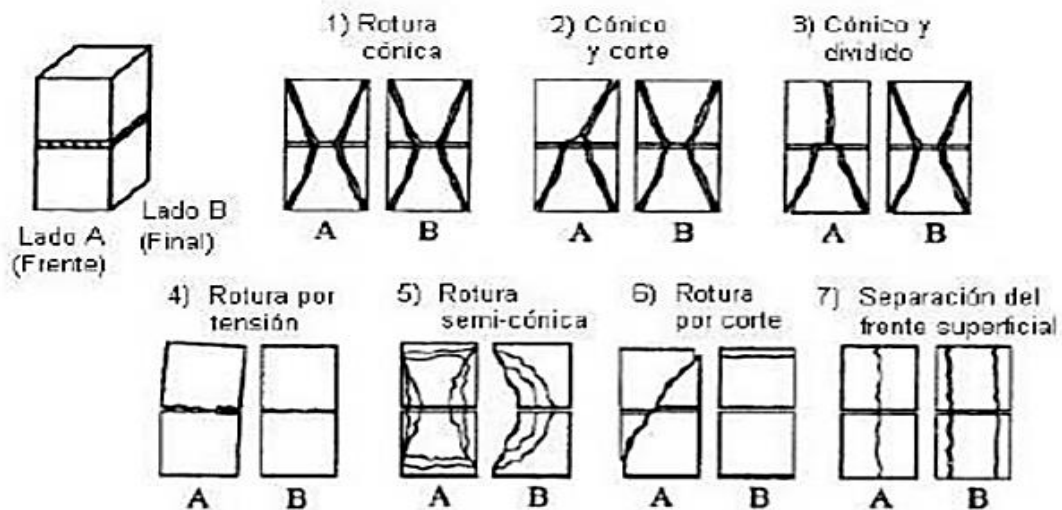
Medición de los prismas. Medir las 4 dimensiones de longitud con aprox. de 1 mm, al igual que el ancho y la altura (desde el centro de la cara). Promediar las dimensiones para longitud, ancho y altura.

Área neta de la sección transversal. Tomar el área neta de sección transversal de los prismas como en el área de sección transversal de las unidades de albañilería, determinada mediante la medición. Si el área neta de sección transversal es el 75 % del área bruta de la sección transversal como mínimo, considerar como 100 % sólido.

Resistencia a compresión. Aplicar la carga uniforme entre 1 y 2 min. Registrar la carga máxima hasta que el prisma muestre el modo de fallo. Se debe describir el modo de falla detalladamente con fotografías o esquemas.

Figura 18.

Esquemas de modo de falla en pilas



Nota. Adaptado de Norma Técnica Peruana 399.605 (2018)

Para calcular la resistencia a compresión:

$$C = \frac{W}{A}$$

Donde:

C : Resistencia a la compresión de la pila (kg/cm²).

W : Máxima carga indicada por la máquina de ensayo (kg o N)

A : Área neta de sección transversal de la pila (cm²)

El resultado debe ser corregido multiplicándolo por un factor de corrección, el cual se determinará en la siguiente tabla según la relación entre la altura (h_p) y el espesor (t_p) de la pila. Para la relación altura/espesor que no se encuentre en la tabla, determinar el factor por interpolación lineal con los valores presentados.

Tabla 40.

Factores de corrección altura/espesor para la resistencia en compresión de pilas de albañilería

h_p/t_p	1.3	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
Factor de corrección	0.75	0.86	1	1.04	1.07	1.15	1.22

Nota. Adaptado de Norma Técnica Peruana 399.605 (2018)

En el informe se deberá incluir el nombre de las personas que construyeron, transportaron y aplicaron las pruebas a la pila, además de identificar cada pila con sus dimensiones, relación altura/espesor, tipo de mortero y tipo de unidad de albañilería.

2.3.6.3 Muretes

En la Norma Técnica Peruana 399.621 (revisada el 2015) nos indica que se debe ensayar muretes para comprobar su resistencia a compresión diagonal (corte), teniendo en cuenta lo siguiente:

Equipos. Se necesitará una máquina de ensayo que aplique la carga continuamente, sin intermitencias y sin impacto. También deberá contar con escuadras de carga de acero que aplique la carga al prisma.

Especímenes de ensayo. Se debe construir por lo menos 3 muretes cuadrados (mín. 600x600mm) teniendo dos ladrillos enteros por hilada como mínimo. Deberán ser almacenados durante 28 días sin corrientes de aire a $24^{\circ}\text{C} \pm 8^{\circ}\text{C}$, 25% y 75% de humedad relativa. Durante sus primeros 7 días de edad no deben ser movidos. Ensayar tres cubos de 50 mm del mortero empleado para determinar su resistencia.

Procedimiento. Se asentará el murete sobre una cama de refrentado de yeso en sus esquinas, la cual estará sobre la escuadra inferior de carga. Las escuadras de carga superior e inferior deberán estar centradas en la máquina de ensayo. Durante el ensayo se aplicará la carga de forma continua hasta la última carga. Primero se hará a cualquier velocidad conveniente

hasta alcanzar la mitad de la carga máxima esperada y después se hará con la velocidad necesaria para que se llegue a la carga máxima entre 1 y 2 min.

Cálculos.

Para calcular el área bruta del murete:

$$A_b = \frac{l + h}{2} t$$

Donde:

l : Largo del murete (mm).

h : Altura del murete (mm)

t : Espesor total del murete (mm)

Para calcular el esfuerzo cortante:

$$V_m = \frac{0.707 P}{A_b}$$

Donde:

V_m : Esfuerzo cortante sobre el área bruta (MPa).

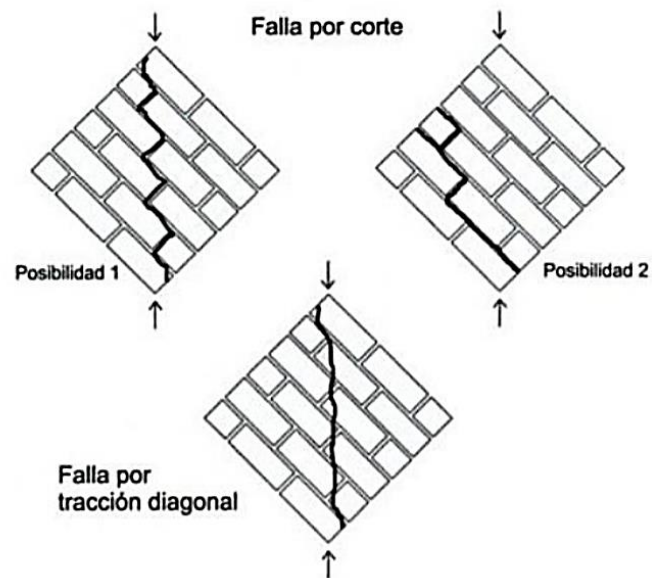
P : Carga aplicada (N)

A_b : Área bruta del espécimen (mm^2)

En el informe detallar el modo de falla del murete con ilustraciones que lo evidencien.

Figura 19.

Esquemas de modo de falla en muretes



Nota. Adaptado de Gallegos & Casabonne (2005)

CAPÍTULO III: Metodología de la Investigación

3.1.1 *Enfoque de Investigación*

Según las definiciones de Sampieri (2014), esta investigación posee un enfoque **Cuantitativo**, ya que se obtendrán resultados con datos numéricos luego de aplicar los ensayos correspondientes para determinar los rendimientos a investigar.

3.1.2 *Tipo de Investigación*

Según las definiciones de Sampieri (2014), el tipo de la investigación es **Correlacional**, porque busca analizar la relación entre las propiedades físico-mecánicas, térmicas, económicas y ambientales del ladrillo con la adición de caucho reciclado y perlita expandida.

3.1.3 *Diseño y Nivel de Investigación*

Según las definiciones de Sampieri (2014), la investigación tiene un diseño **Experimental**, porque el objetivo es observar los efectos producidos en las variables dependientes luego de modificar la incidencia de las variables independientes. Y es de nivel **Cuasi – Experimentos** ya que se tendrá que manipular por lo menos una variable independiente, para posteriormente analizar su efecto directo en las variables dependientes.

3.1.4 *Método de Investigación*

Según las definiciones de Rodríguez & Pérez (2017), se utilizará el método **Hipotético – Deductivo**, porque se requiere que la propuesta de la presente investigación se someta a ensayos para comprobar si es falsa o verídica la hipótesis que se ha planteado, mediante fuentes teóricas y empíricas.

3.1.5 *Método de Muestreo*

Según las definiciones de Sampieri (2014), se empleará el método de muestreo **No Probabilístico**, porque **no** se determinará el muestreo mediante la probabilidad, puesto que se pretende analizar sólo las propiedades de ladrillos de concreto empleando caucho reciclado y perlita mineral a diferentes porcentajes de incidencia determinados por el investigador.

3.1.6 Tamaño de la Muestra

La muestra se divide en cuatro tipos, de los cuales el primero es para los especímenes, según lo que indica la NTP 334.051 (2018).

Tabla 41.

Tamaño de la muestra de especímenes para el mortero de junta

GRUPO DE ESTUDIO	RESISTENCIA A COMPRESIÓN			TAMAÑO DE LA MUESTRA
	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	
Mo (1-9)	Mo (1-3)	Mo (4-6)	Mo (7-9)	9
			TOTAL	9

Nota. Elaboración propia

Tabla 42.

Tamaño de la muestra de especímenes para el concreto patrón

GRUPO DE ESTUDIO	RESISTENCIA A COMPRESIÓN			TAMAÑO DE LA MUESTRA
	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	
P (1-9)	P (1-3)	P (4-6)	P (7-9)	9
			TOTAL	9

Nota. Elaboración propia

Tabla 43.

Tamaño de la muestra de especímenes para el concreto con adiciones de caucho granulado y perlita mineral

GRUPO DE ESTUDIO	%CAUCHO GRANULADO	%PERLITA MINERAL	RESISTENCIA A COMPRESIÓN			CANTIDAD
			7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	
A (1-9)	5	0	A (1-3)	A (4-6)	A (7-9)	9
B (1-9)	5	5	B (1-3)	B (4-6)	B (7-9)	9
C (1-9)	5	10	C (1-3)	C (4-6)	C (7-9)	9
D (1-9)	5	15	D (1-3)	D (4-6)	D (7-9)	9
E (1-9)	10	0	E (1-3)	E (4-6)	E (7-9)	9
F (1-9)	10	5	F (1-3)	F (4-6)	F (7-9)	9
G (1-9)	10	10	G (1-3)	G (4-6)	G (7-9)	9
H (1-9)	10	15	H (1-3)	H (4-6)	H (7-9)	9
I (1-9)	15	0	I (1-3)	I (4-6)	I (7-9)	9
J (1-9)	15	5	J (1-3)	J (4-6)	J (7-9)	9
K (1-9)	15	10	K (1-3)	K (4-6)	K (7-9)	9
L (1-9)	15	15	L (1-3)	L (4-6)	L (7-9)	9
TOTAL						108

Nota. Elaboración propia

Luego de culminar con el muestreo en especímenes, entre los grupos de estudio de los especímenes con adición de caucho granulado y perlita mineral mostrados (A-L) en la Tabla 43, se elegirá sólo los 3 grupos de estudio con resultados más eficiente para continuar con los muestreos de las tablas posteriores.

Entre los ladrillos de arcilla mecanizados tipo IV, se decidió realizar el muestreo con los ladrillos King Kong de 18 huecos, por ser los de mayor comercialización en el mercado.

Tabla 44.

Tamaño de la muestra de unidades de albañilería para ladrillo king kong - 18 huecos (kk)

GRUPO DE ESTUDIO	VARIABILIDAD DIMENSIONAL	ALABE O	PORCENTAJE DE VACÍOS	ABSORCIÓN	SUCCIÓN	RESISTENCIA	TAMAÑO
						A COMPRESIÓN	DE MUESTRA
KK (1-10)	KK (1-10)	KK (1-10)	KK (1-10)	KK (6-10)	KK (6-10)	KK (1-5)	10
TOTAL							10

Nota. Elaboración propia

Tabla 45.

Tamaño de la muestra de unidades de albañilería para ladrillos de concreto patrón (P)

GRUPO DE ESTUDIO	%CAUCHO GRANULADO	%PERLITA MINERAL	VARIABILIDAD DIMENSIONAL	ALABEO	PORCENTAJE DE VACÍOS	ABSORCIÓN	SUCCIÓN	RESISTENCIA A COMPRESIÓN			TAMAÑO DE MUESTRA
								7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	
P (1-20)	0	0	P (1-20)	P (1-20)	P (1-20)	P (16-20)	P (16-20)	P (1-5)	P (6-10)	P (11-15)	20
TOTAL											20

Nota. Elaboración propia

Tabla 46.

Tamaño de la muestra de unidades de albañilería para ladrillos de concreto con adiciones de caucho granulado y perlita mineral

GRUPO DE ESTUDIO	%CAUCHO GRANULADO	%PERLITA MINERAL	VARIABILIDAD DIMENSIONAL	ALABEO	PORCENTAJE DE VACÍOS	ABSORCIÓN	SUCCIÓN	RESISTENCIA A COMPRESIÓN			CANTIDAD	TAMAÑO DE MUESTRA
								7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS		
A (1-20)	5	0	A (1-20)	A (1-20)	A (1-20)	A (16-20)	A (16-20)	A (1-5)	A (6-10)	A (11-15)	20	20 UNIDADES DE ALBAÑILERÍA DE 3 GRUPOS DE ESTUDIO SELECCIONADOS
B (1-20)	5	5	B (1-20)	B (1-20)	B (1-20)	B (16-20)	B (16-20)	B (1-5)	B (6-10)	B (11-15)	20	
C (1-20)	5	10	C (1-20)	C (1-20)	C (1-20)	C (16-20)	C (16-20)	C (1-5)	C (6-10)	C (11-15)	20	
D (1-20)	5	15	D (1-20)	D (1-20)	D (1-20)	D (16-20)	D (16-20)	D (1-5)	D (6-10)	D (11-15)	20	
E (1-20)	10	0	E (1-20)	E (1-20)	E (1-20)	E (16-20)	E (16-20)	E (1-5)	E (6-10)	E (11-15)	20	
F (1-20)	10	5	F (1-20)	F (1-20)	F (1-20)	F (16-20)	F (16-20)	F (1-5)	F (6-10)	F (11-15)	20	
G (1-20)	10	10	G (1-20)	G (1-20)	G (1-20)	G (16-20)	G (16-20)	G (1-5)	G (6-10)	G (11-15)	20	
H (1-20)	10	15	H (1-20)	H (1-20)	H (1-20)	H (16-20)	H (16-20)	H (1-5)	H (6-10)	H (11-15)	20	
I (1-20)	15	0	I (1-20)	I (1-20)	I (1-20)	I (16-20)	I (16-20)	I (1-5)	I (6-10)	I (11-15)	20	
J (1-20)	15	5	J (1-20)	J (1-20)	J (1-20)	J (16-20)	J (16-20)	J (1-5)	J (6-10)	J (11-15)	20	
K (1-20)	15	10	K (1-20)	K (1-20)	K (1-20)	K (16-20)	K (16-20)	K (1-5)	K (6-10)	K (11-15)	20	
L (1-20)	15	15	L (1-20)	L (1-20)	L (1-20)	L (16-20)	L (16-20)	L (1-5)	L (6-10)	L (11-15)	20	
TOTAL											240	60

Nota. Elaboración propia

Con los 3 grupos de estudio elegidos anteriormente, se procederá a realizar el muestreo de los ladrillos de concreto con adiciones de caucho granulado y perlita mineral de la Tabla 46.

Tabla 47.*Tamaño de la muestra de pilas y muretes para ladrillo king kong - 18 huecos*

GRUPO DE ESTUDIO	RESISTENCIA A COMPRESIÓN AXIAL DE PILAS	RESISTENCIA A CORTE DIAGONAL DE MURETES	TAMAÑO DE MUESTRA
KK (1-3)			3 PILAS
KK (1-3)	KK (1-3)	KK (1-3)	3 MURETES
		TOTAL	3 PILAS 3 MURETES

Nota. Elaboración propia

Tabla 48.*Tamaño de la muestra de pilas y muretes para ladrillos de concreto patrón.*

GRUPO DE ESTUDIO	%CAUCHO GRANULADO	%PERLITA MINERAL	RESISTENCIA A COMPRESIÓN AXIAL DE PILAS	RESISTENCIA A CORTE DIAGONAL DE MURETES	TAMAÑO DE MUESTRA
P (1-3)					3 PILAS
P (1-3)	0	0	P (1-3)	P (1-3)	3 MURETES
				TOTAL	3 PILAS 3 MURETES

Nota. Elaboración propia

Tabla 49.

Tamaño de la muestra de pilas y muretes para ladrillos de concreto con adiciones de caucho granulado y perlita mineral

GRUPO DE ESTUDIO	%CAUCHO GRANULADO	%PERLITA MINERAL	RESISTENCIA A	RESISTENCIA A	CANTIDAD	TAMAÑO DE MUESTRA
			COMPRESIÓN	CORTE		
			AXIAL DE PILAS	DIAGONAL DE MURETES		
A (1-3)	5	0	A (1-3)	A (1-3)	3 PILAS	3 PILAS Y 3 MURETES DE 3 GRUPOS DE ESTUDIO SELECCIONADOS
A (1-3)					3 MURETES	
B (1-3)	5	5	B (1-3)	B (1-3)	3 PILAS	
B (1-3)					3 MURETES	
C (1-3)	5	10	C (1-3)	C (1-3)	3 PILAS	
C (1-3)					3 MURETES	
D (1-3)	5	15	D (1-3)	D (1-3)	3 PILAS	
D (1-3)					3 MURETES	
E (1-3)	10	0	E (1-3)	E (1-3)	3 PILAS	
E (1-3)					3 MURETES	
F (1-3)	10	5	F (1-3)	F (1-3)	3 PILAS	
F (1-3)					3 MURETES	
G (1-3)	10	10	G (1-3)	G (1-3)	3 PILAS	
G (1-3)					3 MURETES	
H (1-3)	10	15	H (1-3)	H (1-3)	3 PILAS	
H (1-3)					3 MURETES	
I (1-3)	15	0	I (1-3)	I (1-3)	3 PILAS	
I (1-3)					3 MURETES	
J (1-3)	15	5	J (1-3)	J (1-3)	3 PILAS	
J (1-3)					3 MURETES	
K (1-3)	15	10	K (1-3)	K (1-3)	3 PILAS	
K (1-3)					3 MURETES	
L (1-3)	15	15	L (1-3)	L (1-3)	3 PILAS	
L (1-3)					3 MURETES	
TOTAL					27 PILAS 27 MURETES	9 PILAS 9 MURETES

Nota. Elaboración propia

El tercer tipo de muestra corresponde a los prismas, entre pilas y muretes como indica el Reglamento Nacional de Edificaciones en la Norma E.070.

Se continuará con el muestreo para prismas (pilas y muretes) de los grupos de estudio que se vienen analizando en la sección de unidades de albañilería.

3.1.7 Recursos Empleados

Para el desarrollo de la investigación, se emplearán diversos recursos tanto materiales como digitales. Los ensayos experimentales serán realizados en el Laboratorio “Roberto Cáceres Flores S.R.L.”, utilizando los equipos y materiales adecuados para la fabricación y evaluación de las muestras.

Asimismo, se recurrirá al software ABAQUS para la simulación numérica de las propiedades térmicas de los ladrillos, permitiendo un análisis detallado de su comportamiento.

El procesamiento, análisis y organización de los datos obtenidos se llevará a cabo mediante Microsoft Excel.

Adicionalmente, se emplearán fuentes secundarias para la obtención de datos referenciales relacionados con la huella de carbono, el reciclaje de neumáticos y los costos de producción, a fin de complementar el análisis de viabilidad del material propuesto.

3.1.8 Procedimiento de recolección

La presente investigación tiene un proceso continuo, por lo que se debe ejecutar cada una de las actividades designadas para cada una de las cinco fases y de esa manera cumplir con el objetivo principal.

Fase I. Diseño y selección de las mezclas óptimas

Actividad 1. Ensayos de materiales para concreto: Registrar las propiedades de los materiales utilizados (caucho reciclado, perlita expandida, agregados, cemento y agua) mediante pruebas de laboratorio o fuentes secundarias.

Actividad 2. Diseño de mezcla: Determinar diferentes proporciones de caucho reciclado y perlita expandida para su incorporación en el concreto.

Actividad 3. Elaboración de probetas: Fabricar especímenes cilíndricos con cada diseño de mezcla para su posterior ensayo.

Actividad 4. Evaluación y selección de diseños de mezcla: Realizar ensayos de resistencia a compresión en las probetas a los 7, 14 y 28 días, analizando los resultados para seleccionar las dosificaciones más eficientes y proceder a la fabricación de los ladrillos.

Fase II. Fabricación y evaluación físico-mecánica de los ladrillos.

Actividad 1. Elaboración de ladrillos, pilas y muretes: Fabricar los especímenes con las mezclas seleccionadas en la Fase I.

Actividad 2. Evaluación de ladrillos, pilas y muretes: Realizar los siguientes ensayos según normativas vigentes.

- Ensayo de alabeo
- Ensayo de porcentaje de vacíos
- Ensayo de absorción
- Ensayo de succión
- Ensayo de resistencia a compresión de unidad de albañilería
- Ensayo de resistencia a compresión axial de pilas
- Ensayo de resistencia a corte diagonal de muretes

Actividad 3. Comparación de resultados: Analizar las propiedades obtenidas y contrastarlas con los valores de los ladrillos de arcilla mecanizados.

Fase III. Análisis del comportamiento térmico mediante simulación.

Actividad 1. Determinación de propiedades térmicas: Calcular las propiedades térmicas del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida, incluyendo conductividad térmica, capacidad calorífica y densidad, utilizando la regla de mezclas y referencias bibliográficas.

Actividad 2. Modelado y simulación en ABAQUS: Crear el modelo del ladrillo, definir las condiciones de análisis térmico y configurar la simulación.

Actividad 3. Evaluación del comportamiento térmico: Obtener de la simulación los valores de distribución de temperatura, flujo de calor y resistencia térmica del ladrillo en distintas condiciones climáticas y ante exposición al fuego, considerando:

- Clima frío: 10°C
- Clima moderado: 25°C
- Clima caluroso: 50°C
- Exposición al fuego: 1000°C

Actividad 4. Comparación de resultados: Contrastar el desempeño térmico del ladrillo propuesto con los ladrillos de arcilla mecanizados en función de su resistencia térmica y capacidad de aislamiento.

Fase IV. Análisis económico y ambiental.

Actividad 1. Cálculo de costos de producción: Determinar los costos de materiales, mano de obra y procesos de fabricación del ladrillo propuesto.

Actividad 2. Análisis del impacto ambiental:

- Estimar las emisiones de CO₂ generadas en la extracción, procesamiento de la materia prima y fabricación del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida.
- Cuantificar la cantidad de llantas en desuso generadas anualmente en Arequipa y calcular cuántas toneladas podrían reutilizarse si un porcentaje de la producción de ladrillos en la ciudad fuera sustituido por esta alternativa.

Actividad 3. Comparación con ladrillos de arcilla mecanizados: Evaluar diferencias en costos y huella de carbono entre ambos tipos de ladrillos.

Fase V. Selección del diseño más eficiente.

Actividad 1. Selección del diseño más eficiente: Analizar los resultados obtenidos en los objetivos anteriores y determinar qué prototipo presenta el mejor equilibrio entre resistencia, aislamiento térmico, costos y reducción de impacto ambiental.

Fase VI. Aplicación del ladrillo experimental en módulo de vivienda

Actividad 1. Análisis del impacto de la aplicación del ladrillo óptimo en el desempeño del módulo de vivienda unifamiliar, mediante el chequeo de la densidad de muros, el análisis bioclimático y económico-ambiental final.

Fase Final. Evaluación de la viabilidad del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida

Actividad 1. Análisis de resultados:

- Resumen de los resultados obtenidos en los objetivos específicos.
- Comparación del mejor diseño seleccionado en el Objetivo 5 con los ladrillos de arcilla mecanizados.

Actividad 2. Contraste de hipótesis:

- Comparación entre los resultados obtenidos y lo planteado en las hipótesis.

Actividad 3. Discusión sobre la viabilidad:

- Evaluación integral del ladrillo en términos estructurales, térmicos, económicos y ambientales.
- Justificación de por qué es viable o no.
- Posibles limitaciones del estudio.

Actividad 4. Recomendaciones y aplicaciones futuras:

- Posibles mejoras en la mezcla, diseño o fabricación.
- Aplicaciones alternativas si no es viable para muros portantes.
- Propuestas para futuras investigaciones.



3.1.9 Matriz de consistencia

Tabla 50.

Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables e Indicadores	Metodología
Pregunta de investigación General	Objetivo General	Hipótesis General	Variables Independientes	Enfoque
¿Es viable, en términos físico-mecánicos, térmicos, económicos y ambientales, la fabricación de un ladrillo de concreto con caucho reciclado y perlita expandida, evaluando su conductividad térmica mediante simulación en ABAQUS en la ciudad de Arequipa?	Fabricar y evaluar la viabilidad físico-mecánica, económica y ambiental de un ladrillo de concreto con caucho reciclado y perlita expandida, con análisis de conductividad térmica mediante simulación en ABAQUS, en la ciudad de Arequipa.	Es posible fabricar un ladrillo de concreto con caucho reciclado y perlita expandida que sea viable en términos físico-mecánicos, económicos y ambientales, y que presente un mejor desempeño térmico en comparación con los ladrillos de arcilla mecanizados, de acuerdo con los resultados obtenidos mediante ensayos de laboratorio y simulaciones en ABAQUS.	- Porcentaje de Caucho granulado en la mezcla - Porcentaje de Perlita expandida en la mezcla Indicadores - Cantidad de caucho granulado en la mezcla. - Cantidad de perlita expandida en la mezcla.	Cuantitativo Tipo de Estudio Correlacional – Explicativo Diseño Experimental Nivel Cuasi – Experimentos Recursos Empleados Ensayos en el Laboratorio “Roberto Cáceres Flores S.R.L.”, simulación en ABAQUS, procesamiento de datos en Microsoft Excel, uso de fuentes secundarias para cálculo de CO ₂ , reciclaje de neumáticos y costos, desarrollo de módulo de vivienda en AutoCAD, SketchUp y Lumion.
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Variables Dependientes	
¿Qué dosificaciones de caucho reciclado y perlita expandida permiten obtener un ladrillo de concreto con propiedades adecuadas para su fabricación?	Diseñar y fabricar prototipos del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida, ensayando diferentes dosificaciones en probetas y seleccionando las más adecuadas para su fabricación.	Las diferentes dosificaciones de caucho reciclado y perlita expandida influirán en la resistencia del concreto, permitiendo seleccionar una mezcla óptima con un desempeño mecánico aceptable según los ensayos en probetas a los 7, 14 y 28 días.	- Propiedades físico-mecánicas - Propiedades térmicas - Impacto Ambiental - Costo de producción - Desempeño del módulo de vivienda	
¿Cuáles son las propiedades físico-mecánicas del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida en comparación con los ladrillos de arcilla mecanizados, según ensayos de	Determinar las propiedades físico-mecánicas del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida mediante ensayos de laboratorio basados en las Normas Técnicas Peruanas vigentes,	Los ladrillos con caucho reciclado y perlita expandida presentarán propiedades físico-mecánicas comparables a los ladrillos de arcilla mecanizados, cumpliendo con los estándares mínimos establecidos en las	Indicadores - Distribución de temperatura - Transferencia de calor - Resistencia térmica - Emisiones de CO ₂ en la producción	

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables e Indicadores	Metodología
laboratorio basados en las Normas Técnicas Peruanas vigentes?	comparándolos con ladrillos de arcilla mecanizados.	Normas Técnicas Peruanas para su uso en muros portantes.	- Cantidad de llantas en desuso reutilizadas - Costo unitario del ladrillo	
¿Cómo se comporta térmicamente el ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida en comparación con los ladrillos de arcilla mecanizados, considerando diferentes condiciones de temperatura mediante simulaciones en ABAQUS?	Analizar el comportamiento térmico del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida mediante simulaciones en ABAQUS, examinando la distribución de temperatura, la transferencia de calor y la resistencia térmica en condiciones de clima frío, moderado, caluroso e incendio, comparándolo con ladrillos de arcilla mecanizados.	El ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida tendrá un mejor desempeño térmico que los ladrillos de arcilla mecanizados, presentando una menor transferencia de calor, una distribución de temperatura más homogénea, menor flujo de calor y mayor resistencia térmica en condiciones de clima frío (10°C), moderado (25°C), caluroso (50°C) e incendio (1000°C).	Módulo de vivienda: - Peso total de ladrillos - Consumo de unidades - Costo total de vivienda - Costo por m2 de vivienda - Costo por m2 de muro - Incidencia muro portante - Costo por ladrillo colocado - Capacidad térmica total - Coeficiente global de pérdidas térmicas - Inercia térmica - CO2 evitado en fabricación - Ecoeficiencia - NFU valorizados - Costo de mitigación - Costo por capacidad térmica adicional	
¿Cuál es el costo de producción, la huella de carbono y la cantidad de llantas en desuso que pueden reutilizarse en la fabricación del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida, en comparación con los ladrillos de arcilla mecanizados?	Calcular costos de producción, emisiones de CO ₂ y la cantidad de llantas en desuso que podrían reutilizarse en la fabricación del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida, considerando su implementación en un porcentaje de la producción anual de ladrillos en Arequipa, y comparándolo con los ladrillos de arcilla mecanizados	El ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida tendrá un costo de producción competitivo y una menor huella de carbono en comparación con los ladrillos de arcilla mecanizados, permitiendo la reutilización de llantas en desuso y contribuyendo a la reducción de desechos sólidos en Arequipa.		
¿Cuál es el diseño óptimo del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida considerando su desempeño físico-mecánico, térmico, económico y ambiental?	Seleccionar el diseño óptimo del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida, considerando su desempeño en términos de comportamiento físico-mecánico, térmico, económico y ambiental.	Existe un diseño óptimo del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida que presenta un mejor desempeño en términos físico-mecánico, térmico, económico y ambiental.		

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables e Indicadores	Metodología
¿La aplicación del ladrillo óptimo en el módulo de vivienda cumplirá satisfactoriamente con los requisitos estructurales ofreciendo un desempeño bioclimático justificado, presentando una viabilidad económico-ambiental al ser costo-efectivo a largo plazo y contribuyendo a la gestión de residuos?	Analizar el impacto de la aplicación del ladrillo óptimo en el desempeño del módulo de vivienda unifamiliar, mediante la evaluación integral de su comportamiento estructural, térmico, económico, ambiental y bioclimático en el contexto de Arequipa.	La aplicación del ladrillo óptimo en el módulo de vivienda unifamiliar es viable como un sistema constructivo integral, debido a que cumple satisfactoriamente con los requisitos estructurales (demostrado por el chequeo de densidad de muros), ofrece un desempeño bioclimático justificado, y presenta una viabilidad económico-ambiental al ser costo-efectivo a largo plazo y contribuir a la gestión de residuos.		

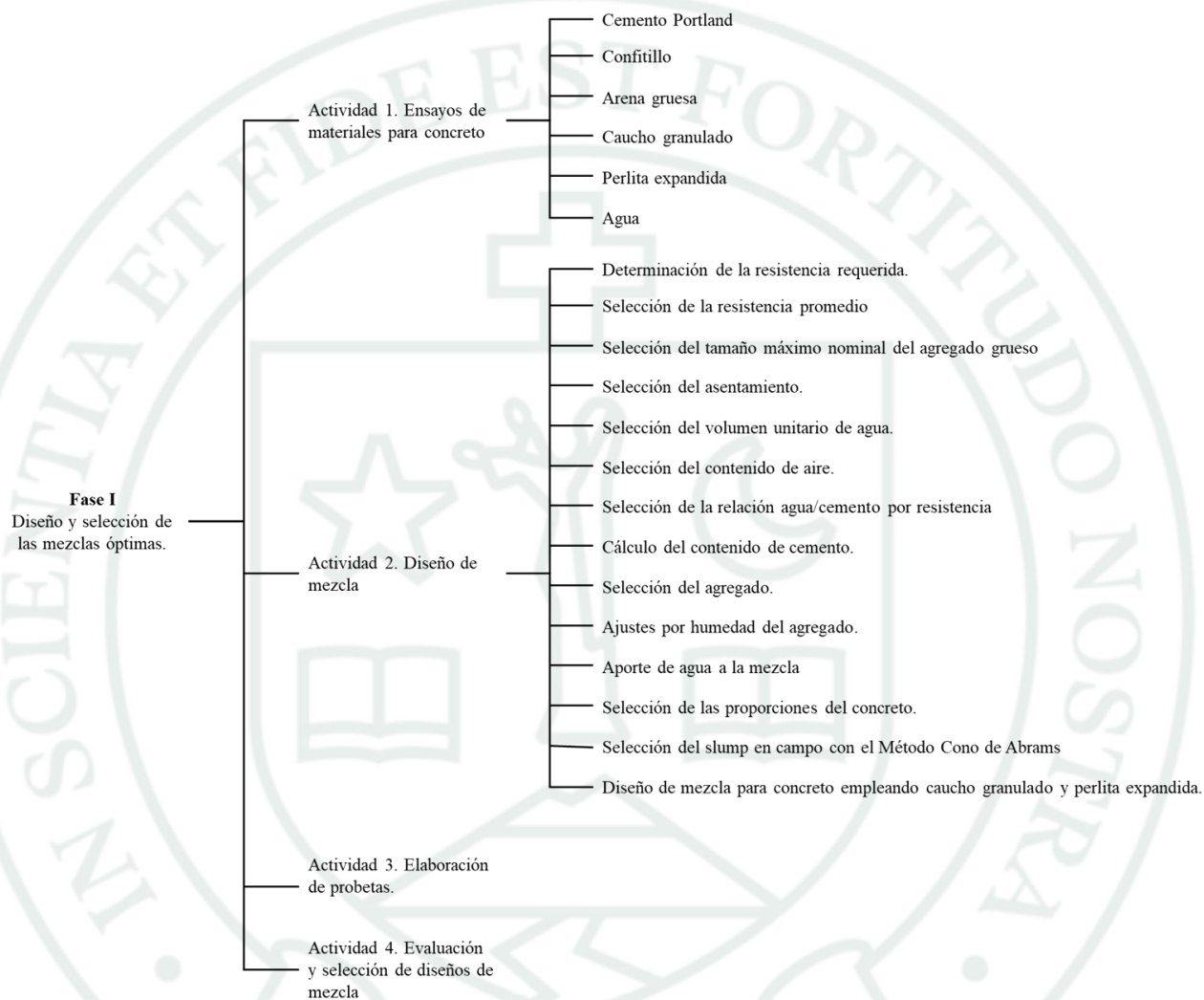
Nota. Elaboración propia

CAPÍTULO IV: Marco Operativo

4.1 Fase I. Diseño y selección de las mezclas óptimas.

Figura 20.

Mapa de Fase I



Nota. Elaboración propia

4.1.1 Actividad 1. Ensayos de materiales para concreto

Registrar las propiedades de los materiales utilizados (caucho reciclado, perlita expandida, agregados, cemento y agua) mediante pruebas de laboratorio o fuentes secundarias.

Antes de elaborar el diseño de mezcla, se necesita conocer las propiedades de cada uno de los materiales que se emplearán para una óptima dosificación.

Figura 21.

Arena gruesa y confitillo



Nota. Elaboración propia

Figura 22.

Caucho granulado y perlita mineral



Nota. Elaboración propia

4.1.1.1 Cemento Portland.

En la presente tesis se empleará Cemento Portland Yura Tipo IP Multi – Propósito, por ser el más comercial en el mercado de Arequipa. Éste contiene puzolona de origen volcánico, la cual reacciona con el hidróxido de calcio, lo que provoca mayor producción de silicatos de calcio brindando mayor resistencia que otros tipos de cementos. (Cemento Yura, 2019)

A continuación, se adjunta sus características químicas y físicas.

Figura 23.

Cemento portland Yura tipo multi – propósito



Nota. Adaptado de Cementos Yura (s.f.)

Tabla 51.*Características químicas y físicas de cemento portland tipo IP*

Requerimientos		Cemento Portland Tipo IP	Yura	Norma Técnica NTP 334.090
Químicos	Óxido de Magnesio, MgO (%)	1.5 a 2.4		6.00 Máximo
	Trióxido de Azufre, SO ₃ (%)	1.5 a 2.3		4.00 Máximo
	Pérdida por Ignición o al Fuego, PF %	1.5 a 3.8		5.00 Máximo
	Peso específico (gr/cm ³)	2.77 a 2.85		No Especifica
	Expansión en Autoclave, %	0.03		0.8 Máximo
Físicos	Tiempo de Fraguado, (inicial)	170		45 Mínimo
	Ensayo Vitcat (minutos)	270		420 Máximo
	Contenido de Aire del mortero, %	2.5 a 8.0		12.00 Máximo
	Resistencia a la compresión Kg/cm ²	7.8 a 10.2		No Especifica
	01 día	17.1 a 19.6		13
	03 días	22.0 a 25.4		20
	28 días	30.0 a 34.3		25

Nota. Adaptado de Cemento Yura (2019)

4.1.1.2 Confitillo.

Como agregado grueso se emplea confitillo proveniente de la cantera de La Poderosa. Se realizaron los respectivos ensayos señalados en el marco normativo y se adjuntaron sus resultados de forma detallada en el Anexo 3. A continuación se muestra el resumen de estos.

Tabla 52.*Características del confitillo*

Confitillo	Unidad	Resultado
Módulo de fineza	-	6.05
Contenido de humedad	%	0.1
Absorción	%	0.91
Densidad relativa (OD)	g/cm ³	2.69
Densidad relativa saturada con superficie seca (SSD)	g/cm ³	2.72
Densidad relativa aparente	g/cm ³	2.76
Peso unitario suelto	g/cm ³	1.516
Peso unitario compactado	g/cm ³	1.627

Nota. Elaboración propia

Figura 24.

Confitillo



Nota. Elaboración propia

4.1.1.3 Arena gruesa.

Como agregado fino se emplea arena gruesa proveniente de la cantera de Socabaya. Se realizaron los respectivos ensayos señalados en el marco normativo y se adjuntaron sus resultados de forma detallada en el Anexo 2. A continuación se muestra el resumen de los mismos.

Tabla 53.

Características de la arena gruesa

Arena gruesa	Unidad	Resultado
Módulo de fineza	-	2.51
Contenido de humedad	%	1.48
Absorción	%	1.17
Densidad relativa (OD)	g/cm ³	2.53
Densidad relativa saturada con superficie seca (SSD)	g/cm ³	2.56
Densidad relativa aparente	g/cm ³	2.61
Peso unitario suelto	g/cm ³	1.467
Peso unitario compactado	g/cm ³	1.611

Nota. Elaboración propia

Figura 25.

Arena gruesa



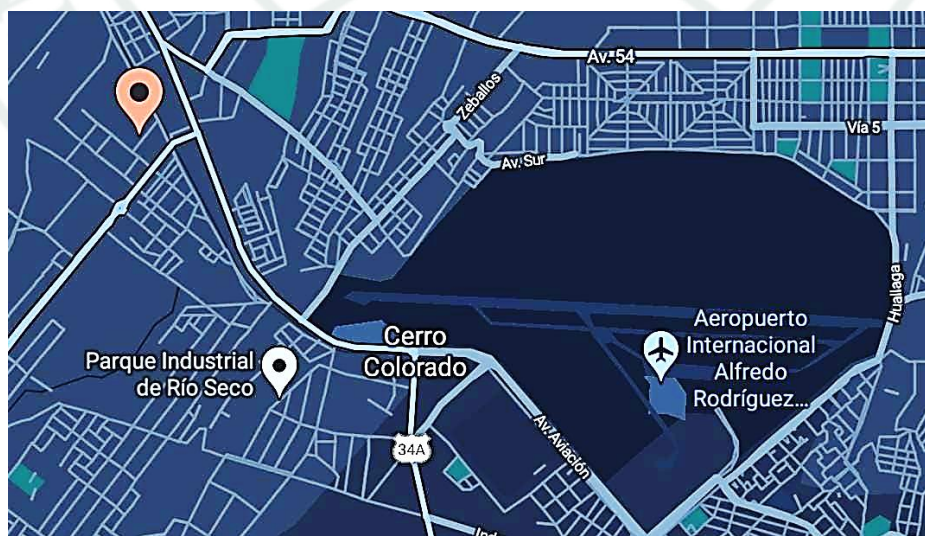
Nota. Elaboración propia

4.1.1.4 Caucho granulado.

Una vez recolectadas las llantas fuera de uso, se procede a llevarlas para su trituración y obtención del caucho en Caucho Grass EIRL ubicado en el distrito de Cerro Colorado, Arequipa.

Figura 26.

Ubicación de la trituradora caucho grass EIRL



Nota. Extraído de Google Maps

Figura 27.

Empresa trituradora caucho grass EIRL



Nota. Elaboración propia

Figura 28.

Empresa trituradora caucho grass EIRL



Nota. Elaboración propia

Se realizaron los respectivos ensayos señalados en el marco normativo al caucho granulado proveniente de llantas en desuso, los cuales se encuentran detallados en el Anexo 4. A continuación se muestra el resumen de los mismos.

Tabla 54.

Características del caucho granulado

Caucho granulado	Unidad	Resultado
Módulo de fineza	-	4.44
Contenido de humedad	%	0.618
Absorción	%	2.567
Densidad relativa (OD)	g/cm ³	1.096
Densidad relativa saturada con superficie seca (SSD)	g/cm ³	1.124
Densidad relativa aparente	g/cm ³	1.127
Peso unitario suelto	g/cm ³	514.201
Peso unitario compactado	g/cm ³	589.947

Nota. Elaboración propia

Figura 29.

Caucho granulado



Nota. Elaboración propia

4.1.1.5 Perlita expandida.

La perlita expandida se obtuvo del vivero Vierdes. Se realizaron los respectivos ensayos señalados en el marco normativo a la perlita mineral en estado expandido, los cuales se encuentran detallados en el Anexo 5. A continuación se muestra el resumen de los mismos.

Tabla 55.

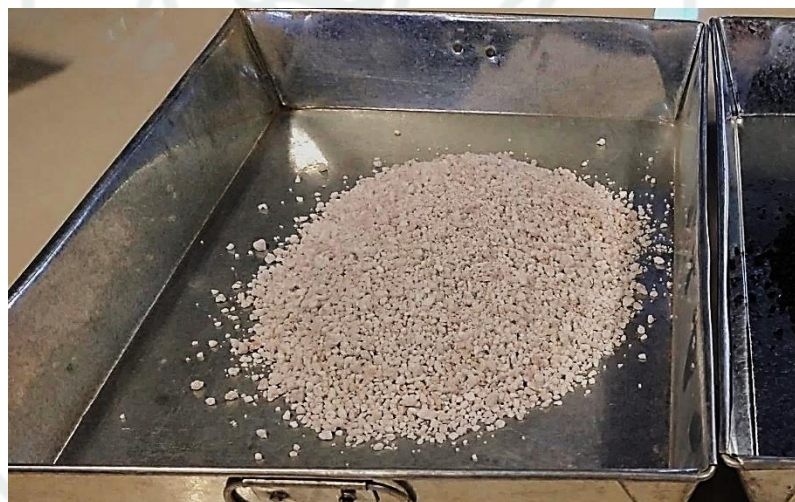
Características de la perlita expandida

Perlita expandida	Unidad	Resultado
Módulo de fineza	-	4.09
Contenido de humedad	%	0.943
Absorción	%	154.563
Densidad relativa (OD)	g/cm ³	0.221
Densidad relativa saturada con superficie seca (SSD)	g/cm ³	0.562
Densidad relativa aparente	g/cm ³	0.336
Peso unitario suelto seco	g/cm ³	93.226
Peso unitario compactado	g/cm ³	104.515

Nota. Elaboración propia

Figura 30.

Perlita expandida



Nota. Elaboración propia

4.1.1.6 Agua.

El agua empleada es potable y libre de impurezas, para garantizar que el concreto sea de buena calidad. De presentar ciertas impurezas existe la posibilidad que provoque efectos negativos sobre el concreto.

Tabla 56.

Efectos negativos sobre el concreto, si se superan los valores límites permisibles de sustancias en el agua

Impureza	Fraguado	Endurecimiento	Eflorescencia	Corrosión	Adherencia	Expansión	Aire incluido	Hidratación
PH	X	X	-	-	-	-	-	-
Sustancias solubles	X	X	X	X	X	-	-	-
Sulfatos	X	X	X	X	X	X	-	-
Cloruros	X	X	X	X	X	-	-	-
Hidratos de carbono	X	X	X	X	X	-	-	-
Sustancias orgánicas solubles en éter	X	X	-	-	-	-	X	X
(X): Causa efecto negativo (-): No causa efecto negativo								

Nota. Adaptado de Niño Hernández (2010)

A continuación, se muestra la tabla resumen de las propiedades de los materiales para el concreto.

Tabla 57.*Propiedades de los materiales para concreto*

Propiedades	Unidad	Agua potable	Cemento Yura IP	Agregado grueso	Agregado fino	Caucho granulado	Perlita expandida
Modulo de fineza	-	-	-	6.05	2.51	4.44	4.09
Contenido de humedad	%	-	-	0.1	1.48	0.618	0.943
Absorción	%	-	-	0.91	1.17	2.567	154.563
Densidad relativa (OD)	g/cm3	1000	2.8	2.69	2.53	1.096	0.221
Densidad relativa saturada con superficie seca (SSD)	g/cm3	-	-	2.72	2.56	1.124	0.562
Densidad relativa aparente	g/cm3	-	-	2.76	2.61	1.127	0.336
Peso unitario suelto seco	g/cm3	-	-	1.516	1.467	0.514	0.093
Peso unitario seco compactado	g/cm3	-	-	1.627	1.611	0.590	0.105

Nota. Elaboración propia

4.1.2 Actividad 2. Diseño de mezcla

Realizar el cálculo de diseño de dosificación para las diferentes muestras de concreto patrón y con adiciones de caucho reciclado y perlita mineral.

Para elaborar el diseño de mezcla del concreto patrón se seguirán los siguientes pasos indicados por Rivva (2014).

- Determinación de la resistencia requerida.
- Selección de la resistencia promedio.
- Selección del tamaño máximo nominal del agregado grueso
- Selección del asentamiento.
- Selección del volumen unitario de agua.
- Selección del contenido de aire.
- Selección de la relación agua/cemento por resistencia.
- Cálculo del contenido de cemento.

- Selección del agregado.
- Ajustes por humedad del agregado.
- Selección de las proporciones del concreto.

Una vez concluidos los pasos anteriores, se procederá a reemplazar el agregado fino (en volumen) por porcentajes de caucho granulado y perlita mineral, para los distintos diseños propuestos.

4.1.2.1 Determinación de la resistencia requerida.

La resistencia requerida es aquella que está especificada por el profesional responsable en los planos de la obra. En este caso, analizaremos las resistencias requeridas en otras investigaciones ya mencionadas con anterioridad y de similares características.

Goñas & Saavedra (2020) empleó una resistencia requerida de 80 kg/cm^2 y alcanzó 58.7 kg/cm^2 para las muestras de concreto con 5% de caucho reciclado; 32.4 kg/cm^2 para 10%; 19.5 kg/cm^2 para 15%; y 105.5 kg/cm^2 para el concreto patrón. Por otro lado, Cabanillas (2017) aplicó una resistencia requerida de 210 kg/cm^2 , obteniendo como resultado 209.39 kg/cm^2 , 191.65 kg/cm^2 , 129.52 kg/cm^2 , 112.79 kg/cm^2 para prototipos de concreto con adición de caucho reciclado reemplazando el agregado fino en 0%, 10%, 15% y 20% respectivamente. Mientras que Pérez & Arrieta (2017), emplearon 250 kg/cm^2 de resistencia requerida y en sus muestras de concreto con adición de caucho reciclado grueso y fino al 0%; 1.5% y 3.5%; 2.5% y 2.5%; 3.5% y 1.5% obtuvieron como resultado 259.29 kg/cm^2 , 157.77 kg/cm^2 , 140.26 kg/cm^2 y 135.90 kg/cm^2 respectivamente. Por último, Guzmán & Guzmán (2015) consiguieron las resistencias a compresión de 262.4 kg/cm^2 , 191.9 kg/cm^2 y 157.9 kg/cm^2 al reemplazar 5%, 15% y 25% del agregado fino por caucho reciclado, con una resistencia requerida de 210 kg/cm^2 .

Después de lo presentado, concluimos que la resistencia requerida a emplear en la presente tesis será de 210 kg/cm^2 , debido a que la resistencia a compresión disminuirá

conforme se incremente el porcentaje que reemplace el agregado fino por caucho reciclado, es por ello que de emplearse una resistencia menor a esa, no se alcanzaría a una clasificación de ladrillo tipo IV ó V, que es lo que se pretende con esta investigación.

4.1.2.2 Selección de la resistencia promedio.

Según Rivva (2014), la resistencia promedio se calculará en relación a la desviación estándar de ensayos practicados anteriormente por la empresa encargada de la producción de concreto. En el caso de esta investigación, que la elaboración del concreto será propia, existe una tabla con los datos necesarios para cuando no se cuenta con ensayos previos que evidencien la desviación estándar que se menciona.

Tabla 58.

Resistencia requerida de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar

Resistencia a la compresión requerida	Resistencia a la compresión promedio
f_c	f_{cr}
menos de 210	$f_c + 70$
210 a 350	$f_c + 84$
sobre 350	$f_c + 98$

Nota. Adaptado de American Concrete Institute

Para la resistencia a la compresión requerida con la que se trabajará, se determina la resistencia a la compresión promedio a través de lo presentado a continuación.

Tabla 59.

Resistencia a la compresión requerida y resistencia a la compresión promedio del diseño patrón

Resistencia a la compresión requerida	Resistencia a la compresión promedio
$f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$	$f_{cr} = 210 \text{ kg/cm}^2 + 84 \text{ kg/cm}^2$
	$f_{cr} = 294 \text{ kg/cm}^2$

Nota. Elaboración propia

4.1.2.3 Selección del tamaño máximo nominal del agregado grueso

Rivva (2014) indica que no deben quedar cangrejeras en las esquinas ni ángulos del espécimen de concreto, por lo que el tamaño debe ser tal que el concreto se coloque sin dificultad. Al emplearse éste en ladrillos y tener espacios reducidos debido a sus perforaciones, se optará por emplear grava del menor tamaño posible, es decir de 3/8”.

4.1.2.4 Selección del asentamiento.

Para la selección del asentamiento, es necesario tener en cuenta el volumen a vaciar y la cantidad de acero que se empleará, ya que el concreto deberá llegar a todos los espacios por más recónditos que sean estos. Para ello, el concreto deberá tener la trabajabilidad necesaria para que no existan cangrejeras.

Tabla 60.

Asentamiento según consistencia de mezcla

Consistencia	Asentamiento
Mezcla seca	0” a 2” ; 0 mm a 50 mm
Mezcla plástica	3” a 4” ; 75 mm a 100 mm
Mezcla fluida	Entre 5” o más ; >125 mm

Nota. Adaptado de Rivva (2014)

En el caso de esta investigación se realizará el ensayo de cono de Abrams para evaluar la consistencia óptima para la elaboración de ladrillos, teniendo en cuenta la morfología de estos. Por tal motivo, se preselecciona dos distintas consistencias: plástica y fluida.

4.1.2.5 Selección del volumen unitario de agua.

La cantidad de agua que se seleccione, le dará la fluidez al concreto. Se debe seleccionar el volumen dependiendo del asentamiento y el tamaño máximo nominal del agregado grueso. Esta cantidad será posteriormente corregida por el porcentaje de absorción y contenido de humedad del agregado ya que deberá hidratarlo. (Rivva, 2014)

Tabla 61.*Volumen unitario de agua*

Asentamiento	Agua en l/m ³ para los tamaños máx. nominales de agregado grueso y consistencia indicados							
	3/8"	1/2 "	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
Concreto sin aire incorporado								
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	--
Concreto con aire incorporado								
1" a 2"	181	175	168	160	150	142	122	107
3" a 4"	202	193	184	175	165	157	133	119
6" a 7"	2016	205	197	184	174	166	154	--

Nota. Adaptado de American Concrete Institute 211 (2009)

El volumen de agua seleccionado para el asentamiento de 3" a 4" es de 228 l/m³, mientras que para el asentamiento de 6" a 7" es de 243 l/m³, ambos con tamaño máximo nominal del agregado grueso de 3/8".

4.1.2.6 Selección del contenido de aire.

El porcentaje de aire atrapado se selecciona dependiendo del tamaño máximo nominal de la grava.

Tabla 62.*Contenido aproximado del aire en el concreto*

Contenido de Aire Atrapado	
Tamaño máximo nominal	Aire atrapado
3/8"	3.0%
1/2"	2.5%
3/4"	2.0%
1"	1.5%
1 1/2"	1.0%
2"	0.5%
3"	0.3%
6"	0.2%

Nota. Adaptado de American Concrete Institute 211 (2009)

Para el TMN de 3/8", le corresponde 3% de aire atrapado.

4.1.2.7 Selección de la relación agua/cemento por resistencia.

Una adecuada relación agua/cemento puede influir en la calidad de la pasta para obtener óptimas propiedades del concreto endurecido. Ahora, seleccionaremos esta relación dependiendo de la resistencia y si el concreto se le incorporará aire o no.

Tabla 63.

Relación agua/cemento por resistencia

F'cr (kg/cm ²)	Relación agua – cemento diseño en peso	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
150	0.8	0.71
200	0.7	0.61
250	0.62	0.53
300	0.55	0.46
350	0.48	0.4
400	0.43	--
450	0.38	--

Nota. Adaptado de American Concrete Institute 211 (2009)

Al no encontrarse la resistencia a compresión promedio ($F'_{cr} = 294 \text{ kg/cm}^2$) en la tabla, se debe calcular la relación agua/cemento mediante interpolación.

$$\begin{array}{rcl} F'_{cr} & & A/C \\ 250 \text{ kg/cm}^2 & \text{-----} & 0.62 \\ 294 \text{ kg/cm}^2 & \text{-----} & x \\ 300 \text{ kg/cm}^2 & \text{-----} & 0.55 \\ \hline \frac{300 \text{ kg/cm}^2 - 294 \text{ kg/cm}^2}{0.55 - x} & = & \frac{300 \text{ kg/cm}^2 - 250 \text{ kg/cm}^2}{0.55 - 0.62} \\ & & x = 0.558 \end{array}$$

4.1.2.8 Cálculo del contenido de cemento.

Teniendo la relación agua/cemento y el volumen de agua definidos, calcular el volumen del cemento es sencillo.

$$\frac{A}{C} = 0.574$$

Donde:

A: cantidad de agua en un m³

C: contenido de cemento en un m³

Tabla 64.

Contenido de cemento

	Unidad	Slump 3" a 4"	Slump 6" a 7"
A/C	-	0.574	0.574
Agua	l/m ³	228.000	243.000
Cemento	kg	397.193	423.324

Nota. Elaboración propia

4.1.2.9 Selección del agregado.

Primero debemos hallar el peso del agregado grueso, para ello, se debe ubicar la intersección (b/bo) del módulo de fineza y el tamaño máximo nominal en la tabla.

Tabla 65.

Peso del agregado grueso por unidad de volumen del concreto

Tamaño Máximo Nominal del Agregado Grueso	Volumen de agregado grueso, seco, y compactado, por unidad de volumen del concreto, para diversos módulos de finura del fino (b/bo)			
	2.4	2.6	2.8	3
3/8"	0.5	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.6
1"	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	0.75	0.73	0.71	0.69
2"	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	0.82	0.8	0.78	0.76
6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Nota. Adaptado de Comité 211, ACI (2009)

En este caso, el valor del módulo de fineza del agregado grueso es 2.51 y el TMN es 3/8". Al no encontrarse esos valores en la tabla, se debe interpolar para calcular el coeficiente b/bo.

$$\begin{array}{rcl} 2.51 & \text{-----} & x \\ 2.40 & \text{-----} & 0.50 \\ 2.60 & \text{-----} & 0.48 \\ \frac{2.60 - 2.51}{0.48 - x} & = & \frac{2.60 - 2.40}{0.48 - 0.50} \\ x & = & 0.489 \end{array}$$

Conociendo el coeficiente b/bo, podemos hallar el peso del agregado grueso, multiplicándolo por el peso unitario compactado del agregado grueso.

$$P_{a.g.} = b/bo \times PUC_{a.g.}$$

$$P_{a.g.} = 0.489 \, m^3 \times 1627 \, kg/m^3$$

$$P_{a.g.} = 795.603 \, kg$$

Segundo, debemos hallar el volumen absoluto del aire, agua, cemento y agregado grueso. Para ello se debe multiplicar el peso calculado anteriormente de cada uno por su peso específico.

Tabla 66.

Volumen absoluto para slump de 3" a 4"

	Peso calculado (kg)	Peso específico (kg/m ³)	Volumen absoluto (peso calculado / peso específico) (m ³)
Aire	3	100	0.030
Agua	228	1000	0.228
Cemento	397.193	2800	0.142
Agregado grueso	795.603	2690	0.296
Σ Volumen absoluto			0.696

Nota. Elaboración propia

Tabla 67.

Volumen absoluto para slump de 6" a 7"

	Peso calculado (kg)	Peso específico (kg/m ³)	Volumen absoluto (peso calculado / peso específico) (m ³)
Aire	3	100	0.030
Agua	243	1000	0.243
Cemento	423.324	2800	0.151
Agregado grueso	795.603	2690	0.296
Σ Volumen absoluto			0.720

Nota. Elaboración propia

El volumen absoluto para el agregado fino se calcula con la diferencia entre un metro cúbico y la sumatoria del volumen absoluto ahora conocido.

Volumen absoluto para agregado fino con slump de 3" a 4":

$$V_{a.f.} = 1m^3 - 0.696 m^3$$

$$V_{a.f.} = 0.304 m^3$$

Volumen absoluto para agregado fino con slump de 6" a 7":

$$V_{a.f.} = 1m^3 - 0.720 m^3$$

$$V_{a.f.} = 0.280 m^3$$

El peso del agregado fino se halla multiplicando su volumen absoluto por su peso específico.

Peso del agregado fino con slump de 3" a 4":

$$P_{a.f.} = 0.304 m^3 \times 2530 kg/m^3$$

$$P_{a.f.} = 770.087 kg$$

Peso del agregado fino con slump de 6" a 7":

$$P_{a.f.} = 0.280 m^3 \times 2530 kg/m^3$$

$$P_{a.f.} = 708.526 kg$$

Tabla 68.

Diseño de mezcla $f'c$ 210 kg/cm² en estado seco

	Slump 3" a 4"		Slump 6" a 7"	
	Volumen absoluto (kg)	Peso (kg)	Volumen absoluto (kg)	Peso (kg)
Agua	0.228	228.000	0.243	243.000
Cemento	0.142	397.193	0.151	423.324
Agregado grueso	0.296	795.603	0.296	795.603
Agregado fino	0.304	770.087	0.280	708.526

Nota. Elaboración propia

4.1.2.10 Ajustes por humedad del agregado.

Se debe hacer una corrección al peso de los agregados, debido a la humedad que contienen estos. Para ello, se debe aplicar lo siguiente.

$$\text{Peso húmedo} = \text{Peso seco} \times \left(\frac{\text{humedad}\%}{100} + 1 \right)$$

Para slump de 3" a 4", el agregado grueso será:

$$\text{Peso húmedo}_{a.g.} = 795.603 \text{ kg} \times \left(\frac{0.10}{100} + 1 \right)$$

$$\text{Peso húmedo}_{a.g.} = 796.399 \text{ kg}$$

Para slump de 3" a 4", el agregado fino será:

$$\text{Peso húmedo}_{a.f.} = 770.087 \text{ kg} \times \left(\frac{1.48}{100} + 1 \right)$$

$$\text{Peso húmedo}_{a.f.} = 781.484 \text{ kg}$$

Para slump de 6" a 7", el agregado grueso será:

$$\text{Peso húmedo}_{a.g.} = 795.603 \text{ kg} \times \left(\frac{0.10}{100} + 1 \right)$$

$$\text{Peso húmedo}_{a.g.} = 796.399 \text{ kg}$$

Para slump de 6" a 7", el agregado fino será:

$$\text{Peso húmedo}_{a.f.} = 708.526 \text{ kg} \times \left(\frac{1.48}{100} + 1 \right)$$

$$\text{Peso húmedo}_{a.f.} = 719.012 \text{ kg}$$

Tabla 69.

Peso húmedo de los agregados

	Slump 3" a 4"		Slump 6" a 7"	
	Peso seco (kg)	Peso húmedo (peso seco x (humedad%/100 + 1))(kg)	Peso seco (kg)	Peso húmedo (peso seco x (humedad%/100 + 1))(kg)
Agregado grueso	795.603	796.399	795.603	796.399
Agregado fino	770.087	781.484	708.526	719.012

Nota. Elaboración propia

4.1.2.11 Aporte de agua a la mezcla

Se calcula la cantidad de agua que aportan los agregados a la mezcla mediante lo siguiente.

$$V_{agua} = \frac{(\%humedad - \%absorción) \times Peso\ seco}{100}$$

Para slump de 3" a 4", el aporte de agua del agregado grueso será:

$$V_{agua} = \frac{(0.10 - 0.91) \times 795.603}{100}$$

$$V_{agua} = -6.444 \text{ litros}$$

Para slump de 3" a 4", el aporte de agua del agregado fino será:

$$V_{agua} = \frac{(1.48 - 1.17) \times 770.087}{100}$$

$$V_{agua} = 2.387 \text{ litros}$$

Para slump de 6" a 7", el aporte de agua del agregado grueso será:

$$V_{agua} = \frac{(0.10 - 0.91) \times 795.603}{100}$$

$$V_{agua} = -6.444 \text{ litros}$$

Para slump de 6" a 7", el aporte de agua del agregado fino será:

$$V_{agua} = \frac{(1.48 - 1.17) \times 708.526}{100}$$

$$V_{agua} = 2.196 \text{ litros}$$

Finalmente se debe calcular la cantidad de agua efectiva mediante la diferencia entre la cantidad de agua calculada inicialmente y el aporte de agua recientemente calculado de los agregados.

Para slump de 3" a 4", el agua efectiva será:

$$V_{agua} = 228 - (-6.44 + 2.387)$$

$$V_{agua} = 232.057 \text{ litros}$$

Para slump de 6" a 7", el agua efectiva será:

$$V_{agua} = 243 - (-6.444 + 2.196)$$

$$V_{agua} = 247.248 \text{ litros}$$

Tabla 70.

Ajuste de agua a la mezcla

	Aporte de agua para Slump 3" a 4"	Aporte de agua para Slump 6" a 7"
Agregado grueso	-6.444	-6.444
Agregado fino	2.387	2.196
Σ Aporte de agua	-4.057	-4.248
Agua efectiva	232.057	247.248

Nota. Elaboración propia

4.1.2.12 Selección de las proporciones del concreto.

A continuación, se muestra el resumen de las cantidades de cada material para la elaboración de un metro cúbico de concreto de F'c 210 kg/cm² con slump de 3" a 4" y de 6" a 7".

Tabla 71.*Diseño de mezcla de concreto patrón $f'c$ 210 kg/cm²*

	Slump 3" a 4"		Slump 6" a 7"	
	Volumen (m3)	Peso (kg)	Volumen (m3)	Peso (kg)
Agua/cemento de diseño	0.574		0.574	
Agua/cemento efectiva	0.584		0.584	
Agua efectiva	0.105	232.057	0.113	247.248
Cemento	0.180	397.193	0.194	423.324
Agregado grueso húmedo	0.361	796.399	0.364	796.399
Agregado fino húmedo	0.354	781.484	0.329	719.012
Dosificación	1 : 2.01 : 1.97		1 : 1.88 : 1.70	

Nota. Elaboración propia

4.1.2.13 Selección del slump en campo con el Método Cono de Abrams.

Debido a las condiciones ambientales durante la elaboración del concreto se alcanzó un slump de 1" con la dosificación para un concreto de slump de 3" a 4"; mientras que con la dosificación que proyectaba el slump de 6" a 7", se logró alcanzar 4". Por tal motivo, se determinó que la dosificación más idónea era aquella que presentaba un asentamiento de 4" (dosificación para slump 6" a 7"), debido a su mayor trabajabilidad durante el vaciado, en relación a la que alcanzó 1". Con un slump de 4" es posible una compactación del concreto mediante la consolidación manual con una varilla lisa de acero.

Figura 31.*Slump de 1" del concreto $f'c$ 210 kg/cm²*

Nota. Elaboración propia

Figura 32.

Slump de 4" del concreto $f'c$ 210 kg/cm²



Nota. Elaboración propia

4.1.2.14 Diseño de mezcla para concreto empleando caucho granulado y perlita expandida.

Luego de seleccionar la dosificación para concreto patrón, se procede a reemplazar el volumen de la arena gruesa por caucho granulado y perlita expandida con los porcentajes seleccionados para cada diseño propuesto en la presente tesis.

Para ello, el porcentaje de incidencia tanto para caucho como para perlita será aplicado al volumen absoluto de los agregados del diseño patrón.

Por lo que se verá afectadas las proporciones para agua, cemento, confitillo y arena gruesa de la dosificación del diseño Patrón, sin afectar el 3% de aire atrapado en el concreto, que corresponde para el tamaño máximo nominal de la grava.

Tabla 72.

Volúmenes absolutos de materiales del diseño patrón

		Aire	Agua	Cemento	Confitillo	Arena Gruesa	Caucho	Perlita
Diseño Patrón	Incidencia en mezcla	3%			97%		0%	0%
	Volumen absoluto	0.03	0.243	0.151	0.296	0.280	0.000	0.000

Nota. Elaboración propia

Entonces para calcular la dosificación del Diseño A, primero debemos calcular el nuevo volumen absoluto para cada agregado, sabiendo que este diseño reemplaza 5% de caucho granulado y 0% de perlita expandida en el total del volumen absoluto.

Por lo que, el agua, cemento, confitillo y arena gruesa, representaría ahora menor porcentaje.

$$\text{Agua} + \text{cemento} + \text{confitillo} + \text{arena} = 100\% - \% \text{Aire} - \% \text{Caucho} - \% \text{Perlita}$$

$$\text{Agua} + \text{cemento} + \text{confitillo} + \text{arena} = 100 - 3 - 5 - 0$$

$$\text{Agua} + \text{cemento} + \text{confitillo} + \text{arena} = 92\%$$

El volumen absoluto para cada material se calcula con una regla de tres simple, sabiendo que en 97% hay 0.243 m³ de agua, 0.151 m³ de cemento, 0.296 m³ de confitillo y 0.280 m³ de arena gruesa como lo indica el diseño patrón. Ahora se multiplica el nuevo porcentaje representativo con el volumen, ya sea de agua, cemento, confitillo o arena gruesa representa en el diseño patrón y se divide entre 97%.

Volumen absoluto para agua.

$$V_{\text{agua}} = 92\% \times 0.243 \text{ m}^3 / 97\%$$

$$V_{\text{agua}} = 0.230 \text{ m}^3$$

Volumen absoluto para cemento.

$$V_{\text{cemento}} = 92\% \times 0.151 \text{ m}^3 / 97\%$$

$$V_{\text{cemento}} = 0.143 \text{ m}^3$$

Volumen absoluto para confitillo.

$$V_{\text{confitillo}} = 92\% \times 0.296 \text{ m}^3 / 97\%$$

$$V_{\text{confitillo}} = 0.281 \text{ m}^3$$

Volumen absoluto para arena gruesa.

$$V_{\text{arena}} = 92\% \times 0.280 \text{ m}^3 / 97\%$$

$$V_{\text{arena}} = 0.266 \text{ m}^3$$

De igual forma se realiza el procedimiento para calcular el volumen absoluto para el diseño B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, y L.

Tabla 73.

Volúmenes absolutos de materiales del diseño A al K

		Aire	Agua	Cemento	Confitillo	Arena Gruesa	Caucho	Perlita
Diseño A	Incidencia en mezcla	3%			92%		5%	0%
	Volumen absoluto	0.03	0.230	0.143	0.281	0.266	0.050	0.000
Diseño B	Incidencia en mezcla	3%			87%		5%	5%
	Volumen absoluto	0.03	0.218	0.136	0.265	0.251	0.050	0.050
Diseño C	Incidencia en mezcla	3%			82%		5%	10%
	Volumen absoluto	0.03	0.205	0.128	0.250	0.237	0.050	0.100
Diseño D	Incidencia en mezcla	3%			77%		5%	15%
	Volumen absoluto	0.03	0.193	0.120	0.235	0.222	0.050	0.150
Diseño E	Incidencia en mezcla	3%			87%		10%	0%
	Volumen absoluto	0.03	0.218	0.136	0.265	0.251	0.100	0.000
Diseño F	Incidencia en mezcla	3%			82%		10%	5%
	Volumen absoluto	0.03	0.205	0.128	0.250	0.237	0.100	0.050
Diseño G	Incidencia en mezcla	3%			77%		10%	10%
	Volumen absoluto	0.03	0.193	0.120	0.235	0.222	0.100	0.100
Diseño H	Incidencia en mezcla	3%			72%		10%	15%
	Volumen absoluto	0.03	0.180	0.112	0.220	0.208	0.100	0.150
Diseño I	Incidencia en mezcla	3%			82%		15%	0%
	Volumen absoluto	0.03	0.205	0.128	0.250	0.237	0.150	0.000
Diseño J	Incidencia en mezcla	3%			77%		15%	5%
	Volumen absoluto	0.03	0.193	0.120	0.235	0.222	0.150	0.050
Diseño K	Incidencia en mezcla	3%			72%		15%	10%
	Volumen absoluto	0.03	0.180	0.112	0.220	0.208	0.150	0.100
Diseño L	Incidencia en mezcla	3%			67%		15%	15%
	Volumen absoluto	0.03	0.168	0.104	0.204	0.193	0.150	0.150

Nota. Elaboración propia

Luego de conocer los volúmenes debemos multiplicarlo por su peso específico para conocer el peso de todos los materiales en estado seco.

Peso del agua, para el diseño A:

$$P_{agua} = 0.230 \text{ m}^3 \times 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$P_{agua} = 230.474 \text{ kg}$$

Peso del cemento, para el diseño A:

$$P_{cemento} = 0.143 \text{ m}^3 \times 2800 \text{ kg/m}^3$$

$$P_{cemento} = 401.503 \text{ kg}$$

Peso del confitillo de 3/8", para el diseño A:

$$P_{confitillo} = 0.281 \text{ m}^3 \times 2690 \text{ kg/m}^3$$

$$P_{confitillo} = 754.593 \text{ kg}$$

Peso de la arena gruesa, para el diseño A:

$$P_{arena} = 0.266 \text{ m}^3 \times 2530 \text{ kg/m}^3$$

$$P_{arena} = 672.004 \text{ kg}$$

Peso del caucho granulado, para el diseño A:

$$P_{caucho} = 0.050 \text{ m}^3 \times 1096 \text{ kg/m}^3$$

$$P_{caucho} = 54.800 \text{ kg}$$

Peso de la perlita expandida, para el diseño A:

$$P_{perlita} = 0.0 \text{ m}^3 \times 221 \text{ kg/m}^3$$

$$P_{perlita} = 0.0 \text{ kg}$$

Con este mismo proceso se calcula para el resto de los diseños.

Tabla 74.*Peso en estado seco de materiales del diseño A al K*

	Agua	Cemento	Confitillo	Arena Gruesa	Caucho	Perlita
Peso específico (kg)	1000	2800	2690	2530	1096	221
Diseño A	230.474	401.503	754.593	672.004	54.800	0.000
Diseño B	217.948	379.682	713.582	635.482	54.800	11.050
Diseño C	205.423	357.861	672.572	598.960	54.800	22.100
Diseño D	192.897	336.041	631.561	562.438	54.800	33.150
Diseño E	217.948	379.682	713.582	635.482	109.600	0.000
Diseño F	205.423	357.861	672.572	598.960	109.600	11.050
Diseño G	192.897	336.041	631.561	562.438	109.600	22.100
Diseño H	180.371	314.220	590.551	525.916	109.600	33.150
Diseño I	205.423	357.861	672.572	598.960	164.400	0.000
Diseño J	192.897	336.041	631.561	562.438	164.400	11.050
Diseño K	180.371	314.220	590.551	525.916	164.400	22.100
Diseño L	167.845	292.399	549.540	489.394	164.400	33.150

Nota. Elaboración propia

Se debe hacer una corrección al peso del confitillo, la arena, el caucho y la perlita, debido a la humedad que contienen estos. Para ello, se debe aplicar lo siguiente.

$$\text{Peso húmedo} = \text{Peso seco} \times \left(\frac{\text{humedad}\%}{100} + 1 \right)$$

Para el diseño A, el confitillo será:

$$\text{Peso húmedo}_{a.g.} = 754.593 \text{ kg} \times \left(\frac{0.100}{100} + 1 \right)$$

$$\text{Peso húmedo}_{a.g.} = 755.347 \text{ kg}$$

Para el diseño A, la arena gruesa será:

$$\text{Peso húmedo}_{a.f.} = 672.004 \text{ kg} \times \left(\frac{1.480}{100} + 1 \right)$$

$$\text{Peso húmedo}_{a.f.} = 681.949 \text{ kg}$$

Para el diseño A, el caucho granulado será:

$$\text{Peso húmedo}_{a.g.} = 54.800 \text{ kg} \times \left(\frac{0.618}{100} + 1 \right)$$

$$\text{Peso húmedo}_{a.g.} = 55.139 \text{ kg}$$

Para el diseño A, la perlita será:

$$\text{Peso húmedo}_{a.f.} = 0.0 \text{ kg} \times \left(\frac{0.943}{100} + 1 \right)$$

$$\text{Peso húmedo}_{a.f.} = 0.0 \text{ kg}$$

Tabla 75.*Peso en estado húmedo de materiales del diseño A al K*

	Confitillo	Arena Gruesa	Caucho	Perlita
Humedad (%)	0.100	1.480	0.618	0.943
Diseño A	755.347	681.949	55.139	0.000
Diseño B	714.296	644.887	55.139	11.154
Diseño C	673.244	607.825	55.139	22.308
Diseño D	632.193	570.762	55.139	33.463
Diseño E	714.296	644.887	110.277	0.000
Diseño F	673.244	607.825	110.277	11.154
Diseño G	632.193	570.762	110.277	22.308
Diseño H	591.141	533.700	110.277	33.463
Diseño I	673.244	607.825	165.416	0.000
Diseño J	632.193	570.762	165.416	11.154
Diseño K	591.141	533.700	165.416	22.308
Diseño L	550.090	496.637	165.416	33.463

Nota. Elaboración propia

Ahora se calcula la cantidad de agua que aportan los agregados a la mezcla mediante lo siguiente.

$$V_{agua} = \frac{(\%humedad - \%absorción) \times \text{Peso seco}}{100}$$

Para el diseño A, el aporte de agua del confitillo será:

$$V_{agua} = \frac{(0.100 - 0.910) \times 754.593}{100}$$

$$V_{agua} = -6.112 \text{ litros}$$

Para el diseño A, el aporte de agua de la arena gruesa será:

$$V_{agua} = \frac{(1.480 - 1.170) \times 672.004}{100}$$

$$V_{agua} = 2.083 \text{ litros}$$

Para el diseño A, el aporte de agua del caucho granulado será:

$$V_{agua} = \frac{(0.618 - 2.567) \times 54.800}{100}$$

$$V_{agua} = -1.068 \text{ litros}$$

Para el diseño A, el aporte de agua de la perlita expandida será:

$$V_{agua} = \frac{(0.943 - 154.563) \times 0.00}{100}$$

$$V_{agua} = 0.00 \text{ litros}$$

Finalmente se debe calcular la cantidad de agua efectiva mediante la diferencia entre la cantidad de agua calculada inicialmente y el aporte de agua recientemente calculado de los agregados.

Para el diseño A, el agua efectiva será:

$$V_{agua} = 230.474 - (-6.112 + 2.083 - 1.068 - 0.00)$$

$$V_{agua} = 235.571 \text{ litros}$$

Lo mismo se aplica para los diseños restantes.

Tabla 76.

Aporte de agua y agua efectiva del diseño A al K

		Confitillo	Arena Gruesa	Caucho	Perlita	Σ Aporte de agua
Contenido de Humedad (%)		0.100	1.480	0.618	0.943	-
Absorción (%)		0.910	1.170	2.567	154.563	-
Diseño A	Aporte de agua	-6.112	2.083	-1.068	0.000	-5.097
	Agua efectiva			235.571		
Diseño B	Aporte de agua	-5.780	1.970	-1.068	-16.975	-21.853
	Agua efectiva			239.802		
Diseño C	Aporte de agua	-5.448	1.857	-1.068	-33.950	-38.609
	Agua efectiva			244.032		
Diseño D	Aporte de agua	-5.116	1.744	-1.068	-50.925	-55.365
	Agua efectiva			248.262		
Diseño E	Aporte de agua	-5.780	1.970	-2.136	0.000	-5.946
	Agua efectiva			223.895		
Diseño F	Aporte de agua	-5.448	1.857	-2.136	-16.975	-22.702
	Agua efectiva			228.125		
Diseño G	Aporte de agua	-5.116	1.744	-2.136	-33.950	-39.458
	Agua efectiva			232.355		
Diseño H	Aporte de agua	-4.783	1.630	-2.136	-50.925	-56.214
	Agua efectiva			236.585		
Diseño I	Aporte de agua	-5.448	1.857	-3.204	0.000	-6.795
	Agua efectiva			212.218		
Diseño J	Aporte de agua	-5.116	1.744	-3.204	-16.975	-23.551
	Agua efectiva			216.448		
Diseño K	Aporte de agua	-4.783	1.630	-3.204	-33.950	-40.307
	Agua efectiva			220.678		
Diseño L	Aporte de agua	-4.451	1.517	-3.204	-50.925	-57.063
	Agua efectiva			224.909		

Nota. Elaboración propia

A continuación, se muestra el resumen de las cantidades de cada material para la elaboración de un metro cúbico de concreto del diseño A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K y L.

Tabla 77.*Dosificación para 1 m3 del diseño A*

Volumen absoluto (m3)			Peso (kg)	Dosificación
Agua/cemento de diseño			0.574	
Agua/cemento efectiva			0.587	
Aire	3%	0.030	-	-
Agua		0.230	235.571	-
Cemento		0.143	401.503	1.00
Confitillo 3/8"	92%	0.281	755.347	1.88
Arena gruesa		0.266	681.949	1.70
Caucho granulado	5%	0.050	55.139	0.14
Perlita expandida	0%	0.000	0.000	0.00
Dosificación (cemento : confitillo : arena gruesa : caucho : perlita)			1 : 1.88 : 1.70 : 0.14 : 0	

Nota. Elaboración propia

Tabla 78.*Dosificación para 1 m3 del diseño B*

Volumen absoluto (m3)			Peso (kg)	Dosificación
Agua/cemento de diseño			0.574	
Agua/cemento efectiva			0.632	
Aire	3%	0.030	-	-
Agua		0.218	239.802	-
Cemento		0.136	379.682	1.00
Confitillo 3/8"	87%	0.265	714.296	1.88
Arena gruesa		0.251	644.887	1.70
Caucho granulado	5%	0.050	55.139	0.15
Perlita expandida	5%	0.050	11.154	0.03
Dosificación (cemento : confitillo : arena gruesa : caucho : perlita)			1 : 1.88 : 1.70 : 0.15 : 0.03	

Nota. Elaboración propia

Tabla 79.*Dosificación para 1 m3 del diseño C*

Volumen absoluto (m3)			Peso (kg)	Dosificación
Agua/cemento de diseño			0.574	
Agua/cemento efectiva			0.682	
Aire	3%	0.030	-	-
Agua		0.205	244.032	-
Cemento	82%	0.128	357.861	1.00
Confitillo 3/8"		0.250	673.244	1.88
Arena gruesa		0.237	607.825	1.70
Caucho granulado	5%	0.050	55.139	0.15
Perlita expandida	10%	0.100	22.308	0.06
Dosificación (cemento : confitillo : arena gruesa : caucho : perlita)			1 : 1.88 : 1.70 : 0.15 : 0.06	

Nota. Elaboración propia

Tabla 80.*Dosificación para 1 m3 del diseño D*

Volumen absoluto (m3)			Peso (kg)	Dosificación
Agua/cemento de diseño			0.574	
Agua/cemento efectiva			0.739	
Aire	3%	0.030	-	-
Agua		0.193	248.262	-
Cemento	77%	0.120	336.041	1.00
Confitillo 3/8"		0.235	632.193	1.88
Arena gruesa		0.222	570.762	1.70
Caucho granulado	5%	0.050	55.139	0.16
Perlita expandida	15%	0.150	33.463	0.10
Dosificación (cemento : confitillo : arena gruesa : caucho : perlita)			1 : 1.88 : 1.70 : 0.16 : 0.10	

Nota. Elaboración propia

Tabla 81.*Dosificación para 1 m³ del diseño E*

Volumen absoluto (m ³)			Peso (kg)	Dosificación
Agua/cemento de diseño			0.574	
Agua/cemento efectiva			0.590	
Aire	3%	0.030	-	-
Agua		0.218	223.895	-
Cemento		0.136	379.682	1.00
Confitillo 3/8"	87%	0.265	714.296	1.88
Arena gruesa		0.251	644.887	1.70
Caucho granulado	10%	0.100	110.277	0.29
Perlita expandida	0%	0.000	0.000	0.00
Dosificación (cemento : confitillo : arena gruesa : caucho : perlita)			1 : 1.88 : 1.70 : 0.29 : 0	

Nota. Elaboración propia

Tabla 82.*Dosificación para 1 m³ del diseño F*

Volumen absoluto (m ³)			Peso (kg)	Dosificación
Agua/cemento de diseño			0.574	
Agua/cemento efectiva			0.637	
Aire	3%	0.030	-	-
Agua		0.205	228.125	-
Cemento		0.128	357.861	1.00
Confitillo 3/8"	82%	0.250	673.244	1.88
Arena gruesa		0.237	607.825	1.70
Caucho granulado	10%	0.100	110.277	0.31
Perlita expandida	5%	0.050	11.154	0.03
Dosificación (cemento : confitillo : arena gruesa : caucho : perlita)			1 : 1.88 : 1.70 : 0.31 : 0.03	

Nota. Elaboración propia

Tabla 83.*Dosificación para 1 m3 del diseño G*

Volumen absoluto (m3)			Peso (kg)	Dosificación
Agua/cemento de diseño			0.574	
Agua/cemento efectiva			0.691	
Aire	3%	0.030	-	-
Agua		0.193	232.355	-
Cemento		0.120	336.041	1.00
Confitillo 3/8"	77%	0.235	632.193	1.88
Arena gruesa		0.222	570.762	1.70
Caucho granulado	10%	0.100	110.277	0.33
Perlita expandida	10%	0.100	22.308	0.07
Dosificación (cemento : confitillo : arena gruesa : caucho : perlita)			1 : 1.88 : 1.70 : 0.33 : 0.07	

Nota. Elaboración propia

Tabla 84.*Dosificación para 1 m3 del diseño H*

Volumen absoluto (m3)			Peso (kg)	Dosificación
Agua/cemento de diseño			0.574	
Agua/cemento efectiva			0.753	
Aire	3%	0.030	-	-
Agua		0.180	236.585	-
Cemento		0.112	314.220	1.00
Confitillo 3/8"	72%	0.220	591.141	1.88
Arena gruesa		0.208	533.700	1.70
Caucho granulado	10%	0.100	110.277	0.35
Perlita expandida	15%	0.150	33.463	0.11
Dosificación (cemento : confitillo : arena gruesa : caucho : perlita)			1 : 1.88 : 1.70 : 0.35 : 0.11	

Nota. Elaboración propia

Tabla 85.*Dosificación para 1 m3 del diseño I*

Volumen absoluto (m3)			Peso (kg)	Dosificación
Agua/cemento de diseño			0.574	
Agua/cemento efectiva			0.593	
Aire	3%	0.030	-	-
Agua		0.205	212.218	-
Cemento	82%	0.128	357.861	1.00
Confitillo 3/8"		0.250	673.244	1.88
Arena gruesa		0.237	607.825	1.70
Caucho granulado	15%	0.150	165.416	0.46
Perlita expandida	0%	0.000	0.000	0.00
Dosificación (cemento : confitillo : arena gruesa : caucho : perlita)			1 : 1.88 : 1.70 : 0.46 : 0	

Nota. Elaboración propia

Tabla 86.*Dosificación para 1 m3 del diseño J*

Volumen absoluto (m3)			Peso (kg)	Dosificación
Agua/cemento de diseño			0.574	
Agua/cemento efectiva			0.644	
Aire	3%	0.030	-	-
Agua		0.193	216.448	-
Cemento	77%	0.120	336.041	1.00
Confitillo 3/8"		0.235	632.193	1.88
Arena gruesa		0.222	570.762	1.70
Caucho granulado	15%	0.150	165.416	0.49
Perlita expandida	5%	0.050	11.154	0.03
Dosificación (cemento : confitillo : arena gruesa : caucho : perlita)			1 : 1.88 : 1.70 : 0.49 : 0.03	

Nota. Elaboración propia

Tabla 87.*Dosificación para 1 m3 del diseño K*

Volumen absoluto (m3)			Peso (kg)	Dosificación
Agua/cemento de diseño			0.574	
Agua/cemento efectiva			0.702	
Aire	3%	0.030	-	-
Agua		0.180	220.678	-
Cemento		0.112	314.220	1.00
Confitillo 3/8"	72%	0.220	591.141	1.88
Arena gruesa		0.208	533.700	1.70
Caucho granulado	15%	0.150	165.416	0.53
Perlita expandida	10%	0.100	22.308	0.07
Dosificación (cemento : confitillo : arena gruesa : caucho : perlita)			1 : 1.88 : 1.70 : 0.53 : 0.07	

Nota. Elaboración propia

Tabla 88.*Dosificación para 1 m3 del diseño L*

Volumen absoluto (m3)			Peso (kg)	Dosificación
Agua/cemento de diseño			0.574	
Agua/cemento efectiva			0.769	
Aire	3%	0.030	-	-
Agua		0.168	224.909	-
Cemento		0.104	292.399	1.00
Confitillo 3/8"	67%	0.204	550.090	1.88
Arena gruesa		0.193	496.637	1.70
Caucho granulado	15%	0.150	165.416	0.57
Perlita expandida	15%	0.150	33.463	0.11
Dosificación (cemento : confitillo : arena gruesa : caucho : perlita)			1 : 1.88 : 1.70 : 0.57 : 0.11	

Nota. Elaboración propia

4.1.3 Actividad 3. Elaboración de probetas.

Mezclado. Se usó un mini trompo mezclador de 125 litros de capacidad, el cual se humedeció previamente y se procedió a verter el confitillo, arena gruesa, caucho, perlita, cemento y finalmente el agua, todo esto con la mezcladora en funcionamiento. El

tiempo que se destinó al mezclado fue entre 3 a 5 min para una tanda de 41 kg.

Figura 33.

Mezclado



Nota. Elaboración propia

Vaciado. Antes de realizar el vaciado, se deben engrasar los moldes de PVC para evitar adhesiones y fracturas. Se realizó el vaciado de las probetas en tres capas.

Figura 34.

Vaciado



Nota. Elaboración propia

Compactación del concreto. Entre capa y capa, se usó el método de consolidación manual con una varilla lisa metálica y se chuzó en sentido vertical por 15 veces para eliminar el aire atrapado en la mezcla. Además, se dio pequeños golpes alrededor del molde con un martillo de goma, con el mismo propósito.

Desmoldado. El desmoldado de las probetas se hizo 24 horas después de vaciado. Al tratarse de moldes de pvc se desmoldó con aire comprimido proporcionado por una manguera conectada a una compresora de aire.

Figura 35.

Desmoldado



Nota. Elaboración propia

Curado. Una vez desmoldadas, las probetas se sumergieron en una poza con agua para su curado hasta un día anterior a la fecha de su ensayo de resistencia a compresión.

Figura 36.

Curado



Nota. Elaboración propia

4.1.4 Actividad 4. Evaluación y selección de diseños de mezcla.

Se realizó a cada diseño el ensayo de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días según lo establece la normativa. A continuación, se muestran los resultados promedios para cada uno de los diseños, mientras que el informe de laboratorio con resultados detallados se adjuntan el Anexo 6.

Tabla 89.

Resistencia a la compresión promedio del Diseño Patrón

Edad	Resistencia Promedio (fb)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica (f'b)	Coefficiente de Variación (%)
7 días	155.365	31.833	123.532	0.205
14 días	190.999	7.554	183.445	0.040
28 días	222.376	13.219	209.157	0.059

Nota. Elaboración propia

Tabla 90.

Resistencia a la compresión promedio del Diseño A

Edad	Resistencia Promedio (fb)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica (f'b)	Coefficiente de Variación (%)
7 días	121.000	13.851	107.149	0.114
14 días	153.171	9.002	144.168	0.059
28 días	180.896	3.363	177.533	0.019

Nota. Elaboración propia

Tabla 91.

Resistencia a la compresión promedio del Diseño B

Edad	Resistencia Promedio (fb)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica (f'b)	Coefficiente de Variación (%)
7 días	137.595	3.417	134.178	0.025
14 días	165.946	4.549	161.397	0.027
28 días	190.477	4.380	186.097	0.023

Nota. Elaboración propia

Tabla 92.*Resistencia a la compresión promedio del Diseño C*

Edad	Resistencia Promedio (fb)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica (f'b)	Coefficiente de Variación (%)
7 días	125.711	2.473	123.238	0.020
14 días	142.094	1.215	140.879	0.009
28 días	167.240	8.890	158.350	0.053

Nota. Elaboración propia

Tabla 93.*Resistencia a la compresión promedio del Diseño D*

Edad	Resistencia Promedio (fb)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica (f'b)	Coefficiente de Variación (%)
7 días	124.183	2.987	121.196	0.024
14 días	142.900	6.018	136.881	0.042
28 días	158.932	11.927	147.005	0.075

Nota. Elaboración propia

Tabla 94.*Resistencia a la compresión promedio del Diseño E*

Edad	Resistencia Promedio (fb)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica (f'b)	Coefficiente de Variación (%)
7 días	118.199	5.127	113.072	0.043
14 días	137.085	6.186	130.900	0.045
28 días	164.343	10.365	153.978	0.063

Nota. Elaboración propia

Tabla 95.*Resistencia a la compresión promedio del Diseño F*

Edad	Resistencia Promedio (fb)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica (f'b)	Coefficiente de Variación (%)
7 días	124.650	11.224	113.426	0.090
14 días	140.735	6.530	134.205	0.046
28 días	179.272	4.879	174.393	0.027

Nota. Elaboración propia

Tabla 96.*Resistencia a la compresión promedio del Diseño G*

Edad	Resistencia Promedio (fb)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica (f'b)	Coefficiente de Variación (%)
7 días	114.040	2.871	111.169	0.025
14 días	134.369	8.805	125.564	0.066
28 días	147.887	11.792	136.095	0.080

Nota. Elaboración propia

Tabla 97.*Resistencia a la compresión promedio del Diseño H*

Edad	Resistencia Promedio (fb)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica (f'b)	Coefficiente de Variación (%)
7 días	112.639	1.068	111.571	0.009
14 días	123.632	2.323	121.308	0.019
28 días	149.510	9.950	139.560	0.067

Nota. Elaboración propia

Tabla 98.*Resistencia a la compresión promedio del Diseño I*

Edad	Resistencia Promedio (fb)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica (f'b)	Coefficiente de Variación (%)
7 días	112.682	1.273	111.408	0.011
14 días	129.064	2.998	126.066	0.023
28 días	149.256	6.705	142.551	0.045

Nota. Elaboración propia

Tabla 99.*Resistencia a la compresión promedio del Diseño J*

Edad	Resistencia Promedio (fb)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica (f'b)	Coefficiente de Variación (%)
7 días	118.878	1.029	117.849	0.009
14 días	134.157	3.497	130.660	0.026
28 días	147.759	10.037	137.723	0.068

Nota. Elaboración propia

Tabla 100.*Resistencia a la compresión promedio del Diseño K*

Edad	Resistencia Promedio (fb)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica (f'b)	Coefficiente de Variación (%)
7 días	108.798	15.536	93.263	0.143
14 días	126.528	7.201	119.328	0.057
28 días	156.513	3.883	152.630	0.025

Nota. Elaboración propia

Tabla 101.

Resistencia a la compresión promedio del Diseño L

Edad	Resistencia Promedio (fb)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica (f'b)	Coefficiente de Variación (%)
7 días	107.302	13.307	93.995	0.124
14 días	119.876	10.269	109.607	0.086
28 días	132.321	18.121	114.200	0.137

Nota. Elaboración propia

Cabe mencionar que los resultados mostrados son el promedio de tres a cuatro muestras cilíndricas por cada edad de diferente diseño de mezcla. Los resultados detallados se encuentran en el informe de laboratorio del Anexo 6.

Figura 37.

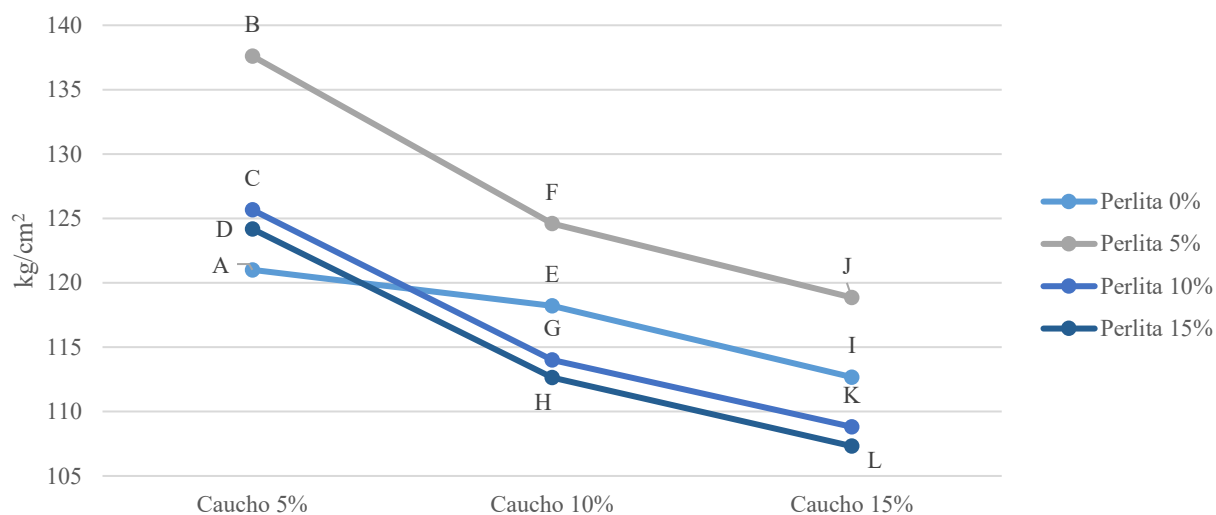
Ensayo de resistencia a la compresión de probetas



Nota. Elaboración propia

Figura 38.

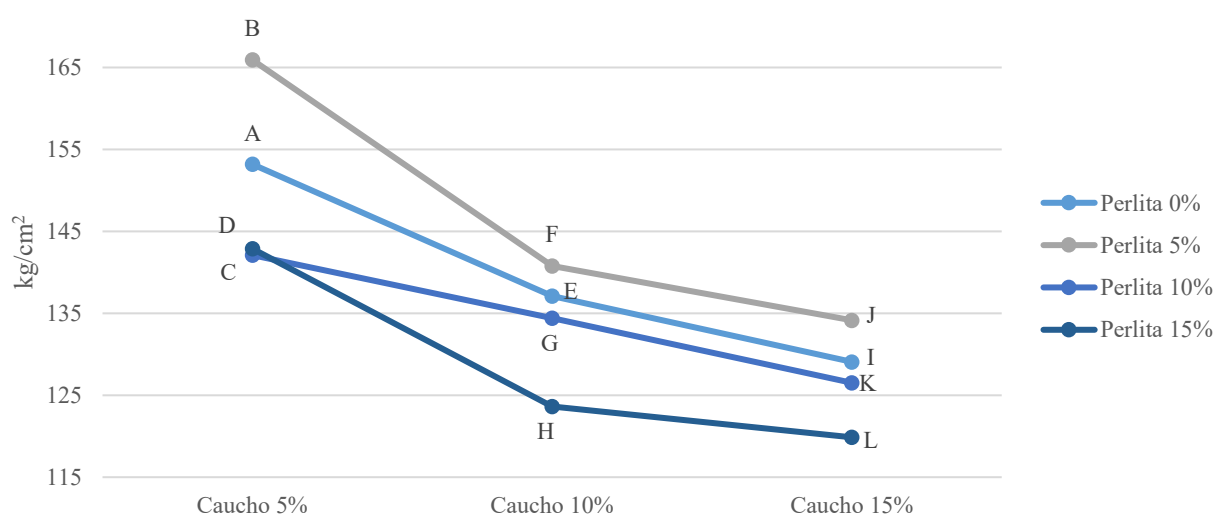
Resistencia a la compresión vs. Contenido de caucho reciclado para la mejor incidencia de perlita mineral – edad 7 días



Nota. Elaboración propia

Figura 39.

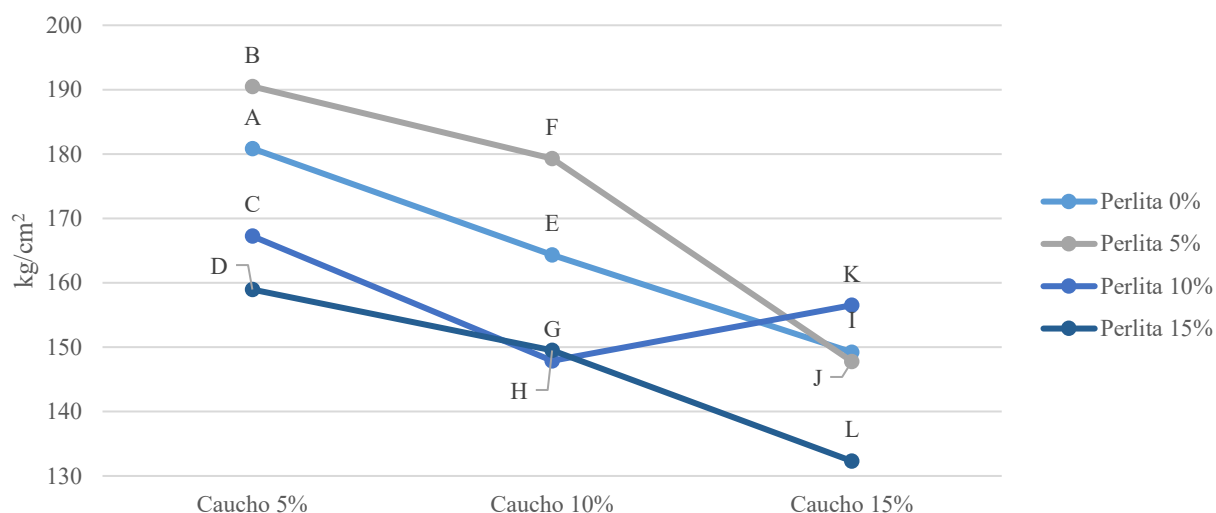
Resistencia a la compresión vs. Contenido de caucho reciclado para la mejor incidencia de perlita mineral – edad 14 días



Nota. Elaboración propia

Figura 40.

Resistencia a la compresión vs. Contenido de caucho reciclado para la mejor incidencia de perlita mineral – edad 28 días



Nota. Elaboración propia

Los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión a 7, 14 y 28 días permiten establecer una tendencia clara respecto a la influencia del contenido de caucho reciclado y perlita expandida en las propiedades mecánicas de los diseños de mezcla.

Tal como se observa en las Figuras 38 a la 40, la línea correspondiente a 5% de perlita (diseños B, F y J) se mantiene consistentemente por encima de las demás curvas en los tres tiempos de curado. Esto demuestra que una dosificación moderada de perlita (5%) genera un efecto positivo sobre la resistencia mecánica, incluso superando al diseño A (sin perlita). Este comportamiento puede estar asociado a una mejor distribución granulométrica de la mezcla y a la posible acción de la perlita como elemento microestructural que contribuye al relleno y mejora del empaquetamiento de partículas.

En contraste, el aumento en el contenido de caucho reciclado genera un efecto de disminución progresiva en la resistencia, siendo más notorio a los 28 días. Este efecto puede atribuirse a la baja rigidez del caucho, su escasa adherencia con la matriz cementante y la

posible generación de microvacíos, lo que compromete la continuidad estructural del compuesto endurecido.

No obstante, dentro de esta tendencia decreciente, el diseño F (10% caucho + 5% perlita) logra mantener un rendimiento estructural aceptable, con una resistencia característica a 28 días de 174.39 kg/cm², solo un 6.9% inferior al diseño B (186.10 kg/cm²) y muy por encima del resto de diseños con mayor o menor contenido de perlita.

Esta situación convierte a los diseños con 5% de perlita (B, F y J) en los candidatos más viables para las siguientes etapas del estudio, ya que ofrecen un balance adecuado entre contenido reciclado y propiedades mecánicas. Además, permiten establecer un eje de análisis en torno a una sola variable: el contenido de caucho.

Finalmente, se observa que el diseño J (15% caucho + 5% perlita), si bien presenta la menor resistencia dentro del grupo seleccionado (137.72 kg/cm²), aún supera a otros diseños con mayor contenido de perlita (I, K, L), lo que refuerza la hipótesis de que la perlita actúa como modulador de las pérdidas mecánicas inducidas por el caucho, permitiendo extender el rango útil de incorporación del mismo sin comprometer gravemente la resistencia mínima exigida por la normativa.

Tabla 102.

Ranking de diseños de mezcla según resistencia a compresión – edad 7 días

Puesto	Diseño	Caucho	Perlita	Resistencia a Compresión (kg/cm2)
	Patrón	0%	0%	155.365
1	B	5%	5%	137.595
2	C	5%	10%	125.711
3	F	10%	5%	124.650
4	D	5%	15%	124.183
5	A	5%	0%	121.000
6	J	15%	5%	118.878
7	E	10%	0%	118.199
8	G	10%	10%	114.040
9	I	15%	0%	112.682
10	H	10%	15%	112.639
11	K	15%	10%	108.798
12	L	15%	15%	107.302

Nota. Elaboración propia

Tabla 103.

Ranking de diseños de mezcla según resistencia a compresión – edad 14 días

Puesto	Diseño	Caucho	Perlita	Resistencia a Compresión (kg/cm2)
	Patrón	0%	0%	190.999
1	B	5%	5%	165.946
2	A	5%	0%	153.171
3	D	5%	15%	142.900
4	C	5%	10%	142.094
5	F	10%	5%	140.735
6	E	10%	0%	137.085
7	G	10%	10%	134.369
8	J	15%	5%	134.157
9	I	15%	0%	129.064
10	K	15%	10%	126.528
11	H	10%	15%	123.632
12	L	15%	15%	119.876

Nota. Elaboración propia

Tabla 104.

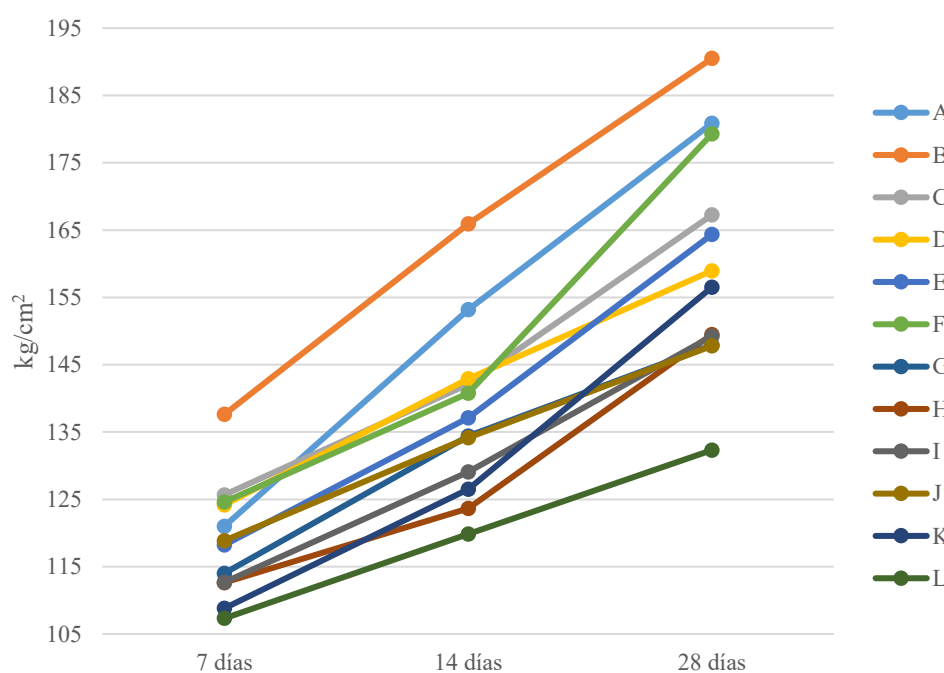
Ranking de diseños de mezcla según resistencia a compresión – edad 28 días

Puesto	Diseño	Caucho	Perlita	Resistencia a Compresión (kg/cm ²)
	Patrón	0%	0%	222.376
1	B	5%	5%	190.477
2	A	5%	0%	180.896
3	F	10%	5%	179.272
4	C	5%	10%	167.240
5	E	10%	0%	164.343
6	D	5%	15%	158.932
7	K	15%	10%	156.513
8	H	10%	15%	149.510
9	I	15%	0%	149.256
10	G	10%	10%	147.887
11	J	15%	5%	147.759
12	L	15%	15%	132.321

Nota. Elaboración propia

Figura 41.

Resistencia a la compresión vs. Edad del concreto según diseño de mezcla



Nota. Elaboración propia

A partir del análisis de los resultados, se observa que el diseño B (5% caucho, 5% perlita) obtuvo consistentemente la mayor resistencia a compresión en las tres edades de curado, posicionándose como el diseño más robusto en términos estructurales dentro del conjunto de mezclas modificadas. Este comportamiento sugiere que una incorporación equilibrada de 5% de perlita actúa positivamente en la microestructura del concreto, posiblemente mejorando la compacidad y ayudando a mitigar los efectos negativos que genera la inclusión de caucho reciclado.

Asimismo, los diseños A (5% caucho, 0% perlita) y F (10% caucho, 5% perlita) también mostraron un rendimiento destacado, ocupando los primeros tres puestos en dos o más edades de evaluación. Específicamente, el diseño F destacó por mantener una resistencia considerable a pesar del mayor contenido de caucho, lo cual puede atribuirse a la compensación estructural que ofrece la perlita frente a la pérdida de adherencia y rigidez introducida por el material polimérico.

En el caso del diseño J (15% caucho, 5% perlita), si bien sus valores de resistencia son inferiores, su inclusión en la fase siguiente responde a una estrategia de análisis más integral, ya que representa el límite superior del contenido de caucho que se desea evaluar. Además, mantiene una resistencia aceptable y superior a la de otros diseños con mayores contenidos de perlita, como K, L o H.

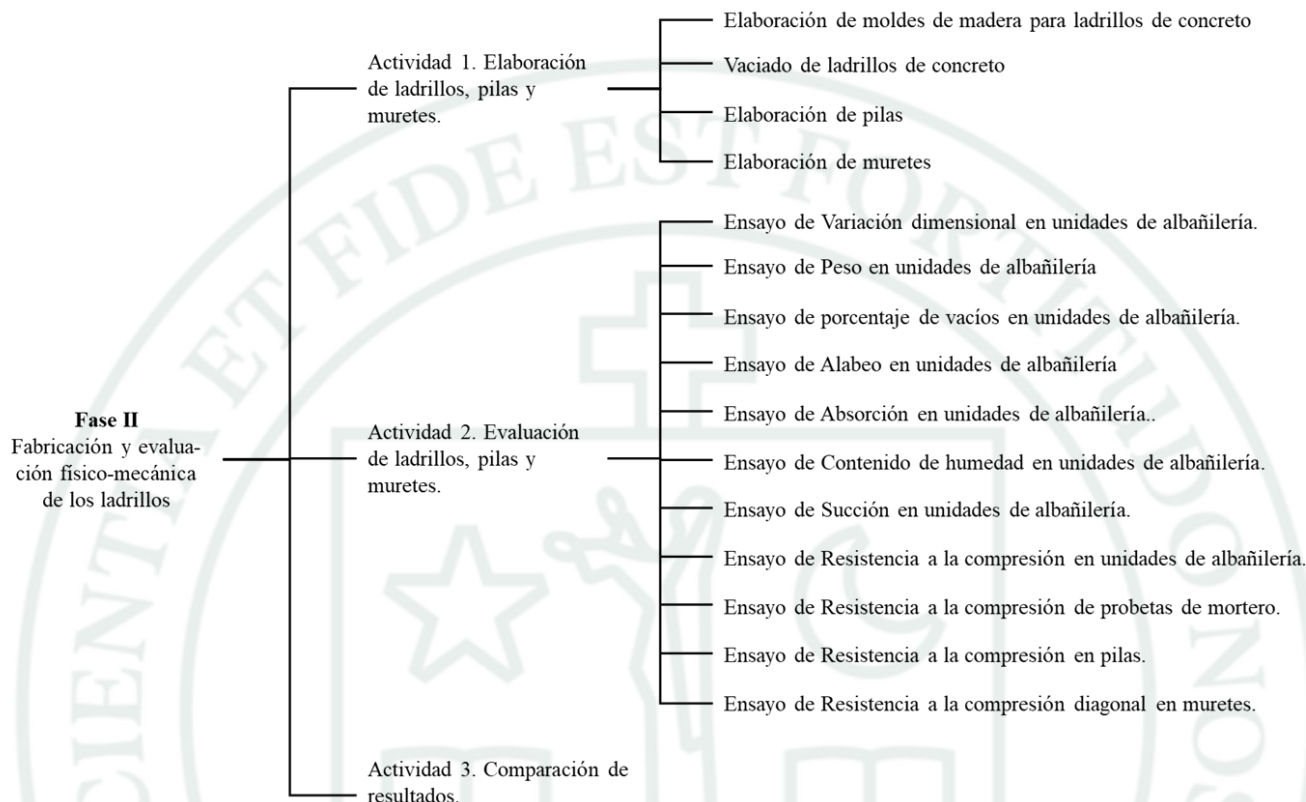
Este patrón se refleja también en la Figura 41, donde los diseños B, A y F dominan visualmente los tres primeros lugares en promedio a lo largo del tiempo.

Por tanto, y considerando tanto los valores cuantitativos como la distribución gráfica de los resultados, se procedió a seleccionar los diseños A, B, F y J para su evaluación en la Fase II del estudio, donde se elaborarán unidades de albañilería (ladrillos de concreto) a fin de analizar su comportamiento estructural integral y su viabilidad técnica frente a ladrillos de arcilla convencionales.

4.2 Fase II. Fabricación y evaluación físico-mecánica de los ladrillos

Figura 42.

Mapa conceptual de fase II



Nota. Elaboración propia

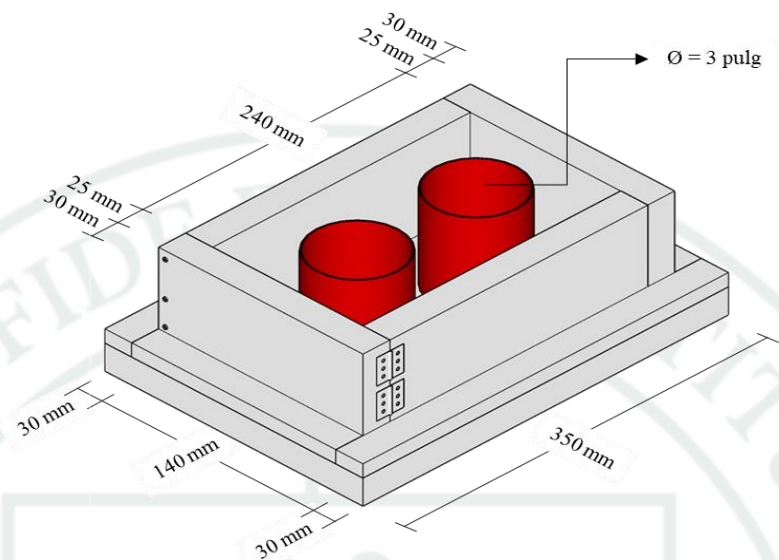
4.2.1 Actividad 1. Elaboración de ladrillos, pilas y muretes.

4.2.1.1 Elaboración de moldes de madera para ladrillos de concreto.

Para el vaciado de los ladrillos de concreto se decidió hacerlo en moldes hechos de madera pino. Para ello, se elaboró un diseño de molde con el objetivo de un fácil desmolde posterior.

Figura 43.

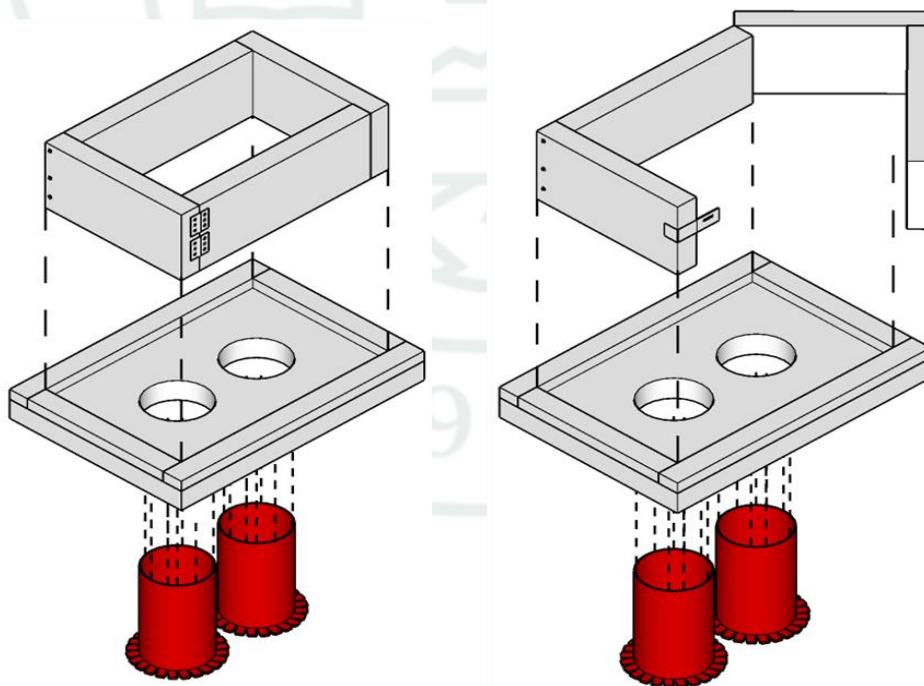
Isometría de molde para ladrillos de concreto con dos perforaciones de 3" de diámetro



Nota. Elaboración propia

Figura 44.

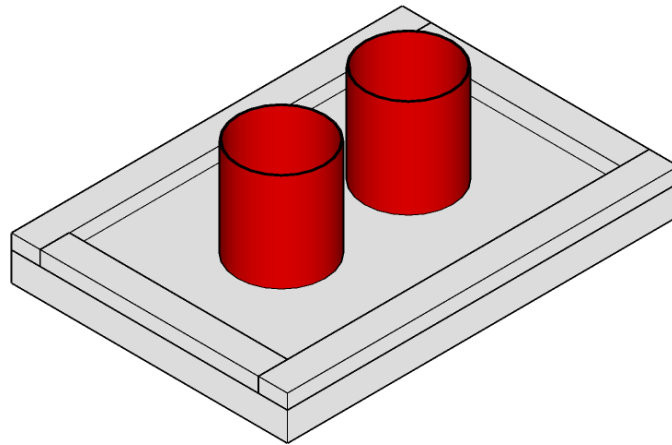
Isometría explotada de molde para ladrillos de concreto con dos perforaciones de 3" de diámetro



Nota. Elaboración propia

Figura 45.

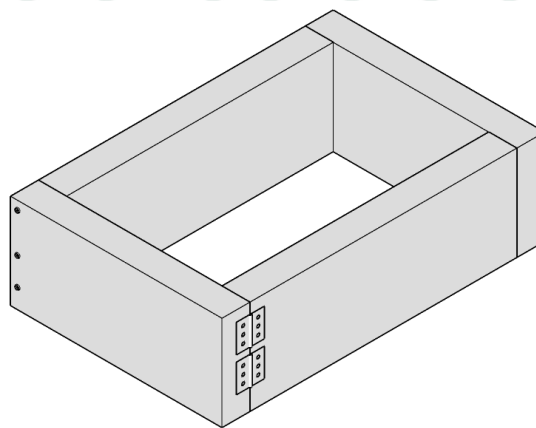
Isometría de la pieza número 1 del molde para ladrillos de concreto con dos perforaciones de 3" de diámetro



Nota. Elaboración propia

Figura 46.

Isometría de la pieza número 2 del molde para ladrillos de concreto



Nota. Elaboración propia

Figura 47.

Molde de madera pino con perforaciones de 2" para ladrillos

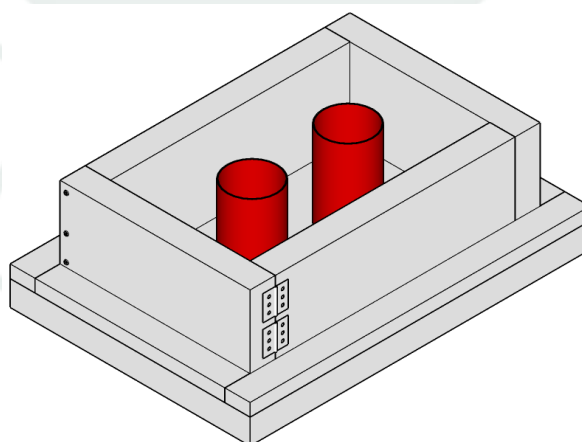


Nota. Elaboración propia

Se elaboró el molde en dos piezas, la pieza número uno es la base hecha de madera pino en la cual se colocó dos segmentos de tubo de PVC inicialmente con diámetro de 3", que servirá para dar forma a las perforaciones del ladrillo. Y la segunda pieza también de madera pino que formará el contorno del ladrillo. En esta pieza se colocó una bisagra y un picaporte para la fácil apertura de la formaleta durante el desmolde.

Figura 48.

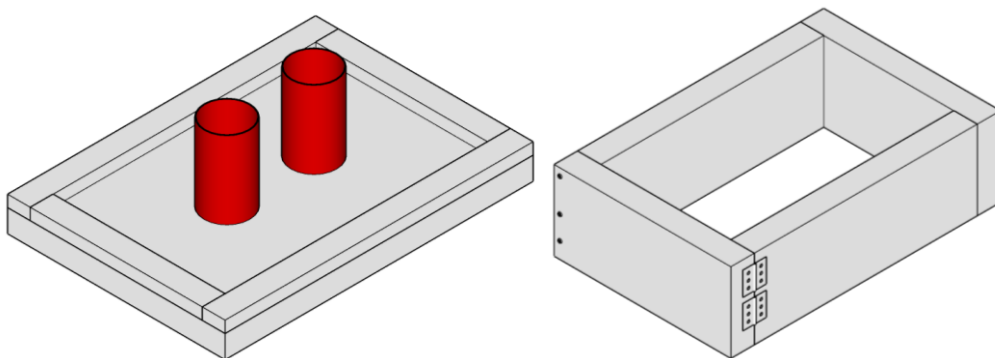
Isometría del molde para ladrillos de concreto con dos perforaciones de 2" de diámetro



Nota. Elaboración propia

Figura 49.

Isometría de la pieza número 1 y 2 del molde para ladrillos de concreto con dos perforaciones de 2" de diámetro

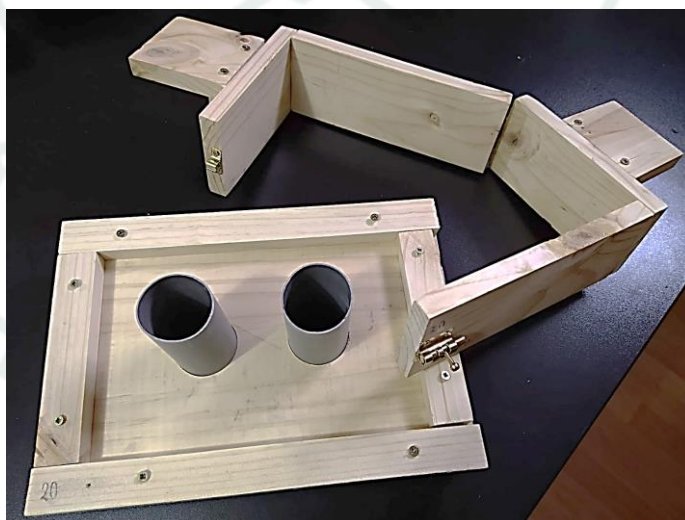


Nota. Elaboración propia

Luego de un primer vaciado con estos moldes, y al observar que durante el desmolde, el ladrillo se fisuraba entre perforación y perforación, se decidió cambiar la pieza número uno por otra que contenga el tubo de PVC de 2" de diámetro para que de esta manera la distancia entre perforaciones sea mayor y así evitar las fisuras durante el desmolde.

Figura 50.

Molde de madera pino con perforaciones de 2" para ladrillos



Nota. Elaboración propia

4.2.1.2 Vaciado de ladrillos de concreto.

Mezclado. Se siguió el mismo procedimiento del mezclado del concreto de las probetas.

El tiempo que se destinó al mezclado fue entre 5 a 8 min para una tanda de 50 kg. Al día se realizaba tres tandas de 8 ladrillos cada una, ya que se contó con sólo 24 moldes.

Tabla 105.

Cantidad de ladrillos a vaciar según ensayos

Ensayo		Diseño Patrón		Diseño A		Diseño B		Diseño F		Diseño J	
Variación dimensional											
Peso		10		10		10		10		10	
Porcentaje de vacíos											
Alabeo											
Absorción		5		5		5		5		5	
Contenido de humedad		5		5		5		5		5	
Succión		5		5		5		5		5	
Resistencia a la compresión		15		15		15		15		15	
Pilas	N° Ladrillos por pila	3	9	3	9	3	9	3	9	3	9
	N° Pilas	3		3		3		3		3	
Muretes	N° Ladrillos por murete	15	45	15	45	15	45	15	45	15	45
	N° Muretes	3		3		3		3		3	
SUBTOTAL		94		94		94		94		94	
Desperdicio (10%)		9.4		9.4		9.4		9.4		9.4	
TOTAL		103.4		103.4		103.4		103.4		103.4	

Nota. Elaboración propia

Finalmente, se decidió vaciar 104 ladrillos por diseño (diseño patrón, A, B, F y J), haciendo un total de 520 ladrillos.

Figura 51.

Mezclado



Nota. Elaboración propia

Vaciado. Antes de realizar el vaciado, se deben engrasar los moldes de madera para evitar adhesiones y fracturas. El engrasado se hizo inicialmente con petróleo, pero debido a su desagradable olor durante la jornada de trabajo se optó por cambiarlo a aceite de cocina. Se realizó el vaciado de los ladrillos en dos capas.

Figura 52.

Engrasado de moldes



Nota. Elaboración propia

Figura 53.

Vaciado



Nota. Elaboración propia

Compactación del concreto. Entre capa y capa, se usó el método de consolidación manual con una varilla lisa metálica y se chuzó en sentido vertical por 15 veces para eliminar el aire atrapado en la mezcla. Además, se dio pequeños golpes alrededor del molde con un martillo de goma, con el mismo propósito.

Desmoldado. El desmoldado de los ladrillos se hizo inicialmente 24 horas después de su vaciado. Pero debido a su fuerte adhesión al molde pese a que se engrasó previamente, se probó el desmoldado a diferentes edades: 2, 4, 6, 8, y 10 horas. El tiempo de fraguado más óptimo durante el desmoldado fue de 4 horas.

Figura 54.

Desmoldado



Nota. Elaboración propia

Como ya se mencionó con anterioridad, inicialmente se trabajó con moldes de perforaciones de 3" de diámetro. Y aunque se desmoldó con diferentes horas de edad, siempre aparecían grietas alrededor de las perforaciones del ladrillo.

Se usó papel celofán envolviendo los tubos PVC del molde para facilitar el desmoldado y aunque esto mejoró significativamente el resultado del desmolde (5 ladrillos sin fisuras de 8 ladrillos vaciados), se optó por disminuir las perforaciones a 2" de diámetro para asegurar todas las muestras de posibles grietas.

Figura 55.

Fisuras durante el desmoldado sin papel celofán de ladrillos con perforaciones de 3''



Nota. Elaboración propia

Curado. Una vez desmoldados los ladrillos, se dejó que cumplieran 24 horas de vida en la intemperie para luego sumergirlos en la poza con agua para su curado hasta cumplieran 28 días de vida o un día anterior a la fecha de su ensayo de resistencia a compresión (según el ensayo al que estaba destinado).

Figura 56.

Curado



Nota. Elaboración propia

4.2.1.3 Elaboración de pilas

El mortero que se empleó en la junta corresponde a la dosificación de 1:4. El espesor de la junta empleada entre unidad y unidad de albañilería fue de 15 mm como máximo.

4.2.1.4 Elaboración de muretes

Al igual que en la elaboración de pilas el mortero con el que se trabajó fue de 1:4 de dosificación. Se humedeció las unidades de albañilería previamente para evitar que éstas absorban agua del mortero durante el asentado.

Figura 57.

Asentado de muros



Nota. Elaboración propia

4.2.2 Actividad 2. Evaluación de ladrillos, pilas y muretes.

Una vez cumplidos los 28 días de curado en la poza de agua, las unidades de albañilería se dejaron a la intemperie para drenar el agua contenida.

4.2.2.1 Ensayo de Variación dimensional en unidades de albañilería.

- Ladrillos de arcilla.

Tabla 106.

Variación dimensional de unidades de albañilería de arcilla

Muestra	Largo		Ancho		Alto		Clasificación de Ladrillo según E.070
	Largo promedio (mm)	Variación dimensional (%)	Ancho promedio (mm)	Variación dimensional (%)	Alto promedio (mm)	Variación dimensional (%)	
KK	241.775	-0.740	141.8	-1.286	99.65	0.35	Tipo V

Nota. Elaboración propia

El ensayo de variación dimensional realizado a los ladrillos de arcilla (Tabla 106) se ejecutó sobre 10 unidades adquiridas en el mercado (detallado en el Anexo 7), es decir, productos fabricados mediante procesos mecanizados. Los resultados muestran dimensiones promedio de 241.775 mm de largo (variación de -0.740 %), 141.8 mm de ancho (variación de -1.286 %) y 99.65 mm de alto (variación de 0.35 %), todos dentro de los rangos permitidos para la clasificación Tipo V, conforme a la Norma Técnica Peruana E.070.

Gracias a su fabricación industrial, estos ladrillos presentan una variación dimensional baja y controlada, lo cual es característico de procesos automatizados. Esta regularidad geométrica contribuye a facilitar el aparejo y reducir la necesidad de correcciones durante la ejecución en obra.

- Ladrillos de concreto patrón, diseño A, B, F y J.

Tabla 107.

Variación dimensional de unidades de albañilería de concreto

Muestra	Largo		Ancho		Alto		Clasificación de Ladrillo según E.070
	Largo promedio (mm)	Variación dimensional (%)	Ancho promedio (mm)	Variación dimensional (%)	Alto promedio (mm)	Variación dimensional (%)	
Diseño patrón	239.642	0.149	140.450	-0.321	89.067	1.037	Tipo V
Diseño A	239.284	0.298	140.216	-0.154	88.170	2.033	Tipo V
Diseño B	238.792	0.503	140.217	-0.155	88.553	1.608	Tipo V
Diseño F	239.725	0.115	140.450	-0.321	88.642	1.509	Tipo V
Diseño J	240.095	-0.040	140.929	-0.663	88.393	1.786	Tipo V

Nota. Elaboración propia

Para cada diseño se evaluaron 30 muestras, cuyos resultados se detallan en la Tabla 107. Todas las unidades analizadas cumplen con los requisitos dimensionales establecidos por la Norma Técnica Peruana E.070, clasificándose como Tipo V.

Las variaciones registradas en las dimensiones de largo, ancho y alto se mantuvieron dentro de los márgenes normativos. El mayor porcentaje de variación se presentó en la dimensión de alto de los diseños A (2.033 %) y J (1.786%), sin que ello implique un incumplimiento de la norma. Este nivel de dispersión es aceptable considerando que las unidades fueron moldeadas manualmente, y evidencia un control razonable del proceso constructivo artesanal.

Los resultados del ensayo demuestran que es posible obtener unidades dimensionalmente estables aún en condiciones no industriales, lo que representa una ventaja relevante para aplicaciones en contextos de obra donde se requiera fabricar materiales in situ o a pequeña escala.

4.2.2.2 Ensayo de Peso en unidades de albañilería.

- Ladrillos de arcilla.

Tabla 108.

Peso de unidades de albañilería de arcilla

Muestra	Peso promedio (g)
KK	3764.800

Nota. Elaboración propia

El peso promedio de las unidades de arcilla ensayadas fue de **3764.8 gramos**, valor obtenido a partir de 10 muestras representativas. Este peso es característico de ladrillos cerámicos huecos de tipo tradicional y está directamente relacionado con su composición y nivel de cocción. Al tratarse de unidades industriales adquiridas en el mercado, se espera cierta regularidad en sus características físicas.

El informe de laboratorio completo se encuentra en el Anexo 8.

- Ladrillos de concreto patrón, diseño A, B, F y J.

Tabla 109.

Peso de unidades de albañilería de concreto

Muestra	Peso promedio (g)
Diseño patrón	5603.5
Diseño A	5587.2
Diseño B	5556.7
Diseño F	5491.6
Diseño J	5446.6

Nota. Elaboración propia

El peso de los ladrillos de concreto, mostrados en la Tabla 109, varía según el diseño de mezcla empleado. El diseño patrón presentó el mayor peso promedio con 5603.5 gramos, mientras que el diseño J registró el menor con 5446.6 gramos. Esta reducción progresiva en el peso está directamente relacionada con el incremento del contenido de caucho granulado y

perlita expandida, materiales empleados como reemplazo parcial del agregado natural en este estudio.

Ambos componentes, el caucho por su baja densidad y la perlita por su naturaleza ligera y porosa, contribuyen a disminuir el peso total de la unidad sin comprometer necesariamente su volumen, lo que permite aligerar las cargas transmitidas al sistema constructivo. Esta tendencia resulta positiva desde el punto de vista de eficiencia estructural y facilidad de manipulación en obra.

Figura 58.

Medición de peso de unidades de albañilería de concreto



Nota. Elaboración propia

Los estudios completos de las 30 muestras ensayadas se encuentran en el Anexo 8.

4.2.2.3 Ensayo de Porcentaje de vacíos en unidades de albañilería.

- Ladrillos de arcilla.

Tabla 110.

Porcentaje de área de vacíos de unidades de albañilería de arcilla

Muestra	Porcentaje de área de vacíos promedio (%)	Clasificación de Ladrillo
KK	33.680	Hueco (No Portante)

Nota. Elaboración propia

El promedio que se obtuvo de las muestras de ladrillos de arcilla supera lo permitido para ladrillos sólidos en el reglamento de la E. 070. Por lo que, al poseer más del 30% de área de vacíos se clasifican como ladrillos huecos, es decir, como ladrillos aptos únicamente para muros no portantes.

Figura 59.

Ensayo de área de vacíos de unidades de albañilería de arcilla



Nota. Elaboración propia

Los datos necesarios para calcular el porcentaje de vacíos de las 10 muestras ensayadas se encuentran en el Anexo 9.

- Ladrillos de concreto patrón, diseño A, B, F y J.

Tabla 111.

Porcentaje de área de vacíos de unidades de albañilería de concreto

Muestra	Porcentaje de área de vacíos promedio (%)	Clasificación de Ladrillo
Diseño patrón	11.146	Sólido (Portante)
Diseño A	11.210	Sólido (Portante)
Diseño B	10.907	Sólido (Portante)
Diseño F	11.120	Sólido (Portante)
Diseño J	11.196	Sólido (Portante)

Nota. Elaboración propia

Los resultados obtenidos para las unidades de concreto muestran porcentajes de área de vacíos que oscilan entre 10.907 % y 11.210 %, lo cual permite clasificarlos según la Norma Técnica E.070 como ladrillos sólidos. Esta clasificación implica que, normativamente, son aptos para su uso en muros portantes, al encontrarse por debajo del límite máximo del 30 % de vacíos permitido, como se resume en la Tabla 111.

La consistencia de estos valores en los distintos diseños de mezcla (patrón, A, B, F y J) sugiere que el proceso de fabricación, aunque artesanal, logró mantener cierto control en la geometría de los vacíos generados por el molde utilizado. No obstante, es importante destacar que dicho molde contaba únicamente con dos perforaciones circulares de 2 pulgadas de diámetro ubicadas en la cara de asiento del ladrillo, lo cual limita la cantidad total de vacíos y, en consecuencia, contribuye al elevado peso de las unidades.

En ese sentido, existe una oportunidad clara de optimización del diseño, mediante la incorporación de un mayor número de vacíos de menor diámetro y mejor distribución, lo que permitiría reducir el peso total del ladrillo sin exceder el 30 % de área vacía permitido por la normativa. Esta modificación podría tener un impacto positivo no solo en el transporte y

manipulación de las unidades, sino también en la reducción de la carga muerta que estos elementos aportan a la estructura.

Figura 60.

Ensayo de área de vacíos de unidades de albañilería de concreto



Nota. Elaboración propia

El informe detallado de las 10 muestras por cada diseño se encuentra en el Anexo 9.

4.2.2.4 Ensayo de Alabeo en unidades de albañilería.

- Ladrillos de arcilla.

Figura 61.

Medición de alabeo en unidad de albañilería de arcilla



Nota. Elaboración propia

Se ensayaron 10 unidades de albañilería de arcilla y se muestra los valores detallados del ensayo en el Anexo 10.

Tabla 112.

Alabeo de unidades de albañilería de arcilla

Muestra	Alabeo promedio (mm)	Clasificación de Ladrillo
KK	0.485	Tipo V

Nota. Elaboración propia

El ensayo de alabeo realizado en las unidades de arcilla arrojó un valor promedio de 0.485 mm, lo cual se encuentra muy por debajo del límite de 2 mm establecido por la Norma Técnica E.070 para la clasificación Tipo V. Esta categoría garantiza que las unidades poseen un nivel aceptable de planicidad y que pueden ser utilizadas sin restricciones desde el punto de vista del alabeo.

Se observó una ligera tendencia a caras cóncavas, lo que es usual en unidades cerámicas, aunque el control industrial del proceso de fabricación asegura que las deformaciones sean mínimas y uniformes. Este comportamiento contribuye a una mejor calidad del aparejo y regularidad en el paramento, reduciendo la necesidad de correcciones en obra.

- Ladrillos de concreto patrón, diseño A, B, F y J.

Tabla 113.

Alabeo de unidades de albañilería de concreto

Muestra	Alabeo promedio (mm)	Clasificación de Ladrillo
Diseño patrón	0.423	Tipo V
Diseño A	0.250	Tipo V
Diseño B	0.576	Tipo V
Diseño F	0.283	Tipo V
Diseño J	0.298	Tipo V

Nota. Elaboración propia

El informe de laboratorio de las 10 muestras que se analizaron por diseño se encuentra en el Anexo 10.

Los ladrillos de concreto, elaborados de forma artesanal bajo cinco diseños distintos, presentaron valores de alabeo promedio comprendidos entre 0.250 mm y 0.576 mm, todos dentro del límite permitido por la normativa para Tipo V. Esto indica que, desde el punto de vista del alabeo, las unidades son técnicamente aceptables para su uso.

No obstante, durante el ensayo se identificaron caras cóncavas y convexas en distintas unidades, lo cual refleja cierta inestabilidad geométrica producto del proceso manual de vaciado y curado. Esta condición, si bien no compromete el cumplimiento normativo, podría traducirse en irregularidades visuales o deficiencias en la calidad del paramento, requiriendo intervenciones adicionales como tarrajeo para nivelar las superficies y asegurar una apariencia uniforme.

Por tanto, aunque los resultados se mantuvieron dentro del rango admisible, la calidad superficial de las unidades de concreto aún puede mejorarse mediante ajustes en el proceso de fabricación, curado y control dimensional.

4.2.2.5 Ensayo de Absorción en unidades de albañilería.

- Ladrillos de arcilla.

Tabla 114.

Absorción de unidades de albañilería de arcilla

Muestra	Absorción promedio (%)	Cumple con la Norma E.070
KK	12.425	SÍ

Nota. Elaboración propia

El ensayo de absorción se hizo a 5 unidades de albañilería de arcilla, mostrándose el informe completo en el Anexo 11.

El ensayo de absorción realizado a las unidades de arcilla arrojó un valor promedio de 12.425 %, el cual se encuentra dentro del límite máximo permitido por la Norma Técnica

E.070, que establece un valor máximo de 22 % para considerar al ladrillo como apto para la construcción.

Este resultado confirma que los ladrillos de arcilla analizados poseen una capacidad de absorción adecuada, compatible con las exigencias constructivas para elementos de albañilería, especialmente en muros portantes donde el control de la humedad es fundamental para preservar la durabilidad del mortero y el desempeño estructural.

Cabe resaltar que el comportamiento observado corresponde a un producto comercial mecanizado, lo cual favorece la homogeneidad en la porosidad y en la estructura interna del ladrillo, aspectos que influyen directamente en su capacidad de absorción de agua.

- Ladrillos de concreto patrón, diseño A, B, F y J.

Tabla 115.

Absorción de unidades de albañilería de concreto

Muestra	Absorción promedio (%)	Cumple con la Norma E.070
Diseño patrón	3.685	SÍ
Diseño A	3.360	SÍ
Diseño B	3.719	SÍ
Diseño F	3.577	SÍ
Diseño J	3.790	SÍ

Nota. Elaboración propia

Por cada diseño se ensayaron 5 unidades de albañilería de concreto, y los datos especificados del ensayo de absorción se encuentran en el Anexo 11.

En el caso de los ladrillos de concreto, los resultados obtenidos en el ensayo de absorción para todos los diseños (patrón, A, B, F y J) se mantuvieron muy por debajo del límite establecido por la norma, con valores que oscilan entre 3.360 % y 3.790 %. Esto indica que los materiales empleados —incluyendo el caucho granulado y la perlita expandida— no comprometieron la densidad o integridad del material frente a la absorción de agua.

Este bajo nivel de absorción puede considerarse favorable desde el punto de vista de resistencia a la intemperie, durabilidad y adherencia con el mortero, aunque también es importante considerar que una absorción extremadamente baja podría afectar la capacidad de trabajo del ladrillo durante el asentado, dependiendo de las condiciones de obra.

La compactación lograda durante el proceso artesanal de moldeo, aun con sus limitaciones, permitió obtener unidades con estructura interna cerrada y con menor porosidad aparente, lo que se refleja directamente en estos valores bajos de absorción.

4.2.2.6 Ensayo de Contenido de humedad en unidades de albañilería.

- Ladrillos de arcilla.

Tabla 116.

Contenido de humedad de unidades de albañilería de arcilla

Muestra	Contenido de Humedad Promedio (%)
KK	0.132

Nota. Elaboración propia

El contenido de humedad promedio registrado en las unidades de arcilla tipo King Kong fue de 0.132 %, un valor muy bajo, típico en productos cerámicos que han sido fabricados industrialmente y almacenados adecuadamente. Esta condición favorece su uso inmediato en obra, ya que no requiere procesos de secado adicionales y asegura una buena interacción con el mortero durante el asentado, sin riesgo de absorción excesiva de agua.

En el Anexo 12 se encuentra el informe del ensayo realizado a las 5 muestras para obtener el contenido de humedad.

- Ladrillos de concreto patrón, diseño A, B, F y J.

Tabla 117.

Contenido de humedad de unidades de albañilería de concreto

Muestra	Contenido de Humedad promedio (%)
Diseño patrón	4.947
Diseño A	4.790
Diseño B	4.821
Diseño F	4.577
Diseño J	4.457

Nota. Elaboración propia

Los ladrillos de concreto artesanales, en sus diferentes diseños, presentaron contenidos de humedad promedio entre 4.457 % y 4.947 %, lo cual es esperable dado que estos elementos fueron elaborados manualmente y almacenados en condiciones de laboratorio, sin procesos forzados de secado ni curado prolongado.

Si bien estos valores no son excesivos, podrían afectar la adherencia con el mortero si no se permite un tiempo de oreo suficiente antes de su uso en obra. El contenido de humedad en este rango sugiere que los ladrillos aún retienen cierta cantidad de agua interna, posiblemente debido a su porosidad residual o humedad del curado reciente, lo que es normal en unidades recién fabricadas.

Aunque no impide su utilización, es recomendable que estas unidades sean evaluadas visual y manualmente antes de su aplicación en obra para asegurar que estén en un estado adecuado de secado superficial, especialmente si se emplean morteros con tiempos de fraguado rápido.

4.2.2.7 Ensayo de Succión en unidades de albañilería.

- Ladrillos de arcilla.

Tabla 118.

Succión de unidades de albañilería de arcilla

Muestra	Succión promedio (gr/200cm ² /min)	¿Necesita humedecerse antes del asentado? (Superior a 20 gr/200cm ² /min)
KK	34.673	SÍ

Nota. Elaboración propia

Se analizaron 5 muestras de ladrillos King Kong de arcilla para calcular la succión promedio. Los valores detallados se especifican en el Anexo 13.

Los ladrillos King Kong de arcilla presentaron una succión promedio de 34.673 gr/200 cm²/min, superando el límite establecido por la Norma Técnica E.070, que señala que valores superiores a 20 gr/200 cm²/min requieren el humedecimiento previo de las unidades antes de su colocación en obra. Este comportamiento implica que, de no realizarse el humedecimiento adecuado, el ladrillo podría absorber el agua del mortero de la junta, afectando negativamente la adherencia y resistencia del aparejo.

Este resultado es característico de unidades cerámicas con alta porosidad superficial, las cuales, aunque frecuentemente utilizadas en obra, demandan mayor control en el proceso constructivo para garantizar un adecuado desempeño.

- Ladrillos de concreto patrón, diseño A, B, F y J.

Tabla 119.

Succión de unidades de albañilería de concreto

Muestra	Succión promedio (gr/200cm²/min)	¿Necesita humedecerse antes del asentado? (Superior a 20 gr/200cm²/min)
Diseño patrón	7.107	NO
Diseño A	9.215	NO
Diseño B	9.481	NO
Diseño F	10.424	NO
Diseño J	12.669	NO

Nota. Elaboración propia

En cuanto a los ladrillos de concreto (diseño patrón, A, B, F y J), se obtuvo una succión promedio que varió entre 7.107 y 12.669 gr/200 cm²/min, es decir, muy por debajo del umbral de los 20 gr/200 cm²/min estipulado por la normativa. Esto implica que no requieren humedecimiento previo al asentado, facilitando el trabajo en obra y disminuyendo los tiempos de ejecución.

Este comportamiento está asociado a la menor porosidad superficial de las unidades de concreto, producto tanto de su composición como del proceso de compactación. Sin embargo, esta baja succión también puede representar una menor capacidad de adherencia inicial del mortero, por lo que es importante verificar el comportamiento en conjunto del sistema muro.

Figura 62.

Ensayo de succión de unidades de albañilería de concreto



Nota. Elaboración propia

En el Anexo 13, se encuentra los valores detallados del ensayo de succión que se hizo a las 5 muestras de cada uno de los diseños.

4.2.2.8 Ensayo de Resistencia a la compresión en unidades de albañilería.

- Ladrillos de arcilla.

Se ensayaron 5 unidades de albañilería de arcilla mecanizados para comprobar su resistencia a la compresión. Previamente a su ensayo se hizo el refrentado de yeso correspondiente según indica la Norma Técnica Peruana 399.613 (2017). En el Anexo 14 se encuentra el informe detallado del ensayo.

Tabla 120.

Resistencia a la compresión de unidades de albañilería de arcilla

Muestra	Resistencia Promedio f_b (kg/cm ²)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica f'_b (kg/cm ²)	Coefficiente de Variación (%)
KK	162.223	3.842	158.381	0.024

Nota. Elaboración propia

Los ladrillos de arcilla mecanizados tipo King Kong alcanzaron una resistencia promedio a la compresión de 162.223 kg/cm², con una desviación estándar baja (3.842 kg/cm²) y un coeficiente de variación de 0.024, lo que indica buena uniformidad en las muestras ensayadas. La resistencia característica fue de 158.381 kg/cm², permitiendo su clasificación como Tipo IV según la norma E.070.

Este resultado es consistente con lo que se espera de una unidad de albañilería industrializada de calidad aceptable, aunque su valor de resistencia se encuentra más cerca del límite inferior del rango para el Tipo IV (130–180 kg/cm²). La homogeneidad en el comportamiento mecánico refleja un proceso de fabricación controlado, adecuado para obras tradicionales estructurales.

Figura 63.

Refrentado de yeso



Nota. Elaboración propia

Figura 64.

Ensayo de resistencia a la compresión de unidades de albañilería de concreto



Nota. Elaboración propia

- Ladrillos de concreto patrón, diseño A, B, F y J.

Se realizó el ensayo a 5 muestras tomadas de forma aleatoria para cada edad (7, 14, 28 días). Haciendo un total de 15 ladrillos ensayados por cada diseño. Los valores obtenidos para calcular la resistencia a la compresión se encuentran en el Anexo 14.

Tabla 121.

Resistencia a la compresión de unidades de albañilería de concreto patrón $\phi=2''$

Edad (días)	Resistencia Promedio f_b (kg/cm ²)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica f'_b (kg/cm ²)	Coefficiente de Variación (%)
7	86.502	5.101	81.401	0.059
14	141.875	6.497	135.378	0.046
28	193.641	3.032	190.609	0.016

Nota. Elaboración propia

Tabla 122.*Resistencia a la compresión de unidades de albañilería de concreto patrón $\phi=3''$*

Edad (días)	Resistencia Promedio f_b (kg/cm ²)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica f'_b (kg/cm ²)	Coefficiente de Variación (%)
48	116.397	18.332	98.066	0.157

Nota. Elaboración propia

Tabla 123.*Resistencia a la compresión de unidades de albañilería de concreto, diseño A*

Edad (días)	Resistencia Promedio f_b (kg/cm ²)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica f'_b (kg/cm ²)	Coefficiente de Variación (%)
7	72.736	6.437	66.299	0.088
14	124.069	5.294	118.775	0.043
28	143.370	5.338	138.032	0.037

Nota. Elaboración propia

Tabla 124.*Resistencia a la compresión de unidades de albañilería de concreto, diseño B*

Edad (días)	Resistencia Promedio f_b (kg/cm ²)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica f'_b (kg/cm ²)	Coefficiente de Variación (%)
7	68.320	5.517	62.803	0.081
14	125.755	13.075	112.680	0.104
28	150.884	6.551	144.334	0.043

Nota. Elaboración propia

Tabla 125.*Resistencia a la compresión de unidades de albañilería de concreto, diseño F*

Edad (días)	Resistencia Promedio fb (kg/cm2)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica f'b (kg/cm2)	Coefficiente de Variación (%)
7	69.921	5.230	64.691	0.075
14	114.708	7.856	106.852	0.068
28	131.535	1.517	130.018	0.012

Nota. Elaboración propia

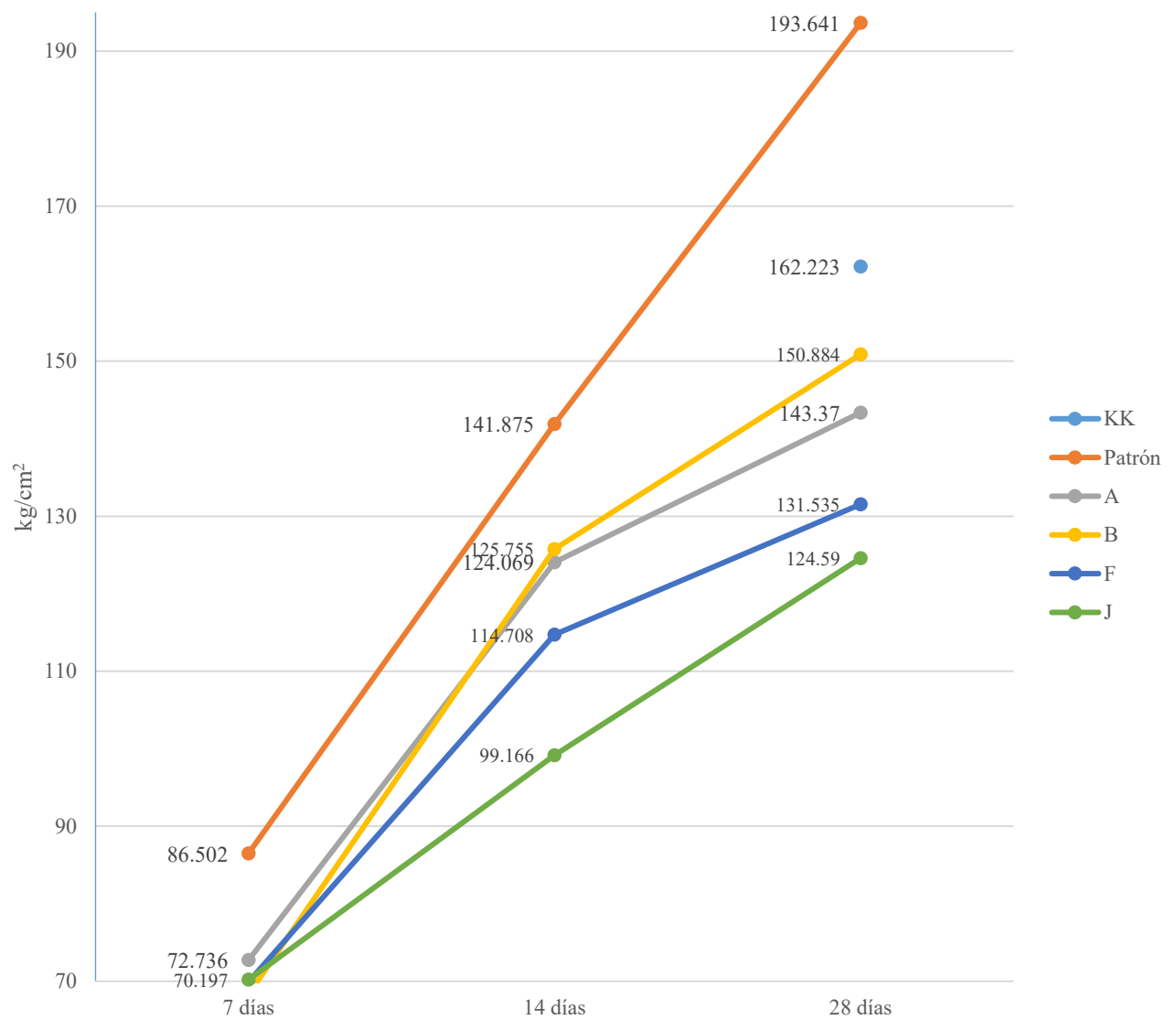
Tabla 126.*Resistencia a la compresión de unidades de albañilería de concreto, diseño J*

Edad (días)	Resistencia Promedio fb (kg/cm2)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica f'b (kg/cm2)	Coefficiente de Variación (%)
7	70.197	13.948	56.249	0.199
14	99.166	7.574	91.592	0.076
28	124.590	2.343	122.246	0.019

Nota. Elaboración propia

Figura 65.

Resistencia a la compresión vs. Edad del concreto según diseño de mezcla



Nota. Elaboración propia

Tabla 127.*Clasificación según resistencia a la compresión de unidades de albañilería*

Muestra	Resistencia Promedio fb (kg/cm ²)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica f'b (kg/cm ²)	Coeficiente de Variación (%)	Clasificación	
					Según NTP 399.601	Según E. 070
KK	162.223	3.842	158.381	0.024	14	Tipo IV
Diseño patrón (Ø=3")	116.397	18.332	98.066	0.157	10	Tipo III
Diseño patrón	193.641	3.032	190.609	0.016	17	Tipo V
Diseño A	143.370	5.338	138.032	0.037	14	Tipo IV
Diseño B	150.884	6.551	144.334	0.043	14	Tipo IV
Diseño F	131.535	1.517	130.018	0.012	10	Tipo IV
Diseño J	124.590	2.343	122.246	0.019	10	Tipo III

Nota. Elaboración propia

La clasificación de los ladrillos del diseño patrón según su resistencia a compresión fue de Tipo V para aquellos que se vaciaron en moldes con perforaciones de 2", sin embargo, podemos observar en la Tabla 127 que los ladrillos que se vaciaron en los moldes con perforaciones de 3" su resistencia bajó considerablemente clasificando como Tipo III. Por lo cual, se decidió no trabajar con los moldes de perforaciones de 3", ya que la resistencia a la compresión disminuiría conforme aumente la incidencia de caucho granulado y perlita mineral, bajando a su vez la clasificación. Por lo que se continuó el vaciado de los ladrillos en los moldes de 2" de perforación para el resto de los diseños.

En los diseños de concreto se observaron comportamientos diferenciados en función del tipo y proporción de reemplazo. El diseño patrón alcanzó el mejor desempeño con 193.641 kg/cm² y una clasificación Tipo V, superando incluso al ladrillo de arcilla. Esto demuestra que, en condiciones óptimas de dosificación, los ladrillo de concreto pueden lograr una resistencia considerablemente alta.

El diseño A, con 5% de caucho, obtuvo 143.370 kg/cm², pero fue superado por el diseño B, que además de mantener el 5% de caucho, incorporó 5% de perlita, logrando 150.884 kg/cm². Este patrón ya se había observado en los ensayos de probetas, lo que sugiere que la adición moderada de perlita podría estar generando una mejora estructural posiblemente asociada a una optimización en la compactación o a una mejor distribución de esfuerzos dentro de la matriz cementicia.

No obstante, este efecto positivo no se mantiene en diseños con mayor porcentaje de caucho. En el diseño F (10% caucho, 5% perlita) y el diseño J (15% caucho, 5% perlita), la resistencia cae a 131.535 kg/cm² y 124.590 kg/cm² respectivamente, ambos por debajo incluso del ladrillo de arcilla, y con una clasificación de Tipo IV y Tipo III, respectivamente. Esto sugiere que hay un umbral en el contenido de caucho a partir del cual su efecto negativo en la resistencia se hace más notorio, probablemente debido a la baja adherencia del caucho con la matriz de cemento o a su efecto en la porosidad global de la mezcla.

Asimismo, el gráfico de crecimiento por edades muestra que el desarrollo de resistencia fue más lento y menos pronunciado en los diseños modificados, en comparación con el patrón. Esto puede estar vinculado de igual forma a la deficiente adherencia del caucho en la mezcla o alta porosidad, que dificultan el desarrollo de una matriz cementicia continua y eficiente.

4.2.2.9 Ensayo de Resistencia a la compresión de probetas de mortero.

En la siguiente tabla se muestra la resistencia a la compresión de probetas de mortero.

Tabla 128.

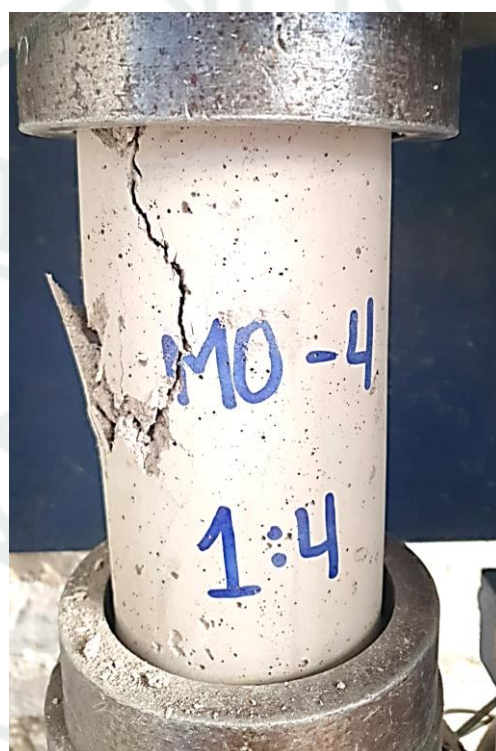
Resistencia a la compresión de probetas de mortero

Edad (días)	Resistencia Promedio f_b (kg/cm ²)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica f'_b (kg/cm ²)	Coefficiente de Variación (%)
7	90.060	0.701	89.359	0.008
14	101.223	0.764	100.459	0.008
28	113.403	1.571	111.832	0.014

Nota. Elaboración propia

Figura 66.

Ensayo de resistencia a la compresión de probetas de mortero



Nota. Elaboración propia

El mortero tipo P2 dosificado en proporción 1:4 (cemento:arena gruesa) evidenció un comportamiento mecánico progresivo adecuado en términos de resistencia a la compresión. A

los 28 días, se alcanzó una resistencia promedio de 113.403 kg/cm², lo cual es consistente con los valores esperados para un mortero de uso estructural en elementos de albañilería confinada.

Los resultados obtenidos en edades tempranas (90.060 kg/cm² a 7 días y 101.223 kg/cm² a 14 días) reflejan un desarrollo gradual de la resistencia, con incrementos del orden del 12.4% entre los 7 y 14 días, y del 11.9% entre los 14 y 28 días, lo que indica un adecuado proceso de hidratación y ganancia de resistencia en el tiempo.

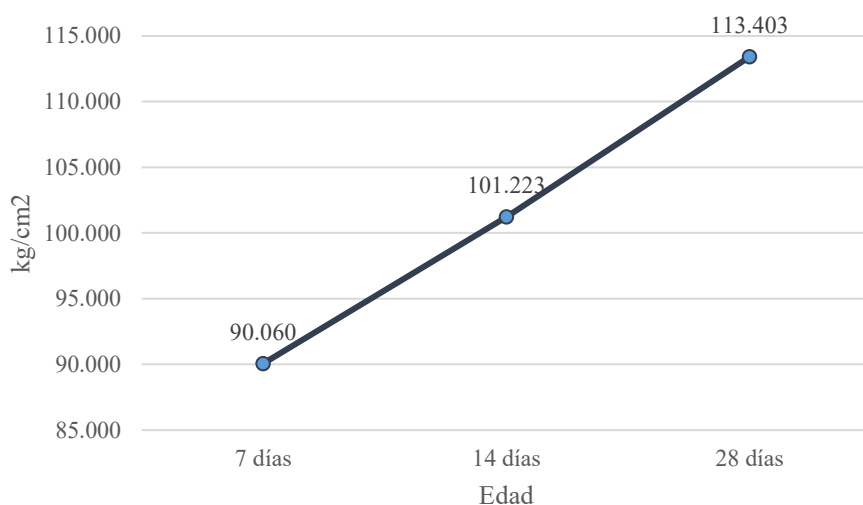
Desde el punto de vista estadístico, los coeficientes de variación son excepcionalmente bajos (entre 0.8% y 1.4%), lo cual sugiere una alta homogeneidad entre las muestras ensayadas y una correcta ejecución tanto en la elaboración como en el curado de las probetas. Asimismo, la desviación estándar mínima refuerza esta consistencia, otorgando mayor confiabilidad a los valores obtenidos.

La elección de este mortero como material para el asentado de pilas y muretes resulta técnicamente justificada, pues su resistencia característica a los 28 días ($f'_b = 111.832 \text{ kg/cm}^2$) garantiza un desempeño mecánico aceptable frente a las exigencias del sistema constructivo propuesto. No obstante, es importante considerar que esta dosificación no incorpora aditivos ni correcciones por absorción del sustrato, lo cual podría tener un impacto en obra cuando se empleen ladrillos de concreto con baja succión. Por tanto, se sugiere que estos aspectos sean tratados dentro de las recomendaciones constructivas.

Se ensayaron 3 muestras por cada edad del mortero (7, 14, y 28 días), el informe con los valores detallados están en el Anexo 15.

Figura 67.

Resistencia a la compresión axial en mortero 1:4



Nota. Elaboración propia

4.2.2.10 Ensayo de Resistencia a la compresión en pilas.

El ensayo nos permite identificar el modo de falla y resistencia a la compresión de cada pila correspondiente a los diseños evaluados, así como a las muestras elaboradas con ladrillos de arcilla mecanizados.

- Ladrillos de arcilla.

Tabla 129.

Resistencia a la compresión en pilas de unidades de albañilería de arcilla

Muestra	Resistencia Promedio f_b (kg/cm ²)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica f'_b (kg/cm ²)	Coefficiente de Variación (%)
KK	78.279	3.572	74.707	0.046

Nota. Elaboración propia

Las pilas construidas con ladrillos cerámicos tipo King Kong de la marca comercial *Pirámide* alcanzaron una resistencia promedio de 78.279 kg/cm², superando el mínimo requerido por la Norma Técnica E.070 (65 kg/cm²).

Sin embargo, el tipo de falla observada, una separación del frente superficial, sugiere una fragilidad estructural asociada a su porcentaje de vacíos, lo que compromete no solo la resistencia, sino también la durabilidad y la adherencia efectiva del mortero. Esta condición es típica en unidades de arcilla altamente perforadas y puede representar un punto débil en la zona de transmisión de esfuerzos compresivos, especialmente en situaciones de carga excéntrica o impacto.

La información detallada de este ensayo se encuentra en el Anexo 16.

- Ladrillos de concreto patrón, diseño A, B, F y J.

Tabla 130.

Resistencia a la compresión de pilas de unidades de albañilería de concreto

Muestra	Resistencia Promedio f_b (kg/cm²)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica f'_b (kg/cm²)	Coefficiente de Variación (%)	Según E. 070
Diseño patrón	153.984	3.572	150.412	0.046	Tipo V
Diseño A	137.645	13.183	124.462	0.096	Tipo IV
Diseño B	139.936	4.990	134.946	0.036	Tipo IV
Diseño F	118.174	5.487	112.687	0.046	Tipo IV
Diseño J	115.941	0.990	114.951	0.009	Tipo IV

Nota. Elaboración propia

Figura 68.

Ensayo de resistencia a la compresión de pilas con ladrillos de concreto



Nota. Elaboración propia

La información detallada de este ensayo se encuentra en el Anexo 16.

Los resultados de resistencia a compresión en pilas construidas con ladrillos de concreto evidencian un desempeño general muy superior al de los ladrillos cerámicos, con valores que van desde los 115.941 kg/cm² (Diseño J) hasta los 153.984 kg/cm² (Diseño patrón), lo que los ubica con holgura dentro de las clasificaciones Tipo IV y V según la E.070.

Sin embargo, al analizar críticamente el comportamiento de los diseños modificados con caucho granulado y perlita expandida, se observa una disminución sostenida en la resistencia conforme aumenta el porcentaje de estos aditivos, lo que responde al carácter liviano y poco rígido de dichos componentes. A pesar de ello, hay un patrón relevante que se mantiene con respecto a los ensayos previos con probetas de concreto: el diseño B (5% caucho + 5% perlita) supera al diseño A (5% caucho + 0% perlita), alcanzando 139.936 kg/cm² frente a 137.645 kg/cm², lo cual refuerza la hipótesis de que, en pequeñas proporciones, la incorporación de perlita puede aportar a una mejor distribución de vacíos o mejorar ciertas características físicas de la mezcla.

Este patrón, sin embargo, no se sostiene para diseños con mayores porcentajes de caucho (F y J), donde la resistencia desciende notablemente, lo que refuerza la idea de que el uso de caucho debe ser limitado si se busca mantener niveles aceptables de resistencia estructural. El diseño F (10% caucho + 5% perlita) y J (15% caucho + 5% perlita) presentaron 118.174 y 115.941 kg/cm² respectivamente, y aunque cumplen la norma, ya no muestran mejoras ni equilibrio mecánico razonable, por lo que su empleo debe ser justificado por otros beneficios (acústica, impacto ambiental, etc.), no por resistencia.

Además, las fallas observadas en las pilas, mayoritariamente grietas verticales que atraviesan la unidad y el mortero, indican una transferencia de carga relativamente eficiente. Sin embargo, en ciertos casos se evidenció separación entre mortero y ladrillo, posiblemente debido a deficiencias en la adherencia o problemas de ejecución, lo que debería abordarse con recomendaciones constructivas específicas.

4.2.2.11 Ensayo de Resistencia a la compresión diagonal en muretes.

- Ladrillos de arcilla.

Tabla 131.

Resistencia a la compresión diagonal de muretes de unidades de albañilería de arcilla

Muestra	Resistencia Promedio f_b (kg/cm ²)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica f'_b (kg/cm ²)	Coefficiente de Variación (%)
KK	10.156	0.077	10.079	0.077

Nota. Elaboración propia

Luego de ensayar tres muretes asentados con ladrillos de arcilla King Kong (marca Pirámide, 18 huecos) alcanzaron una resistencia promedio a compresión diagonal de 10.156 kg/cm², cumpliendo lo exigido por la Norma Técnica E.070 para este tipo de unidades.

A pesar del cumplimiento normativo, es importante destacar que el tipo de falla registrado (una rotura en forma escalonada centrada en el murete) evidencia una débil

adherencia entre ladrillos y mortero, lo que compromete el funcionamiento integral del conjunto ante esfuerzos de corte diagonal. Esta condición puede explicarse por la baja succión de agua en la superficie de los ladrillos cerámicos industriales, lo que dificulta la formación de un vínculo mecánico eficaz con el mortero.

Así, si bien la resistencia cumple, el comportamiento estructural del murete no es óptimo, ya que se espera que la falla diagonal atravesase tanto ladrillos como juntas de mortero para demostrar una interacción adecuada entre ambos elementos. El tipo de falla observada sugiere una actuación parcial o disgregada del sistema, lo que podría limitar su capacidad frente a cargas combinadas o sismo.

- Ladrillos de concreto patrón, diseño A, B, F y J.

Tabla 132.

Resistencia a la compresión diagonal de muretes de unidades de albañilería de concreto

Muestra	Resistencia Promedio f_b (kg/cm²)	Desviación estándar (σ)	Resistencia Característica f'_b (kg/cm²)	Coefficiente de Variación (%)
Diseño patrón	10.410	0.142	10.268	0.139
Diseño A	9.444	0.088	9.357	0.095
Diseño B	9.689	0.095	9.595	0.100
Diseño F	8.520	0.037	8.483	0.044
Diseño J	7.801	0.023	7.778	0.030

Nota. Elaboración propia

Figura 69.

Ensayo de resistencia a la compresión diagonal de muretes de unidades de albañilería de concreto



Nota. Elaboración propia

La información detallada de este ensayo se encuentra en el Anexo 17.

En el caso de los muretes con ladrillos de concreto, el diseño patrón obtuvo la mayor resistencia a corte diagonal con 10.410 kg/cm^2 , superando incluso al ladrillo de arcilla. Este valor disminuye conforme se incrementa la presencia de caucho y perlita, alcanzando solo 7.801 kg/cm^2 en el diseño J (15% caucho + 5% perlita).

Una vez más, se reafirma un patrón ya observado en otros ensayos: el diseño B (5% caucho + 5% perlita) logra mejores resultados que el diseño A (5% caucho + 0% perlita), con una resistencia de 9.689 frente a 9.444 kg/cm^2 . Esto sugiere que, en proporciones moderadas, la incorporación de perlita podría estar favoreciendo la compactación de la mezcla o el comportamiento bajo corte.

No obstante, los diseños F y J muestran una caída crítica de la resistencia, confirmando que el exceso de caucho debilita la cohesión interna y la capacidad de transferencia de esfuerzos entre unidades y mortero. El tipo de falla fue igualmente escalonada en la mayoría de casos,

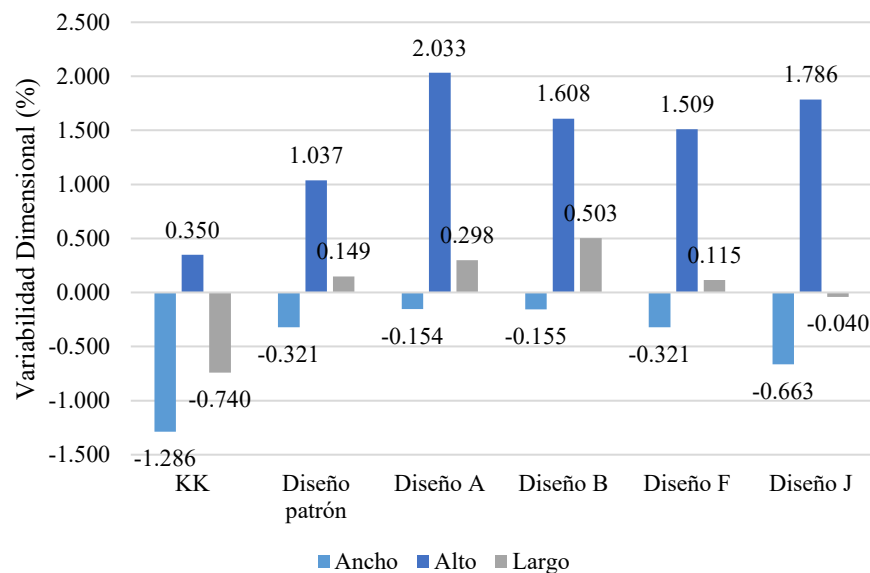
indicando una falta de adherencia efectiva en las juntas, ya sea por deficiencia en la superficie del ladrillo (lisa o poco porosa) o por características del mortero.

Esto último debe ser considerado cuidadosamente, ya que la baja adherencia anula los beneficios estructurales esperados de una unidad resistente, debilitando el sistema frente a esfuerzos diagonales, los cuales son críticos en zonas sísmicas.

4.2.3 Actividad 3. Comparación de resultados.

Figura 70.

Comparación de variabilidad dimensional entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J



Nota. Elaboración propia

El análisis comparativo de la variación dimensional entre los ladrillos de arcilla y los ladrillos de concreto evidencia diferencias importantes, tanto en los niveles de precisión dimensional como en el contexto de fabricación de cada tipo de unidad.

Los ladrillos de arcilla, fabricados industrialmente mediante procesos mecanizados, presentan una menor dispersión dimensional, con variaciones máximas del -1.286 % en el ancho. Esta regularidad es propia de productos estandarizados y resulta beneficiosa para lograr

aparejos más precisos y una mejor presentación superficial del muro sin necesidad de mayores correcciones.

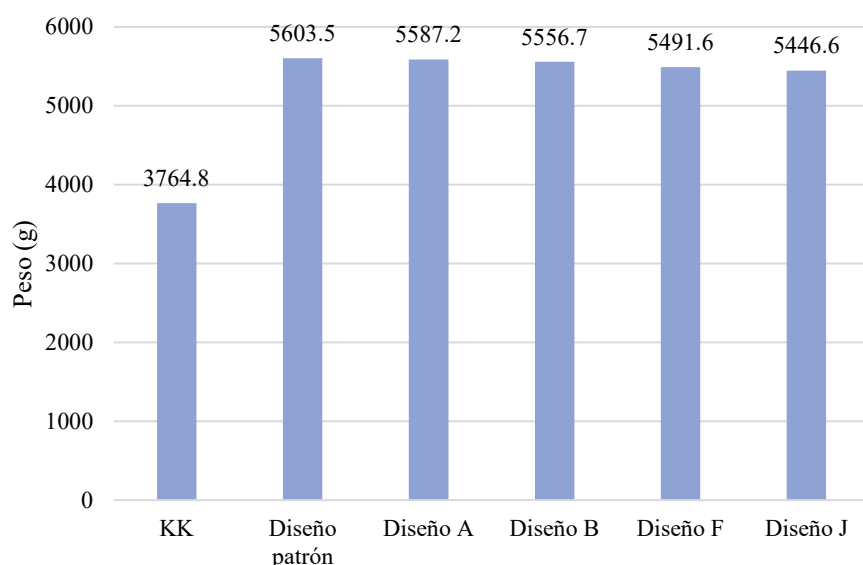
En contraste, los ladrillos de concreto fueron elaborados manualmente como parte del presente estudio experimental, lo cual se refleja en una mayor variabilidad en las dimensiones registradas, especialmente en la altura (hasta 2.033 % de variación en el diseño A). A pesar de estas fluctuaciones, todas las unidades cumplieron con los límites establecidos por la Norma Técnica E.070, clasificándose como Tipo V.

No obstante, es importante señalar que esta variabilidad dimensional, aunque aceptable desde el punto de vista normativo, puede repercutir negativamente en la estética final del muro, generando superficies con rugosidades o desniveles perceptibles. Esto puede hacer necesario el uso de tarrajeo u otros acabados niveladores para corregir las diferencias entre piezas y obtener un acabado más uniforme. En ese sentido, las unidades de concreto fabricadas manualmente podrían no ser recomendables para sistemas de albañilería con acabados expuestos, a menos que se optimicen los procesos de producción o se considere previamente la aplicación de recubrimientos.

En conclusión, aunque ambos tipos de unidad cumplen con la norma en cuanto a variación dimensional, su impacto práctico en obra varía significativamente. Los ladrillos de arcilla ofrecen una mayor regularidad geométrica, mientras que los de concreto, aun siendo más variables, demuestran viabilidad técnica con posibilidad de mejora, especialmente si se busca su empleo en sistemas con acabado superficial.

Figura 71.

Comparación de peso entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J



Nota. Elaboración propia

Los ladrillos de concreto presentan pesos promedio sustancialmente mayores, con valores que oscilan entre 5603.5 g (diseño patrón) y 5446.6 g (diseño J), mientras que los ladrillos de arcilla registran un peso promedio considerablemente menor, de 3764.8 g. Esta diferencia representa un incremento de aproximadamente 49 % en la carga por unidad, lo que se traduce directamente en una mayor carga muerta para la edificación.

Este incremento en la carga estructural tiene implicancias técnicas importantes: demanda mayor capacidad portante de los cimientos, refuerzo en elementos estructurales complementarios y un eventual aumento en los costos constructivos. En contextos donde se prioriza la eficiencia estructural y el uso racional de materiales, esta característica puede representar una desventaja.

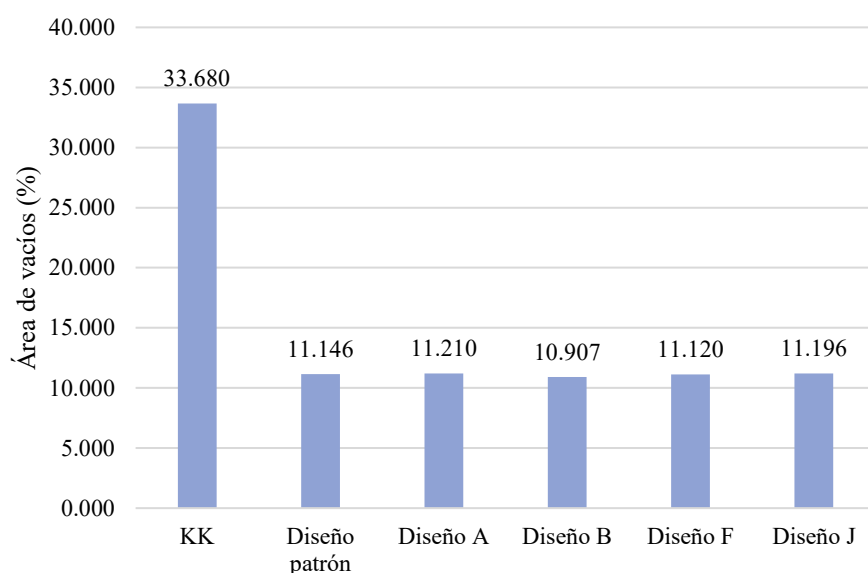
Si bien los diseños de mezcla con incorporación de caucho granulado y perlita permiten cierta reducción del peso, los valores alcanzados aún se mantienen por encima de los obtenidos en unidades de arcilla. Por tanto, la densidad de los ladrillos de concreto, en su estado actual,

representa un factor estructural desfavorable, especialmente si no se logra compensar con un desempeño mecánico superior.

En contraste, los ladrillos de arcilla, al ser más livianos, reducen la carga muerta transmitida por los muros portantes, lo que favorece diseños más eficientes y livianos, particularmente en edificaciones de una o dos plantas.

Figura 72.

Comparación de porcentaje de área de vacíos entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J



Nota. Elaboración propia

El ensayo de porcentaje de vacíos revela una diferencia fundamental en el comportamiento de las unidades de arcilla y concreto en términos de clasificación normativa y potencial estructural. Los ladrillos de arcilla comerciales, con un porcentaje promedio de vacíos de 33.680 %, se clasifican formalmente como huecos, lo que según la Norma Técnica E.070 los catalogaría como no portantes. No obstante, cabe señalar que estos ladrillos son ampliamente utilizados en la práctica constructiva nacional para muros portantes, gracias a su fabricación industrial estandarizada, control de calidad, y comprobado desempeño en obra.

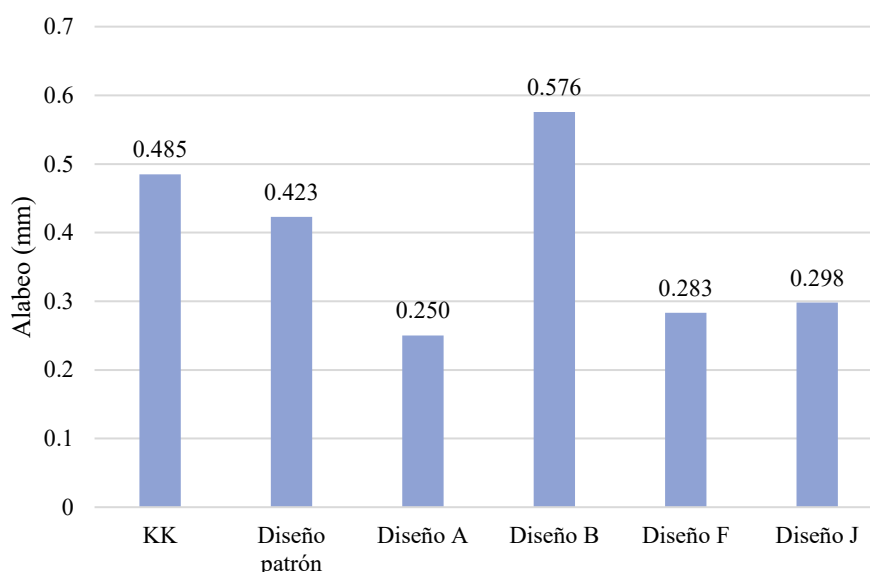
En contraste, los ladrillos de concreto artesanales, elaborados en diferentes diseños de mezcla, presentan porcentajes de vacíos considerablemente más bajos (entre 10.907 % y 11.210 %), por lo cual se clasifican como sólidos y, en principio, aptos para muros portantes. Esta condición representa una ventaja normativa frente a los ladrillos de arcilla, sin embargo, su aplicabilidad estructural real requiere un análisis más amplio, dado que otros factores como el exceso de peso, la irregularidad dimensional y la variabilidad artesanal del proceso productivo pueden contrarrestar este beneficio técnico.

Es importante señalar que los moldes utilizados para la fabricación de las unidades de concreto contaban únicamente con dos perforaciones circulares de 2 pulgadas de diámetro ubicadas en la cara de asiento. Por tanto, existe un margen de optimización en el diseño del molde, que permitiría incrementar el número de vacíos, por ejemplo, utilizando perforaciones de menor diámetro distribuidas de forma más uniforme. Esta modificación podría contribuir a reducir significativamente el peso de las unidades, sin comprometer su clasificación como ladrillos sólidos, siempre y cuando el área total de vacíos no supere el 30 % establecido por la normativa.

En consecuencia, si bien los ladrillos de concreto cumplen con el criterio normativo del porcentaje de vacíos, su desempeño estructural integral aún se ve limitado por otros aspectos, y su uso en muros portantes no puede considerarse viable en su estado actual. En cambio, los ladrillos de arcilla, a pesar de exceder el 30 % de vacíos en este ensayo específico, continúan siendo una alternativa confiable y validada en el sector formal de la construcción.

Figura 73.

Comparación de alabeo entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J



Nota. Elaboración propia

Tanto los ladrillos de arcilla como los de concreto cumplieron con los requerimientos establecidos por la norma E.070 para el alabeo, clasificando como Tipo V al presentar deformaciones superficiales menores a 2 mm. Sin embargo, la comparación entre ambos tipos revela diferencias relevantes en cuanto a calidad de acabado y estabilidad dimensional.

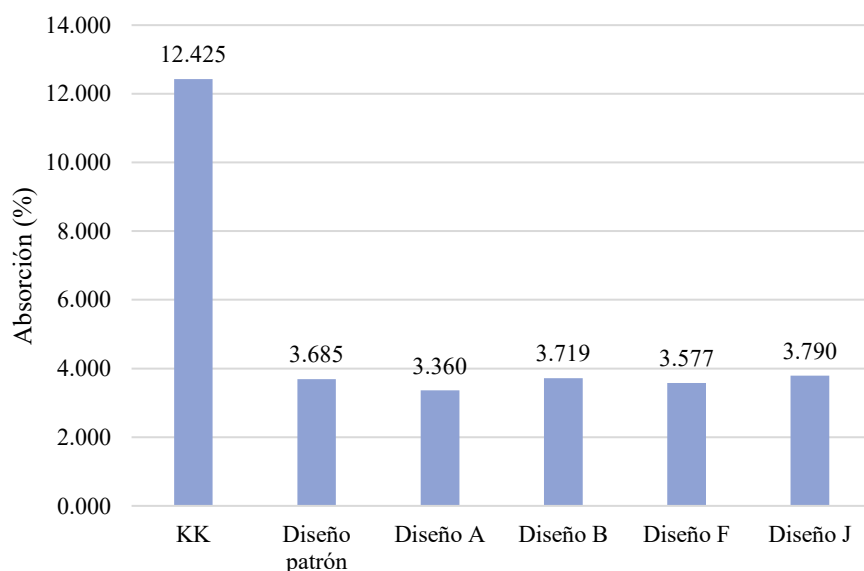
Los ladrillos de arcilla, fabricados mediante procesos mecanizados, presentan un alabeo leve, con características geométricas más consistentes y controladas, lo cual favorece una mayor precisión en el aparejo y menor requerimiento de correcciones en obra. Por otro lado, los ladrillos de concreto, de fabricación artesanal, mostraron una mayor dispersión en la forma superficial, con la presencia de caras tanto cóncavas como convexas, lo que puede repercutir negativamente en la estética del muro terminado.

Esta variabilidad dimensional, aunque dentro del rango permitido, puede dificultar el alineamiento y nivelado durante la construcción, haciendo necesario el uso de acabados adicionales como tarrajeo para corregir imperfecciones. En consecuencia, aunque ambos tipos

cumplen normativamente, los ladrillos de arcilla presentan un comportamiento más favorable en este ensayo, reflejo de una mayor regularidad y calidad en su fabricación.

Figura 74.

Comparación de absorción entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J



Nota. Elaboración propia

Ambos tipos de ladrillos cumplen con los requerimientos de absorción establecidos por la Norma E.070; sin embargo, existen diferencias sustanciales en su comportamiento. Los ladrillos de concreto presentaron niveles notablemente más bajos de absorción, en comparación con los de arcilla (3.3 % a 3.8 % frente a 12.4 %), lo cual refleja una estructura interna más compacta y menos porosa.

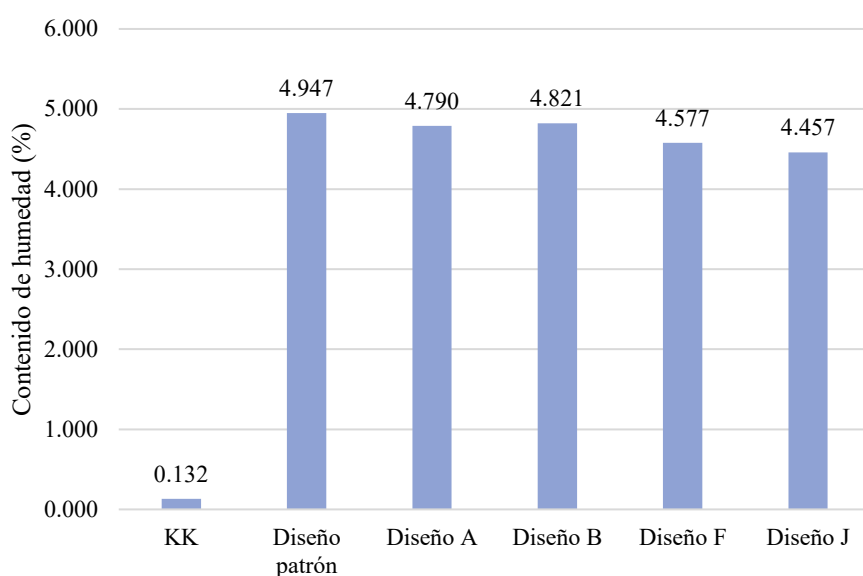
Esta baja absorción puede ser considerada ventajosa en términos de durabilidad, ya que reduce la susceptibilidad del ladrillo a la penetración de humedad y a los ciclos de humedecimiento y secado. No obstante, en la práctica constructiva, una absorción moderada favorece la adherencia con el mortero y mejora la trabajabilidad durante el asentado, especialmente en climas cálidos o de baja humedad. En ese sentido, los ladrillos de arcilla, con una absorción media, ofrecen un equilibrio más favorable entre capacidad de secado y adherencia, sin llegar a niveles críticos.

Además, los valores extremadamente bajos en los ladrillos de concreto, aunque normativamente aceptables, deben ser considerados con cautela, ya que podrían requerir prehumedecimiento previo al uso en obra para evitar la deshidratación del mortero al momento del asentado.

En resumen, ambos tipos de ladrillo son técnicamente aptos, pero presentan ventajas y limitaciones diferentes que deben ser evaluadas en función del sistema constructivo y las condiciones ambientales de uso.

Figura 75.

Comparación de contenido de humedad entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J



Nota. Elaboración propia

Al comparar el contenido de humedad entre ambos tipos de ladrillos, se observa una diferencia marcada: mientras los ladrillos de arcilla presentan un contenido extremadamente bajo (0.132 %), los ladrillos de concreto alcanzan valores cercanos al 5 %. Esta diferencia responde directamente a las condiciones de fabricación: los primeros son productos comerciales cocidos en hornos industriales, mientras que los segundos fueron elaborados artesanalmente con materiales cementantes y métodos de curado simples.

El contenido de humedad en los ladrillos de concreto no representa una desventaja inmediata, pero sí implica que se requiere mayor atención antes de su uso en obra, ya que su alta humedad podría:

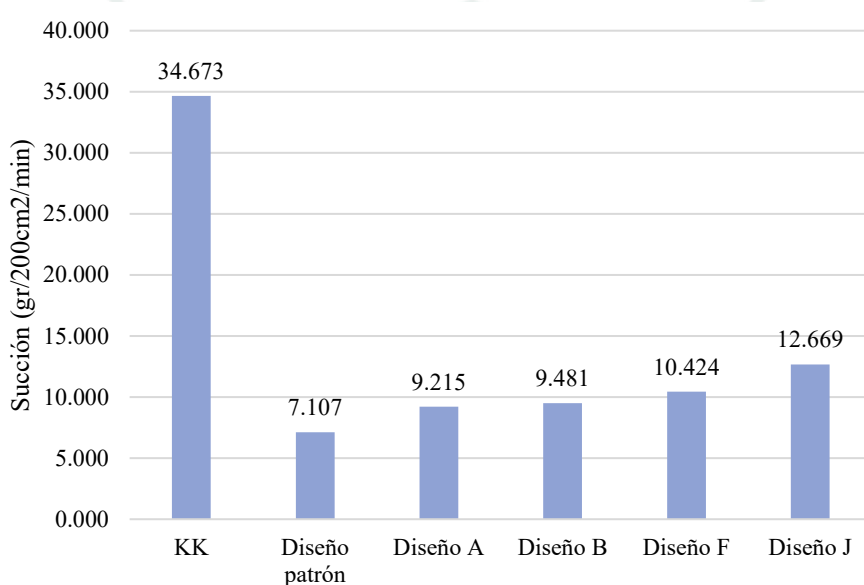
- Interferir en la adherencia con el mortero si no se ha presecado adecuadamente.
- Aumentar la variabilidad en el desempeño mecánico y dimensional si el curado no fue uniforme.
- Influir en la aparición de eflorescencias si no se controla la migración de sales solubles tras la colocación.

En contraste, los ladrillos de arcilla, al tener un contenido de humedad casi nulo, brindan mayor previsibilidad y estabilidad desde su recepción, favoreciendo su empleo inmediato y confiable.

En este aspecto, los ladrillos de arcilla presentan una ventaja significativa sobre los de concreto en términos de manejo, secado y preparación previa a la instalación.

Figura 76.

Comparación de succión entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J



Nota. Elaboración propia

Al comparar los resultados del ensayo de succión entre los ladrillos de arcilla y los de concreto, se observa una diferencia notoria en su capacidad de succión.

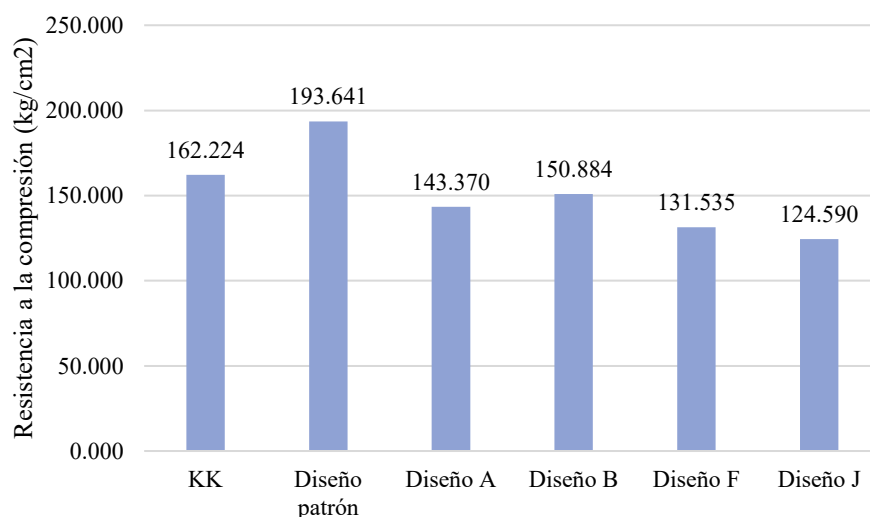
Los ladrillos de arcilla mecanizados presentaron una succión promedio de 34.673 gr/200 cm²/min, lo cual excede el límite de 20 gr/200 cm²/min que establece la Norma Técnica E.070. En consecuencia, estos ladrillos requieren ser humedecidos antes del asentado para evitar que absorban el agua del mortero, lo que podría perjudicar la adherencia. Si bien esto implica un paso adicional durante la ejecución de obra, también puede favorecer una mayor interacción con la pasta del mortero si se controla adecuadamente.

Por otro lado, los ladrillos de concreto artesanales presentaron valores de succión considerablemente menores, entre 7.107 y 12.669 gr/200 cm²/min, lo cual los exime de ser humedecidos previamente. No obstante, esta baja capacidad de succión podría generar una adherencia deficiente con el mortero, debido a que la unidad no absorbe parte del agua de la mezcla y, por tanto, la hidratación y anclaje mecánico del mortero se ven limitados. Este comportamiento ha sido reportado en diversas investigaciones sobre unidades con baja porosidad superficial o escasa absorción inicial.

En resumen, aunque los ladrillos de concreto cumplen normativamente con el ensayo de succión, su bajo nivel puede no ser favorable en la práctica para asegurar una buena adherencia en juntas de mortero. En contraste, los ladrillos de arcilla, aunque exigen un proceso previo de humedecimiento, podrían generar un enlace más eficaz con el mortero, siempre que este procedimiento se realice correctamente.

Figura 77.

Comparación de resistencia a la compresión entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J



Nota. Elaboración propia

Al comparar los ladrillos de concreto con los de arcilla, se observa que el diseño patrón supera ampliamente al ladrillo King Kong tanto en resistencia promedio como en clasificación normativa, alcanzando Tipo V frente al Tipo IV del ladrillo de arcilla. Sin embargo, esta ventaja se mantiene solo mientras se controle el diseño geométrico del molde: cuando se aumentó el diámetro de las perforaciones, la resistencia cayó drásticamente a Tipo III, por lo que el diseño debe ser cuidadosamente optimizado para garantizar desempeño estructural.

Además, varios de los diseños con reemplazo parcial (A, B y F) también logran igualar o superar la resistencia del ladrillo de arcilla, manteniéndose dentro del rango Tipo IV. Solo el diseño J desciende a una clasificación inferior (Tipo III), lo que evidencia que si bien los reemplazos pueden funcionar hasta cierto punto, su incremento desmedido afecta negativamente la capacidad portante del material.

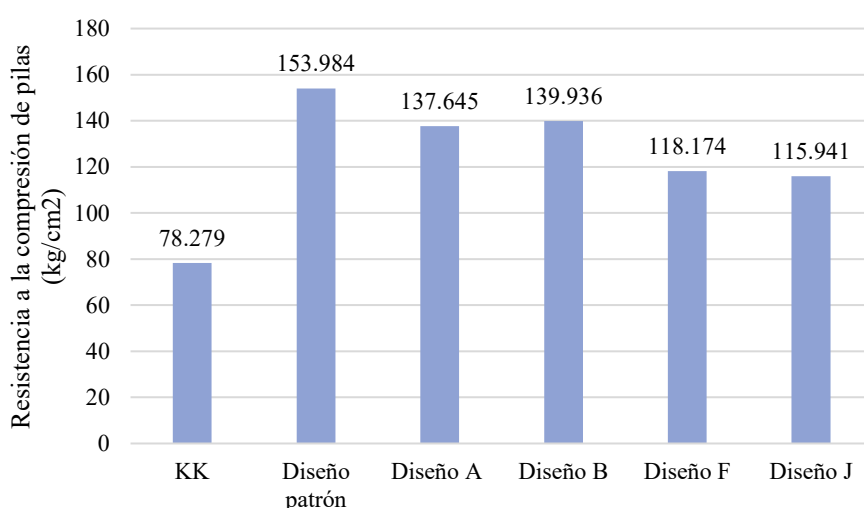
En conjunto, los resultados muestran que es posible alcanzar resistencias adecuadas utilizando materiales alternativos, siempre que se mantenga un control riguroso sobre las

proporciones. Además, los patrones de comportamiento observados en las probetas se mantuvieron en los ensayos con unidades de albañilería, lo que da mayor confiabilidad a las tendencias detectadas.

En resumen, los ladrillos de concreto ofrecen mayor potencial estructural que los de arcilla si se diseñan adecuadamente. No obstante, es claro que hay un límite técnico a la incorporación de materiales reciclados, particularmente el caucho, más allá del cual el desempeño mecánico se ve comprometido.

Figura 78.

Comparación de resistencia a la compresión de pilas entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J



Nota. Elaboración propia

La comparación entre las pilas construidas con ladrillos de arcilla y las de concreto revela una brecha considerable en resistencia a compresión, tanto en términos absolutos como en consistencia. Mientras que los ladrillos cerámicos apenas alcanzan 78.279 kg/cm², los de concreto, incluso en sus versiones modificadas con materiales reciclados, superan holgadamente los 115 kg/cm².

Además, mientras que los ladrillos de arcilla muestran fallas asociadas a su configuración hueca, como la pérdida superficial del frente; los de concreto tienden a fallar de

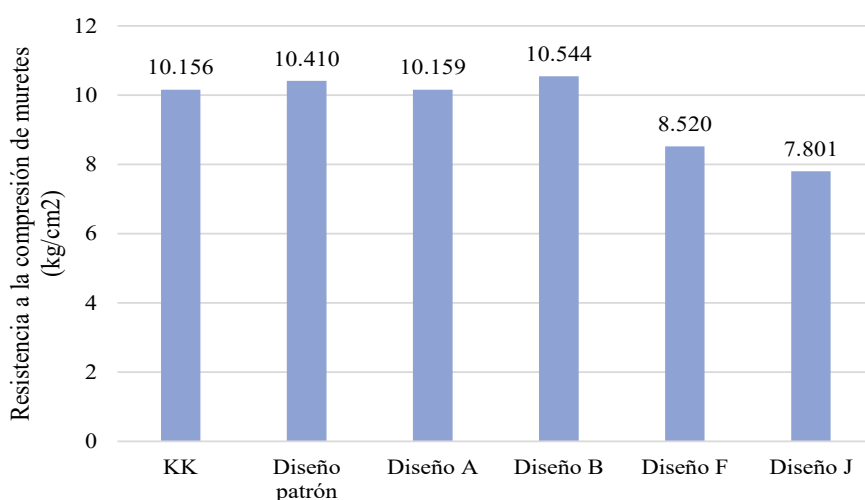
forma más íntegra, indicando una mayor cohesión entre los elementos de la pila (unidad + mortero).

No obstante, el concreto no está exento de desafíos. La incorporación de materiales alternativos como caucho y perlita puede afectar negativamente el desempeño estructural si no se dosifican adecuadamente. Aunque existe evidencia de que pequeñas proporciones pueden incluso mejorar el comportamiento (como el caso del diseño B), la sobreutilización de estos aditivos deriva en un descenso crítico de la resistencia, lo que limita su aplicabilidad estructural si no se acompaña de un rediseño integral del sistema.

En conclusión, los ladrillos de concreto superan con claridad a los de arcilla en términos de resistencia a compresión, aunque su potencial real solo se concretará si se optimizan las proporciones de aditivos, se controla rigurosamente la ejecución, y se garantiza una adecuada adherencia con el mortero.

Figura 79.

Comparación de resistencia a la compresión diagonal de muretes entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J



Nota. Elaboración propia

A diferencia del ensayo de compresión axial en pilas, donde los ladrillos de concreto superaron ampliamente a los de arcilla, en los ensayos de compresión diagonal la diferencia no

es tan marcada: el ladrillo King Kong (10.156 kg/cm^2) se encuentra muy cerca del diseño patrón de concreto (10.410 kg/cm^2). Esta paridad en resistencia, sin embargo, debe ser analizada junto con el tipo de falla.

En ambos materiales, se observó una falla escalonada por las juntas, indicativa de baja adherencia mortero-ladrillo, lo cual representa un punto débil estructural que limita la acción monolítica del muro. Sin embargo, en los diseños modificados de concreto, especialmente F y J, esta debilidad se agrava por el efecto combinado de una resistencia inferior y una cohesión estructural reducida.

Por lo tanto, aunque el concreto sigue siendo superior en los diseños (patrón, A y B), los beneficios se ven mermados si no se acompaña de un tratamiento adecuado de adherencia (rugosidad, aditivos, lechadas) y dosificaciones controladas de los materiales reciclados.

En resumen, si bien el concreto ofrece mayor potencial estructural, ambos sistemas presentan debilidades en la transferencia de esfuerzos diagonales debido a la deficiente adherencia en las juntas, lo que plantea un desafío técnico que debe atenderse en el diseño constructivo y la preparación del mortero.

Tabla 133.

Comparación de propiedades físicas y mecánicas entre ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J

			King Kong Pirámide		Diseño Patrón		Diseño A		Diseño B		Diseño F		Diseño J	
			Resultado o	Norma	Resultado o	Norma	Resultado o	Norma	Resultado o	Norma	Resultado o	Norma	Resultado o	Norma
Ladrillos	Variación Dimensional (%)	Largo	-0.740	Tipo V	0.149	Tipo V	0.298	Tipo V	0.503	Tipo V	0.115	Tipo V	-0.040	Tipo V
		Ancho	-1.286	Tipo V	-0.321	Tipo V	-0.154	Tipo V	-0.155	Tipo V	-0.321	Tipo V	-0.663	Tipo V
		Alto	0.350	Tipo V	1.037	Tipo V	2.033	Tipo V	1.608	Tipo V	1.509	Tipo V	1.786	Tipo V
	Peso (g)		3764.80	-	5603.53	-	5587.23	-	5556.70	-	5491.57	-	5446.62	-
	Área de vacíos (%)		33.680	Hueco	11.146	Sólido	11.210	Sólido	10.907	Sólido	11.120	Sólido	11.196	Sólido
	Alabeo (mm)		0.485	Tipo V	0.423	Tipo V	0.250	Tipo V	0.576	Tipo V	0.283	Tipo V	0.298	Tipo V
	Absorción		12.425	Cumple	3.685	Cumple	3.360	Cumple	3.719	Cumple	3.577	Cumple	3.790	Cumple
	Contenido de humedad (%)		0.132	-	4.947	-	4.790	-	4.821	-	4.577	-	4.457	-
	Succión		34.673	Necesita humedecers e antes del asentado	7.107	No necesita humedecers e antes del asentado	9.215	No necesita humedecers e antes del asentado	9.481	No necesita humedecers e antes del asentado	10.424	No necesita humedecers e antes del asentado	12.669	No necesita humedecers e antes del asentado
	Resistencia a la compresión (kg/cm2)		162.224	Tipo IV	193.641	Tipo V	143.370	Tipo IV	150.884	Tipo IV	131.535	Tipo IV	124.590	Tipo III
Pilas	Resistencia a la compresión (kg/cm2)		78.279	-	153.984	-	137.645	-	139.936	-	118.174	-	115.941	-
Muretes	Resistencia a la compresión (kg/cm2)		10.156	-	10.410	-	10.159	-	10.544	-	8.520	-	7.801	-

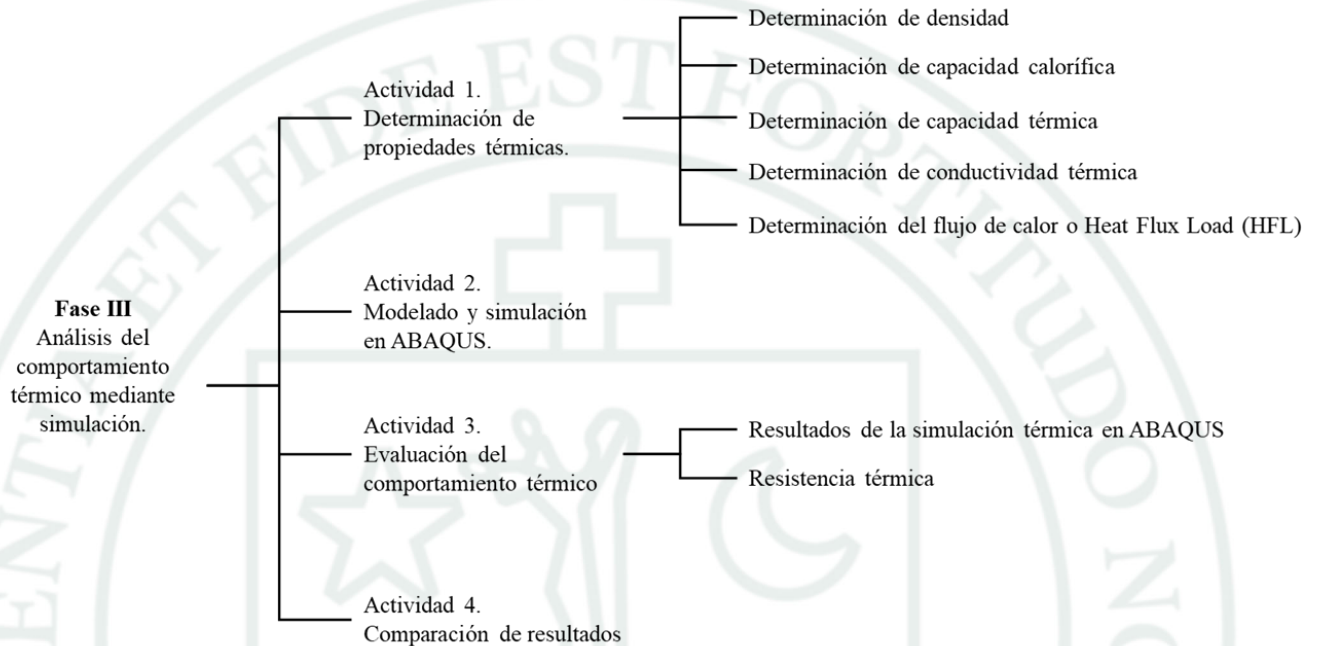
Nota. Elaboración propia

4.3 Fase III. Análisis del comportamiento térmico mediante simulación.

En la siguiente figura se muestra el Mapa de Fase III

Figura 80.

Mapa de Fase III



Nota. Elaboración propia

La evaluación realizada en ABAQUS tiene como propósito llevar a cabo una simulación del comportamiento térmico de los ladrillos fabricados con una mezcla de caucho reciclado y perlita expandida. Esta simulación busca ofrecer una aproximación preliminar sobre cómo la incorporación de estos materiales alternativos impacta en las propiedades térmicas de los ladrillos, con el objetivo de optimizar el desempeño energético de las construcciones. De esta manera, se pretende obtener datos que respalden la viabilidad de la mezcla propuesta, considerando su potencial para reducir el impacto ambiental y promover la sostenibilidad en el ámbito de la construcción.

Para la evaluación de la resistencia térmica de los ladrillos, se utilizaron dos métodos complementarios. El primero consistió en aplicar la relación teórica entre espesor y conductividad térmica efectiva, dada por $R = \frac{e}{k}$, donde "e" es el espesor del ladrillo (0.13 m)

y "k" la conductividad térmica efectiva obtenida previamente. Este método entrega un valor idealizado que asume propiedades constantes y ausencia de pérdidas adicionales.

El segundo método se basó en los resultados de la simulación en ABAQUS, en la que se fijó una de las caras del ladrillo a 25 °C y se aplicó un flujo de calor constante en la cara opuesta. A partir de los resultados de temperatura nodal (NT11) en ambas caras, se calculó la resistencia térmica utilizando la expresión $R = \frac{\Delta T}{q}$, donde "ΔT" es la diferencia de temperatura entre las caras y "q" el flujo de calor impuesto.

Este procedimiento permitió obtener una resistencia térmica basada en el comportamiento real del material bajo condiciones de carga térmica, considerando variaciones internas de temperatura y posibles no idealidades. Se observó que los valores obtenidos mediante simulación fueron superiores a los calculados teóricamente, reflejando una respuesta térmica más conservadora y representativa. Esto valida la importancia de realizar simulaciones numéricas para complementar los cálculos teóricos y mejorar la precisión en la evaluación térmica de materiales.

4.3.1 Actividad 1. Determinación de propiedades térmicas.

Es necesario definir las propiedades físicas de los materiales, como la densidad, la capacidad calorífica y la conductividad térmica, previo al análisis en ABAQUS, ya que estos parámetros son fundamentales para simular con precisión el comportamiento térmico de los ladrillos. La densidad influye en la distribución del calor en el material, la capacidad calorífica determina la cantidad de calor que puede almacenar y liberar, y la conductividad térmica define cómo se transfiere el calor a través del material. Estos datos son esenciales para obtener resultados fiables y representar de manera adecuada las interacciones térmicas en la simulación.

4.3.1.1 Determinación de densidad

Tabla 134.

Cálculo de densidad de ladrillos de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J

	Peso (kg)	Volumen (m3)				Densidad (kg/m3)
		Largo (m)	Ancho (m)	Altura(m)	% de vacíos	
KK	3.76	0.24	0.14	0.10	33.68%	1661.41
				0.002265784		
Diseño patrón	5.60	0.24	0.14	0.09	11.15%	2103.64
				0.002663726		
Diseño A	5.61	0.24	0.14	0.09	11.21%	2134.89
				0.002626644		
Diseño B	5.59	0.24	0.14	0.09	10.91%	2116.40
				0.002641546		
Diseño F	5.52	0.24	0.14	0.09	11.12%	2080.32
				0.002652638		
Diseño J	5.57	0.24	0.14	0.09	11.20%	2097.20
				0.00265602		

Nota. Elaboración propia

La densidad de los ladrillos correspondientes al diseño patrón, A, B, F y J fue determinada mediante un procedimiento experimental directo, tomando como base los resultados promedios obtenidos en los ensayos físicos desarrollados en los ítems anteriores. El método consistió en calcular la densidad aparente de cada muestra a partir de la relación entre su masa y volumen, según la expresión:

$$\rho = m/V$$

donde “ ρ ” representa la densidad del ladrillo en kg/m³, “m” es la masa en kilogramos, y “V” el volumen en metros cúbicos. La masa fue medida con balanza digital, mientras que el volumen se obtuvo a partir de las dimensiones promedio del ladrillo (largo, ancho y altura), tomadas con cinta métrica.

En la Tabla 134 se presentan los valores de peso, volumen y densidad calculada para cada diseño.

4.3.1.2 Determinación de capacidad calorífica

Tabla 135.

Cálculo de capacidad calorífica de ladrillos del diseño patrón, A, B, F y J

	Concreto (J/kg·K)		Caucho (J/kg·K)		Perlita (J/kg·K)		Capacidad
	940		855		2050		calorífica (J/kg·K)
Diseño Patrón	100%	940	0%	0	0%	0	940
Diseño A	95%	893	5%	42.75	0%	0	935.75
Diseño B	90%	846	5%	42.75	5%	102.5	991.25
Diseño F	85%	799	10%	85.5	5%	102.5	987
Diseño J	80%	752	15%	128.25	5%	102.5	982.75

Nota. Elaboración propia

La capacidad calorífica específica efectiva de los ladrillos fue calculada mediante la aplicación de la regla de mezclas ponderada, considerando los valores promedio referenciales de capacidad calorífica de los materiales constituyentes: concreto, caucho reciclado y perlita expandida. Los valores adoptados fueron 940 J/kg·K para el concreto, 2050 J/kg·K para el caucho reciclado y 855 J/kg·K para la perlita, los cuales se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura técnica (Mindess et al., 2003; Neville, 2012; Koksall et al., 2015; Siddique & Naik, 2004; Thomas & Gupta, 2016).

El cálculo se realizó multiplicando la capacidad calorífica específica de cada componente por su porcentaje en la mezcla (en base a masa), y sumando los productos para obtener la capacidad calorífica total del diseño, conforme a la ecuación:

$$C_{ef} = \sum_{i=1}^n p_i \times c_i$$

donde C_{ef} es la capacidad calorífica efectiva (J/kg·K), p_i es el porcentaje en masa del componente i , y c_i su capacidad calorífica específica.

En la Tabla 135 se detallan los valores obtenidos para cada diseño, reflejando el efecto del reemplazo progresivo de concreto por caucho y perlita. Se observa que los diseños

modificados presentan una capacidad calorífica mayor que el diseño patrón, como resultado del mayor aporte térmico del caucho y la perlita en la mezcla.

La capacidad calorífica específica de los ladrillos de arcilla mecanizada se encuentra en un valor promedio de 840 J/kg·K, según lo informado en estudios técnicos sobre propiedades térmicas de materiales cerámicos (Moreno et al., 2011).

4.3.1.3 Determinación de capacidad térmica

La capacidad térmica (C) de cada ladrillo se obtuvo multiplicando la capacidad calorífica específica calculada previamente (c, en J/kg·K) por la masa de la unidad (m, en kg), según la expresión:

$$C=m \cdot c$$

Este parámetro refleja la cantidad de energía que cada unidad puede almacenar por cada grado Kelvin de variación de temperatura, lo que permite evaluar la inercia térmica de los diseños.

Tabla 136.

Cálculo de capacidad térmica de ladrillos de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J

	Masa (kg)	Capacidad calorífica (J/kg·K)	Capacidad térmica (J/K)
KK	3.76	840	3162
Diseño Patrón	5.60	940	5264
Diseño A	5.61	935.75	5252
Diseño B	5.59	991.25	5539
Diseño F	5.52	987.00	5452
Diseño J	5.57	982.75	5471

Nota. Elaboración propia

En la Tabla 136 se observa que la capacidad térmica de los ladrillos oscila entre 3 162 J/K para los de arcilla mecanizada (KK) y valores superiores a 5 200 J/K en los ladrillos de concreto, tanto en el diseño patrón como en los experimentales. Esto significa que las unidades

de concreto, debido a su mayor masa y capacidad calorífica específica, son capaces de almacenar y liberar una mayor cantidad de energía frente a cambios de temperatura.

Dentro de los diseños experimentales, los ladrillos B, F y J presentan las capacidades térmicas más elevadas (entre 5 450 y 5 540 J/K), superando ligeramente al ladrillo patrón. Este comportamiento se atribuye al aporte térmico del caucho reciclado y la perlita expandida en la mezcla, que, pese a reducir marginalmente la densidad respecto al patrón, contribuyen con valores de calor específico mayores.

El mayor valor de capacidad térmica en estas unidades implica una mayor inercia térmica, es decir, la capacidad de atenuar las fluctuaciones de temperatura en el interior de los recintos. En contraste, los ladrillos de arcilla, con menor capacidad térmica, se calientan y enfrían más rápidamente, lo que puede generar condiciones de confort menos estables.

4.3.1.4 Determinación de conductividad térmica

Tabla 137.

Asignación de las propiedades de conductividad térmica para los materiales compuestos dentro del ladrillo de concreto – perlita y el caucho

Contenido %	Conductividad Termica PERLITA (W/mK)	Conductividad Termica CAUCHO (W/mK)
0	1.40	1.40
5	1.15	1.31
10	0.94	1.12
15	0.73	0.97

Nota. Adaptado de Información Citada de (al2018) “Propiedades mecánicas y térmicas del mortero de cemento aislante de perlita y caucho”

La conductividad térmica efectiva de los diseños con mezcla combinada de perlita y caucho reciclado fue determinada mediante la fórmula de combinación en serie entre los valores experimentales ya obtenidos para cada uno de estos componentes, según el estudio de Al (2018). Esta metodología se justifica dado que los valores de conductividad térmica

utilizados ya consideran el efecto del porcentaje correspondiente (5%, 10% o 15%) aplicado individualmente en un mortero de cemento. La expresión utilizada es la siguiente:

$$k_{ef} = \frac{1}{\left(\frac{1}{k_{caucho}} + \frac{1}{k_{perlita}}\right)}$$

Esta aproximación permite obtener una estimación representativa del comportamiento térmico del ladrillo compuesto, sin necesidad de recalcular por porcentaje, ya que este ha sido incorporado en los ensayos de referencia.

Tabla 138.

Cálculo de conductividad térmica de ladrillos del diseño patrón, A, B, F y J

	Conductividad térmica (W/m·K)						Conductividad térmica efectiva (W/m·K)
	Concreto + %caucho				Concreto + %perlita		
	0%	5%	10%	15%	0%	5%	
Diseño Patrón	1.4	-	-	-	1.4	-	1.4
Diseño A	-	1.31	-	-	-	-	0.677
Diseño B	-	1.31	-	-	-	1.15	0.612
Diseño F	-	-	1.12	-	-	1.15	0.567
Diseño J	-	-	-	0.97	-	1.15	0.526

Nota. Elaboración propia

La unidad de arcilla mecanizada presenta una conductividad térmica promedio de 0.532 W/m·K, valor reportado en investigaciones sobre el comportamiento térmico de materiales cerámicos aplicados en la construcción (Cabeza et al., 2014).

4.3.1.5 Determinación del flujo de calor o Heat Flux Load (HFL)

El Heat Flux Load (HFL) se determinó a partir de una aproximación basada en las propiedades térmicas de los materiales evaluados y sus condiciones de contorno. Para su cálculo, se utilizó la siguiente expresión:

$$HFL = \frac{k \times \Delta T}{e}$$

donde:

- k es la conductividad térmica del material (W/m·K),
- ΔT es la diferencia de temperatura entre las caras opuestas del ladrillo (K),
- " e " es el espesor del ladrillo (m).

La diferencia de temperatura (ΔT) se consideró entre un escenario de alta temperatura exterior de 1000°C (1273 K) y una temperatura interior de 25°C (298 K), resultando en un ΔT de 975 K.

Este procedimiento permitió estimar el flujo de calor que atraviesa el ladrillo bajo condiciones de incendio severo, considerando únicamente la conducción térmica en estado estacionario y despreciando efectos de convección o radiación interna.

Tabla 139.

Flujo de calor (HFL) de ladrillos de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J

	Conductividad térmica (k)	ΔT	Espesor (e)	Flujo de calor o HFL (watts/m2)
KK	0.532	975	0.14	3990
Diseño Patrón	1.4	975	0.14	9750
Diseño A	0.677	975	0.14	4715
Diseño B	0.612	975	0.14	4262
Diseño F	0.567	975	0.14	3949
Diseño J	0.526	975	0.14	3663

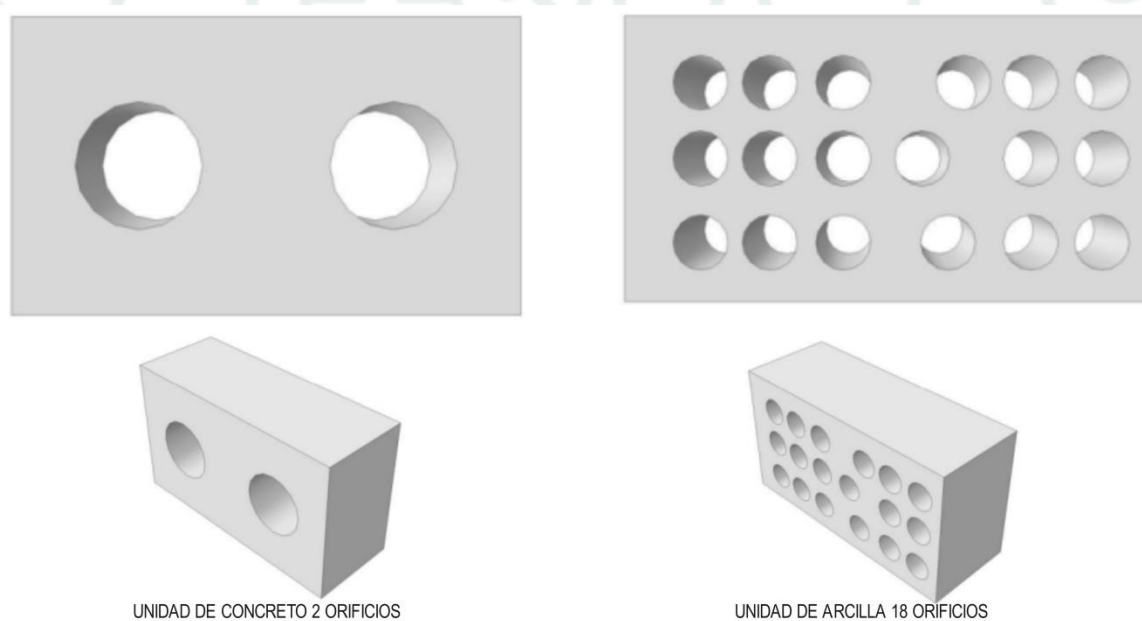
Nota. Elaboración propia

4.3.2 Actividad 2. Modelado y simulación en ABAQUS.

Para evaluar el comportamiento térmico de los distintos diseños de ladrillo propuestos, se desarrolló un modelo numérico mediante el software ABAQUS, aplicando el método de elementos finitos. El proceso inició con la definición geométrica de los sólidos, basada en las dimensiones reales de los ladrillos, considerando una forma ortoédrica de 0.24 m de largo, 0.14 m de ancho y 0.09 m de altura. Estos cuerpos fueron discretizados mediante una malla estructurada, asignando nodos a lo largo de la superficie y volumen del modelo. Cada nodo cuenta con grados de libertad térmicos, lo que permite registrar y analizar la evolución de la temperatura en función del tiempo y de las condiciones impuestas.

Figura 81.

Modelamiento de ladrillos de concreto y de arcilla con el software ABAQUS



Nota. Elaboración propia

El modelo fue configurado como un análisis térmico transitorio, con el objetivo de simular la respuesta del ladrillo ante diferentes condiciones ambientales. Para ello, se definieron condiciones de frontera representativas del comportamiento real en obra: una de las caras del ladrillo fue fijada a una temperatura constante de 25 °C, correspondiente a la

temperatura ambiente interior; mientras que la cara opuesta fue sometida a distintos escenarios de carga térmica, representando condiciones de exposición típicas o extremas.

Los escenarios definidos para el análisis fueron los siguientes:

- **Simulación a 10 °C.**

Clima frío extremo, con temperatura impuesta de 10 °C. Este valor representa condiciones exteriores en zonas andinas o altitudes elevadas, donde la diferencia térmica respecto al interior puede ser significativa, especialmente durante las noches o estaciones frías.

- **Simulación a 50 °C.**

Clima caluroso severo, con temperatura de 50 °C aplicada sobre la cara exterior del ladrillo. Si bien esta no representa la temperatura ambiente, sí corresponde a valores reales de temperatura superficial que pueden alcanzar los materiales expuestos directamente al sol en climas áridos o tropicales. Estudios han documentado que superficies exteriores en muros sin aislamiento térmico, de color oscuro o con alta absorción solar, pueden superar los 50 °C durante las horas pico (Álvarez et al., 2017; Asdrubali et al., 2014). Este escenario permite analizar la transferencia de calor hacia el interior de la edificación en condiciones críticas de radiación solar.

- **Simulación a 1000 °C.**

Exposición al fuego, con temperatura de 1000 °C. Este caso simula una condición accidental de incendio, en la que se busca evaluar la respuesta del ladrillo ante altas temperaturas en cortos periodos, así como su capacidad para ralentizar la transmisión de calor hacia el interior.

- **Simulación con aplicación de flujo de calor constante (HFL)**

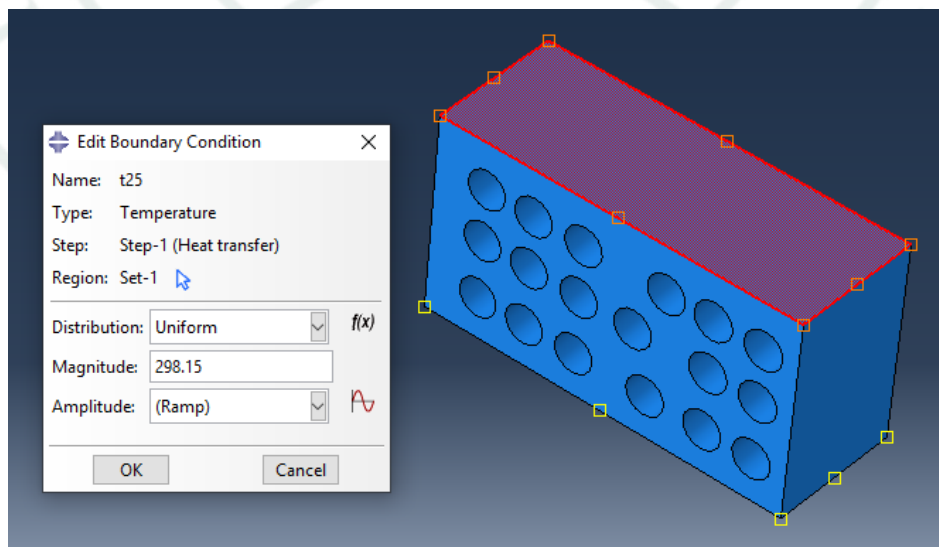
Flujo de calor aplicado (HFL), en el que se aplicó directamente una carga térmica en la superficie expuesta. Este caso permite estimar la resistencia térmica del material, al observar el gradiente de temperatura generado en función del flujo impuesto.

En todos los escenarios, se mantuvo constante la temperatura de 25 °C en la cara opuesta, con el fin de generar un gradiente térmico definido que permita una comparación homogénea entre los distintos diseños y condiciones. Este enfoque busca simular el comportamiento del ladrillo como parte de un muro exterior que separa un ambiente interior controlado de un entorno externo variable.

- 10°C vs 25°C
- 50°C vs 25°C
- 1000°C vs 25°C
- Caso con flujo de calor aplicado (HFL) vs 25°C

Figura 82.

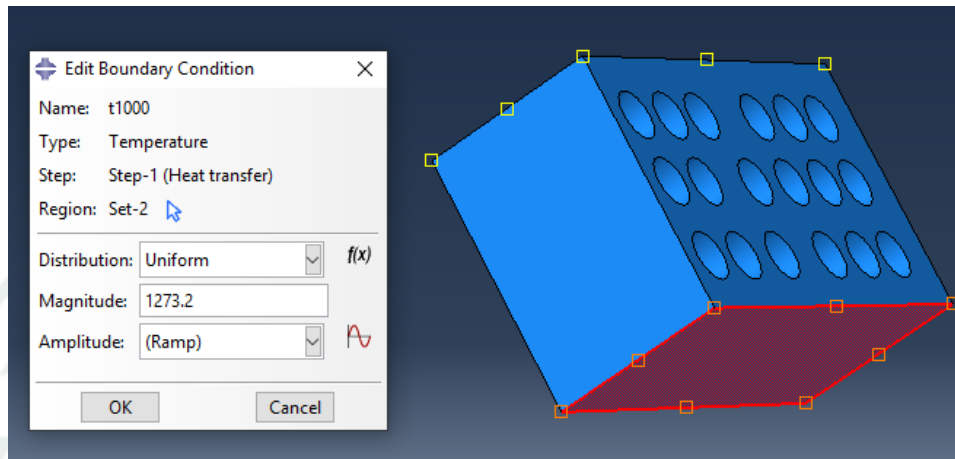
Ladrillo de arcilla con condiciones de borde impuestas, cara expuesta a 25°C (298.15K) y cara opuesta con temperaturas variables



Nota. Elaboración propia

Figura 83.

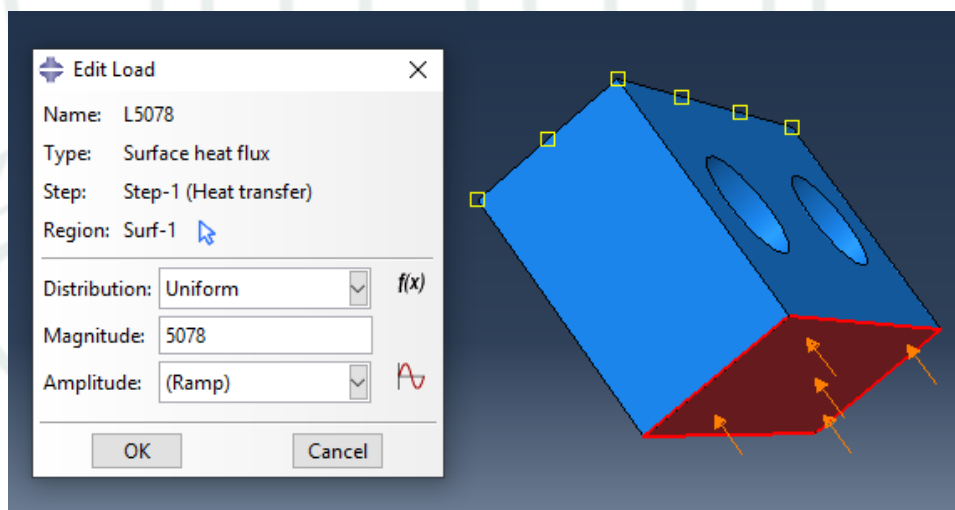
Ladrillo de arcilla con condiciones de borde impuestas, cara expuesta a 1000°C (1273.2°K) y cara opuesta con temperaturas variables



Nota. Elaboración propia

Figura 84.

Ladrillo de concreto con condiciones de borde impuestas, cara expuesta a 25°C (298.15°K) y cara opuesta sometida al flujo de calor



Nota. Elaboración propia

Para alimentar el modelo con datos realistas, se utilizaron las propiedades térmicas determinadas previamente en la Actividad 1. Estos parámetros fueron ingresados en el entorno de definición de materiales del módulo térmico de ABAQUS.

Tabla 140.*Parámetros ingresados en el software ABAQUS*

	Densidad (kg/m ³)	Capacidad calorífica (J/kg·K)	Conductividad térmica efectiva (W/m·K)	Flujo de calor o HFL
KK	1661.41	840	0.532	3705
Diseño Patrón	2103.64	940	1.4	9750
Diseño A	2134.89	935.75	0.677	4715
Diseño B	2116.40	991.25	0.612	4262
Diseño F	2080.32	987	0.567	3949
Diseño J	2097.20	982.75	0.526	3663

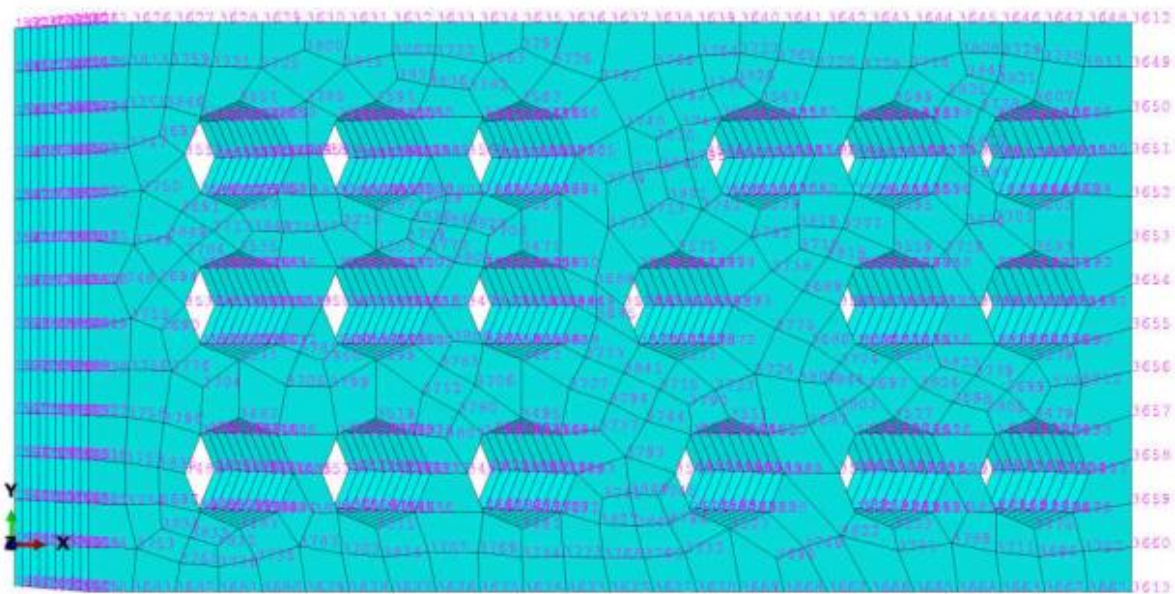
Nota. Elaboración propia

Para llevar a cabo el análisis térmico de los ladrillos en estudio, se realizó el modelado y mallado de las unidades en el software ABAQUS. El mallado consistió en discretizar cada sólido en nodos distribuidos sobre su superficie y volumen, lo que permitió capturar la variación de la temperatura de manera detallada a través del método de elementos finitos.

En las Figuras 85 y 86 se presentan los modelos de los ladrillos de arcilla y concreto respectivamente, mostrando la numeración de los nodos generados tras el proceso de mallado en el entorno de ABAQUS. Esta numeración permitió definir rutas de análisis (PATH) sobre las cuales se registró la evolución de temperatura durante la simulación térmica posterior.

Figura 85.

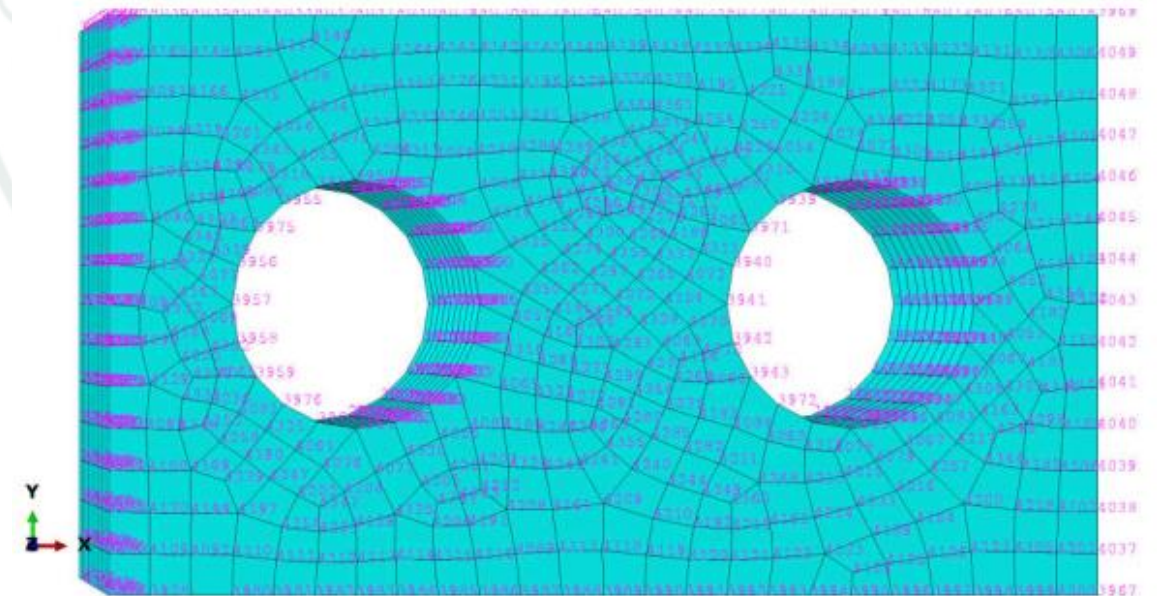
Nodos numerados en base al software ABAQUS del ladrillo de arcilla



Nota. Elaboración propia

Figura 86.

Nodos numerados en base al software ABAQUS del ladrillo de concreto

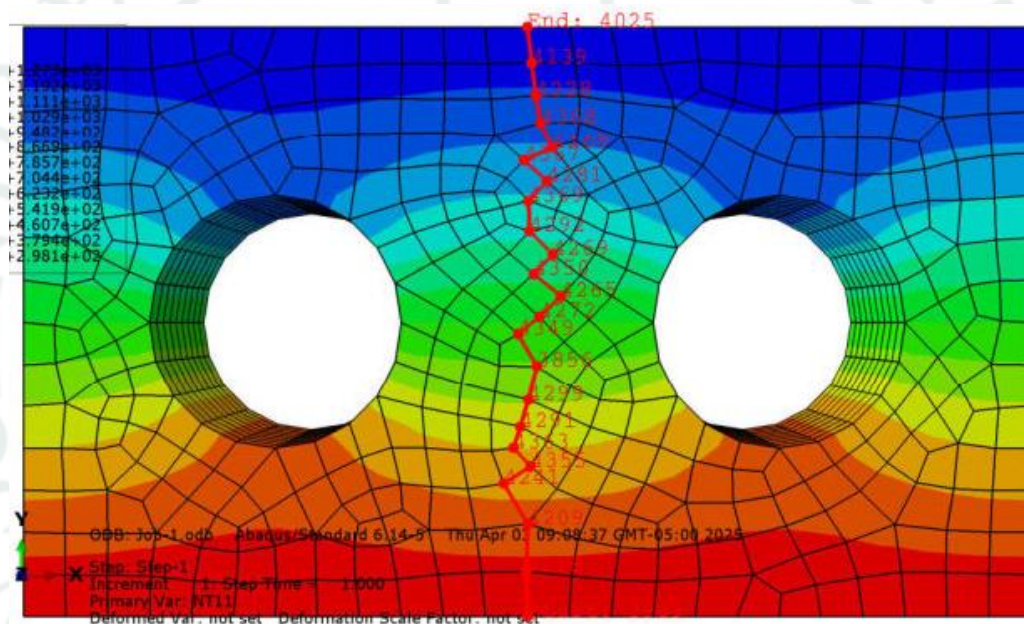


Nota. Elaboración propia

Posteriormente, se definieron los recorridos de nodos o caminos térmicos (PATH) que permiten rastrear la distribución de temperaturas a lo largo del espesor del ladrillo, siguiendo un trazado que respeta la geometría particular de cada modelo. La Figura 87 muestra la definición del PATH en el ladrillo de concreto de 2 huecos, y la Figura 88 presenta el recorrido nodal definido para el ladrillo de arcilla de 18 huecos.

Figura 87.

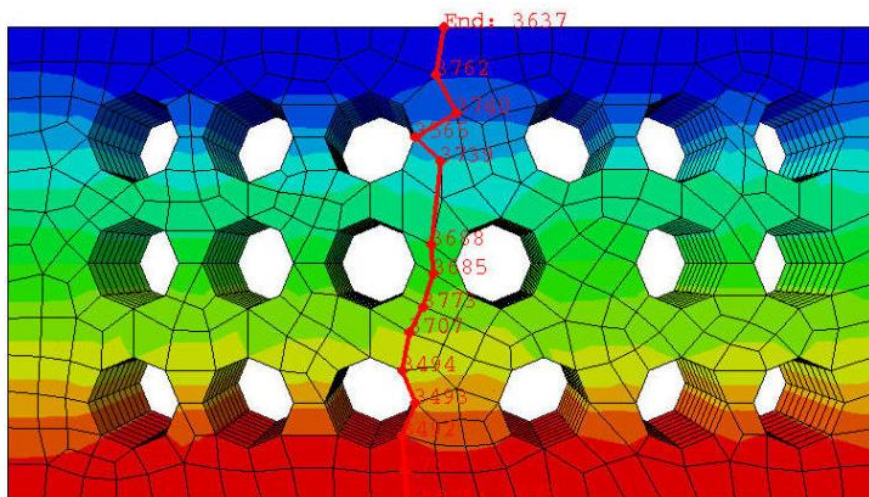
Trayectoria de nodos (PATH) en el ladrillo de concreto para registrar la distribución de temperatura vertical



Nota. Elaboración propia

Figura 88.

Trayectoria de nodos (PATH) en el ladrillo de arcilla para registrar la distribución de temperatura vertical



Nota. Elaboración propia

La metodología adoptada asegura una comparación homogénea entre las unidades, ya que el análisis térmico se enfoca en registrar las temperaturas desde la cara expuesta al flujo de calor hasta la cara fijada a temperatura ambiente, considerando la influencia de la geometría (cantidad de huecos) en la disipación térmica.

4.3.3 Actividad 3. Evaluación del comportamiento térmico.

Una vez definido el modelo y los recorridos de análisis, se procedió a la simulación térmica de las unidades bajo diferentes escenarios de carga térmica. En todos los casos, se aplicó un flujo de calor en una de las caras del ladrillo, mientras que la cara opuesta fue fijada a una temperatura constante de 25 °C, representando una condición de borde típica de ambientes interiores.

Para evaluar el comportamiento térmico de las unidades de albañilería, se realizó un análisis de conducción estacionaria en el software ABAQUS. La simulación térmica permitió obtener la distribución de temperaturas internas en función de diferentes condiciones de frontera, considerando una trayectoria lineal de nodos desde la cara fría hasta la cara caliente

de cada ladrillo. Los resultados de temperatura fueron obtenidos mediante el parámetro NT11, que corresponde al grado de temperatura en cada nodo interno.

Durante la simulación, las temperaturas registradas fueron expresadas en unidades de kelvin (K), en concordancia con el uso del Sistema Internacional de Unidades (SI). No obstante, para la interpretación de resultados, puede considerarse la relación convencional:

$$0\text{ }^{\circ}\text{C}=273.15\text{ K}$$

Esto permite traducir los valores térmicos obtenidos a una escala Celsius para facilitar su análisis y comprensión contextual.

En total se evaluaron cuatro escenarios térmicos por cada tipo de ladrillo:

- Simulación a 10 °C.
- Simulación a 50 °C.
- Simulación a 1000 °C.
- Simulación con aplicación de flujo de calor constante (HFL), determinado previamente mediante cálculo analítico.

Estos escenarios fueron definidos para representar condiciones ambientales y críticas, desde situaciones de clima frío hasta exposiciones severas como en caso de incendio.

4.3.3.1 Resultados de la simulación térmica en ABAQUS

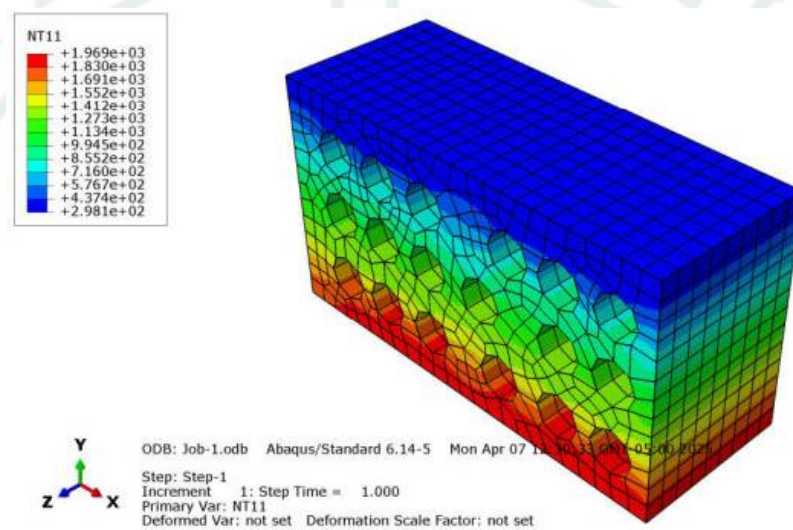
4.3.3.1.1 Ladrillo de arcilla mecanizado

La Figura 89 muestra la distribución de temperatura (NT11) obtenida para el ladrillo de arcilla de 18 huecos. Se observa un patrón térmico coherente con el comportamiento físico esperado: las zonas más próximas a la fuente de calor presentan coloraciones rojizas, lo que indica una mayor temperatura, mientras que las áreas alejadas conservan tonalidades azuladas, señal de temperaturas inferiores. Este gradiente cromático evidencia una transferencia térmica progresiva desde la cara caliente hacia la fría.

En este tipo de ladrillo, la presencia de múltiples orificios genera un mayor desarrollo superficial, lo cual favorece la disipación de calor. Esta característica se ve reforzada en la Figura 90, donde se representa la distribución del flujo de calor (HFL). En dicha figura se evidencia cómo el calor tiende a difundirse a través de las paredes internas del ladrillo, distribuyéndose con cierta uniformidad debido a su geometría hueca.

Figura 89.

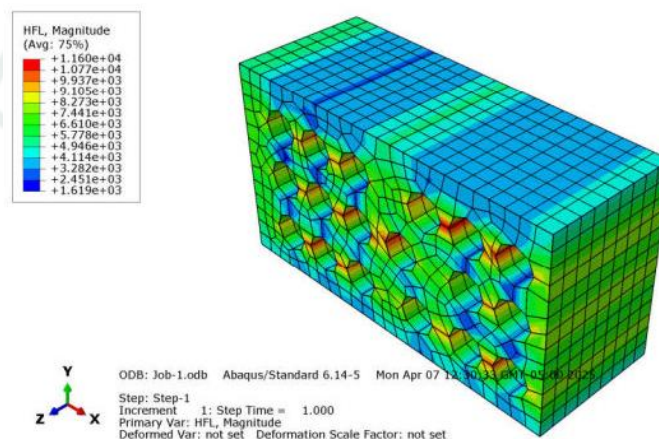
Distribución de temperatura (NT11) del ladrillo de arcilla



Nota. Elaboración propia

Figura 90.

Flujo de calor (HFL) en el ladrillo de arcilla



Nota. Elaboración propia

Tabla 141.

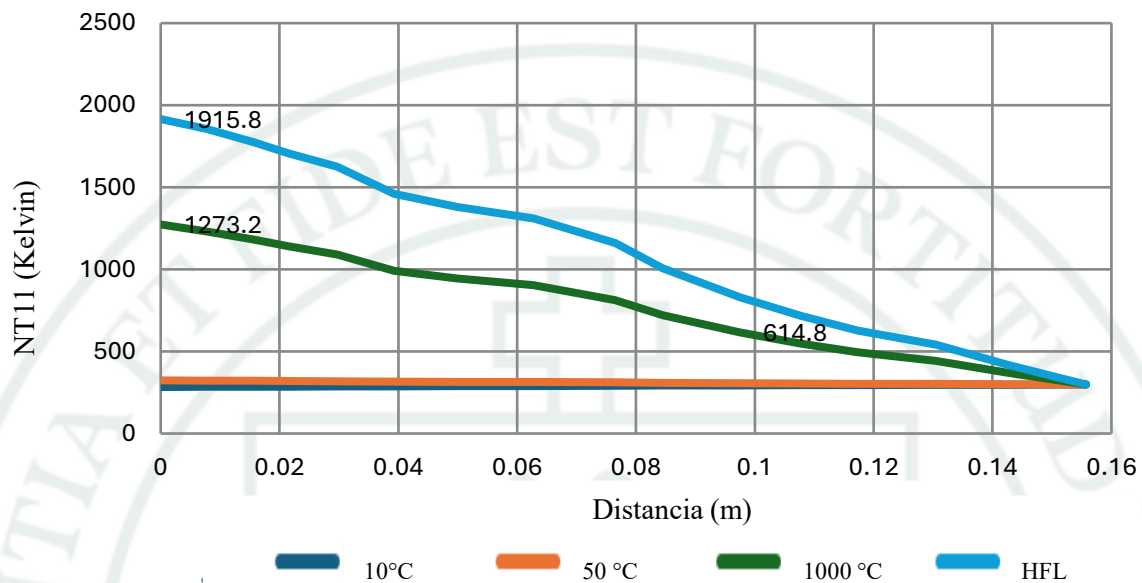
Distribución de temperatura (NT11) para ladrillos de arcilla en las temperaturas de 10, 50, 1000°C y flujo de calor (HFL)

Distancia	10 °C	50°C	1000°C	Flujo de calor
0	283.15	323.15	1273.2	1915.8
0.0078	283.80	322.07	1230.9	1855.0
0.0156	284.56	320.81	1181.8	1776.5
0.0215	285.19	319.75	1140.6	1708.4
0.0297	285.95	318.48	1091.1	1625.8
0.0393	287.47	315.94	992.1	1460.4
0.0499	288.20	314.73	944.7	1381.1
0.0627	288.85	313.65	902.8	1311.2
0.0765	290.24	311.34	812.6	1160.2
0.0845	291.64	309.01	721.5	1007.5
0.0975	293.28	306.27	614.8	828.8
0.1077	294.30	304.56	548.2	717.2
0.1173	295.13	303.19	494.5	627.3
0.1304	295.92	301.86	442.9	540.9
0.1425	297.04	300.01	370.5	419.5
0.1557	298.15	298.15	298.1	298.1

Nota. Elaboración propia

Figura 91.

Comparativa de NT11 a 10, 50, 1000 °C y flujo de calor (HFL) en función de la distancia nodal para ladrillos de arcilla mecanizados



Nota. Elaboración propia

- **Simulación de 10°C:**

El ladrillo de arcilla presentó un comportamiento térmico eficiente ante un ambiente frío. Con una temperatura exterior de 10 °C, logró mantener los 25 °C interiores en su cara opuesta, con una progresión térmica lenta y estable. A la mitad del espesor la temperatura era apenas de 17.71 °C, lo que indica que el calor interior se disipa gradualmente hacia el exterior. Esta respuesta demuestra una capacidad adecuada para conservar el calor en el interior de una vivienda. En contextos reales, esto representa un beneficio para los usuarios, ya que permite mantener un ambiente térmicamente confortable en zonas andinas o en climas fríos sin depender excesivamente de sistemas de calefacción. La sensación térmica interior permanece cálida gracias a la baja conductividad térmica de la arcilla y su espesor mayor, lo que se traduce en eficiencia energética y confort.

- **Simulación de 50°C:**

En este escenario, que simula una fachada expuesta al sol en un día extremadamente caluroso, el ladrillo de arcilla mostró nuevamente un buen desempeño. A pesar de que la cara exterior alcanzó los 50 °C, la cara interior se mantuvo en 25 °C. A la mitad del espesor, la temperatura era de apenas 33.26 °C, evidenciando una baja transmisión térmica hacia el interior. Esto significa que el calor del exterior no penetra con rapidez, lo cual en la práctica se traduce en ambientes frescos durante las horas de alta radiación solar. Para una vivienda real, esta propiedad se convierte en un amortiguador térmico, reduciendo la necesidad de ventilación artificial y ayudando a que los ocupantes no sufran un sobrecalentamiento dentro del hogar.

- **Simulación de 1000°C:**

Ante un incendio simulado con una temperatura exterior de 1000 °C, el ladrillo de arcilla demostró una capacidad significativa de retrasar la propagación del calor. Si bien la cara exterior alcanzó esta temperatura extrema, la interior se mantuvo en 25 °C. A la mitad del espesor, la temperatura fue de 556.21 °C, lo que significa que el calor avanzó, pero de forma mucho más controlada que en otros materiales. En un contexto real, esto permite un mayor tiempo de evacuación antes de que el fuego o el calor extremo traspase hacia los ambientes habitados. Además, como se trata de un material inorgánico, no genera gases tóxicos, humo denso ni incrementa la combustión del entorno, aportando a la seguridad pasiva contra incendios.

- **Simulación con flujo de calor constante:**

Con un flujo de calor impuesto, el ladrillo de arcilla mantiene un patrón de disipación progresiva de temperatura. La temperatura en la cara caliente alcanza los 1915.8 K (~1642°C), pero disminuye gradualmente a través del espesor, confirmando que la arcilla no solo retarda la transmisión del calor, sino que también evita que este penetre con rapidez hacia el interior

del material, mostrando una disminución progresiva de temperatura a lo largo del espesor y confirmando su capacidad para actuar como aislante térmico en situaciones de incendios prolongados.

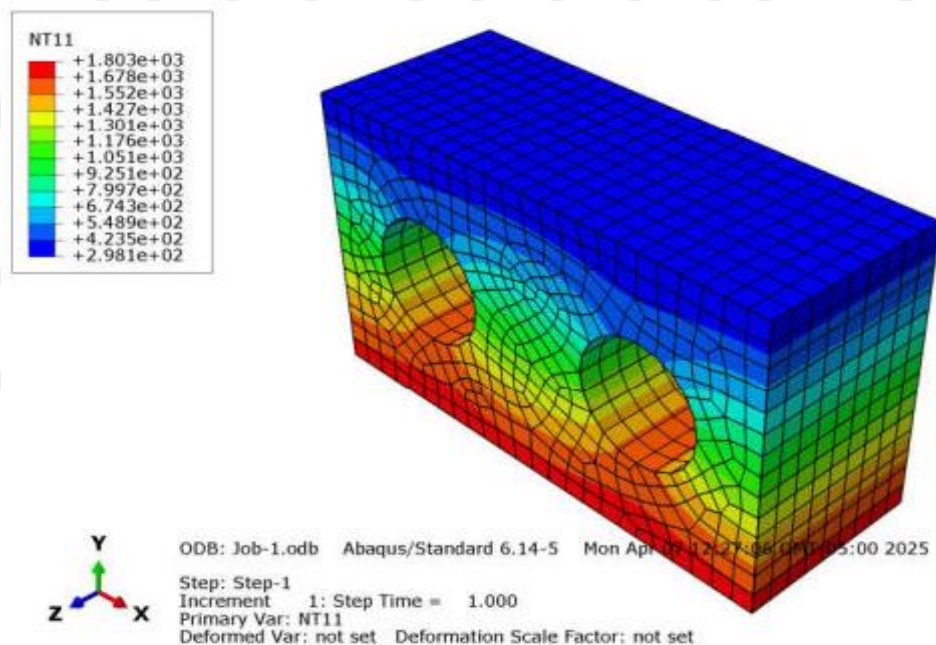
En un entorno real, esto se traduce en un amortiguamiento térmico ideal para viviendas ubicadas en zonas donde el sol incide con fuerza y de forma prolongada durante el día. La casa permanecería más fresca por dentro durante la mayor parte del día, mejorando el confort térmico y reduciendo el uso de ventiladores o aire acondicionado.

4.3.3.1.2 Ladrillos de concreto

La Figura 92 muestra la distribución de temperatura NT11 en el ladrillo de concreto de 2 huecos. A diferencia del ladrillo de arcilla, en este caso el recorrido térmico se presenta más directo, con menor dispersión lateral. La baja cantidad de cavidades reduce el área de disipación, lo que se traduce en una transferencia de calor más concentrada.

Figura 92.

Distribución de temperatura (NT11) del ladrillo de concreto



Nota. Elaboración propia

Tabla 142.

Distribución de temperatura (NT11) para diseño patrón, A, B, F y J en las temperaturas de 10, 50, 1000°C y flujo de calor (HFL)

Distancia	Diseño A				Diseño B				Diseño F				Diseño J				Diseño patrón			
	10°C	50°C	1000°C	HFL	10°C	50°C	1000°C	HFL	10°C	50°C	1000°C	HFL	10°C	50°C	1000°C	HFL	10°C	50°C	1000°C	HFL
0	283.15	323.15	1273.20	1758.86	283.10	323.15	1273.20	1758.72	283.15	323.15	1273.20	1758.87	283.15	323.15	1273.20	1758.72	283.15	323.15	1273.2	1758.7
0.0107	284.09	321.59	1212.32	1675.23	284.04	321.59	1212.32	1675.10	284.09	321.59	1212.32	1675.24	284.09	321.59	1212.32	1675.10	284.09	321.59	1212.3	1675.1
0.0220	285.11	319.88	1145.82	1579.42	285.07	319.88	1145.82	1579.30	285.11	319.88	1145.82	1579.43	285.11	319.88	1145.82	1579.30	285.11	319.88	1145.8	1579.3
0.0331	286.02	318.37	1086.74	1492.50	285.98	318.37	1086.74	1492.38	286.02	318.37	1086.74	1492.50	286.02	318.37	1086.74	1492.38	286.02	318.37	1086.7	1492.4
0.0406	286.46	317.64	1058.22	1449.65	286.42	317.64	1058.22	1449.53	286.46	317.64	1058.22	1449.65	286.46	317.64	1058.22	1449.53	286.46	317.64	1058.2	1449.5
0.0466	286.93	316.85	1027.59	1403.82	286.89	316.85	1027.59	1403.71	286.93	316.85	1027.59	1403.82	286.93	316.85	1027.59	1403.71	286.93	316.85	1027.6	1403.7
0.0519	287.49	315.91	990.77	1348.38	287.46	315.91	990.77	1348.28	287.49	315.91	990.77	1348.38	287.49	315.91	990.77	1348.28	287.49	315.91	1027.6	1348.3
0.0586	288.26	314.63	940.97	1273.23	288.23	314.63	940.97	1273.14	288.26	314.63	940.97	1273.23	288.26	314.63	940.97	1175.11	288.26	312.97	941.0	1273.1
0.0668	289.26	312.97	876.17	1175.19	289.23	312.97	876.17	1175.11	289.26	312.97	876.17	1175.19	289.26	312.97	876.17	1074.33	289.26	311.27	876.2	1175.1
0.0759	290.28	311.27	809.67	1074.41	290.25	311.27	809.67	1074.33	290.28	311.27	809.67	1074.41	290.28	311.27	809.67	1019.87	290.28	310.34	809.7	1074.3
0.0824	290.83	310.34	773.75	1019.94	290.81	310.34	773.75	1019.87	290.83	310.34	773.75	1019.94	290.83	310.34	773.75	953.87	290.83	309.23	773.8	1019.9
0.0895	291.50	309.23	730.23	953.94	291.48	309.23	730.23	953.87	291.50	309.23	730.23	953.93	291.50	309.23	730.23	888.36	291.50	308.12	730.2	953.9
0.0979	292.17	308.12	687.06	888.42	292.15	308.12	687.06	888.36	292.17	308.12	687.06	888.41	292.17	308.12	687.06	829.33	292.17	307.12	687.1	888.4
0.1044	292.77	307.12	648.16	829.38	292.75	307.12	648.16	829.33	292.77	307.12	648.16	829.37	292.77	307.12	648.16	765.28	292.77	306.04	648.2	829.3
0.1122	293.41	306.04	605.95	765.32	293.40	306.04	605.95	684.44	293.41	306.04	605.95	765.31	293.41	306.04	605.95	684.44	293.41	304.68	605.9	765.3
0.1194	294.23	304.68	552.68	684.48	294.22	304.68	552.68	633.46	294.23	304.68	552.68	684.46	294.23	304.68	552.68	633.46	294.23	303.81	552.7	684.4
0.1259	294.75	303.81	519.09	633.49	294.74	303.81	519.09	585.32	294.75	303.81	519.09	633.48	294.75	303.81	519.09	585.32	294.75	303.00	519.1	633.5
0.1332	295.24	303.00	487.37	585.35	295.23	303.00	487.37	553.26	295.24	303.00	487.37	585.33	295.24	303.00	487.37	553.26	295.24	302.46	487.4	585.3
0.1405	295.56	302.46	466.24	553.29	295.56	302.46	466.24	498.17	295.56	302.46	466.24	553.27	295.56	302.46	466.24	498.17	295.56	301.53	466.2	553.3
0.1471	296.12	301.53	429.95	498.19	296.12	301.53	429.95	371.36	296.12	301.53	429.95	498.18	296.12	301.53	429.95	438.83	296.12	300.53	429.9	498.2
0.1538	296.72	300.53	390.85	438.84	296.72	300.53	390.85	371.36	297.41	300.53	390.85	438.83	296.72	300.53	390.85	371.36	296.72	299.39	390.8	438.8
0.1615	297.41	299.39	346.39	371.37	297.41	299.39	346.39	298.15	297.41	299.39	346.39	371.35	297.41	299.39	346.39	298.15	297.41	298.15	346.4	371.4
0.1700	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15		298.15	298.15	298.15	298.13	298.15	298.15	298.15		298.15		298.1	298.1

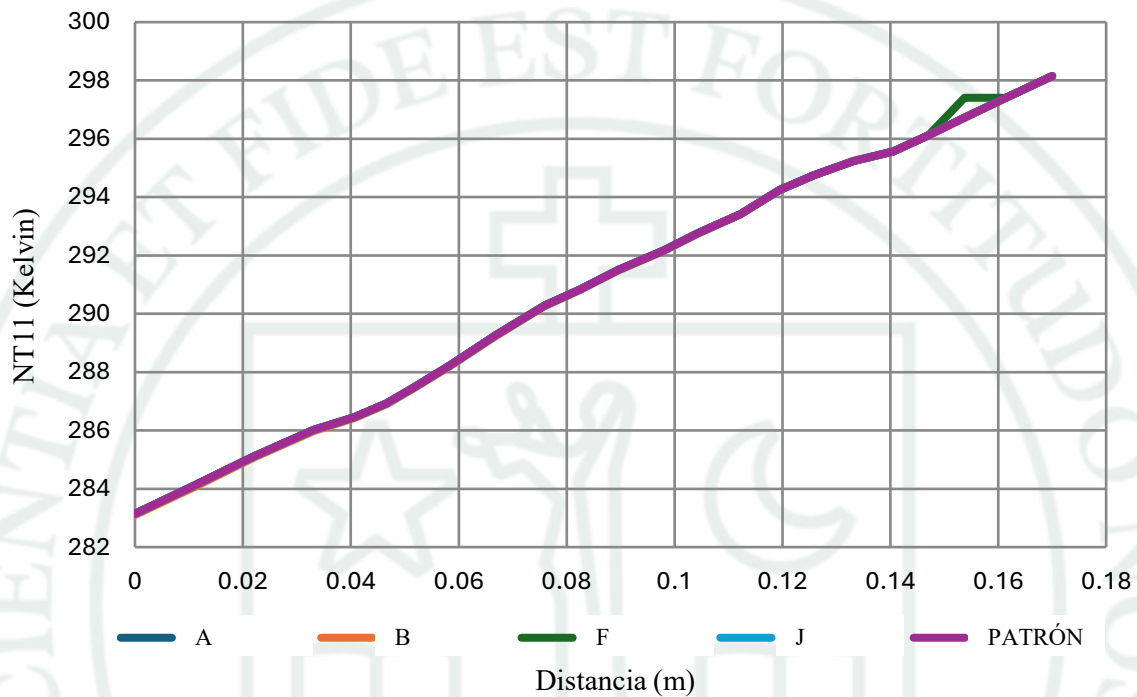
Nota. Elaboración propia

- Simulación con 10°C

Figura 93.

Comparativa de NT11 a 10 °C en función de la distancia nodal para diseño patrón, A, B, F y J

J



Nota. Elaboración propia

Los ladrillos de concreto, en todos sus diseños, lograron mantener los 25 °C interiores. Sin embargo, la disipación del calor hacia el exterior fue más acelerada en comparación con la arcilla. Por ejemplo, en el diseño Patrón la temperatura a la mitad del espesor fue de 18.18 °C, ligeramente superior a la del ladrillo de arcilla. Los diseños que incluían caucho reciclado y perlita mostraron aún mayor transferencia térmica: el diseño B alcanzó 19.10 °C a mitad del espesor, lo que evidencia una menor capacidad para conservar el calor interno. En un contexto real, esto implicaría que en zonas frías los ambientes interiores se enfrían más rápido, obligando al usuario a recurrir a calefacción con mayor frecuencia.

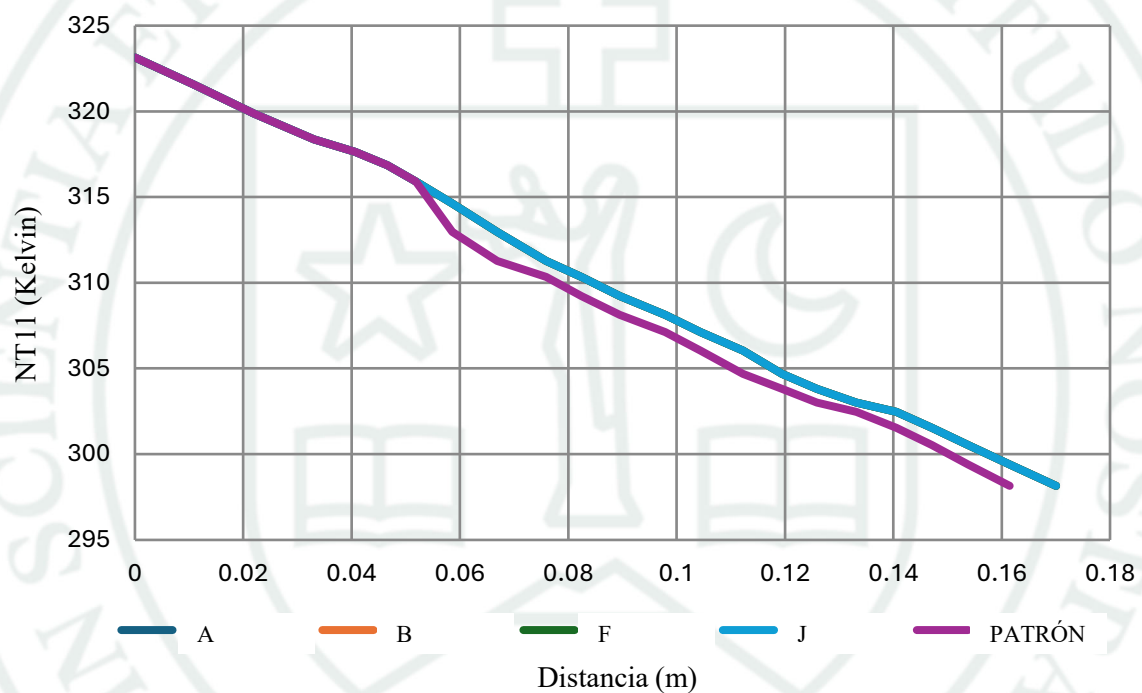
No hay diferencias sustanciales entre los diseños, pero el Diseño J, con presencia de perlita y caucho, muestra una muy ligera mejora en los valores de HFL a lo largo del espesor, lo que indica una menor conductividad térmica efectiva.

- **Simulación con 50°C**

Figura 94.

Comparativa de NT11 a 50 °C en función de la distancia nodal para diseño patrón, A, B, F y

J



Nota. Elaboración propia

Este escenario simula el efecto de una fachada expuesta al sol intenso, como ocurre a mediodía en verano. Aquí lo deseable es que el ladrillo no transmita ese calor hacia el interior rápidamente, ayudando a mantener frescos los ambientes interiores.

Bajo condiciones calurosas extremas, los ladrillos de concreto permitieron una mayor transferencia de calor hacia el interior que los de arcilla. En todos los diseños, la temperatura en la mitad del espesor fue mayor: el diseño Patrón marcó 34.12 °C, el diseño A (con caucho)

35.16 °C, y el diseño J (con perlita) llegó a 33.17 °C. Aunque el diseño J mostró un leve mejoramiento gracias al uso de perlita, sigue estando por debajo del desempeño de la arcilla.

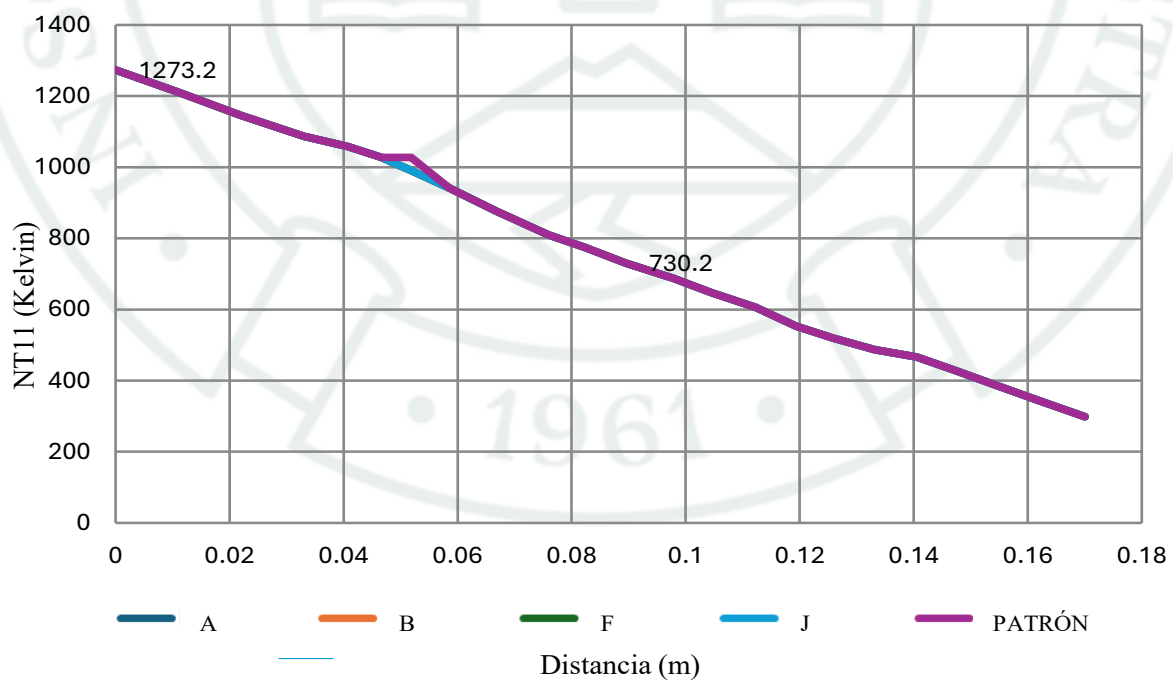
En días calurosos, los ladrillos de concreto sí permiten que el calor exterior penetre hacia el interior, aunque con cierto retardo. Esto significa que sin una adecuada ventilación o barreras térmicas adicionales (como aislamiento interior), los ambientes pueden calentarse considerablemente durante el día.

El Diseño J nuevamente presenta valores de flujo térmico levemente más bajos, especialmente a mitad de espesor (por ejemplo, 1175.1 frente a 1273.2 W/m² en otros diseños), lo que sugiere una mayor capacidad de disipar el calor sin transmitirlo completamente. Esto puede deberse al efecto aislante de la perlita expandida.

- **Simulación con 1000°C**

Figura 95.

Comparativa de NT11 a 1000 °C en función de la distancia nodal para diseño patrón, A, B, F y J



Nota. Elaboración propia

Este es el escenario más crítico y representa la respuesta del ladrillo ante un incendio severo. Aquí interesa ver si el material retarda el paso del calor, permitiendo proteger a los ocupantes y dar tiempo para evacuación, o si por el contrario facilita la propagación del calor y los gases calientes, algo letal.

En la simulación los ladrillos de concreto presentaron un avance más rápido del calor. A la mitad del espesor, el diseño Patrón marcó 598.41 °C, el diseño A (con caucho) 608.79 °C, y el diseño J (con perlita) 564.36 °C. Aunque todos mantuvieron los 25 °C en la cara interior durante el tiempo simulado, la progresión térmica fue más acelerada que en la arcilla. Además, los diseños con caucho reciclado representan un riesgo adicional ya que, en la vida real, al llegar a temperaturas cercanas a los 300 °C, el caucho comienza a descomponerse y liberar gases tóxicos como dioxinas o hidrocarburos aromáticos. Esto pone en riesgo la salud de los ocupantes y puede agravar la situación durante un incendio.

Los ladrillos de concreto, especialmente aquellos con caucho, no ofrecen una gran resistencia al fuego. El calor penetra velozmente y puede elevar la temperatura interna a niveles peligrosos en pocos minutos. Esto es un problema grave en edificaciones sin protecciones adicionales.

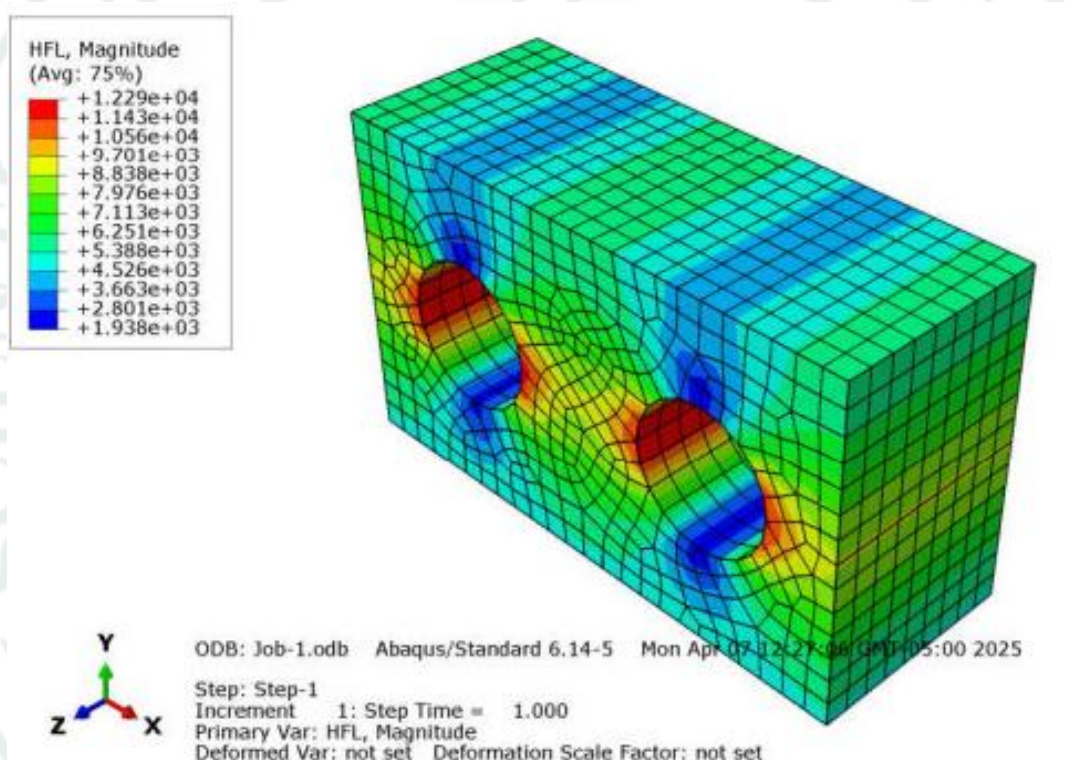
El Diseño Patrón, muestra una transmisión térmica ligeramente más constante y predecible, mientras que el Diseño J, aunque destaca en los escenarios previos, aquí podría ser riesgoso si se considera la emisión de gases del caucho en la vida real.

- **Simulación con flujo de calor impuesto (HFL)**

Este comportamiento se confirma visualmente en la Figura 96, donde se presenta el flujo de calor (HFL). Se aprecia que el calor se concentra en las zonas de contacto directo con la fuente, mostrando un flujo más dirigido y menos distribuido que en el caso de la arcilla. Esto refleja la influencia de la geometría interna en la eficiencia térmica de la unidad.

Figura 96.

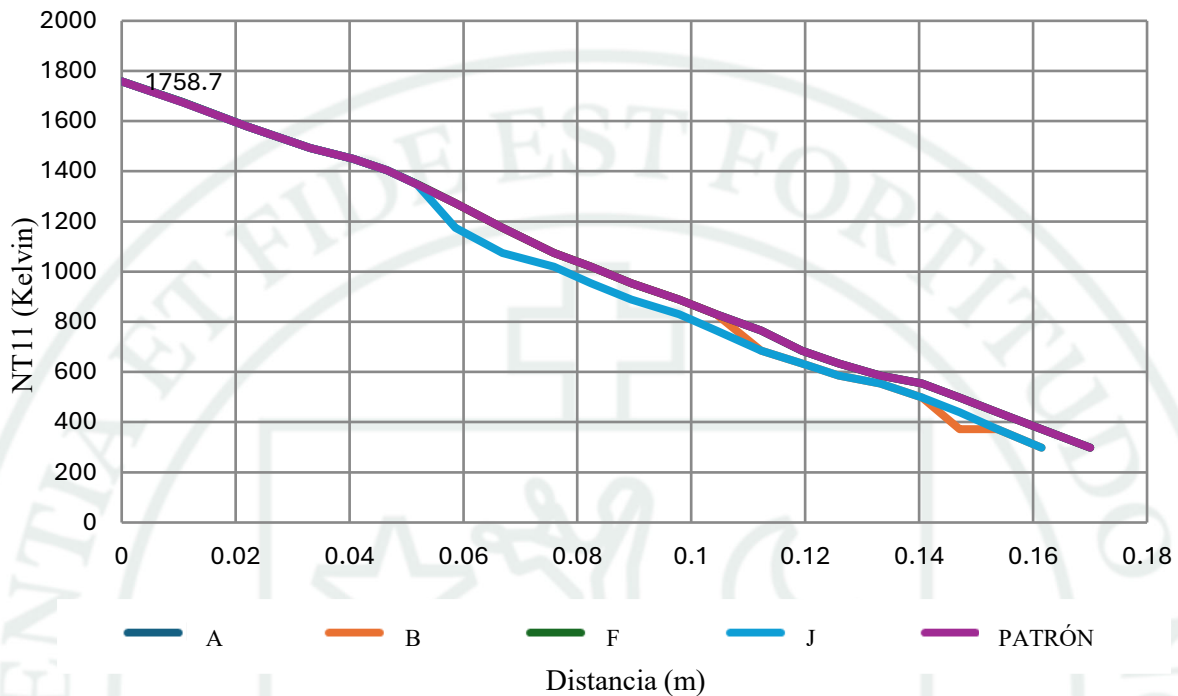
Flujo de calor (HFL) en el ladrillo de concreto



Nota. Elaboración propia

Figura 97.

Comparativa del flujo de calor (HFL) en función de la distancia nodal para diseños Patrón, A, B, F y J a 25 °C como condición de borde



Nota. Elaboración propia

En este escenario, los ladrillos de concreto mostraron una transmisión de calor más acelerada. La temperatura en la cara interior aumentó más rápidamente que en el caso del ladrillo de arcilla. En particular, los diseños con caucho reciclado (como el diseño A y B) exhibieron un comportamiento aún más permisivo al paso del calor, mientras que el diseño con perlita (J) mostró una ligera mejora, pero insuficiente para alcanzar el desempeño de la arcilla. La mayor conductividad térmica de los materiales compuestos permitió una entrada más rápida del flujo constante de calor. En términos prácticos, esto significa que, en un día caluroso con exposición solar continua, las viviendas construidas con estos ladrillos tenderían a calentarse más en menos tiempo, generando discomfort térmico en los ocupantes y aumentando la demanda energética para mantener un ambiente agradable.

Todos los diseños muestran un flujo de calor inicial de 1758.7 W/m² que va reduciéndose progresivamente. El descenso no es abrupto, lo que indica una conductividad térmica media-alta. Esto significa que los ladrillos de concreto no son materiales aislantes por naturaleza.

El Diseño J, sin embargo, presenta un descenso más pronunciado en ciertos tramos, lo que puede asociarse a la baja conductividad de la perlita, mientras que el caucho tiene menor influencia a nivel de flujo puro, por lo que este diseño muestra mejor disipación y retardo del calor.

4.3.3.2 Resistencia térmica

Para la evaluación de la resistencia térmica de los ladrillos, se utilizaron dos métodos complementarios. El primero consistió en aplicar la relación teórica entre espesor y conductividad térmica efectiva, dada por:

$$R = \frac{e}{k}$$

Donde:

“e” es el espesor del ladrillo (0.14 m)

“k” la conductividad térmica efectiva obtenida previamente

Este método entrega un valor idealizado que asume propiedades constantes y ausencia de pérdidas adicionales.

Tabla 143.

Cálculo de la resistencia térmica idealizada mediante la relación entre espesor y conductividad térmica efectiva

	Espesor (m)	Conductividad térmica efectiva (W/m·K)	Resistencia Térmica (K·m ² /W)
KK	0.142	0.532	0.267
Diseño Patrón	0.140	1.400	0.100
Diseño A	0.140	0.677	0.207
Diseño B	0.140	0.612	0.229
Diseño F	0.140	0.567	0.247
Diseño J	0.141	0.526	0.268

Nota. Elaboración propia

El segundo método se basó en los resultados de la simulación en ABAQUS, en la que se fijó una de las caras del ladrillo a 25 °C y se aplicó un flujo de calor constante en la cara opuesta. A partir de los resultados de temperatura nodal (NT11) en ambas caras, se calculó la resistencia térmica utilizando la expresión:

$$R = \frac{\Delta T}{q}$$

Donde:

ΔT es la diferencia de temperatura entre las caras

“q” el flujo de calor impuesto

Este procedimiento permite obtener una resistencia térmica basada en el comportamiento real del material bajo condiciones de carga térmica, considerando variaciones internas de temperatura y posibles no idealidades.

Tabla 144.

Cálculo de la resistencia térmica a partir de la simulación con flujo de calor constante en ABAQUS

	ΔT (K)	Flujo de calor (W/m ²)	Resistencia Térmica (K·m ² /W)
KK	1617.65	3705	0.437
Diseño Patrón	1460.55	9750	0.150
Diseño A	1460.71	4715	0.310
Diseño B	1460.57	4262	0.343
Diseño F	1460.72	3949	0.370
Diseño J	1460.57	3663	0.399

Nota. Elaboración propia

Se observa que los valores obtenidos mediante simulación fueron superiores a los calculados teóricamente, reflejando una respuesta térmica más conservadora y representativa. Esto valida la importancia de realizar simulaciones numéricas para complementar los cálculos teóricos y mejorar la precisión en la evaluación térmica de materiales.

Por tanto, la combinación de cálculos teóricos y simulaciones numéricas permitió no solo contrastar los resultados, sino también comprender mejor el comportamiento térmico real de los ladrillos. Esta metodología garantiza una evaluación más completa y confiable de su desempeño, especialmente considerando que en condiciones reales de operación pueden presentarse variaciones que el enfoque teórico clásico no contempla.

En primer lugar, el cálculo de la resistencia térmica idealizada, obtenido a partir de la relación entre el espesor del ladrillo y su conductividad térmica efectiva, permitió observar una tendencia clara: la incorporación de caucho reciclado reduce significativamente la conductividad térmica de la mezcla, incrementando en consecuencia la resistencia térmica. El diseño patrón presentó una conductividad térmica de 1.400 W/m·K y una resistencia térmica de 0.100 K·m²/W, mientras que el diseño A, con 5% de caucho, redujo la conductividad a 0.677 W/m·K y elevó la resistencia a 0.207 K·m²/W. Al incorporar también perlita expandida (diseño

B), se obtuvo una mejora adicional, alcanzando una resistencia térmica de $0.229 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$. Esta tendencia se mantuvo en los diseños F y J, donde el aumento progresivo del caucho junto con el 5% de perlita generó incrementos constantes en la resistencia térmica. El diseño J, con 15% de caucho y 5% de perlita, alcanzó una resistencia térmica idealizada de $0.268 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$, valor incluso ligeramente superior al obtenido para el ladrillo tradicional de arcilla mecanizado (ladrillo KK), cuya resistencia fue de $0.267 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$.

En segundo lugar, la simulación térmica realizada en ABAQUS bajo condiciones de flujo de calor constante permitió una evaluación más realista, incorporando la geometría de los ladrillos, incluyendo el número y tamaño de las perforaciones. En este análisis, el ladrillo KK, con 18 perforaciones pequeñas, presentó una resistencia térmica de $0.437 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$. Por su parte, el diseño patrón, con solo dos perforaciones de 2 pulgadas, mostró un valor significativamente menor ($0.150 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$). Sin embargo, al incluir adiciones de caucho y perlita, los diseños modificados mostraron una mejora sostenida. El diseño A alcanzó una resistencia de $0.310 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$, el diseño B de $0.343 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$, el diseño F de $0.370 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ y finalmente el diseño J logró una resistencia térmica de $0.399 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$, acercándose notablemente al valor del ladrillo KK.

Ambos enfoques, tanto el cálculo idealizado como la simulación, muestran una tendencia coherente: el uso de caucho reciclado y perlita expandida mejora sustancialmente la resistencia térmica del ladrillo de concreto. Esto evidencia que la incorporación de estos materiales no solo contribuye a un mejor comportamiento térmico, sino que también permite acercar e incluso igualar el desempeño térmico de los ladrillos de concreto respecto a los de arcilla, sin modificar la geometría ni el espesor del elemento. Esta mejora, junto con el uso de materiales reciclados y livianos, refuerza la viabilidad del diseño J como una alternativa sostenible para la construcción en climas donde el aislamiento térmico es una prioridad.

4.3.4 Actividad 4. Comparación de resultados.

La comparación inicial de propiedades físicas y térmicas evidenció diferencias relevantes entre los ladrillos de arcilla y los de concreto, tanto en sus diseños patrón como en los experimentales. En cuanto a densidad, los ladrillos de arcilla mecanizada presentaron un valor de 1661.41 kg/m^3 , mientras que los de concreto alcanzaron densidades superiores a 2100 kg/m^3 en promedio. Esta diferencia se debe a la menor cantidad de vacíos de los ladrillos de concreto ($\approx 11\%$) en comparación con la arcilla (33.68%), lo cual se traduce en unidades más compactas y pesadas.

En lo que respecta a la capacidad calorífica específica, los ladrillos de arcilla reportaron un valor de $840 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, inferior al de los diseños de concreto que oscilaron entre 935 y $991 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$. Este incremento se debe al aporte del caucho reciclado y la perlita expandida, materiales que poseen mayor calor específico que el concreto.

Al calcular la capacidad térmica por unidad ($C = m \cdot c$), los resultados muestran una diferencia aún más marcada: mientras que los ladrillos de arcilla alcanzaron 3162 J/K , los de concreto superaron los 5200 J/K , con máximos cercanos a 5540 J/K en los diseños experimentales B, F y J. Esto significa que las unidades de concreto pueden almacenar y liberar casi el doble de energía frente a cambios de temperatura, dotándolas de una mayor inercia térmica. En la práctica, este comportamiento implica que las edificaciones construidas con dichos diseños tenderán a mantener condiciones más estables de confort interior, reduciendo las fluctuaciones térmicas en ambientes de uso cotidiano.

En el escenario frío (10°C), los ladrillos de concreto alcanzan una temperatura interior de 298.15 K , igual que los de arcilla, debido a que las temperaturas de las superficies están impuestas. Sin embargo, al observar la evolución del flujo de calor hacia el interior, se evidencia una menor capacidad de aislamiento térmico: el flujo disminuye, pero no tan drásticamente como en los ladrillos de arcilla. Mientras que en estos últimos el flujo cae de

1915.8 W/m² a solo 298.1 W/m², en los de concreto los valores intermedios son más altos, lo que implica una mayor transmisión de calor desde el exterior frío hacia el interior.

En el escenario caluroso (50 °C), sucede algo similar. Aunque el interior de los ladrillos de concreto también se mantiene en 298.15 K, el flujo de calor es más elevado que en la arcilla. Mientras los ladrillos de arcilla permiten el paso de 1007.5 W/m² hacia el interior, los de concreto superan los 1175 W/m², lo cual revela que el concreto permite una mayor transferencia de calor, haciendo menos eficiente su comportamiento como aislante frente a ambientes externos muy calurosos.

Bajo condiciones extremas como en el escenario de fuego (1000 °C), se observa que ambos materiales tienen la misma temperatura en la cara expuesta, pero las diferencias se hacen notorias hacia el centro del ladrillo. Ambos alcanzan 812.6 K, sin embargo, conforme se avanza hacia el interior, el concreto muestra temperaturas mayores que la arcilla. Esto indica que el calor penetra más fácilmente en el concreto, lo que sugiere una menor resistencia térmica. Además, en algunos diseños que incorporan caucho reciclado, existe el riesgo añadido de emisión de gases tóxicos a altas temperaturas, lo cual no ocurre con la arcilla.

Al comparar ambos materiales bajo flujo de calor constante, el ladrillo de arcilla sobresale por su capacidad de retrasar la transmisión del calor hacia el interior. Esto lo convierte en un material más adecuado para climas cálidos con alta radiación solar durante el día. Los ladrillos de concreto, en especial aquellos con aditivos como caucho reciclado, se calientan más rápidamente y transfieren ese calor al interior con mayor facilidad. En consecuencia, el ladrillo de arcilla proporciona mayor estabilidad térmica y confort interior frente a una fuente de calor sostenida, lo cual podría deberse también a la mayor cantidad de perforaciones en su geometría.

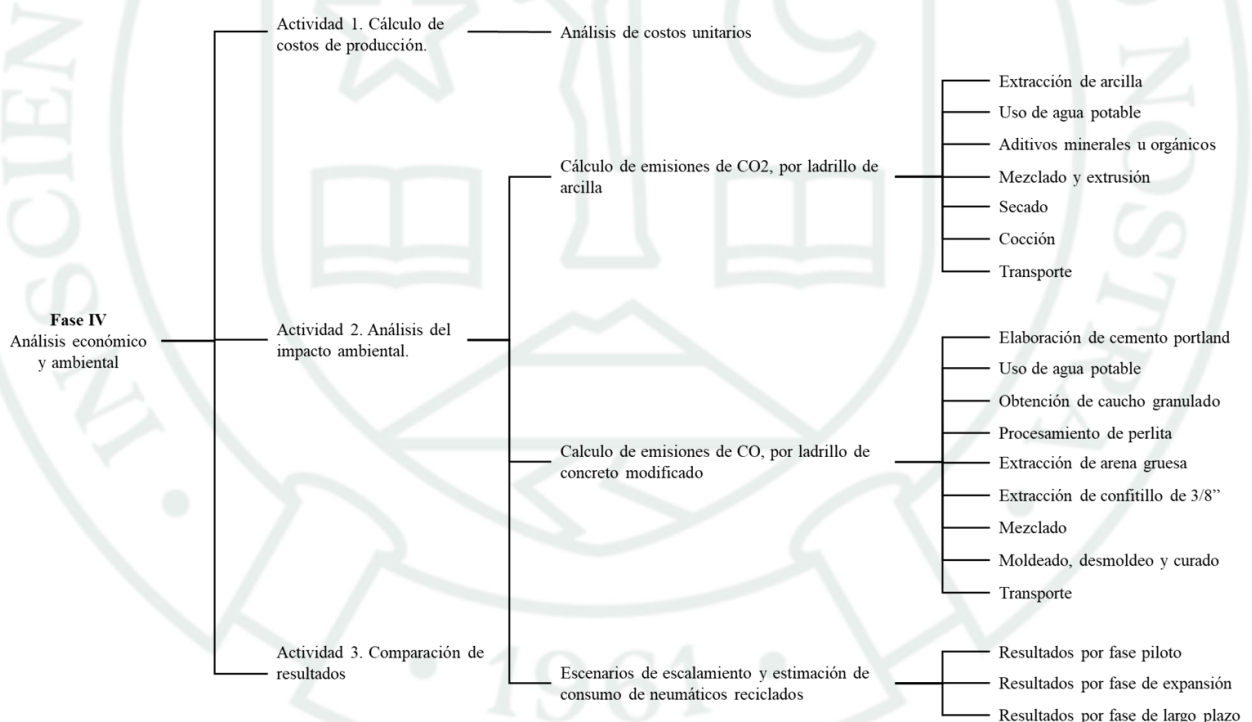
Finalmente, el análisis térmico evidenció que la incorporación de caucho reciclado y perlita expandida en los diseños de ladrillos de concreto mejora significativamente su

resistencia térmica. A nivel idealizado, el diseño J (15% caucho y 5% perlita) alcanzó una resistencia térmica de $0.268 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$, valor superior al del ladrillo tradicional de arcilla mecanizada ($0.267 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$). De forma complementaria, la simulación en ABAQUS, considerando la geometría de los ladrillos, confirmó esta tendencia: el diseño J alcanzó una resistencia de $0.399 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$, acercándose al valor del ladrillo KK ($0.437 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$). En ambos métodos, se observó que a mayor contenido de caucho (con 5% constante de perlita), mayor fue la resistencia térmica, lo cual refuerza el potencial del diseño J como una alternativa sostenible y eficiente frente a los ladrillos tradicionales.

4.4 Fase IV. Análisis económico y ambiental

Figura 98.

Mapa de fase IV



Nota. Elaboración propia

4.4.1 Actividad 1. Cálculo de costos de producción.

4.4.1.1 Análisis de costos unitarios

Tabla 145.

Análisis de costos unitarios de la fabricación de ladrillo de concreto del diseño patrón

PARTIDA FABRICACIÓN DE LADRILLO CONCRETO EMPLEANDO CAUCHO RECICLADO Y PERLITA MINERAL: DISEÑO PATRON (0% CAUCHO, 0% PERLITA)						
JORNADA		8 h/d		RENDIMIENTO		300 ladrillo/día
RECURSOS	UND	CUADRILL A	CANTIDA D	PRECIO UNITARIO	PARCIAL	TOTAL
MANO DE OBRA						S/ 0.45
Peón	hm	2	0.05	S/ 9.00	S/ 0.45	
MATERIALES						S/ 0.67
Agua	m3		0.000579669	S/ 9.00	S/ 0.01	
Cemento	kg		0.992475925	S/ 0.55	S/ 0.55	
Confitillo	m3		0.000694106	S/ 65.00	S/ 0.05	
Arena Gruesa	m3		0.000666289	S/ 45.00	S/ 0.03	
Caucho Granulado	m3		0	S/ 300.00	S/ -	
Perlita Mineral	m3		0	S/ 800.00	S/ -	
Moldes	und		0.002	S/ 18.00	S/ 0.04	
EQUIPO Y HERRAMIENTAS						S/ 0.03
Herramientas Manuales	%		3%	S/ 0.41	S/ 0.01	
Mezcladora	hm	1	0.005	S/ 3.75	S/ 0.02	
PRECIO UNITARIO						S/ 1.15

Nota. Elaboración propia

Tabla 146.

Análisis de costos unitarios de la fabricación de ladrillo de concreto del diseño A

FABRICACIÓN DE LADRILLO CONCRETO EMPLEANDO CAUCHO RECICLADO Y PERLITA MINERAL: DISEÑO A (5% CAUCHO, 0% PERLITA)						
JORNADA		8 h/d	RENDIMIENTO		300	ladrillo/día
RECURSOS	UND	CUADRILL A	CANTIDA D	PRECIO UNITARIO	PARCIAL	TOTAL
MANO DE OBRA						S/ 0.45
Peón	hm	2	0.05	S/ 9.00	S/ 0.45	
MATERIALES						S/ 0.68
Agua	m3		0.000566939	S/ 9.00	S/ 0.01	
Cemento	kg		0.966280431	S/ 0.55	S/ 0.53	
Confitillo	m3		0.000675785	S/ 65.00	S/ 0.04	
Arena Gruesa	m3		0.000648703	S/ 45.00	S/ 0.03	
Caucho Granulado	m3		0.000121077	S/ 300.00	S/ 0.04	
Perlita Mineral	m3		0	S/ 800.00	S/ -	
Moldes	und		0.002	S/ 18.00	S/ 0.04	
EQUIPO Y HERRAMIENTAS						S/ 0.03
Herramientas Manuales	%		3%	S/ 0.41	S/ 0.01	
Mezcladora	hm	1	0.005	S/ 3.75	S/ 0.02	
PRECIO UNITARIO						S/ 1.17

Nota. Elaboración propia

Tabla 147.

Análisis de costos unitarios de la fabricación de ladrillo de concreto del diseño B

PARTIDA FABRICACIÓN DE LADRILLO CONCRETO EMPLEANDO CAUCHO RECICLADO Y PERLITA MINERAL: DISEÑO B (5% CAUCHO, 5% PERLITA)						
JORNADA		8 h/d	RENDIMIENTO		300	ladrillo/día
RECURSOS	UND	CUADRILL A	CANTIDA D	PRECIO UNITARIO	PARCIAL	TOTAL
MANO DE OBRA						S/ 0.45
Peón	hm	2	0.05	S/ 9.00	S/ 0.45	
MATERIALES						S/ 0.78
Agua	m3		0.000600983	S/ 9.00	S/ 0.01	
Cemento	kg		0.951544407	S/ 0.55	S/ 0.53	
Confitillo	m3		0.00066548	S/ 65.00	S/ 0.04	
Arena Gruesa	m3		0.000638811	S/ 45.00	S/ 0.03	
Caucho Granulado	m3		0.000126083	S/ 300.00	S/ 0.04	
Perlita Mineral	m3		0.000126487	S/ 800.00	S/ 0.10	
Moldes	und		0.002	S/ 18.00	S/ 0.04	
EQUIPO Y HERRAMIENTAS						S/ 0.03
Herramientas Manuales	%		3%	S/ 0.41	S/ 0.01	
Mezcladora	hm	1	0.005	S/ 3.75	S/ 0.02	
PRECIO UNITARIO						S/ 1.26

Nota. Elaboración propia

Tabla 148.

Análisis de costos unitarios de la fabricación de ladrillo de concreto del diseño F

PARTIDA FABRICACIÓN DE LADRILLO CONCRETO EMPLEANDO CAUCHO RECICLADO Y PERLITA MINERAL: DISEÑO F (10% CAUCHO, 5% PERLITA)						
JORNADA		8 h/d	RENDIMIENTO		300	ladrillo/día
RECURSOS	UND	CUADRILL A	CANTIDA D	PRECIO UNITARIO	PARCIAL	TOTAL
MANO DE OBRA						S/ 0.45
Peón	hm	2	0.05	S/ 9.00	S/ 0.45	
MATERIALES						S/ 0.80
Agua	m3		0.000587955	S/ 9.00	S/ 0.01	
Cemento	kg		0.922328659	S/ 0.55	S/ 0.51	
Confitillo	m3		0.000645047	S/ 65.00	S/ 0.04	
Arena Gruesa	m3		0.000619198	S/ 45.00	S/ 0.03	
Cauchó Granulado	m3		0.000259326	S/ 300.00	S/ 0.08	
Perlita Mineral	m3		0.00013008	S/ 800.00	S/ 0.10	
Moldes	und		0.002	S/ 18.00	S/ 0.04	
EQUIPO Y HERRAMIENTAS						S/ 0.03
Herramientas Manuales	%		3%	S/ 0.41	S/ 0.01	
Mezcladora	hm	1	0.005	S/ 3.75	S/ 0.02	
PRECIO UNITARIO						S/ 1.28

Nota. Elaboración propia

Tabla 149.

Análisis de costos unitarios de la fabricación de ladrillo de concreto del diseño J

FABRICACIÓN DE LADRILLO CONCRETO EMPLEANDO CAUCHO RECICLADO Y PERLITA MINERAL: DISEÑO J (15% CAUCHO, 5% PERLITA)						
JORNADA		8 h/d	RENDIMIENTO		300	ladrillo/día
RECURSOS	UND	CUADRILL A	CANTIDA D	PRECIO UNITARIO	PARCIAL	TOTAL
MANO DE OBRA						S/ 0.45
Peón	hm	2	0.05	S/ 9.00	S/ 0.45	
MATERIALES						S/ 0.83
Agua	m3		0.000574166	S/ 9.00	S/ 0.01	
Cemento	kg		0.891406649	S/ 0.55	S/ 0.49	
Confitillo	m3		0.00062342	S/ 65.00	S/ 0.04	
Arena Gruesa	m3		0.000598437	S/ 45.00	S/ 0.03	
Caucho Granulado	m3		0.00040036	S/ 300.00	S/ 0.12	
Perlita Mineral	m3		0.000133882	S/ 800.00	S/ 0.11	
Moldes	und		0.002	S/ 18.00	S/ 0.04	
EQUIPO Y HERRAMIENTAS						S/ 0.03
Herramientas Manuales	%		3%	S/ 0.41	S/ 0.01	
Mezcladora	hm	1	0.005	S/ 3.75	S/ 0.02	
PRECIO UNITARIO						S/ 1.31

Nota. Elaboración propia

En las Tablas 145 a 149 se presenta el análisis de costos unitarios para la fabricación de ladrillos de concreto correspondientes al diseño patrón y a los diseños modificados con adición de caucho granulado reciclado y perlita mineral expandida. Todos los cálculos se han realizado considerando una jornada de 8 horas con un rendimiento de 300 unidades por día.

El diseño patrón (0% caucho, 0% perlita) presenta el menor costo unitario (S/ 1.15) debido a la ausencia de materiales alternativos y un consumo moderado de cemento (0.992 kg por unidad). Este diseño sirve como base de comparación para evaluar el impacto económico de las modificaciones introducidas en los demás diseños.

El diseño A (5% caucho, 0% perlita) incrementa ligeramente el costo unitario a S/ 1.17. Este aumento se debe a la incorporación de caucho granulado, cuyo costo unitario es significativamente más alto que el de los áridos convencionales. Sin embargo, al sustituir parcialmente la arena gruesa por caucho, se reduce levemente el consumo de cemento, contribuyendo a una contención del costo total.

El diseño B (5% caucho, 5% perlita) alcanza un costo unitario de S/ 1.26. Si bien el uso de perlita representa un aumento notable en el costo del material (S/ 0.10 por unidad), este diseño ofrece una mejor eficiencia estructural que el diseño A, justificando su incorporación como alternativa técnica viable. La adición de perlita, aunque costosa, permite reducir marginalmente el volumen de cemento empleado y mejora la resistencia a compresión respecto al diseño A.

En el diseño F (10% caucho, 5% perlita), el costo unitario asciende a S/ 1.28. Este diseño combina una reducción más acentuada en el uso de cemento (0.922 kg/unidad) con un incremento en el contenido de caucho, lo que impacta directamente en el costo final. La inclusión de perlita y un mayor volumen de caucho aumentan el costo total de materiales, aunque dentro de un margen aceptable.

Finalmente, el diseño J (15% caucho, 5% perlita) registra el costo unitario más alto (S/ 1.31), debido principalmente al mayor volumen de caucho incorporado (0.00040 m³ por unidad) y al uso constante de perlita. A pesar de ser el más costoso, este diseño permite evaluar el comportamiento mecánico y económico en el límite superior de incorporación de materiales reciclados, lo cual resulta relevante para el enfoque experimental del estudio.

En términos generales, se observa una tendencia creciente del costo unitario conforme se incrementa la proporción de materiales no convencionales, especialmente la perlita. No obstante, algunos diseños como el B y el F logran equilibrar el costo con una adecuada eficiencia estructural, evidenciada en su resistencia a compresión. Esta información será fundamental para la evaluación técnico-económica integral de los diseños seleccionados para la Fase III del estudio.

4.4.2 Actividad 2. Análisis del impacto ambiental.

4.4.2.1 Cálculo de emisiones de CO₂ por ladrillo de arcilla

Para estimar el impacto ambiental de un ladrillo de arcilla mecanizado, se consideraron las emisiones asociadas a cada una de las etapas del ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta el transporte del producto final. En todos los casos se adoptaron los valores más altos reportados por la literatura científica y bases de datos reconocidas, con el fin de establecer una línea de base conservadora.

4.4.2.1.1 Extracción de arcilla

Las emisiones asociadas con la extracción de arcilla se estimaron en 0.010 kg CO₂e por kg de ladrillo, valor que representa el extremo superior del rango reportado para este proceso (Martínez-Lage et al., 2020).

4.4.2.1.2 *Uso de agua potable*

El uso de agua en el proceso de fabricación de ladrillos de arcilla genera emisiones relativamente bajas. De acuerdo con la base de datos Ecoinvent v3.6, se considera un máximo de 0.001 kg CO_{2e} por kg de ladrillo, principalmente atribuible a procesos de captación y tratamiento (Ecoinvent, 2020).

4.4.2.1.3 *Aditivos minerales u orgánicos*

Aunque los aditivos (como aserrín, paja o ceniza) se utilizan en pequeñas proporciones (generalmente entre 1 y 5%), se estimó una emisión conservadora de 0.010 kg CO_{2e} por kg de ladrillo, de acuerdo con Martínez-Lage et al. (2020).

4.4.2.1.4 *Mezclado y extrusión*

Este proceso representa una etapa de consumo energético moderado. Se consideró un valor de 0.030 kg CO_{2e} por kg de ladrillo, asociado al uso de mezcladoras y sistemas de extrusión con energía eléctrica o diésel (Schroeder, 2016).

4.4.2.1.5 *Secado*

Cuando el secado no es natural, puede implicar un consumo energético considerable. Para este análisis se asumió un proceso de secado asistido, con una emisión máxima de 0.020 kg CO_{2e} por kg de ladrillo (Ecoinvent, 2020).

4.4.2.1.6 *Cocción*

La etapa de cocción es la más intensiva en emisiones, debido al uso de hornos que emplean combustibles fósiles o biomasa. Se consideró un valor de 0.400 kg CO_{2e} por kg de ladrillo, correspondiente al tipo de horno menos eficiente (Martínez-Lage et al., 2020).

4.4.2.1.7 *Transporte*

Considerando un transporte promedio de 30 km en camión diésel, se estimaron emisiones de 0.0021 kg CO_{2e} por kg de ladrillo, de acuerdo con factores medios de emisión (Ecoinvent, 2020).

En conjunto, estas cifras permiten estimar un total de 0.4721 kg CO₂e por kg de ladrillo de arcilla mecanizado, siendo el componente de cocción el principal contribuyente al impacto ambiental del producto.

Tabla 150.

Cálculo de CO₂ emitido en la fabricación de un ladrillo de arcilla mecanizado

		CO ₂ / kg de ladrillo
Extracción de materia prima	Arcilla	0.0100
	Agua	0.0003
	Aditivos orgánicos o minerales	0.0100
Mezclado y Extrusión		0.0300
Secado		0.0200
Cocción		0.4000
Transporte		0.0021
CO₂ / kg de ladrillo		0.4724
Peso (kg)		CO₂ / ladrillo
Ladrillo King Kong 18 huecos	3.7644	1.7783

Nota. Elaboración propia

Los ladrillos de arcilla mecanizados presentan una emisión total de 1.7783 kg de CO₂ por unidad, una cifra considerablemente alta en comparación con las emisiones generadas por los diseños alternativos a base de concreto. El desglose de las fuentes de emisión muestra que la cocción es, por amplio margen, la etapa más intensiva en carbono (0.4000 kg de CO₂/kg), representando más del 84% del total si se considera el CO₂/kg del ladrillo. Esto se debe al uso de hornos alimentados generalmente por combustibles fósiles, lo cual resalta la ineficiencia energética y ambiental de este sistema tradicional.

El secado y la extrusión también suman, aunque en menor proporción, y destacan como etapas de alto consumo energético.

El uso de energía térmica intensiva, probablemente proveniente de fuentes no renovables, marca un punto crítico en la sostenibilidad de este tipo de ladrillos, a pesar de su

amplia utilización en el mercado. Aunque los materiales base como la arcilla tienen emisiones relativamente bajas, el procesamiento transforma radicalmente su huella ambiental.

4.4.2.2 Cálculo de emisiones de CO₂ por ladrillo de concreto modificado

Para el análisis del impacto ambiental en la fabricación de unidades de albañilería de concreto, se consideró la estimación de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) asociadas a la extracción, procesamiento y transporte de los materiales utilizados. Cada uno de los factores de emisión fue seleccionado o ajustado con base en estudios bibliográficos actualizados y contextuales al caso de estudio (Arequipa, Perú), a fin de reflejar con mayor realismo el comportamiento ambiental del proceso de producción.

4.4.2.2.1 *Elaboración de cemento portland*

En cuanto al cemento Portland, se utilizó un valor de 0.9000 kg CO₂/kg, ampliamente validado en literatura técnica y bases de datos internacionales. Este material es responsable de la mayor proporción de emisiones debido al proceso de calcinación de carbonatos a altas temperaturas (entre 1,400 °C y 1,500 °C), y representa la principal fuente de emisiones en las mezclas de concreto (Habert et al., 2010).

4.4.2.2.2 *Uso de agua potable*

Para el agua potable, se tomó como referencia el sistema de abastecimiento de la ciudad de Arequipa, el cual se caracteriza por utilizar fuentes superficiales ubicadas a mayor altitud. Gracias a ello, el transporte del recurso hasta las plantas de tratamiento requiere un consumo energético bajo. Según estimaciones realizadas para sistemas urbanos similares, el proceso completo de potabilización genera entre 0.2 y 0.4 kg CO₂/m³ de agua, lo que equivale aproximadamente a 0.0003 kg CO₂ por kilogramo de agua utilizada en la mezcla (González et al., 2012; Aldaya & Llamas, 2009).

4.4.2.2.3 *Obtención de caucho granulado*

Respecto al caucho granulado reciclado, se consideró una emisión ajustada de 0.0315 kg CO₂/kg, obtenida a partir de un consumo energético promedio de 0.35 kWh/kg en el proceso de trituración mecánica (Díaz & Fernández, 2014), combinado con el factor de emisión del sistema eléctrico peruano (0.09 kg CO₂/kWh) según el Ministerio de Energía y Minas (2023). Esta estimación refleja con mayor fidelidad el contexto local, donde la matriz energética tiene una menor intensidad de carbono que en otros países.

4.4.2.2.4 *Procesamiento de perlita*

La perlita expandida, por el contrario, es un material de mayor huella ambiental debido a su proceso de expansión térmica. Se adoptó un valor de 0.3000 kg CO₂/kg, en concordancia con la literatura internacional, donde se indica que productos volcánicos sometidos a tratamientos térmicos, como perlita o vermiculita, requieren grandes cantidades de energía térmica para su expansión (EPA, 2016).

4.4.2.2.5 *Extracción de arena gruesa*

En el caso de la arena gruesa, al tratarse de un material que se encuentra en estado natural en lechos fluviales y no requiere procesamiento mecánico, se asignó un factor de emisión de 0.0300 kg CO₂/kg, asociado principalmente al transporte (Toscano & Ramírez, 2020).

4.4.2.2.6 *Extracción de confitillo de 3/8"*

Por otro lado, el confitillo de 3/8" o grava fina, sí requiere procesos de chancado y clasificación mecánica, aunque de forma más eficiente en canteras locales. Por ello, se utilizó un valor moderado de 0.0600 kg CO₂/kg, basado en estudios sobre producción de agregados pétreos (González & Arroyo, 2021).

4.4.2.2.7 Mezclado

El mezclado se efectuó utilizando un trompo de 125 litros de capacidad, durante un tiempo promedio de 3 a 4 minutos por tanda, con una producción aproximada de 8 unidades por ciclo. Se asumió una potencia típica de 0.75 kW para este tipo de mezcladoras, lo que genera un consumo energético de aproximadamente 0.0055 kWh por ladrillo. Considerando el factor de emisión eléctrica para el sistema peruano de 0.09 kg CO₂/kWh (Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2023), la huella de carbono asociada al mezclado mecánico se estimó en 0.0005 kg CO₂ por unidad.

4.4.2.2.8 Moldeado, delmoldeo y curado

Las etapas de moldeado y desmoldeo fueron completamente manuales, y el curado se realizó mediante inmersión en poza de agua, por lo que no se generaron emisiones adicionales asociadas al uso de energía en estas fases.

4.4.2.2.9 Transporte

En cuanto al transporte del producto desde el lugar de fabricación hasta el punto de uso, se estimó una emisión de 0.0500 kg CO₂ por unidad, considerando un recorrido urbano corto con carga ligera, en base a factores medios de transporte terrestre establecidos en estudios de análisis de ciclo de vida (Blanco et al., 2014; SimaPro Database, 2022).

Estos factores de emisión ajustados proporcionan una base sólida y coherente para el análisis comparativo del impacto ambiental de los distintos diseños de mezcla evaluados en esta investigación.

Tabla 151.*Cálculo de kg de CO2 emitido en la fabricación de un ladrillo del diseño Patrón*

	MATERIALES	UND	CANTIDAD	CO2/kg	PARCIAL
Extracción de materia prima	Agua	kg	0.5797	0.0003	0.0002
	Cemento	kg	0.9925	0.9000	0.8932
	Confitillo	kg	1.8671	0.0600	0.1120
	Arena Gruesa	kg	1.6857	0.0300	0.0506
	Caucho Granulado	kg	0.0000	0.0315	0.0000
	Perlita Mineral	kg	0.0000	0.3000	0.0000
				kg de CO2/unidad	1.0560
Fabricación artesanal				kg de CO2/unidad	0.0005
Transporte				kg de CO2/unidad	0.0500
TOTAL				kg de CO2/unidad	1.1065

Nota. Elaboración propia

Tabla 152.*Cálculo de kg de CO2 emitido en la fabricación de un ladrillo del diseño A*

	MATERIALES	UND	CANTIDAD	CO2/kg	PARCIAL
Extracción de materia prima	Agua	kg	0.5669	0.0003	0.0002
	Cemento	kg	0.9663	0.9000	0.8697
	Confitillo	kg	1.8179	0.0600	0.1091
	Arena Gruesa	kg	1.6412	0.0300	0.0492
	Caucho Granulado	kg	0.1327	0.0315	0.0042
	Perlita Mineral	kg	0.0000	0.3000	0.0000
				kg de CO2/unidad	1.0323
Fabricación artesanal				kg de CO2/unidad	0.0005
Transporte				kg de CO2/unidad	0.0500
TOTAL				kg de CO2/unidad	1.0828

Nota. Elaboración propia

Tabla 153.*Cálculo de kg de CO2 emitido en la fabricación de un ladrillo del diseño B*

	MATERIALES	UND	CANTIDAD	CO2/kg	PARCIAL
Extracción de materia prima	Agua	kg	0.6010	0.0003	0.0002
	Cemento	kg	0.9515	0.9000	0.8564
	Confitillo	kg	1.7901	0.0600	0.1074
	Arena Gruesa	kg	1.6162	0.0300	0.0485
	Caucho Granulado	kg	0.1382	0.0315	0.0044
	Perlita Mineral	kg	0.0280	0.3000	0.0084
				kg de CO2/unidad	1.0252
Fabricación artesanal				kg de CO2/unidad	0.0005
Transporte				kg de CO2/unidad	0.0500
TOTAL				kg de CO2/unidad	1.0757

Nota. Elaboración propia

Tabla 154.*Cálculo de kg de CO2 emitido en la fabricación de un ladrillo del diseño F*

	MATERIALES	UND	CANTIDAD	CO2/kg	PARCIAL
Extracción de materia prima	Agua	kg	0.5880	0.0003	0.0002
	Cemento	kg	0.9223	0.9000	0.8301
	Confitillo	kg	1.7352	0.0600	0.1041
	Arena Gruesa	kg	1.5666	0.0300	0.0470
	Caucho Granulado	kg	0.2842	0.0315	0.0090
	Perlita Mineral	kg	0.0287	0.3000	0.0086
				kg de CO2/unidad	0.9990
Fabricación artesanal				kg de CO2/unidad	0.0005
Transporte				kg de CO2/unidad	0.0500
TOTAL				kg de CO2/unidad	1.0495

Nota. Elaboración propia

Tabla 155.*Cálculo de kg de CO₂ emitido en la fabricación de un ladrillo del diseño J*

	MATERIALES	UND	CANTIDAD	CO ₂ /kg	PARCIAL
Extracción de materia prima	Agua	kg	0.5742	0.0003	0.0002
	Cemento	kg	0.8914	0.9000	0.8023
	Confitillo	kg	1.6770	0.0600	0.1006
	Arena Gruesa	kg	1.5140	0.0300	0.0454
	Caucho Granulado	kg	0.4388	0.0315	0.0138
	Perlita Mineral	kg	0.0296	0.3000	0.0089
				kg de CO₂/unidad	0.9712
Fabricación artesanal				kg de CO₂/unidad	0.0005
Transporte				kg de CO₂/unidad	0.0500
TOTAL				kg de CO₂/unidad	1.0217

Nota. Elaboración propia

Los diseños alternativos basados en concreto, con adiciones de caucho granulado reciclado y perlita, muestran valores significativamente menores de CO₂ por unidad, en un rango que va desde 1.0217 kg (J) hasta 1.1065 kg (Patrón). A continuación, se comentan las observaciones más relevantes:

- Diseño Patrón: Su mayor carga de CO₂ (1.1065 kg) se explica por el uso intensivo de cemento Portland (0.9925 kg/unidad), que representa más del 79% del CO₂ emitido. A pesar de no incluir materiales alternativos, establece la línea base frente a la cual los demás diseños muestran mejoras.
- Diseño A: Introduce caucho granulado (0.0828 kg), reduciendo ligeramente la cantidad de cemento. Esto le permite alcanzar una emisión de 1.1023 kg, lo que refleja un avance modesto pero significativo hacia una mayor sostenibilidad.
- Diseño B: Similar a A, pero incorpora también una pequeña cantidad de perlita (0.0280 kg). Su CO₂ total baja a 1.0757 kg, reforzando la hipótesis de que el reemplazo parcial de materiales tradicionales por reciclados o livianos reduce la huella de carbono.

- Diseño F: Aumenta la cantidad de caucho (0.2842 kg), resultando en una de las menores emisiones: 1.0495 kg de CO₂. Este resultado demuestra que, a pesar del uso de más agregados, el menor uso de cemento (0.9223 kg) contribuye a una reducción significativa.
- Diseño J: Es el más eficiente en términos de emisiones, con 1.0217 kg de CO₂/unidad, gracias al mayor contenido de caucho (0.4388 kg) y la menor proporción de cemento (0.8914 kg). Este diseño ejemplifica el éxito de sustituir cemento por residuos reciclados sin aumentar considerablemente el CO₂ en transporte o fabricación.

Es importante notar que todos los diseños incluyen fabricación artesanal y transporte, sumando 0.07 kg de CO₂ en cada caso. Aunque estas cifras son fijas, podrían ser aún menores si se optimizan los procesos productivos locales o se emplean fuentes de energía renovables.

4.4.2.3 Escenarios de escalamiento y estimación de consumo de neumáticos reciclados

Con el objetivo de evaluar la viabilidad técnica y ambiental del uso de caucho reciclado proveniente de neumáticos fuera de uso (NFU) en la fabricación de ladrillos de concreto, se definieron tres escenarios de producción escalonada:

- Fase piloto (1%)
- Fase de expansión (5%)
- Fase de largo plazo (10%)

Estas fases fueron establecidas en función de criterios estratégicos de implementación progresiva, buscando explorar desde una introducción controlada hasta una potencial adopción masiva del producto en el mercado local.

La referencia base para el cálculo de la demanda anual corresponde a la cifra reportada por Linares (2016), quien identificó un consumo de 92,053.59 millares de ladrillos en Arequipa durante el año 2020, lo que equivale a 92,053,590 unidades. A partir de esta cifra, se

proyectaron las tres fases mencionadas, que representarían el 1%, 5% y 10% del total de dicha demanda, respectivamente.

Para cada fase, se estimó el número de ladrillos requeridos y, en consecuencia, la cantidad total de caucho granulado (kg) necesaria por ladrillo en función de la cantidad empleada por unidad en cada diseño experimental (A, B, F y J). Posteriormente, se calculó el equivalente en neumáticos enteros, considerando que estos incluyen, además del caucho, otros materiales como acero y fibras textiles. Según datos técnicos, el caucho representa aproximadamente el 60% de la masa total de una llanta (Martínez-Barrera et al., 2013); por tanto, se aplicó un factor correctivo (división entre 0.6) para estimar el peso total de llantas necesario para la producción de un ladrillo. Finalmente se hizo el cálculo de la cantidad requerida de llantas (toneladas) para abastecer la demanda de caucho de cada fase.

Este análisis no solo permite cuantificar el consumo proyectado de NFU por diseño y fase, sino que también relaciona directamente la viabilidad del escalamiento con la disponibilidad anual de neumáticos en desuso en Arequipa. Según el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2014), estos residuos representan el 1.25% de los residuos sólidos recolectados diariamente en la ciudad, lo que equivale a una generación anual de 2,651.06 toneladas de llantas.

A través de esta metodología, se busca determinar con precisión cuáles diseños y qué niveles de producción pueden sostenerse ambiental y logísticamente, sirviendo como base para decisiones futuras sobre escalamiento, alianzas estratégicas y políticas públicas de economía circular.

4.4.2.3.1 Resultados por fase piloto

Tabla 156.

Fase piloto – 1% de la demanda local

Demanda		92053590	ladrillos/año
Fase piloto	1%	920536	ladrillos/año
	Caucho/ladrillo	Llantas/ladrillo	Llantas requeridas/año
	(kg)	(kg)	(ton)
Diseño A	0.1327	0.2212	203591.86
Diseño B	0.1382	0.2303	212030.10
Diseño F	0.2842	0.4737	436027.17
Diseño J	0.4388	0.7313	673218.59

Nota. Elaboración propia

La fase piloto contempla una producción anual de 920,536 unidades de ladrillos, lo cual representa el 1% de la demanda estimada para la ciudad de Arequipa. Esta etapa tiene como objetivo validar la viabilidad técnica y ambiental de los diseños propuestos, a través de una implementación controlada y de bajo riesgo logístico.

Los resultados muestran que el diseño A y el diseño B son significativamente más sostenibles en términos de requerimiento de materia prima reciclada, con necesidades de 203.59 t y 212.03 t de neumáticos en desuso, respectivamente. Ambos valores representan menos del 10% de la disponibilidad anual estimada en la ciudad (2,651.06 t según MINAM, 2014), lo que garantiza una implementación factible sin comprometer el sistema local de gestión de residuos.

Por el contrario, el diseño F (436.03 t) y especialmente el diseño J (673.22 t) presentan mayores exigencias de insumo reciclado. Si bien aún se encuentran dentro de la disponibilidad anual, implican un mayor esfuerzo en términos de recolección, clasificación y procesamiento de neumáticos, lo que puede representar una barrera para su implementación en esta primera fase.

4.4.2.3.2 Resultados por fase de expansión

Tabla 157.

Fase de expansión – 5% de la demanda local

Demanda		92053590	ladrillos/año
Fase de expansión	5%	4602680	ladrillos/año
	Caucho/ladrillo	Llantas/ladrillo	Llantas requeridas/año
	(kg)	(kg)	(kg) (ton)
Diseño A	0.1327	0.2212	1017959.28 1017.96
Diseño B	0.1382	0.2303	1060150.51 1060.15
Diseño F	0.2842	0.4737	2180135.86 2180.14
Diseño J	0.4388	0.7313	3366092.94 3366.09

Nota. Elaboración propia

Esta etapa proyecta una producción anual de 4,602,680 ladrillos, representando un incremento significativo en el uso de caucho granulado. El diseño A (1,017.96 t) y el diseño B (1,060.15 t) siguen siendo viables dentro del umbral de disponibilidad de neumáticos, lo que reafirma su potencial para una aplicación progresiva en el mercado local sin generar presión ambiental ni requerir una expansión logística desproporcionada.

El diseño F alcanza un valor de 2,180.14 t, lo que casi iguala el límite máximo de disponibilidad anual, dejando escaso margen para contingencias, crecimiento inesperado o fallos logísticos. Su implementación en esta fase requeriría un modelo eficiente de recolección, además de alianzas con gestores de residuos o políticas públicas que prioricen el reciclaje de neumáticos.

En cambio, el diseño J, con una exigencia de 3,366.09 t, supera ampliamente la disponibilidad anual actual. Esto sugiere que, aun si sus beneficios térmicos o mecánicos fueran altos, su aplicación a esta escala no sería viable en el contexto arequipeño actual sin intervenciones externas, como importación de NFU o acopio interregional.

4.4.2.3.3 Resultados por fase de largo plazo

Tabla 158.

Fase de largo plazo – 10% de la demanda local

Demanda			92053590	ladrillos/año
Fase de largo plazo	10%		9205359	ladrillos/año
	Caucho/ladrillo	Llantas/ladrillo	Llantas requeridas/año	
	(kg)	(kg)	(kg)	(ton)
Diseño A	0.1327	0.2212	2035918.57	2035.92
Diseño B	0.1382	0.2303	2120301.02	2120.30
Diseño F	0.2842	0.4737	4360271.71	4360.27
Diseño J	0.4388	0.7313	6732185.88	6732.19

Nota. Elaboración propia

La fase de largo plazo, que contempla la producción del 10% de la demanda (9,205,359 unidades anuales), tiene el mayor impacto ambiental y representa la consolidación del producto en el mercado.

En esta etapa, solo el diseño A (2,035.92 t) y el diseño B (2,120.30 t) se mantienen por debajo del límite de disponibilidad, aunque con valores cercanos al umbral. Esto indica que su implementación a largo plazo aún es viable, aunque requerirá un sistema de reciclaje eficiente y continuo, sin interrupciones logísticas.

El diseño F (4,360.27 t) y el diseño J (6,732.19 t) superan ampliamente la capacidad actual del sistema de residuos local, lo que los hace inviables en esta fase sin una transformación estructural en el sistema de recolección y procesamiento de neumáticos.

4.4.3 Actividad 3. Comparación de resultados

Tabla 159.

Cálculo de precio comercial de ladrillos de concreto

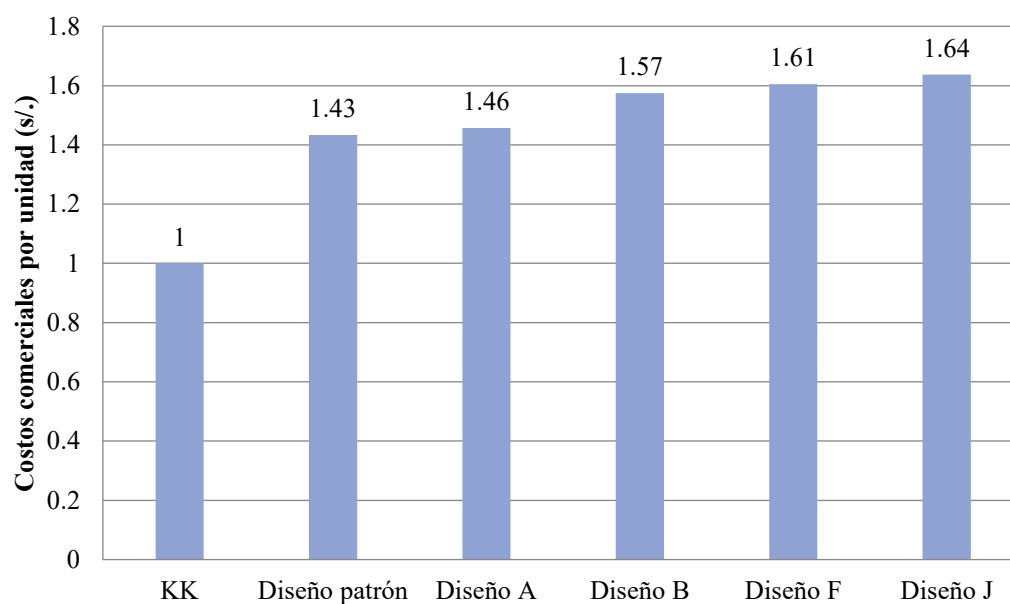
	Precio de fabricación	Gastos generales (10%)	Utilidad del productor (10%)	Costos almacenaje, transporte e impuestos (5%)	Precio comercial
Diseño patrón	1.15	0.11	0.11	0.06	1.43
Diseño A	1.17	0.12	0.12	0.06	1.46
Diseño B	1.26	0.13	0.13	0.06	1.57
Diseño F	1.28	0.13	0.13	0.06	1.61
Diseño J	1.31	0.13	0.13	0.07	1.64

Nota. Elaboración propia

Para establecer un precio de venta estimado comparable con productos comerciales como es el caso del ladrillo de arcilla, se aplicó un porcentaje adicional del 25% al costo directo de fabricación. Este porcentaje considera gastos generales (10%), utilidad del productor (10%) y costos relacionados con almacenamiento, transporte e impuestos (5%). La elección de este porcentaje se basa en metodologías empleadas por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú en sus análisis de precios unitarios, así como en criterios empleados en estudios previos sobre producción de unidades de albañilería a pequeña escala (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018).

Figura 99.

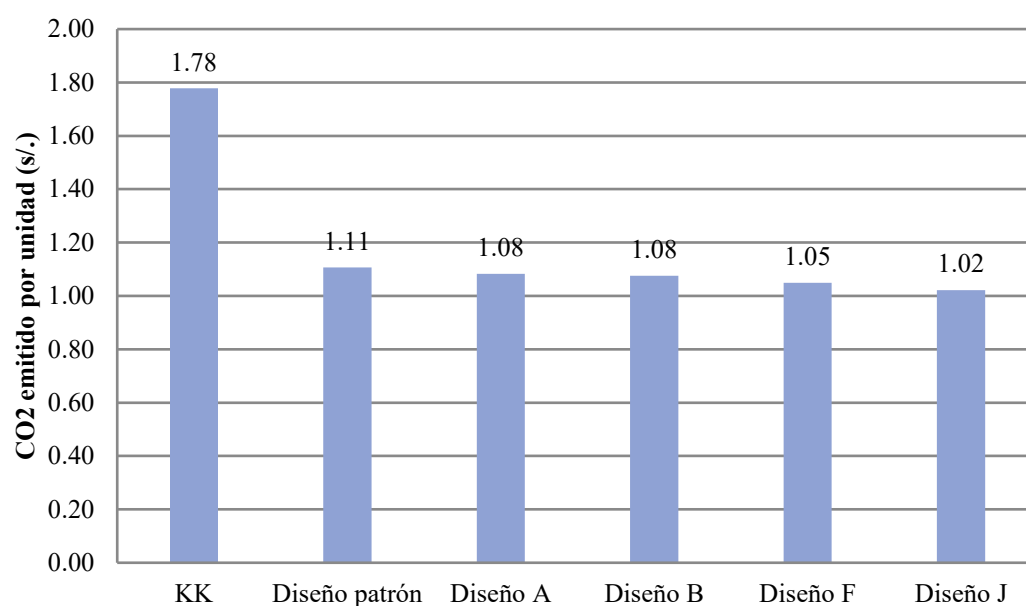
Costos comerciales de ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J



Nota. Elaboración propia

Figura 100.

CO2 emitido por ladrillos mecanizados de arcilla, diseño patrón, A, B, F y J



Nota. Elaboración propia

Cuando se comparan ambos grupos, la diferencia en emisiones de CO₂ es notoria y contundente. El ladrillo de arcilla mecanizado emite 1.78 kg de CO₂/unidad, mientras que el diseño más alto entre los experimentales (Patrón) alcanza solo 1.11 kg, lo que representa una reducción de 37.64%. El diseño más eficiente (J) (1.02 kg de CO₂/unidad) mejora aún más esta reducción, llegando a 42.70% menos CO₂ por unidad respecto al ladrillo de arcilla.

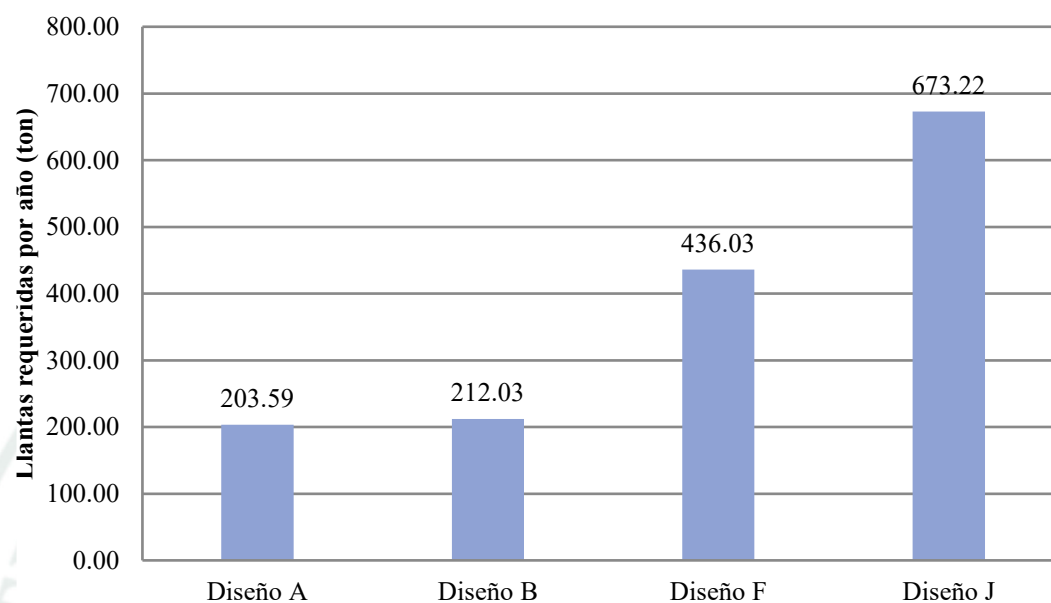
Esta diferencia sustancial se explica, en gran parte, por la ausencia del proceso de cocción en los diseños experimentales. En vez de depender de energía térmica intensiva, se emplean curados naturales o de baja energía, lo cual representa una ventaja ecológica clave. Además, la incorporación de residuos como caucho granulado, que de otro modo serían descartados, no solo disminuye la huella de carbono sino también fomenta la economía circular.

Sin embargo, es fundamental mencionar que los diseños experimentales dependen en gran medida del cemento Portland, cuya producción es altamente emisora de CO₂. A pesar de ello, al reducir su proporción o reemplazarla parcialmente por agregados reciclados o ligeros como la perlita, se logran beneficios significativos. Esto sugiere que futuros desarrollos podrían enfocarse en reducir aún más el contenido de cemento o reemplazarlo por cementantes alternativos de menor impacto ambiental.

En el caso de los diseños modificados, si bien ya se ha evidenciado que presentan limitaciones técnicas y económicas que afectan su viabilidad constructiva general —como el mayor peso, baja succión y mayor costo—, este análisis revela que su único atributo verdaderamente competitivo es su desempeño ambiental.

Figura 101.

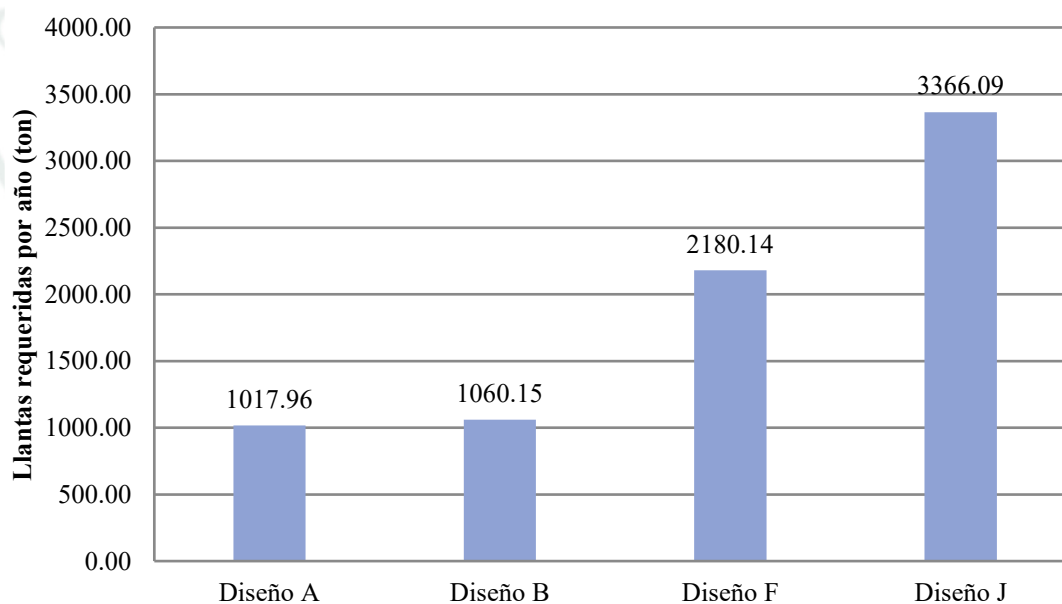
Llantas requeridas por año en la Fase piloto para el diseño patrón, A, B, F y J



Nota. Elaboración propia

Figura 102.

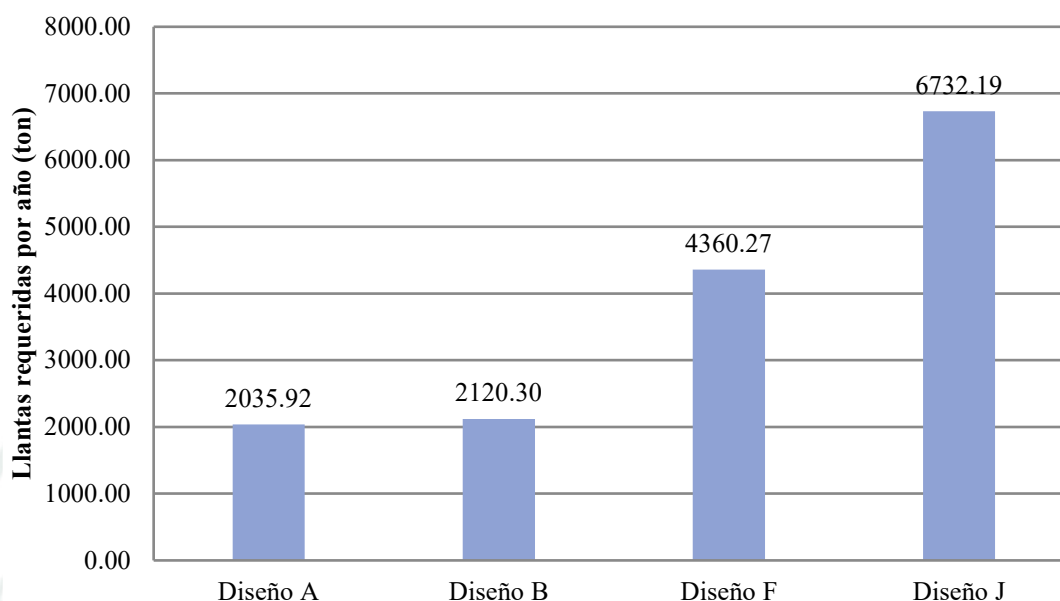
Llantas requeridas por año en la Fase de expansión para el diseño patrón, A, B, F y J



Nota. Elaboración propia

Figura 103.

Llantas requeridas por año en la Fase de largo plazo para el diseño patrón, A, B, F y J



Nota. Elaboración propia

El análisis comparativo entre diseños permite establecer no solo su viabilidad práctica, sino también el potencial ambiental y estratégico que cada uno ofrece en cuanto a la valorización de residuos sólidos, en particular los neumáticos fuera de uso (NFU).

En términos de eficiencia en el uso de caucho granulado, el diseño A se presenta como la opción más favorable, seguido del diseño B, debido a su menor requerimiento por unidad de ladrillo y su comportamiento sostenible incluso en escenarios de expansión y largo plazo. Ambos diseños podrían ser implementados sin necesidad de modificar significativamente el sistema actual de gestión de residuos, por lo que resultan ideales para una adopción gradual, práctica y de bajo riesgo.

Por otro lado, los diseños F y J, a pesar de su mayor exigencia en cuanto a materia prima reciclada, no deben ser descartados. Al contrario, su aplicación representa una oportunidad para incrementar la valorización de un residuo problemático como las llantas, contribuyendo directamente a la reducción de su acumulación en botaderos y espacios urbanos. En ese sentido,

si se establecen mecanismos de recolección más eficientes, campañas de concientización o convenios intermunicipales, estos diseños podrían convertirse en herramientas clave para impulsar una economía circular más robusta.

Particularmente, el diseño J, con su elevada proporción de caucho, podría contribuir a la reutilización de hasta 6,732.19 toneladas de llantas al año en su fase de máximo alcance. Si bien esto supera la disponibilidad actual en Arequipa, abre la posibilidad de proyectar mejoras en la logística de reciclaje y tratamiento de neumáticos a nivel regional, generando empleo verde y reduciendo significativamente el impacto ambiental de estos residuos.

En conclusión, mientras que los diseños A y B se perfilan como opciones ideales para una implementación inmediata y escalable, los diseños F y J deben entenderse como propuestas estratégicas para incentivar un mayor aprovechamiento de los residuos y motivar el fortalecimiento del sistema de reciclaje en la ciudad y sus alrededores. En lugar de limitar su uso por la exigencia de insumo reciclado, es recomendable considerarlos como impulsores de cambio estructural en la gestión de residuos sólidos urbanos.

4.5 Fase V. Selección del diseño más eficiente.

4.5.1 Actividad 1. Puntuación numérica

Para la evaluación integral de los diseños experimentales de ladrillos de concreto con adición de caucho reciclado y perlita expandida, se elaboró una rúbrica de comparación técnica basada en 19 criterios objetivos, agrupando ensayos normativos, constructivos, térmicos, ambientales y económicos.

Tabla 160.*Resultados numéricos por diseño y ensayo*

Criterio / Ensayo		KK	Patrón	A	B	F	J
Variación dimensional (%)	Largo	-0.740	0.149	0.298	0.503	0.115	-0.040
	Ancho	-1.286	-0.321	-0.154	-0.155	-0.321	-0.663
	Alto	0.350	1.037	2.033	1.608	1.509	1.786
Peso (g)		3764.80	5603.53	5587.23	5556.70	5491.57	5446.62
% Vacíos (máx 30%)		33.680 %	11.146 %	11.210%	10.907 %	11.120 %	11.196 %
Alabeo (mm)		0.485	0.423	0.250	0.576	0.283	0.298
Absorción (%)		12.425 %	3.685 %	3.360 %	3.719 %	3.577 %	3.790 %
Humedad (%)		0.132 %	4.947 %	4.790 %	4.821 %	4.577 %	4.457 %
Succión (< 20 g/200 cm ² /min)		34.673	7.10	9.215	9.481	10.424	12.669
Resistencia ladrillo (kg/cm ²)		162.224	193.641	143.370	150.884	131.535	124.590
Resistencia pilas (kg/cm ²)		78.279	153.984	137.645	139.936	118.174	115.941
Compresión diagonal (kg/cm ²)		10.156	10.410	10.159	10.544	8.520	7.801
Densidad (kg/m ³)		1661.41	2103.64	2134.89	2116.40	2080.32	2097.20
Capacidad calorífica (J/kg·K)		840.00	940.00	935.75	991.25	987.00	982.75
Capacidad térmica (J/K)		3162	5267	5228	5508	5420	5353
Térmica 10 °C (punto medio) (K)		293.28	291.50	291.50	291.48	291.50	291.50
Térmica 50 °C (punto medio) (K)		306.27	308.12	309.23	309.23	309.23	309.23
Térmica 1000 °C (punto medio) (K)		614.80	730.20	730.23	730.23	730.23	730.23
Flujo de calor constante (interior) (K)		298.10	498.20	498.19	371.36	498.18	438.83
Resistencia térmica idealizada (K·m ² /W)		0.267	0.100	0.207	0.229	0.247	0.268
Resistencia térmica simulada (K·m ² /W)		0.437	0.150	0.310	0.343	0.370	0.399
Precio comercial (\$/ por unidad)		1.00	1.43	1.46	1.57	1.61	1.64
CO ₂ por unidad (kg)		1.78	1.11	1.08	1.08	1.05	1.02
Valorización de NFU (t/año)	Fase piloto	0.00	0.00	203.59	212.03	436.03	673.22
	Fase de expansión	0.00	0.00	1017.96	1060.15	2180.14	3366.09
	Fase de largo plazo	0.00	0.00	2035.92	2120.30	4360.27	6732.19

Nota. Elaboración propia

La rúbrica fue estructurada con puntajes del 0 al 5 por cada ensayo, siendo 5 puntos el mejor desempeño técnico dentro del conjunto y 0 puntos reservado únicamente para casos que incumplen requisitos normativos mínimos o representan desventajas técnicas críticas. Este enfoque evitó valoraciones arbitrarias, ya que se basó en el rendimiento numérico proporcional entre los diseños en cada ensayo, y no en juicios cualitativos subjetivos.

Donde:

- Excelente (4.5–5.0 pts)
- Bueno (3.0–4.4 pts)
- Cumple, pero bajo (1.0–2.9 pts)
- ✗ No cumple requisito normativo (0 pts)

Tabla 161.

Puntuación final de desempeño

Criterio / Ensayo		KK	Patrón	A	B	F	J
Variación dimensional	Largo	1.0 ●	4.2 ●	3.4 ●	2.3 ●	4.4 ●	4.8 ●
	Ancho	1.0 ●	4.0 ●	4.5 ●	4.5 ●	4.0 ●	2.9 ●
	Alto	4.3 ●	3.0 ●	1.0 ●	1.8 ●	2.0 ●	1.5 ●
Peso		5.0 ●	1.0 ●	1.0 ●	1.1 ●	1.2 ●	1.3 ●
% Vacíos (máx 30%)		0.0 ✖	4.9 ●	4.9 ●	5.0 ●	4.9 ●	4.9 ●
Alabeo		2.1 ●	2.9 ●	5.0 ●	1.0 ●	4.6 ●	4.4 ●
Absorción		4.5 ●	2.6 ●	2.5 ●	2.6 ●	2.5 ●	2.6 ●
Humedad		4.9 ●	3.0 ●	3.1 ●	3.1 ●	3.2 ●	3.2 ●
Succión (< 20)		2.0 ●	2.0 ●	2.0 ●	2.0 ●	3.0 ●	3.0 ●
Resistencia ladrillo		3.6 ●	5.0 ●	2.1 ●	2.7 ●	1.1 ●	0.0 ✖
Resistencia pilas		1.0 ●	5.0 ●	4.6 ●	4.8 ●	3.4 ●	3.3 ●
Compresión diagonal		4.4 ●	4.8 ●	4.4 ●	5.0 ●	2.0 ●	1.0 ●
Densidad		5.0 ●	1.3 ●	1.0 ●	1.2 ●	1.5 ●	1.3 ●
Capacidad calorífica		1.0 ●	3.6 ●	3.5 ●	5.0 ●	4.9 ●	4.8 ●
Capacidad térmica		1.0 ●	4.6 ●	4.5 ●	5.0 ●	4.9 ●	4.7 ●
Térmica 10 °C (punto medio)		1.0 ●	5.0 ●	5.0 ●	5.0 ●	5.0 ●	5.0 ●
Térmica 50 °C (punto medio)		5.0 ●	2.5 ●	1.0 ●	1.0 ●	1.0 ●	1.0 ●
Térmica 1000 °C (punto medio)		5.0 ●	1.0 ●	1.0 ●	1.0 ●	1.0 ●	1.0 ●
Flujo de calor constante (interior)		5.0 ●	1.0 ●	1.0 ●	3.5 ●	1.0 ●	2.2 ●
Resistencia térmica idealizada		5.0 ●	1.0 ●	3.5 ●	4.1 ●	4.5 ●	5.0 ●
Resistencia térmica simulada		5.0 ●	1.0 ●	3.2 ●	3.7 ●	4.1 ●	4.5 ●
Precio comercial		5.0 ●	2.3 ●	2.1 ●	1.4 ●	1.2 ●	1.0 ●
CO ₂ por unidad		1.0 ●	4.5 ●	4.7 ●	4.7 ●	4.8 ●	5.0 ●
Valorización de NFU (t/año)	Fase piloto	0.0 ✖	0.0 ✖	2.2 ●	2.3 ●	3.6 ●	5.0 ●
	Fase de expansión	0.0 ✖	0.0 ✖	2.2 ●	2.3 ●	3.6 ●	5.0 ●
	Fase de largo plazo	0.0 ✖	0.0 ✖	2.2 ●	2.3 ●	3.6 ●	5.0 ●
TOTAL de 130 puntos		72.9 ✖	70.2 ●	75.8 ●	78.2 ●	81.0 ●	83.4 ✖

Nota. Elaboración propia

Tabla 162.*Ranking final de diseños según evaluación comparativa (máx. 130 puntos)*

Puesto	Diseño	Puntaje de 95
1	F	81.0
2	B	78.2
3	A	75.8
4	Patrón	70.2
Descalificado	J	83.4
Descalificado	KK	72.9

Nota. Elaboración propia

En este análisis, el diseño F obtuvo la mayor puntuación acumulada, con 81.0 puntos sobre 130 posibles, posicionándose como la opción más equilibrada y completa entre los diseños estructuralmente válidos.

Desde el punto de vista estructural, el diseño F alcanzó una resistencia a compresión unitaria de 131.535 kg/cm², lo que le otorga una clasificación Tipo IV, cumpliendo con lo establecido por la norma E.070 para unidades estructurales. A nivel de pilas, su comportamiento fue también robusto, superando los 118.174 kg/cm², lo que demuestra una buena cohesión entre unidades y mortero.

En cuanto a propiedades térmicas, el diseño F logró destacarse ampliamente. Su resistencia térmica idealizada fue de 0.247 K·m²/W, y en la simulación realizada con flujo de calor constante en ABAQUS alcanzó 0.370 K·m²/W, valores significativamente superiores al del diseño patrón (0.150 K·m²/W) y considerablemente cercanos al del ladrillo de arcilla mecanizado (0.437 K·m²/W). Esto indica que el diseño F tiene un potencial térmico real que lo hace especialmente útil en zonas de alta radiación solar, donde el confort interior es una prioridad.

A ello se suma el análisis de la capacidad térmica, que refleja la cantidad de energía que cada ladrillo puede almacenar frente a variaciones de temperatura. El diseño F alcanzó un

valor de 5420 J/K por unidad, superior al ladrillo patrón (5267 J/K) y al ladrillo de arcilla (3162 J/K), y solo ligeramente menor al diseño B (5508 J/K) y al J (5353 J/K). Este resultado confirma que el diseño F posee una alta inercia térmica, es decir, la capacidad de amortiguar las oscilaciones de temperatura en el interior de la vivienda. En consecuencia, la elección de este diseño favorece la estabilidad térmica de los ambientes habitables y reduce la dependencia de sistemas activos de climatización, lo que constituye un beneficio adicional en términos de eficiencia energética.

En términos de impacto ambiental, el diseño F demostró también ventajas importantes. Las emisiones de CO₂ por unidad fueron de 1.05 kg, una reducción de 41 % en comparación con el ladrillo de arcilla (1.78 kg/unidad). Además, permite valorizar hasta 4360.27 toneladas de llantas al año en escenarios de implementación a gran escala, gracias a la incorporación de caucho reciclado en su mezcla.

Respecto al peso unitario, si bien el diseño F fue más pesado que el ladrillo de arcilla (aproximadamente 5491.57 g frente a 3764.8 g), este aspecto fue compensado por su alta resistencia, su comportamiento térmico y su contribución ecológica, logrando una relación peso–prestación favorable. La absorción de agua se mantuvo dentro de los valores normativos (3.577 %, frente al 12.425 % del ladrillo cerámico), y su porcentaje de vacíos fue de 11.120 %, clasificándolo como ladrillo sólido apto para muros portantes. Su contenido de humedad al momento del ensayo fue 4.577 %, lo que implica una necesidad mínima de curado adicional antes de la instalación.

En comparación, el diseño B obtuvo una puntuación total de 78.2 puntos, y si bien alcanzó una resistencia a compresión unitaria similar (150.884 kg/cm²) y un buen desempeño en pilas (139.936 kg/cm²), su resistencia térmica idealizada fue de 0.229 K·m²/W, y la simulada en ABAQUS fue de 0.343 K·m²/W, ambas inferiores a las de F. Su capacidad térmica alcanzó 5508 J/K, el valor más alto entre los diseños experimentales, aunque la diferencia con F no fue

significativa. Sin embargo, su capacidad de valorización de residuos fue menor (2120.30 toneladas de llantas/año) y su costo comercial estimado fue de S/ 1.57 por unidad, más elevado que el de alternativas más sencillas, lo cual puede limitar su adopción en escenarios de bajo presupuesto.

Por otro lado, el diseño A obtuvo 75.8 puntos, con una resistencia a compresión unitaria de 143.370 kg/cm² y una resistencia térmica idealizada de 0.207 K·m²/W, además de una baja absorción (3.36 %) y un contenido de vacíos de 11.21 %. Su capacidad térmica fue de 5228 J/K, prácticamente equivalente al ladrillo patrón, lo que refleja un desempeño moderado en cuanto a inercia térmica. No obstante, su valorización ambiental fue más limitada que la del diseño F.

Finalmente, aunque el diseño J alcanzó una resistencia térmica idealizada de 0.268 K·m²/W y una resistencia simulada en ABAQUS de 0.399 K·m²/W, además de ser el más eficiente ambientalmente (solo 1.02 kg CO₂/unidad y hasta 6732.19 toneladas de llantas valorizadas al año), fue descalificado del análisis estructural por no alcanzar la resistencia mínima de compresión exigida por la norma, clasificándose como Tipo III con 124.590 kg/cm². Su capacidad térmica fue de 5353 J/K, muy similar a la de F y B, pero al no cumplir los requisitos estructurales, su uso queda restringido exclusivamente a muros no portantes o divisiones interiores.

En conclusión, el diseño F representa la propuesta más robusta y viable para uso estructural, integrando desempeño mecánico confiable, eficiencia térmica real comprobada en múltiples escenarios, alta capacidad térmica como indicador de inercia térmica, impacto ambiental positivo y adecuada factibilidad constructiva. Su implementación permitiría avanzar hacia soluciones más sostenibles en el ámbito de la construcción, con respaldo técnico normativo y capacidad de valorización de residuos como las llantas fuera de uso, contribuyendo directamente a reducir su acumulación en botaderos. Si se fortalecen mecanismos de acopio,

campañas de concientización o convenios intermunicipales, este tipo de diseños podría convertirse en una herramienta clave para consolidar una economía circular en el sector edificación.

4.6 Fase VI. Aplicación del ladrillo tipo F en módulo de vivienda unifamiliar

La presente fase desarrolla la aplicación del ladrillo experimental en un módulo de vivienda unifamiliar, con el fin de evaluar su desempeño en condiciones reales de uso.

A partir de los resultados obtenidos en las fases previas, relacionados con el comportamiento físico-mecánico, térmico, económico y ambiental del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida, se plantea una propuesta arquitectónica que permite integrar dichos resultados en un caso práctico, verificando su viabilidad constructiva y su impacto en el diseño de una edificación.

En este contexto, el módulo de vivienda no se concibe únicamente como una propuesta formal, sino como una herramienta de validación aplicada, mediante la cual se analizan aspectos como la densidad de muros, el comportamiento bioclimático, el desempeño estructural y el costo de construcción en comparación con sistemas tradicionales.

La vivienda se desarrolla bajo el sistema de albañilería confinada y responde a las condiciones climáticas y urbanas de la ciudad de Arequipa, permitiendo evaluar la pertinencia del material propuesto dentro de un contexto real.

4.6.1 Contexto y condicionantes del emplazamiento

4.6.1.1 Ubicación del proyecto

El terreno seleccionado para el desarrollo del módulo de vivienda unifamiliar se ubica en la Residencial “El Palacio II”, manzana I, lote 32, en el distrito de Sachaca, provincia y departamento de Arequipa.

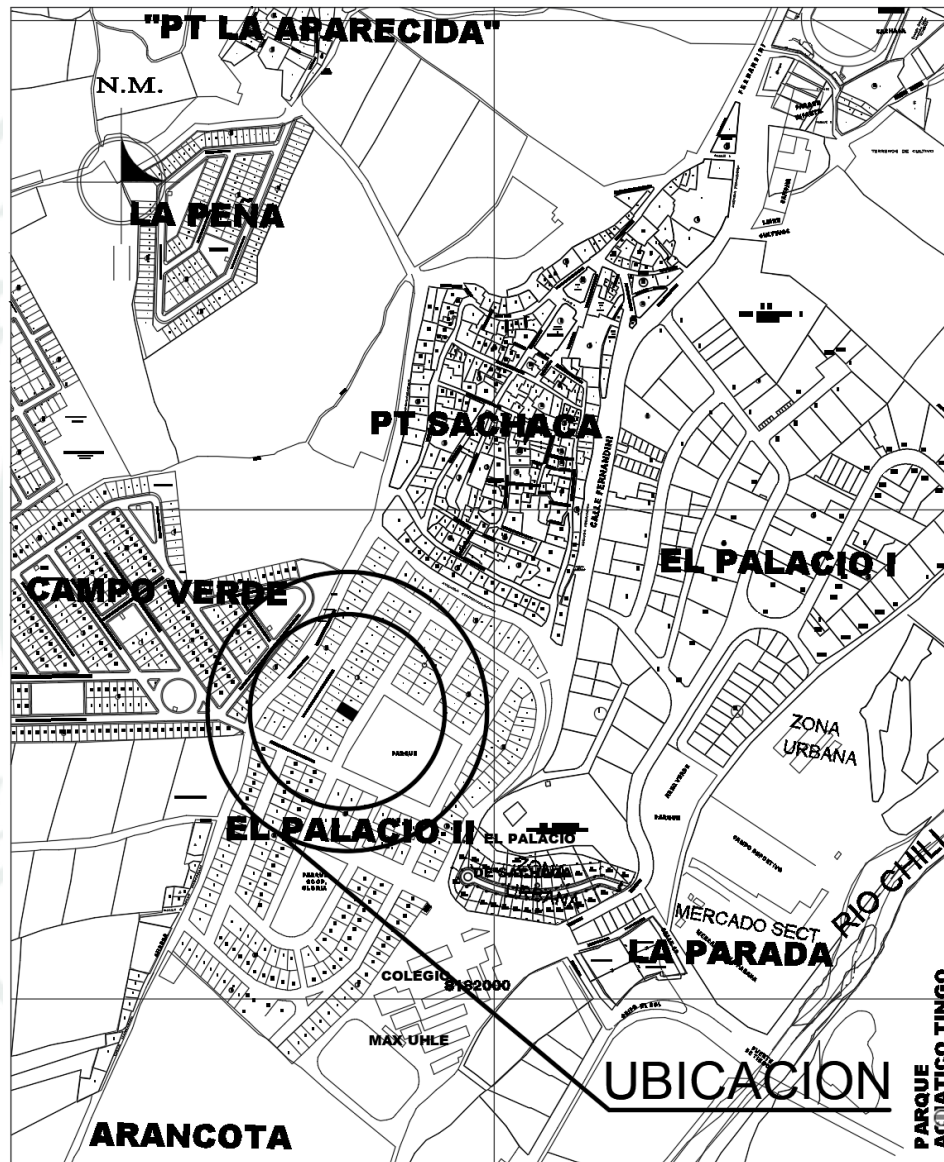
Este sector se caracteriza por ser una zona de expansión urbana con predominancia de uso residencial, presentando condiciones representativas del crecimiento urbano de la ciudad.

Su localización permite analizar la aplicación del ladrillo experimental en un contexto real de vivienda unifamiliar, bajo las condiciones climáticas propias de la ciudad de Arequipa.

En la Figura 104 se muestra la ubicación del terreno dentro del contexto urbano.

Figura 104.

Ubicación del terreno de la vivienda unifamiliar



Nota. Elaboración propia

4.6.1.2.2 Topografía y orientación

El terreno presenta una topografía predominantemente plana, lo cual permite el desarrollo del proyecto sin requerir intervenciones significativas de nivelación.

Asimismo, el lote se orienta de acuerdo con el eje mostrado en el plano (N.M.), lo cual condiciona la incidencia de la radiación solar sobre la edificación y repercute en el comportamiento térmico de los muros, aspecto relevante para la aplicación del ladrillo experimental.

4.6.1.2.3 Accesibilidad y entorno inmediato

El terreno cuenta con acceso directo desde la vía local de la urbanización, lo cual garantiza la adecuada accesibilidad vehicular y peatonal.

Su ubicación frente a un área verde (parque) favorece las condiciones de ventilación natural, iluminación y calidad ambiental del entorno inmediato, aportando además a la valorización del proyecto de vivienda.

4.6.1.3 Justificación del emplazamiento

El lote seleccionado en la Residencial “El Palacio II”, distrito de Sachaca, responde a criterios económicos, urbanos y técnicos que permiten validar la aplicación del ladrillo experimental en un contexto real de vivienda unifamiliar. A continuación, se presentan los principales fundamentos de su elección:

- **Adecuación al mercado objetivo:** El ladrillo propuesto presenta un costo superior al convencional, lo que lo orienta al segmento residencial medio–alto, donde se prioriza el confort térmico, acústico y la ecoeficiencia.
- **Condición de lote vacante:** Permite desarrollar una propuesta arquitectónica integral desde cero, facilitando la aplicación del material en muros, fachadas y envolventes sin restricciones preexistentes.

- **Representatividad urbana:** El entorno corresponde a una zona residencial típica de expansión urbana en Arequipa, lo que permite evaluar el material en un contexto real y replicable.
- **Condiciones geotécnicas y climáticas:** El área presenta características propias del suelo arequipeño (origen volcánico/aluvial) y variaciones térmicas significativas, lo cual resulta pertinente para analizar el desempeño térmico del ladrillo experimental.

En ese sentido, el emplazamiento seleccionado constituye un escenario adecuado para validar la aplicación del material propuesto en una vivienda unifamiliar.

4.6.1.4 Condiciones climáticas

El prototipo de vivienda se ubica en el distrito de Sachaca, provincia de Arequipa, a una altitud aproximada de 2 300 m s. n. m., dentro del valle arequipeño. Esta zona presenta un clima templado seco característico de la región surandina del Perú, con alta radiación solar y marcadas variaciones térmicas entre el día y la noche (SENAMHI, 2020; MINAM, 2016).

De acuerdo con los registros climatológicos del SENAMHI y el Atlas Solar del Perú, las principales características climáticas del área de estudio son las siguientes:

- **Temperatura:**
Temperatura media anual entre 14 y 15 °C, con máximas diurnas entre 20 y 24 °C y mínimas nocturnas entre 5 y 9 °C, generando una amplitud térmica diaria superior a 8–10 °C.
- **Radiación solar:**
Radiación global promedio entre 5.5 y 7.0 kWh/m²·día, evidenciando una alta disponibilidad de energía solar durante todo el año.

- **Viento:**

Velocidad media entre 3 y 4 m/s, con dirección predominante sureste–noroeste, lo cual favorece el aprovechamiento de la ventilación natural.

En la Tabla 163 se presentan los valores promedio mensuales de temperatura, radiación solar y velocidad del viento para el área de estudio.

Tabla 163.

Condiciones climáticas promedio mensuales – Sachaca (Arequipa)

Mes	T° media (°C)	T° máx media (°C)	T° mín media (°C)	T° media (°C)	Radiación global (kWh/m ² ·día)	Velocidad media del viento (m/s)
Enero		23.8	9.8	16.8	6.4	3.6
Febrero		23.5	9.6	16.5	6.2	3.4
Marzo		23.3	8.8	16.1	6.1	3.3
Abril		22.7	7.5	15.1	5.9	3.4
Mayo		21.9	6.5	14.2	5.8	3.6
Junio		21.2	5.6	13.4	5.7	3.9
Julio		21.0	5.3	13.2	5.7	4.0
Agosto		21.8	5.6	13.7	5.8	4.1
Septiembre		22.6	6.8	14.7	6.0	3.9
Octubre		23.4	8.0	15.7	6.1	3.7
Noviembre		23.9	9.0	16.4	6.3	3.6
Diciembre		24.1	9.7	16.9	6.4	3.5

Nota. Adaptado de Elaboración propia con base en datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2020) y Atlas Solar del Perú (MINAM, 2016).

La información climática corresponde a la estación meteorológica Arequipa – La Pampilla (código OMM 84628), administrada por el SENAMHI, seleccionada por ser la más cercana y representativa del área urbana donde se ubica el proyecto.

Dicha estación se encuentra dentro del mismo valle arequipeño y presenta condiciones de altitud y comportamiento térmico similares al distrito de Sachaca, por lo que sus registros reflejan adecuadamente las condiciones climáticas del emplazamiento.

4.6.1.5 Análisis bioclimático

Las condiciones térmicas y radiativas del emplazamiento determinan la necesidad de una envolvente con comportamiento pasivo equilibrado, capaz de reducir los efectos de la alta radiación diurna y conservar el calor durante la noche. En este contexto, se identifican tres estrategias principales:

- **Aumento de la inercia térmica:** La elevada amplitud térmica diaria justifica el empleo de materiales con alta capacidad térmica (como el ladrillo experimental del diseño F), que permiten almacenar el calor solar diurno y liberarlo gradualmente por la noche, estabilizando la temperatura interior y reduciendo las oscilaciones térmicas.
- **Control solar y orientación:** Dado el alto nivel de radiación, es necesario aprovechar la ganancia solar en invierno (mediante orientación norte de fachadas principales y vanos) y reducir la incidencia directa en verano mediante aleros, parasoles o protecciones solares.
- **Ventilación natural cruzada:** Los vientos moderados del sureste facilitan el diseño de una ventilación cruzada este–oeste, que permita la disipación del calor acumulado durante el día y la ventilación nocturna para el enfriamiento pasivo.

4.6.1.5.1 Estrategias de diseño bioclimático

Las condiciones del distrito de Sachaca confirman que la vivienda debe combinar masa térmica y aislamiento. La masa, aportada por los ladrillos de concreto con caucho y perlita, contribuye a la estabilidad térmica diaria, mientras que la resistencia térmica del muro debe optimizarse para reducir pérdidas de calor nocturnas y evitar el sobrecalentamiento diurno. En consecuencia, se recomiendan las siguientes estrategias de diseño:

- Optimización geométrica del ladrillo experimental, incrementando el número de cavidades y su distribución para mejorar la resistencia térmica sin comprometer la masa térmica.
- Aplicación de revoques aislantes o capas de baja conductividad térmica en la superficie exterior del muro.
- Orientación norte de las fachadas principales y uso de protecciones solares para controlar la radiación estacional.
- Incorporación de ventilación cruzada en planta para favorecer el confort térmico pasivo.

Estas medidas garantizan un comportamiento térmico eficiente y coherente con las condiciones climáticas del emplazamiento, contribuyendo al confort interior y a la reducción del consumo energético de la vivienda.

4.6.1.6 Síntesis de condicionantes del diseño

A partir del análisis del emplazamiento, las condiciones climáticas y los criterios bioclimáticos, se identifican los principales condicionantes que influyen en el diseño del módulo de vivienda y en la aplicación del ladrillo experimental.

Tabla 164.*Síntesis de condicionantes de diseño del módulo de vivienda*

Condicionante	Característica identificada	Implicancia en el diseño	Relación con el ladrillo experimental
Radiación solar	Alta radiación durante todo el año	Incorporación de control solar (aleros, parasoles) y orientación adecuada	Necesidad de reducir ganancia térmica excesiva en muros
Amplitud térmica	Diferencia día-noche > 8–10 °C	Uso de masa térmica para estabilizar temperatura interior	El ladrillo con caucho y perlita aporta inercia térmica
Temperaturas nocturnas	Descensos térmicos significativos	Reducción de pérdidas térmicas en la envolvente	Importancia de mejorar la resistencia térmica del muro
Vientos predominantes	Dirección SE–NO, velocidad moderada	Diseño de ventilación cruzada en la vivienda	Permite complementar el confort térmico del material
Contexto urbano	Zona residencial de densidad media	Tipología de vivienda unifamiliar y organización espacial	Aplicación del ladrillo en un escenario real y replicable
Condición del lote	Terreno regular, plano y accesible	Facilidad de implantación del proyecto	Permite evaluar el material sin restricciones constructivas

Nota. Elaboración propia

En conjunto, estos condicionantes orientan el diseño arquitectónico hacia la implementación de estrategias pasivas que optimicen el confort térmico y energético, permitiendo evaluar de manera integral el desempeño del ladrillo experimental dentro de un contexto real de aplicación.

4.6.2 Propuesta arquitectónica del módulo de vivienda

La propuesta arquitectónica del módulo de vivienda unifamiliar se desarrolla a partir de los condicionantes del emplazamiento y los criterios bioclimáticos previamente establecidos, integrando el uso del ladrillo experimental como elemento principal del sistema constructivo.

4.6.2.1 Programa arquitectónico

El módulo de vivienda unifamiliar está diseñado para una familia tipo de 4 a 5 integrantes, considerando espacios que respondan a criterios de funcionalidad, confort y eficiencia.

El programa arquitectónico se organiza en dos niveles respectivamente.

Tabla 165.

Programa arquitectónico y áreas de la vivienda

Nivel	Zona	Ambiente	Área
Primer nivel	Social	Sala	14.90 m ²
	Social	Comedor	13.85 m ²
	Social	Cocina	9.48 m ²
	Social	Terraza	35.00 m ²
	Social	Jardín posterior	8.75 m ²
	Social	Piscina	18.15 m ²
	Servicio	Baño exterior (ducha)	4.28 m ²
	Servicio	Baño social	3.68 m ²
	Servicio	Alacena	5.88 m ²
	Servicio	Lavandería	5.28 m ²
	Circulación	Hall - escaleras	10.20 m ²
	Servicio	Car porch	3.00 m ²
Segundo nivel	Servicio	Hall	5.10 m ²
	Íntima	Dormitorio principal	18.50 m ²
	Servicio	Baño principal	4.80 m ²
	Íntima	Balcón	4.58 m ²
	Íntima	Dormitorio 2	13.82 m ²
	Íntima	Dormitorio 3	13.62 m ²
	Servicio	Baño compartido	5.28 m ²

Nota. Elaboración propia

4.6.2.2 Zonificación y organización espacial

La organización espacial de la vivienda responde a criterios funcionales y bioclimáticos, diferenciando claramente las zonas sociales, íntimas y de servicio.

El área social se ubica en el primer nivel, orientada hacia el frente del lote y en relación directa con el área verde (parque), lo que favorece la iluminación natural y la integración visual con el entorno. Asimismo, la incorporación de la terraza y áreas exteriores permite ampliar los espacios de uso y mejorar las condiciones de ventilación.

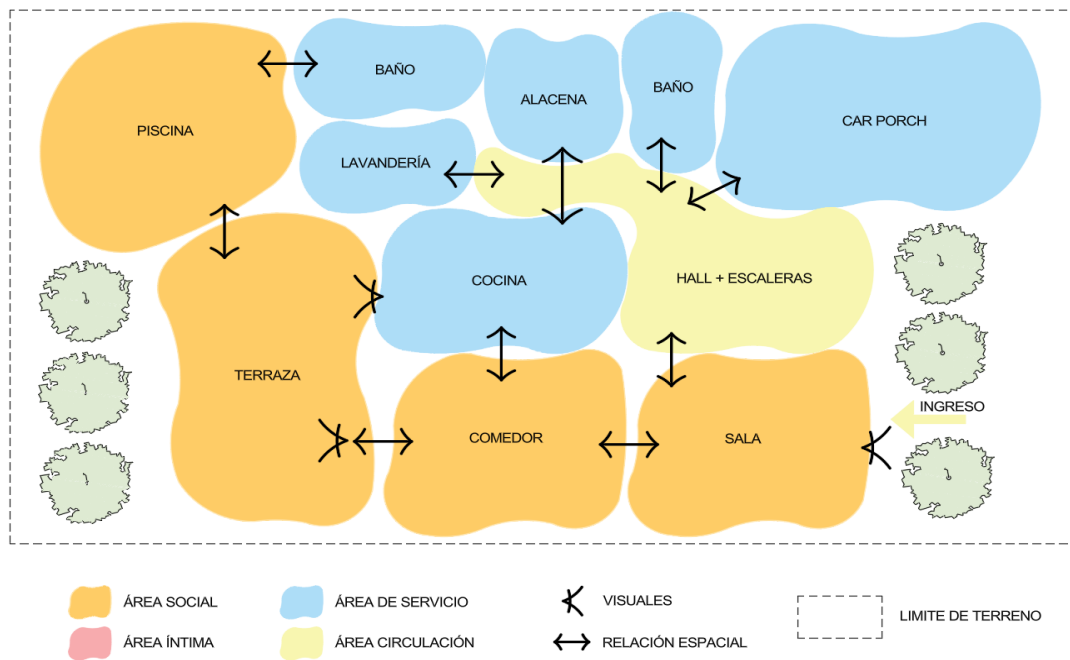
Por otro lado, el área íntima se desarrolla en el segundo nivel, garantizando mayor privacidad y control térmico en los espacios de descanso.

La disposición de los ambientes permite la implementación de ventilación cruzada en sentido este - oeste, en concordancia con los vientos predominantes del emplazamiento, contribuyendo al confort térmico interior.

En las Figuras 106 y 107 se presentan los diagramas de zonificación del primer y segundo nivel.

Figura 106.

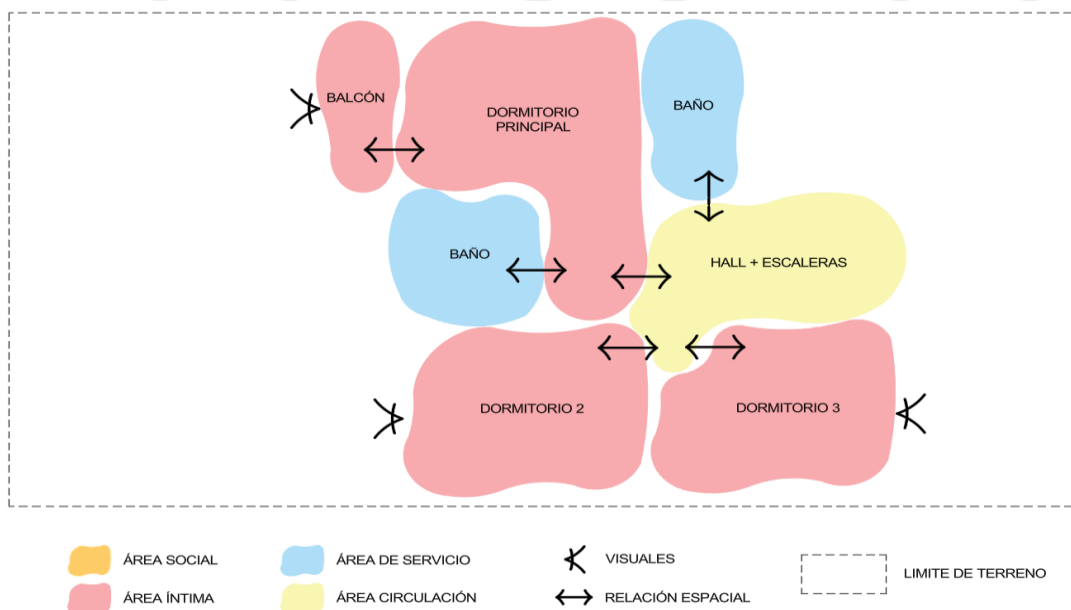
Diagrama de zonificación del primer nivel



Nota. Elaboración propia

Figura 107.

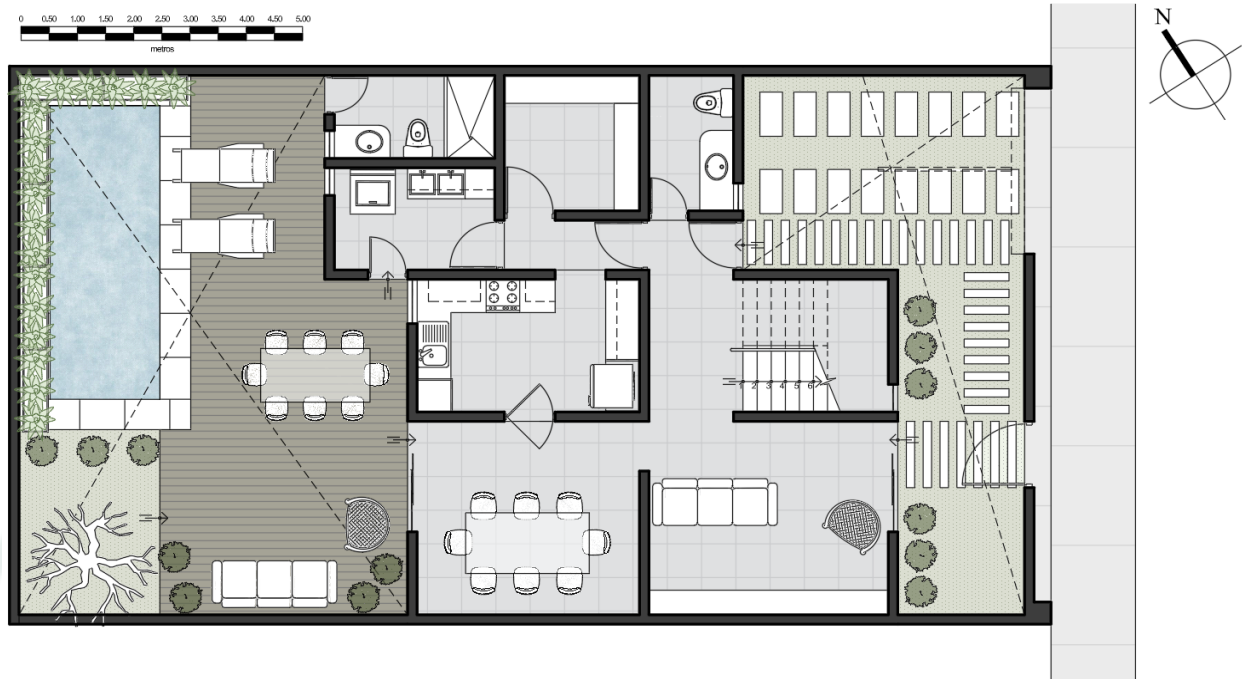
Diagrama de zonificación del segundo nivel



Nota. Elaboración propia

Figura 108.

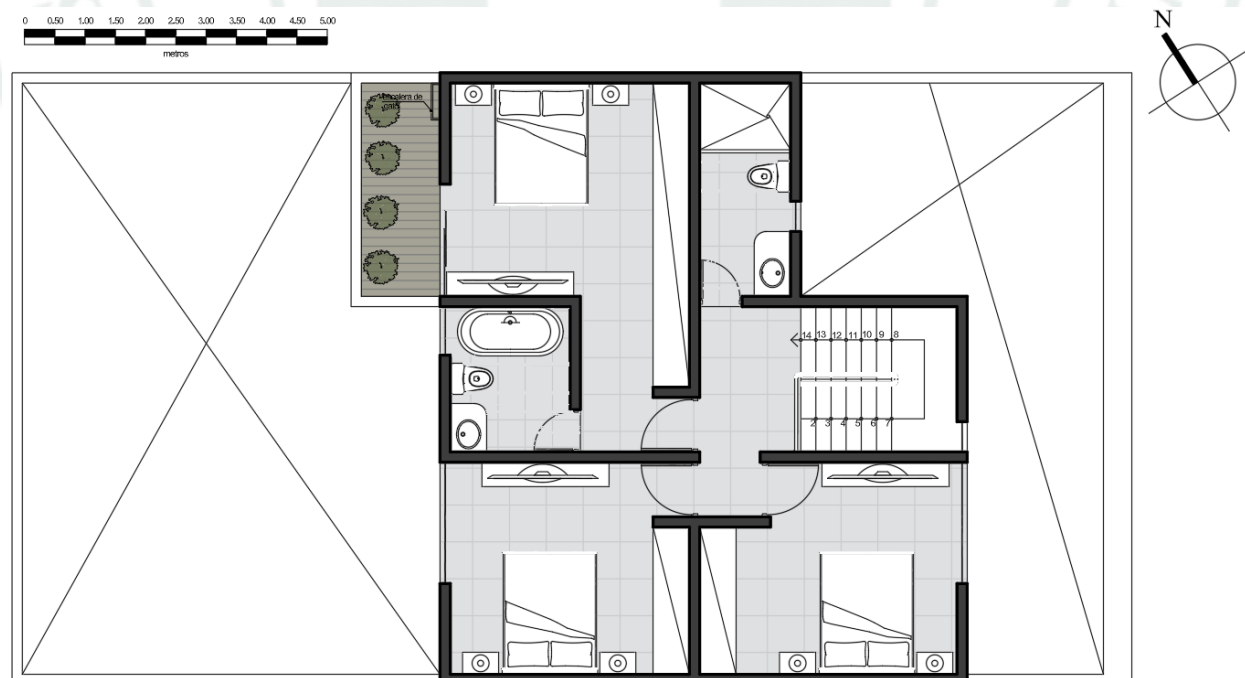
Distribución de primer nivel



Nota. Elaboración propia

Figura 109.

Distribución de segundo nivel



Nota. Elaboración propia

4.6.2.3 Visualización y recorrido virtual

El modelado tridimensional del proyecto permite visualizar la configuración volumétrica de la vivienda, caracterizada por una composición arquitectónica simple y funcional, coherente con el contexto urbano.

La propuesta incorpora elementos de control solar, como celosías, que permiten regular la incidencia de radiación sobre las fachadas.

Asimismo, se evidencia el uso del ladrillo experimental en los muros exteriores, el cual cumple una función estructural y contribuye al desempeño térmico de la envolvente.

Se han desarrollado vistas 3D y un recorrido virtual interactivo, disponible mediante código QR (Anexo 18), que permite comprender tanto la secuencia constructiva como la organización espacial del proyecto.

El contenido del recorrido virtual comprende los siguientes aspectos:

- **Simulación del proceso constructivo:**
Se presenta una secuencia progresiva del proceso de edificación, desde la ejecución de los cimientos hasta la culminación de los acabados, permitiendo visualizar la lógica constructiva del sistema propuesto.
- **Representación del sistema estructural y constructivo:**
Se identifican los principales elementos del sistema constructivo, tales como cimientos, muros portantes, columnas de arriostre, muros no portantes y losas, evidenciando la integración del ladrillo experimental dentro de la envolvente estructural.
- **Visualización espacial del proyecto:**
Se desarrolla un recorrido por los ambientes interiores y exteriores, facilitando la comprensión de la organización espacial, la relación entre zonas funcionales y la conexión interior–exterior.

Figura 110.

QR de vídeo de recorrido virtual



Nota. Elaboración propia

Asimismo, el recorrido permite evaluar de manera cualitativa el comportamiento de la vivienda en términos de iluminación natural, ventilación y relación con el entorno, reforzando los criterios bioclimáticos considerados en el diseño.

La Figura 111 muestra la fachada principal del proyecto, donde se evidencia el uso de celosías verticales como elemento de control solar, reduciendo la incidencia directa de radiación sobre los vanos. Asimismo, los muros exteriores corresponden al sistema de albañilería propuesto con ladrillo experimental, el cual contribuye al desempeño térmico de la envolvente.

En la fachada principal y trasera se incorpora un revestimiento vertical tipo *wall panel*, el cual contribuye a la composición arquitectónica mediante la generación de ritmo y contraste material, diferenciando planos y aportando profundidad a la envolvente.

Figura 111.

Vista 3D de fachada principal de vivienda unifamiliar



Nota. Elaboración propia

Figura 112.

Vista 3D - Corte de fachada principal de vivienda unifamiliar



Nota. Elaboración propia

En la Figura 112 y 113 se observa la relación interior - exterior del proyecto, donde la apertura de vanos permite la ventilación cruzada en sentido este - oeste, favoreciendo la disipación del calor acumulado durante el día.

Figura 113.

Vista 3D de fachada posterior de vivienda unifamiliar



Nota. Elaboración propia

La Figura 114 presenta el espacio de sala, donde se incorpora una chimenea como elemento complementario para el confort térmico en periodos nocturnos, en concordancia con la amplitud térmica del contexto arequipeño.

Figura 114.

Vista 3D de sala de estar de vivienda unifamiliar



Nota. Elaboración propia

La Figura 115 evidencia el ingreso de iluminación natural controlada, así como el uso de materiales que contribuyen al confort térmico interior.

Figura 115.

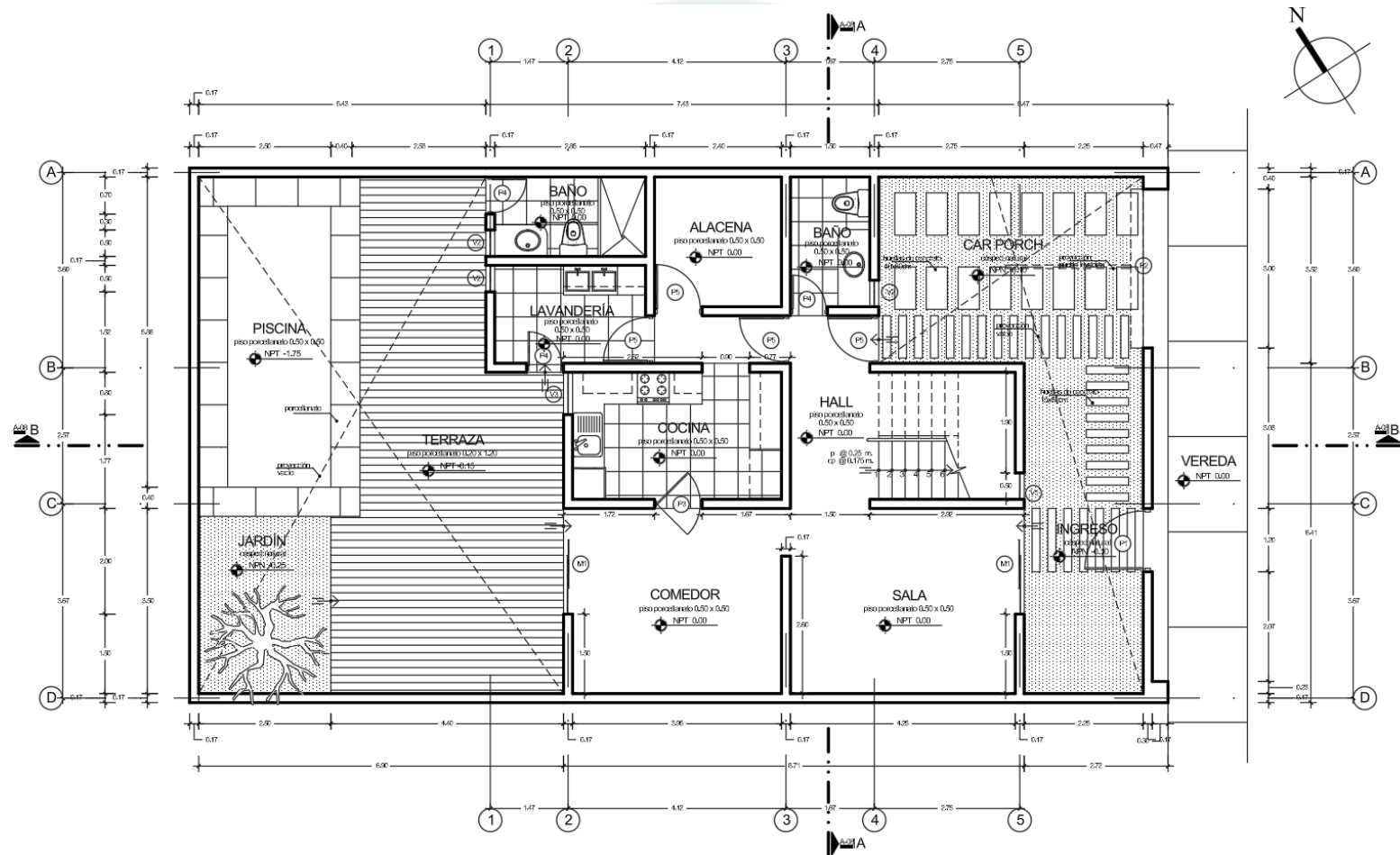
Vista 3D de dormitorio principal de vivienda unifamiliar



Nota. Elaboración propia

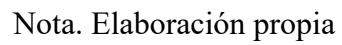
Figura 116.

Planta primer nivel de vivienda unifamiliar



Nota. Elaboración propia

Planta primer nivel de vivienda unifamiliar



Los planos a nivel Proyecto se encuentran detallados en el Anexo 18 y contienen: Planta de Primer y Segundo nivel, cuadro de vanos, Elevación Principal y Posterior, Corte A y Corte B, además contiene vistas 3D y el código QR de un recorrido virtual del proyecto.

4.6.3 Estrategias de diseño bioclimático

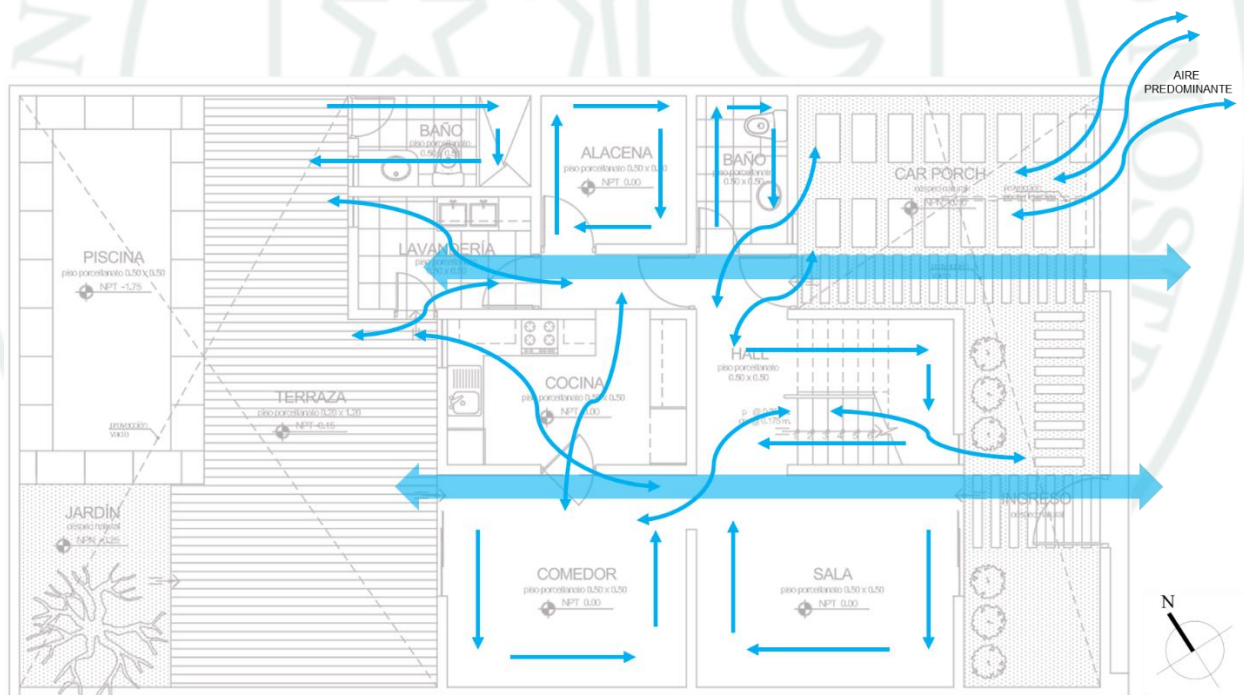
4.6.3.1 Estrategia de ventilación natural y flujos de aire

4.6.3.1.1 Primer nivel

El diseño de la primera planta incorpora estrategias clave de ventilación natural para optimizar el confort interior y reducir la dependencia de sistemas de climatización mecánicos, contribuyendo al análisis energético y bioclimático de la vivienda.

Figura 118.

Esquema de flujo de aire del primer nivel



Nota. Elaboración propia

- **Ventilación cruzada horizontal**

La principal estrategia de ventilación empleada es la ventilación cruzada (representada por las flechas azules), facilitada por la disposición de las aberturas en fachadas opuestas o adyacentes, permitiendo que el aire atraviese los espacios de manera eficiente.

- Zonas sociales y de servicio: se observa un flujo continuo desde el ingreso (fachada frontal) hacia el jardín y la piscina (fachada posterior/lateral). Esta corriente principal logra ventilar simultáneamente la sala, el comedor, el hall, la cocina, y la lavandería.
- Comedor y Sala: Estos espacios se benefician de aperturas en fachadas opuestas o adyacentes, permitiendo que el aire pase de manera lineal y directa, asegurando una rápida renovación del aire.
- Corrientes Secundarias: El aire es redirigido inteligentemente en las áreas de servicio y almacenamiento:
 - La LAVANDERÍA recibe flujo desde la terraza y ventila hacia el baño adyacente, promoviendo la extracción de humedad y olores.
 - La COCINA utiliza aperturas para promover el flujo a través de su centro, ayudando a disipar el calor generado durante la cocción.

- **Influencia del aire predominante**

La gráfica indica claramente una dirección del Aire Predominante (flechas curvas en la esquina superior derecha).

- Captación y Distribución: El aire predominante incide sobre la fachada frontal/lateral, siendo capturado eficientemente a través de las aberturas en el CAR PORCH y el INGRESOS.
- Optimización del Flujo: El diseño de la fachada actúa como un captador de vientos. El flujo es inmediatamente dirigido a los espacios más amplios (SALA, HALL),

asegurando que la corriente dominante sea aprovechada para la climatización pasiva de las áreas de mayor uso.

- **Estrategia de extracción en espacios húmedos**

La ventilación está diseñada para priorizar la extracción de aire viciado y húmedo de los espacios de servicio:

- Baños: Las flechas indican que el aire de los baños es extraído directamente al exterior o hacia un espacio intermedio (como un patio de luz o el exterior) para evitar que la humedad y los olores se propaguen al HALL, ALACENA o áreas sociales.
- Tiro Térmico Incipiente: En áreas centrales, como el HALL (donde se ubica la escalera), la conexión vertical con la Planta Alta sugiere la posibilidad de un efecto de tiro térmico (ventilación por chimenea) que facilita la evacuación del aire caliente ascendente y mantiene la presión negativa en la planta baja.
- Conclusión

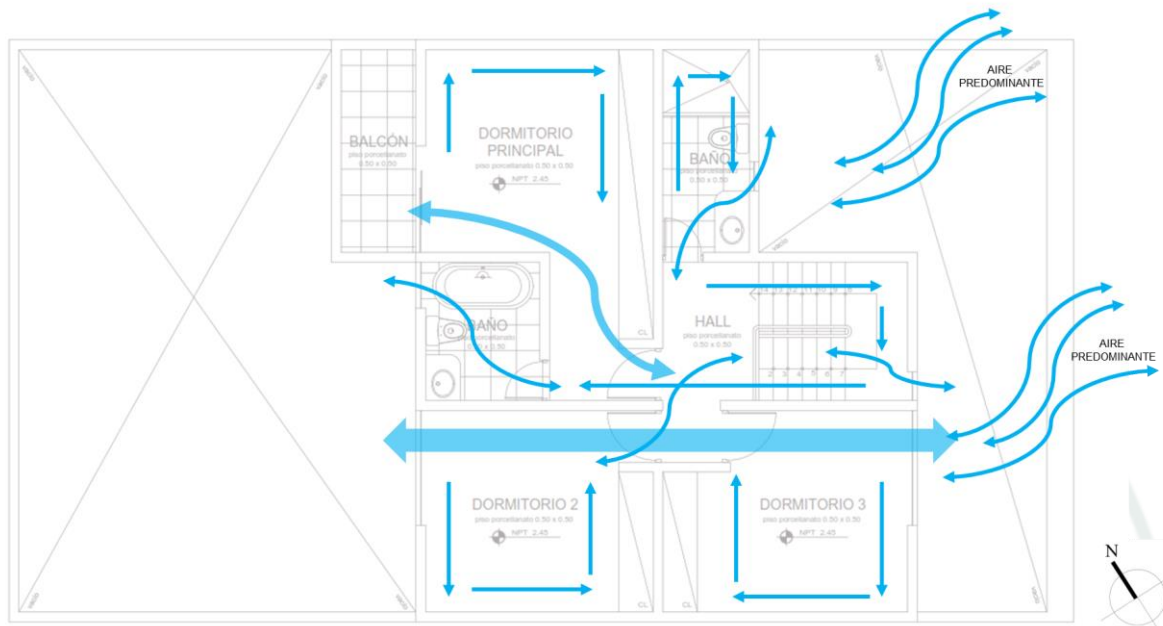
El esquema demuestra un enfoque sólido en la ventilación pasiva. La vivienda maximiza el potencial del aire predominante y la ventilación cruzada para generar un movimiento de aire constante en las zonas habitables. Las estrategias de ventilación forzada o secundaria en la LAVANDERÍA y BAÑOS aseguran el control de humedad y calidad del aire en los espacios de servicio, siendo un factor positivo en el análisis energético al minimizar la necesidad de ventilación mecánica.

4.6.3.1.2 Segundo nivel

La planta del segundo nivel, destinada al área privada (dormitorios y servicios), continúa y complementa las estrategias de ventilación natural de la planta del primer nivel, enfocándose en la ventilación cruzada en los dormitorios y el aprovechamiento del tiro térmico a través del hall de escalera.

Figura 119.

Esquema de flujo de aire del segundo nivel



Nota. Elaboración propia

- **Ventilación cruzada en dormitorios**

La disposición de los dormitorios facilita la ventilación cruzada efectiva, crucial para el confort térmico en el área de descanso:

- **Dormitorio Principal:** Este espacio maximiza la ventilación cruzada al contar con aperturas hacia el BALCÓN y, una abertura de la puerta hacia el hall, permitiendo que el aire atraviese directamente la habitación. La cercanía al BALCÓN permite una extracción o inyección de aire hacia el exterior inmediato.
- **Dormitorio 2 y Dormitorio 3:** Estos dormitorios adyacentes se benefician de aperturas en fachadas opuestas o contiguas, generando un flujo horizontal que garantiza la renovación del aire en la zona de descanso. El flujo es predominantemente lineal, optimizando la capacidad de las ventanas como puntos de entrada y salida.

- **Aprovechamiento del aire predominante**

El esquema muestra dos zonas principales de incidencia del aire predominante en la segunda planta:

- **Fachada Frontal:** Una porción del aire predominante incide directamente sobre la fachada frontal, siendo capturado en el área del HALL y, posiblemente, en el BAÑO contiguo, ayudando a impulsar el flujo hacia el interior.
- **Ventilación Inducida en el Hall:** Una corriente de aire significativa se establece a lo largo del plano de la fachada donde se encuentra el HALL. Este flujo es crucial para la distribución del aire a los dormitorios 2 y 3.
- **Conexión vertical y efecto de tiro térmico**

El HALL de la segunda planta, que contiene la caja de la escalera, actúa como un elemento clave para la ventilación de toda la vivienda:

- **Extracción de Aire Caliente:** El flujo de aire que ingresa a la primera planta tenderá a ascender por convección (efecto de tiro térmico), concentrándose en el HALL de la segunda planta.
- **Zona de Presión Negativa:** Al permitir una salida en la parte superior (a través de una claraboya), se crea una zona de presión negativa que succiona el aire caliente de los niveles inferiores.
- **Distribución/Extracción Interior:** El flujo de aire se mueve desde el HALL hacia los dormitorios, y desde el DORMITORIO PRINCIPAL y el DORMITORIO 2 hacia los BAÑOS adyacentes, utilizándolos como ductos de ventilación para la extracción de aire viciado y húmedo al exterior.

- **Conclusión Integrada**

La estrategia bioclimática en la Planta Alta se basa en la protección y la renovación constante del aire. Los dormitorios garantizan el confort mediante la ventilación cruzada, mientras que el diseño explota la conexión vertical del HALL/Escalera para capitalizar el efecto de tiro térmico, logrando la evacuación eficiente del aire caliente acumulado y manteniendo un ambiente fresco en las áreas de descanso.

4.6.3.2 Control solar y aprovechamiento de la radiación: Análisis de sombras de la vivienda

El análisis de la incidencia solar, simulado mediante el estudio de sombras para la ubicación de Sachaca, Arequipa, permite validar las estrategias pasivas de diseño implementadas en la envolvente de la vivienda. Este estudio se centra en los periodos críticos del solsticio de verano (21 de diciembre) y el solsticio de invierno (21 de junio), contrastando la gestión de la ganancia solar indeseada y el aprovechamiento del calentamiento pasivo.

4.6.3.2.1 Comportamiento en solsticio de verano (21 de diciembre)

El solsticio de verano, caracterizado por la mayor altura solar y la máxima intensidad de radiación, representa el mayor desafío de control térmico.

Figura 120.

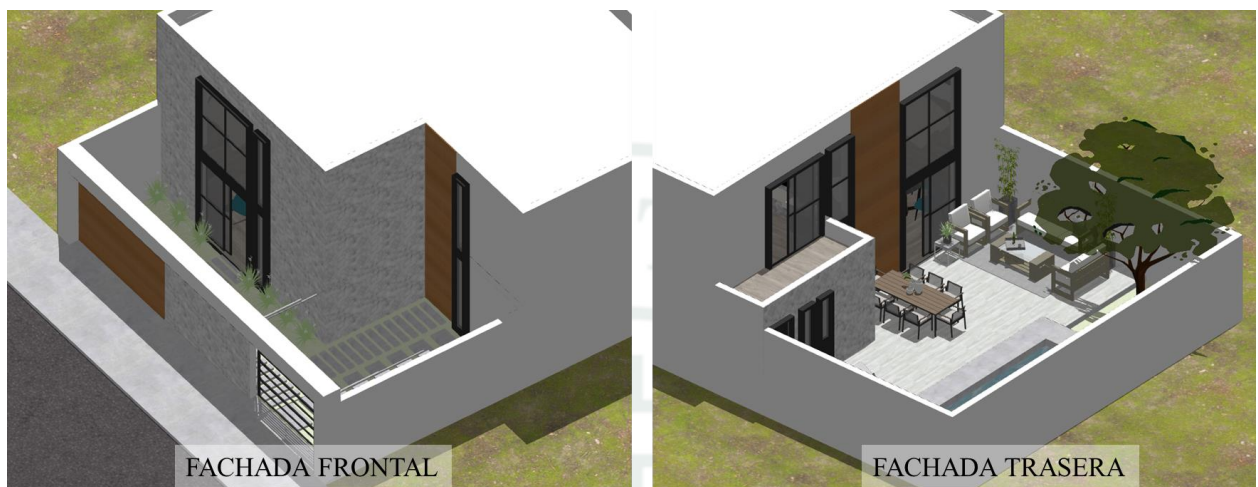
Estudio de sombras en el solsticio de verano (21 de diciembre) - 9:00 a.m.



Nota. Elaboración propia

Figura 121.

Estudio de sombras en el solsticio de verano (21 de diciembre) - 12:00 m.



Nota. Elaboración propia

Figura 122.

Estudio de sombras en el solsticio de verano (21 de diciembre) - 3:00 p.m.



Nota. Elaboración propia

- **Fachada Frontal (Nor-Este, NE)**

- **Mañana (9:00 am):** La fachada principal, orientada al NE, recibe la radiación solar directa matinal. Esta incidencia temprana es controlada de manera efectiva por el gran marco perimetral que define la fachada del primer nivel. Este elemento arquitectónico, al sobresalir, actúa como un potente parasol horizontal que filtra la entrada de sol a los ambientes sociales (Sala y Comedor), permitiendo una iluminación diurna adecuada sin sobrecalentamiento.
- **Mediodía (12:00 m):** Debido a la elevada altura cenital del sol, la radiación incide de manera casi vertical. En este momento, el marco perimetral del primer nivel proyecta una sombra profunda sobre el área del acceso y parte del Car Porch, demostrando su alta eficacia en el bloqueo de la radiación de alto ángulo. Esto es crucial para mantener frescas las zonas de entrada y las circulaciones adyacentes.

- **Fachada Trasera (Sur-Oeste, SO)**

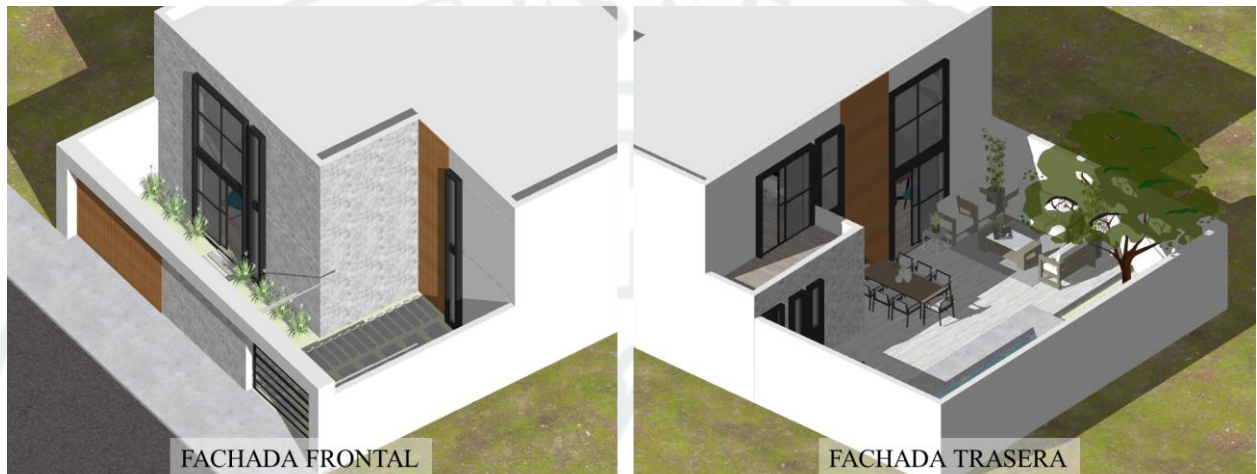
- **Tarde (15:00 pm):** La fachada trasera, expuesta al SO, es la que recibe la radiación solar más intensa y problemática de la tarde. El estudio de sombras revela que la sombra proyectada por el árbol existente en la terraza y la propia volumetría del segundo nivel son los principales elementos de control. Si bien la vegetación cumple un rol esencial, la simulación sugiere que el sol bajo y penetrante de la tarde aún podría incidir en algunas áreas acristaladas si no están protegidas por aleros complementarios o dispositivos verticales. Esto subraya la importancia crítica de la vegetación y la posible necesidad de protección adicional en ventanas específicas.

4.6.3.2.2 *Comportamiento en solsticio de invierno (21 de junio)*

El solsticio de invierno, caracterizado por el sol bajo y sombras largas, facilita las estrategias de ganancia solar pasiva para el calentamiento.

Figura 123.

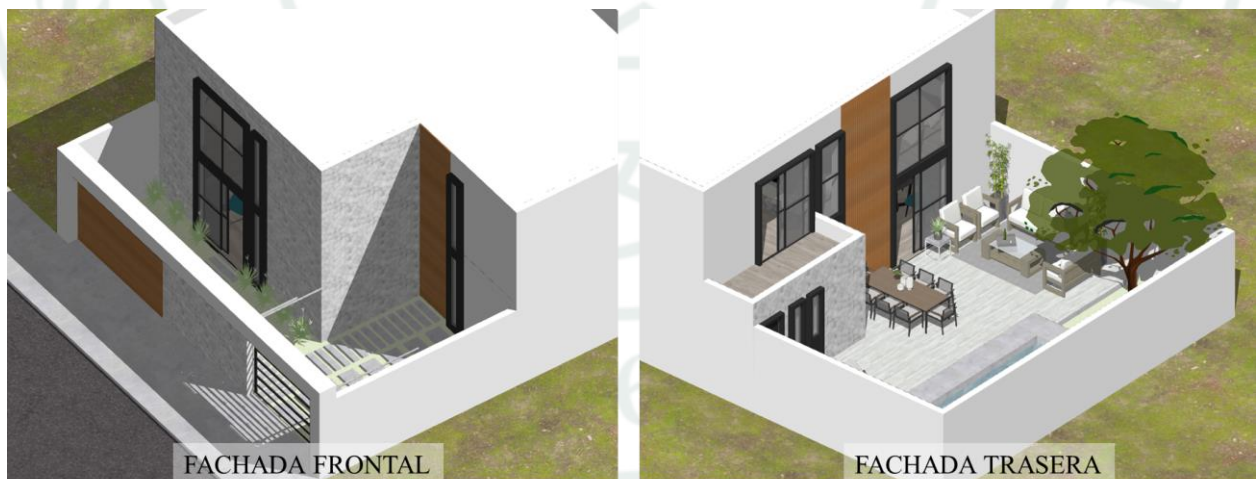
Estudio de sombras en el solsticio de invierno (21 de junio) - 9:00 a.m.



Nota. Elaboración propia

Figura 124.

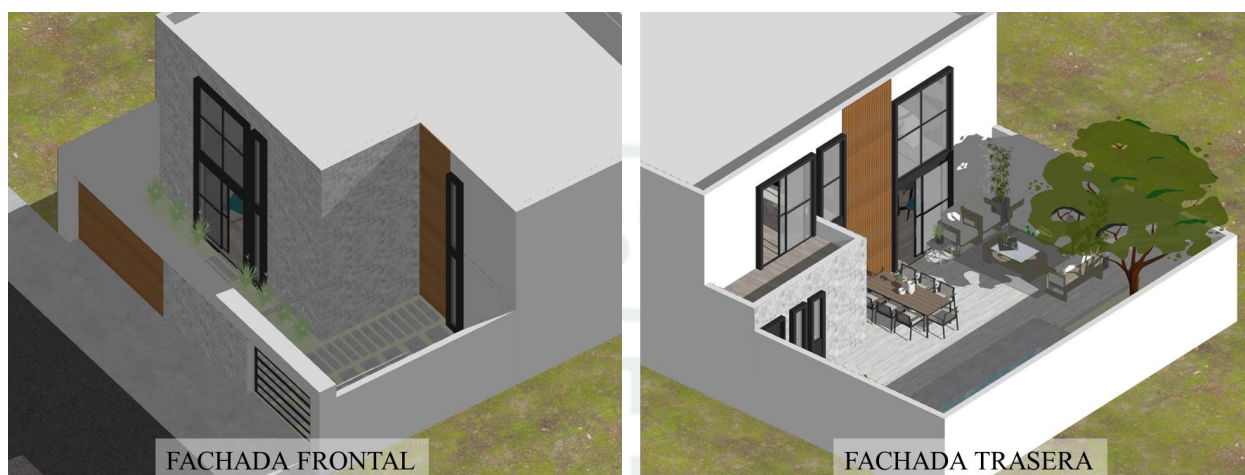
Estudio de sombras en el solsticio de invierno (21 de junio) - 12:00 m.



Nota. Elaboración propia

Figura 125.

Estudio de sombras en el solsticio de invierno (21 de junio) - 3:00 p.m.



Nota. Elaboración propia

- **Fachada Frontal (Nor-Este, NE)**
 - **Mañana (9:00 am):** Con el sol en su posición más baja, la fachada frontal está significativamente iluminada. El marco perimetral, debido al ángulo bajo del sol invernal, permite una mayor penetración de la radiación solar directa hacia los espacios interiores (Sala y Comedor), maximizando la ganancia térmica pasiva. Esto es altamente beneficioso para atemperar los ambientes tras las frías noches, contribuyendo al confort sin consumo energético.
 - **Mediodía (12:00 m):** El sol de mediodía en invierno, al ser más bajo que en verano, continúa facilitando una penetración solar favorable a través de las aperturas, lo que ayuda a calentar la masa térmica interior de la vivienda.
- **Fachada Trasera (Sur-Oeste, SO)**
 - **Tarde (15:00 pm):** En invierno, la exposición de la fachada trasera sigue siendo relevante, pero el sol más bajo y menos intenso hace que la gestión sea más sencilla. Las sombras arrojadas por los volúmenes del segundo nivel y la vegetación (aunque de menor densidad foliar en algunos casos) siguen siendo

efectivas. La penetración del sol de la tarde en la terraza puede ser aprovechada para atemperar este espacio exterior, lo que es un beneficio en los días más fríos.

4.6.3.2.3 *Conclusión Estratégica: Evaluación del Diseño*

El análisis de sombras visualiza y valida la eficacia de las estrategias bioclimáticas pasivas integradas en el diseño:

- **Diferenciación Estacional Inteligente:** La vivienda demuestra una capacidad notable para adaptarse a las estaciones. El marco perimetral de la fachada principal actúa como un eficaz parasol de verano para el sol de alto ángulo, y simultáneamente, permite la ganancia solar profunda en invierno cuando el sol está más bajo, optimizando el confort térmico en las áreas sociales.
- **Gestión Activa del Sol Crítico:** Se reconoce la efectividad del diseño volumétrico y la vegetación en la fachada trasera (SO) para mitigar el impacto del sol de la tarde en verano. Esto es crucial y demuestra una planificación consciente de los elementos del paisaje como componentes activos del control solar.
- **Diseño Bioclimático Coherente:** En términos generales, el diseño de la vivienda presenta una estrategia de control solar bien concebida y coherente con la orientación y el clima de Arequipa. Las decisiones arquitectónicas relacionadas con volúmenes, aberturas y la inclusión de elementos como el marco perimetral y la vegetación responden directamente a los principios de control solar y aprovechamiento de la radiación, apuntando hacia un excelente desempeño energético pasivo.

4.6.4 *Aplicación del ladrillo tipo F en el sistema constructivo*

La propuesta arquitectónica se desarrolla a partir de un sistema constructivo de albañilería confinada, caracterizado por:

- Muros portantes como elementos principales de carga con ladrillos tipo F.
- Columnas de confinamiento de concreto armado

- Vigas de amarre en nivel superior de muros
- Integración con losas aligeradas

Este sistema permite una construcción eficiente, adecuada para viviendas de baja altura, y compatible con las condiciones del contexto, permitiendo que el sistema funcione de forma monolítica y garantizando su estabilidad estructural.

4.6.4.1 Características del ladrillo aplicado

Se emplea un ladrillo de concreto Tipo F, diseñado para uso en muros portantes, con las siguientes características:

- Dimensiones promedio:
 - Largo: 239.725 mm
 - Ancho: 140.450 mm
 - Alto: 88.642 mm
- Variación dimensional controlada
- Presencia de dos cavidades circulares que representan el 11.196% del área de asentado
- Uso de junta de mortero de 15 mm

A diferencia del ladrillo convencional (tipo King Kong 18 huecos), el ladrillo propuesto presenta:

- Cavidades de mayor diámetro (2”), lo que permite su relleno con mortero, contribuyendo a la continuidad del muro
- Mayor participación del mortero en el comportamiento del sistema
- Diferencias en altura de hilada (9 cm), lo cual influye en la modulación constructiva

No obstante, el sistema mantiene compatibilidad con los criterios tradicionales de albañilería confinada.

4.6.4.2 Relación muro - estructura

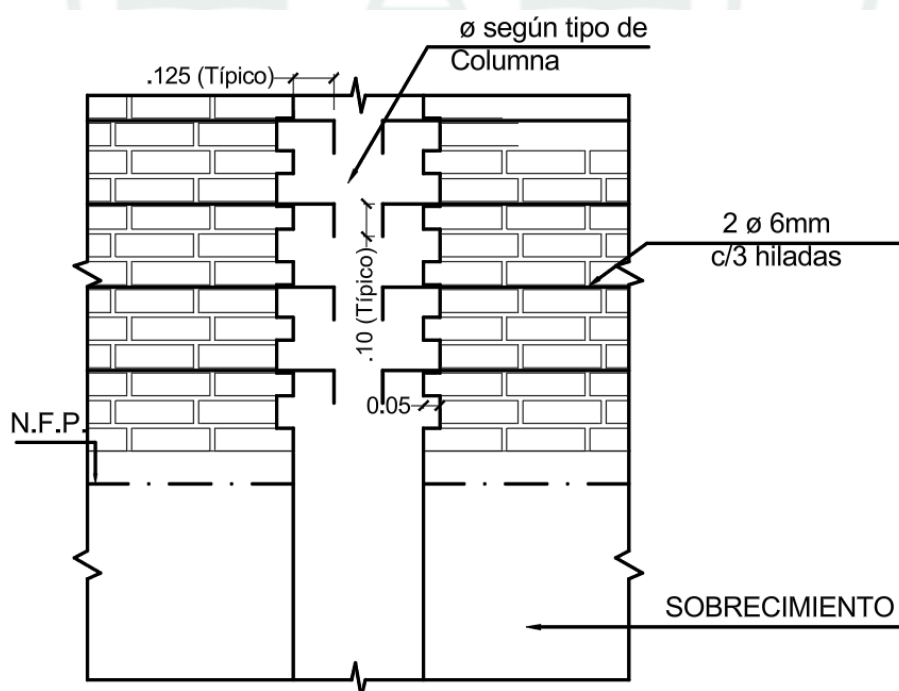
Los muros portantes trabajan de manera conjunta con los elementos de confinamiento:

- Las columnas de confinamiento incorporan dentado de 5 cm para asegurar el anclaje mecánico con la albañilería
- Las vigas de amarre distribuyen cargas y amarran los muros en la parte superior
- Se incorpora refuerzo horizontal (acero 2Ø6 mm) en las hiladas, mejorando la resistencia del muro
- Las cavidades del ladrillo permiten la integración con elementos estructurales verticales

Esta relación asegura un comportamiento monolítico del sistema constructivo.

Figura 126.

Refuerzo horizontal en muros portantes



Nota. Elaboración propia

4.6.4.3 Detalles constructivos del sistema de muros portantes

El sistema constructivo del muro está compuesto por:

- Tarrajeo interior: 15 mm
- Muro de albañilería (ladrillo Tipo F + mortero)
- Tarrajeo exterior: 15 mm

En los encuentros constructivos se considera:

- Sobrecimiento de concreto ciclópeo
- Vigas de amarre de concreto armado
- Losa aligerada de 20 cm
- Falso piso de 5 cm

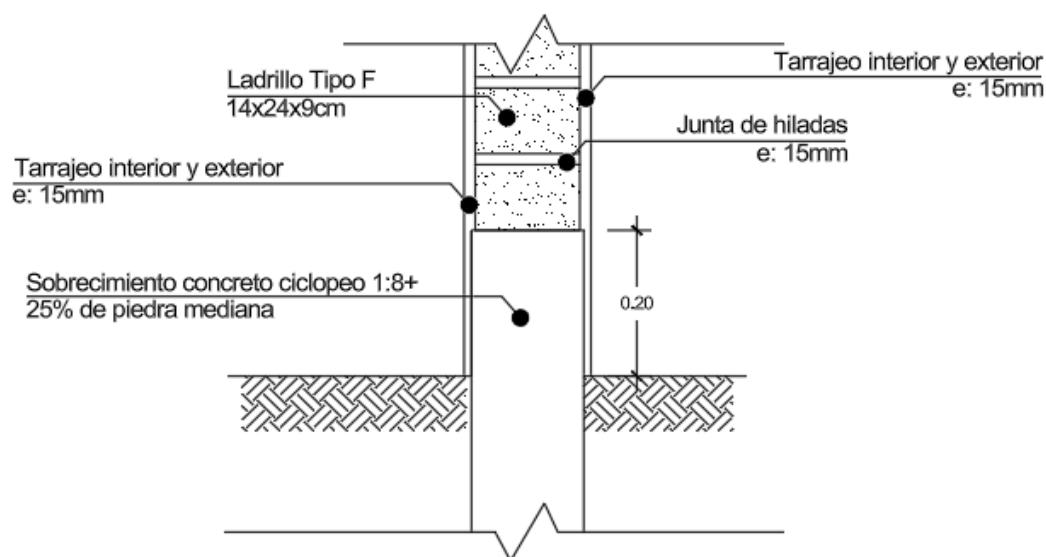
Estos componentes garantizan continuidad estructural y adecuada protección de los elementos constructivos.

La comprensión del sistema constructivo se complementa mediante el desarrollo de detalles, los cuales permiten visualizar la integración de los distintos elementos estructurales.

En la Figura 127 se aprecia la transmisión de cargas hacia la cimentación, así como la función del sobrecimiento en la protección del muro frente a la humedad del terreno.

Figura 127.

Detalle constructivo del encuentro de sobrecimiento y muro portante

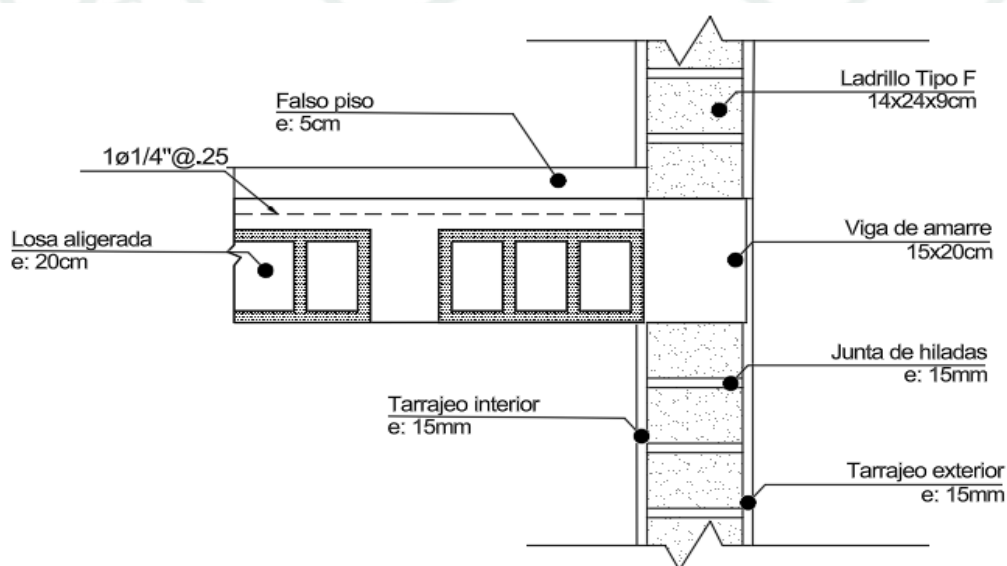


Nota. Elaboración propia

En la Figura 128 muestra la relación entre la losa aligerada, la viga de amarre y el muro portante, evidenciando la continuidad estructural del sistema. Asimismo, se observa la disposición del falso piso y las capas de acabado.

Figura 128.

Detalle constructivo del encuentro de losa, viga y muro portante

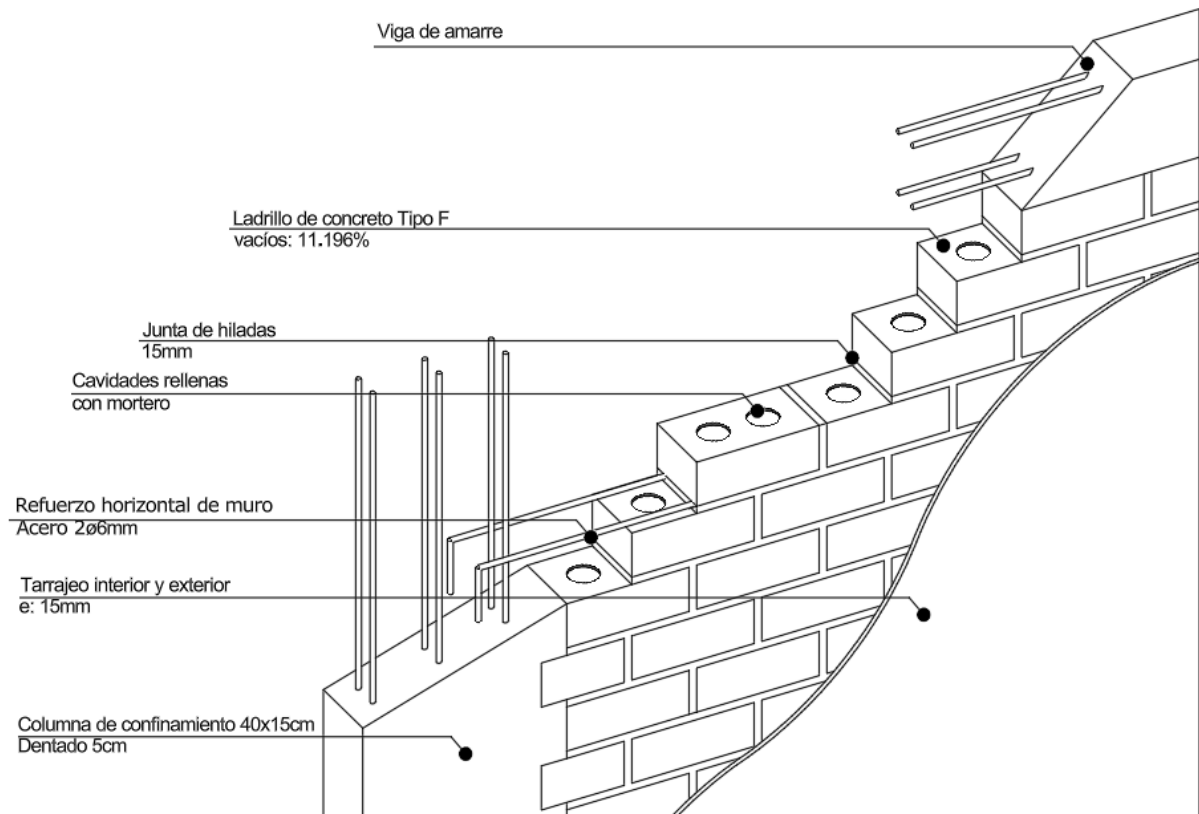


Nota. Elaboración propia

En la Figura 129 se visualiza la disposición del ladrillo Tipo F, el relleno de cavidades con mortero, el refuerzo horizontal y la interacción con las columnas de confinamiento, permitiendo una comprensión integral del sistema.

Figura 129.

Detalle constructivo 3D del muro portante



Nota. Elaboración propia

4.6.4.4 Disposición en muros portantes

La disposición de los muros responde a criterios estructurales, funcionales y de modulación constructiva, asegurando un adecuado comportamiento frente a cargas gravitacionales y sollicitaciones sísmicas.

El sistema estructural se organiza en dos direcciones principales:

- Eje X (dirección longitudinal)
- Eje Y (dirección transversal)

4.6.4.4.1 Disposición en planta - Primer nivel

En la Figura 130 se presenta la disposición de muros portantes en el primer nivel, donde se identifican:

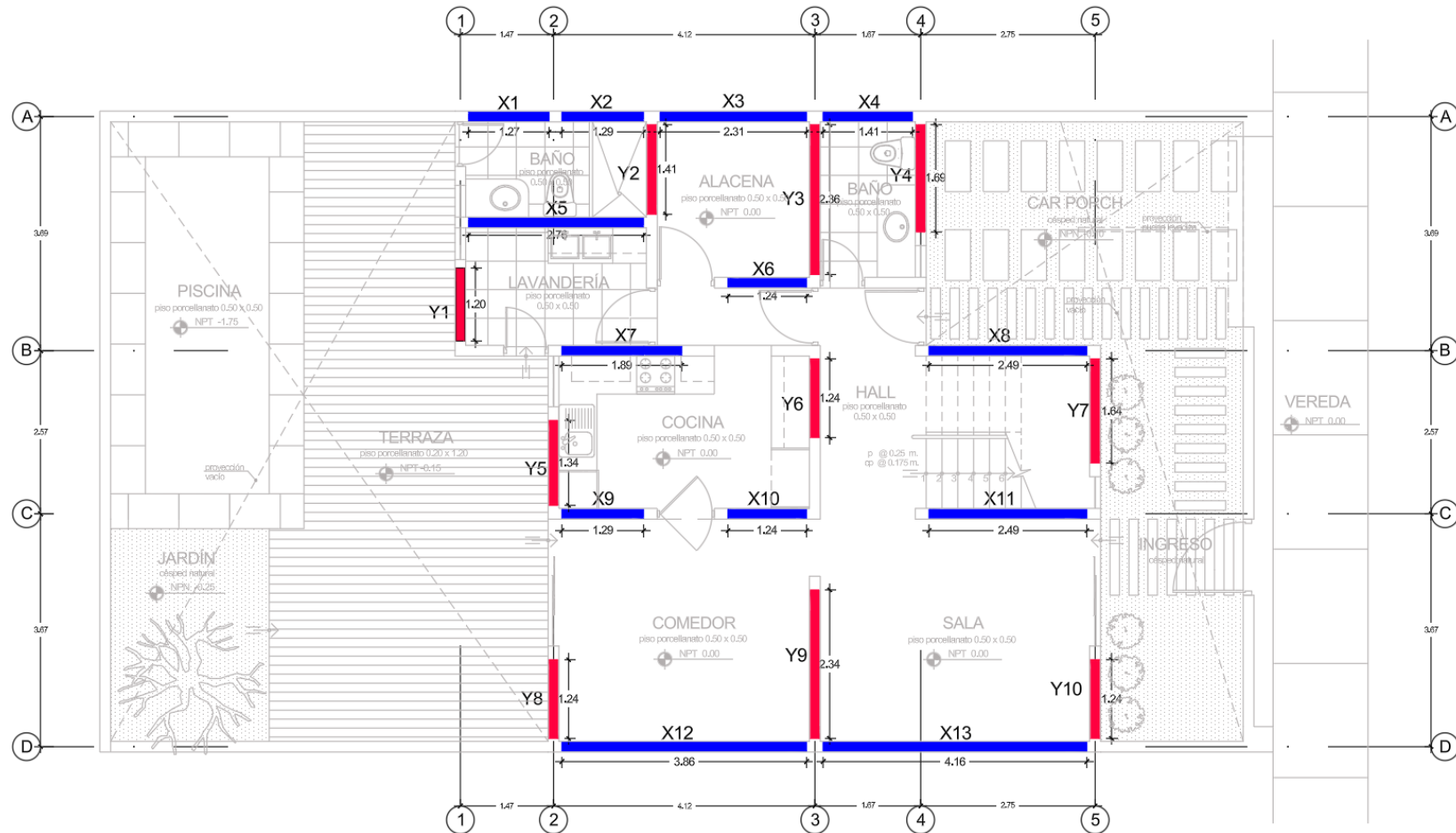
- **Muros en eje X (color azul).** Dispuestos principalmente en la dirección longitudinal de la vivienda, aportando rigidez frente a fuerzas laterales paralelas a este eje.
- **Muros en eje Y (color rojo).** Ubicados en sentido transversal, permitiendo equilibrar el comportamiento estructural y evitar irregularidades en planta.

La distribución evidencia una adecuada continuidad de muros entre ambientes como sala, comedor, cocina y zona de servicios, evitando interrupciones que puedan generar debilidad estructural.

Asimismo, los muros portantes se alinean con los elementos de confinamiento (columnas y vigas), garantizando la correcta transmisión de cargas hacia la cimentación.

Figura 130.

Muros portantes en planta primer nivel de vivienda unifamiliar



Nota. Elaboración propia

4.6.4.4.2 Disposición en planta - Segundo nivel

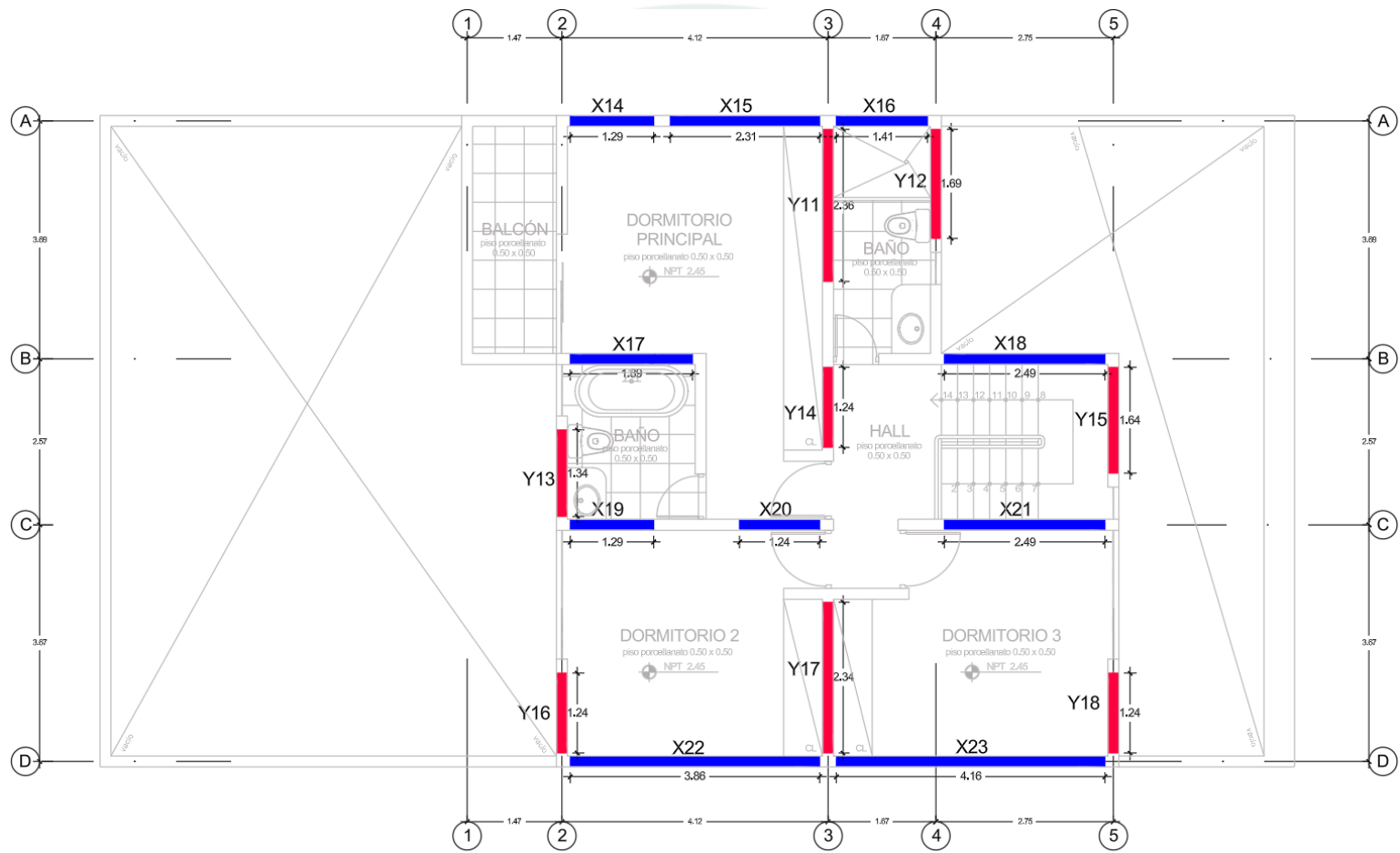
En la Figura 131 se muestra la disposición de muros portantes en el segundo nivel, manteniendo la continuidad estructural respecto al primer nivel.

Se observa que:

- Los muros del segundo nivel coinciden en gran medida con los del primer nivel, asegurando una correcta transferencia de cargas.
- Se evita la generación de voladizos estructurales innecesarios, lo que mejora el comportamiento sísmico.
- La distribución en ambos ejes permite una configuración balanceada, reduciendo efectos de torsión.

Figura 131.

Muros portantes en planta segundo nivel de vivienda unifamiliar



Nota. Elaboración propia

4.6.4.5 Modulación y cantidad de unidades

La modulación del sistema de muros se ha desarrollado en función de las dimensiones del ladrillo de concreto Tipo F, el cual presenta medidas promedio de:

- **Largo:** 24 cm
- **Ancho:** 14 cm
- **Alto:** 9 cm
- **Espesor de junta de mortero:** 15 mm

4.6.4.5.1 *Módulo vertical (altura de hilada)*

Cada hilada está compuesta por:

- Altura del ladrillo: 9 cm
- Junta de mortero: 1.5 cm
 - Altura total por hilada: 10.5 cm

Esto permite definir la altura de los muros en función de múltiplos de este módulo.

4.6.4.5.2 *Módulo horizontal*

En sentido longitudinal:

- Largo del ladrillo: 24 cm
- Junta vertical: 1.5 cm
 - Longitud modular: 25.5 cm por unidad

4.6.4.5.3 *Cantidad de ladrillos por metro cuadrado*

Para determinar la cantidad de unidades por metro cuadrado (m²) se emplea la siguiente expresión:

$$CL = \frac{1}{(L + J_h) \times (H + J_v)}$$

Donde:

CL: cantidad de ladrillos por m²

L: longitud de ladrillo (m)

J_h: espesor de junta horizontal (m)

H: altura del ladrillo (m)

J_v: espesor de junta vertical (m)

Entonces:

$$CL = \frac{1}{(0.24 + 0.015) \times (0.09 + 0.015)}$$

$$CL = \frac{1}{(0.24 + 0.015) \times (0.09 + 0.015)}$$

CL = 38 ladrillos por m² de muro portante (sin desperdicio)

4.6.4.5.4 Ajuste por desperdicio

Se considera un margen por:

- Cortes
- Pérdidas en obra
- Ajustes en encuentros
 - Factor de incremento: 5% – 10%

CL = 40 ladrillos por m² de muro portante (considerando 5% de desperdicio)

4.6.4.6 Cálculo de la cantidad total de ladrillos para muros portantes.

A partir de la identificación de los muros portantes en ambos niveles, se determinó el área total de albañilería estructural, descontando elementos como columnas, vigas y sobrecimiento.

Tabla 166.

Cantidad de ladrillos 24x14x9 cm empleados en muros portantes

	Muro	Longitud (m)	Altura (m)	Área (m2)
Primer Nivel	X1	1.27	2.05	2.6
	X2	1.29	2.05	2.65
	X3	2.31	2.05	4.73
	X4	1.41	2.05	2.89
	X5	2.76	2.05	5.66
	X6	1.24	2.05	2.54
	X7	1.89	2.05	3.87
	X8	2.49	2.05	5.1
	X9	1.29	2.05	2.64
	X10	1.24	2.05	2.54
	X11	2.49	2.05	5.1
	X12	3.86	2.05	7.91
	X13	4.16	2.05	8.53
	Y1	1.2	2.05	2.46
	Y2	1.41	2.05	2.89
	Y3	2.36	2.05	4.84
	Y4	1.69	2.05	3.46
	Y5	1.34	2.05	2.75
	Y6	1.24	2.05	2.54
	Y7	1.64	2.05	3.36
	Y8	1.24	2.05	2.54
	Y9	2.34	2.05	4.8
	Y10	1.24	2.05	2.54
Segundo nivel	X14	1.29	2.25	2.90
	X15	2.31	2.25	5.20
	X16	1.41	2.25	3.17
	X17	1.89	2.25	4.25
	X18	2.49	2.25	5.60
	X19	1.29	2.25	2.90
	X20	1.24	2.25	2.79
	X21	2.49	2.25	5.60
	X22	3.86	2.25	8.69
	X23	4.16	2.25	9.36
	Y11	2.36	2.25	5.31
	Y12	1.69	2.25	3.80
	Y13	1.34	2.25	3.02
	Y14	1.24	2.25	2.79
	Y15	1.64	2.25	3.69
	Y16	1.24	2.25	2.79
	Y17	2.34	2.25	5.27
	Y18	1.24	2.25	2.79
Área total de muros portantes				168.86
Ladrillos por m2 (5% de desperdicio)				40
Cantidad total de ladrillos (5% de desperdicio)				6 755

Nota. Elaboración propia

Para la construcción de los muros portantes de la vivienda unifamiliar en estudio se requieren 6 755 ladrillos de dimensiones 24×14×9 cm, considerando un 5% adicional por desperdicio.

Tabla 167.

Cantidad de ladrillos tipo F en muros portantes del módulo de vivienda

Área total de muros portantes	Consumo unitario		Cantidad total	
	Sin desperdicio	Con 5% desperdicio	Sin desperdicio	Con 5% desperdicio
168.86 m ²	38 ladrillos/m ²	40 ladrillos/m ²	6 417 unidades	6 755 unidades

Nota. Elaboración propia

La cuantificación de unidades permite establecer una relación directa entre el diseño arquitectónico, la modulación constructiva y el consumo de materiales, asegurando coherencia entre la propuesta proyectual y su viabilidad constructiva.

4.6.4.7 Síntesis de consideraciones en el sistema constructivo

A partir del uso del ladrillo experimental, se identifican algunas consideraciones:

- El mayor volumen de cavidades implica un mayor consumo de mortero de relleno
- Existe la necesidad de asegurar una adecuada adherencia entre mortero y unidad
- Se requiere control en la ejecución para evitar segregación o vacíos

Si bien el sistema mantiene los principios de la albañilería confinada tradicional, el ladrillo propuesto introduce variaciones en su ejecución, principalmente en el tratamiento de cavidades y modulación.

Estas condiciones se plantean como oportunidades de mejora para futuras investigaciones.

Tabla 168.*Síntesis comparativa del sistema constructivo entre ladrillo Tipo F y ladrillo convencional*

Aspecto	Ladrillo Tipo F (propuesto)	Ladrillo convencional	Implicancia
Dimensiones	24 × 14 × 9 cm	24 × 14 × 10 cm	Ajuste en modulación vertical
Altura de hilada	10.5 cm	11.5 cm	Mayor número de hiladas
Ladrillos por m ²	38 und/m ²	35 und/m ²	Mayor consumo de unidades
Ladrillos por m ² (con desperdicio)	40 und/m ²	37 und/m ²	Incremento en metros
Área total de muros	168.86 m ²	168.86 m ²	Base de comparación equivalente
Cantidad total de ladrillos	6 755 und	6 248 und	Mayor cantidad total
Cavidades	Grandes (2'')	Pequeñas	Mayor volumen de mortero
Relleno de orificios	Completo	Parcial	Posible menor adherencia si no se controla
Consumo de mortero	Alto	Medio	Impacto en ejecución
Adherencia mortero - unidad	Requiere control	Mayor agarre	Diferencia en colocación
Sistema constructivo	Albañilería confinada	Albañilería confinada	No cambia el sistema
Procedimiento constructivo	Similar	Tradicional	Compatible
Integración estructural	Compatible	Compatible	Sin variación
Acabado final	Tarrajeado	Tarrajeado	Sin diferencia visual

Nota. Elaboración propia

La comparación constructiva evidencia que el uso del ladrillo Tipo F no modifica la lógica del sistema de albañilería confinada, manteniendo compatibilidad con los procesos constructivos tradicionales.

No obstante, introduce variaciones en la modulación, el consumo de unidades y la cantidad de mortero requerido, debido principalmente a sus características geométricas y al tamaño de sus cavidades.

Estas diferencias implican una mayor exigencia en el control de ejecución en obra, sin afectar la funcionalidad estructural del sistema, lo que permite considerar al ladrillo propuesto como una alternativa viable dentro de los sistemas constructivos convencionales.

4.6.5 Evaluación estructural del módulo de vivienda

4.6.5.1 Chequeo de densidad de muros portantes

Para realizar el chequeo se aplica la siguiente fórmula:

$$\frac{\sum(L * t)}{A_p} \geq \frac{Z * U * S * N}{56}$$

Donde:

L: Longitud de muro efectivo

t: Espesor de muro efectivo

A_p: Área de planta

Z: Factor de zona

U: Factor de uso

S: Factor de suelo

N: Número de pisos

Figura 132.

Zonas sísmicas



Nota. Adaptado de Norma E. 030

Tabla 169.*Categoría de las edificaciones y factor de uso*

Categoría	Descripción	Factor U
B Edificaciones importantes	Edificaciones donde se reúnen gran cantidad de personas tales como cines, teatros, estadios, coliseos, centros comerciales, terminales de pasajeros, establecimientos penitenciarios, o que guardan patrimonios valiosos como museos y bibliotecas. También se considerarán depósitos de granos y otros almacenes importantes para el abastecimiento.	1.3
C Edificaciones comunes	Edificaciones comunes tales como: viviendas, oficinas, hoteles, restaurantes, depósitos e instalaciones industriales cuya falla no acarree peligrosos adicionales de incendios o fugas de contaminantes.	1.0
D Edificaciones temporales	Construcciones provisionales para depósitos, casetas y otras similares.	Ver nota 2

Nota. Adaptado de Norma E. 030

Tabla 170.*Factor de suelo*

Zona / Suelo	S_0	S_1	S_2	S_3
Z_4	0.80	1.00	1.05	1.10
Z_3	0.80	1.00	1.15	1.20
Z_2	0.80	1.00	1.20	1.40
Z_1	0.80	1.00	1.60	2.00

Nota. Adaptado de Norma E. 030

El distrito de Sachaca, provincia de Arequipa pertenece a la Zona Sísmica 3, según la Norma E. 030, entonces el factor de zona es 0.35.

Y según el Instituto Geofísico del Perú (2013), la Urbanización El Palacio II tiene un perfil de suelo semirígido, lo que corresponde a S_2 , entonces el factor de suelo es 1.15 según la Tabla 169.

La vivienda corresponde a edificaciones comunes según la Tabla 170, por lo que el Factor de Uso es 1.0.

El espesor efectivo de estos muros portantes es 0.14 m pero según la Norma E.070 el mínimo espesor efectivo de muro se calcula con la siguiente fórmula:

$$t \geq \frac{h}{20}$$

Donde h es la altura libre entre arriostres horizontales, en este caso la altura de piso a techo es 2.25 m. Por lo que:

$$t \geq \frac{2.25}{20}$$

$$t \geq 0.1125$$

Entonces sí cumple con el mínimo.

Resumiendo, se tiene lo siguiente:

t: 0.14 m

Z: 0.35

U: 1.0

S: 1.15

En el primer nivel existe 83.50 m² de área techada, mientras que en el segundo nivel es 77.82 m².

Tabla 171.*Densidad de muros en el eje X, primer nivel*

Muro	Longitud L (m)	Espesor t (m)	Área de corte Lt (m2)
X1	1.27	0.14	0.18
X2	1.29	0.14	0.18
X3	2.31	0.14	0.32
X4	1.41	0.14	0.20
X5	2.76	0.14	0.39
X6	1.24	0.14	0.17
X7	1.89	0.14	0.26
X8	2.49	0.14	0.35
X9	1.29	0.14	0.18
X10	1.24	0.14	0.17
X11	2.49	0.14	0.35
X12	3.86	0.14	0.54
X13	4.16	0.14	0.58
$\Sigma(Lt)$			3.88
$\Sigma(Lt)/Ap$			0.05%

Nota. Elaboración propia

Conociendo la sumatoria del área de corte de los muros portantes en el eje X del primer nivel, se divide entre su área techada. Y se aplica la fórmula antes mencionada.

$$\frac{\Sigma(L * t)}{Ap} \geq \frac{Z * U * S * N}{56}$$

$$0.05\% \geq \frac{0.35 * 1 * 1.15 * 2}{56}$$

$$0.05\% \geq 0.01\% \quad \text{Sí cumple}$$

Tabla 172.

Densidad de muros en el eje Y, primer nivel

Muro	Longitud L (m)	Espesor t (m)	Área de corte Lt (m2)
Y1	1.2	0.14	0.17
Y2	1.41	0.14	0.20
Y3	2.36	0.14	0.33
Y4	1.69	0.14	0.24
Y5	1.34	0.14	0.19
Y6	1.24	0.14	0.17
Y7	1.64	0.14	0.23
Y8	1.24	0.14	0.17
Y9	2.34	0.14	0.33
Y10	1.24	0.14	0.17
		$\Sigma(Lt)$	2.20
		$\Sigma(Lt)/Ap$	0.03%

Nota. Elaboración propia

Conociendo la sumatoria del área de corte de los muros portantes en el eje Y del primer nivel, se divide entre su área techada. Y se aplica la fórmula antes mencionada.

$$\frac{\Sigma(L * t)}{Ap} \geq \frac{Z * U * S * N}{56}$$

$$0.03\% \geq \frac{0.35 * 1 * 1.15 * 2}{56}$$

$$0.03\% \geq 0.01\% \quad \text{Sí cumple}$$

Tabla 173.

Densidad de muros en el eje X, segundo nivel

Muro	Longitud L (m)	Espesor t (m)	Área de corte Lt (m2)
X14	1.29	0.14	0.18
X15	2.31	0.14	0.32
X16	1.41	0.14	0.20
X17	1.89	0.14	0.26
X18	2.49	0.14	0.35
X19	1.29	0.14	0.18
X20	1.24	0.14	0.17
X21	2.49	0.14	0.35
X22	3.86	0.14	0.54
X23	4.16	0.14	0.58
$\Sigma(Lt)$			3.14
$\Sigma(Lt)/Ap$			0.04%

Nota. Elaboración propia

Conociendo la sumatoria del área de corte de los muros portantes en el eje X del segundo nivel, se divide entre su área techada. Y se aplica la fórmula antes mencionada.

$$\frac{\Sigma(L * t)}{Ap} \geq \frac{Z * U * S * N}{56}$$

$$0.04\% \geq \frac{0.35 * 1 * 1.15 * 2}{56}$$

$$0.04\% \geq 0.01\% \quad \text{Sí cumple}$$

Tabla 174.*Densidad de muros en el eje Y, segundo nivel*

Muro	Longitud L (m)	Espesor t (m)	Área de corte Lt (m2)
Y11	2.36	0.14	0.33
Y12	1.69	0.14	0.24
Y13	1.34	0.14	0.19
Y14	1.24	0.14	0.17
Y15	1.64	0.14	0.23
Y16	1.24	0.14	0.17
Y17	2.34	0.14	0.33
Y18	1.24	0.14	0.17
$\Sigma(Lt)$			1.83
$\Sigma(Lt)/Ap$			0.02%

Nota. Elaboración propia

Conociendo la sumatoria del área de corte de los muros portantes en el eje Y del segundo nivel, se divide entre su área techada. Y se aplica la fórmula antes mencionada.

$$\frac{\Sigma(L * t)}{Ap} \geq \frac{Z * U * S * N}{56}$$

$$0.02\% \geq \frac{0.35 * 1 * 1.15 * 2}{56}$$

$$0.02\% \geq 0.01\% \quad \text{Sí cumple}$$

Entonces se comprueba que el predimensionamiento de los muros portantes tienen la densidad superior al mínimo para la zona en la que se encuentra ubicado el terreno en cuestión.

4.6.5.1.1 Conclusión del chequeo de densidad

El predimensionamiento de muros portantes supera la densidad mínima exigida por la Norma E.070 para la Zona Sísmica 3. Se considera adecuada la disposición propuesta de muros portantes para la edificación de 2 niveles.

4.6.5.2 Análisis del peso estructural de muros portantes

El peso total de la edificación se determinó a partir del peso unitario de los ladrillos, obtenido en la fase de caracterización, y de la cantidad total de unidades requeridas en los muros portantes, calculada anteriormente (6 417 unidades sin desperdicio).

El ladrillo Tipo F presenta un peso de 5.492 kg por unidad, mientras que el ladrillo King Kong tiene un peso de 3.765 kg por unidad. A partir de estos valores, se obtiene el peso total de la albañilería estructural para cada sistema, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 175.

Comparación del peso estructural del sistema de muros portantes

Concepto	Ladrillo Tipo F	Ladrillo King Kong	Observación
Peso por ladrillo (kg)	5.492	3.765	Mayor peso unitario en el ladrillo Tipo F
Peso total en vivienda (kg)	35 242.164	22 254.915	Incremento de 12987.249 kg (58.36%)

Nota. Elaboración propia

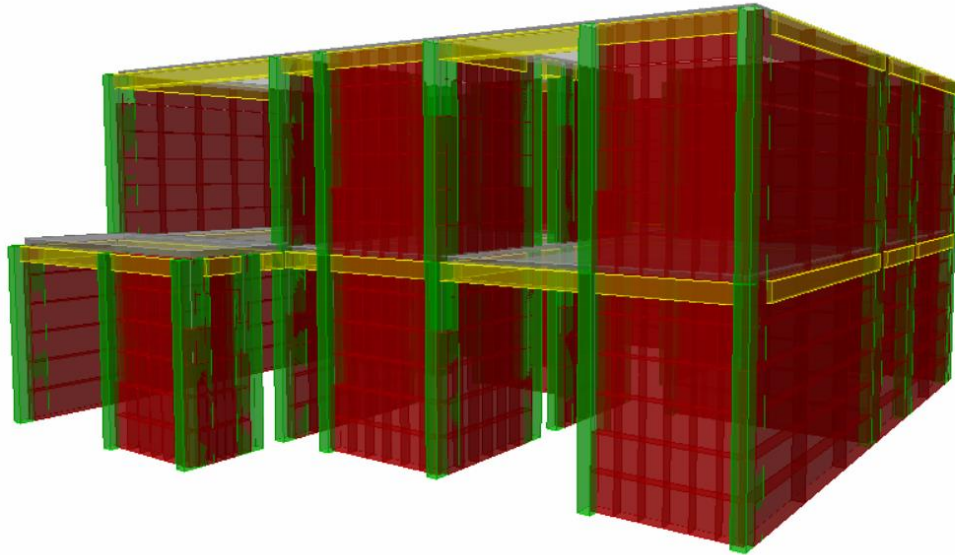
4.6.5.3 Modelamiento estructural

El modelamiento se realizó con ETABS:

- Muros definidos como elementos tipo shell (masonry)
- Elementos de confinamiento (columnas y vigas) modelados con elementos frame de hormigón armado.
- Las losas se consideraron aligeradas y se modelaron según su diagrama de rigidez equivalente.

Figura 133.

Modelamiento en ETABS



Nota. Elaboración propia

4.6.5.3.1 *Materiales*

La relación de materiales dispuesto a todo el análisis sísmico en albañilería confinada.

Tabla 176.

Materiales utilizados en el análisis

Material	Tipo	Propiedad / Resistencia
Albañilería	Masonry	130 kgf/cm ²
Concreto	Concrete	210 kgf/cm ²

Nota. Elaboración propia

4.6.5.3.2 Elementos

Relación de secciones transversales dispuestas para el análisis sísmico

Tabla 177.

Secciones de materiales utilizados en el análisis

Nombre	Material
Columna 40x15	Concreto 210
Viga 20x25	Concreto 210

Nota. Elaboración propia

4.6.5.3.3 Acciones y combinaciones

Se consideraron las siguientes acciones para el análisis:

- Peso propio (D)
- Cargas muertas complementarias (CM)
- Cargas vivas (LL)
- Acciones sísmicas estáticas
- Espectrales en direcciones X e Y conforme a la Norma E.030 (Q).
- Adicionalmente se definieron combinaciones para comprobación en servicio y diseño último.

4.6.5.4 Análisis de resistencia al sismo

Conforme indica la Norma E-030 para el caso de viviendas multifamiliares que no sobrepasen los 45m y de acuerdo al sistema estructural se tiene que, para calcular la fuerza sísmica, se aplica la fórmula (análisis estático):

$$V = \frac{ZUCS}{R} \cdot P$$

Donde:

Z = Factor de Zona.

U = Coeficiente según tipo de edificación

C = Factor de amplificación sísmica

Tp = Periodo Predominante del terreno.

Tl = Periodo en la zona de desplazamientos espectrales constantes.

S = Factor de tipo de suelo

R = Coeficiente de reducción

P = Peso de la Edificación (Carga muerta más el porcentaje de carga viva).

4.6.5.4.1 *Sistemas de muros estructurales de albañilería (dirección X)*

Z = 0.35 (Zona 3)

U = 1.0 (Categoría C)

$C = 2.5 * T_p / T \leq 2.5$

Tp = 0.60 segundos

Tl = 2.00 segundos

S = 1.05 (de acuerdo al tipo de suelo)

Ro = 6.00 (Sistema de muros estructurales)

4.6.5.4.2 *Sistemas de muros estructurales de albañilería (dirección Y)*

Z = 0.35 (Zona 3)

U = 1.0 (Categoría C)

$C = 2.5 * T_p / T \leq 2.5$

Tp = 0.60 segundos

Tl = 2.00 segundos

S = 1.05 (de acuerdo al tipo de suelo)

Ro = 6.00 (Sistema de muros estructurales).

Debido a que la edificación no presenta irregularidades no se consideraron factores de reducción de resistencia.

Asimismo, según la norma E-030 para diseño sismorresistente se recomienda limitar los desplazamientos de entrepiso según los siguientes valores:

- Elementos de Albañilería: 0.005

En el presente proyecto se realizó un análisis dinámico espectral el cual considera la norma Técnica peruana E-030.

Tal como lo establece la Norma E-030 se verifico que el cortante en la base de la estructura sea como mínimo el 80% del cortante que se obtendría en el análisis estático para estructuras regulares y como mínimo el 90% para estructuras irregulares.

Para este caso los desplazamientos de entrepiso en el sentido X y en el sentido Y son:

Tabla 178.

Desplazamientos y derivas de entrepiso obtenidos del análisis dinámico espectral

Story	Item	Load	DriftX	DriftY	DriftX Inelast	DriftY Inelast
STORY2	Diaph D2 X	DINXX	0.00008		0.00034	
STORY2	Diaph D2 Y	DINYY		0.00014		0.00063
STORY1	Diaph D1 X	DINXX	0.00007		0.00032	
STORY1	Diaph D1 Y	DINYY		0.00013		0.00059

Nota. Elaboración propia

La distorsión máxima 0.00008 en la dirección X-X, que multiplicados por $R=6$ y 0.75 según reglamento se obtiene una distorsión de 0.00034, siendo menor a lo permisible de 0.005.

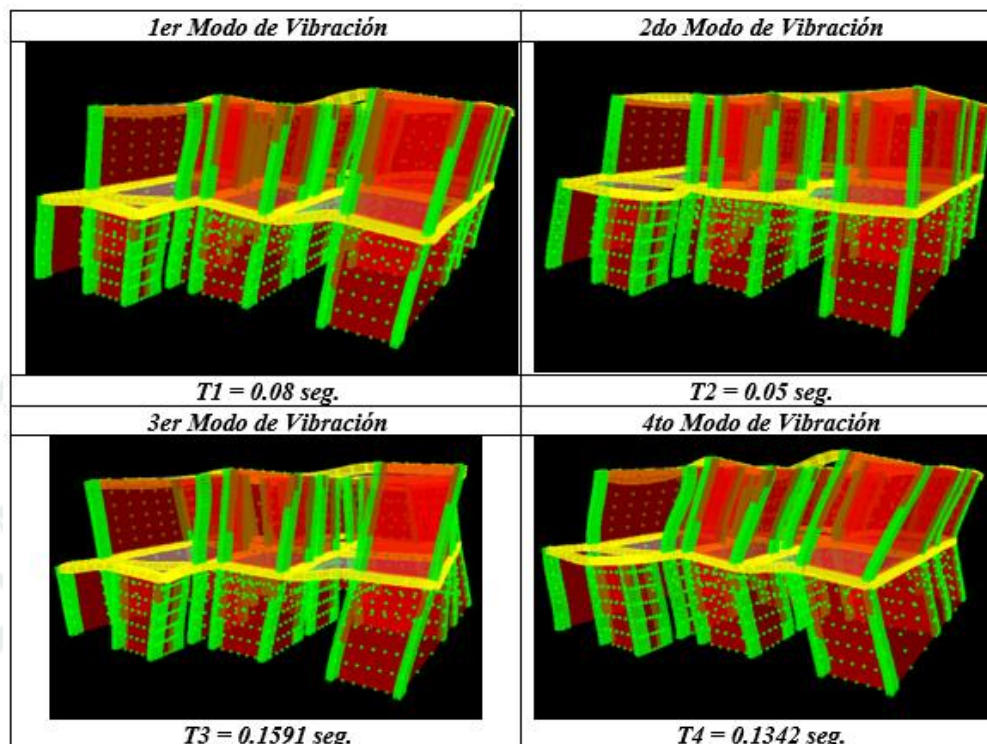
La distorsión máxima 0.00014 en la dirección Y-Y, que multiplicados por $R=6$ y 0.75 según reglamento se obtiene una distorsión de 0.00063, siendo menor a lo permisible de 0.005.

4.6.5.4.3 *Análisis dinámico de la estructura*

Para el análisis sísmico de la estructura, primeramente, se desarrolló un análisis modal considerando 03 grados de libertad por cada nivel de la estructura; a continuación, se presenta los 04 primeros modos de vibración de la estructura y sus periodos asociados.

Figura 134.

Modos de vibración



Nota. Elaboración propia

4.6.5.4.4 Verificación de fisuras por sismo moderado

La verificación normativa establece: $V_e \leq 0.55 V_m$.

Se verificó esta condición en cada entrepiso y en ambas direcciones para todos los muros analizados. A continuación, se presentan tablas resumen (valores extraídos del análisis en ETABS).

Tabla 179.*Verificación de fisuración – Primer nivel, Dirección X*

Muro	L (m)	t (m)	PG	Ve	a	Vm	0.55Vm	Estado
			(tn)	(Tn)		(Tn)	(Tn)	
MX1	8.68	0.14	16.77	6.935	0.33	53.074	29.191	OK
MX2	1.69	0.14	3.70	0.585	0.33	10.433	5.738	OK
MX3	1.64	0.14	4.69	0.711	0.33	10.378	5.708	OK
MX4	2.89	0.14	8.04	1.134	0.33	18.235	10.029	OK
MX5	2.59	0.14	8.51	0.947	0.33	16.643	9.154	OK
MX6	2.89	0.14	6.03	1.229	0.33	17.773	9.775	OK
MX7	1.60	0.14	2.43	0.615	0.33	9.630	5.296	OK
MX8	3.02	0.14	3.43	1.834	0.33	17.910	9.851	OK
MX9	7.00	0.14	0.14	12.72	0.33	44.884	24.686	OK

Nota. Elaboración propia

Tabla 180.*Verificación de fisuración – Primer nivel, Dirección Y*

Muro	L (m)	t (m)	PG (tn)	Ve (Tn)	a	Vm (Tn)	0.55Vm (Tn)	Estado
MY1	1.50	0.14	3.57	0.766	0.33	7.939	4.366	OK
MY2	2.60	0.14	8.85	2.576	0.33	16.778	9.228	OK
MY3	1.50	0.14	3.70	0.894	0.33	8.871	4.879	OK
MY4	1.60	0.14	4.01	0.953	0.33	9.586	5.272	OK
MY5	2.67	0.14	9.16	3.160	0.33	17.246	9.485	OK
MY6	1.90	0.14	3.39	1.422	0.33	11.554	6.355	OK
MY7	1.49	0.14	1.64	0.932	0.33	7.044	3.874	OK
MY8	2.62	0.14	3.39	3.534	0.33	15.635	8.599	OK
MY9	2.62	0.14	5.72	3.431	0.33	16.170	8.894	OK
MY10	1.95	0.14	2.51	0.775	0.33	11.633	6.398	OK

Nota. Elaboración propia

Observación: Todas las verificaciones de fisuración por sismo moderado se encuentran dentro de los límites establecidos, por lo que no se espera formación de fisuras diagonales significativas en los muros analizados bajo acción moderada.

4.6.5.4.5 Verificación de cortante en la base por sismo severo

Según la Norma E.070: $\Sigma V_{mi} \geq V_{Ei}$. A continuación, se presentan los resultados resumen obtenidos del análisis:

Tabla 181.

Verificación de cortante en la base por sismo severo en la primera planta, dirección X

ΣV_m (Tn)	198
Fuerza cortante Sismo severo VE (Tn)	50
Verificación: $198.961 \text{ Tn} \geq 50 \text{ Tn}$	→ Cumple
Nota. Elaboración propia	

Tabla 182.

Verificación de cortante en la base por sismo severo en la primera planta, dirección Y

ΣV_m (Tn)	122
Fuerza cortante Sismo severo VE (Tn)	10
Verificación: $122.454 \text{ Tn} \geq 10 \text{ Tn}$	→ Cumple
Nota. Elaboración propia	

4.6.5.5 Observaciones del modelamiento

El modelamiento del sistema estructural en ETABS muestra un comportamiento consistente con el sistema de albañilería confinada: los muros portantes absorben la mayor parte de la demanda sísmica, no se observan mecanismos de fallo global y las derivas laterales se mantienen dentro de límites aceptables.

4.6.5.6 Diseño estructural del sistema en albañilería confinada

4.6.5.6.1 *Diseño de vigas y columnas de confinamiento*

Se presentan a continuación cuadros resumen de comprobaciones de diseño para columnas de confinamiento y vigas de amarre. Los resultados indican cumplimiento de los estados límite últimos y de servicio para las combinaciones verificadas.

- Cálculo de áreas de acero
 - Cálculo de área de concreto en la columna de confinamiento
 - $A_c = 0.9V / \sqrt{f_c}$
 - $A_c = 521.12 \text{ cm}^2$
 - Cálculo de la longitud de la columna de confinamiento:
 - $L = 521.12 \text{ cm}^2 / 15 \text{ cm}$
 - $L = 34.74 \text{ cm}$
 - Adoptamos: $L = 40 \text{ cm}$
 - Cálculo del refuerzo vertical en la columna de confinamiento
 - $A_s = 1.4 V h / (f_y L)$
 - $A_s = 2.3297 \text{ cm}^2$
 - Cálculo de área de acero mínimo
 - $A_{s_min} = 0.1 f_c A_c / f_y$
 - $A_{s_min} = 2.4375 \text{ cm}^2$
 - Como $A_{s_min} > A_s$, se adopta el área de acero mínimo:
 - Usando $\varnothing 1/2"$: 4 $\varnothing 1/2"$
 - Cálculo de área de acero en la solera
 - $A_s = 1.4 V / f_y$
 - $A_s = 3.374 \text{ cm}^2$
 - Usando $\varnothing 1/2"$:
 - 4 $\varnothing 1/2" = 5.16 \text{ cm}^2$

4.6.5.7 Resultados y Conclusiones

- La disposición y espesor de muros portantes cumple y supera la densidad mínima exigida por Norma E.070 para Zona 3.
- Las verificaciones de fisuración por sismo moderado y de capacidad resistente por sismo severo se satisfacen en todas las comprobaciones realizadas.
- Columnas y vigas de confinamiento cumplen los estados límite analizados; las vigas muestran flechas menores al límite $L/480$.
- El sistema estructural propuesto es adecuado desde el punto de vista de resistencia y comportamiento sísmico para la vivienda de 2 niveles.

4.6.6 Evaluación económica del módulo de vivienda

4.6.6.1 Análisis de costos unitarios del asentado de muro

Con la finalidad de evaluar el impacto económico del uso del ladrillo propuesto en comparación con una unidad convencional, se desarrolló el análisis de costos unitarios para la partida de asentado de muros portantes en aparejo de soga, considerando tanto el ladrillo tipo F como el ladrillo King Kong de 18 huecos.

El análisis se realizó por metro cuadrado de muro, incorporando los recursos de mano de obra, materiales y equipo, en función de consumos reales y criterios constructivos empleados en obra.

Tabla 183.*Análisis de costo unitario del asentado de muro soga con ladrillo tipo F*

					Rendimiento:	7.5 m2/Día
					Costo unitario por m2	112.95
Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial	
MANO DE OBRA						58.34
CAPATAZ	hh	0.1000	0.10667	34.50000		3.68
OPERARIO	hh	1.0000	1.14286	29.57000		33.79
PEON	hh	0.9000	1.02857	20.29000		20.87
MATERIALES						52.86
CLAVOS	kg	-	0.02200	4.50000		0.10
ARENA GRUESA	m3	-	0.03200	75.00000		2.40
LADRILLO TIPO F	und	-	40.00000	1.00000		40.00
CEMENTO TIPO I	bls	-	0.27000	29.50000		7.97
AGUA	m3	-	0.06000	1.35000		0.08
MADERA TORNILLO	p2	-	0.42000	5.50000		2.31
EQUIPO						1.75
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo	-	3.00000	58.34400		1.75

Nota. Elaboración propia

Tabla 184.*Análisis de costo unitario del asentado de muro soga con ladrillo KK*

					Rendimiento:	9 m2/Día
					Costo unitario por m2:	96.01
Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial	
MANO DE OBRA						45.58
CAPATAZ	hh	0.1000	0.08889	34.50000		3.07
OPERARIO	hh	1.0000	0.88889	29.57000		26.28
PEON	hh	0.9000	0.80000	20.29000		16.23
MATERIALES						49.06
CLAVOS	kg	-	0.02200	4.50000		0.10
ARENA GRUESA	m3	-	0.03100	75.00000		2.33
LADRILLO KK	und	-	37.00000	1.00000		37.00
CEMENTO TIPO I	bls	-	0.24500	29.50000		7.23
AGUA	m3	-	0.07000	1.35000		0.09
MADERA TORNILLO	p2	-	0.42000	5.50000		2.31
EQUIPO						1.37
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo	-	3.00000	45.58311		1.37

Nota. Elaboración propia

Las cantidades de los recursos considerados en el análisis fueron determinadas en función del rendimiento de la mano de obra, el consumo de materiales por metro cuadrado y el uso de recursos auxiliares necesarios para la ejecución del muro.

En el caso de la mano de obra, los coeficientes fueron obtenidos a partir del rendimiento de ejecución, expresado en metros cuadrados por día, adoptándose un valor de 9 m²/día para el ladrillo King Kong y 7.5 m²/día para el ladrillo tipo F. Esta diferencia responde a las características físicas de las unidades, tales como su peso y altura, que influyen directamente en el tiempo de colocación y, por tanto, en el rendimiento del operario.

Respecto a los materiales, el consumo de unidades de albañilería por metro cuadrado fue calculado a partir de las dimensiones promedio obtenidas en los ensayos de variación dimensional, considerando un espesor de junta de mortero de 15 mm, resultando en 37 unidades/m² para el ladrillo King Kong y 40 unidades/m² para el ladrillo tipo F, considerando el 5% de desperdicio.

El mortero de asentado fue considerado con una dosificación 1:4 (cemento:arena), empleando cemento Portland Tipo I. En el análisis de costos unitarios, dicho mortero fue descompuesto en sus componentes básicos, determinándose las cantidades de cemento, arena y agua en función del volumen requerido por metro cuadrado de muro.

Asimismo, se incluyeron materiales auxiliares como clavos y madera tornillo, los cuales son utilizados en obra para la instalación de reglas, guías y alineamiento mediante el uso de hilos, siendo su consumo estimado mediante coeficientes empíricos por metro cuadrado debido a su reutilización parcial.

Finalmente, el uso de herramientas manuales fue considerado como un porcentaje de la mano de obra (3%), representando el desgaste, mantenimiento y reposición de herramientas menores necesarias para la ejecución de la partida, conforme a criterios convencionales de análisis de costos.

4.6.6.1.1 *Análisis comparativo*

Del análisis comparativo, se observa que el costo unitario del muro ejecutado con ladrillo tipo F asciende a 112.95 por m², mientras que el muro con ladrillo King Kong presenta un costo de 96.01 por m². Esta diferencia se debe principalmente al mayor consumo de unidades por metro cuadrado y al menor rendimiento de la mano de obra en el caso del ladrillo tipo F.

Asimismo, el costo de los materiales es significativamente mayor en el ladrillo tipo F, debido al precio unitario de la unidad y al incremento en la cantidad requerida. Por otro lado, los costos asociados a materiales auxiliares y herramientas no presentan variaciones relevantes entre ambos casos, dado que dependen de prácticas constructivas similares.

En ese sentido, si bien el ladrillo tipo F presenta un mayor costo inicial, su evaluación debe complementarse con el análisis de sus propiedades mecánicas, térmicas y ambientales, a fin de determinar su viabilidad integral como alternativa constructiva.

4.6.6.2 Presupuesto de construcción del módulo de vivienda

Con la finalidad de evaluar la viabilidad económica de la propuesta, se elaboró el presupuesto general de la vivienda unifamiliar de dos niveles, considerando un área construida de 161.32 m².

El presupuesto fue desarrollado a partir de los análisis de costos unitarios de cada una de las partidas constructivas, incorporando costos directos, gastos generales, utilidad e impuestos, de acuerdo con criterios convencionales de formulación de presupuestos en edificación.

En este escenario, se consideró el uso del ladrillo tipo F en los muros portantes, con el objetivo de analizar su impacto económico dentro del costo total del proyecto.

Tabla 185.

Presupuesto detallado de la construcción del módulo de vivienda unifamiliar propuesto empleando ladrillos tipo F

<i>Item</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidad</i>	<i>Metrado</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	<i>Subtotal</i>	<i>Total</i>
01	OBRAS PROVISIONALES, TRABAJOS PRELIMINARES Y MOVIMIENTO DE TIERRAS						17,797.81
01.01	OBRAS PROVISIONALES Y TRABAJOS PRELIMINARES					2,907.32	
01.01.01	LIMPIEZA DE TERRENO	M2	186.85	3.02	564.29		
01.01.02	TRAZO Y REPLANTEO	M2	186.85	3.52	657.71		
01.01.03	CARTEL DE OBRA	und	1.00	450.00	450.00		
01.01.04	INSTALACIONES PROVISIONALES	glb	1.00	1,235.32	1,235.32		
01.02	TRABAJOS DE MOVIMIENTO DE TIERRAS					14,890.49	
01.02.01	EXCAVACIÓN PARA ZAPATAS	M3	21.80	121.02	2,638.24		
01.02.02	EXCAVACIÓN PARA CIMIENTOS CORRIDOS	M3	28.50	121.02	3,449.07		
01.02.03	EXCAVACIÓN PARA PISCINA	M3	25.52	130.23	3,323.47		
01.02.04	ELIMINACIÓN DE MATERIAL EXCEDENTE	M3	40.23	84.96	3,417.94		
01.02.05	RELLENO Y COMPACTACIÓN CON MATERIAL PROPIO	M3	21.63	95.32	2,061.77		
02	CIMENTACIÓN						25,556.46
02.01	ZAPATAS					8,205.86	
02.01.01	CONCRETO PRE-MEZ. F' C 210KG/CM2	M3	16.12	332.52	5,360.22		
02.01.03	ACERO DE REFUERZO Fy=4200 kg/cm2	KG	451.59	5.58	2,519.87		
02.01.04	SOLADO DE CONCRETO POBRE	m2	24.83	13.12	325.77		
02.02	CIMIENTOS CORRIDOS					9,210.99	
02.02.01	CONCRETO PRE-MEZ. F' C 210KG/CM2	M3	21.96	332.52	7,302.14		
02.02.02	ACERO DE REFUERZO Fy=4200 kg/cm2	KG	312.48	5.58	1,743.64		
02.02.03	CURADO DE CONCRETO	M2	41.72	3.96	165.21		
02.03	PISCINA					8,139.61	
02.03.01	CONCRETO PRE-MEZ. F' C 210KG/CM2	M3	10.23	332.52	3,401.68		

02.03.02	ENCOFRADO Y DESENCOFRADO DE MUROS INTERIORES	m2	28.26	55.42	1,566.17
02.03.03	ACERO DE REFUERZO Fy=4200 kg/cm2	KG	548.36	5.58	3,059.85
02.03.04	CURADO DE CONCRETO	M2	28.26	3.96	111.91

03	ESTRUCTURAS				74,020.92
-----------	--------------------	--	--	--	------------------

03.01	MUROS Y TABIQUES				23,843.43
03.01.01	TABIQUES LADRILLO PANDERETA	M2	76.38	62.46	4,770.69
03.01.02	MURO PORTANTE LADRILLO TIPO F	M2	168.86	112.95	19,072.74
03.02	NIVEL 1				25,000.10
03.02.01	COLUMNAS				11,883.03
03.02.01.01	CONCRETO PRE-MEZ. F'C 350KG/CM2	M3	3.78	468.87	1,772.33
03.02.01.02	ENCOFRADO Y DESENCOFRADO DE COLUMNAS	m2	71.82	70.26	5,046.07
03.02.01.03	ACERO DE REFUERZO Fy=4200 kg/cm2	KG	831.60	5.30	4,407.48
03.02.01.04	CURADO DE CONCRETO	M2	71.82	9.15	657.15
03.02.02	LOSA ALIGERADA				7,327.80
03.02.02.01	CONCRETO PRE-MEZ. F'C 280KG/CM2	M3	5.73	369.62	2,117.92
03.02.02.02	ACERO DE REFUERZO Fy=4200 kg/cm2	KG	381.90	5.30	2,024.07
03.02.02.03	ENCOFRADO DE LOSA ALIGERADA	M2	76.38	6.13	468.21
03.02.02.04	CURADO DE CONCRETO	M2	76.38	9.15	698.88
03.02.02.05	APUNTALAMIENTO DE LOSA	M2	76.38	26.43	2,018.72
03.02.03	VIGAS				5,789.26
03.02.03.01	CONCRETO PRE-MEZ. F'C 280KG/CM2	M3	3.17	369.62	1,171.70
03.02.03.02	ENCOFRADO Y DESENCOFRADO DE VIGAS	m2	16.11	89.77	1,446.19
03.02.03.03	ACERO DE REFUERZO Fy=4200 kg/cm2	KG	570.56	5.30	3,023.97
03.02.03.04	CURADO DE CONCRETO	M2	16.11	9.15	147.41
03.03	NIVEL 2				25,177.39
03.03.01	COLUMNAS				11,883.03
03.03.01.01	CONCRETO PRE-MEZ. F'C 350KG/CM2	M3	3.78	468.87	1,772.33
03.03.01.02	ENCOFRADO Y DESENCOFRADO DE COLUMNAS	m2	71.82	70.26	5,046.07
03.03.01.03	ACERO DE REFUERZO Fy=4200 kg/cm2	KG	831.60	5.30	4,407.48
03.03.01.04	CURADO DE CONCRETO	M2	71.82	9.15	657.15
03.03.02	LOSA ALIGERADA				7,601.87
03.03.02.01	CONCRETO PRE-MEZ. F'C 280KG/CM2	M3	5.94	369.62	2,195.54

03.03.02.02	ACERO DE REFUERZO Fy=4200 kg/cm2	KG	396.30	5.30	2,100.39	
03.03.02.03	ENCOFRADO DE LOSA ALIGERADA	M2	79.26	6.13	485.86	
03.03.02.04	CURADO DE CONCRETO	M2	79.26	9.15	725.23	
03.03.02.05	APUNTALAMIENTO DE LOSA	M2	79.26	26.43	2,094.84	
03.03.03	VIGAS					5,692.49
03.03.03.01	CONCRETO PRE-MEZ. F'C 280KG/CM2	M3	3.17	369.62	1,171.70	
03.03.03.02	ENCOFRADO Y DESENCOFRADO DE VIGAS	m2	16.11	89.77	1,446.19	
03.03.03.03	ACERO DE REFUERZO Fy=4200 kg/cm2	KG	552.30	5.30	2,927.19	
03.03.03.04	CURADO DE CONCRETO	M2	16.11	9.15	147.41	
04	ARQUITECTURA					103,084.47
04.01	BASE DE PISOS					9,537.45
04..01.01	FALSO PISO DE CONCRETO f'c=140 kg/cm² e=7 cm	M2	118.36	55.22	6,535.84	
04..01.02	CONTRAPISO MORTERO C:A 1:5 e=4 cm	M2	118.36	25.36	3,001.61	
04.02	REVOQUES Y ENLUCIDOS					11,661.56
04.02.01	SOLAQUEADO DE CIELORRASO	M2	155.64	22.01	3,425.64	
04.02.02	SOLAQUEADO DE MUROS INTERIORES	M2	178.56	22.01	3,930.11	
04.02.03	SOLAQUEADO DE MUROS EXTERIORES	M2	195.63	22.01	4,305.82	
04.03	PINTURA					7,002.26
04.03.01	PINTURA LATEX EN CIELORRASO	m2	155.64	16.49	2,566.50	
04.03.02	PINTURA LATEX EN MUROS EXTERIOR	M2	198.63	11.76	2,335.89	
04.03.03	PINTURA LATEX EN MUROS INTERIORES	M2	178.56	11.76	2,099.87	
04.04	PORCELANATO BAÑOS, COCINAS Y LAVANDERÍA					3,409.28
04.04.01	PISO DE PORCELANATO	M2	25.53	133.54	3,409.28	
04.05	PORCELANATO INTERIORES Y EXTERIORES					19,110.91
04.05.01	PISO DE PORCELANATO	M2	143.11	133.54	19,110.91	
04.06	ZOCALOS DE BAÑOS, COCINA Y LAVANDERIA					7,153.21
04.06.01	INSTALACION DE ZOCALOS	M2	155.64	45.96	7,153.21	
04.07	CONTRAZOCALOS					2,607.46
04.07.01	INSTALACION DE CONTRAZOCALOS	ML	73.12	35.66	2,607.46	
04.08	LAVATORIOS BAÑOS Y COCINA					2,316.93
04.08.01	LAVADERO DE ACERO INOXIDABLE LAVA COPAS UNA POZA	UND	3.00	307.03	921.09	
04.08.02	LAVADERO OVALIN+ GRIFERIA TREBOL	UND	4.00	348.96	1,395.84	
04.09	INODOROS					1,580.84

04.09.01	INODORO TOP PIECE	PZA	4.00	395.21	1,580.84	
04.10	DUCHAS					1,068.69
04.10.01	MEZCLADORA DE DUCHA TREBOL PESADA	UND	3.00	356.23	1,068.69	
04.11	BAÑERA					1,158.32
04.12.01	BAÑERA 1.75X0.80M + GRIFERÍA	UND	1.00	1,158.32	1,158.32	
04.13	MESADAS					5,224.07
04.13.01	MESADA GRANITO COCINA	ML	5.70	452.30	2,578.11	
04.13.02	MESADA GRANITO LAVANDERÍA	ML	1.55	452.30	701.07	
04.13.03	MESADA GRANITO BAÑOS	ML	4.30	452.30	1,944.89	
04.14	CARPINTERÍA					31,253.50
04.14.01	PUERTAS					13,770.00
04.14.01.01	PUERTAS P1 (MADERA CONTRAPLACADA TIPO CAJON) 1.20X2.15M	UND	1.00	900.00	900.00	
04.14.01.02	PUERTAS P2 (METALICA LEVADIZA)	UND	1.00	3,200.00	3,200.00	
04.14.01.03	PUERTAS P3 (MADERA CONTRAPLACADA TIPO CAJON VAIVEN) 0.90X2.25M	UND	1.00	650.00	650.00	
04.14.01.04	PUERTAS P4 (MADERA CONTRAPLACADA TIPO CAJON) 0.70X2.25M	UND	5.00	500.00	2,500.00	
04.14.01.05	PUERTAS P5 (MADERA CONTRAPLACADA TIPO CAJON) 0.90X2.25M	UND	6.00	520.00	3,120.00	
04.14.01.06	MAMPARA M1 (VIDRIO TEMPLADO 8MM CORREDIZA 2.00X2.25M)	UND	1.00	1,600.00	1,600.00	
04.14.01.07	PUERTA DE DUCHA (VIDRIO TEMPLADO 8MM CORREDIZA 1.50X2.25M)	UND	2.00	900.00	1,800.00	
04.14.02	VENTANAS					4,700.00
04.14.02.01	VENTANAS V1 (SERIE 25 PIVOTANTE 0.50X1.30M)	UND	3.00	350.00	1,050.00	
04.14.02.02	VENTANAS V2 (SERIE 25 PIVOTANTE 0.80X1.30M)	UND	3.00	450.00	1,350.00	
04.14.02.03	VENTANAS V3 (SERIE 25 PIVOTANTE 0.80X2.25M)	UND	1.00	650.00	650.00	
04.14.02.04	VENTANAS V4 (SERIE 25 PIVOTANTE 2.00X2.25M)	UND	1.00	950.00	950.00	
04.14.02.05	VENTANAS V5 (SERIE 25 PIVOTANTE 0.50X2.25M)	UND	2.00	350.00	700.00	
04.14.03	MUEBLES					9,092.50
04.14.03.01	MUEBLES BAJOS COCINA (MELAMINE 18MM CON CAJONES)	ML	6.30	550.00	3,465.00	
04.14.03.02	MUEBLES ALTOS COCINA (MELAMINE 18MM CON PUERTAS PUSH)	ML	7.25	450.00	3,262.50	
04.14.03.03	MUEBLE DE LAVATORIO (MELAMINE 18MM CON CAJONES)	ML	4.30	550.00	2,365.00	
04.14.04	ESCALERA					3,691.00
04.14.04.01	ESCALERA	UND	1.00	2,800.00	2,800.00	
04.14.04.02	BARANDAS DE ESCALERA	ML	4.95	180.00	891.00	

05.01	ALIMENTADORES ELECTRICOS					7,650.42
05.01.01	CABLE 2x2.5 mm2 TW - LSOH-80	M	318.55	12.11	3,857.64	
05.01.02	CABLE 3X2.5 mm2 TW - LSOH-80	M	190.33	14.23	2,708.40	
05.01.03	CABLE 4X4mm2 TW - LSOH-80	M	60.21	18.01	1,084.38	
05.02	TUBERÍAS					4,416.67
05.02.01	TUBERIA PVC-P 20mm	M	418.18	8.05	3,366.35	
05.02.02	TUBERIA PVC-P 25mm	M	70.44	10.56	743.85	
05.02.03	TUBERIA PVC-P 50mm	M	15.06	20.35	306.47	
05.03	CAJAS DE F.G.					1,987.55
05.03.01	CAJA RECTANGULAR GALVANIZADA	UND	73.00	12.03	878.19	
05.03.02	CAJA OCTOGONAL GALVANIZADA	UND	56.00	14.78	827.68	
05.03.03	CAJA DE PASE F°G° 150x150x75 mm	UND	4.00	70.42	281.68	
05.04	TABLEROS ELECTRICOS					601.01
05.04.01	TABLERO DE DISTRIBUCION PISO 1	PZA	1.00	601.01	601.01	
05.04.02	TABLERO DE DISTRIBUCION PISO 2	PZA	1.00	601.01	601.01	
05.05	CIRCUITOS DERIVADOS					5,054.86
05.05.01	SALIDA PARA INTERRUPTOR SIMPLE / DOBLE / CONMUTACION	pto	30.00	65.44	1,963.20	
05.05.02	SALIDA PARA TOMACORRIENTE HERMÉTICO	pto	4.00	90.22	360.88	
05.05.03	SALIDA TOMACORRIENTE C/T A TIERRA	pto	39.00	70.02	2,730.78	
05.06	ARTEFACTOS DE ILUMINACION					6,930.58
05.06.01	DICROICO LED EMPOTRADOS	UND	51.00	65.01	3,315.51	
05.06.02	LUMINARIA COLGANTE DECORATIVA	UND	5.00	180.55	902.75	
05.06.03	APLIQUE DE PARED PARA INTERIOR	UND	4.00	118.56	474.24	
05.06.04	APLIQUE DE PARED DECORATIVO EXTERIOR	UND	16.00	139.88	2,238.08	
05.07	SISTEMA DE PUESTA A TIERRA					2,497.83
05.07.01	CABLE DE CU DESNUDO 1x16 mm2	M	30.33	19.58	593.86	
05.07.02	CAJAS EQUIPOTENCIALES ATERRADAS	UND	1.00	280.22	280.22	
05.07.03	BARRAS EQUIPOTENCIALES	UND	1.00	219.19	219.19	
05.07.04	POZO DE TIERRA	UND	1.00	1,404.56	1,404.56	
06	INSTALACIONES SANITARIAS					29,344.30
06.01	RED DESAGUE					8,563.70
06.01.01	EXCAVACION DE ZANJAS	M3	5.00	49.19	245.95	

06.01.02	REFINE Y NIVELACION DE ZANJA	M	5.00	9.74	48.70	
06.01.03	RELLENO Y COMPACTACION DE ZANJAS A=0.50m H=0.65	M	5.00	11.52	57.60	
06.01.04	CAJA DE REGISTRO DE DESAGUE 30x60 INC. TAPA	PZA	2.00	270.57	541.14	
06.01.05	SUMINISTRO E INSTALACION DE TUBERIA PVC SAL ø 110 mm	M	74.92	102.38	7,670.31	
06.02	RED AGUA FRIA					6,529.54
06.02.01	SUMINISTRO E INSTALACION DE TUBERIA PVC SAL ø 20 mm AF	M	65.62	44.18	2,899.09	
06.02.02	SALIDA DE AGUA FRIA. - PVC 1/2"	PTO	17.00	93.69	1,592.73	
06.02.03	VALVULA COMPUERTA DE ø 1/2"	UND	5.00	110.03	550.15	
06.02.04	MEDIDOR DE AGUA	UND	1.00	255.54	255.54	
06.02.05	TANQUE ELEVADO + INSTALACIÓN	UND	1.00	1,232.03	1,232.03	
06.03	RED AGUA CALIENTE					6,676.76
06.03.01	SUMINISTRO E INSTALACION DE TUBERIA PVC SAL ø 20 mm AC	M	37.37	44.18	1,651.01	
06.03.02	SALIDA DE AGUA CALIENTE 1/2"	PTO	11.00	162.13	1,783.43	
06.03.03	TERMA SOLAR (150-200 L INC. INSTALACIÓN)	UND	1.00	2,500.00	2,500.00	
06.03.04	VALVULA CHECK + SEGURIDAD + PURGA	GLB	1.00	302.20	302.20	
06.03.05	VALVULA COMPUERTA DE ø 1/2"	UND	4.00	110.03	440.12	
06.04	INSTALACIONES DE DESAGUE					6,810.42
06.04.01	TUBERIA PVC-SAP DESAGUE ø 2" AEREA	UND	74.92	49.85	3,734.76	
06.04.02	SALIDA DE DESAGUE EN PVC- SAL 2"	PTO	13.00	131.42	1,708.46	
06.04.03	SALIDA DE DESAGUE EN PVC- SAL 4"	PTO	4.00	151.36	605.44	
06.04.04	REGISTRO DE BRONCE 4"	UND	4.00	74.73	298.92	
06.04.05	SUMIDERO DE BRONCE 2"	UND	6.00	77.14	462.84	
06.05	PRUEBAS Y ACCESORIOS					763.88
06.05.01	PRUEBA HIDRAULICA	GLB	1.00	505.06	505.06	
06.05.02	VALVULA FLOTADORA DE 3/4"	UND	2.00	129.41	258.82	
07	OBRAS EXTERIORES					15,188.73
07.01	JARDIN DE INGRESO Y POSTERIOR					2,565.19
07.01.01	HUELLAS DE CONCRETO INGRESO	M2	9.38	83.65	784.64	
07.01.02	PREPARACIÓN DE TERRENO CON TIERRA VEGETAL Y ABONO	M2	29.87	24.65	736.30	
07.01.03	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE GRASS NATURAL	M2	29.87	34.96	1,044.26	
07.02	PISCINA					12,623.54
07.02.01	TARRAJEO IMPERMEABLE PISCINA	M2	44.82	74.21	3,326.09	
07.02.02	RESVETIMIENTO DE PISCINA	M2	44.82	133.79	5,996.47	

07.02.03	BORDE PERIMETRAL DE PISCINA	ML	9.16	152.36	1,395.62
07.02.04	CTO DE BOMBAS + SISTEMA DE RECIRCULACIÓN (BOMBA+FILTRO)	GLB	1.00	1,905.36	1,905.36

08	OTROS				405.56
-----------	--------------	--	--	--	---------------

08.01	LIMPIEZA FINAL DE OBRA	GLB	1.00	405.56	405.56
-------	------------------------	-----	------	--------	--------

COSTO DIRECTO	294,537.16
----------------------	-------------------

GASTOS GENERALES	12 %	35,344.46
-------------------------	------	-----------

UTILIDAD	10 %	29,453.72
-----------------	------	-----------

SUB TOTAL	359,335.34
------------------	-------------------

IGV.	18 %	64,680.36
-------------	------	-----------

PRESUPUESTO TOTAL	424,015.70
--------------------------	-------------------

Son : CUATROCIENTOS VEINTICUATRO MIL QUINCE 70/100 SOLES

Nota. Elaboración propia

Del presupuesto obtenido, se determina un costo total de S/ 424,015.70 para la ejecución de la vivienda unifamiliar, incluyendo costos directos, gastos generales, utilidad e IGV.

Se observa que las partidas con mayor incidencia corresponden a arquitectura, estructuras e instalaciones, las cuales concentran la mayor parte del costo total del proyecto, siendo consistentes con la naturaleza de una edificación de dos niveles y piscina.

4.6.6.2.1 *Análisis comparativo*

Con el propósito de evaluar el impacto específico del uso del ladrillo tipo F en los muros portantes, se realizó una comparación considerando el reemplazo de dicha partida por muros ejecutados con ladrillo King Kong, manteniendo constantes todas las demás partidas del presupuesto.

Como resultado, se obtuvo que el presupuesto total de la vivienda con ladrillo King Kong asciende a S/ 419,897.74, lo que representa una reducción de S/ 4,117.96 respecto al presupuesto con ladrillo tipo F.

Esta diferencia equivale aproximadamente a un 0.97% del costo total del proyecto, evidenciando que, si bien el ladrillo tipo F presenta un mayor costo unitario en la partida de muros portantes, su impacto en el presupuesto global de la vivienda es reducido.

En ese sentido, el incremento en el costo total no resulta determinante, por lo que la evaluación de la viabilidad del ladrillo tipo F debe considerar también sus beneficios en términos mecánicos, térmicos y ambientales, los cuales pueden compensar la ligera variación económica observada.

4.6.6.3 Conclusión

A partir de los resultados obtenidos, se presenta un resumen comparativo de los principales indicadores económicos evaluados para ambos tipos de unidad de albañilería.

Tabla 186.*Comparación económica entre ladrillo tipo F y KK aplicado al módulo de vivienda propuesto*

Parámetro	Ladrillo tipo F	Ladrillo KK	Diferencia
Rendimiento de mano de obra (m2/día)	7.50	9.00	-1.50
Consumo de unidades (und/m2)	40	37	+2
Costo unitario de asentado de muro (S/. por m2)	112.95	96.01	+16.94
Costo total de vivienda (S/.)	424,015.70	419,897.74	+4,117.96
Incidencia en el costo total (%)	-	-	+0.97%

Nota. Elaboración propia

Como se observa, el ladrillo tipo F presenta un mayor costo unitario en la ejecución de muros portantes, asociado a un menor rendimiento de la mano de obra y un mayor consumo de unidades por metro cuadrado. Sin embargo, al analizar su incidencia en el presupuesto total de la vivienda, se evidencia que la diferencia económica es reducida, representando únicamente un incremento del 0.97% respecto al sistema convencional.

En ese sentido, los resultados confirman que el uso del ladrillo tipo F no genera un impacto significativo en el costo global del proyecto, por lo que su implementación resulta económicamente viable. En consecuencia, su adopción debe evaluarse de manera integral, considerando también sus ventajas en términos mecánicos, térmicos y ambientales, las cuales pueden justificar plenamente su utilización en edificaciones de vivienda unifamiliar.

4.6.7 Evaluación del desempeño térmico y energético

4.6.7.1 Capacidad térmica y confort energético

La capacidad térmica de la albañilería estructural se determinó a partir de la capacidad térmica unitaria de los ladrillos, obtenida en fases anteriores, y de la cantidad total de unidades empleadas en los muros portantes (6 417 unidades con tipo F) (5911 unidades con convencional).

El ladrillo Tipo F presenta una capacidad térmica de 0.005420 MJ/K por unidad, mientras que el ladrillo King Kong presenta 0.003162 MJ/K por unidad. A partir de estos valores, se obtiene la capacidad térmica total de los muros portantes para cada sistema.

Tabla 187.

Comparación de la capacidad térmica con ladrillos tipo F y convencionales

Concepto	Ladrillo Tipo F	Ladrillo King Kong	Observación
Capacidad térmica por ladrillo (MJ/K)	0.005420	0.003162	Mayor capacidad térmica unitaria en el ladrillo Tipo F
Capacidad térmica total en muros (MJ/K)	34.78	18.69	Incremento de 16.09 MJ/K (86.09%)

Nota. Elaboración propia

El uso del ladrillo tipo F genera una capacidad térmica de 34.78 MJ/K, frente a los 18.69 MJ/K de los ladrillos convencionales. Esto representa un incremento del 86.09 %, equivalente a 16.09 MJ/K adicionales. La mayor capacidad térmica permite que los muros absorban y liberen energía de manera más gradual, mejorando el comportamiento pasivo de la vivienda, reduciendo la necesidad de climatización activa y aumentando la eficiencia energética y el confort térmico en el uso cotidiano.

4.6.7.2 Análisis energético del prototipo de vivienda

El análisis energético tuvo como propósito evaluar el comportamiento térmico global del prototipo de vivienda, considerando los materiales y componentes que conforman su envolvente exterior.

Para ello, se determinó el coeficiente global de pérdidas térmicas (H_{total}), que representa la cantidad de calor que se transfiere desde el interior hacia el exterior a través de los distintos elementos constructivos expuestos.

Este parámetro se calculó aplicando la siguiente expresión:

$$H_{total} = \sum (U_i \times A_i)$$

donde:

- U_i = coeficiente de transmitancia térmica del elemento ($W/m^2 \cdot K$),
- A_i = superficie expuesta al exterior (m^2).

4.6.7.2.1 Determinación del coeficiente U

El coeficiente de transmitancia térmica (U) indica la cantidad de calor que atraviesa un elemento constructivo por unidad de superficie y por grado de diferencia térmica entre ambos lados.

Matemáticamente, se define como el inverso de la resistencia térmica total (R_{total}):

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

donde la resistencia total se obtiene mediante:

$$R_{total} = R_{si} + \sum \frac{e}{\lambda} + R_{se}$$

siendo e el espesor (m) y λ la conductividad térmica ($W/m \cdot K$) de cada capa que compone el elemento.

En el presente estudio, los valores de U para los ladrillos experimentales y convencionales se obtuvieron de las simulaciones térmicas realizadas en ABAQUS, mientras

que los de los demás materiales se tomaron de referencias normativas (MVCS, 2015; ASHRAE, 2017; ISO 10077-1, 2017; INEN, 2017).

4.6.7.2.2 Ajuste y justificación de valores de transmitancia térmica (U)

Es importante precisar que los valores obtenidos en ABAQUS representan el comportamiento térmico del ladrillo en su estado puro, sin considerar los acabados superficiales presentes en la vivienda.

En la propuesta arquitectónica, todos los muros se encuentran tarrajeados por ambas caras con un espesor promedio de 1.5 cm y pintados, lo que aporta una resistencia térmica adicional.

Dicha resistencia se estimó a partir de la conductividad térmica típica del mortero cemento-arena ($\lambda = 1.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) y del espesor total del tarrajeo (0.03 m entre ambas caras), aplicando la relación $R = e/\lambda$, obteniéndose $0.03 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$.

Esto reduce la transmitancia térmica de los muros en aproximadamente 7 % a 10 % respecto al ladrillo sin acabado.

El techo del segundo nivel está conformado por una losa aligerada de concreto armado de 22 cm de espesor, con ladrillos de techo aligerantes, tarrajeo inferior y pintura, con un valor de $U = 1.70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (MVCS, 2015).

El piso del balcón cuenta con revestimiento cerámico superior y tarrajeo inferior, alcanzando $U = 1.65 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (INEN, 2017).

Las columnetas de confinamiento de concreto armado presentan $U = 2.30 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, valor promedio referencial del MVCS (2015).

Las ventanas de vidrio crudo de 6 mm con perfilería de aluminio serie 25 poseen $U = 5.80 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, mientras que las mamparas de vidrio templado de 8 mm alcanzan $U = 5.60 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, según la ISO 10077-1 (2017).

Finalmente, las puertas de madera contraplacada de 40 mm presentan $U = 2.20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, conforme al ASHRAE Handbook – Fundamentals (2017).

Estos valores fueron homogeneizados a condiciones estacionarias de 25°C , representando el comportamiento térmico de los materiales secos y terminados en obra.

Tabla 188.

Cálculo del coeficiente global de pérdidas térmicas (H_{total}) por elementos

Elemento constructivo	Material / Sistema	Área (m^2)	U ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)	H = U $\times$ A (W/K)	Fuente
Muros portantes (experimental F)	Ladrillo con caucho y perlita tarrajado	94.56	2.79	263.82	ABAQUS + MVCS (2015)
Muros portantes (convencional KK)	Ladrillo de arcilla/concreto tarrajado	94.56	1.99	188.17	ABAQUS + MVCS (2015)
Muros no portantes y perimetrales	Ladrillo convencional tarrajado	90.65	1.75	158.64	MVCS (2015)
Columnetas de confinamiento	Concreto armado tarrajado	26.08	2.30	59.98	MVCS (2015)
Techo (losa aligerada 22 cm)	Concreto armado con ladrillos de techo	71.54	1.70	121.62	MVCS (2015)
Piso balcón (porcelanato + tarrajeo)	Concreto armado	4.58	1.65	7.56	INEN (2017)
Ventanas (vidrio 6 mm serie 25)	Vidrio simple + aluminio	17.17	5.80	99.59	ISO 10077-1 (2017)
Mamparas (vidrio 8 mm serie 25)	Vidrio templado + aluminio	13.50	5.60	75.60	ISO 10077-1 (2017)
Puertas (madera contraplacada 40 mm)	Madera sólida	10.23	2.20	22.51	ASHRAE (2017)

Nota. Elaboración propia

Una vez determinados los valores parciales de transmitancia térmica (U) y las pérdidas térmicas individuales de cada componente de la envolvente, se procedió a sumar los aportes de cada elemento para obtener el coeficiente global de pérdidas térmicas (H_{total}) de la vivienda.

Este parámetro permite comparar de forma integral el desempeño térmico del prototipo construido con ladrillos experimentales tipo F frente al sistema de ladrillos convencionales tipo KK, bajo las mismas condiciones de área, orientación y materiales complementarios.

Tabla 189.*Resultados globales del coeficiente de pérdidas térmicas*

Sistema constructivo			H _{total} (W/K)	Diferencia (%)	Interpretación
Vivienda experimentales tipo F	con	ladrillos	809.3	+10.3 %	Mayor transferencia térmica global
Vivienda convencionales tipo KK	con	ladrillos	733.5	-	Menor transferencia térmica global

Nota. Elaboración propia

4.6.7.2.3 Interpretación y análisis comparativo

Los resultados evidencian que el prototipo construido con ladrillos experimentales tipo F presenta un coeficiente global de pérdidas térmicas (H_{total}) ligeramente mayor que el sistema convencional, lo que indica una mayor transferencia de calor hacia el exterior en condiciones estacionarias.

Esto se debe principalmente a la menor resistencia térmica ($R = 0.3584 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$) de los ladrillos F frente a los convencionales ($R = 0.5025 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$), vinculada a su geometría más maciza y baja succión superficial por la adición de caucho reciclado y perlita expandida.

No obstante, la simulación en ABAQUS demostró que los ladrillos F poseen una mayor capacidad térmica, lo que se traduce en mayor inercia térmica y una amortiguación más estable de las variaciones diurnas de temperatura.

En el contexto climático de Sachaca–Arequipa, caracterizado por altas amplitudes térmicas diarias, este comportamiento contribuye a mejorar el confort interior durante la noche y a reducir la demanda de calefacción.

Por tanto, aunque el ladrillo F presenta una transmitancia más alta, su capacidad de almacenamiento de calor le otorga un potencial de mejora en edificaciones bioclimáticas.

Como proyección técnica, se recomienda optimizar la geometría del ladrillo, incrementando su porcentaje de vacíos a un rango mayor al 11 % actual, pero menor al 30 %, de modo que continúe clasificándose como ladrillo sólido según la Norma E.070.

Esta modificación permitiría aumentar la resistencia térmica del elemento sin comprometer su resistencia estructural, mejorando el equilibrio entre eficiencia energética y capacidad portante.

Tabla 190.

Comparación del comportamiento térmico con ladrillos tipo F y convencionales

Concepto	Ladrillo Tipo F	Ladrillo King Kong	Observación
Coefficiente H_{total}	Mayor (809.3 W/K)	Menor (733.5 W/K)	Mayor transferencia de calor en el sistema Tipo F
Resistencia térmica (R)	Menor (0.3584 $m^2 \cdot K/W$)	Mayor (0.5025 $m^2 \cdot K/W$)	Menor capacidad de aislamiento en Tipo F
Transmitancia térmica (U)	Mayor	Menor	Incremento de pérdidas térmicas en muros Tipo F
Capacidad térmica	Mayor	Menor	Mayor almacenamiento de calor en Tipo F
Inercia térmica	Alta	Media	Mejor estabilidad térmica interior en Tipo F
Comportamiento en clima de Arequipa	Favorable	Moderado	Mejor desempeño en condiciones de alta amplitud térmica
Implicancia bioclimática	Positiva	Convencional	Potencial de mejora del confort térmico
Recomendación técnica	Optimizar vacíos (11%–30%)	-	Mejorar aislamiento sin perder resistencia

Nota. Elaboración propia

El ladrillo Tipo F no mejora el aislamiento térmico del sistema, ya que presenta una mayor transmitancia y menores valores de resistencia térmica en comparación con el ladrillo convencional. Sin embargo, sí mejora el comportamiento térmico dinámico, debido a su mayor

capacidad de almacenamiento de calor, lo que permite amortiguar las variaciones de temperatura a lo largo del día y generar condiciones interiores más estables.

4.6.8 Evaluación ambiental

4.6.8.1 Emisiones de CO₂ en muros portantes

Las emisiones de CO₂ de la albañilería estructural se determinaron a partir de las emisiones unitarias por ladrillo, obtenidas en la fase de caracterización, y de la cantidad total de unidades empleadas en los muros portantes (6 755 unidades).

El ladrillo Tipo F presenta una emisión de 1.050 kg de CO₂ por unidad, mientras que el ladrillo King Kong presenta 1.780 kg de CO₂ por unidad. A partir de estos valores, se obtiene la emisión total de CO₂ para cada sistema.

Tabla 191.

Comparación de emisiones de CO₂ de ladrillos tipo F y convencionales

Concepto	Ladrillo Tipo F	Ladrillo King Kong	Observación
CO ₂ por ladrillo (kg)	1.050	1.780	Menor emisión unitaria en el ladrillo Tipo F
CO ₂ total en muros (kg)	7,092.75	11,121.44	Reducción de 4 028.69 kg (36.22%)

Nota. Elaboración propia

El uso del ladrillo Tipo F permite reducir en un 36.22% las emisiones de CO₂ asociadas a la albañilería estructural en comparación con el sistema convencional. Esta disminución se relaciona con la incorporación de material reciclado (caucho de neumáticos), lo que contribuye a un menor impacto ambiental y a la valorización de residuos sólidos.

4.6.8.2 Valorización de NFU

En el caso del ladrillo Tipo F, cada unidad incorpora 0.2842 kg de caucho granulado, equivalente a 0.474 kg de neumáticos fuera de uso (NFU).

De acuerdo con el Ministerio del Ambiente (2014), en la ciudad de Arequipa se generan aproximadamente 2 651.06 toneladas anuales de NFU. En este contexto, la vivienda en estudio permite la valorización de 3.202 toneladas de estos residuos, lo que representa aproximadamente el 0.12% del total anual generado.

A mayor escala, la aplicación del sistema en 100 viviendas permitiría valorizar alrededor de 320.2 toneladas de NFU, equivalentes al 12% de la generación anual en la ciudad.

Tabla 192.

Comparación de la valorización de NFU con ladrillos tipo F y convencionales

Concepto	Ladrillo Tipo F	Ladrillo King Kong	Observación
NFU por ladrillo (kg)	0.474	0.000	Incorporación de material reciclado en el ladrillo Tipo F
NFU total en muros (kg)	3,201.87	0.000	Valorización de 3.202 t de NFU por vivienda
Participación respecto a generación anual (%)	0.12%	0.000%	Aporte a la reducción de residuos en la ciudad
Proyección en 100 viviendas (t)	320.2	0.000	Impacto significativo a escala urbana

Nota. Elaboración propia

Estos resultados evidencian que el uso del ladrillo Tipo F no solo contribuye a la reducción de emisiones de CO₂ y al mejor desempeño térmico de la vivienda, sino que también constituye una estrategia efectiva de gestión sostenible de residuos sólidos, al reincorporar neumáticos fuera de uso en el ciclo constructivo.

4.6.9 Evaluación integral de la aplicación del ladrillo tipo F en el módulo de vivienda

Con el fin de evaluar de manera integral el desempeño del ladrillo tipo F frente al sistema convencional, se formularon indicadores económicos, térmicos, ambientales y técnico-constructivos.

Estos indicadores fueron obtenidos a partir de los resultados previamente desarrollados en el presente capítulo, incluyendo el presupuesto de obra, el análisis térmico, la cuantificación de emisiones de CO₂ y la caracterización de materiales. Asimismo, se incorporaron relaciones e índices derivados que permiten comparar de manera objetiva ambas alternativas constructivas.

En la siguiente tabla se presenta la síntesis de los principales indicadores calculados, junto con su respectiva interpretación técnica.

Tabla 193.

Indicadores integrales de desempeño del ladrillo tipo F frente al ladrillo convencional

Categoría	Indicador	Ladrillo Tipo F	Ladrillo KK	Diferencia	Interpretación
Económico	Costo total de vivienda (S/.)	424,015.70	419,897.74	+4,117.96	Incremento económico marginal, no determinante en el costo global del proyecto. (0.97%)
	Costo por m ² (S./m ²)	2,628.41	2,602.89	+25.53	Diferencia mínima por unidad de área construida.
	Incidencia del muro portante en el presupuesto (%)	1.62%	1.39% aprox.	Baja	El costo del sistema de muros tiene baja influencia en el presupuesto total.
	Costo por ladrillo colocado (S./und)	2.82	2.59	+0.23	Mayor costo asociado a menor rendimiento y mayor consumo de unidades.
	Rendimiento de mano de obra (m ² /día)	7.50	9.00	-17%	Menor productividad constructiva del sistema Tipo F.
Térmico Energético	– Capacidad térmica total (MJ/K)	34.78	18.69	+86.09%	Mayor capacidad de almacenamiento de calor en el sistema Tipo F.
	H_total (W/K)	809.3	733.5	+10.3%	Mayor transferencia térmica en condiciones estacionarias.
	Relación Capacidad térmica / H_total	0.0407	0.0262	+55%	Mejor desempeño dinámico frente a variaciones térmicas.
	Eficiencia térmica relativa	Alta	Media	—	La ganancia en inercia térmica supera ampliamente el incremento de pérdidas.
Ambiental	CO ₂ total en muros (kg)	7,092.75	11,121.44	-36%	Reducción significativa de emisiones en el sistema Tipo F.
	CO ₂ por m ² de muro (kg/m ²)	42.00	67.64	-38%	Menor impacto ambiental por unidad de superficie construida.
	CO ₂ por m ² de vivienda (kg/m ²)	43.97	68.94	-36%	Mejora ambiental a escala global del proyecto.
	Ecoeficiencia (kg CO ₂ /S/.)	0.0167	0.0284	-41%	Mayor eficiencia ambiental por unidad monetaria invertida.

Categoría	Indicador	Ladrillo Tipo F	Ladrillo KK	Diferencia	Interpretación
Técnico Constructivo	Reducción de CO ₂ por sol extra (kg/S/.)	0.98	—	—	Alta eficiencia de mitigación ambiental del sobrecosto.
	NFU valorizados (kg/vivienda)	3,201.87	0.00	+100%	Incorporación efectiva de residuos en el sistema constructivo.
	NFU por m ² (kg/m ²)	18.96	0.00	+100%	Contribución directa a la gestión de residuos urbanos.
	Peso total de ladrillos en muros (kg)	35,242.16	22,254.92	+58.36%	Mayor carga estructural que debe considerarse en diseño estructural.
	Peso por m ² de ladrillos en muro (kg/m ²)	219.68	143.07	+54%	Incremento significativo del peso propio del sistema.
Ecoeficiencia global	Consumo de unidades (und/m ²)	40	38	+5.26%	Mayor uso de material por unidad de área.
	Costo de mitigación (S./t CO ₂)	1,022.16	—	—	Costo competitivo de reducción de emisiones en construcción.
	Costo por capacidad térmica adicional (S./MJ/K)	255.93	—	—	Relación costo-beneficio favorable en términos energéticos.

Nota. Elaboración propia

A partir de los indicadores presentados, se evidencia que el uso del ladrillo tipo F genera implicancias diferenciadas en los ámbitos económico, térmico y ambiental, las cuales deben ser analizadas de manera conjunta para una adecuada evaluación de su viabilidad.

Desde el punto de vista económico, los resultados muestran que el sistema con ladrillo tipo F presenta un incremento de S/ 4,117.96 en el costo total de la vivienda, equivalente a apenas un 0.97%. Asimismo, el costo por metro cuadrado de construcción de vivienda se incrementa en solo S/ 25.53/m², y S/ 16.94/m² en el asentado de muro, lo que confirma que el impacto económico del cambio de unidad de albañilería es mínimo. Esta baja incidencia se explica porque la partida de muros portantes representa aproximadamente el 1.62% del costo

total del proyecto, por lo que variaciones en su costo unitario no afectan de manera significativa el presupuesto global.

En contraste, desde el enfoque térmico–energético, el ladrillo tipo F presenta un comportamiento más complejo. Si bien se observa un incremento en el coeficiente global de pérdidas térmicas (H_{total}) de 10.3%, lo que implica una mayor transferencia de calor en condiciones estacionarias, este efecto se ve ampliamente compensado por el incremento del 71.5% en la capacidad térmica del sistema. Este resultado indica que el ladrillo tipo F posee una mayor inercia térmica, lo que le permite almacenar y liberar calor de manera más gradual. En consecuencia, el indicador de relación entre capacidad térmica y pérdidas térmicas muestra una mejora del 55%, evidenciando un mejor desempeño dinámico frente a variaciones de temperatura.

Este comportamiento resulta particularmente relevante en el contexto climático de Arequipa, caracterizado por altas amplitudes térmicas diarias. En este tipo de clima, la inercia térmica cumple un rol fundamental en la estabilización de las condiciones interiores, reduciendo la necesidad de sistemas activos de climatización y mejorando el confort térmico de los ocupantes. Por tanto, aunque el ladrillo tipo F no optimiza el aislamiento térmico en términos de transmitancia, sí mejora el desempeño térmico global de la edificación en condiciones reales de uso.

En el ámbito ambiental, los resultados son claramente favorables para el ladrillo tipo F. Se registra una reducción del 41% en las emisiones de CO₂ asociadas a los muros portantes, lo que equivale a evitar aproximadamente 4.03 toneladas de CO₂ por vivienda. Este beneficio se refleja también en los indicadores de ecoeficiencia, donde se obtiene una reducción de 0.98 kg de CO₂ por cada sol adicional invertido, lo que evidencia una alta eficiencia en términos de mitigación ambiental. Asimismo, la incorporación de 3.20 toneladas de neumáticos fuera de

uso (NFU) por vivienda constituye un aporte significativo a la gestión de residuos sólidos y a la implementación de principios de economía circular.

No obstante, el sistema presenta ciertas desventajas técnicas que deben ser consideradas. El incremento del 54% en el peso de los muros implica una mayor carga estructural, lo que podría influir en el diseño de la cimentación y los elementos de soporte. Asimismo, se observa una menor productividad constructiva (reducción del 17% en rendimiento) y un mayor consumo de unidades por metro cuadrado, lo que incide en el costo unitario de ejecución de los muros.

A pesar de estas limitaciones, el análisis integral de los indicadores permite concluir que los beneficios térmicos y ambientales del ladrillo tipo F superan ampliamente sus desventajas económicas y constructivas. En particular, la combinación de una mejora significativa en la capacidad térmica (+86.09%) y una reducción sustancial de emisiones (-36%), frente a un incremento económico marginal (+0.97%), posiciona al ladrillo tipo F como una alternativa altamente viable desde el enfoque de la construcción sostenible.

CAPÍTULO FINAL: Evaluación de la viabilidad

Evaluación de la viabilidad del ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida

5.1 Análisis de resultados

Tabla 194.

Resultados numéricos de ensayos a ladrillos KK y de concreto del diseño F

Criterio / Ensayo		KK	F
Variación dimensional (%)	Largo	-0.740	0.115
	Ancho	-1.286	-0.321
	Alto	0.350	1.509
Peso (g)		3764.80	5491.57
% Vacíos (máx 30%)		33.680 %	11.120 %
Alabeo (mm)		0.485	0.283
Absorción (%)		12.425 %	3.577 %
Humedad (%)		0.132 %	4.577 %
Succión (< 20 g/200 cm ² /min)		34.673	10.424
Resistencia ladrillo (kg/cm ²)		162.224	131.535
Resistencia pilas (kg/cm ²)		78.279	118.174
Compresión diagonal (kg/cm ²)		10.156	8.520
Densidad (kg/m ³)		1661.41	2080.32
Capacidad calorífica (J/kg·K)		840.00	987.00
Capacidad térmica (J/K)		3162	5420
Térmica 10 °C (punto medio) (K)		293.28	291.50
Térmica 50 °C (punto medio) (K)		306.27	309.23
Térmica 1000 °C (punto medio) (K)		614.80	730.23
Flujo de calor constante (interior) (K)		298.10	498.18
Resistencia térmica idealizada (K·m ² /W)		0.267	0.247
Resistencia térmica simulada (K·m ² /W)		0.437	0.370
Precio comercial (S/ por unidad)		1.00	1.61
CO ₂ por unidad (kg)		1.78	1.05
	Fase piloto	0.00	436.03
Valorización de NFU (t/año)	Fase de expansión	0.00	2180.14
	Fase de largo plazo	0.00	4360.27

Nota. Elaboración propia

Tabla 195.

Resultados a escala de vivienda unifamiliar para ladrillos KK y diseño F

Criterio	Unidad	Ladrillo KK	Ladrillo Tipo F	Variación	Interpretación
Número de unidades	und	6,409	6,409	—	Se mantiene constante para comparación directa.
Peso total de muros	kg	22,889.52	33,421.70	+46.0%	Mayor carga estructural en el sistema Tipo F.
Peso por m ² de muro	kg/m ²	242.1	353.5	+46.0%	Incremento del peso propio de la albañilería.
Capacidad térmica total	MJ/K	19.228	32.976	+71.5%	Mayor almacenamiento de calor en muros Tipo F.
H _{total}	W/K	733.5	809.3	+10.3%	Mayor transferencia térmica en estado estacionario.
Relación Capacidad térmica / H _{total}	MJ/K por W/K	0.0262	0.0407	+55%	Mejor desempeño térmico dinámico en Tipo F.
CO ₂ total en muros	kg	11,408.02	6,726.25	-41%	Reducción significativa de emisiones.
CO ₂ por m ² de vivienda	kg/m ²	70.7	41.7	-41%	Menor impacto ambiental global.
NFU valorizados	kg	0.00	3,035.94	+100%	Incorporación de residuos al sistema constructivo.
Costo de muros	S/.	6,409.00	10,318.49	+61%	Mayor costo directo de la unidad de albañilería.
Costo total de vivienda	S/.	401,191.76	403,229.72	+0.51%	Impacto económico global mínimo.
Costo por m ²	S/./m ²	2,486.50	2,499.10	+12.60	Diferencia poco significativa por área.

Criterio	Unidad	Ladrillo KK	Ladrillo Tipo F	Variación	Interpretación	
Ecoeficiencia (kg CO ₂ /S/.)	(kg kg/S/.)	0.0284	0.0167	-41%	Mayor eficiencia ambiental del sistema Tipo F.	

Nota. Elaboración propia

5.1.1 Ensayos geométricos (variación dimensional y alabeo)

En la variación dimensional, el ladrillo de arcilla King Kong (KK) presentó desviaciones de -0.740% en largo, -1.286% en ancho y +0.350% en alto, mientras que el diseño F mostró valores de +0.115% en largo, -0.321% en ancho y +1.509% en alto. Como se había observado previamente, ambos se mantuvieron dentro de lo permitido por la norma y alcanzaron clasificación Tipo V, aunque los resultados reflejan diferencias atribuibles al método de fabricación. El ladrillo KK, al ser mecanizado, evidenció mayor regularidad dimensional, lo que favorece la alineación y el aparejo en obra. En cambio, el diseño F, fabricado de manera artesanal, mostró un mayor grado de dispersión en la altura, lo que podría complicar la nivelación de hiladas y exigir mayor precisión en el asentado.

En cuanto al alabeo, el ladrillo King Kong registró 0.485 mm, mientras que el diseño F presentó un valor de 0.283 mm, es decir, una reducción de 41.6%. Ambos resultados se encuentran muy por debajo del límite de 2 mm y cumplen con la clasificación Tipo V. Como se había señalado anteriormente, el proceso mecanizado del ladrillo de arcilla le confiere uniformidad, pero aun así mostró un alabeo mayor que el diseño F. Este último, pese a ser artesanal, resultó más estable geométricamente, lo que favorece la planicidad de las superficies y puede reducir el espesor de tarrajeo necesario.

Síntesis práctica: ambos materiales cumplen los criterios normativos de dimensionalidad y alabeo; sin embargo, mientras que el ladrillo King Kong ofrece mayor regularidad industrial, el diseño F destaca por su menor alabeo. En términos de viabilidad

geométrica, los resultados confirman que ambos pueden emplearse en obra sin inconvenientes, aunque el diseño F demuestra una ventaja en la estabilidad de sus caras, compensada por una mayor dispersión en la altura.

5.1.2 Ensayos físicos (peso, vacíos, densidad, absorción, humedad y succión)

En lo referente al peso, el ladrillo de arcilla King Kong (KK) alcanzó un valor promedio de 3764.80 g, mientras que el diseño F registró 5491.57 g, lo que representa un incremento del 45.9%. Como se había observado previamente, esta diferencia responde al menor porcentaje de vacíos del diseño F, que lo convierte en un ladrillo más compacto pero también más pesado. En términos constructivos, esto implica una mayor carga muerta en la edificación, aspecto que debe considerarse en el diseño estructural.

El porcentaje de vacíos confirmó esta diferencia: los ladrillos KK presentaron 33.68%, superando el límite máximo del 30% establecido por la norma y clasificándose como ladrillos huecos no portantes. El diseño F, en cambio, registró solo 11.12%, ubicándose ampliamente dentro del rango permitido y clasificándose como ladrillo sólido portante. Este resultado constituye una ventaja técnica relevante del diseño F, ya que confirma su aptitud normativa para muros portantes, a diferencia del ladrillo de arcilla mecanizado.

La densidad promedio también reflejó esta tendencia: 1661.41 kg/m³ en los KK frente a 2080.32 kg/m³ en el diseño F, con un aumento de 25.2%. Este mayor peso específico del diseño F refuerza su clasificación como ladrillo sólido, pero también explica la penalidad estructural en términos de masa adicional.

En cuanto a la absorción de agua, el ladrillo King Kong obtuvo 12.43%, mientras que el diseño F registró solo 3.58%. Ambos cumplen con la norma, pero el ladrillo de arcilla presenta una absorción media que favorece la adherencia con el mortero, mientras que el diseño F, como ya se había señalado, exhibe una absorción muy baja que mejora su durabilidad frente

a la humedad, pero podría comprometer la adherencia durante el asentado si no se ajustan las condiciones de obra.

El contenido de humedad mostró un comportamiento opuesto: 0.13% en los KK frente a 4.58% en el diseño F. Esta diferencia responde al curado artesanal en agua aplicado en los ladrillos de concreto, que retiene más humedad en el momento de la prueba. Si no se deja orear correctamente antes de su uso, esta condición podría afectar la calidad del asentado.

Finalmente, la succión presentó la mayor diferencia: 34.67 g/200 cm²/min en los KK frente a 10.42 g/200 cm²/min en el diseño F. El valor de los ladrillos de arcilla excede el límite de 20 g establecido en la norma, lo que obliga a humedecerlos antes de la colocación. El diseño F, en contraste, cumple con la exigencia normativa y no requiere prehumedecimiento. Sin embargo, como se había advertido anteriormente, su baja succión puede generar una adherencia deficiente con el mortero, por lo que se recomienda evaluar el uso de mezclas de pega con mayor plasticidad.

Síntesis práctica: el diseño F mostró ventajas claras frente al ladrillo King Kong en términos de clasificación normativa (sólido portante), menor porcentaje de vacíos, baja absorción y succión controlada. Estas características lo hacen un material más durable y compatible con ambientes húmedos. No obstante, su mayor peso y densidad implican un aumento en la carga muerta, y su muy baja absorción y succión podrían reducir la adherencia del mortero, lo que demanda medidas complementarias en la práctica constructiva.

5.1.3 Ensayos mecánicos (unidades, pilas y compresión diagonal)

En la resistencia a compresión de las unidades, el ladrillo King Kong alcanzó un valor promedio de 162.22 kg/cm², mientras que el diseño F obtuvo 131.54 kg/cm², lo que representa una reducción de 18.9%. Como se había señalado anteriormente, esta diferencia confirma que el ladrillo de arcilla presenta un mejor desempeño individual bajo carga axial. Sin embargo,

ambos se clasificaron como Tipo IV según la Norma E.070, lo que indica que son aptos para muros portantes.

Al evaluar la resistencia a compresión en pilas, los resultados fueron inversos: el diseño F alcanzó 118.17 kg/cm², superando en 51.0% a los ladrillos de arcilla, que registraron solo 78.28 kg/cm². Esta tendencia ya había sido observada en los ensayos previos, y se relaciona con la mayor solidez y compacidad del diseño F, que al tener menos vacíos distribuye mejor los esfuerzos en la pila. En la práctica, esto significa que el diseño F se comporta de manera más eficiente al trabajar en conjunto con el mortero, lo que refuerza su viabilidad estructural.

En el ensayo de compresión diagonal en muretes, los ladrillos de arcilla registraron un promedio de 10.16 kg/cm², mientras que el diseño F alcanzó 8.52 kg/cm², es decir, una diferencia de -16.1%. Este resultado, como se había anticipado, se debe a la mala adherencia entre el mortero y los ladrillos de concreto con caucho y perlita, consecuencia de su baja succión y absorción. Esta conclusión se evidencia en el tipo de rotura observado en los muretes de diseño F, donde la falla ocurrió siguiendo las juntas de mortero en forma escalonada, en lugar de atravesar los ladrillos, lo que confirma la debilidad de la interfaz mortero-ladrillo. En contraste, los muretes de arcilla, al presentar mayor succión, lograron una adherencia más firme, lo que explica su mejor desempeño al corte diagonal.

Síntesis práctica: los resultados mecánicos muestran un panorama complementario. El ladrillo de arcilla King Kong ofrece mayor resistencia en unidades aisladas y mejor desempeño al corte diagonal en muretes gracias a su mayor adherencia con el mortero. El diseño F, en cambio, supera ampliamente al de arcilla en la resistencia a compresión de pilas, demostrando que su menor porcentaje de vacíos internos le otorga una mejor respuesta en trabajo conjunto vertical. Ambos alcanzan clasificación Tipo IV, aunque con ventajas diferenciadas según el tipo de esfuerzo aplicado.

5.1.4 Ensayos térmicos (capacidad calorífica, capacidad térmica, simulaciones y flujo de calor)

En cuanto a la capacidad calorífica específica, el ladrillo de arcilla King Kong (KK) registró un valor de $840 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, mientras que el diseño F alcanzó $987 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, es decir, un incremento de 17.5%. Este aumento, como se había señalado previamente, se debe a la presencia de la perlita expandida en la mezcla, que mejora la capacidad del material para almacenar calor.

Al analizar la capacidad térmica total, que depende de la capacidad calorífica y de la masa del material, las diferencias fueron aún más notorias: 3162 J/K en los KK frente a 5420 J/K en el diseño F, lo que implica un incremento del 71.5 %. Este comportamiento está directamente vinculado a la geometría interna de cada ladrillo: mientras que el King Kong presenta 18 huecos distribuidos en su cara de asiento, el diseño F cuenta con solo dos aberturas de mayor tamaño, lo que incrementa significativamente la cantidad de masa sólida. Como se había observado anteriormente, esta configuración le otorga al diseño F una mayor inercia térmica, es decir, una mejor capacidad para acumular y liberar lentamente el calor.

En las simulaciones térmicas realizadas a 10°C , 50°C y 1000°C , ambos materiales mostraron respuestas similares a bajas temperaturas, con diferencias menores a 3 K. Sin embargo, a altas temperaturas (1000°C), el diseño F alcanzó un valor de 730.23 K, superior al de los KK (614.80 K), evidenciando que mantiene mejor su integridad frente a gradientes térmicos elevados. Este resultado también se relaciona con su geometría más maciza, que retrasa la propagación del calor hacia el interior.

Respecto al flujo de calor constante en condiciones interiores, el ladrillo King Kong presentó 298.10 K, mientras que el diseño F registró 498.18 K, lo que representa un incremento del 67.1%. Como se había anticipado, este comportamiento refleja tanto la menor

conductividad térmica del diseño F como su geometría sólida, que obliga al calor a atravesar una mayor cantidad de masa antes de transferirse al interior.

En cuanto a la resistencia térmica, los resultados idealizados mostraron $0.267 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ para los KK y $0.247 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ para el diseño F, mientras que en la simulación se obtuvo $0.437 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ para los KK y $0.370 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ para el diseño F. Aunque los valores de arcilla resultan ligeramente superiores debido a su mayor número de cavidades, la diferencia es reducida, y el diseño F compensa con su elevada capacidad térmica, vinculada a la solidez de su configuración geométrica.

Síntesis práctica: en el aspecto térmico, el diseño F mostró un desempeño globalmente más favorable que los ladrillos King Kong. Si bien la resistencia térmica de la arcilla es marginalmente mayor, el diseño F compensa con una capacidad calorífica y térmica muy superior, producto de su composición con perlita y de su geometría más maciza, que incrementa su inercia térmica y le permite estabilizar la temperatura interior con mayor eficiencia. Sin embargo, esta misma geometría con pocas aberturas grandes hace que la transferencia de calor sea menos uniforme. Esto abre la posibilidad de explorar, en investigaciones futuras, la incorporación de un mayor número de aberturas de menor tamaño, que permitan optimizar el equilibrio entre masa térmica y regularidad en la conducción del calor. De esta manera, se podrían conservar las ventajas térmicas del diseño F y, al mismo tiempo, mejorar su comportamiento frente a gradientes de temperatura.

5.1.5 Ensayos económico-ambientales (precio, huella de carbono y valorización de NFU)

En términos de precio comercial, los ladrillos King Kong (KK) presentaron un costo promedio de S/ 1.00 por unidad, mientras que el diseño F alcanzó S/ 1.61, es decir, un incremento de 61%. Como se había observado previamente, esta diferencia se relaciona con el mayor consumo de material por su baja proporción de vacíos, lo que incrementa tanto el peso

como el costo de fabricación. Desde el punto de vista económico, este aspecto representa una de las principales limitaciones para su adopción masiva.

Respecto a la huella de carbono por unidad, los resultados fueron opuestos: el ladrillo King Kong generó 1.78 kg CO₂/unidad, mientras que el diseño F emitió solo 1.05 kg CO₂/unidad, lo que equivale a una reducción del 41%. Este hallazgo confirma la ventaja ambiental de emplear caucho reciclado en la mezcla, que sustituye parcialmente al agregado convencional y disminuye las emisiones asociadas al proceso productivo.

La valorización de neumáticos fuera de uso (NFU) es otro aspecto clave. Durante la fase piloto, el diseño F permitiría valorizar 436.03 toneladas/año de caucho; en una fase de expansión, hasta 2180.14 toneladas/año; y en una fase de largo plazo, 4360.27 toneladas/año. Estas cifras evidencian el enorme potencial ambiental del diseño, al convertir un residuo altamente contaminante en un insumo de la construcción.

En la simulación de una vivienda unifamiliar, se estimó que el empleo del diseño F en los muros portantes implicaría el uso de aproximadamente 6409 unidades de ladrillos, lo que equivale a 280.77 kg de caucho granulado reciclado. En términos ambientales, este aporte representa una contribución tangible a la reducción de neumáticos en desuso en Arequipa, al mismo tiempo que disminuye la huella de carbono de la vivienda en comparación con el uso exclusivo de ladrillos de arcilla.

Síntesis práctica: desde el punto de vista económico, el diseño F presenta un costo unitario superior al ladrillo King Kong, lo que constituye una limitación inicial. Sin embargo, esta desventaja se compensa en el plano ambiental gracias a la reducción de CO₂ por unidad y, sobre todo, por el alto potencial de valorización de NFU, que lo convierte en una alternativa sostenible y alineada con los objetivos de economía circular. En consecuencia, la viabilidad económica del diseño F dependerá de la posibilidad de optimizar su geometría y reducir el

consumo de material, mientras que su viabilidad ambiental es incuestionable y constituye uno de sus aportes más relevantes.

5.1.6 Impacto en la vivienda unifamiliar

Para los muros portantes de la vivienda en estudio se emplean 6 755 unidades para el diseño F y 6 248 para los ladrillos convencionales tipo King Kong, manteniéndose constante la configuración arquitectónica y estructural. Con el uso del diseño F, la vivienda alcanza un peso total en muros de 35m242.16 kg, frente a 22,254.92 kg con ladrillos King Kong, lo que representa un incremento del 58.36%. Este aumento implica mayores cargas gravitacionales que deben ser consideradas en el diseño estructural; sin embargo, también contribuye a una mayor inercia térmica del sistema.

En términos térmicos, la capacidad térmica total de los muros portantes con ladrillo tipo F es de 34.78 MJ/K, lo que representa un incremento del 86.09% respecto al sistema convencional (18.69 MJ/K). Este resultado evidencia una mayor capacidad de almacenamiento de calor, favoreciendo la estabilización de la temperatura interior frente a las variaciones térmicas diarias. No obstante, el análisis del coeficiente global de pérdidas térmicas (H_{total}) muestra que la vivienda con ladrillo tipo F presenta un valor de 809,3 W/K, superior al sistema convencional (733,5 W/K), lo que indica una mayor transferencia de calor en condiciones estacionarias. A pesar de ello, la relación entre capacidad térmica y pérdidas térmicas es más favorable en el sistema tipo F, lo que confirma un mejor desempeño térmico dinámico, especialmente relevante en el clima de Arequipa, caracterizado por alta amplitud térmica.

Desde el punto de vista económico, el costo total de la vivienda con ladrillo tipo F asciende a S/ 424,015.70, mientras que con ladrillo King Kong es de S/ 419,897.74, lo que representa una diferencia de S/ 4,117.96, equivalente a un incremento del 0.97%. Este resultado demuestra que, a nivel global, el uso del ladrillo tipo F no genera un impacto económico significativo, a pesar de presentar un mayor costo unitario en la partida de muros portantes.

Asimismo, el costo por metro cuadrado de vivienda construida se incrementa en apenas S/25.53/m², lo que refuerza su viabilidad económica en el contexto de vivienda unifamiliar.

En el ámbito ambiental, el uso del ladrillo tipo F permite reducir las emisiones de CO₂ en un 36%, pasando de 11,121.44 kg a 7,092.75 kg en los muros portantes, lo que equivale a una disminución de aproximadamente 4.03 toneladas de CO₂ por vivienda. Adicionalmente, se logra la valorización de 3,201.87 kg de neumáticos fuera de uso (NFU), contribuyendo a la gestión de residuos sólidos y a la implementación de estrategias de economía circular en el sector construcción. Los indicadores de ecoeficiencia evidencian que cada sol adicional invertido permite evitar 0.98 kg de CO₂, con un costo de mitigación de S/ 1,022.16 por tonelada de CO₂, lo que refleja una relación favorable entre inversión económica y beneficio ambiental.

En conjunto, los resultados muestran que, si bien el ladrillo tipo F implica un incremento en el peso estructural y una ligera reducción en la eficiencia térmica estacionaria, estos aspectos son compensados por una mejora significativa en la capacidad térmica, una reducción sustancial de emisiones y una mínima incidencia en el costo total del proyecto. En consecuencia, el diseño F se consolida como una alternativa técnica viable, ambientalmente eficiente y energéticamente favorable para su aplicación en viviendas unifamiliares, especialmente en contextos climáticos como el de Arequipa.

5.2 Discusión sobre la viabilidad

La evaluación de la viabilidad del diseño F se realiza considerando los aspectos estructurales, térmicos, económicos y ambientales, contrastando sus resultados con los ladrillos de arcilla King Kong y con las exigencias normativas.

5.2.1 Viabilidad estructural.

La evaluación de la viabilidad estructural del diseño F se realizó a partir de los ensayos mecánicos del ladrillo y su comportamiento en elementos de albañilería.

El diseño F alcanzó la clasificación Tipo IV en resistencia a compresión, igual que el ladrillo King Kong, por lo que es apto para muros portantes según la Norma E.070. Aunque su resistencia individual (131.54 kg/cm^2) fue menor a la de la arcilla (162.22 kg/cm^2), superó al ladrillo convencional en las pruebas de pilas (+51%), confirmando su buen desempeño cuando trabaja en conjunto con el mortero. Sin embargo, la menor resistencia al corte en muretes (–16.1%) y el tipo de falla escalonada evidenciaron la necesidad de optimizar la adherencia mortero–ladrillo, lo que constituye una limitación técnica a superar. Aun con este aspecto, la viabilidad estructural se considera favorable, ya que cumple con la clasificación normativa para unidades portantes.

A nivel de aplicación en la vivienda unifamiliar, el uso del diseño F genera un incremento del peso total de la estructura del 54%, lo que implica mayores cargas gravitacionales sobre la cimentación y elementos estructurales. No obstante, este incremento se encuentra dentro de rangos manejables mediante el adecuado dimensionamiento estructural, sin comprometer la estabilidad global del sistema. En este contexto, el mayor peso se interpreta no como una limitación, sino como una condición que debe ser considerada en el diseño estructural, manteniendo la viabilidad técnica del sistema constructivo.

5.2.2 Viabilidad térmica.

El diseño F demostró un desempeño superior en términos de inercia térmica: alcanzó una capacidad térmica de 34.7 MJ/K , un 71.5% más que los ladrillos de arcilla, gracias a su composición con perlita expandida y a su geometría más maciza. Esto permite a los muros almacenar calor durante el día y liberarlo gradualmente en la noche, reduciendo la necesidad de climatización activa. Si bien la resistencia térmica de la arcilla fue marginalmente superior,

el diseño F aportó mayor estabilidad térmica interior, consolidando su viabilidad en climas como el de Arequipa, donde las variaciones de temperatura son marcadas. Se identificó, además, que la geometría con pocas aberturas grandes podría mejorarse con la incorporación de más aberturas pequeñas, buscando uniformizar la transferencia de calor.

A escala de vivienda, este comportamiento se refleja en una mayor capacidad térmica total de la envolvente (34.78 MJ/K), lo que mejora la estabilidad térmica interior frente a variaciones diurnas. Si bien el sistema con ladrillo F presenta un coeficiente global de pérdidas térmicas mayor (809.3 W/K frente a 733.5 W/K), lo que indica una mayor transferencia de calor en condiciones estacionarias, su mayor inercia térmica compensa este efecto al amortiguar las fluctuaciones térmicas. En el contexto climático de Arequipa, caracterizado por alta amplitud térmica diaria, este comportamiento resulta favorable para el confort interior, evidenciando una viabilidad térmica basada en desempeño dinámico más que en aislamiento puro.

5.2.3 Viabilidad económica.

El costo unitario del diseño F fue de S/ 1.61, un 61% más elevado que el ladrillo King Kong. Este incremento representa una desventaja en términos de costo directo del material.

Sin embargo, al evaluar su aplicación en la vivienda completa, el impacto económico se reduce significativamente: el sobre costo total asciende a S/ 4,117.96, equivalente a solo un 0.97% del costo total del proyecto. Este resultado evidencia que, aunque el ladrillo es más costoso, su incidencia en el presupuesto global es mínima.

Asimismo, el análisis de ecoeficiencia mostró que cada sol adicional invertido permite evitar 0.98 kg de CO₂ y aportar aproximadamente 0.004 MJ/K de capacidad térmica adicional, con un costo de mitigación de S/ 1,022.16 por tonelada de CO₂. En este sentido, la viabilidad económica del diseño F no se sustenta en el menor costo, sino en su eficiencia costo-beneficio en términos ambientales y energéticos.

5.2.4 Viabilidad ambiental.

El diseño F redujo en un 41% las emisiones de CO₂ por unidad en comparación con el ladrillo convencional, evidenciando un menor impacto ambiental en su proceso de fabricación.

A nivel de vivienda, esta reducción se traduce en una disminución total de 4.03 toneladas de CO₂, además de permitir la valorización de aproximadamente 3.20 toneladas de neumáticos fuera de uso (NFU). Este aporte equivale al 0.12% de la generación anual de NFU en Arequipa, y proyectado a 100 viviendas, representaría cerca del 12%, lo que evidencia un impacto significativo a escala urbana.

Estos resultados consolidan la viabilidad ambiental del diseño F, al integrar reducción de emisiones y aprovechamiento de residuos dentro de un enfoque de economía circular aplicada a la construcción.

5.3 Justificación de la viabilidad integral.

La evaluación de la viabilidad del ladrillo tipo F se complementa mediante el análisis integrado de indicadores obtenidos tanto a nivel del material como en su aplicación dentro de la vivienda unifamiliar. Este enfoque permite comprender de manera más completa el desempeño del sistema constructivo, considerando su comportamiento en condiciones controladas y su impacto real en una edificación.

A nivel del material, el ladrillo tipo F presenta un incremento significativo en su peso unitario (+46%) y en su densidad, lo que se traduce en una mayor capacidad térmica (+71.5%) respecto al ladrillo convencional. Asimismo, muestra una menor absorción y succión, lo que favorece la durabilidad y el control de la trabajabilidad en obra. En términos mecánicos, aunque la resistencia a compresión individual es menor, el comportamiento en pilas resulta superior (+51%), evidenciando una adecuada interacción con el mortero. Sin embargo, se identifican limitaciones en la resistencia al corte, asociadas a la adherencia, lo que representa un aspecto susceptible de mejora.

Desde el punto de vista económico del material, el costo unitario del ladrillo tipo F es 61% mayor que el convencional, lo que constituye una desventaja en términos de competitividad directa. No obstante, al analizar su aplicación en la vivienda, este incremento se diluye, generando un sobre costo total de S/ 4,117.96, equivalente a solo 0.97% del presupuesto total. Este resultado evidencia que el impacto económico del material no es determinante a escala del proyecto.

En el ámbito térmico, los indicadores muestran un comportamiento complementario entre ambas escalas. A nivel del material, el ladrillo tipo F presenta una menor resistencia térmica, pero una mayor capacidad de almacenamiento de calor. Esta característica se traduce, a nivel de vivienda, en un incremento del 10.3% en las pérdidas térmicas (H_{total}), pero también en una mejora del 86.09% en la capacidad térmica global de la envolvente. Como resultado, el sistema presenta una mayor inercia térmica, lo que favorece la estabilidad de la temperatura interior, especialmente en climas con alta amplitud térmica como el de Arequipa.

En términos ambientales, los beneficios son consistentes en ambas escalas. El ladrillo tipo F reduce en 41% las emisiones de CO₂ por unidad, lo que se traduce en una reducción de aproximadamente 4.03 toneladas de CO₂ por vivienda. Asimismo, permite la valorización de 3.02 toneladas de neumáticos fuera de uso (NFU), contribuyendo a la gestión sostenible de residuos. El análisis de ecoeficiencia refuerza estos resultados, indicando que cada sol adicional invertido permite evitar 0.98 kg de CO₂, lo que evidencia un alto rendimiento ambiental del sistema.

Adicionalmente, los indicadores constructivos evidencian una menor eficiencia en términos de ejecución, reflejada en un menor rendimiento de mano de obra y un mayor consumo de unidades por metro cuadrado, lo que incrementa el costo unitario de los muros. Asimismo, el incremento del peso del material genera mayores cargas estructurales, lo que debe ser considerado en el diseño de la edificación.

En conjunto, el análisis integral de los indicadores permite concluir que, aunque el ladrillo tipo F presenta desventajas en términos de costo unitario, peso y eficiencia constructiva, estas no resultan determinantes a escala de la vivienda. Por el contrario, sus ventajas en capacidad térmica, reducción de emisiones y valorización de residuos le otorgan un desempeño superior desde la perspectiva de la sostenibilidad.

En ese sentido, la viabilidad del ladrillo tipo F no debe evaluarse únicamente desde un enfoque económico inmediato, sino a partir de un análisis integral que considere su aporte energético y ambiental, así como su comportamiento en condiciones reales de aplicación. Bajo este enfoque, el diseño F se consolida como una alternativa viable para la construcción de viviendas unifamiliares en contextos como el de Arequipa, donde el confort térmico pasivo y la sostenibilidad constituyen criterios relevantes de diseño.

Tabla 196.

Síntesis de la viabilidad integral del ladrillo tipo F a nivel de material y vivienda

Criterio	Indicador	Nivel (ladrillo)	material	Nivel (vivienda)	aplicación	Interpretación integral
Estructural	Resistencia compresión	a Menor que 19%)	KK	(– Cumple portante (Tipo IV)	función	Viable estructuralmente, requiere control en diseño
	Resistencia en pilas	Mayor (+51%)		Buen desempeño en muros		Compensa menor resistencia individual
	Peso / densidad	Mayor (+46%)		Incremento de cargas estructurales		Requiere dimensionamiento adecuado
Térmico	Resistencia térmica (R)	Menor		Mayor transferencia térmica (H _{total} +10.3%)		Menor aislamiento
	Capacidad térmica	Mayor (+71.5%)		Mayor inercia térmica (34.78 MJ/K)		Mejora estabilidad térmica interior
	Comportamiento térmico	Mayor almacenamiento de calor	de	Mejor confort en clima de Arequipa		Ventaja en condiciones reales
Económico	Costo unitario	Mayor (+61%)		Incremento +0.97%	global	Impacto económico bajo
	Costo total	-		+ S/ 4,117.96		No determinante en el proyecto
	Ecoeficiencia	-		0.98 kg CO ₂ / S/.		Alta eficiencia ambiental del gasto
Ambiental	CO ₂ por unidad	Menor (–41%)		–4.03 t CO ₂ por vivienda		Reducción significativa de emisiones
	Valorización de NFU	de Presente		3.02 t por vivienda		Aporte a economía circular
	Impacto escalable	-		12% (100 viviendas)		Alto potencial urbano
Constructivo	Rendimiento	Menor		Menor productividad en obra		Desventaja operativa
	Consumo unidades	de Mayor		Mayor costo de ejecución de muros	de	Impacta costo unitario, no total

Nota. Elaboración propia

5.4 Posibles limitaciones del estudio

El presente estudio se desarrolló bajo condiciones controladas de laboratorio y mediante la modelación de un prototipo de vivienda unifamiliar, por lo que los resultados obtenidos podrían presentar variaciones en aplicaciones reales a mayor escala. En este sentido, se identifican las siguientes limitaciones:

- **Fabricación artesanal de los ladrillos:** La producción de las unidades se realizó de manera no industrializada, lo que puede generar dispersión en las dimensiones, variabilidad en el proceso de curado y diferencias en las propiedades mecánicas y físicas. A nivel de vivienda,

esta variabilidad podría influir en la uniformidad de los muros y en los rendimientos de ejecución en obra.

- **Adherencia mortero–ladrillo:** Se evidenció una menor resistencia al corte en los muretes, asociada a una limitada adherencia entre el mortero y el ladrillo tipo F. Esta condición podría afectar el comportamiento estructural de los muros en situaciones de carga lateral, por lo que se requiere profundizar en el diseño de mezclas de mortero compatibles que optimicen la interacción entre materiales en condiciones reales de construcción.

- **Mayor peso del sistema constructivo:** Incremento de cargas estructurales en la vivienda, que exige un adecuado dimensionamiento de los elementos estructurales.

- **Eficiencia constructiva:** El sistema presenta un menor rendimiento de mano de obra y un mayor consumo de unidades por metro cuadrado en comparación con el ladrillo convencional. En la aplicación en vivienda, esto puede traducirse en mayores tiempos de ejecución y costos unitarios en la partida de muros, especialmente en contextos donde la productividad es un factor determinante.

- **Costo de producción:** El costo unitario del ladrillo tipo F es superior al convencional y no incorpora aún los beneficios de economías de escala ni procesos de industrialización. Si bien su impacto en el costo total de la vivienda es reducido, su competitividad en el mercado dependerá de la optimización de los procesos productivos y de su producción a mayor escala.

- **Modelación térmica y condiciones ideales:** El análisis térmico se realizó bajo condiciones estacionarias y mediante simulación numérica, lo que no contempla completamente factores dinámicos como variaciones climáticas reales, infiltraciones de aire o comportamiento del usuario. Por ello, los resultados obtenidos a nivel de vivienda representan una aproximación del desempeño térmico, siendo recomendable su validación mediante monitoreo en edificaciones reales.

5.5 Síntesis de viabilidad

En conclusión, el diseño F es viable técnica y ambientalmente, tanto a nivel del material como en su aplicación en la vivienda unifamiliar. Si bien presenta limitaciones económicas y constructivas, estas no invalidan su aplicabilidad, ya que su impacto en el costo total del proyecto es reducido. Por el contrario, sus beneficios en capacidad térmica, reducción de emisiones y valorización de residuos evidencian un desempeño favorable desde un enfoque integral de sostenibilidad. En ese sentido, las limitaciones identificadas representan oportunidades de optimización para futuras investigaciones y para su eventual escalamiento a nivel constructivo.

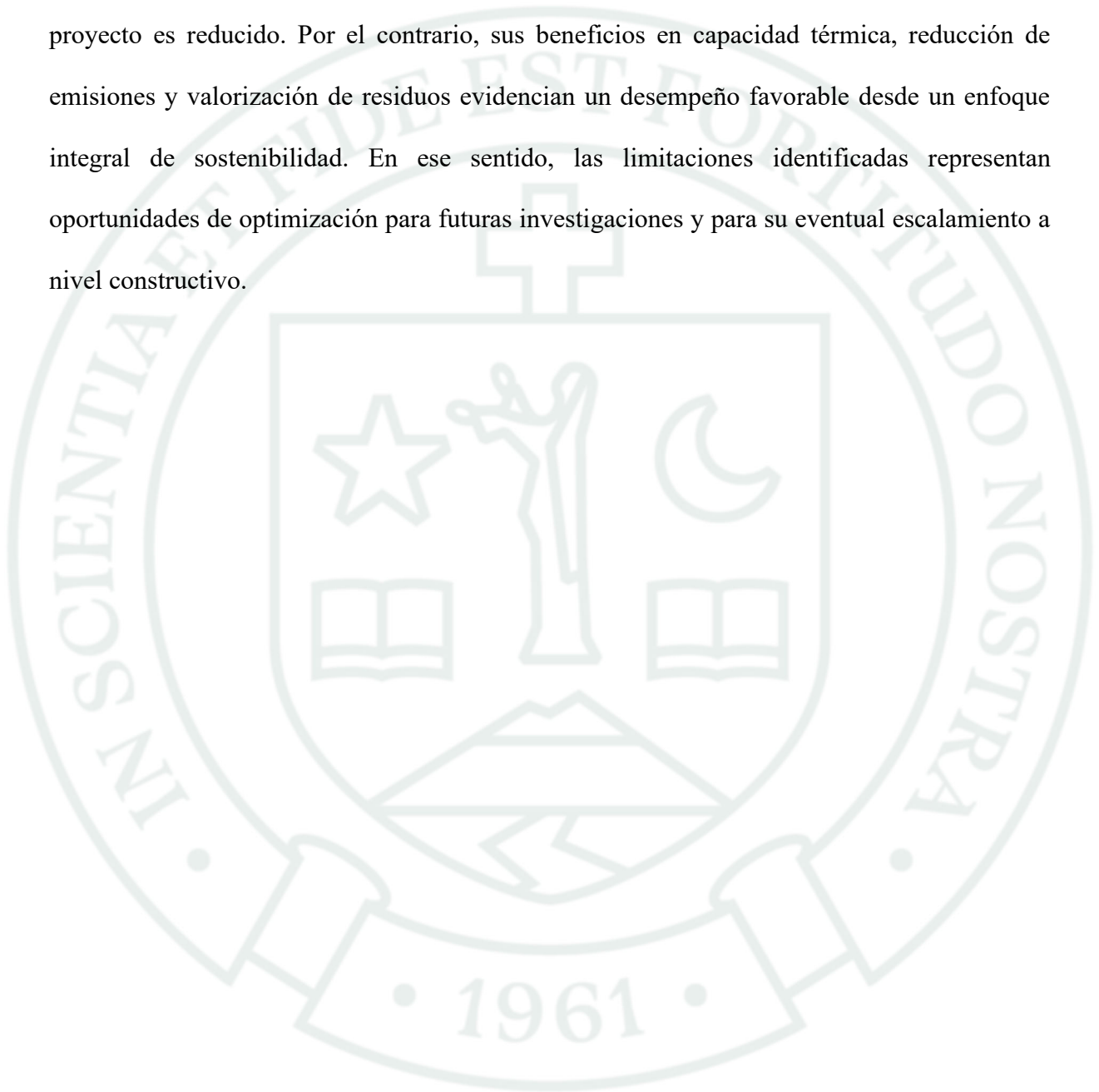
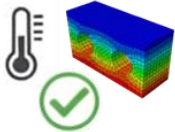


Tabla 197.

Resumen de la discusión sobre la viabilidad del diseño F

Criterio	Resultados principales	Justificación de viabilidad	Limitaciones identificadas
Estructural	- Resistencia compresión: 131.54 kg/cm² (Tipo IV). - Pilas: +51% vs KK. - Muretes: -16.1% vs KK. - Peso unitario: 5.49 kg (45.9% mayor que KK). - Vivienda: mayor carga estructural	Cumple E.070 para muros portantes. Buen desempeño en pilas. Viable con adecuado diseño estructural.	Mayor carga muerta en la vivienda. Baja adherencia mortero-ladrillo (fallas escalonadas en juntas). 
Térmico	- Capacidad térmica: 0.00542 MJ/K por unidad (+71.5% vs KK). - Mejor inercia térmica por mayor masa sólida. - Perlita y geometría maciza favorecen almacenamiento de calor. - Vivienda: 34.78 MJ/K - H_{total}: +10.3%	Mejora el confort térmico pasivo en vivienda. Desempeño favorable en clima de Arequipa.	Geometría con pocas aberturas grandes → transferencia de calor menos uniforme. 
Económico	- Costo unitario: S/ 1.61 (+61% vs KK). - Ecoeficiencia: 0.98 kg CO₂ evitados y 0.004 MJ/K adicionales por sol invertido.	Impacto económico bajo a escala de vivienda. Alta eficiencia costo-ambiental.	Precio unitario alto. Menor rendimiento constructivo. 
Ambiental	- Emisiones: 1.05 kg CO₂/unidad (-41% vs KK). - Vivienda: -4.03 t CO₂ - NFU: 3.02 t/vivienda	Reduce emisiones y promueve economía circular. Alto impacto positivo escalable.	Resultados basados en prototipo; falta validación en producción industrial. 

Nota. Elaboración propia

5.6 Contraste de hipótesis

5.6.1 Hipótesis general.

Se confirma que es posible fabricar un ladrillo de concreto con caucho reciclado y perlita expandida que resulte viable en términos físico-mecánicos, económicos y ambientales. El diseño F (10% caucho + 5% perlita) cumplió con los requisitos de la Norma E.070 en resistencia, absorción, alabeo y variación dimensional, clasificando como Tipo IV para muros portantes. A nivel térmico, presentó mayor inercia y capacidad calorífica que el ladrillo King Kong, lo que se traduce en mejor desempeño pasivo y eficiencia energética. En el plano económico-ambiental, aunque su costo unitario fue mayor (S/ 1.61 frente a S/ 1.00), redujo un 41% las emisiones de CO₂ y permitió la valorización significativa de neumáticos fuera de uso. Por tanto, la hipótesis general se valida, con la salvedad de que la viabilidad práctica requiere atender limitaciones como el mayor peso del ladrillo y su baja succión para un adecuado desempeño en obra.

5.6.2 Hipótesis específicas.

5.6.2.1 Influencia de las dosificaciones en la resistencia del concreto.

Se confirma. Los ensayos en probetas mostraron que el 5% de perlita es la dosificación clave, mejorando la compacidad de la mezcla y contrarrestando las pérdidas mecánicas del caucho. Sin embargo, el aumento de caucho redujo progresivamente la resistencia. El diseño F, pese a tener 10% de caucho, alcanzó 174.39 kg/cm² a los 28 días, solo 6.9% inferior al diseño B (186.10 kg/cm²), demostrando que la perlita permitió mantener un desempeño estructural aceptable.

5.6.2.2 Propiedades físico-mecánicas comparables a los ladrillos de arcilla.

Se valida parcialmente. El ladrillo F presentó menor resistencia unitaria (131.5 frente a 162.2 kg/cm² del King Kong), pero en pilas superó al ladrillo de arcilla (118.2 frente a 78.3 kg/cm²). En compresión diagonal fue menor (8.52 frente a 10.15 kg/cm²), lo que junto con su

baja succión evidenció limitaciones en la adherencia al mortero. No obstante, cumplió con la clasificación Tipo IV exigida para muros portantes y mostró menor absorción (3.58% frente a 12.42%), lo que le otorga mayor durabilidad.

5.6.2.3 Mejor desempeño térmico frente a los ladrillos de arcilla.

Se confirma en gran parte. El ladrillo F alcanzó mayor capacidad calorífica (987 frente a 840 J/kg·K) y capacidad térmica total (5420 frente a 3162 J/K), ofreciendo un 71.5% más de almacenamiento energético. También redujo la temperatura interna bajo flujo de calor constante en escenarios de clima cálido e incendio. Sin embargo, debido a su geometría con solo dos cavidades grandes, presentó menor resistencia térmica simulada (0.370 frente a 0.437 K·m²/W) que el King Kong con múltiples huecos pequeños, lo que resalta la influencia de la configuración geométrica en el desempeño térmico.

5.6.2.4 Costo competitivo y menor huella de carbono.

Se valida en términos ambientales, pero no en costo. El ladrillo F redujo las emisiones en un 41% (1.05 frente a 1.78 kg CO₂/unidad), valorizando hasta 4360 toneladas de NFU al año en un escenario de expansión. No obstante, su costo unitario fue 61% mayor que el King Kong. El análisis de ecoeficiencia mostró que cada sol adicional invertido representa una reducción de 1.20 kg de CO₂ y S/ 835.04 por tonelada evitada, además de un sobre costo de S/ 270.40 por MJ/K de capacidad térmica adicional, indicadores que refuerzan su eficiencia ambiental aunque con un mayor desembolso inicial.

5.6.2.5 Existencia de un diseño óptimo.

Se confirma. El diseño F emergió como la opción más equilibrada al integrar un buen desempeño físico-mecánico (Tipo IV), ventajas térmicas (mayor inercia y capacidad calorífica), y un aporte ambiental relevante mediante reducción de CO₂ y valorización de NFU. Aunque presenta limitaciones como el mayor peso y la adherencia al mortero, su balance general valida la hipótesis de que existe un diseño óptimo con potencial de implementación.

5.6.2.6 Aplicación del ladrillo óptimo en el módulo de vivienda unifamiliar.

Se confirma. La aplicación del ladrillo óptimo en el módulo de vivienda demostró su viabilidad como sistema constructivo integral. Desde el punto de vista estructural, el incremento de peso de los muros (+46%) no compromete la estabilidad de la edificación, cumpliendo con las exigencias normativas. En el ámbito térmico, aunque el sistema presenta una mayor transmitancia y un coeficiente global de pérdidas térmicas superior ($H_{total} = 809.3$ W/K frente a 733.5 W/K del sistema convencional), alcanza una mayor capacidad térmica (34.78 MJ/K, +86.09%), lo que mejora la inercia térmica y favorece el confort interior en condiciones climáticas de Arequipa.

En términos económicos, el uso del ladrillo óptimo genera un incremento de S/ 4,117.96 en el costo total de la vivienda (0.97%), evidenciando una incidencia mínima. Desde la perspectiva ambiental, permite reducir aproximadamente 4.03 t de CO₂ (-36%) en los muros portantes y valorizar 3.04 t de neumáticos fuera de uso, constituyendo un aporte relevante a la gestión de residuos. Asimismo, el análisis de ecoeficiencia indica que cada sol adicional invertido permite evitar 0.98 kg de CO₂.

En conjunto, estos resultados validan la hipótesis, demostrando que el ladrillo óptimo no solo es viable a nivel de unidad, sino también en su aplicación real en vivienda, integrando desempeño estructural, térmico, económico y ambiental.

Tabla 198.

Contraste de hipótesis

Objetivo	Resultado obtenido	Validación
General: Es posible fabricar un ladrillo con caucho reciclado y perlita expandida, viable en lo físico-mecánico, económico, ambiental y con mejor desempeño térmico que los de arcilla.	El diseño F cumplió con Norma E.070 (Tipo IV), mostró menor absorción, buen desempeño térmico (71.5% más capacidad calorífica), reducción del 41% en emisiones de CO ₂ y valorización de NFU. El costo fue mayor y presentó limitaciones en peso y adherencia.	Confirmada , con salvedades prácticas en peso y succión.
a) Dosificaciones influyen en resistencia.	5% de perlita fue clave para mejorar la compacidad; más caucho redujo resistencia. El diseño F (10% caucho + 5% perlita) mantuvo 174.39 kg/cm ² a 28 días (solo 6.9% menor que B).	Confirmada.
b) Propiedades comparables a arcilla.	Menor resistencia unitaria (131.5 vs 162.2 kg/cm ²), pero mejor en pilas (118.2 vs 78.3). En compresión diagonal fue menor (8.52 vs 10.15), evidenciando baja adherencia. Clasificó como Tipo IV y presentó menor absorción (3.58% vs 12.42%).	Parcialmente confirmada.
c) Mejor desempeño térmico.	Mayor capacidad térmica (5420 vs 3162 J/K) y mejor inercia en climas fríos, cálidos e incendio. Menor resistencia térmica simulada (0.370 vs 0.437 K·m ² /W) por geometría de cavidades.	Confirmada en gran parte , con observación de optimización geométrica.
d) Costo competitivo y menor huella.	Redujo 41% de CO ₂ (1.05 vs 1.78 kg/unidad) y valorizó hasta 4360 t NFU/año. Costo unitario mayor (S/ 1.61 vs 1.00). Ecoeficiencia: S/ 835.04/t CO ₂ evitada y 1.20 kg CO ₂ reducido por sol adicional.	Confirmada en lo ambiental , no en costo.
e) Existencia de diseño óptimo.	El diseño F integró buen desempeño mecánico (Tipo IV), mayor capacidad térmica, reducción de CO ₂ y valorización de NFU, aunque con limitaciones en peso y succión.	Confirmada.
f) Aplicación del ladrillo óptimo en vivienda unifamiliar.	El uso del ladrillo F incrementó el peso de muros (+46%), mejoró la capacidad térmica (34.78 MJ/K, +86.09%) y el confort. Presentó mayor H _{total} (809.3 vs 733.5 W/K). El sobre costo fue bajo (S/ 4,117.96; 0.97%). Redujo 4.03 t de CO ₂ (-36%) y valorizó 3.20 t de NFU.	Confirmada. Viable como sistema integral, con ventajas térmicas y ambientales y baja incidencia económica.

Nota. Elaboración propia

CONCLUSIONES

Objetivo general.

Se fabricó y evaluó un ladrillo de concreto con incorporación de caucho reciclado y perlita expandida, verificando su desempeño físico-mecánico, económico y ambiental, así como su comportamiento térmico mediante simulaciones en ABAQUS. El análisis demostró que el ladrillo F (10% caucho + 5% perlita) constituye una alternativa viable en la ciudad de Arequipa, ya que combina una resistencia estructural aceptable, mejor desempeño térmico y un impacto positivo en la reducción de emisiones de CO₂ y en la valorización de neumáticos fuera de uso (NFU).

A nivel de vivienda, el incremento de peso de los muros (+54%) no compromete la estabilidad estructural y mejora la masa térmica. Aunque el sistema presenta mayor transmitancia y un H_{total} superior (809.3 W/K frente a 733.5 W/K), alcanza una mayor capacidad térmica (34.78 MJ/K), lo que favorece la inercia térmica y el confort interior en el clima de Arequipa.

Económicamente, el uso del ladrillo óptimo incrementa el costo total en S/ 4,117.96 (0.97%), mostrando una incidencia mínima. Ambientalmente, permite reducir 4.03 t de CO₂ (–36%) y valorizar 3.20 t de neumáticos fuera de uso, con una ecoeficiencia de 0.98 kg de CO₂ evitados por sol invertido.

En conjunto, el sistema resulta técnica, ambiental y económicamente viable, con potencial de aplicación en viviendas unifamiliares sostenibles.

Objetivo específico a – Diseño y fabricación.

La fabricación de probetas permitió establecer tendencias claras en la influencia de la perlita y el caucho en las mezclas. El 5% de perlita resultó ser la dosificación clave para mejorar la compacidad y mitigar las pérdidas mecánicas por caucho, mientras que incrementos mayores de caucho redujeron significativamente la resistencia. De esta etapa se seleccionaron los

diseños A, B, F y J, siendo el diseño F el más equilibrado al mantener una resistencia característica de 174.39 kg/cm^2 en probetas y un buen potencial de valorización de NFU. La fabricación artesanal de los ladrillos fue exitosa, obteniéndose prototipos con estabilidad dimensional y geometría controlada.

Objetivo específico b – Propiedades físico-mecánicas.

Los ensayos demostraron que el ladrillo F posee menor resistencia por unidad (131.5 frente a 162.2 kg/cm^2 del KK), pero en pilas alcanzó mayor resistencia (118.2 frente a 78.3 kg/cm^2), confirmando un buen desempeño colectivo. Sin embargo, en compresión diagonal mostró menor resistencia (8.52 frente a 10.15 kg/cm^2), y el tipo de rotura escalonado evidenció problemas de adherencia, coherentes con su baja succión capilar. En lo físico, presentó menor absorción (3.58% frente a 12.42% del KK), lo que favorece su durabilidad, aunque el bajo porcentaje de vacíos (11.12% frente a 33.68%) explica su mayor peso y densidad. Estas condiciones lo hacen viable normativamente, pero imponen limitaciones prácticas en obra relacionadas con el incremento de carga muerta y la adherencia al mortero.

Objetivo específico c – Comportamiento térmico.

Las simulaciones en ABAQUS confirmaron que el ladrillo F tiene mayor inercia térmica (5420 frente a 3162 J/K), mostrando mejor desempeño en condiciones frías y cálidas, y retrasando la transferencia de calor bajo incendio. Sin embargo, la geometría influyó notablemente: con solo dos aberturas, el ladrillo F mostró menor resistencia térmica simulada (0.370 frente a $0.437 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$), mientras que el King Kong, con 18 huecos pequeños, distribuyó el calor de manera más uniforme. Esto abre la posibilidad de optimizar el diseño hacia configuraciones con más cavidades pequeñas, que mejoren tanto la resistencia térmica como el comportamiento frente al flujo de calor.

Objetivo específico d – Análisis económico y ambiental.

El costo unitario del ladrillo F (S/ 1.61) fue superior al del King Kong (S/ 1.00), pero redujo las emisiones de CO₂ en 41% (1.05 frente a 1.78 kg/unidad). Además, permite valorizar entre 436 y 4360 t/año de NFU según el nivel de implementación. El análisis de ecoeficiencia indicó que el sobre costo equivale a S/ 835.04 por tonelada de CO₂ evitada; cada sol adicional invertido representa una reducción de 1.20 kg de CO₂; y el sobre costo por capacidad térmica adicional fue de S/ 270.40 por MJ/K. Estos resultados muestran que, pese al mayor costo inicial, la propuesta es ambientalmente eficiente y energéticamente ventajosa.

Objetivo específico e – Selección del diseño óptimo.

La integración de los resultados físicos, mecánicos, térmicos, económicos y ambientales permitió concluir que el diseño F (10% caucho + 5% perlita) es el más adecuado. Aunque presenta limitaciones asociadas a su mayor peso y a la adherencia con mortero, ofrece ventajas en durabilidad, comportamiento térmico y reducción de impactos ambientales, logrando un balance técnico y sostenible que lo convierte en la opción óptima frente a otros diseños evaluados.

En síntesis, la investigación demuestra que es posible fabricar un ladrillo de concreto con caucho reciclado y perlita expandida que cumpla con los criterios de resistencia establecidos en la normativa, a la vez que aporta beneficios en términos de eficiencia térmica y sostenibilidad ambiental. Si bien su mayor peso y la baja succión representan limitaciones prácticas que requieren ajustes en diseño y mortero de asentado, el balance general evidencia que el ladrillo F constituye una alternativa técnicamente viable y ambientalmente responsable frente a los ladrillos de arcilla convencionales. Su implementación no solo contribuiría a la gestión de neumáticos fuera de uso en Arequipa, sino que también abriría un camino hacia sistemas constructivos más alineados con los principios de la economía circular y la construcción sostenible.

Objetivo específico f – Aplicación del ladrillo tipo F en módulo de vivienda

La aplicación del ladrillo óptimo en el módulo de vivienda unifamiliar demostró ser viable como sistema constructivo integral en el contexto de Arequipa. Desde el punto de vista estructural, el incremento de peso de los muros (+54%) no compromete la estabilidad de la edificación y contribuye a una mayor masa térmica. En el ámbito térmico, aunque el sistema presenta una mayor transmitancia y un coeficiente global de pérdidas térmicas superior ($H_{total} = 809.3 \text{ W/K}$ frente a 733.5 W/K del sistema convencional), alcanza una capacidad térmica significativamente mayor (34.78 MJ/K , +86.09%), lo que mejora la inercia térmica y favorece el confort interior ante variaciones térmicas diarias.

En términos económicos, el uso del ladrillo óptimo genera un incremento de S/ 4,117.96 en el costo total de la vivienda, equivalente a solo un 0.97%, evidenciando una incidencia poco significativa en el presupuesto global. Desde la perspectiva ambiental, se logra una reducción de 4.03 t de CO_2 (-36%) y la valorización de 3.20 t de neumáticos fuera de uso, lo que representa un aporte relevante a la gestión de residuos en la ciudad. Asimismo, el análisis de ecoeficiencia indica que cada sol adicional invertido permite evitar 0.98 kg de CO_2 .

En conjunto, los resultados confirman que, pese a su mayor costo unitario y menor aislamiento térmico, el ladrillo óptimo mejora el comportamiento térmico dinámico de la vivienda y presenta beneficios ambientales significativos, consolidándose como una alternativa viable desde un enfoque estructural, bioclimático, económico y ambiental.

Tabla 199.

Conclusiones por objetivo

Objetivo	Conclusión principal	Validación
General: Fabricar y evaluar la viabilidad físico-mecánica, económica y ambiental de un ladrillo de concreto con caucho reciclado y perlita expandida, con análisis de conductividad térmica mediante simulación en ABAQUS; y analizar su aplicación en un módulo de vivienda unifamiliar en la ciudad de Arequipa.	El diseño F (10% caucho + 5% perlita) resultó viable al cumplir con la Norma E.070, mostrar buen desempeño térmico, reducir CO ₂ y valorizar NFU, aunque con limitaciones en peso y adherencia.	● Viable en lo técnico, térmico y ambiental. ● Requiere mejoras prácticas en obra.



a) Diseñar y fabricar prototipos y seleccionar mezclas.

El 5% de perlita fue clave para mejorar la compacidad y mitigar pérdidas mecánicas por caucho. El diseño F, pese a su mayor contenido de caucho, alcanzó resistencias aceptables (174.39 kg/cm² en probetas). La fabricación artesanal de ladrillos fue exitosa, obteniéndose prototipos estables.

● Confirmada: mezcla óptima con balance caucho-perlita.



b) Determinar propiedades físico-mecánicas en laboratorio y compararlas con ladrillos de arcilla.

El diseño F tuvo menor resistencia unitaria que el KK (131.5 vs 162.2 kg/cm²), pero mejor en pilas (118.2 vs 78.3). Mostró menor absorción (3.58% vs 12.42%), mayor peso y densidad, y baja succión, lo que afecta adherencia. Cumplió con clasificación Tipo IV, siendo normativamente apto para muros portantes.

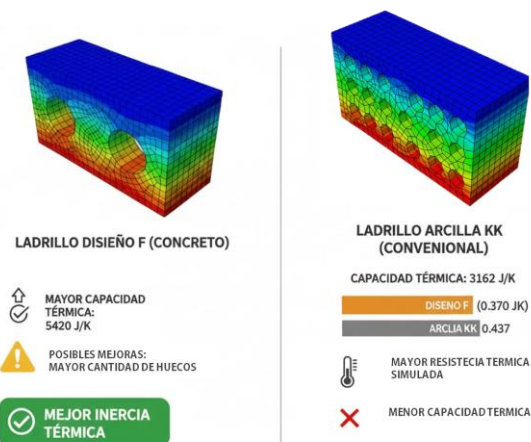
● Cumple normativamente.
● Adherencia a mejorar.
● Peso excesivo.



c) **Analizar comportamiento térmico mediante simulaciones en ABAQUS.**

El ladrillo F mostró mayor capacidad térmica (5420 vs 3162 J/K) y mejor inercia en climas fríos, cálidos e incendio. Sin embargo, tuvo menor resistencia térmica simulada (0.370 vs 0.437 K·m²/W) por su geometría de cavidades grandes, lo que sugiere explorar configuraciones con más huecos pequeños.

● Mejor inercia térmica.
● Geometría requiere optimización.



d) **Calcular costos, emisiones y reutilización de NFU.**

El costo unitario fue mayor (S/ 1.61 vs S/ 1.00), pero redujo un 41% de CO₂ (1.05 vs 1.78 kg/unidad) y valorizó hasta 4360 t de NFU/año. El análisis de ecoeficiencia mostró que cada sol adicional evitó 1.20 kg de CO₂ y que el costo de mitigación fue S/ 835.04/t CO₂.

● Ventaja ambiental y energética.
● Mayor costo inicial.



e) Seleccionar el diseño óptimo considerando desempeño integral.

El diseño F se confirmó como el más equilibrado: mecánicamente aceptable (Tipo IV), térmicamente ventajoso, ambientalmente positivo y viable a nivel normativo. Sus limitaciones (peso y adherencia) pueden mitigarse con optimización geométrica y ajustes de mortero.

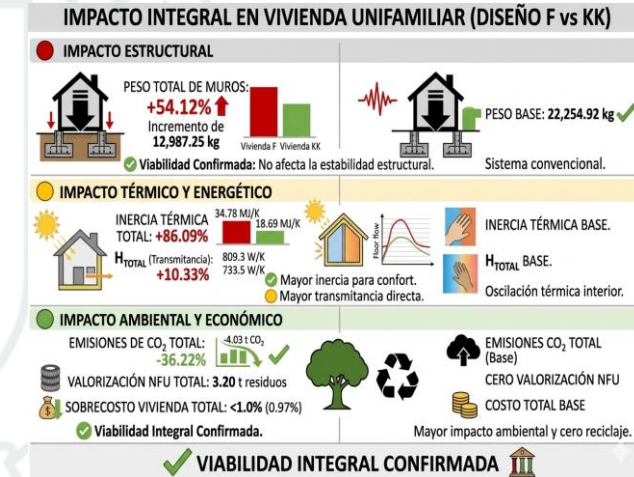
● Diseño F es el óptimo.
● Mejoras posibles en geometría y mortero.



f) Analizar el impacto de la aplicación del ladrillo óptimo en la vivienda unifamiliar.

El uso del ladrillo F incrementó el peso de muros (+54%) sin afectar la estabilidad. A nivel térmico, presentó mayor inercia (34.78 MJ/K, +86.09%), aunque mayor H_{total} (809.3 vs 733.5 W/K). El sobre costo fue bajo (0.97% del total). Ambientalmente, redujo 4.03 t de CO₂ (-36%) y valorizó 3.20 t de NFU.

● Viabilidad integral confirmada.
● Mayor transmitancia térmica.
● Incremento de peso estructural.



Nota. Elaboración propia

Reflexión crítica sobre límites y proyecciones del estudio

La viabilidad integral del ladrillo Diseño F (10% caucho + 5% perlita) se establece en el balance entre sus notables ventajas en sostenibilidad y sus limitaciones operativas, las cuales definen las proyecciones futuras de la investigación.

Límites críticos identificados.

Implicaciones estructurales del peso.

La mayor masa por unidad (45.9% más que el ladrillo King Kong) si bien aumenta la inercia térmica y la capacidad calorífica (+71.5%), conlleva un incremento en la carga muerta de la estructura. Este límite exige una revisión de los parámetros de diseño estructural y la optimización geométrica para aligerar la unidad.

Desafío en la adherencia y succión.

La baja succión del ladrillo es un límite crítico en obra, que se reflejó en una menor resistencia a la compresión diagonal en los muretes. Este fenómeno compromete la durabilidad y la respuesta sísmica del sistema de albañilería confinada, y no puede ser ignorado, haciendo imperativa la adaptación del mortero de asentado.

Competitividad económica.

El mayor costo unitario inicial (S/ 1.61 vs S/ 1.00) limita la competitividad del ladrillo en el mercado local tradicional.

Implicaciones a nivel de vivienda

La aplicación del ladrillo Diseño F en la vivienda evidenció que el incremento de peso de los muros (+54%) no compromete la estabilidad estructural, pero sí influye en el dimensionamiento global de la edificación. Asimismo, aunque el sistema presentó una mayor transmitancia térmica (H_{total} superior), la capacidad térmica de la envolvente fue significativamente mayor (+86.09%), lo que mejora la inercia térmica y el confort interior.

En el ámbito económico, el sobrecosto representó solo el 0.97% del costo total de la vivienda, evidenciando una incidencia reducida a escala real.

Proyecciones de la investigación

Impulso a la economía circular

La proyección más significativa es la potencial valorización de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) en Arequipa, con una capacidad de reutilización de hasta 4,360 t/año. Esto convierte la investigación en una propuesta tangible de gestión de residuos y fomento de la economía circular.

Eficiencia energética y ecoeficiencia.

El ladrillo proyecta un camino hacia una construcción más eficiente, demostrando una reducción del 41% en la huella de CO₂ y un mejor desempeño térmico. La métrica de ecoeficiencia demostró que cada sol invertido de más evita 1.20 kg de CO₂, justificando el sobrecosto desde una perspectiva ambiental.

A nivel de vivienda, estos beneficios se traducen en una mejora del comportamiento térmico dinámico de la edificación, con potencial reducción en la demanda energética a largo plazo.

Líneas de investigación futura.

El estudio sienta las bases para futuras líneas de trabajo enfocadas en:

- **Optimización geométrica:** Explorar diseños con más perforaciones y cavidades más pequeñas para mejorar la resistencia térmica simulada y reducir el peso.
- **Escalabilidad industrial:** Investigaciones sobre la escalabilidad de la producción para alcanzar economías de escala que reduzcan el costo unitario, mejorando su posición en el mercado.
- **Durabilidad:** Realizar ensayos a largo plazo sobre durabilidad y resistencia a agentes químicos, esenciales para la adopción normativa definitiva.

RECOMENDACIONES

Optimización de la mezcla

- Mantener proporciones moderadas de caucho reciclado ($\leq 5\%$) y perlita expandida ($\approx 5\%$), ya que esta combinación (diseño B) evidenció el mejor equilibrio entre resistencia y desempeño térmico.
- Evitar incrementos excesivos de caucho ($> 10\%$), dado que generan pérdidas significativas de resistencia a compresión.
- Explorar la incorporación de aditivos o fibras que mejoren la adherencia entre la matriz cementicia y las partículas de caucho, reduciendo el efecto negativo en la resistencia mecánica.

Mejoras en diseño geométrico y fabricación

- Rediseñar el molde incorporando mayor número de vacíos pequeños y distribuidos uniformemente, en lugar de dos perforaciones grandes, para reducir el peso de la unidad sin superar el límite del 30% de vacíos establecido por la norma.
- Implementar procesos que mejoren la regularidad dimensional y superficial (control de curado, vibrado mecánico, ajustes en el desmolde) con el fin de reducir la variabilidad artesanal observada.
- Ensayar tratamientos de superficie rugosa o texturizada en los ladrillos para favorecer la adherencia mortero–unidad, considerando que la baja succión y las fallas escalonadas en muretes evidenciaron deficiencias en este aspecto.

Aplicaciones alternativas

- En caso de que no se optimice la adherencia y el exceso de peso siga siendo una limitación, el ladrillo con caucho y perlita puede emplearse en muros no

portantes, tabiques, cerramientos o aplicaciones de aislamiento térmico y acústico, aprovechando sus beneficios ambientales y de eficiencia energética.

- Su uso también es pertinente en obras de infraestructura ligera o mobiliario urbano, donde el desempeño estructural no sea crítico, pero sí lo sean la durabilidad, la ecoeficiencia y la reducción de impacto ambiental.

Validaciones experimentales complementarias

- Ampliar los estudios de comportamiento térmico experimental, complementando las simulaciones con pruebas en cámaras térmicas que reproduzcan condiciones reales de temperatura y flujo de calor.
- Dada la baja succión capilar registrada para el diseño óptimo F (10.42 g/200 cm²/min) frente al ladrillo de arcilla de referencia (34.67 g/200 cm²/min), que se correlacionó con la menor resistencia a la compresión diagonal en muretes, se establece como recomendación técnica prioritaria la optimización de la adherencia en la junta de albañilería.
 - **Ensayos de Adherencia:** Se recomienda la realización de ensayos de adherencia directos (por ejemplo, el ensayo de adherencia directa y cortante) entre el ladrillo del diseño F y diferentes formulaciones de mortero de asentado. Esto validará el desempeño estructural de la junta, complementando el ensayo de compresión diagonal.
 - **Incorporación de aditivos adherentes:** Para compensar la baja succión del ladrillo, se debe investigar la incorporación de aditivos poliméricos adherentes (como el PVA o látex) o aditivos retenedores de agua en la mezcla de mortero. Estos aditivos buscarían mejorar la plasticidad y la humectación de la superficie del ladrillo durante el asentado, asegurando

una transferencia de esfuerzos adecuada y mitigando el riesgo de fallas escalonadas.

Proyección ambiental y económica

- Profundizar en la valorización de neumáticos fuera de uso (NFU), evaluando la capacidad de integrar progresivamente porcentajes mayores de caucho sin comprometer el desempeño mecánico.
- Explorar modelos de producción a escala industrial que reduzcan los costos unitarios (hoy superiores a los ladrillos de arcilla), aprovechando economías de escala y procesos mecanizados.

Evaluación a escala real de vivienda

- Realizar monitoreo térmico en viviendas piloto construidas con el ladrillo Diseño F, a fin de validar en condiciones reales los resultados obtenidos mediante simulación y análisis teórico.

REFERENCIAS

- Al-Salami, H. H. A. (2018). Mechanical and thermal properties of insulating cement mortar with perlite and rubber. [Trabajo de grado o investigación].*
- American Concrete Institute (ACI). (s.f.). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318). ACI.*
- American Concrete Institute (ACI). (2021). Guías prácticas para la dosificación del concreto (ACI 211.1-21).*
- American Concrete Institute (ACI) Committee 211. (2009). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-09). ACI.*
- ASHRAE. (2017). ASHRAE Handbook – Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.*
- ASTM International. (2019). Standard Test Method for Density, Air Content, and Yield of Concrete Containing Lightweight Aggregate (ASTM C567-19).*
- ASTM International. (2020). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete (ASTM C143-20).*
- Bathe, K. J. (2021). Finite Element Procedures (2nd ed.). Bathe Publishing.*
- Cabanillas, E. (2017). Comportamiento físico mecánico del concreto hidráulico adicionado con caucho reciclado. [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.*
- Castillo, R., López, J., & Medina, A. (2020). Durabilidad de concretos con adiciones minerales en ambientes agresivos. Revista de Ingeniería Civil, 18(2), 55–67. <https://doi.org/10.21041/ric.v18i2.345>*
- Cementos Yura. (2021). Ficha Técnica Cemento Yura.*
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones (5.ª ed.). McGraw-Hill.*
- Dassault Systèmes. (2017). Abaqus 2017: Analysis user's guide. Dassault Systèmes.*

- Dassault Systèmes. (2023). *ABAQUS Unified FEA User's Manual*. Dassault Systèmes SIMULIA Corp.
- fib. (2021). *Model Code 2020 for Concrete Structures*. International Federation for Structural Concrete.
- García, L., Muñoz, P., & Salazar, D. (2023). Propiedades mecánicas y térmicas de bloques de concreto con agregados reciclados. *Journal of Sustainable Construction Materials*, 12(1), 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.jscm.2023.01.005>
- Goñas, R., & Saavedra, G. (2020). *Determinación del uso de caucho de llantas y concreto reciclado en la fabricación de bloques de concreto B12*, Lima 2019. [Tesis de pregrado]. Universidad César Vallejo de Lima, Perú.
- Gutiérrez, H., Morales, C., & Díaz, L. (2022). Propiedades físico-mecánicas de concretos con sustitución parcial de agregados por caucho reciclado. *Revista Colombiana de Materiales*, 15(1), 45–59. <https://doi.org/10.22335/rcm.v15i1.1203>
- Guzmán, Y., & Guzmán, L. (2015). *Sustitución de agregados por fibras de caucho de neumáticos reciclados en la obtención de la patente estructural en Chimbote-2015*. [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional del Santa de Chimbote, Perú.
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2021). *Fundamentals of heat and mass transfer* (8th ed.). Wiley.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2017). *Manual de acondicionamiento térmico y eficiencia energética en edificaciones*.
- Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2018). *NTP 334.051:2018. Concreto. Método de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*. Lima, Perú: INACAL.

- ISO 10077-1. (2017). *Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance*. International Organization for Standardization.
- Jiménez, A., Vega, M., & Cárdenas, F. (2021). Evaluación ambiental comparativa de unidades de albañilería: concreto vs. arcilla. *Revista Latinoamericana de Construcción Sostenible*, 9(3), 22–35. <https://doi.org/10.1016/j.rlcs.2021.09.004>
- Koksai, F., Gencel, O., & Kaya, M. (2015). Properties of perlite and rubber powder added cement-based composites. *Journal of Engineering and Applied Sciences*.
- Linares, A. (2016). *Proyecto de implementación de un horno Hoffman y un secador artificial para atender la demanda de la región Arequipa por la ladrillera el diamante SAC “LADISAC”*. [Tesis de pregrado]. Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú.
- López, A., Fernández, J., & Vega, P. (2024). Análisis de concretos ligeros con mezclas de caucho reciclado y perlita expandida. *Journal of Sustainable Building Materials*, 14(2), 78–92. <https://doi.org/10.1016/j.jsbm.2024.02.008>
- Martínez, J., Ortega, R., & Villanueva, E. (2020). Caracterización de la perlita expandida para aplicaciones en construcción. *Revista de Ciencias de la Tierra*, 10(3), 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.rct.2020.03.005>
- Martínez-Barrera, D., Gencel, O., & Kaya, M. (2013). Thermal and mechanical properties of cement-based composites with rubber waste and expanded perlite. *Journal of Cleaner Production*.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2022). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2014). *VI Informe Anual de Residuos Sólidos Municipales y No Municipales 2013*.

- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2016). *Atlas Solar del Perú*. Dirección General de Eficiencia Energética. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/atlas-solar-del-peru>
- Ministerio del Ambiente (MINAM) & GTZ. (2009). *Guía para el diseño bioclimático en edificaciones en el Perú*. Lima: Proyecto Energía.
- Ministerio de Energía y Minas (MINEM). (2023). *Anuario Estadístico de Electricidad 2023*. Plataforma del Estado Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/6411602-anuario-estadistico-de-electricidad-2023>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS). (2006). *Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma Técnica E.070: Albañilería*. Lima, Perú: MVCS.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú (MVCS). (2015). *Guía de eficiencia energética en la edificación*. Lima: MVCS.
- Neville, A. M. (2012). *Properties of Concrete (5th ed.)*. John Wiley & Sons.
- Niño Hernández, G. E. (2010). *Manual de tecnología del concreto*.
- Norma Técnica Peruana. (2013). NTP 400.022: *Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino*.
- Norma Técnica Peruana. (2015). NTP 339.034: *Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas*.
- Norma Técnica Peruana. (2016). NTP 334.009: *Cemento Portland. Requisitos*.
- Norma Técnica Peruana. (2016). NTP 399.601: *Unidades de albañilería de concreto. Definiciones, clasificación y requisitos*.
- Norma Técnica Peruana. (2017). NTP 399.613: *Ladrillos de arcilla usados en albañilería. Métodos de muestreo y ensayo*.
- Norma Técnica Peruana. (2018). NTP 339.185: *Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado*.

- Norma Técnica Peruana. (2018). NTP 399.605: Mampostería. Método de ensayo para determinar la resistencia a compresión de pilas de albañilería.
- Norma Técnica Peruana. (2018). NTP 400.012: Agregados. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global.
- Norma Técnica Peruana. (2018). NTP 400.021: Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso.
- Norma Técnica Peruana. (2018). NTP 400.037: Agregados para concreto. Especificación normalizada para agregados en concreto.
- Norma Técnica Peruana. (2020). NTP 400.017: Método de ensayo para determinar la masa por unidad de volumen o densidad ("Peso Unitario") y los vacíos en los agregados.
- Norma Técnica Peruana. (2021). NTP 339.034: Diseño y elaboración de mezclas de concreto.
- Pérez, J., & Arrieta, Y. (2017). Estudio para caracterizar una mezcla de concreto con caucho reciclado en un 5% en peso comparado con una mezcla de concreto tradicional. [Tesis de pregrado]. Bogotá, Colombia.
- Pérez, M., Salinas, F., & Andrade, J. (2022). Transferencia de calor en materiales de construcción: análisis y tendencias. *Ingeniería Térmica Aplicada*, 12(1), 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.ita.2022.01.004>
- Pérez, M., Salinas, F., & Andrade, J. (2023). Influencia de agregados de caucho reciclado en el comportamiento mecánico de concretos estructurales. *Materiales de Construcción Sostenible*, 8(4), 112–126. <https://doi.org/10.1016/j.mcs.2023.04.007>
- Ríos, V., Campos, A., & Morales, H. (2021). Aplicaciones del caucho reciclado en unidades de albañilería. *Ingeniería y Construcción*, 27(2), 55–70. <https://doi.org/10.1016/j.iyc.2021.06.004>
- Rivva, E. (2014). *Diseño de Mezclas* (2da ed., Vol. 2).

- Rodríguez, F., Silva, P., & Torres, M. (2021). *Gestión de neumáticos fuera de uso: panorama y alternativas en América Latina*. *Revista Ambiental*, 19(1), 66–81. <https://doi.org/10.1016/j.ramb.2021.01.004>
- Rodríguez, R., & Pérez, C. (2017). *Metodología de la investigación: El proceso y sus técnicas* (6.ª ed.). Editorial Trillas.
- Santos, D., Herrera, J., & Núñez, L. (2022). *Evaluación del concreto ligero con perlita expandida: propiedades mecánicas y térmicas*. *Revista Internacional de Construcción Sustentable*, 6(1), 23–37. <https://doi.org/10.1016/j.rics.2022.01.003>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2020). *Datos climatológicos de la estación Arequipa – La Pampilla (Código OMM 84628)*. Dirección de Climatología, Lima. <https://www.senamhi.gob.pe>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2022). *Resumen de datos meteorológicos y radiación solar para Arequipa*. Dirección de Climatología, Lima.
- Siddique, R., & Naik, T. R. (2004). *Properties of concrete containing scrap tire rubber—An overview*. *Waste Management*.
- Simulación térmica en ABAQUS*. (2025). *Capítulo IV – Resultados térmicos de ladrillos tipo F y KK*.
- Thomas, B. S., & Gupta, R. (2016). *Properties of lightweight concrete containing expanded perlite*. *Construction and Building Materials*.
- Torres, J., & Ramos, P. (2022). *Análisis comparativo de resistencia en ladrillos de concreto y arcilla en el contexto peruano*. *Revista Peruana de Ingeniería y Materiales*, 14(2), 87–98.

ANEXOS

Anexo 1. Constancia de ensayos en laboratorio



ROBERTO CACERES FLORES S.R.L.
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO ISO/IEC 17025
ASESORÍA, CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD EN OBRAS CIVILES

CONSTANCIA

El que suscribe, **Ing. Roberto Cáceres Flores**, gerente del Laboratorio de Suelos y Concretos ROBERTO CACERES FLORES S.R.L., ubicado en la Calle Palomar 107 B-3B Arequipa,

HACE CONSTAR
Que los bachilleres en Arquitectura:

YANELA YANIRA FLORES TICONA, DNI 70428466
ROMARIO BOLAÑOS RADO, DNI 76627405

Han realizado los ensayos en el Laboratorio de Concreto con el propósito de complementar su trabajo de tesis, para optar el título de Arquitecto, con la tesis denominada: **"EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD FÍSICO-MECÁNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE UN LADRILLO DE CONCRETO CON CAUCHO RECICLADO Y PERLITA EXPANDIDA, CON ANÁLISIS DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA MEDIANTE SIMULACIÓN EN ABAQUS, EN LA CIUDAD DE AREQUIPA"**

Los ensayos realizados por las tesisistas fueron en agregados, concreto y unidades de albañilería de arcilla y concreto-con caucho y perlita.

Dichos ensayos fueron efectuados en las instalaciones del Laboratorio R.C.F., entre el 08 de septiembre del 2021 hasta el 19 de mayo del 2022.

Se expide la presente constancia a solicitud de los interesados para los fines que se estime conveniente.

Arequipa, 23 de mayo del 2022

ROBERTO CACERES FLORES S.R.L.


Ing. Roberto Cáceres Flores
GERENTE GENERAL

Laboratorio : Calle El Palomar N° 107 Lote B-3B - Arequipa (detrás del Mercado El Palomar) - Móvil RPM + 414895 - RPC: 955781874
Telf. (054) 214163 - E-mail: laboratorio@rcflaboratorio.com - spc_laboratorio@hotmail.com - Atte. 8:00 a 1:00 pm y 1:30 a 5:00 pm

Anexos 2-17. Informes de laboratorio

Link:

<https://www.dropbox.com/scl/fo/velknsdimievbk3x2y1jj/ANPqi4OL9uHFIPGk6w5YVGA?rlkey=hb1jktqh2q165alcdfebooib1&st=34v0eqtv&dl=0>



Anexo 18. Planos del módulo de vivienda unifamiliar

Link:

<https://www.dropbox.com/scl/fo/y6j6ukl2bnnccdmxq1reg/AEz0pWuAm81fpSEjwyTkxso?rlkey=17q9fud9xuphjob68viyo8mqc&st=oj8oeckw&dl=0>



Anexo 19. Registros fotográficos

Link:

<https://www.dropbox.com/scl/fo/86o99u9qmttvin3137tfm/AKyHcC82HWhy8Jc0A2bMgeI?rlkey=uvn7w8wj73m1h6y3ur58wioah&st=a4npx3ym&dl=0>

